



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE  
SAN NICOLÁS DE HIDALGO



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA  
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO  
DOCTORADO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA MECÁNICA.

**“ANÁLISIS DEL REGISTRO Y REGULACIÓN DE  
VIBRACIONES DINÁMICAS MEDIANTE MODIFICACIONES  
DEL SOPORTE EN EL TURBO GENERADOR EN  
PLANTA DE BAJA ENTALPÍA”**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE DOCTOR EN CIENCIAS CON ESPECIALIDAD EN DISEÑO  
MECÁNICO Y MATERIALES.

PRESENTA:

**M.C. CARLOS MANUEL SÁNCHEZ GONZÁLEZ**

ASESOR:

**DR. JUAN FELIPE SORIANO PEÑA**

COASESOR:

**DR. J. JESÚS PACHECO IBARRA.**

MORELIA , MICHOACÁN SEPTIEMBRE 2020

## CONTENIDO

<b>RESUMEN</b> .....	5
<b>ABSTRACT</b>	
<b>JUSTIFICACIÓN</b> .....	6
<b>HIPÓTESIS</b>	
<b>OBJETIVOS</b> .....	7
<ul style="list-style-type: none"> <li>• GENERAL</li> <li>• ESPECÍFICOS</li> </ul>	
<b>CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN</b>	
Introducción.....	8
1.1 Conceptos de vibraciones mecánicas.....	10
1.1.1 Movimiento armónico simple.	
1.1.2 Movimiento periódico.	
1.1.3 Sobre posición de ondas.	
1.1.4 Aspectos energéticos de la onda.	
1.1.5 Dos componentes armónicos en dirección perpendicular. ....	11
1.2 Parámetros de vibraciones mecánicas.	
1.2.1 Sistemas de diagnóstico y predicción.....	13
1.3 Normativa vigente para vibraciones en máquinas rotativas.	
1.4 Sensores de vibraciones.....	14
1.4.1 Piezoresistivos	
1.4.2 Piezoeléctricos.	
1.4.3 Inductivos.	
1.4.4 Ópticos.	
1.5 Procesamiento de señales en LABVIEW.....	15
1.5.1 Acondicionadores de señales.....	17
1.5.2 Puente Wheatstone.....	18
1.5.3 Filtrado analógico y digital.	
1.5.4 Valores de los parámetros de vibraciones.....	19
1.5.5 Espectro de la frecuencia (FFT).	
1.6 Control y regulación de vibraciones mecánicas.....	20
1.6.1 Reducción de la carga dinámica.	
1.6.2 Aplicación de amortiguamiento.....	21
1.6.3 Aislamiento de vibraciones.	
1.6.4 Absorber dinámico.	
1.6.5 Eliminador activo de vibraciones.....	22
1.6.6 Eliminador sincrónico.	
1.7 Clasificación de los plásticos comerciales.....	23
1.7.1 Elastómeros usados en aisladores de vibraciones.....	25
1.7.2 Compuestos flexibles RTV y fibras de carbono molidas FCM.....	26
1.7.3 Composición de los elastómeros de silicona RTV.	
1.8 Micro fibras molidas FMC y grafito comercial.....	27
1.8.1 La micro-interfase (MI) de un compuesto flexible RTV piezoresistivo.	

**CAPÍTULO 2- ANTECEDENTES**

1. Antecedentes de análisis de vibraciones.....	30
2. Antecedentes de materiales flexibles aisladores de vibraciones.....	48

**CAPÍTULO 3- TRABAJO EXPERIMENTAL Y RESULTADOS**

3.1.- Sistema experimental.....	60
3.2.- Análisis de vibraciones en un sistema de rodamientos de bolas.	
3.3.- Desarrollo de un soporte para máquinas rotativas.....	63
3.4.- Fabricación y caracterización de un compuesto flexible piezoresistivo.....	65
3.4.1.- Diseño del compuesto flexible piezoresistivo.	
3.4.2.- Análisis de microscopia electrónica de barrido (MEB).	
3.4.3.- Análisis de difracción de rayos X (DRX).....	67
3.4.4.- Ensayos mecánico a compresión y piezoresistividad.....	68
3.4.5.- Ensayo de espectroscopia de impedancias.....	72
3.4.6.- Ensayo mecánico-eléctrico, espectroscopia de impedancia vibratoria.....	74
3.4.7.- Eficiencia mecánica vibratoria del compuesto y frecuencia de resonancia.....	77
3.4.8.- El calor específico del compuesto flexible.....	78
3.4.9.- Ensayo de dilatación lineal térmica y conductividad térmica.....	79
3.4.10.- Dilatación térmica y la estabilidad por el efecto Joule.....	82
3.4.11.- Distribución y orientación de las fibras de carbono molidas en la matriz.....	84
3.4.12.- Variación de la conductividad eléctrica y térmica por efecto Joule.	
3.4.13.- Distribución de partículas usando fotografías de rayos X y termografía IR.....	85
3.4.14.- Radiografías de Rayos X-3D.....	87

**CAPÍTULO 4- ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS**

ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	91
4.- Propiedades micro-estructurales.	
4.2.- Propiedades mecánicas y eléctricas.....	93
4.3.- Propiedades termo-físicas.....	94
4.4.- Circuito equivalente del compuesto flexible.	
4.4.1.- El modelo equivalente del compuesto flexible propuesto.	
4.4.2.- Impedancia eléctrica $Z_e$ .....	95
4.4.3.- La resistencia $R\Omega$ .	
4.4.4.- La capacitancia $C_e$ .	
4.4.5.- La inductancia $L_e$ .	
4.5.- Micro-interfases del compuesto flexible.....	96
4.5.1.- Impedancia equivalente asociada a parámetros mecánicos $Z_m$ .	
4.5.2.- Principio de conservación de la energía.....	97
4.6.- La Impedancia equivalente total o de terminales $Z_t$ .	
4.6.1.- Efecto de los cambios de temperatura en la impedancia $Z_T$ .....	98
4.7.- Estudio físico de las vibraciones en los apoyos mecánicos (Soporte).	
4.7.1.- Experimentación de las vibraciones en el laboratorio de un conjunto de máquinas rotativas.....	99
4.7.2.- Fabricación del soporte aislador de vibraciones con el compuesto flexible.	
4.8.- Propuesta de un nuevo apoyo de metal y compuesto elástico de silicona conductora.....	101
4.8.1.- Propuesta del método para la adquisición de datos.....	102
4.8.2.- Adquisición de datos en un ensayo de laboratorio.....	103
4.8.3.- Evaluación y discusión de los resultados obtenidos en el soporte modificado.	

**CONCLUSIONES .....108**  
**APORTACIONES.....109**  
**TRABAJOS A FUTURO**  
**REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....110**  
**LISTA DE FIGURAS.....115**  
**LISTA DE TABLAS.....118**  
**ANEXO.....119**

**RESUMEN.**

Este trabajo estuvo orientado al desarrollo de software para la adquisición y análisis de las vibraciones mecánicas en un conjunto de máquinas rotativas y contempla la instrumentación virtual para procesar las señales provenientes de los sensores de vibraciones colocadas en puntos estratégicos y de interés en las máquinas, además del diseño de soportes que contribuyen a la regulación de las vibraciones mecánicas. Los aspectos relevantes son: la obtención de los parámetros vibratorios referidos a las normas vigentes tales como la magnitud y contenido armónico de las señales de las ondas vibratorias, Aceleración, Velocidad, el valor de Desplazamiento y la comparación de estas magnitudes con los criterios que establece la norma vigente ISO10816. Para lo cual se realizó un análisis de las magnitudes de estos parámetros. El otro aspecto fue la modificación del acoplamiento elástico entre el conjunto de máquinas mediante un soporte fabricado con un compuesto flexible para aislar las vibraciones que se transfieren a la cimentación y otros componentes asociados. Para lograrlo se diseñó y fabricó un compuesto flexible basado en silicona comercial, usando fibras de carbono molidas para construir el soporte aislador con sensibilidad a vibraciones en un ancho de banda amplio. Los acelerómetros piezoeléctricos comerciales tienen un alto costo y el rango de sensibilidad a la frecuencia estrecho. El análisis contempló también el desarrollo de un programa de computo y circuitos necesarios para registrar los parámetros de vibraciones y posteriormente realizar un análisis de su estado operativo. A la silicona usada RTV (Room Temperature Vulcanized), se le adicionó fibras de carbón molido FCM micrométricas, que le otorgó al soporte propiedades piezoresistivas, buena respuesta a la variaciones y sensibilidad en rango de 5 a 300 Hz. Se aportó también el desarrollo tecnológico de un software para la adquisición de la señal producida por el soporte piezoresistivo, la instrumentación y el registro de los parámetros de vibración mecánicas en tiempo real in situ, mediante el uso de instrumentación virtual obteniendo un sistema de tecnología de punta, ergonómico, integrado y adaptable a la problemática, con aislamiento de las vibraciones útiles para la regulación y el registro de parámetros utilizados en los programas de mantenimiento predictivo y correctivo en plantas con conjuntos de máquinas rotativas como el caso de motor-generator o turbina-generator. Una solución simple, económico y con nivel tecnológico competitivo respecto a sistemas existentes en el mercado, apegado a las normas vigentes.

**Palabras clave:** adquisición, conjunto de máquinas, instrumentación virtual, sensor de vibraciones, normas vigentes, armónicos, parámetros de vibraciones, compuesto flexible, piezoresistivas, aislamiento.

**ABSTRACT.**

This work was aimed at developing software for the acquisition and analysis of mechanical vibrations in a set of rotating machines and includes virtual instrumentation to process the signals from vibration sensors placed at strategic points of interest in the machines, in addition of the design of supports that contribute to the regulation of mechanical vibrations. The relevant aspects are: obtaining the vibratory parameters referred to the current standards such as the magnitude and harmonic content of the vibration wave signals, Acceleration, Speed, the Displacement value and the comparison of these magnitudes with the criteria that establishes the current standard ISO10816. For which an analysis of the magnitudes of these parameters was carried out. The other aspect was the modification of the elastic coupling between the set of machines by means of a support made of a flexible compound to isolate the vibrations that are transferred to the foundation and other associated components. To achieve this, a flexible commercial silicone-based composite was designed and manufactured, using ground carbon fibers to build the isolating support with sensitivity to vibrations in a wide bandwidth. Commercial piezoelectric accelerometers have a high cost and a narrow frequency sensitivity range. The analysis also contemplated the development of a computer program and circuits necessary to record the vibration parameters and subsequently carry out an analysis of their operational status. To the RTV (Room Temperature Vulcanized) silicone used, micrometric FCM

ground carbon fibers were added, which gave the support piezoresistive properties, good response to variations and sensitivity in the range from 5 to 300 Hz. Another contribution was the technological development of a software for the acquisition of the signal produced by the piezoresistive support, the instrumentation and the recording of the mechanical vibration parameters in real time in situ, through the use of virtual instrumentation obtaining a state-of-the-art, ergonomic, integrated and adaptable to the problem system, with isolation of useful vibrations for the regulation and recording of parameters used in predictive and corrective maintenance programs in plants with sets of rotating machines such as motor-generator or turbine-generator. A simple, economical solution with a competitive technological level compared to existing systems on the market, adhering to current regulations.

### **Hipótesis general:**

Una vez realizado el análisis detallado de las señales y determinados los parámetros de las vibraciones en un conjunto de máquinas rotatorias (turbo-generator), se puede diseñar e implementar un sistema de regulación usando un soporte aislador de vibraciones, de silicona-metal, sensible a ellas y a cargas dinámicas, mediante el efecto piezoresistivo, que pueda disminuir los niveles de vibraciones mediante el desarrollo de un software para el registro, medición y control mediante un soporte.

### **Hipótesis específicas:**

Existe una relación entre los niveles de vibraciones presentes en un conjunto de máquinas giratorias y el correcto funcionamiento de sus componentes basado en criterios de severidad según la norma vigentes. Existe una relación en la disminución de los niveles de vibración y el uso de un soporte aislador inteligente, desarrollado con instrumentación virtual para un conjunto de máquinas rotativas.

### **Justificación.**

En la práctica es difícil desarrollar un modelo matemático de un sistema mecánico que no se tiene su modelo, predecir sus niveles de vibraciones y su contenido armónico mecánico por medio de un estudio analítico. En tales casos se utilizan métodos experimentales para medir y determinar la respuesta del sistema y sus vibraciones. Estos métodos permiten identificar el sistema en función de su masa, rigidez, carga y amortiguamiento. Los sistemas considerados en esta propuesta son un conjunto de máquinas rotativas que realizan una función bien definida, cuando se requiere transformar la energía para su aprovechamiento en el caso de hidroeléctricas, termoelectricas y procesos industriales, estos sistemas producen ruido y vibraciones mecánicas que se propagan al medio ambiente y a otros componentes. Cuando estos sistemas funcionan de acuerdo a su diseño, los niveles de vibraciones tienen magnitudes pequeñas. En caso de falla en algunas de sus parte o desgaste, estos niveles son más elevados y requieren ser analizados para corregirla. En el diseño y la construcción de máquinas rotativas el análisis de vibraciones es fundamental para su correcta operación a corto, mediano y largo plazo. Si las vibraciones son consideradas correctamente durante el proceso de diseño en cuanto a tiempo, amplitud y forma, se evitaría el deterioro prematuro y daños estructurales o fatales de alto costo. Este análisis garantizará que el conjunto prestará una continuidad del servicio si se presentara una falla de esta naturaleza. En planta generadora de energía de inter-conexión al bus de transmisión de CFE, es prioridad el mantenimiento predictivo, este sistema ayudan a realizarlo de manera eficiente. Para lograrlo se requiere un análisis en tiempo real y modo continuo de las vibraciones. Esta problemática hace necesaria la regulación de los niveles de vibraciones mediante el uso de sistemas aisladores de vibraciones integrados, que realicen dicha tarea en tiempo real. Como ya se refirió la propuesta de esta tesis integra el desarrollo tecnológico, la instrumentación, regulación y control de un sistema de vibraciones que incorpora un soporte que aísla y detectar las señales vibratorias con rangos de sensibilidad a la frecuencia desde 5-300hz, es un nuevo enfoque ya que no hay soportes aisladores de

vibraciones en el mercado que cumplan con estas características. Esta investigación se complementa con el desarrollo de un software implementado en un entorno de instrumentación virtual como Labview, que facilita esta tarea. El Proyecto CONACYT-CEMIE-GEO-P29. Que es un proyecto de colaboración entre la Secretaría de Energía SENER, CONACYT y la UMSNH. el cual se denomina: “Diseño y construcción de Turbo-Generador de baja entalpía con capacidad de 300 kW para aprovechamiento del recurso geotérmico nacional”. Una motivación muy importante para el desarrollo de esta investigación es la colaboración y aportación tecnológica al proyecto P29, para obtener el grado doctoral; aporta el desarrollo tecnológico y análisis de las vibraciones mecánicas en modo continuo para el conjunto turbo-generador con instrumentación virtual.

## **OBJETIVOS:**

**Objetivo general:** Analizar el registro de las vibraciones durante la operación de un conjunto de máquinas rotativas (turbo-generador) obteniendo los datos de manera sistemática, interpretando e identificando los problemas para su regulación mediante el diseño y construcción de un soporte aislador de vibraciones mecánicas, aportando cualidades de control.

### **Objetivos específicos:**

- 1.- Registrar los parámetros de vibraciones mecánicas en el turbo-generador para el diseño de un sistema de regulación aplicado a los rodamientos del conjunto y la aplicación de un soporte aislador de vibraciones.
- 2.- Desarrollar un programa de computo para el análisis de los registros de las vibraciones mecánicas del conjunto turbo-generador, sustentado por las normas vigentes garantizando el correcto funcionamiento del turbo-generador.
- 3.- Desarrollar tecnología y conocimiento en el área de adquisición y procesamiento de las señales de vibración en un entorno virtual de instrumentación.
- 4.- Construir un soporte metal-elastómero a partir del diseño de un material compuesto flexible y sensible que sirva como aislante de vibraciones mecánicas contribuyendo al análisis, registro y regulación de los parámetros de vibraciones en el conjunto turbo-generador.

## CAPITULO 1

### INTRODUCCIÓN.

Este trabajo de investigación inicia con la propuesta de desarrollar tecnología en el campo del análisis y monitoreo de las vibraciones de máquinas en un conjunto turbo-generador sin considerar su modelo matemático. Para que aporte resultados del estado de operación del conjunto en tiempo real, posteriormente estos parámetros sean registrados y pueden servir posteriormente para realizar el diagnóstico y basado en estos resultados y su historial. Se desarrolla también el diseño y la fabricación de un soporte aislador de vibraciones sensible a ellas para lograr dichos objetivos. El contenido de esta tesis incluye cuatro capítulos. En el capítulo 1 introducción se muestran algunos aspectos teóricos básicos y normas relacionados con este trabajo de investigación y un resumen de algunos trabajos en los últimos años referidas al análisis de vibraciones, su regulación, control de forma teórica adicionalmente algunos conceptos básicos para el procesamiento de señales vibratorias en entorno virtual como Labview. Se hace referencia también a algunos conceptos básicos de compuestos flexible usados de manera comercial y la fabricación de soportes aisladores de vibraciones y sensores usados para este fin. En el capítulo 2 antecedentes se exponen dos temas fundamentales resultado de la revisión del estado del arte a un detalle mayor como es el análisis de las vibraciones y el segundo tema que tiene que ver con materiales flexibles aisladores de vibraciones. En el capítulo 3 se presentan los resultados experimentales y sus resultados del sistema experimental propuesto para poder lograr los objetivos de esta investigación. El cual se divide en dos partes el desarrollo de un software de análisis y control de vibraciones en un conjunto de máquinas rotatorias enfocado este estudio en los rodamientos y soporte elástico de este conjunto de máquinas. La otra parte que tubo un desarrollo mayor fue la fabricación de un compuesto flexible que permitirá en análisis, el control y la regulación de dicho fenómeno vibratorio para finalmente construir con este compuesto un soporte sensible a estas vibraciones. En el capítulo 4 se realiza un análisis de los resultados generales para la integración de los elementos de esta investigación en un sistema de análisis de vibraciones mediante un software y un soporte inteligente de cuatro apoyos. En este capítulo se muestran los resultados de un análisis realizado a un conjunto de máquinas en el laboratorio, mostrando los resultados de forma espectral del contenido armónico y sus magnitudes. En la mecánica moderna se analizan los sistemas no lineales, estos arrojan otros resultados que no eran posible obtener con las ecuaciones lineales, por ejemplos las vibraciones autoexcitadas, las vibraciones paramétricas y muchas otras. A fin del siglo XIX Liapunov y Poincaré desarrollaron el método de permutación y la teoría de estabilidad. Para las vibraciones más complejas, en las cuales no era posible determinar directamente sus características, se introdujeron los métodos al azar para definir las propiedades de estas vibraciones. En estos casos se emplean los parámetros de probabilidad [23]. El análisis de las deformaciones, esfuerzos y vibraciones en estructuras muy complejas, su análisis es complicado debido a que este tipo de sistema tiene muchos grados de libertad de movimiento. La masa y la elasticidad son distribuidas en estas estructuras. En estos casos, la estructura considerada se puede dividir en elementos muy pequeños que se unen con elementos elásticos y posteriormente se definen ecuaciones para estas estructuras y se utiliza el método de elemento finito (MEF), [24,25,26,29]. También los sistemas no lineales se pueden resolver por métodos numéricos utilizando sistemas de computo. Cuando las frecuencias de excitación y la frecuencia natural de una máquina se igualan, se produce un fenómeno conocido como resonancia pudiendo aparecer grandes deformaciones, fatiga del material e incluso su destrucción. Para evitar este fenómeno utilizan elementos adicionales que aislen o disminuyan la magnitud o la presencia de estas vibraciones. Si se usan materiales flexibles con este objetivo, el material flexible absorbe las ondas vibratorias. Las vibraciones de gran magnitud en una turbina de vapor son síntomas de problemas que existe en la turbina y que derivan en graves consecuencias. La vibración tiene muy diversas causas, por lo que cuando se presentan se hace necesario estudiar las causas que está provocando el fenómeno y corregirlas. La vibración se hace especialmente evidente durante el proceso de arranque, ya que durante este período se



atraviesan una o varias velocidades críticas de la turbina, velocidades en las que la vibración, por resonancia, se ve notablemente amplificada [21]. Es común no estudiar ni corregir el problema que está provocando ese anormal alto nivel de vibraciones y limitarse a tomar alguna medida puntual [16]. Un buen diseño de los alabes, fijación y forma segmentada de la turbina y un balanceo dinámico adecuado disminuirán las vibraciones en la fase de pruebas experimentales durante el proceso de construcción de la turbina.

Tabla 1. Se puede apreciar los trabajos mas recientes en el estudio de las vibraciones mecánicas en máquinas rotativas.

Año	Título	Autores	Evento
2006	Semi-active Switching Vibration Control for Dynamic Absorber based on the Seismic Frequency	Naoto Abe	Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Control Applications Munich, Germany, October 4-6, 2006
2007	1-3 Piezofiber - Silicone Rubber - Composite with Different Resonance Frequencies Enabling Frequency Controlled Shapes of the Ultrasound Radiation Pattern	Johannes Kellner, Schweinzer Institute of Electrical Measurements and Circuit Design Vienna University of Technology Vienna, Austria	2007 IEEE Ultrasonics Symposium
2009	Reliability Analysis of an Integrated and Multifunctional Vibration Signal Measuring Instrument for Rotary Machine	Xuejun LI , Guangfu BIN , B.S. Dhillon Hunan provincial Key Laboratory of Health Maintenance for Mechanical Equipment Hunan University of Science and Technology,	978-1-4244-4905-7/09/\$25.00©2009 IEEE
2009	Enhancement of Piezoelectric Vibration Energy Harvester Output Power Level for Powering of Wireless Sensor Node in Large Rotary Machine Diagnostic System	Bartosz Pkosawski, Piotr Pietrzak, Maciej Makowski, Andrzej Napieralski Department of Microelectronics and Computer Science Technical University of Lodz Lodz, P	MIXDES 2009, 16th International Conference "Mixed Design of Integrated Circuits and Systems", June 25-27, 2009, ód, Poland
2010	Vibration Control of Two-Mass Rotary System Using Improved NCTF Controller for Positioning Systems	Mohd Fitri Mohd Yakub, Wahyudi Martono, and Rini Akmeliawati Department of Electrical Engineering UTM	2010 IEEE Control and System Graduate Research Colloquium
2010	Vibration-based Fault Diagnostic Platform for Rotary Machines	W.Q Lim, D.H Zhang, J.H Zhou, Belgi P.H., Dr. H.L. Chan	978-1-4244-5226-2/10/\$26.00 ©2010 IEEE
2013	Simulation and Measurement of Angular Vibration of Induction Machine via Hilbert Transformation	Bohumil Skala, Vaclav Kus	978-1-4673-4913-0/13/\$31.00 ©2013 IEEE
2013	An Adaptive Signal Processing Method for Extraction of A Weak Bearing Signal	Wei Guo, Kesheng Wang, Ming J. Zuo	2013 International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering (QR2MSE)

2013	Vibro Acoustic Signal Analysis in Fault Finding of Bearing Using Empirical Mode Decomposition	Satish Mohanty, K. K Gupta, Kota Solomon Raju, Arvind Singh, Snigdha S	2013 International Conference on Advanced Electronic Systems (ICAES)
2014	J69-T-25A Engine Component Failure Analysis	Irfan Anjum Manarvi, Muhammad Asim Qazi	978-1-4799-1622-1/14/\$31.00 ©2014 IEEE
2016	Retrofittable Machine Condition and Structural Excitation Monitoring From the Terminal Box	Christopher Schantz, Katie Gerhard, John Donnal, Jinyeong Moon	IEEE SENSORS JOURNAL, VOL. 16, NO. 5, MARCH 1, 2016
2015	Bearing fault detection with the use of acoustic signals recorded by a hand-held mobile phone	Maciej Orman, Pawel Rzeszucinski, Agnieszka Tkaczyk	2015 International Conference on Condition Assessment Techniques in Electrical Systems (CATCON)
2015	Sparsity-Aware Tight Frame Learning for Rotary Machine Fault Diagnosis	Han Zhang , Xuefeng Chen , Zhaohui Du1 , Meng Ma1 , Xiaoli Zhang	This work is supported by the National Key Basic Research Program of China (No. 2015CB057400) and National Natural Science Foundation of China (No. 51225501, 51335006).
2016	Fault Diagnosis Technology of Rolling Bearing Based on LMD and BP Neural Network	Li-Pin Zhang, Hong-Mei Liu and Chen Lu	2016 12th World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA) June 12-15, 2016, Guilin, China
2017	Design, Analysis, and Realization of a Novel Piezoelectrically Actuated Rotary Spatial Vibration System for Micro-/Nanomachining	Zhiwei Zhu, Member, IEEE, Suet To, Kornel F. Ehmman, and Xiaoqin Zhou	IEEE/ASME TRANSACTIONS ON MECHATRONICS, VOL. 22, NO. 3, JUNE 2017
2017	"HOLDERCPS" - A New Type Data Recorder System for Proactive Maintenance to Rotary Blade Machines	Constantin VILCUI, NICULESCUI, CS, Andrei MITRU1, Cristian NECHIFOR1, Claudia-Irina BORZEAL, Camelia CORNEAL	THE 10th INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ADVANCED TOPICS IN ELECTRICAL ENGINEERING March 23-25, 2017 Bucharest, Romania
2017	Material optimization and experimental analysis of shock & vibration mount	Vijay A. Gore, Sonal P. Sali	2017 International Conference on Nascent Technologies in the Engineering Field (ICNTE-2017)

## 1.1.- Conceptos básicos de vibraciones mecánicas.

### 1.1.1.- Movimiento armónico simple.

El movimiento armónico simple se define como una función de senos o cosenos con parámetros constantes: amplitud, frecuencia y fase.  $x(t) = a \sin(\omega t + \theta)$  o bien  $x(t) = a \cos(\omega t + \theta)$  donde  $t(s)$  es el tiempo en segundos,  $a$  es la amplitud de la vibración (mm, m, V, A, etc),  $\omega$  es la frecuencia radial (rad/s),  $\theta$  es el ángulo de fase (rad). En la teoría se emplea, la mayoría de la veces, la frecuencia radial en la práctica (en mediciones) se usa la frecuencia en  $f(\text{Hz})$ . La relación entre la frecuencia radial  $\omega$ , la frecuencia  $f$  y el período de vibraciones  $T(s)$  se define mediante la relación:  $\omega = 2\pi f = 2\pi/T$  [23].

### 1.1.2.- Movimiento periódico.

Este movimiento se define en función de:  $x(T+t) = x(t)$ , donde  $T$  es el período del movimiento,  $T \neq 0$ . Cuando no es posible definir el desplazamiento del cuerpo en función al tiempo (vibraciones casuales), entonces se utilizan parámetros estadísticos para definir las vibraciones. Los valores que se usan para definir este tipo de vibraciones son: valor promedio, desviación estándar y valor promedio cuadrático, varianza, probabilidad, densidad de probabilidad y espectro de potencia. Para calcular estos parámetros es necesario tener suficientes datos experimentales (base de datos). Como ejemplo se puede citar la velocidad del viento, la rugosidad de una autopista, las vibraciones del piso en una planta, etc.

### 1.1.3.- Sobre posición de ondas.

Considerando que la onda mecánica de excitación en el compuesto viaja en dirección del eje  $x$ ,  $F_1(t)$  y que la onda  $F_2(t)$  es una onda en sentido opuesto a  $F_1(t)$ . Por superposición de ondas.

$$F_1(t) = A \text{ sen } (Kx - wt)$$

$$F_2(t) = A \text{ sen } (Kx + wt)$$

$$F_1(t) + F_2(t) = F_0(t) = 2A \cos(wt) \text{ sen}(Kx)$$

$$F_0(t) = A' \text{ sen}(kx).$$

La señal  $F_0(t)$  no representa una ondas que se desplaza en la dirección de  $F_1(t)$  ó  $F_2(t)$ , sino que describe un movimiento armónico simple en dirección vertical de amplitud  $A'$ , formando una onda estacionaria que contiene nodos  $N \quad \text{Sin}(kx) = 0, \quad Kx = 0, \pi, 2\pi, \dots n\pi$ . Y crestas  $\text{Sin}(kx) = \pm 1, \quad Kx = \pi/2, 3\pi/2, \dots (2n+1)\pi/2$ . [23].

### 1.1.4.- Aspectos energéticos de la onda.

La energía de un sistema vibratorio es parcialmente potencial y parcialmente cinética, la suma de estas dos energías permanece constante. La energía cinética  $T$  se almacena en la masa del compuesto por efecto de su velocidad y la energía potencial  $U$  se almacena en el compuesto por causa de la deformación elástica [1], el principio de conservación de energía se expresa como:

$$T = \frac{1}{2} m \dot{x}^2, \quad U = \frac{1}{2} K x^2, \quad U + T = \text{constante}, \quad m\ddot{x} + kx = 0$$

### 1.1.5.- Dos componentes armónicos en dirección perpendicular.

Para este caso el objeto vibra de manera armónica en dos direcciones  $x(t) = a_1 \text{ sen}(\omega_1 t)$  y  $y(t) = a_2 \text{ cos}(\omega_2 t + \theta)$ . La trayectoria de los movimientos son aplicadas según estas ecuaciones, al ser graficadas se conocen como figuras de *Lissajous*. Estos componentes armónicos son obtenidos mediante las señales de acelerómetros analógicos de dos ejes y graficadas en modo X-Y en el Osciloscopio digital, en el eje "x" se mide la aceleración de la fuerza de excitación mecánica, en el eje "y" se mide la aceleración de la respuesta que están a 90 grados. Estas relaciones de señales permiten asociar la amplitud de las dos señales  $a_1$  y  $a_2$  y la relación de frecuencia  $\omega_1$  y  $\omega_2$  y mostrar el valor de esta relación gráficamente vista en la figura 1.1 en la figura 1.1A se muestra la relación de dos señales con igual valor de frecuencia y magnitud. En la figura 1.1B la relación de frecuencia es de 1:2, en la 1.1C y 1.1D 1:3 y 1:4 respectivamente.

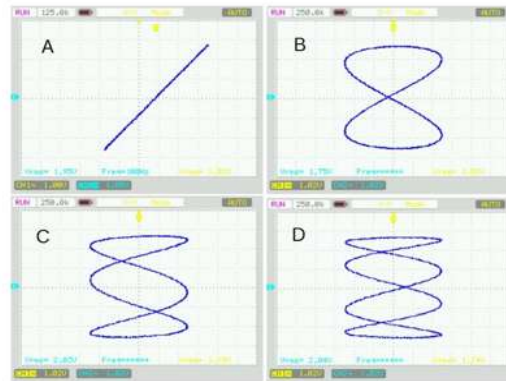


Figura 1.1 Onda estacionaria gráfica de Lissajous.

### 1.2.- Parámetros de vibraciones mecánicas.

Las máquinas modernas trabajan a velocidades mayores, lo que provoca que las cargas dinámicas sean más elevadas, por lo que es necesario conocer exactamente las propiedades de las máquinas para así obtener un alto nivel de seguridad durante su operación. El análisis teórico no siempre detecta exactamente estas propiedades debido a que los parámetros del modelo teórico no concuerdan con los reales. Las vibraciones pueden medirse con respecto a un sistema de coordenadas fijo, o bien, con respecto a un sistema inercial. Es común en estos parámetros la medición de las ondas vibratorias en el dominio del tiempo (aceleración, velocidad, desplazamiento) velocidad mecánica y posición de la flecha y eficiencia mecánica. En la figura 1.2 se muestra un clásico esquema de un vibrometro analógico tradicional vistas las etapas de procesamiento de la señal obtenida por una acelerómetro colocado sobre un motor eléctrico[19].

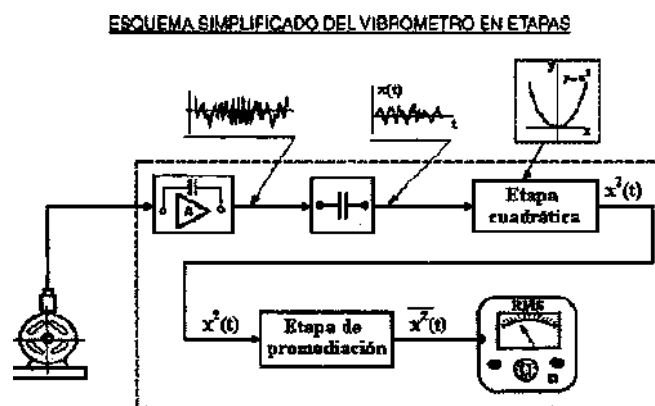


Figura 1.2 Esquema del vibrometro típico.

El movimiento (o fuerza dinámica) del cuerpo vibratorio se transforma en una señal eléctrica por medio de un transductor o detector de vibración. Por lo común, un transductor es un dispositivo que transforma los cambios de cantidades mecánica (desplazamiento, velocidad, aceleración o fuerza) en cambios de cantidades eléctricas (voltaje, corriente, frecuencia y tren de pulsos). Como la señal de salida de un transductor es de magnitud pequeña para ser registrada de forma directa por un instrumento, se utiliza un dispositivo de conversión de señales para amplificar la señal al valor requerido por un convertidor. Algunos medidores de vibraciones muestran en pantalla local el valor de las señales medidas, para su inspección

visual, capturar en una unidad de registro, o guardar en una computadora o microcontrolador. Los datos se pueden analizar entonces para determinar las características de vibración deseadas de la máquina o estructura [22,3,2].

### **1.2.1.- Sistemas de diagnóstico y predicción.**

Los diagnósticos de vibración son una parte importante de los programas de mantenimiento predictivo de máquinas. Las herramientas de diagnóstico de vibraciones son usadas para predecir y/o diagnosticar los fallos de los equipos. Cuando se aplica el mantenimiento predictivo y los equipos se supervisan regularmente, los fallos de la máquina se pueden descubrir en una etapa temprana, se pueden tomar acciones correctoras con anticipación. Esto puede evitar paradas inesperadas de los equipos y evitar la sustitución de piezas que todavía están en buenas condiciones. Las máquinas en funcionamiento generan vibraciones, que contienen mucha información sobre su estado. Se utiliza un medidor de vibraciones o un analizador para medir esta vibración. El transductor debe montarse en un punto apropiado de la máquina (por ejemplo, el soporte del rodamiento). El instrumento mide la señal de vibración, le indica la gravedad de las vibraciones y también los posibles fallos de la máquina. Los fallos más frecuentes son defectos en rodamientos, desequilibrio, desalineación y holguras. Al realizar los diagnósticos de vibración en una máquina rotatoria se pretenden dos cosas importantes que obtenemos de la señal del transductor: condición general de la máquina y condición del rodamiento. Existen métodos adicionales para evaluar la condición de una máquina y sus fallos. En el programa de mantenimiento predictivo se decidirá qué técnicas son las mejores para sus máquinas particulares [1,19,20]. Como resultado debe crearse un sistema que pueda predecir con certeza los posibles fallos que provocan las vibraciones no controladas en el sistema.

### **1.3.- Normativa vigente para vibraciones en máquinas rotativas.**

La Norma ISO 10816 establece las condiciones y procedimientos generales para la medición y evaluación de la vibración, utilizando mediciones realizadas sobre partes no rotativas de las máquinas. El criterio general de evaluación se basa tanto en la monitorización operacional como en pruebas de validación que han sido establecidas fundamentalmente con objeto de garantizar un funcionamiento fiable de la máquina a largo plazo. Esta norma reemplaza a las ISO 2372 e ISO 3945, que han sido objeto de revisión técnica. Este estándar consta de cinco partes:

- Parte 1: Indicaciones generales.
- Parte 2: Turbinas de vapor y generadores que superen los 50 MW con velocidades típicas de trabajo: de 1500, 1800, 3000 y 3600 RPM.
- Parte 3: Maquinaria industrial con potencia nominal por encima de 15 kW y velocidades entre 120 y 15000 RPM.
- Parte 4: Conjuntos movidos por turbinas de gas excluyendo las empleadas en aeronáutica.
- Parte 5: Conjuntos de máquinas en plantas de hidrogenación y bombeo.

Este nuevo estándar evalúa la severidad de la vibración de maquinaria rotativa a través de mediciones efectuadas en planta en partes no giratorias de las mismas [2]. De este análisis se deduce la importancia de tomar la normatividad vigente al desarrollar el programa de computo para el análisis y valoración de los datos que se obtengan in situ.

Tabla 2 Norma de rango de severidad de vibraciones en máquinas rotativas, según la Norma ISO 2372

Rango de severidad de vibración		Clase de máquina			
Vel RMS (mm/s)	Velocidad 0-PK (mm/s)	Clase I	Clase II	Clase III	Clase IV
0.28	0.396				
0.45	0.6364				
0.71	1.0041	A			
1.12	1.5839		A		
1.8	2.5458	B		A	
2.8	3.9598		B		A
4.5	6.364	C		B	
7.1	10.0409		C		B
11.2	15.8392			C	
18	25.4558				C
28	39.598				
45	63.6396				
71	100.4092	D	D	D	D
FSM para las máquinas		1.5702	1	0.62608	0.39625
FSN para los niveles (1/FSM)		0.63686	1	1.59725	2.52364
FSM Factor de servicio para clase de maquina					
FSN Factor de servicio para los niveles					

La norma de rangos de severidad de vibración ISO 2372, establece límites de nivel de vibración y los factores de servicio para cuatro tipos de máquinas, estos límites pueden ser prácticos para muchas máquinas básicas del proceso, pero es importante considerar la individualidad inherente a cada equipo, haciendo necesario la utilización de otras herramientas tales como el seguimiento de niveles de tendencia y el respectivo historial de mantenimiento. Ya que el valor de severidad de la vibración asociada a un rango de clasificación en particular, depende del tamaño y masa del cuerpo vibrante, las características del montaje del sistema, la salida y el uso que se le da a la máquina. Del análisis anterior resulta necesario tomar cuenta de varios propósitos y circunstancias concernientes a los diferentes rangos vistos en la tabla 2.

- CLASE I Componentes individuales, totalmente conectados al conjunto de la máquina en condiciones normales de operación. Por ejemplo, pequeños motores eléctricos hasta 15 kW.
- CLASE II – Máquinas de tamaño medio. Por ejemplo, motores eléctricos de 15 a 75 kW o hasta 300 kW en motores con cimentación especial.
- CLASE III – Motores principales grandes, con cimentación rígida y pesada, potencia >75kW.
- CLASE IV - Motores principales grandes montados sobre cimentación blanda y ligera. Por ejemplo, Turbo maquinaria (equipos con RPM > velocidad crítica).

#### 1.4.- Sensores de vibraciones.

Los sensores de vibración son usados para registrar la aceleración de las ondas vibratorias que se propagan un medio elástico, como lo son la velocidad o el desplazamiento. Muchos de estos sensores de vibración se usan para diferentes aplicaciones industriales o de laboratorio, razón por lo que deben ser flexibles teniendo en cuenta el tipo de medición o las condiciones ambientales. Estos sensores de vibración tienen diferente sensibilidad, un gran rango de medición y de frecuencia. Estos sensores son inmunes a variaciones de temperatura ambiental y poseen compensación de temperatura [24]. De aquí se deducen otras características que deben cumplir el material que servirá de base al diseño del nuevo soporte a desarrollar.

##### 1.4.1.- Piezoresistivos.

Estos sensores son pensados para la medición de aceleraciones o vibraciones en baja o media frecuencia, ya que, por su tecnología extensométrica, con el grabado estándar del elemento sensor o MEMS si es micromecanizado, la familia de acelerómetros piezoresistivos, MEMS o acelerómetros DC, cubre todas las variantes posibles en estos tipos de sensores. Su principal característica es que pueden medir frecuencias desde 0 hasta varios cientos de ciclos (Hz), con rangos que parten de los 2gs y pueden llegar a los 6000gs.

Su salida amplificada, la compensación en temperatura y una alta precisión son algunas de sus características más destacadas. También existen series MEMS no amplificadas, con salida diferencia directamente del puente completo Wheatstone para poderse acondicionar externamente como un canal de extensometría. En el diseño del material, se hace necesario tomar las características antes mencionadas como premisa a garantizar y sirve de referencia para valorar las capacidades del material al ser empleado en el soporte propuesto.

#### **1.4.2.- Piezoeléctricos y piezoresistivos.**

El sensor piezoeléctrico puede estar conformado por materiales cerámicos o cristales iónicos que son capaces de generar una pequeña energía eléctrica cuando estos son deformados. Los sensores piezoeléctricos son apropiados para mediciones dinámicas con rangos de hasta 100 kHz. Son de tamaño muy pequeños, por lo que se pueden integrar fácilmente en las aplicaciones. Destacan por sus extraordinarias características de señal, opera a un amplio rango de temperaturas. Los sensores de presión son aptos para ser utilizados en rangos térmicos de hasta 400°C (serie especial 700°C).

#### **1.4.3.- Inductivos.**

Los sensores de proximidad y sensores de posición inductivos se emplean para la medición del desplazamiento de vibración en los ejes en máquinas rotativas.

- La medición se realiza sin contacto
- Los sensores se montan fácilmente
- Gran área de linealidad y de trabajo

Los sensores inductivos Eddy Current se basan en el principio de corrientes de Foucault y están diseñados para medición sin contacto de desplazamiento, distancia, posición, oscilación y vibraciones. Son adecuados cuando se requiere alta precisión en entornos industriales hostiles (presión, suciedad, temperatura). Los sensores inductivos ofrecen mediciones extremadamente precisas donde se requiere precisión submicrométrica. Será necesario que el material destinado al soporte refleje resultados positivos de valores de frecuencia de trabajo en los rangos de temperatura sobre los 400°C y de ser posible también cercanos al los 700°C.

#### **1.4.4.- Ópticos.**

El acelerómetro óptico es un sensor de vibración de alta precisión diseñado para medir aceleración a frecuencias comprendidas entre 0 y 50 Hz. Puede trabajar en una gran variedad de aplicaciones de monitoreo en presencia de vibraciones de baja frecuencia con amplitudes significativas; por ejemplo vibraciones de obras civiles inducidas por la carga o vibraciones de cables causadas por el medio ambiente.

#### **1.5.- Procesamiento de señales en LABVIEW.**

El análisis en este entorno virtual es una parte fundamental de muchas aplicaciones de prueba, medición y control ya que permite comprender el significado de sus datos. Se realiza un procesamiento rápido y simple de una señal o desarrollo de un algoritmo altamente especializado. El sistema de desarrollo completo en LABVIEW usa varias funciones integradas de análisis para simplificar el desarrollo. Algunas entre otras bibliotecas usadas comúnmente como:

- Álgebra Lineal
- Ajuste de Curvas
- Generación de Señales
- Filtros integrados
- Transformadas integradas

- Análisis Espectral
- Algoritmos de Control PID
- Lógica Difusa
- Gráficas de Bode
- Probabilidad y Estadística
- Optimización

LabVIEW ofrece habilidades de análisis que operan perfectamente con funciones de adquisición de datos y visualización, permitiendo realizar medidas más rápido y reducir el tiempo de desarrollo. Al realizar análisis en línea con adquisición de datos, su aplicación puede responder rápidamente a los cambios en su señal en el momento en que ocurren.



Figura 1.3 Desarrollo en el entorno visual LABVIEW.

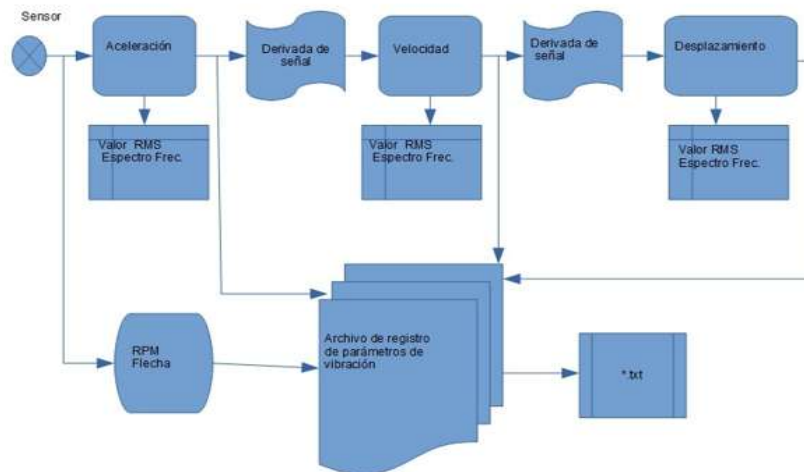


Figura 1.4 Desarrollo de la aplicación del análisis en LABVIEW.



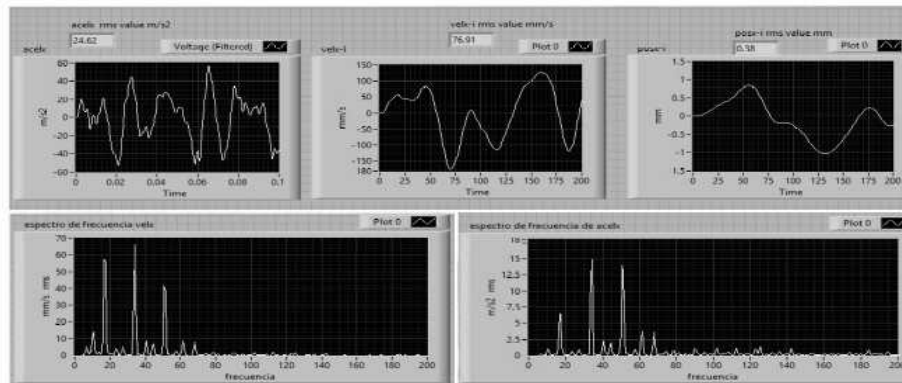


Figura 1.5 Gráfica de las señales medidas en entorno virtual LABVIEW.

### 1.5.1.- Acondicionadores de señales.

La mayoría de las señales que producen los sensores requieren alguna forma de preparación antes de que puedan ser digitalizadas. Las señales de un termopar, por ejemplo proporcionan niveles muy pequeños de tensión que deben ser amplificadas antes de la digitalización. Otros sensores, tales como detectores de temperatura mediante resistencia (RTD), termistores, galgas extensiométricas y acelerómetros, requieren una excitación para poder funcionar (elementos pasivos). Esta tecnología que requiere un trabajo de preparación, conllevan un acondicionamiento de la señal. Los amplificadores de instrumentación incrementan el nivel de tensión de la señal de entrada para lograr un nivel adecuado al rango del convertidor analógico-digital (ADC), incrementando así la resolución de la medida y la sensibilidad. Mejora la relación de la señal con respecto al ruido, mediante el incremento del nivel de la tensión antes de que se vea afectada por el ruido ambiental. Los sensores típicos que requieren de amplificación son los termopares y los medidores de deformaciones (galgas extensométricas). **Atenuación.** En ocasiones cuando las tensiones de la señal que se van a digitalizar están fuera del rango del ADC. Esta forma de acondicionamiento de la señal disminuye la amplitud de la señal de entrada de modo que la señal acondicionada quede dentro del rango de tensión del ADC. La atenuación es típicamente necesaria cuando se miden tensiones de más de 10 V. **Filtrado.** Los filtros rechazan el ruido no deseado dentro de un determinado rango de frecuencias. A menudo, los filtros paso-bajo se utilizan para bloquear el ruido de las medidas eléctricas, tales como el procedente de los 50/60 Hz de la red eléctrica. Otro uso común del filtrado es evitar el “aliasing” de las señales de alta frecuencia. Esto se puede hacer mediante el uso de un filtro “anti-aliasing” que atenúan las señales por encima de la frecuencia de Nyquist. Los filtros anti-alias son un tipo de filtro paso-bajo que se caracteriza por tener una banda de paso plana y una caída rápida. Debido a que las medidas de los acelerómetros y de los micrófonos se analizan comúnmente en el dominio de la frecuencia, los filtros anti-aliasing son ideales para aplicaciones de sonido y vibración. **Aislamiento.** Señales de tensión que están bastante fuera del rango del digitalizador pueden dañar al sistema de medida y al operador. Por esa razón, se requiere generalmente el aislamiento junto con la atenuación para proteger al sistema y al usuario de las tensiones peligrosas o de los picos de tensión. El aislamiento también puede ser necesario cuando el sensor está en un plano de tierra diferente del sensor de medida, tal como ocurre con un termopar montado en un motor.

**Excitación.** Se requiere una excitación en muchos tipos de transductores (transductores pasivos). Por ejemplo, las galgas extensométricas, los acelerómetros electrónicos, los termistores y las RTDs requieren tensiones externas o corriente de excitación. Las medidas de RTDs y de termistores se hacen con una fuente de corriente que convierte la variación de la resistencia en una tensión medible. Los acelerómetros tienen a menudo un amplificador integrado, que requiere una corriente de excitación proporcionada por el dispositivo de medida. Las galgas extensométricas, son dispositivos de muy baja resistencia, se utilizan típicamente en una configuración de puente de Wheatstone con una fuente de excitación de tensión.

**Linealización.** La linealización es necesaria cuando los sensores producen señales de tensión que no están linealmente relacionadas con las medidas físicas. La linealización, que consiste en el proceso de interpretación de la señal del sensor, se puede implementar mediante el acondicionamiento de la señal o por medio de software. Un termopar es el clásico ejemplo de un sensor que requiere linealización. Para el caso del termopar se requiere la compensación de la unión fría (CJC: Cold-Junction Compensation). Los termopares miden la temperatura como la diferencia de tensión entre dos metales diferentes. En base a este concepto, se genera otra tensión en la conexión entre el termopar y la terminal de un dispositivo de adquisición de datos. La compensación de la unión fría mejora la precisión de la medida proporcionando la temperatura de esta unión y aplicando la corrección apropiada.

**Método de muestreo.** El multiplexado puede enrutar secuencialmente una serie de señales a un solo convertidor CAD, logrando así una manera rentable de ampliar en gran medida el número de señales de un sistema. Cuando resulta crítica la medida de dos o más señales en el mismo instante, como en el caso de la caracterización de una estructura, se recomienda el muestreo simultáneo. Para el caso de la adquisición de las señales de sensores piezoresistivos conectados en forma de puente completo Wheatstone, este entrega un voltaje diferencial que se muestrea en modo de lectura simple a 2000 muestras por segundo y una frecuencia de 2Khz. Otras señales como sensor de posición de la flecha y sensores de temperatura de rodamientos son adquiridos y registrados.

### 1.5.2.- Puente Wheatstone.

Cuando son usadas las galgas extensométricas para la medición de deformaciones, esto implican la detección de cambios de resistencia extremadamente pequeños. Deberá de realizarse la selección y uso apropiado del puente completo, el acondicionamiento de la señal es necesario para obtener medidas fiables, libres de ruidos eléctricos externos que afecten la instrumentación de las señales. Existen tres tipos principales de galgas extensométricas son de: cuarto, medio y puente completo. El nombre hace referencia al número de ramas que forman el puente de Wheatstone para la detección activa de las galgas extensométricas o elementos sensibles piezoresistivos. Por lo tanto, se necesitan circuitos acondicionadores especializados en conexión tipo puentes que contienen galgas extensométricas de cuarto y medio puente. Si se está utilizando un sensor de cuarto de puente, se necesita una tercera resistencia comúnmente conocida como la resistencia de terminación de un cuarto de puente, estas tienen niveles relativamente bajos de salida (menos de 100 mV), que los hace vulnerables al ruido. El uso de filtros de paso-bajo puede ayudar a eliminar el ruido de las componentes de alta frecuencia no deseadas. Este ruido puede ser reducido o eliminado con filtros analógicos externos entre el puente y la tarjeta de adquisición de datos o mejor aún mediante un filtro digital de orden  $n$  diseñado a la medida en el entorno virtual de Labview una vez adquirida la señal. Típicamente cuando un puente es fabricado e integrado con elementos extensométricos, piezoresistivos a esta forma se le denomina (celda de carga) [30,31,32,33].

### 1.5.3.- Filtrado analógico y digital.

Los filtros digitales son herramientas de procesamiento mediante un algoritmo o modelo matemático que tiene como entrada una señal analógica o digital discreta en el tiempo y su salida es el resultado de aplicar un determinado filtrado “algoritmo de filtrado” a la señal original. Existen grandes diferencias entre los filtros analógicos tradicionales y los filtros digitales empleados para acondicionar señales de sensores. En

cuanto a su implementación, los analógicos son constituidos a base de componentes electrónicos discretos como capacitores, resistores, amplificadores operacionales, mientras que los digitales pueden implementarse tanto en software (aplicación) como en hardware (soporte físico). Otra de las diferencias es el ancho de banda de frecuencias en el que se usa el filtro, definido únicamente por el periodo de muestreo para el digital y limitado por el tipo de amplificadores operacionales analógicos, además de una potencia de cálculo mayor para los filtros digitales. El proceso de filtrado consiste en el tratamiento de la señal de entrada en su espectro de frecuencias con el fin de atenuar algunas frecuencias que no contienen información relevante de la señal. Para ello, la operación a realizar por el filtro sería la aplicación de una ecuación diferencial sobre la entrada del filtro, pero como las señales que se emplearán son discretas se utiliza una ecuación en diferencias que consiga el mismo efecto que la ecuación diferencial homóloga. Existen 4 tipos de filtros comúnmente usados. Los filtros pasa bajos, que permiten pasar las frecuencias por debajo de una frecuencia de corte ( $\omega_c$ ), atenuando las frecuencias por encima de ella (mayor atenuación cuanto más alejada esté de la frecuencia de corte). Por el contrario, los filtros paso alto atenúan las frecuencias por debajo de la frecuencia de corte. Los filtros pasa banda tienen dos frecuencias de corte, una mayor que la otra, como su nombre indica, deja pasar el espectro en frecuencias contenido entre esas dos frecuencias, atenuando la amplitud del resto. Y finalmente los filtros rechaza banda tienen también dos frecuencias de corte y eliminan las frecuencias intermedias a estas dos frecuencias de corte. La representación de estos filtros se realiza en un diagrama de Bode, donde en el eje de abscisas disponen las frecuencias en escala logarítmica y en el eje de ordenadas se marcan los decibelios atenuados.

#### 1.5.4.- Valores de los parámetros de vibraciones.

Los parámetros que definen una vibración más comunes, son la medición y registro de la magnitud y fase del desplazamiento de la onda vibratoria que se mide en metros (m) o en unidades menores milímetros (mm), la magnitud y fase de la velocidad de propagación de la onda en metros por segundo (m/s) o bien en milímetros por segundo (mm/s) y finalmente la aceleración de la ondas en metros sobre segundos al cuadrado ( $m/s^2$ ), ( $mm/s^2$ ), (dB) en (gs) igual a  $9.81m/s^2$ . Como parámetro adicionalmente en máquinas vibratoria es necesario una referencia de la posición y velocidad angular de la flecha del generador, motor o turbina en RPM's. Para una onda vibratoria  $\omega_0$  senoidal:

$$x(t) = x \text{ sen } (2\pi ft) = x_0 \text{ sen } (\omega t).$$

$$v(t) = dx/dt = v_0 \cos (\omega t) = v_0 \text{ sen } (\omega t + \pi/2).$$

$$a(t) = dv/dt = d^2 x/dt^2 = -a_0 \text{ sen } (\omega t).$$

Una clasificación general de las diferentes tipos de señales vibratorias son:

- Señales estacionarias: deterministas y aleatorias.
- Señales no estacionarias: las continuas y las transitorias.

Las ya referidas unidades de medición de parámetros vibratorios que son usadas por mencionar algunas son el valor de pico a pico ( $V_{pp}$ ) que es la diferencia algebraica entre los valores máximos positivo y negativo. El valor de pico ( $V_p$ ) es el valor máximo de una magnitud en un intervalo dado da idea de su evolución temporal. El valor eficaz o cuadrático (RMS) es también llamado valor equivalente. El factor de cresta cociente entre el valor de pico y el valor equivalente. El factor de forma (Ff) es la relación entre el valor eficaz y el valor medio [16].

#### 1.5.5.- Espectro de la frecuencia (FFT).

El análisis de las señales en el dominio del tiempo arroja cierta información necesaria para el análisis, pero la parte complementaria es realizar análisis de la señal de vibraciones en el dominio de la frecuencia. Para ello es necesario transformar esta señal del dominio del tiempo al de la frecuencia conocida como espectro de frecuencias. Esta herramienta matemática para el análisis de vibraciones en maquinaria en el dominio de la frecuencia fue desarrollada por el francés Jean Baptiste Fourier (1768 - 1830) quien encontró la forma de

representar una señal compleja en el dominio del tiempo de una señal compuesta de contenido armónico a una serie de valores de amplitud y frecuencia específicos denominada “Espectro”. De este modo, empleando la transformada rápida de Fourier (FFT), se retoma la suma de vibraciones simples de la Figura 1.6 y representar exactamente la misma operación en el dominio de la frecuencia. La cual muestra tres señales senoidales que se suman en el dominio del tiempo, y tienen frecuencias diferentes (20, 60 y 100 Hz) y una amplitud unitaria. Al ser transformada al dominio de la frecuencia (FFT), se obtiene un espectro del contenido armónico, presentando las tres señales su frecuencia fundamental y magnitud, esta muestra información más clara que la vista en dominio del tiempo.

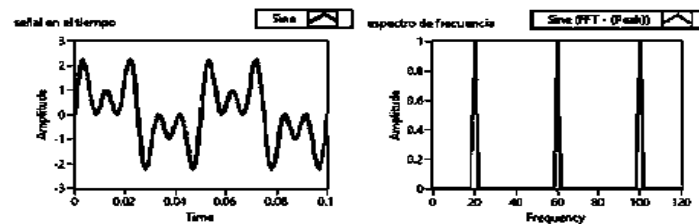


Figura 1.6 Señal compuesta senoidal dominio del tiempo y dominio de la frecuencia mediante FFT.

### 1.6.- Control y regulación de vibraciones mecánicas.

En diseño de máquinas rotativas, se requiere para la construcción e implementación de estas, considerar un análisis de vibraciones previo y otro en la puesta en marcha. Con esto se pretende la reducción de las carga dinámica con el uso de elementos amortiguadores en el diseño inicial. Para el caso en que las cargas dinámicas produzcan reacciones fuera de los niveles contemplados en el diseño y en las normas vigentes, deberá de ser considerado este caso (re-diseño), o aplicar elementos externos para su control y regulación. Si el diseño de las máquinas, sus elementos móviles, fijos y otros asociados al sistema, producen niveles bajos de vibración, esto no serán considerado problema como resultado de este análisis y las máquinas puede iniciar a operar en condiciones nominales. Anteriormente a la puesta en marcha por primera vez deberá realizarse un correcto balanceo y alineación de sus ejes, además de la correcta fijación del conjunto máquina a la cimentación. Después de que el conjunto de máquinas es diseñado, construido, balanceado, alineado y puesto en marcha se realizará periódicamente o de manera permanente en tiempo real un análisis de estas vibraciones para determinar su correcta operación, los posibles problemas, causa y sus efectos basados en criterios de severidad que establecen las normas vigentes.

#### 1.6.1.- Reducción de la carga dinámica.

Las máquinas rotativas que tienen rotores en desbalance producen mayormente valores de cargas dinámicas altas. Los rotores se diseñan de tal manera que la distribución de masas sea simétrica con respecto a su eje de rotación. Existen dos componentes: desbalance estático, cuando el centro de masa no esta sobre el eje de rotación. Este desbalance genera reacciones dinámicas en los soportes del rotor. La segunda componente es el desbalance dinámico, resultado de la distribución no simétrica de la masa y genera dos reacciones iguales, pero en sentido opuesto. Normalmente existen ambos desbalances los cuales producen reacciones y vibraciones. Si los valores de carga son muy grandes las reacciones también lo serán y por tal más rápido se destruyen los rodamientos de la máquina.

### 1.6.2.- Aplicación de amortiguamiento.

La presencia del amortiguamiento en un sistema ayuda a disipar más rápido la energía de las vibraciones. Particularmente cuando las máquinas trabajan cerca de la frecuencia de resonancia, el amortiguamiento puede disminuir mucho su amplitud. Cuando la máquina trabaja en un amplio rango de frecuencias no es posible evitar la presencia de la frecuencia de resonancia y en este caso el uso de un amortiguador permite reducir la amplitud de la resonancia. Generalmente se utilizan tres tipos de amortiguadores; por rozamiento seco de Lancheter, el rozamiento viscoso de Houde, y el de histéresis interna. El amortiguamiento existe siempre que existan las juntas. Las juntas por remaches o pernos siempre permiten pequeños desplazamientos relativos que disipan la energía de las vibraciones [4].

### 1.6.3.- Aislamiento de vibraciones.

El aislamiento pasivo puede presentar dos casos: minimizar la fuerza que genera el objeto vibratorio sobre la cimentación o minimizar las vibraciones del objeto cuando el suelo vibra. En ambos casos se usa aislamiento; entre la máquina y la cimentación se coloca un resorte con un amortiguador. El primer elemento permite obtener una adecuada frecuencia natural y el segundo elemento disipa las vibraciones. La elasticidad del resorte tiene que diseñarse de manera que la frecuencia natural de la máquina sea varias veces más pequeña que la frecuencia de la vibración perturbadora figura 1.7. Algunas compañías producen elementos de aislamiento tales como una combinación de resorte y amortiguador. Para vibro-aisladores se usan materiales como caucho, hule, neopreno o elastómeros en combinación con un metal, y su forma puede variar. En el catálogo de productos para seleccionar un adecuado se define la carga máxima, la frecuencia natural y otros parámetros importantes para su uso [3].

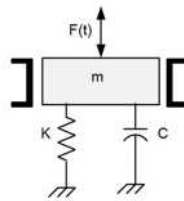


Figura 1.7 Aislador de vibraciones.

### 1.6.4.- Absorber dinámico.

Son sistemas auxiliares formados de una masa  $m$  y un resorte  $K$ , se conecta el objeto principal, que puede compensar las vibraciones para una frecuencia de excitación. El sistema auxiliar se diseña de tal manera que su frecuencia natural sea igual a la frecuencia de excitación. Para los parámetros de diseño del absorber se considera la fuerza generada por la masa  $m$  es opuesta a la fuerza del objeto que vibra, y solo a esa frecuencia. Para otras frecuencias el absorber tiene una fuerza de oposición muy pequeña figura 1.8.

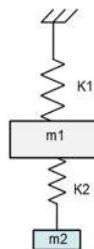


Figura 1.8 Absorber dinámico de vibraciones.

### 1.6.5 Eliminador activo de vibraciones.

No siempre es posible aplicar un absorbente dinámico de vibraciones, porque sus parámetros no son aceptables, por ejemplo, no es posible conectar otra masa o bien la frecuencia de vibración del objeto no es constante. También en la práctica, la excitación tiene una forma más complicada y constituye una serie de impactos. En otras situaciones la aplicación de aislamiento (método pasivo) no se puede usar porque el desplazamiento estático  $x_{st} = mg/K$  es muy grande. Para este sistema eliminador se requiere un sensor y actuador (cilindros hidráulicos o neumáticos, motores eléctricos, actuadores piezoeléctricos) para generar la fuerza que actúa sobre el objeto y compensa la carga dinámica. Para obtener este efecto, el sensor de desplazamiento del sistema, la señal del sensor es realimentada a un controlador que accionará el actuador. Este sistema es de lazo cerrado. Para ejercer una gran fuerza sobre el sistema el actuador tiene que tener la suficiente potencia. Por tal es necesario un amplificador de potencia en la salida del controlador visto en la figura 1.9. El sistema de control puede también controlar los parámetros del sistema  $C$  y  $K$  para disminuir las vibraciones a través de un cambio de la frecuencia natural y la razón de amortiguamiento, caso del sistema semiactivo. El caso de un amortiguador con fluido magnetoreológico y mediante un campo magnético producido por una bobina, se controla este fluido y como consecuencia su amortiguamiento y rigidez.

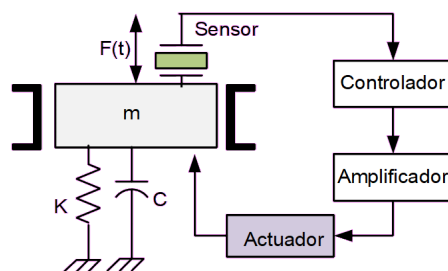


Figura 1.9 Eliminador activo de vibraciones.

### 1.6.6.- Eliminador sincrónico.

Un tambor con bolas gira con una velocidad angular cercana a la frecuencia de excitación, las bolas tienen libertad de desplazarse con respecto al tambor. La fuerza resultante de las bolas puede compensar la excitación del objeto y de esta manera elimina las vibraciones del objeto. La misma vibración del objeto genera la fuerza vibratoria que obliga a las bolas a cambiar su posición dentro del tambor. De tal manera que la posición de las bolas y la fuerza vibratoria se anulan de esta manera se eliminan las vibraciones visto en la figura 1.10 Este sistema es usado típicamente en lavadoras de ropa en donde la variación de velocidad y el desbalance de la ropa al ser centrifugada generan vibraciones, las cuales son eliminadas por el recipiente radial en la parte superior de la tina con forma de dona, en su interior se mueven las bolas o un líquido viscoso como aceite [3].

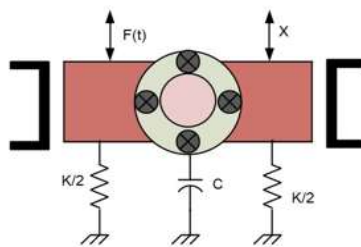


Figura 1.10 Eliminador sincrónico de vibraciones.

En conclusión las diferentes técnicas anteriores para el control y regulación de las vibraciones deberán de ser estudiadas y analizadas para el caso en particular y determinar cuál o cuáles pueden ser aplicadas al diseño de un conjunto de máquinas rotativas como el caso de turbo-generador referido en este proyecto. En el proyecto P29 es factible el diseño de aisladores de vibraciones mediante un soporte flexible aislador entre el conjunto de las máquinas y la cimentación, otros componentes como el intercambiador de calor y tuberías asociadas. Adicionalmente se desarrollará un sistema de análisis de parámetros de vibraciones en tiempo real para establecer criterios de control de dichas regulación, realizar diagnóstico y pronóstico de posibles fallas por componentes defectuosos o elementos envejecidos o desgastados y otras fallas asociadas que puedan ser detectadas mediante el análisis de vibraciones en el conjunto turbo-generador, otras técnicas de análisis complementaria son la termografía y ultrasonido aplicada a elementos críticos como rodamientos y regiones que producen calor por fricción. Las señales producidas por el soporte aislador son acondicionadas y adquiridas para ser procesadas. Además se diseña un sistema eliminador activo de vibraciones en tiempo real y adicionalmente se guarda en una bitácora de los parámetros de vibración que sirven como base para el diagnóstico y pronóstico [23].

### 1.7.- Clasificación de los plásticos comerciales.

Dado que se pretende la fabricación de un compuesto flexible para fabricar con el los soportes aisladores de vibraciones para un conjunto de máquinas vibratorias, se deberá hacer un análisis de los plásticos comerciales para con ello posteriormente determinar cuál puede servir para la fabricación de este compuesto flexible con propiedades piezoresistivas. Los plásticos se clasifican por su naturaleza: Los plásticos naturales se obtienen directamente de materia primas (látex, hueso de aguacate, la caseína proteína de la leche y la celulosa). Los plásticos sintéticos se elaboran a partir de compuestos derivados del petróleo, el gas natural o el carbón. La mayoría de plásticos pertenecen a este grupo. Por su estructura interna: los termoplásticos son aquellos que por su estructura interna, formada por cadenas lineales, se desarmen fácilmente con el calor y se reconstruyen al enfriarse, pueden fundirse y volver a fabricarse muchas veces, tienen buena capacidad para el reciclado. Se ablandan con el calor, pudiéndose moldear con nuevas formas que se conservan al enfriarse. Es debido a que las macromoléculas están unidas por débiles fuerzas que se rompen con el calor [4]. Una lista de los termoplásticos comerciales es la siguiente:

1. Polietilentereftelato (PET)
2. Polietileno de alta densidad(HDPE)
3. Cloruro de polivinilo (PVC)
4. Polietileno de baja densidad(LDPE)
5. Polipropileno (PP)
6. Poliestireno (PS)
7. Otros: Metacrilato, Teflón, Celofán, Nailon o poliamida (PA)
  - Polietileno (PE) - Metacrilato
  - Polipropileno (PP) - Teflón
  - Poliestireno (PS) - Celofán
  - Cloruro de polivinilo (PVC) - Nailon o poliamida (PA)

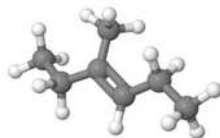


Figura 1.11 Molécula de aceite de silicona (polidimetilsiloxano)

*Los termoestables* son aquellos que por su estructura interna, formada por cadenas entrecruzadas, se degradan con el calor antes de que el plástico se funda, solo pueden fundirse y fabricarse una vez. Poca capacidad de reciclado. Con el calor se descomponen antes de llegar a fundir, por lo que no se les puede moldear, son frágiles y rígidos. Es debido a que las cadenas de los polímeros están muy entrelazadas. Una lista de ellos de algunos es la que sigue: 1. Poliuretano, 2. Resinas fenólicas, 3. Melamina. *Los elastómeros* son un tipo de material termoestables, por lo cual sólo pueden fundirse una vez, pero debido a su estructura interna con cadenas ramificadas, presentan un elevado grado de elasticidad. Estos plásticos que se caracterizan por su gran elasticidad, adherencia y baja dureza. Estructuralmente son intermedios entre los termoplásticos y los termoestables. Por ejemplo: 1. Caucho natural 2. Caucho sintético 3. Neopreno. Elastómero significa simplemente "Caucho". Entre los polímeros elastómeros se encuentran el polisopreno o caucho natural, el polibutadieno, el polisobutileno, y los poliuretanos. La particularidad de los elastómeros es que pueden ser estirados muchas veces, para luego recuperar su forma original sin una deformación permanente. Las moléculas poliméricas que conforman una porción de caucho, cualquier clase de caucho, no tienen ningún orden, se enrollan y se enredan entre ellas, formando un gran ovillo. Al estirar el caucho las moléculas son forzadas a alinearse en la dirección de la fuerza aplicada figura 1.11. Cuando lo hacen, se vuelven más ordenadas, llegando las cadenas a alinearse tanto como para cristalizar. Cuando deja de aplicarse presión, el material deja de estirarse, las moléculas vuelven rápidamente a su estado enredado y desordenado, recuperando su forma original. El primer caucho disponible fue el látex de caucho natural, el polisopreno. Sin embargo, el látex de caucho natural extraído del árbol no tiene muchas aplicaciones, pues gotea y se pone pegajoso cuando se calienta, y se endurece volviéndose quebradizo cuando se enfría. Determinados elementos aditivos adicionados al caucho forman puentes que unen todas las cadenas poliméricas del caucho. Esto se denomina entrecruzamiento o vulcanización. Los puentes formados por cadenas cortas de átomos de aditivo unen una cadena de poliisopreno (caucho natural) con otra, hasta que todas las cadenas quedan unidas en una super molécula gigante. Por ejemplo, la unión de azufre con caucho natural da lugar al caucho vulcanizado, material que no funde ni está pegajoso al calentarse al igual que no se quiebran al enfriarse. Dado que generalmente es el calor el que causa el entrecruzamiento que da una forma permanente, a estos materiales los llamamos termoestables. Esta denominación se diferencia de los termoplásticos, que no son entrecruzados y puede volver a dárseles forma una vez que fueron moldeados. Los elastómeros termoplásticos, también conocidos como cauchos termoplásticos, son una clase de copolímeros o mezcla física de polímeros (generalmente un plástico y un caucho) que dan lugar a materiales con las características termoplásticas y elastoméricas. Mientras que la mayoría de los elastómeros son termoestables, los termoplásticos son, en cambio, relativamente fáciles de utilizar en la fabricación, por ejemplo, en moldeo por inyección. Los elastómeros termoplásticos combinan las ventajas típicas de las gomas y de los materiales termoplásticos. La diferencia principal entre los elastómeros reticulares (termoestables) y los elastómeros termoplásticos es el grado de entrecruzamiento en sus estructuras. De hecho, el entrecruzamiento es un factor estructural crítico que contribuye a que el material adquiera altas propiedades elásticas. En la tabla 3 se muestra un resumen de los rangos comerciales de dureza en elastómeros medidos con el estándar Shore 00 hasta Shore D [4,6].

Tabla 3 Escala de dureza chore para elastómeros comerciales [5].

Material	Extra Suave					Suave		Medios Suave			Duros		Extra duros								
Shore 00	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100											
Shore A						0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100					
Shore D											0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100



### 1.7.1.- Elastómeros usados en aisladores de vibraciones.

Como ya se mencionó un aislador de vibraciones es un soporte elástico que tiene como función reducir tanto las vibraciones ambientales que se transfieren a la máquina como las que produce ella misma. Esto se consigue introduciendo un material aislante entre la masa vibrante y la fuente de excitación, para así reducir el nivel de las vibraciones. Los elastómeros usados pueden ser los cauchos sintéticos y naturales. Estos pueden moldearse en ciertas formas deseadas. En función de su naturaleza y calidad, son aptos para soportar grandes deformaciones para luego volver a su estado original sin sufrir ningún daño. Tienen una excepcional extensibilidad y una gran deformabilidad, por ello pueden utilizarse en alargamientos extremos. Los elastómeros de caucho natural ofrecen las propiedades mecánicas más favorables para esta aplicación como aisladores, ya que ofrecen una débil disipación energética y esto hace que su transmisibilidad sea siempre inferior a otros cauchos sintéticos. Sus excelentes propiedades mecánicas permiten conseguir soluciones estables en el tiempo. El caucho natural tiene como limitaciones su deterioro bajo la influencia de aceites y temperaturas ambientales elevadas. La optimización de su mezcla favorece su resistencia a rayos UV y al Ozono. El caucho de silicona es uno de los elastómeros más caros del mercado, pero presenta unas propiedades notablemente estables y proporcionan un aislamiento eficaz en un amplio rango de temperatura. La mayoría de los aisladores elastoméricos no deben estar sujetos a grandes deformaciones estáticas durante períodos largos de tiempo. Un aislador con una gran deflexión estática puede dar un rendimiento satisfactorio temporalmente, pero la sobrecarga propicia deformaciones permanentes al igual que el desgarrar de cadenas poliméricas. Los aisladores de plástico, son de bajo coste y presentan una uniformidad excepcional. Los más utilizados son los materiales de polietileno y de estireno. El mayor inconveniente de estos aisladores son sus pobres propiedades mecánicas, es decir, presentan una capacidad inferior de resistencia a las cargas o fuerzas, al igual que su gran fluencia y deformación permanente. Existen poliuretanos micro celulares que mejoran en gran manera estos inconvenientes anteriormente descritos, para estos últimos elastómeros, es imprescindible que su curva de “carga-deformación” presente forma "S", es decir, una sección lineal, otra regresiva y al final progresiva. El aislante antivibratorio más utilizado está fabricado de un elastómero. Siendo el caucho natural el más popular, ya que los dispositivos son capaces de sostener grandes deformaciones y luego volver a su estado original prácticamente sin daños. Los soportes antivibratorios de caucho metal son los que mejores características ofrecen, además de presentar las mejores utilidades. Se encuentran en el mercado aisladores de caucho con multitud de formas y tamaños, pero hay que elegir el que mejor se adapte a nuestras necesidades figura 1.12 por ello, antes de instalar un aislador para reducir la vibración, es recomendable realizar un cálculo antivibratorio teórico y después acompañarlo de una medición de vibraciones y así establecer cuál es la mejor solución para cada caso. Solo de esta manera dispondremos del soporte antivibratorio perfecto para nuestro problema y así reducir satisfactoriamente los efectos no deseados derivados de toda vibración (espectro del contenido armónico) [6].



Figura 1.12. Soportes aisladores de vibración comerciales elastómero-metal.

Los elastómeros al igual que los resortes son medios para acumular energía potencial de un sistema. También se les denomina elementos de rigidez del sistema. La fuerza que actúa en un resorte lineal puede determinarse con la siguiente expresión:  $F(x) = Kx$  donde  $K$  es la constante del resorte y “ $x$ ” su deformación, la energía potencia acumulada por este elementos es  $V(x) = \frac{1}{2} Kx^2$ . La masa es el medio que acumula energía cinética en el sistema, también se le determina elemento de inercia. La fuerza de inercia es determinada por la segunda ley de Newton como:  $F = m\ddot{a}$ . El elemento amortiguador presenta el medio para disipar energía del sistema también denominado elemento de disipación del sistema. La fuerza de amortiguamiento de manera ideal y el amortiguador viscoso es proporcional a la velocidad ( $V$ ) a la que se mueve el sistema  $F = cV$  donde  $c$  es la constante de proporcionalidad o de amortiguamiento. La fricción entre superficies secas produce una amortiguamiento de Coulomb que resulta del producto del coeficiente de fricción y la fuerza normal  $F = \mu mg$ . Las fuerzas vibratorias generadas por una máquina son a menudo inevitables; sin embargo, su efecto puede reducirse sustancialmente agregando resortes denominados aisladores. La fuerza transmitida a través del resorte y el amortiguador  $F_t = \sqrt{((Kx)^2 + (cwx)^2)}$  y la fuerza excitatriz armónica  $F_o = Kx\sqrt{(1 - (mw^2/k)^2 + (cw/k)^2)}$  por tal, la relación de estas dos fuerzas se determina la transmisibilidad de fuerzas  $F_t/F_o$ .

### 1.7.2.- Compuestos flexibles con silicona RTV y fibras de carbono molidas FCM.

El nombre de siliconas viene dado del enlace silicio-oxígeno, en inglés como silicon-ketones. Su materia prima es la arena de sílice, de esta se obtiene el clorosilano, al calentarla arena de sílice con cloro y coque. El clorosilano con agua (mediante hidrólisis) da lugar a los silianoles, monómeros de bajo peso molecular capaces de formar grandes moléculas (macromoléculas) tridimensionales que son el fundamento de lo que se denomina técnica y comercialmente los aceites de siliconas figura 5.6, en los elastómeros de silicona RTV. Anteriormente referida las siglas RTV provienen de idioma inglés quieren decir Room Vulcanizing Temperature. En español Siliconas VTA, es decir, vulcanización a temperatura ambiente. Las firmas Dow Corning y General Electric en EE.UU, desarrollaron los primeros compuestos caracterizados por ser bicomponentes (Componente A-Silicona, componente B-Catalizador), cuya mezcla provocan la vulcanización en frío dando lugar a un material homogéneo, gomoso y elástico.

### 1.7.3.- Composición de los elastómeros de silicona RTV.

Los elastómeros de silicona se componen de un líquido y un relleno, por lo tanto se puede hablar de un material compuesto o mejor dicho un compuesto de silicona. El líquido base es el aceite de silicona elaborado por la industria petroquímica. El relleno es un polvo formado por nano-partículas y dan cuerpo, definen la viscosidad y repercute en las propiedades físicas de la silicona. Algunos rellenos usados son partículas de sílice, dióxido de silicio o sílice coloidal por ejemplo, un óxido metálico micrométrico, el tamaño óptimo de estas partículas debe estar entre 5 y 10 nanómetros. Se suele incidir sobre la cara exterior de las partículas para optimizarlas y que gocen de mayor compatibilidad con los aceites de silicona. Ibarra Rueda propone en su libro Ingredientes y mezclas del caucho, que “el grado máximo de reforzamiento se consigue con las Sílices Pirogénicas (carga de tipo orgánico) obtenidas por combustión de vapores de cloruro de silicio o de silicato de etilo, y que se componen esencialmente de anhídrido silícico. Se emplean en las siliconas, el aumento de la viscosidad con la dosis de esta carga es más usado”. La proporción de relleno varía obteniéndose así siliconas de diferente viscosidad, consistencia y pastosidad situada entre extremos bastantes distantes. En el mercado se encuentran siliconas en diversos grados de viscosidad a fin de satisfacer las necesidades del los usuarios. Por regla general hay tres viscosidades base: pesada, media y ligera luego existen otros tantos niveles de viscosidad situados entre estas. Cuando la cantidad de relleno supera las tres cuartas partes, obtenemos una masilla, entonces la viscosidad de la silicona viene definida como pesada o ultra-pesada. Con un material así puede aplicarse a mano sin riesgo de que se escurra, es dócil y modelable. Cuando la cantidad de relleno está presente en una proporción más baja e incluso no

supera la cuarta parte del peso de la masa total, se habla de una silicona de ligera consistencia apta para ser aplicada en procedimientos de colada. El catalizador se agrega al compuesto de silicona con el fin de promover la reacción que dará lugar a la reticulación. El compuesto de silicona carece de las prestaciones requeridas, es deformable pero no elástico, mantiene la forma que se le aplica y por la fuerza de la gravedad la silicona se apelmaza sobre si misma o se escurre por su propio peso. Con la adición del catalizador, se producirá la reacción de reticulación, la silicona adquiere una constitución elástica, gomosa, estable y lista para ser usada. La reacción de reticulación en las siliconas RTV es exotérmica y no alcanza a penas 1 °C. Los catalizadores generalmente poseen un olor desagradable, tal olor es enmascarado con aditivos odorantes que segregan un olor fresco a esencia, flores o frutas. De ahí que algunas siliconas perfumen el ambiente al poco de haber reticulado. El tiempo de trabajo o “pot life” es ese espacio de tiempo que va desde la mezcla de la silicona con el catalizador hasta el momento en que ya no puede ser manipulada. Es importante definir que la reticulación es el fragmento de tiempo que va desde la mezcla de la silicona con el catalizador hasta que el curado permite poner en uso el molde de silicona. El tiempo de fraguado no coincide con el de curado; el tiempo de curado continúa avanzando por días e incluso meses, a medida que se aproxima a su fin se van asentando y acentuando las propiedades específicas de la silicona. La vulcanización de las siliconas se divide en tres fases: Fase de inicio, Fase de expansión, y Fase de culminación. Las siliconas y el catalizador se comercializan de tres formas: a) Un líquido y una pasta, b) Dos líquidos, y c) Dos pastas. Varios tipos de catalizadores son usados para la reticulación de los polisiloxanos o siliconas, por lo común son sales metálicas: compuestos organometálicos (ácido cloroplátinico), compuestos de estaño (dibutildilaurato de estaño), y aminas. Por lo general, el catalizador va acompañado de un acelerador (octoato de estaño, ortosilicato de etilo) para incrementar la velocidad de reticulación. Los aditivos que normalmente se utilizan son los siguientes: Pigmentos que den a la silicona un color atractivo. Un plastificante usado es el bióxido de titanio, también ejerce como blanqueador. Otro plastificante usado son las tixotrópicos en forma de gel o en polvo, dotan a la silicona de una propiedad antidescolgante, dicha silicona se llama silicona tixotrópica [7].

### **1.8.- Micro fibras molidas FMC y grafito comercial.**

La silicona tiene una gran capacidad “digestiva” la cual le permite formar compuestos aglomerados con propiedades adicionales conductoras de electricidad y calor, permitiendo aglomerarse con una gran cantidad de partículas metálicas y no metálicas como puede ser polvos metálicos y fibras de vidrio, de carbono o grafitos minerales. Desde luego que esta capacidad digestiva tiene un límite y se debe considerar en la rigidez final del compuesto. En la fabricación de un compuesto flexible RTV con propiedades piezoresistivas deberá agregarse los aditivos mediante proceso mecanizado para asegurar una homogeneidad y distribución de partículas en el volumen final antes que inicie del proceso de reticulación y catalizado esto debido a su cambio de viscosidad de ligera a ultrapesada, con la adición de las micro fibras de carbono.

#### **1.8.1.- La micro-interfase (MI) de un compuesto flexible RTV piezoresistivo.**

La zona de interfase es una región de composición química o física variable, donde tiene lugar la unión entre la matriz y el refuerzo en un compuesto, que asegura la transferencia de las cargas mecánicas, eléctricas y térmicas aplicadas entre ambos y condiciona las propiedades mecánicas y eléctrica finales de los materiales compuestos. La sinterización de un compuesto flexible usado para aplicaciones como sensor en ingeniería eléctrica, electrónica y mecánicas, son aprovechadas sus propiedades como la conductividad eléctrica, térmica, flexibilidad, alta resistencia a medio ambiente, temperatura, humedad y radiación solar, etc. Los compuestos elastoméricos reforzados con fibras discontinuas cortas orientadas aleatoriamente en el volumen del compuesto, tienen propiedades que le permite ser usado para fabricar aisladores de vibraciones, sensores de carga mecánica y vibraciones. Un electrodo conductor fabricado con un compuesto flexible,

debe estar sujeto mecánicamente (metal-elástico). Por otro lado la conexión eléctrica al metal también es requerida en el caso de que el compuesto flexible sea usado como sensor. Para este fin es necesario crear una interfase o superficie de conexión que denominaremos Micro-Interfase-Compuesto-Electrodo (MICE) vista en la figura 1.13 y permite la conexión eléctrica de la parte flexible a una parte fija sección transversal (electrodo-metal). Para este fin es necesario desarrollar un adhesivo basado en silicona que sea buen conductor eléctrico, que presente una resistencia eléctrica muy baja adherido a una placa aisladora eléctrica.

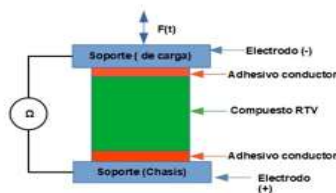


Figura 1.13 Micro-interfase en un soporte compuesto-electrodo (MICE).

El grafito es un mineral de la clase de los elementales, y en su composición concreta interviene un elemento semimetálico. Se puede considerar la composición del grafito como el carbón de máximo contenido en carbono, encontrándose por encima de la antracita, por lo que se le puede llamar meta-antracita, aunque normalmente no se emplea como combustible debido a que es muy difícil encenderlo. Es de color negro con brillo metálico, refractario y se exfolia con facilidad. Otras de las características del grafito es que en la dirección perpendicular a las capas presenta una conductividad eléctrica baja y aumenta con la temperatura, comportándose como un semiconductor. A lo largo de las capas la conductividad es mayor y aumenta proporcionalmente con la temperatura, comportándose como un conductor semimetálico. La estructura molecular del grafito presenta hibridación  $sp^2$ , esto significa que forma tres enlaces covalentes en el mismo plano a un ángulo de  $120^\circ$  formando una estructura hexagonal y un orbital perpendicular a este plano queda libre (estos orbitales deslocalizados son fundamentales para definir el comportamiento eléctrico de este material). La fibra de carbono sintética constituida por finos filamentos de  $5\text{--}10\ \mu\text{m}$  de diámetro y compuesto principalmente por carbono. Cada filamento de carbono es la unión de miles de capas de carbono. Se trata de una fibra sintética porque se fabrica a partir del poliacrilonitrilo. Tiene propiedades mecánicas similares al acero y es tan ligera como la madera o el plástico. Por su dureza tiene mayor resistencia al impacto que el acero. La principal aplicación es la fabricación de compuestos, en la mayoría de los casos aproximadamente un 75% con polímeros termoestables. El polímero es habitualmente resina epóxica, de tipo termoestable, aunque también puede asociarse a otros polímeros, como el poliéster o el viniléster. La fibra de carbono se fabrica a partir de otro polímero, llamado poliacrilonitrilo, a través de un complicado proceso de calentamiento. Cuando se calienta el poliacrilonitrilo, el calor hace que las unidades repetitivas “Ciano” formen anillos al aumentamos el calor, los átomos de carbono se deshacen de sus hidrógenos y los anillos se vuelven aromáticos. Este polímero constituye una serie de anillos piridínicos fusionados. Luego se incrementa la temperatura a unos  $400\text{--}600^\circ\text{C}$ . De este modo, las cadenas adyacentes se unen, este calentamiento libera hidrógeno y da un polímero de anillos fusionados en forma de cinta. Incrementando aún más la temperatura de  $600$  hasta  $1300^\circ\text{C}$ , nuevas cintas se unirán para formar cintas más anchas. De este modo se libera nitrógeno. Terminado el proceso, las cintas son extremadamente anchas y la mayor parte del nitrógeno se liberó, quedando una estructura que es casi carbono puro en su forma de grafito. El filamento de carbono es producido a partir de un polímero precursor. El polímero precursor es comúnmente rayón, poliacrilonitrilo es una resina derivada del petróleo. La estructura atómica de las fibras de carbono es similar a la del grafito, consistente en láminas de átomos de carbono ordenados en un patrón regular hexagonal. La diferencia está en la manera en que esas hojas se entrecruzan. El grafito es un

material cristalino en donde las hojas se sitúan paralelamente unas a otras de manera regular. Las uniones químicas entre las hojas son relativamente débiles, lo que proporciona al grafito su blandura y brillo característicos. La fibra de carbono es un material amorfo. Las láminas de átomos de carbono se colocan al azar, apretadas o juntas. Esta integración de las láminas de carbono es responsable de su alta resistencia. La densidad de la fibra de carbono es de  $1750 \text{ kg/m}^3$ . Es conductor eléctrico y de alta conductividad térmica. Al calentarse, un filamento de carbono se hace más grueso y corto (coeficiente de dilatación térmica negativa). Las propiedades principales de este material compuesto son: muy elevada resistencia mecánica, con un módulo de elasticidad elevado, baja densidad, en comparación con otros elementos como por ejemplo el acero con densidad de  $7850 \text{ kg/m}^3$ , elevado precio de producción, resistencia a agentes externos, gran capacidad de aislamiento térmico, resistencia a las variaciones de temperatura, conservando su forma, sólo si se utiliza matriz termoestable. Las razones del elevado precio de los materiales realizados con fibra de carbono se deben a varios factores: El refuerzo, fibra, es un polímero sintético que requiere un caro y largo proceso de producción. Este proceso se realiza a alta temperatura entre  $1100$  y  $2500 \text{ }^\circ\text{C}$  en atmósfera de hidrógeno durante semanas o incluso meses dependiendo de la calidad que se desee obtener, ya que pueden realizarse procesos para mejorar algunas de sus características una vez se ha obtenido la fibra. El uso de materiales termoestables dificulta el proceso de creación de la pieza final, ya que se requiere de un complejo equipo especializado, como el uso de una Autoclave [8]. Como valoración general de lo analizado en este capítulo, se aprecia que al analizar las vibraciones y tratar de atenuarlas, es de vital importancia atender las propiedades de los materiales que conforman los elementos involucrados y sobre todo de los soportes.

## Capítulo 2

### ANTECEDENTES.

#### 1. Antecedentes del análisis de vibraciones.

Las bases teóricas de este tema se presentan a continuación mediante los siguientes publicaciones.

Según J.E. Escalante Martínez y J.R. Laguna Camacho (2016) afirman que el análisis teórico y numérico en sistemas masa-resorte-amortiguador compara tres tipos amortiguadores hidráulicos. Un propósito es que sirva como apoyo a la formación de estudiantes de ingeniería y ciencias, en particular para quienes cursan la experiencia educativa llamada vibraciones mecánicas. El estudio de sistema del coeficiente viscoso de sistemas tienen influencia que ejerce la viscosidad del fluido y el valor del coeficiente de amortiguamiento viscoso es analizada mediante el empleo de tres fluidos, agua, aceite comestible y aceite para motor. Se realizan las simulaciones numéricas utilizando PPLANE y GeoGebra. Los resultados de estos estudios permiten la obtención del conocimiento y comprensión mayor de este fenómeno de las ondas vibratorias en sistemas mecánico de este tipo [55].

Jason R. Stack (2002) afirma que los elementos rodantes de un rodamientos que comienzan a fallar, producen frecuencias de falla características en la vibración de un máquina eléctrica. Las frecuencias de falla características tienden a modular las frecuencias resonancia mecánica y la natural de la máquina eléctrica. Por lo tanto, una modulación de amplitud. Es posible detectar una señal de amplitud modulada (AM), similar al biespectro. Esta nueva herramienta está especialmente diseñada para detectar instancias de banda AM, cuando la magnitud medida de la frecuencia de falla característica en sí no es de valor significativo (e.g. fallas incipientes en los rodamientos). Un versión normalizada de este detector también se presenta para ayudar en la interpretación de resultados. Mediante el uso de simulaciones por computadora, así como los datos reales de vibración en los cojinetes se utilizan para confirmar la potencia de esta herramienta como detector de AM propuesto para identificar fallas de rodamientos [56].

Por otro lado Johannes Kellner (2007) determina que los absorsores dinámico son muy usados en sistemas de estabilización de estructuras como edificios por la ingeniería civil se usa como una estrategia para suprimir las vibraciones con una masa aditiva sin usar ningún tipo de energía, conocidos como absorber reactivo. El mejoramiento de estos se restringe por la presencia de vibración, sin embargo se sigue usando de manera práctica. La curva de resonancia del absorber dinámico tiene dos picos del mismo nivel que depende de los coeficientes de amortiguamiento de la estructura. Un Amortiguador rígido es un absorber que disminuye las magnitudes los armónicos presentes. El amortiguador suave tiene ganancia de frecuencia antiresonante más bajo que el caso del amortiguador duro. Un control de conmutación semiactivo se propone para mejorar el sistema. El absorber dinámico se considera sobre la base de las respuestas de frecuencia utilizando filtro de paso de banda. Un control de conmutación semiactivo es implementado y arroja un buen rendimiento y adecuado para todo tipo de terremotos mediante, este sistema de control requiere el uso de simulación y experimentación visto en la figura 1. [58]

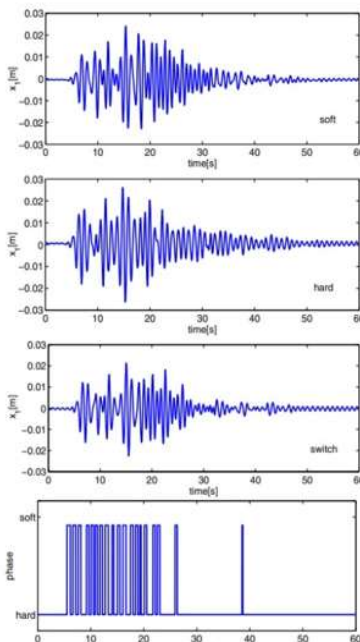


Figura 2.1 Resultados experimentales de un Absorber semiactivo.

También Naoto Abe (2006) determina que la tecnología basada en las características y el análisis de las señales de vibraciones es el método más utilizado en el proceso de diagnóstico de fallas en máquinas rotativas. En los últimos años, con el desarrollo de diagnóstico de fallas y tecnologías informáticas. La medición y análisis de vibraciones mediante el uso de instrumentos que están siendo desarrollados bastante rápido debido a sus ventajas como alta integración, multifunción, alto rendimiento y precio aceptable debido a una variedad de incontroladas o inesperadas razones, como error de fabricación, falla de instalación y error de operación. La fiabilidad de tales instrumentos se ha convertido en un tema importante porque afecta seriamente su función y medición de resultados. Se estudia un instrumento integrado de medición de señal de vibración multifuncional. Las posibles fallas se analizan utilizando el método de análisis de árbol de fallas (FTA) de acuerdo con las características de la estructura y funciones del instrumento visto en la figura 2.2. La confiabilidad de dos circuitos de medición y sus diferentes configuraciones se calculan y analizan comparativamente con respecto al costo. El resultado de este estudio es útil durante el diseño y el mantenimiento de tales instrumentos. [59].

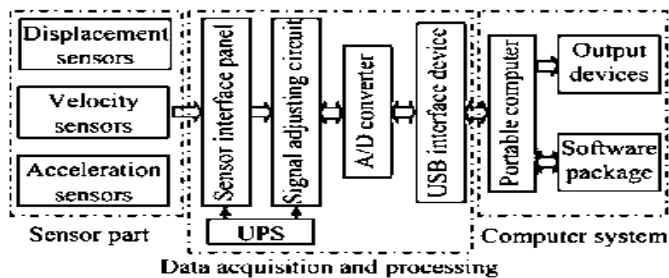


Figura 2.2. Sistema de medición de vibración en máquinas.

Xuejun LI y Guangfu BIN (2009) afirman que realizaron un estudio que presenta resultados de experimentos y análisis teóricos sobre sensores piezoeléctricos de tamaño pequeño, en los cuales la energía de las vibraciones mecánicas de la máquina se adquiere y convierte a señales eléctrica. Estos sensores piezoeléctricos fueron propuesto, como alternativa a una solución que usaba tradicionalmente una fuente de energía como alimentación al sensor, como un nodos de sensores en sistemas de monitoreo de análisis de máquinas rotativas grandes como turbogeneradores, en plantas de energía. Estudios iniciales realizados para tres sensores piezoeléctricos de tipo viga flexible presentan valores de señal eléctrica activa y el diseño de masa adecuada para evitar la resonancia mecánica. Al obtener el rendimiento del elemento piezoeléctrico y su configuración con la masa de la estructura estudiada, resultó insatisfactorio cuando se probó en condiciones reales en un turbogenerador, Al adicionar un interruptor sincronizado que usa la técnica de adquisición en elementos inductivo se ha aplicado recientemente para mejorar los niveles de energía generados. Los circuitos que se describen el figura 2.3 de un circuito de interfaz. Los resultados de laboratorio obtenidos confirman su utilidad en esta solución y son una base para un futuro trabajar en bloques de procesamiento de energía que funcionan con sensores piezoeléctrico [60].

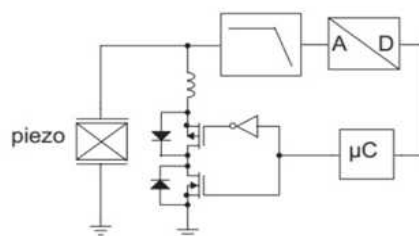


Figura 2.3 Diagrama a bloques del circuito de interfase del medidor de vibraciones.

Bartosz Pkosawski (2009) afirma en su artículo que el usos de controles activos y semiactivos de masa en sistemas rotativos y control de posición para el control de vibraciones en sistemas acoplados mecánicamente, en donde una trayectoria característica nominal llamada controlador (NCTF) para posicionamiento punto a punto (PTP). Un sistema rotativo de dos masas se evalúa y su rendimiento. En general, el controlador NCTF usado en estos sistemas consiste en proponer una trayectoria característica nominal (NCT) y un compensador. El objetivo del controlador NCTF es hacer que el objeto siga el movimiento de la NCT y termine en su origen. El controlador NCTF está diseñado en base a un simple circuito de lazo abierto experimental del objeto. Los parámetros y un modelo exacto de la planta no es necesaria para el diseño del controlador. Este controlador presenta un método para mejorar el controlador NCTF existente para sistema de posicionamiento rotativo de dos masas agregando un filtro tipo ranura como compensador para eliminar la vibración debido a la resonancia mecánica. A menudo pueden eliminar la resonancia sin comprometer el rendimiento. El controlador NCTF mejorado es evaluado y discutido en base a los resultados de la simulación visto en la figura 2.4. El efecto de los parámetros de diseño sobre la robustez del NCTF, controlador de inercia y variaciones de fricción se evalúa y en comparación con el controlador PID convencional. Se demuestra que el controlador NCTF mejorado es mejor que el tradicional controlador PID [61].



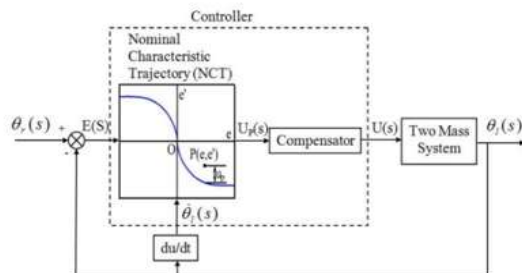


Figura 2.4 Estructura del NCTF con sistema de control de posición PTP .

Mohd Fitri Mohd Yakub (2010) en un análisis de vibraciones usando el método híbrido de diagnóstico de vibraciones en máquinas eléctricas es en la actualidad muy usado. Un estudio de vibraciones en máquinas eléctricas rotativas es un tema de investigación que casi siempre involucra matemática, modelado, identificación de modelos y análisis de señales, entre otros. Las fallas en motores y generadores modifican las señales de vibración. El uso de Redes Adaptativas basado en Fuzzy Inference System (ANFIS) propone un diagnóstico de máquinas eléctricas rotativas, porque es capaz de lograr aproximaciones consistentes del comportamiento de las máquinas cuando se enfrentan a una condición defectuosa o funcionando normalmente vista en la figura 2.5. Los resultados usando con mediciones reales son más valiosas y dan mayores expectativas para su uso a futuro [62].

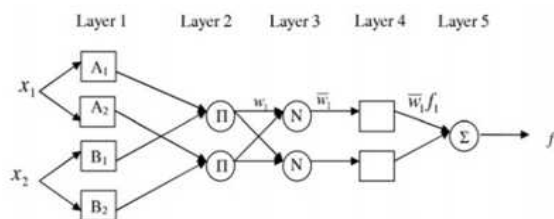


Figura 2.5 Red neuronal adaptiva.

Fredy A. Sanz y Juan M. Ramírez (2010) proponen un método de diagnóstico en una plataforma de análisis de fallas de máquinas rotativas basadas en vibraciones, es una plataforma para monitorear y diagnosticar fallas de manera sistemática en sistemas de máquinas rotativas. Las fallas de la máquina rotativa comúnmente son provocadas por fallas de desalineación de las flechas, defecto de la jaula del rotor, falla del rodamiento, defecto en bolas, falla de la pista externa e interna del rodamiento. El uso de la frecuencia de resonancia estructural, los criterios establecidos por la norma ISO 10816 para la evaluación de nivel de vibración, la evaluación de espectro para desalineación se identifican las fallas de los rodamientos visto en la figura 2.6. Además del diagnóstico de fallas, se debe incluir una acción para recomendar diferentes planes de mantenimiento de acuerdo a las condiciones de falla. Estos métodos forman la base de un sistema de diagnóstico basado en el conocimiento y los resultados han sido probados con éxito en una fresadora Hitachi Seiki de alta velocidad. La plataforma de diagnóstico minimiza la necesidad de intervención humana en el monitoreo y la detección de degradación [63].

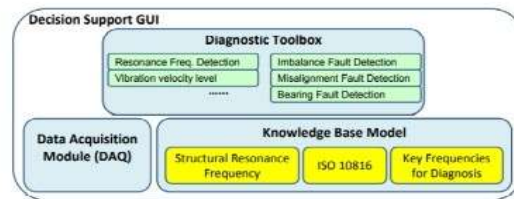


Figura 2.6 Arquitectura de la plataforma de diagnóstico.

Bohumil Skala y Vaclav Kus (2013) proponen un método usando la transformada de Hilbert para la vibración angular es indeseable incluso peligrosa. Este tipo de vibración provoca fuerzas adicionales y tensiones en el eje y de los acoplamientos. Si la frecuencia natural del eje está cerca a la frecuencia de operación o frecuencia de vibración angular, la amplitud puede aumentar a valores enorme (resonancia). Estas vibraciones pueden provocar un mal funcionamiento y daños graves. Las vibraciones angulares requieren medir la velocidad mediante la transformada de Hilbert para la medición angular de vibración de un máquina de inducción esquema visto en la figura 2.7. Cuando se usa un decodificador incremental rotatorio (encoder) como sensor de velocidad, es necesario procesar una señal de muy altas frecuencias en este caso, la transformación de Hilbert es útil figura 2.7 [64].

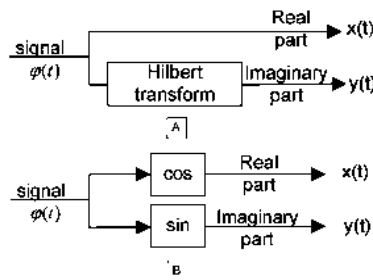


Figura 2.7 Alternativa a la transformada de Hilbert.

Wei Guo y Kesheng Wang (2013) proponen un método de extracción adaptativa. En ocasiones se usa método de extracción de señales en rodamiento de bolas este método de procesamiento de señal adaptativo usa un sensor para extraer una señal en un rodamiento que produce vibración. Los resultados de la experimentación que procesan una señal de vibración que es adquirida de un rodamiento con un defecto en una bola demuestra que el método de procesamiento de señal de control adaptativo es efectivo para extraer la señal espectral del rodamiento. Con el análisis de la envolvente espectral este tipo de defecto en rodamiento es identificado [65]. La falla del rodamiento es un problema en el proceso y el control industrial, y tiene un impacto significativo en el flujo de producción. El comportamiento de la maquinaria puede identificarse bien desde la fuerzas de fricción del rodamiento debido a la carga, y también el desgaste y fisuras de los rodamientos de bolas. La característica de este rodamiento de bolas puede predecir la naturaleza exacta de la carga y cualquier mal funcionamiento operativos en los equipos a futuro. Las señales generadas a partir de estos rodamientos pueden ser de cualquier tipo, es decir, sonido o vibración. El fenómeno acústico es difícil de predecir en un entorno ruidoso, donde los datos de vibración pueden usarse

cuando la acústica no puede ser la fuente de información. En general, el diagnóstico de falla en rodamientos se realiza mediante la comparación de los datos matemáticos interpretados con la señal de vibración. Este método solo puede ser aplicable a aquellos sistemas donde se conoce información completa sobre el rodamiento de bolas. Pero el papel que predice la falla en el rodamiento de bolas usando acústica y firmas de vibración sin conocer la información del rodamiento completo. El procesamiento de la señal se usa para la formulación matemática para predecir la falla en el rodamiento bajo diferentes estados. El análisis de señal usando la transformada rápida de Fourier FFT, puede analizar las señales de estado transitorios y estacionarios. La extracción y análisis de la señal transitoria puede realizarse usando la técnica de Descomposición en Modo Empírico (EMD). La acústica y la vibración se pueden usar para calcular la frecuencia de vibración en el rodamiento. El empleo de las frecuencias para acústica y vibración pueden ayudar a predecir la naturaleza de la señal y los defecto existente en el rodamiento. El resultado del análisis de falla muestra que la banda de frecuencias es de alrededor de 60 y 91Hz, es un rango típico. La respuesta de frecuencia menos defectuosas de la señal se toma como la señal de referencia para predecir la falla en el rodamiento. Los rodamientos defectuosos tendrán mayor frecuencia debido a la fricción y el valor deseado depende de la selección exacta del número de Intrinsic Mode Functions (FMI) para descomponer una señal. La respuesta de frecuencia de la señal debido al comportamiento transitorio será de mayor frecuencia y de orden, la banda será de valores alrededor de 170 y 215 Hz. respectivamente. La intensidad de esta frecuencias decidirán el tipo de la falla en el rodamiento, y la sobrecarga de los equipos mecánicos [66]. Irfan Anjum Manarvi y Muhammad Asim Qazi (2014) proponen un analisis de fallas en motores, por ejemplo el análisis de fallas en componentes automotrices basado en la norma J69-T-25A aplicable a este tipo de motores y permite la identificación de fallas debidas a ciertos componentes del motor, los criterios como la fiabilidad y el factor de servicio de motores turbinas a reacción en industria de la aviación es de suma importancia y es directamente relacionado con la seguridad del vuelo. El mantenimiento programado y los programas de inspección preventiva muy usadas en estos motores de turbina en todo el mundo. La vejez proporciona madurez de mantenimiento en un sistema, por otro lado requiere esfuerzos enfocados para garantizar la confiabilidad debido al factor de envejecimiento. J69-T-25A cae en la misma categoría que en servicio desde las últimas seis décadas. A pesar de todo el mantenimiento y esfuerzos, una variedad de defectos se presentan en estos motores algunos de los principales defectos incluyen las fluctuación de las RPM, ruido, nivel de aceite y vibraciones. El proceso de solución de problemas identifica una serie de los componentes pueden contribuir a estos problemas. El presente estudio se centró en el análisis de fallas de componentes basado en su frecuencia de falla. Los diez componentes que fallan más se encontró que incluían la unidad de control de combustible, delantera y trasera rodamientos, carcasa exterior e interior, la carcasa del compresor y turbina, distribuidor de combustible y retenes, se muestra el top de fallas en la figura 2.8 [67].

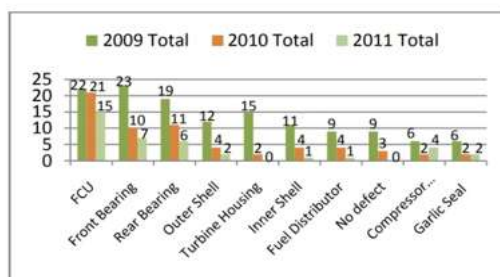


Figura 2.8 Top de falla en componentes.

Wen Zheng y Wang Pu (2015) proponen un análisis espectral basado en la transformada Wavelet. Otro tipo de diagnóstico basado en el análisis espectral con transformada Wavelet, en el caso de los ventilador y juega un papel insustituible en la ventilación de ambientes subterráneos. Causará graves consecuencias una vez que el sistema de ventilación falla. Por lo tanto, es esencial hacer un diagnóstico de fallas del sistema de ventilación para evitar la aparición de averías. El método de análisis espectral es un método simple y eficaz para el análisis de señales y ha sido ampliamente utilizado en el diagnóstico de fallas de maquinaria rotativa. Se analizan las fallas de sistemas de ventilación en base a un estudio en profundidad de las características de frecuencia de las fallas típicas de un ventilador. El ruido de alta frecuencia de la señal de vibración se ha eliminado mediante el método de umbral suave Wavelet y el uso de esta transformada obteniendo el espectro de característica de la señal reconstruida, luego la categoría de falla de la señal, se discriminan al comparar sus característica de frecuencia a fallas típicas en teoría. Combinando las herramientas de LABVIEW y MATLAB, se implementa el algoritmo a través de dos de ellos, logrando el análisis de ruido y el espectro de señales de vibración, completando el diagnóstico de fallas del sistema de ventilador. En ingeniería práctica, la señal útil suele ser caracterizada por baja frecuencia, pero la señal de ruido generalmente se caracteriza por alta frecuencia. La señal de vibración se puede eliminar mediante filtrado de Wavelets y reconstrucción de señal. El análisis Wavelet es una nueva teoría matemática y método desarrollado desde mediados de la década de 1980. Es un método de análisis local de frecuencia de tiempo cuyo tamaño de ventana (es decir, el área de la ventana) es fija pero la forma del tiempo y la frecuencia puede ser cambiada. El análisis de Wavelet se llama "microscopio matemático", con mayor resolución de frecuencia y menor resolución de tiempo en la parte de baja frecuencia. Por otro lado, mayor resolución de tiempo y menor resolución de frecuencia alta. El análisis Wavelet es un método que tiene adaptabilidad con la señal y es el desarrollo y continuación del análisis de Fourier con los objeto de investigación se descompone a diferentes escalas de espacio para el análisis y el proceso mediante la transformación Wavelet, y luego se refactoriza de acuerdo con la demanda de la investigación. El análisis Wavelet de la señal es ponderar o filtrar la señal a través de la función Wavelet [68].

Maciej Orman, Pawel Rzeszucinski y Agnieszka Tkaczyk (2015) proponen un sistema de detección de fallas usando el micrófono de un teléfono celular inteligente. La detección de fallas en rodamientos con el uso de acústica y señales grabadas en un teléfono móvil, son sistema desarrollados para elaborar herramientas poderosa mediante un teléfono el cual cuenta con un poder de procesamiento y desarrollo respetable. Es bien sabido que los rodamientos son los elementos más frecuentes propensos a defectos y fallas en motores eléctricos. El porcentaje de fallas de rodamientos vs. otras fallas es aún más significativo en el caso de motores de bajo voltaje. Al mismo tiempo, el diagnóstico de elementos de rodamientos constituye una parte bien establecida de condición y monitoreo en maquinaria rotativa. En muchos casos, el costo de instalar un acelerómetro de alta gama, esto es un sistema de monitoreo de la condición del rodamiento, que actualmente es el enfoque más común en la industria, podría ser difícil de justificar maquinaria no crítica debido al período de recuperación potencialmente largo de la inversión. Por lo tanto, todavía el primer diagnóstico es a menudo realizado por el oído humano y la evaluación de la naturaleza de la sonido emitido en motores eléctricos, es típicamente el sonido anormal o excesivo que se reconoce por primera vez por los operadores como indicador de funcionamiento defectuoso del motor condición. La posibilidad de realizar monitoreo de la condición de los rodamientos del elemento rodante basado en señales acústicas grabadas por un estándar y de fácil acceso mediante un teléfono móvil. La dificultad principal en el uso del micrófono integrado en el teléfono móvil para el diagnóstico de maquinaria giratoria es el hecho de que la respuesta de frecuencia del móvil el micrófono del teléfono es muy pobre (por debajo de 200 Hz) donde típicamente las frecuencias de falla del rodamiento se encuentran en esta banda. Los resultados parecen indicar que dado que se adopta un enfoque de procesamiento de señal apropiado, es posible indicar la presencia de fallas en los rodamientos. Los elementos de rodamientos que se mueven pueden sufrir cuatro tipos de factores fundamentales de fallas o la combinación de ellas:

- Falla de la pista exterior donde la superficie de la pista exterior de el rodamiento desarrolla una falla.
- Falla de la pista interna donde la superficie de la carrera interna de el rodamiento se deteriora.
- Falla del elemento rodante donde el elemento rodando operando entre la pista interna y la externa desarrolla una falla.
- Frecuencia de la jaula, donde la jaula que contiene elementos rodantes las bolas se dañan.

El análisis acústico ha atraído cada vez más atención y se ha aplicado en muchos campos, por ejemplo, reconocimiento de voz, sin embargo, todavía muy raramente se aplica en entorno industrial con fines de propósito de monitoreo. Podría ser difícil de justificar su uso en maquinaria no crítica debido al período de recuperación potencialmente largo de la inversión, típicamente los basado en acelerómetros piezoeléctricos. Los sistemas también son ampliamente aceptados en la industria como un estándar ya que no sufren tanto ruido de fondo como sistema basado en micrófono. Sin embargo, para sistemas no críticos y aplicaciones menos costosas. La motivación es permitir el servicio in situ. Un técnicos para que pueda utilizar a diario un teléfono móvil para fines de diagnóstico, tanto en términos de datos adquisición, así como procesamiento de señal en el mismo teléfono se reduce significativamente el costo de dicho servicio. Todos los miembros hoy en día usan un teléfono móvil moderno e inteligentes, como servicio personal para fines de comunicación, al mismo tiempo los micrófonos integrados utilizados para teléfonos normales las llamadas tienen características operativas, como el muestreo frecuencia de 44.1 kHz que permite señales acústicas relacionadas con las operaciones de maquinaria rotativa en la figura 2.9 podemos ver un fallo de una pista. [69].



Figura 2.9 Fallo sembrado en la pista exterior del rodamiento.

Han Zhang, Xuefeng Chen, Zhaohui Du y Meng Ma (2016) proponen un método de diagnóstico con el uso de las redes neuronales en el análisis de rodamientos son componente clave en maquinaria rotativa y su estado de funcionamiento tiende a afectar la confiabilidad y vida útil del equipo. La forma tradicional de asegurar la productividad es reemplazar los rodamientos con regularidad, que es un desperdicio de recursos y podría aumentar los costos de mantenimiento, debido a la gran discreción de la vida útil de los rodamientos. Entonces cambiando las prácticas de fallar y corregir en un sistema de predicción y prevención, este es el método más efectivo. En la actualidad, la forma común utilizada para el diagnóstico de fallas de los rodamientos es análisis de señales de vibración. Mediante un algoritmo local de descomposición (LMD) para descomponerse de forma autoadaptativa la señal de vibración en varios componentes PF, y calcular el espectro de potencia de cada componente PF, y extrae la suma del valor de potencia a la frecuencia característica, banda de fallos de la pista interna, falla de la pista externa, falla del elemento rodante. La suma del valor de potencia se usa para entrenar la red neuronal BP. Y los resultados experimentales muestran que la red neuronal BP entrenada de esta manera tiene una alta capacidad de clasificación. El algoritmo para extraer la función de falla de la señal de muestreo se denomina algoritmo de descomposición media local (LMD). En este caso se utiliza MATLAB para realizar la aplicación de LMD y descomponer los datos de muestra seleccionados en un número finito de componentes PF, y analizar el

espectro de potencia de la función de amplitud instantánea de cada componente PF. La variable independiente del espectro de potencias es la frecuencia, y la variable dependiente es amplitud. La amplitud cerca de la frecuencia característica de la falla del rodamiento debe ser prominente y fácil de extraer las características de falla. Después de buscar el valor de potencia de frecuencia característica de falla de los datos de muestreo del rodamiento, en este caso se utiliza una red neuronal para realizar un juicio adaptativo sobre las partes específicas de la falla por su clasificación de patrones características. Al principio, se selecciona una parte de la información característica de falla para entrenar la red neuronal y establecer la esperada salida de la red. Luego se elija una parte de las características de falla como las muestras de prueba para la red neuronal de entrenada. Finalmente contrastar la prueba de salida y la salida esperada. Cuanto más cerca están los dos resultados, cuanto mayor es la tasa de reconocimiento de la red neuronal [70].

En análisis de vibración espacial rotativa propuesta recientemente (RSV) un sistema de corte de diamante asistido, se usa un sensor piezoeléctrico vibrador espacial accionado como circuito monolítico integrado (CSV), que genera tres señales de vibraciones con alto ancho de banda de trabajo, está diseñado deliberadamente para trabajar en el husillo giratorio de una máquina (fresadora). Utilizando un método de modelado de cumplimiento basado en una matriz y el principio Lagrangiano, el modelo completos y dinámica del sistema de CSV están integrados. Los resultados del modelado analítico se validan aún más en comparación con los resultados obtenidos a través de análisis de elementos finitos. Se realizaron pruebas experimentales fuera de línea para investigar las fallas reales, considerando las señales parásitas, así como las frecuencias naturales del CSV a lo largo de sus tres ejes de trabajo. Una evaluación preliminar del desempeño del desarrollado de un sistema de corte de diamante asistido por RSV para la generación de complejas micro y nano-estructuras multi-nivel se realizó para demostrar la viabilidad y eficiencia del sistema RSV para micro mecánica / nano-maquinado. Los resultados arrojan buenos aportaciones en el campo del análisis de señales y la creación de nuevos sistemas embebido para este propósito [71].

Constantin VILCU y Filip NICULESCU (2017) proponen un sistema proactivo, el sistema HolderCPS es un nuevo tipo de sistema de grabado de datos para el mantenimiento proactivo de palas giratorias en máquinas. Basado en una innovadora arquitectura, el sistema tipo Holder contribuye a la máquina diagnóstico de equipos y advertencias tempranas sobre posibles fallas en el funcionamiento de la máquina. El sistema puede determinar, en tiempo real, las causas de las advertencias y las paradas emergencia de las máquinas, para evitar posibles fallas, o el renderizado inapropiado de la máquina. Estas causas pueden ser establecidas mediante el monitoreo de los parámetros críticos de la máquina: vibraciones, temperatura y calidad del lubricante. Configuración del sistema HolderCPS, junto a la elementos giratoria máquinas, aumenta la fiabilidad de la máquina mediante un mantenimiento centrado en la fiabilidad. Como tal, los datos recopilados y procesados en la base de algoritmos relacionados con sistemas de la mecánica de alta velocidad, permiten el diagnóstico local del estado actual de la máquina o transferencia de datos, por conexión remota, a un laboratorio donde se puede realizar un análisis fuera de línea un diagrama a bloques de este sistema se muestra en la figura 2.10 y 2.11 [72].

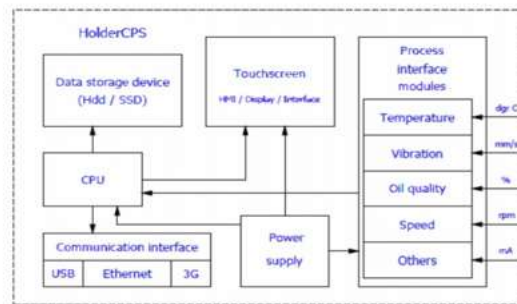


Figura 2.10 Diagrama a bloques del sistema de gravado HolderCPS.

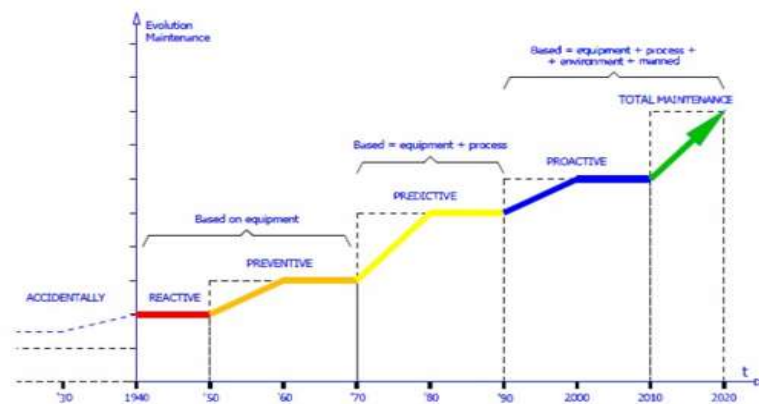


Figura 2.11 Evolución del mantenimiento en el tiempo de máquinas rotativas.

Vijay A. Gore y Sonal P. Sali (2017) proponen un análisis experimental de optimización del uso de materiales de impactos y vibraciones (SV) mejora la durabilidad del motor y otras máquinas en funcionamiento reduciendo desplazamientos no deseado. Estos sistemas se usa ampliamente para aislar maquinaria (industrial y marina), ingeniería civil estructura (base de aislamiento en edificios, puentes, etc.) y componentes sensibles desde la base /cimentación. Además de lo anterior, en máquina vehículo, marina y alguna industrial así como aplicación en sísmica, también se espera que los aisladores disminuyan los impacto o choques de objeto de la cimentación al aislador y viceversa. Como el silicón es suave y material viscoelástico tiene una combinación única de como elástico y las propiedades viscosas (amortiguación) lo hacen un material muy útil para montaje SV. Generalmente el montaje SV consiste en caucho vulcanizado unido a una parte metálica que facilita la carga distribución e instalación. Para este trabajo de desarrollo, el elastómero la silicona de nitrilo butadieno hidrogenado (HNBR) es utilizada como parte del soporte que absorbe los golpes y las vibraciones. El elastómero se puede diseñar para obtener mejores propiedades mecánicas con una vida útil mejorada. Las vibraciones influyen principalmente en el rendimiento de estructuras de ingeniería y reduce su vida. En amortiguamiento la energía mecánica del sistema vibratorio se convierte en calor energía mediante algún mecanismo de disipación. Muchos tipos de mecanismos de amortiguación se han desarrollado para controlar las vibraciones indeseadas de estructuras. El tratamiento de amortiguación pasiva es una de las formas de controlar la vibración y el ruido en las estructuras. Los

métodos comunes de control pasivo que incluyen el uso de silenciadores, amortiguadores, barreras, etc. son usados para el controlar el ruido. Los materiales viscoelásticos son uno de los que exhiben características del material tanto del fluido viscoso como del sólido elástico capaz de almacenar energía de deformación cuando se deforma. Gran variedad de polímeros desde gomas sintéticas y naturales hasta varios materiales termoestables y termostatos poseen amortiguación viscoelástica. Estas propiedades se utilizan en diferentes industrias vistas en la figura 2.12 [73].

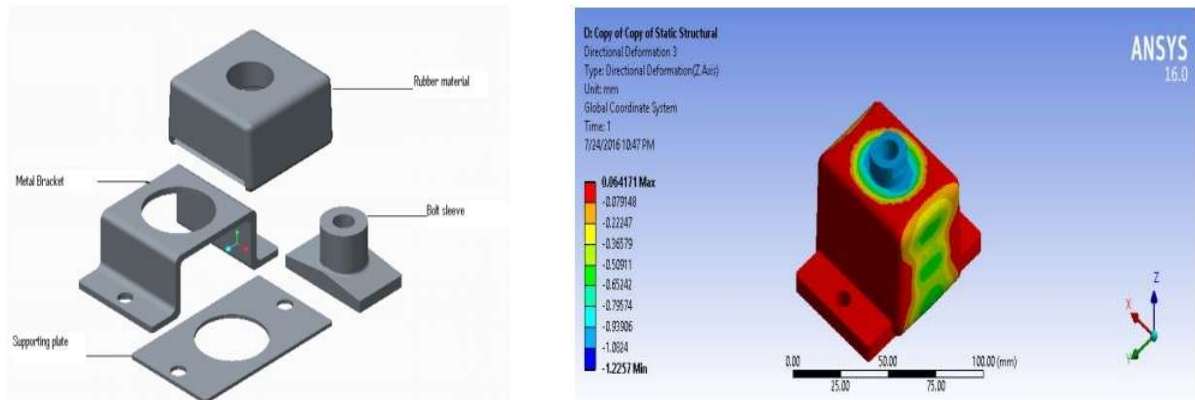


Figura 2.12 Análisis estructural estático del soporte aislador de vibraciones basado en silicona.

Ricardo González Alcorta y Efraín Grajales Vargas (2002) proponen un sistemas de aislamiento de base para estructuras de soporte de maquinaria rotatoria. Las estructuras industriales presentan problemáticas inherentes al tipo de ambiente y cargas características, el deterioro por exposición a agentes agresivos y a vibraciones excesivas en estructuras de soporte de equipos. Los fundamentos teóricos para un adecuado dimensionamiento del sistema de aislamiento de maquinarias rotatorias, debe considerar aspectos como la capacidad de carga, frecuencia natural del aislador y sistema de soporte, así como la frecuencia de operación de la maquinaria. Se concluye que, con un adecuado diseño, estos sistemas de aislamiento pueden abatir significativamente la respuesta de un sistema vibratorio. Los sistemas de aislamiento para maquinaria están disponibles en una amplia variedad de diseños no obstante, todos tienen la característica en común que son el medio que conecta el sistema de soporte y la maquinaria. La elección del aislador dependerá de la frecuencia o frecuencias del conjunto estructural que se deseen modificar. Los aisladores pueden ser placas de neopreno, goma, corcho, fieltro, resortes de metal o algunos otros materiales resistentes, generalmente colocados directamente bajo la maquinaria o bajo el bloque base-cimentación (ver figura 2.13). En otros casos, la maquinaria se coloca sobre el bloque y éste se mantiene suspendido como un péndulo, soportado por los aisladores de vibración. En cualquier caso, el aislador debe tener un apropiado diseño, con base en el concepto de transmisibilidad. Un sistema reciente de aislamiento de vibración es el uso de resortes neumáticos, tal como se utilizan en la suspensión de los vehículos. Estos aisladores son utilizados para una variedad de maquinarias que originan vibración [74].





Figura 2.13. Aisladores de neopreno en maquinaria rotatoria.

Edgar Estupiñan y Pedro Saavedra (2002) refieren que la señal de vibración emitida por un rodamiento puede contener componentes espectrales que están relacionadas con la geometría del rodamiento, el número de elementos rodantes, la velocidad de rotación, la ubicación del defecto y el tipo de carga aplicada; lo cual marca la diferencia con un apoyo de tipo hidrodinámico. Es de gran importancia en la industria moderna poder detectar defectos en los rodamientos de las máquinas críticas en una etapa incipiente de falla. Mediante el uso de las técnicas modernas de análisis de vibraciones incluidas en analizadores comerciales, es posible detectar defectos en los rodamientos en su etapa incipiente. Las técnicas utilizadas para el análisis como la técnica de demodulación o envolvente, el método de Peakvue o detección del valor peak y el zoom real. Al comparan los resultados obtenidos con estas técnicas en ensayos de laboratorio para diferentes condiciones de carga y velocidad. Los rodamientos actúan como una fuente de ruido y vibración debido tanto a la variación de su volumen como a la presencia de defectos en ellos. Los defectos en los rodamientos se pueden clasificar como distribuidos y localizados. El hecho de que la distribución de carga varíe sobre los elementos rodantes a medida que éstos giran sobre las pistas de rodadura hace que los rodamientos se comporten por si mismos como un generador de vibraciones. Este comportamiento puede provenir tanto de rodamientos geoméricamente perfectos como de rodamientos con imperfecciones de manufactura, problemas de instalación, lubricación y condiciones ambientales inadecuadas o de algún otro factor que ayude a producir desgaste o fatiga. En análisis de vibraciones todas las máquinas tienen un nivel de vibración que puede ser considerado normal o inherente a su funcionamiento. Cuando este nivel aumenta y empieza a ser excesivo, es normalmente el síntoma de la presencia de una falla. Debido a la presencia de defectos localizados, se producen cambios abruptos en los esfuerzos de contacto en las interfaces, lo cual resulta en la generación de pulsos de muy corta duración, que pueden excitar las frecuencias naturales de las pistas y soporte del rodamiento (Figura 2.14) [75].

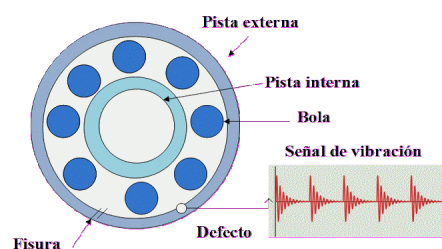


Figura 2.14. Generación de impactos por la presencia de un defecto.

La empresa ADEMINSAC (2002) propone la siguiente Carta de diagnostico de vibraciones para el analisis de las vibraciones causa y efecto. *El desbalance estático estará en fase y estable.* La amplitud debido al desbalance aumentará por el cuadrado de la velocidad incrementada estando por debajo de la primera crítica del rotor (un incremento de velocidad de  $3X =$  una vibración a  $9X$  mayor).  $1X$  RPM siempre estará presente y por lo general domina el espectro. Puede ser corregido colocando un solo peso de corrección de balance en un plano en el Centro de Gravedad del rotor (CG). Una diferencia de fase aproximadamente de  $0^\circ$  debe existir entre los horizontales OB&IB, así como entre las verticales OB&IB. Usualmente también ocurre una diferencia de fase aproximadamente de  $90^\circ$  entre las lecturas de fase horizontal y vertical en cada rodamiento del rotor desbalanceado ( $\pm 30^\circ$ ) figura 2.15A.

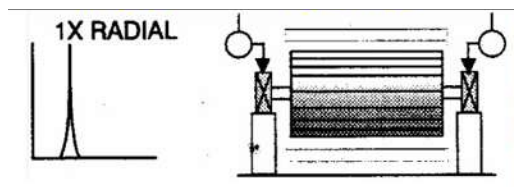


Figura 2.15A El desbalance estático.

*Un desbalance de un par de fuerzas* resulta en un desfase de  $180^\circ$  del movimiento en el mismo eje.  $1X$  RPM siempre esta presente y normalmente domina el espectro. La amplitud varía por el cuadrado de la velocidad incrementada por debajo de la primera velocidad crítica del rotor. Puede causar una alta vibración axial así como radial. La corrección requiere la colocación de los pesos de balanceo en al menos 2 planos. Note que debe existir una diferencia aproximada de  $180^\circ$  entre las horizontales OB&IB así como entre las verticales OB&IB. También usualmente ocurre una diferencia aproximada de  $90^\circ$  entre las lecturas horizontal y vertical en cada rodamiento ( $\pm 30^\circ$ ) figura 2.15B.

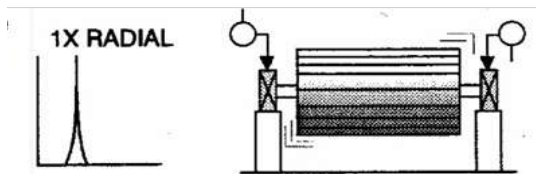


Figura 2.15B El desbalance de un par de fuerzas.

*El Desbalance dinámico* es el tipo de desbalance que se presenta más comúnmente y es una combinación de desbalance estático y de par de fuerzas.  $1X$  RPM domina el espectro y realmente necesita una corrección en 2 planos. Aquí la diferencia de fase radial entre los rodamientos externos e internos puede estar en cualquier lugar del rango entre  $0^\circ$  y  $180^\circ$ . Sin embargo, la diferencia de fase horizontal debe cuadrar usualmente con la diferencia de fase vertical, cuando se comparan las mediciones de los rodamientos externos e internos ( $\pm 30^\circ$ ). Si el desbalance predomina una diferencia de fase de  $90^\circ$  resulta entre las lecturas horizontal y vertical de cada rodamiento ( $\pm 40^\circ$ ) figura 2.15C.

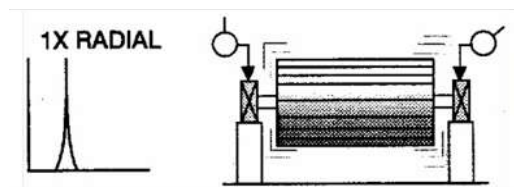


Figura 2.15C El desbalance dinámico.

El desbalanceo de rotor en voladizo causa un alto armónico 1X RPM en las direcciones axial y radial. Las lecturas Axiales tienden a estar en fase mientras que las lecturas de fase Radial pueden estar inestables. Sin embargo, las diferencias de fase Horizontal usualmente cuadran con las diferencias de fase Vertical en el rotor desbalanceado ( $\pm 30^\circ$ ). Los Rotores en Voladizo tienen desbalances Estáticos y de Par de Fuerzas, cada uno de los cuales requiere una corrección. Así, los pesos de corrección casi siempre tendrán que ser colocados en dos planos para contrarrestar ambos desbalances, el estático y el de par de fuerzas figura 2.15D.

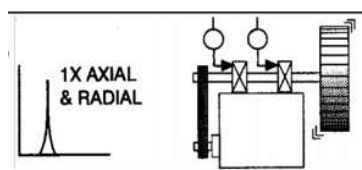


Figura 2.15D El desbalanceo de rotor en voladizo.

La *excentricidad del rotor* ocurre cuando el centro de rotación está fuera de la línea de centro geométrico de una polea, engranaje, rodamiento, armadura del motor, etc. La vibración mayor ocurre en el armónico 1X RPM del componente excéntrico en una dirección a través de la línea que une el centro de ambos rotores. Comparativamente, las lecturas de fase horizontales y verticales usualmente difieren  $0^\circ$  ó  $180^\circ$  (cada una de las cuales indica el movimiento en línea recta). El intentar balancear un rotor excéntrico resulta en reducir la vibración en una dirección radial pero incrementarla en la otra (dependiendo de la cantidad de excentricidad) figura 2.15E.

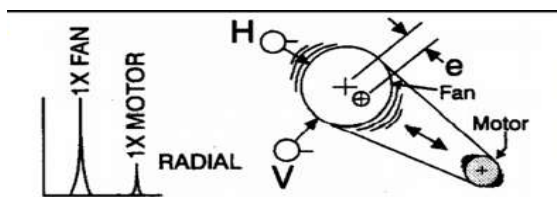


Figura 2.15E Rotor excéntrico.

Los *problemas de eje doblado* causan una alta vibración axial con una diferencia de fase axial a  $180^\circ$  en el mismo componente de la máquina. La vibración dominante ocurre normalmente por la presencia del armónico 1X, si está doblado cerca del centro del eje, pero se presenta el 2X si está doblado cerca del acople. (Ser cuidadoso al tomar en cuenta la orientación del transmisor para cada medición axial si usted voltea la dirección de la probeta). Use un indicador de dial para confirmar el doblado de eje figura 2.15F.

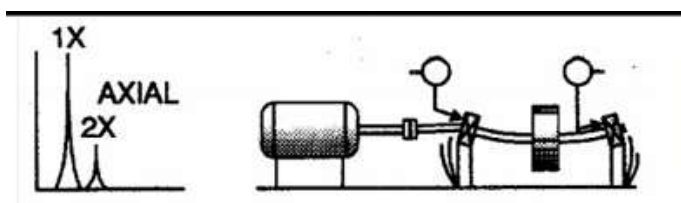


Figura 2.15F Eje doblado.

La *desalineación angular* se caracteriza por una alta vibración axial,  $180^\circ$  fuera de fase a través del acople típicamente tendrá una vibración axial en los armónicos 1X RPM y 2X RPM. Sin embargo no es inusual que tanto 1X, 2X ó 3X dominen en magnitud. Estos síntomas también pueden indicar problemas de acople. Una severa desalineación angular puede excitar muchos armónicos de 1X RPM. A diferencia de la soltura mecánica, estos múltiples armónicos no tienen típicamente un incremento de ruido en el piso del espectro figura 2.15G.

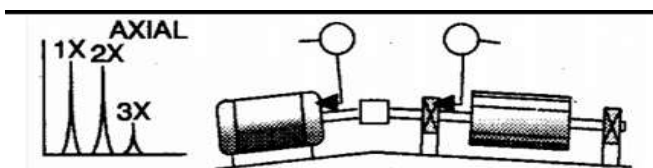


Figura 2.15G Desalineación angular.

La *desalineación paralela* posee síntomas de vibración similares a la angular pero muestra una alta vibración radial que se aproxima a  $180^\circ$  fuera de fase a través del acople. 2X es por lo regular mayor que 1X, pero su altura respecto a 1X es por lo general debida a el tipo de acople y construcción de este. Cuando cualquier desalineación, angular o radial, se vuelve severa, puede generar tanto picos de gran amplitud a altos armónicos del orden de (4X-8X) como también toda una serie de armónicos de alta frecuencia, similares en apariencia a la soltura mecánica. El tipo de acople y el material influyen de gran manera a todo el espectro cuando la desalineación es severa. No presenta por lo general un incremento de ruido en el piso del espectro figura 2.15H.

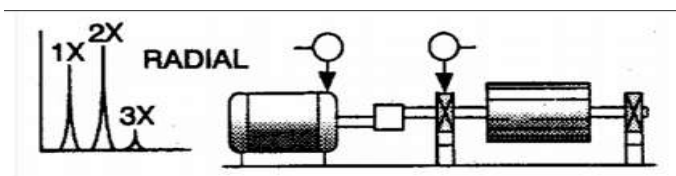


Figura 2.15H Desalineación paralela.

Un *rodamiento inclinado* genera una vibración Axial considerable. Puede causar un movimiento torsional con un cambio de fase aproximado de  $180^\circ$  de arriba a abajo y/o de lado a lado cuando se mide en dirección axial de la misma carcasa del rodamiento. Intentos de alinear el acople o balancear el rotor no aliviara el problema. Es necesario remover el cojinete e instalarlo correctamente figura 2.15I.



Figura 2.15I Desalineación de rodamiento inclinado sobre el eje.

La *resonancia* ocurre cuando una frecuencia forzada coincide con una frecuencia natural del sistema, y puede causar una amplificación dramática de las amplitudes, lo que puede resultar en una falla prematura o

incluso catastrófica. Esta puede ser una frecuencia natural del rotor, pero a menudo puede ser originada por el bastidor, la cimentación, caja de engranajes e incluso las correas de transmisión. Si un rotor esta o se aproxima a la resonancia puede ser prácticamente imposible balancearlo debido a el enorme cambio de fase que experimenta (90° en resonancia, cerca de 180° cuando la atraviesa). A menudo requiere el cambio de la frecuencia natural a una frecuencia mayor o menor. Generalmente las frecuencias naturales no cambian con un cambio en la velocidad, lo que ayuda a su identificación (exceptuando una máquina con cojinetes de gran tamaño o un rotor que tenga un voladizo significativo) [76].

El objetivo del uso de los aisladores de vibraciones es aislar un sistema de interés introduciendo un elemento de este tipo. Por ejemplo aisladores de cimentación y base de máquinas y sistemas de suspensión de vehículos figura 2.17. Se identifican 2 tipos de aislamiento: aislamiento de fuerzas y el aislamiento de movimientos. En ambos casos se define el concepto de transmisibilidad como fundamental para identificar su funcionamiento. Donde  $m$ : máquina,  $s$ : aislador visto en la figura 2.16.

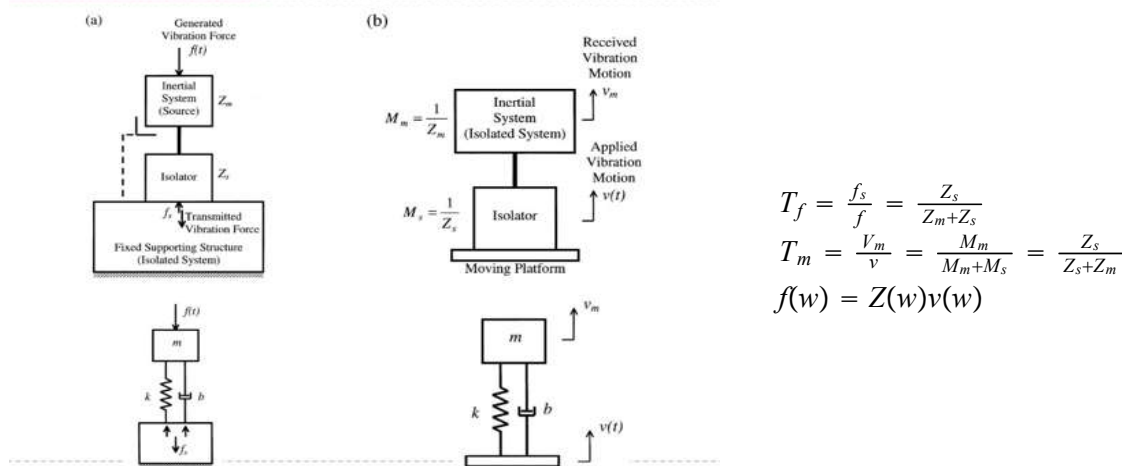


Figura 2.16 Sistema de control pasivo bajo fuerzas externa(a) , sistema recibiendo una vibración de movimiento(b).

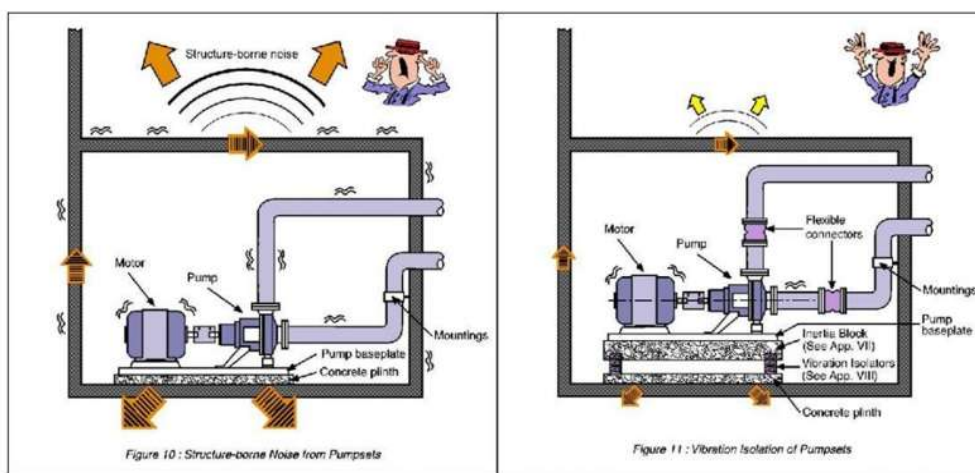


Figura 2.17 Ilustración de la propagación de las ondas vibratorias en un sistema de máquinas giratorias y accesorios.

El control de vibraciones tiene 2 categorías: control pasivo y control activo. La primera usa controladores pasivos, es decir aquellos que no requieren de potencia externa. En estos dispositivos el sensado está implícito y el control se produce por una fuerza generada por la vibración del dispositivo. Dos ejemplos comunes son: el absorber de vibraciones y los amortiguadores. El control pasivo de vibraciones es relativamente simple y directo. Se sabe también que es robusto, confiable y económico, pero tiene sus limitaciones. Una vez diseñado el dispositivo ( $m$ ,  $c$  y  $k$ ), no es posible ajustar las fuerzas de control generadas naturalmente en tiempo real. Esto se puede solucionar usando control activo, donde la respuesta del sistema es adquirida y con esta información se producen acciones de control, de valores específicos, son aplicadas al sistema a controlar visto en la figura 2.18 [77].

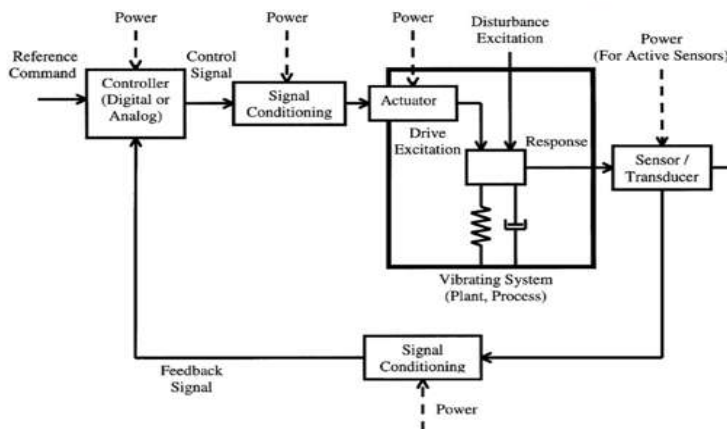


Figura 2.18 Sistema de control activo de vibraciones.

La prevención de posibles fallas en maquinarias es necesaria para una operación confiable y segura de una instalación. El riesgo de fallas y el tiempo en que una maquinaria queda fuera de servicio puede disminuirse sólo si los problemas potenciales son anticipados y evitados. Una de las herramientas fundamentales con que se cuenta en la actualidad para el mantenimiento predictivo de una planta o instalación es la medición y análisis de vibraciones. Se deberá realizar una breve descripción de los tipos de fallas normalmente detectables a través de la medición y análisis de vibraciones en base a esto se presentará solución concretas de aplicación de esta técnica, en una maquina rotativa convencional, y el otro en una maquinaria no convencional, como lo es el eje de un acelerador de iones.

FRECUENCIA	CAUSAS PROBABLES DE FALLA
1 x RPM	Desbalanceo, engranajes o poleas descentradas, desalineamiento o eje flexionado, resonancia, problemas eléctricos, fuerzas alternativas.
2 x RPM	Huelgos o juegos mecánicos, desalineamiento, fuerzas alternativas, resonancia.
3 x RPM	Desalineamiento, combinación de huelgos mecánicos axiales excesivos con desalineamiento
< a 1 x RPM	Remolino de aceite (oil whirl) en cojinetes o rotores
Frec. de línea	Problemas eléctricos
Armónicas de RPM	Engranajes dañados, fuerzas aerodinámicas, fuerzas hidráulicas, huelgos o juegos mecánicos, fuerzas alternativas
Alta frecuencia (no armónicas)	Cojinetes antifricción en mal estado

SEVERIDAD DE VIBRACIÓN RMS [mm/seg]	TIPO DE SOPORTE	
	RÍGIDO	FLEXIBLE
0,46	Buena	Buena
0,71		
1,12		
1,8	Satisfactoria	Satisfactoria
2,8		
4,6		
7,1	No Satisfactoria	No Satisfactoria
11,2		
18,0	Inaceptable	Inaceptable
28,0		
71,0		

Figura 2.19 Criterios de severidad, armónicos presentes y causas de vibraciones.

Los lineamientos básicos se deben tener en cuenta en el análisis de vibraciones en maquinarias como herramienta tanto para la predicción como para el diagnóstico de fallas en maquinarias junto con los casos de aplicación práctica. En general los gastos de mantenimiento representan entre un 15 y un 40% de los costos totales de producción tanto en industrias manufactureras como de procesos, y que resulta posible obtener disminuciones de entre el 20 y 50% de esos costos de mantenimiento trabajando con inteligencia: sin comprar partes innecesarias, aumentando la vida útil de las maquinarias y disminuyendo el consumo de energía como resultado de la disminución de las vibraciones y el ruido. Todo esto puede lograrse a través de un plan racional de medición y análisis de vibraciones en las maquinarias [78].

Evelio Palomino Marín y Yanexi Cepero Aguilera (2011) realizaron un análisis de la eficiencia del sistema de aislamiento de vibraciones. Todo sistema de aislamiento de vibraciones está encaminado en primera instancia a aislar vibraciones como su propio nombre lo indica. En ocasiones es menester que a la máquina no la perturben vibraciones procedentes del entorno, como lo puede ser por ejemplo, el caso de una rectificadora en un taller de mecanizado. Así mismo, en otras ocasiones resulta necesario aislar la máquina para evitar que las vibraciones producidas por ella misma afecten al entorno. Tal es el caso de los grupos electrógenos MAN 18 V48/60 B, cuyos motores de combustión interna responden a un diseño de 18 cilindros en “V” distribuidos en 13 metros de longitud visto en la figura 2.20. El sistema de aislamiento de estos motores consta de 14 paquetes de ocho resortes cada uno, incluyendo un amortiguador viscoso por cada calzo. Se efectuaron mediciones espectrales de vibraciones en cada uno de estos calzos antivibratorios, sobre y debajo de estos respectivamente y se evaluó la eficiencia de estos calzos en todo el espectro, determinándose aquellas frecuencias que por determinadas razones no alcanzan los niveles de eficiencia en el aislamiento establecidos a tales efectos. De esta manera, se presenta una metodología para conducir este análisis.

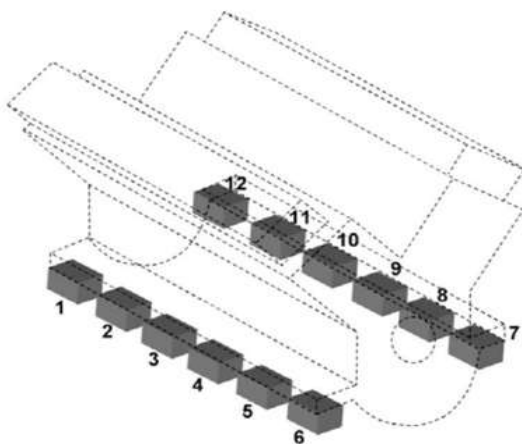


Figura 2.20 Distribución de los soportes o calzos antivibratorios de un motor de combustión interna V48.

La eficiencia del calzo o soporte de motor puede calcularse teóricamente en función de la relación entre la frecuencia de resonancia del sistema de aislamiento de vibraciones y la frecuencia de las vibraciones que necesitan ser aisladas. Sin embargo, es menester tomar en consideración que esta forma de calcular la eficiencia por su carácter teórico, es susceptible de ser afectada por un sinnúmero de factores prácticos y es por ello que sobre la base de las mediciones realizadas se aplicará la ecuación  $E_c(f)$  para estimar la eficiencia. Es decir, disponiendo de los registros espectrales de velocidad de las vibraciones en mm/s RMS

sobre y debajo de cada calzo respectivamente, se procede al cálculo de la eficiencia  $E_c(f)$  en el dominio de la frecuencia y expresada en por ciento visto en la *Eq. 1*, de cada uno de estos dispositivos. Se determinará esta eficiencia para todas y cada una de las frecuencias que componen los espectros de la transformada rápida de Fourier (FFT), además de ser una faena trabajosa, nos conduce a obtener resultados que permitan disponer de una idea clara del comportamiento del aislamiento y por tal motivo se decidió realizar el cálculo por bandas de octavas de frecuencia, en un rango de entre 6.3 Hz y 200 Hz, toda vez que los registros espectrales no mostraron información significativa más allá de la frecuencia de 200 Hz y tomando en cuenta que la velocidad de operación del motor de combustión interna es de 514 rpm. (8.56 Hz).

$$E_c(f) = \left(1 - \frac{V_d(f)}{V_a(f)}\right) \times 100\% \quad (\text{Eq. 1})$$

En todos los calzos, excepto en el caso del calzo No. 6, se obtienen niveles de eficiencia del sistema de aislamiento de entre un 86 % y un 99 % para las bandas de 6.3 Hz, 8 Hz y 10 Hz, lo cual resulta adecuado para una instalación industrial de este tipo. Es necesario verificar las condiciones de montaje del calzo No.6 y efectuar las correcciones pertinentes tabla 4, pues este calzo, en ocho de las 16 bandas analizadas, exhibe una eficiencia de menos del 80 %, sobre todo en la zona de bajas frecuencias que es donde se requiere de mayor eficiencia en el aislamiento. Resulta imprescindible crear las condiciones necesarias para colocar transductores sobre y debajo de los calzos identificados con los números 11 y 12, lo cual permita completar el análisis dinámico del sistema de aislamiento de vibraciones, toda vez que al momento de efectuar las mediciones no se pudo acceder a los calzos identificados con los números 11 y 12 [79].

Tabla 4 Eficiencia estimada para el sistema de aislamiento de vibraciones por banda de octavas en frecuencia para 10 de los 12 calzos objeto de análisis del sistema MAN18V48/60B.

Frecuencia Hz	Eficiencia 100%									
	Calzo No.									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
6,3	89	89	91	93	96	5	89	87	94	86
8,0	99	89	99	99	98	52	94	97	99	97
10,0	95	91	99	98	98	29	91	95	99	98
12,5	81	78	85	81	92	-78	77	78	88	82
16,0	98	86	93	87	93	70	91	87	91	71
20,0	89	90	91	87	96	63	91	80	85	83
25,0	89	96	95	82	97	75	98	96	92	40
31,5	95	92	98	96	95	82	97	93	96	95
40,0	96	97	98	97	99	89	97	97	92	94
50,0	95	97	96	96	99	82	97	98	95	96
63,0	97	96	98	96	99	86	94	94	95	95
80,0	96	96	97	98	99	95	97	97	96	95
100,0	96	92	95	95	97	89	94	95	95	96
125,0	96	96	97	98	98	95	93	96	95	96
160,0	96	93	96	92	89	95	73	65	87	88
200,0	80	74	87	96	90	57	95	95	92	90

## 2. Antecedentes de materiales flexibles aisladores de vibraciones.

Fue necesario realizar una revisión de los antecedentes en este tema.

Wang, Tianhuai Ding y Peng Wang (2008) realizan un análisis de los efectos de la presión en un compuesto flexible piezoresistivo, se analiza la relajación de la resistencia a la compresión del compuesto de caucho de silicona relleno de negro de carbón con diferentes contenidos. Los resultados experimentales muestran que el incremento repentino de la resistencia compuesta aumenta al aumentar la fuerza de compresión instantánea. Los datos experimentales para la relajación de la resistencia a la compresión y la relajación al estrés de compresión. Los coeficientes exponenciales de las funciones ajustadas aumentan con el aumento de la presión de compresión instantánea. El incremento repentino de la resistencia compuesta aumenta con el aumento de la presión de compresión instantánea. En la etapa de la relajación del esfuerzo de compresión, la resistencia compuesta y el estrés pueden ser ajustada por la combinación lineal de tres funciones



exponenciales negativas. La resistencia eléctrica del compuesto bajo presión cero es  $1.5 \text{ M}\Omega$ . La compresión induce aumento repentino de resistencia inmediatamente después de la compresión. Los compuestos tienen una red conductora tridimensional compuesta de partículas de negro de humo y la macromolécula de caucho, la red conductora es destruida por la compresión, lo que lleva a el aumento repentino de la resistencia compuesta. El grado de deformación de la red conductora aumenta con el aumento de la presión instantánea, lo que resulta en el aumento del grado de incremento en la resistencia compuesta. La tendencia al cambio de la compresión y la relajación del estrés es similar a la de la resistencia a la compresión visto en la figura 2.21 y la tabla 5 [80].

Tabla 5 Propiedades de la silicona y el carbón negro.

	Specific surface area ( $\text{m}^2/\text{g}$ )	pH	Heating loss (%)	Light transmittance of toluene (%)
Carbon black	320	6.8	2.0	100
	Dielectric constant	Hardness (shore)	Tearing resistance ( $\text{kg}/\text{cm}$ )	Dielectric strength ( $\text{kV}/\text{mm}$ )
Silicone rubber	3.0	35	4	18

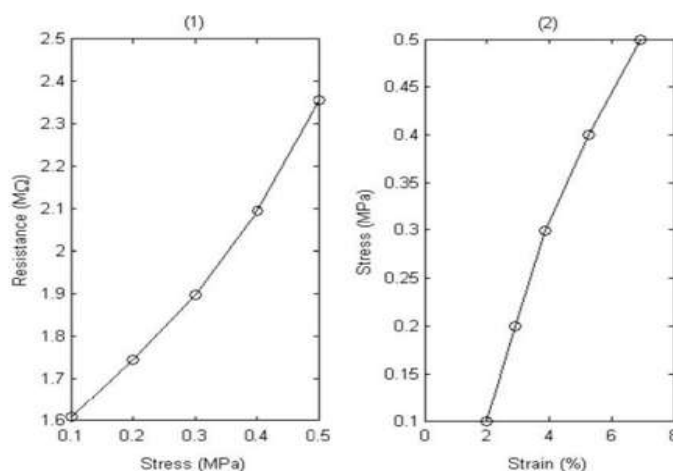


Figura 2.21 Relación entre los ensayos de resistencia eléctrica, compresión y tensión.

Ana Luísa Silva y Matheus Millen Correa (2017) proponen unos electrodos de silicona conductora dopada con grafito molido. Las resinas electroconductoras, pueden ser usadas para aplicaciones de fundición y revestimiento. La conductividad eléctrica de las resinas epoxi y poliuretano, compuestas con dos grados diferentes de grafito sintético de diferente tamaño promedio fue estudiado. Todos los compuestos investigados se volvieron electroconductores con un 22% en volumen del relleno. También se investigó la resistencia al impacto de las resinas de epoxi y poliuretano con adición de grafito. Una disminución en la resistencia al impacto se observó con un aumento en el contenido de adición en todos los casos. Se encontraron los valores más altos de resistencia al impacto para compuestos de poliuretano y grafito KS6. También se determinó la resistencia de adhesión de las resinas con el aluminio. Una disminución en la resistencia del adhesivo se observaron junto a las láminas de aluminio con un aumento en el contenido de relleno en todos los casos. Las juntas adhesivas más fuertes fueron logradas con los compuestos epoxi y grafito KS 6. Se determinó una concentración de percolación de resinas conductoras de la electricidad, rellenas con diferentes grados de grafito. Se determinó que la mejor es del 22% en volumen para todos los

compuestos investigados. El grado de grafito, así como el tipo de resina polimérica, no tuvo influencia significativa en ninguno de los dos. La concentración de percolación o conductividad eléctrica. Estos resultados fueron confirmados por mediciones de propiedades antiestáticas porque el material electrostático era obtenido después de alcanzar la concentración de percolación de grafito en el adhesivo compuesto. Una disminución en la resistencia al impacto con un aumento del contenido de relleno se observó en todos los casos. La mayor resistencia al impacto se presentó para los compuestos de PU y grafito KS6. Una disminución en la resistencia de la unión adhesiva para el aluminio se observó con un aumento en el contenido del relleno en todos los casos. Las fuerzas adhesivas más altas fueron observadas para adhesivos basados en epoxi y grafito KS6 [6].

En otra investigación los compuestos de grafito y silicona (SGCE) en diferentes proporciones fueron preparados y caracterizados para diferentes estrategias, como la termogravimetría (TG), la espectroscopía Raman y la espectroscopía de fotoelectrones de Rayos X (XPS). Se realizó una caracterización electroquímica de los diferentes electrodos aplicando esfuerzos cíclicos y voltamperometría; Los experimentos cubrieron una ventana de potencial eléctrico de 0.2 a 0.8 V (vs. Ag/AgCl), utilizando como sonda una solución K<sub>3</sub>Fe(CN)<sub>6</sub> 65 mmol/L en KCl 0.5 mol/L. Perfiles voltamétricos para blanco y sonda. Los resultados se registraron sin problema a una velocidad de exploración de 50 mV/s.



Figura 2.22 Electrodo de compuestos flexible.

Los resultados de la voltametría cíclica condujeron a evaluaciones morfológicas y topográficas realizadas por microscopía electrónica de barrido (SEM) y microscopía de fuerza atómica (AFM), respectivamente. La única proporción que mostró flexibilidad y autosuficiencia propiedades con un perfil voltamétrico reversible a velocidades de exploración lentas ( $5 \times 10^{-5}$  mV/s) fue SG1. El uso de los electrodos compuestos SSF y graphite-silicone para aplicaciones electroanalíticas es muy prometedor, Dado que este tipo de electrodos permite el monitoreo de la electroactividad, presentando aplicabilidad incluso con bajas relaciones de grafito. El presente estudio ha demostrado que es posible producir un electrodo compuesto autosuficiente y flexible con un 50% de grafito y relación de silicona, relativamente fácil de preparar, de bajo costo y no tóxico. El electrodo compuesto flexible de SSF y grafito-silicona mostró un perfil voltamétrico reversible solo a velocidades de exploración lentas ( $5 \times 10^{-5}$  mV/s), lo que resulta en una respuesta sigmoidal bien definida con pequeña histéresis entre el escaneo hacia adelante y hacia atrás, y la limitación de corriente independiente de la velocidad de exploración, lo que sugiere que el electrodo compuesto SG1 SSF / Graphite-Silicone tiene una estructura de matriz de microelectrodos figura 2.22. Por lo tanto, desde la perspectiva de ciertas aplicaciones, este electrodo compuesto flexible de SSF y grafito-silicona muestra ventajas significativas sobre los electrodos compuestos convencionales, debido a la flexibilidad.

Los electrodos de compuestos flexible se prepararon usando polvo de grafito y caucho de silicona en diferentes composiciones. El uso de tales materiales hidrofóbicos adicionados para disminuir la deglución observada en otros casos cuando los electrodos se usan en soluciones acuosas durante mucho tiempo. El compuesto se caracterizó por la reproducibilidad de su respuesta, resistencia óhmica, comportamiento

térmico y área activa. La respuesta voltamétrica en relación con el analito, se evaluaron con comportamiento voltamétrico conocido, siempre en comparación con el carbono vítreo. El 70% (grafito, w / w) compuesto electrodo se utilizó en la determinación cuantitativa de hidroquinona (HQ) en un procedimiento DPV en el que un límite de detección de  $5,1 \times 10^{-8}$  mol/L fue observado. El HQ se determinó en una muestra de revelador fotográfico con errores inferiores al 1% en relación con el valor de la etiqueta. Según los resultados presentados en este trabajo, los electrodos GSR presentaron características interesantes para uso analítico, tanto en experimentos voltamétricos cíclicos y de pulso. Estos electrodos presentaron preparación relativamente fácil, bajo costo, sensibilidad, resistencia a algunos solventes orgánicos y buena mecánica resistencia. La mejor respuesta voltamétrica se obtuvo con el 70% (grafito, w / w) del compuesto, que no era previamente descrito en la literatura. Esta composición presentó la mejor renovación de superficie y resistencia eléctrica apropiada para ser utilizado en la preparación de dispositivos sensores voltamétricos. En comparación con el compuesto de carbono vidrioso y PU 60% (grafito, w / w), el compuesto de 70% (grafito, w / w) presentó mayor sensibilidad a la hidroquinona visto en la table 6. El potencial de ventana estaba limitada en la rama catódica. Sin embargo en medios neutros o medios ácidos, el material compuesto puede usarse en un rango de potencial anódico grande. La introducción de modificadores químicos debería permitir a la determinación de varios analitos y será una investigación sujeto en el futuro [81].

Tabla 6 Resistencia eléctrica del compuesto flexible.

Electrode composition (%)	Resistance ( $\Omega$ )
30	290,000
40	78,000
50	75
60	11
70	6
GC	4

En las últimas cuatro décadas, el campo de los sensores de presión piezoresistivos de silicio han experimentado una revolución importante en términos de metodología de diseño y procesos de fabricación. Las tecnologías de fabricación de vanguardia han resultado en una precisión mejorada en factores clave como las dimensiones del diafragma y la colocación de piezoresistores. Considerando la naturaleza única de cada sensor y las compensaciones en el diseño, No es factible seguir un enfoque de diseño estándar. Por lo tanto, es útil derivar el diseño específico de una serie de factores importantes para llegar al diseño "ideal". Se debe revisar y analizar críticamente las distintas consideraciones de diseño y principios de un sensor de presión piezoresistivo de silicio. También informamos el efecto de estos consideraciones sobre la salida del sensor tomando la ayuda de varias herramientas CAD. Teniendo en cuenta la precisión de las herramientas de fabricación de vanguardia y las estrictas demandas del mercado actual, se ha vuelto importante incluir muchos de estos aspectos de diseño. El modelado utilizando expresiones analíticas para placas delgadas también se ha examinado ya que proporciona guía rápida y estimación de parámetros críticos antes del análisis detallado del método de elementos finitos. Donde sea posible, las imperfecciones de fabricación y sus efectos han sido discutido la dependencia de coeficientes piezoresistivos en temperatura y concentración de dopaje, el efecto de la condición de sujeción de los diafragmas y la fabricación usando mojadadas. También se analizan las micro-máquinas a granel. Los sensores basados en silicio sobre aislador junto con estrategias de diseño innovadoras y tendencias futuras también se han discutido. Las expresiones analíticas ayudan a ahorrar tiempo de modelado dando características de salida rápidas y aproximadas. Pero un análisis de diseño más riguroso requiere el uso de herramientas basadas en FEM que realizan un análisis complejo y que involucra los dominios mecánicos, eléctricos y térmicos. Las herramientas FEM pueden dar varias ventajas al tener en cuenta las propiedades anisotrópicas del silicio y el límite de condiciones realistas. Estos

ayudan a obtener una mejor estimación de campos de tensión en el diafragma. Efecto de factores como el perfil de dopaje, socavación en grabadores húmedos anisotrópicos, tensión incorporada y tensión de fractura del diafragma y ruido, que son difíciles de explicar incluso con el uso de herramientas FEM. Técnicas de diseño inteligentes empleadas al elegir piezoresistores en forma de meandro, forma adecuada del diafragma y toma una conexión de metal fuera del diafragma puede ayudar en mejorar el rendimiento del sensor. La variación de los coeficientes piezoresistivos con la temperatura y la concentración de dopaje, y la falta de una comprensión completa del fenómeno solo se suman a la complejidad del análisis. Se delinea una metodología de diseño completa para sensor de presión piezoresistivo de silicio basado en el diseño de principios y consideraciones. Se dedica un especial énfasis en las consideraciones de diseño que son exclusivas de sensor de presión piezoresistivo. Por último, alguna variación innovadora del sensor de presión que utiliza el doble puente Wheatstone. Un sensor bien diseñado ofrece un rendimiento mejorado después de la fabricación e integración con circuitos de compensación. Antes de fabricar un dispositivo, se deben hacer consideraciones de diseño y un método de optimización a través del cual se pueden identificar las dimensiones exactas y parámetros de proceso que deben usarse para la fabricación del sensor. Todo el proceso comienza con las especificaciones de diseño y requisito personalizado del sensor requerido para una aplicación en particular [82].

SIHAI WEN, SHOUKAI WANG y D. D. L. CHUNG (2000) proponen que la piezoresistividad depende de la matriz de cemento de fibra de carbono unidireccional continua y compuestos de matriz polimérica. La fracción de volumen de fibra es de 2.6, 7.4% y 58% para compuestos de matriz de cemento y matriz de polímero, respectivamente. La resistencia eléctrica en corriente continua en la dirección de la fibras aumentó con la tensión en la dirección de la fibra para la matriz de cemento compuesto, debido a la degradación de la interfaz de la fibra-matriz, disminuye por la tensión para compuesto de matriz de polímero debido al aumento en el grado de alineación de la fibra. La piezoresistividad es un fenómeno en el que la resistividad eléctrica de un material cambia con la tensión, que se relaciona con el estrés. Este fenómeno permite que un material pueda servir como sensor a tensión y compresión. Las aplicaciones de los sensores a deformación en tensión incluyen sensores de presión para componentes de aviones y automóviles, sensores de vibración para estructuras civiles como puentes y pesaje en movimiento sensores para autopistas (pesaje de vehículos). La primer categoría tiende a involucrar sensores pequeños (p. ej., las pastas de cemento o mortero) y competirán con sensores de presión de silicio. La segunda y tercera categoría tienden a involucrar sensores grandes (por ejemplo, en forma de hormigón prefabricado o mortero) y competirán con sensores de silicio, acústicos, inductivos y neumáticos. Los estudios de piezoresistividad se han realizado principalmente en compuestos de matriz polimérica con rellenos que otorgan conducción eléctrica. Estos sensores compuestos piezoresistivos funcionan porque la tensión cambia la proximidad entre las unidades de relleno conductoras, afectando así la resistividad eléctrica. La tensión aumenta la distancia entre las fibras, lo que aumenta la resistividad; la compresión disminuye esta distancia, disminuyendo así la resistividad figura 2.23.

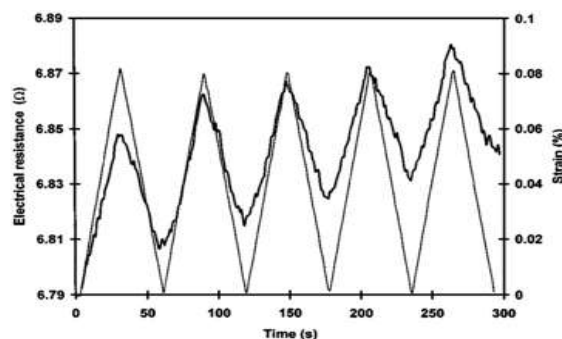


Figura 2.23 Resistividad con ciclos de tensión-compresión repetitiva.

Luheng Wang (2016) propone también un material sensible a la presión. La piezoresistividad en compuestos con carbono unidireccional continuo depende de la matriz epoxídica de fibra tras la tensión en la dirección de la fibra. El fenómeno involucrado la resistividad de volumen del material compuesto en la dirección de la fibra disminuye de manera reversible con la tensión, debido a un aumento en el grado de alineación de la fibra, como se observó utilizando el método de cuatro sondas. El método de la doble sonda se usó en la medición de la resistencia de contacto en lugar de la resistencia de volumen. La resistividad de contacto aumentó reversiblemente con la tensión, pero el fenómeno no es verdadera piezoresistividad y no es adecuado para uso práctico para la detección de tensión debido a la necesidad tener los contactos eléctricos en los extremos de la fibra. Se observa la piezoresistividad con factor de medición hasta +60 en compuestos continuos de matriz de cemento de fibra de carbono con fracciones de volumen de fibra en el rango de 2.6 a 7.4%. La resistencia eléctrica en la dirección de la fibra, medida con contactos eléctricos de superficie, aumenta con la tensión en la misma dirección. El aumento de resistencia es mayormente reversible, de modo que la porción irreversible aumenta con la amplitud de tensión. El efecto se atribuye a la degradación de la interfaz fibra-matriz, que es en parte irreversible. En casos donde este valor es más alto en el cual el módulo disminuye, la resistencia aumenta con la tensión abruptamente, debido a la rotura de la fibra. La resistencia a la tracción de los compuestos es  $(88 \pm 1)\%$  de la valor calculado basado en la regla de mezclas. El módulo de tracción  $(84 \pm 1)\%$  del valor calculado basado sobre la regla de las mezclas [83].

La piezoresistividad del compuesto de caucho de silicona con relleno de lámina de grafito (que es un compuesto típico de 2 a 3 micras) a la compresión. Si el contenido de la hoja de grafito es bajo, la resistencia eléctrica del compuesto aumenta con el aumento de la presión. Si el contenido de la hoja de grafito es medio, la resistencia disminuye primero y luego aumenta con el aumento de la presión. Cuando el contenido de lámina de grafito es alto, la resistencia disminuye con el aumento de la presión. El comportamiento piezoresistivo del compuesto se explica mediante el uso de la teoría sobre el "camino conductivo efectivo entre la láminas de grafito". Basado en los análisis de la piezoresistividad, el contenido óptimo de la hoja de grafito para el desarrollo se ha determinado el sensor piezoresistivo. En la figura 2.24 se muestran los resultados experimentales para la piezoresistividad del compuestos con diferentes contenidos de hoja de grafito durante compresión. Cuando el contenido de la hoja de grafito es inferior al 5% en volumen, la resistencia eléctrica aumenta con el aumento de la presión de compresión. Cuando el contenido de la hoja de grafito está entre 6 % y 8% del volumen, la resistencia eléctrica disminuye primero y luego aumenta con el aumento de la presión de compresión. Cuando el contenido de la lámina de grafito es superior al 9% en volumen, la resistencia eléctrica disminuye con el aumento de la presión de compresión. Para seguir estudiando el cambio de resistencia, la resistencia normalizada se define por:  $r(\sigma) = R(\sigma) / R(0)$ , donde  $r(\sigma)$  es la resistencia normalizada bajo la presión  $\sigma$ ,  $R(0)$  es la resistencia bajo la presión.

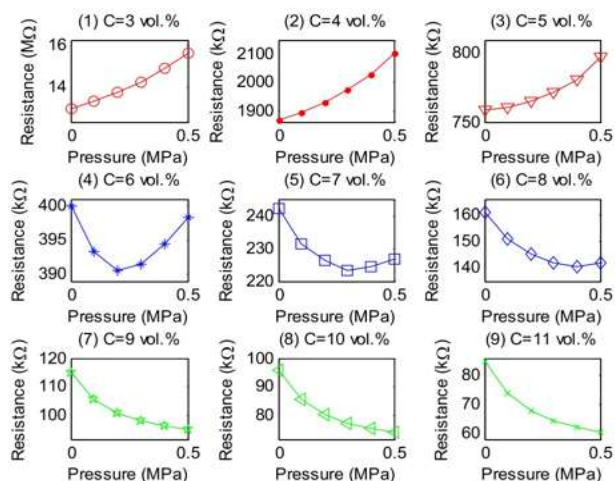


Figura 2.24 Relaciones entre la presión y la resistencia (C: contenido de la hoja de grafito).

La resistencia eléctrica de la lámina (hojuelas) de grafito en adición de la silicona, el compuesto de goma aumenta y disminuye con el aumento de compresión si el contenido de la lámina de grafito es bajo y alto, la la resistencia disminuye primero y luego aumenta con el aumento de la presión si el contenido de la hojuelas de grafito es medio. La resistencia normalizada de la película de túnel en una ruta conductora efectiva disminuye con el aumento de la presión. La tasa decreciente disminuye con el aumento del contenido de la hoja de grafito. Basado en las conclusiones sobre las influencias del contenido de la hoja de grafito en la piezoresistividad del compuesto, el mejor contenido de grafito para desarrollar un sensor piezoresistivo. Como se muestra en la Fig. 2.25, el contenido de hojuelas de grafito bajo y alto muestran la distribución de partículas mas densa de las hojas de grafito en el material compuesto. Por lo tanto, la probabilidad de que los contactos entre las hojas de grafito sea baja o alta, lo que resulta en la probabilidad baja o alta de las apariencias de los caminos conductivos efectivos. Esto fortalecerá la formación del efecto de la red conductora durante la compresión. Como resultado, la tendencia creciente de la resistencia compuesta se debilita con el aumento del contenido de la hoja de grafito [84].

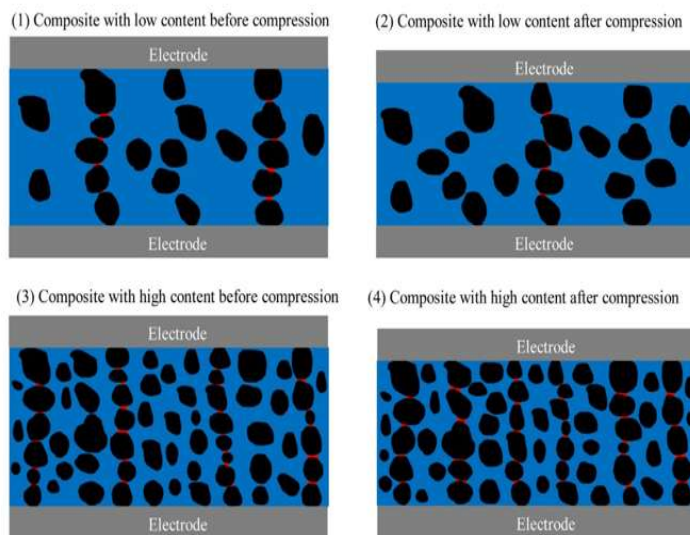


Figura 2.25 Cambios en las redes conductoras con contenido de hoja de grafito bajo y alto.

Yuting Li, Zhiyong Liu, Tianxing Wang y Shuying Shang (2016) proponen otro material basado en silicona dopado con partículas metálica. Una serie de compuestos de silicona y níquel, adicionado con partículas de níquel micrométricas y níquel sub-micrometrico son usados para crear los compuestos con una relación de masa de níquel y silicona por debajo de 1.8 : 1 tuvieron una alta sensibilidad a la presión; la conductividad cambió 9 veces, bajo una presión alrededor de 0.096 MPa. Para nuestro conocimiento, este es el contenido más bajo de rellenos reportados hasta la fecha en compuestos basados en polímeros altamente sensibles. Además, los compuestos muestran una buena repetibilidad de piezoresistividad, lo que indica un atractivo perspectiva de aplicación. Se estudió el factor de calibre de los compuestos y apareció una curva maestra para el compuestos con diferentes cargas conductoras visto en las figuras 2.26 y 2.27.

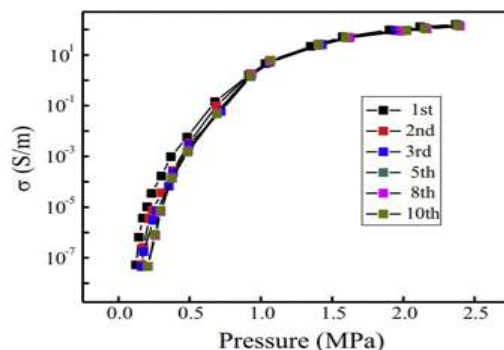


Figura 2.26 Curvas de conductividad en tensión de compresión después de varios ciclos.

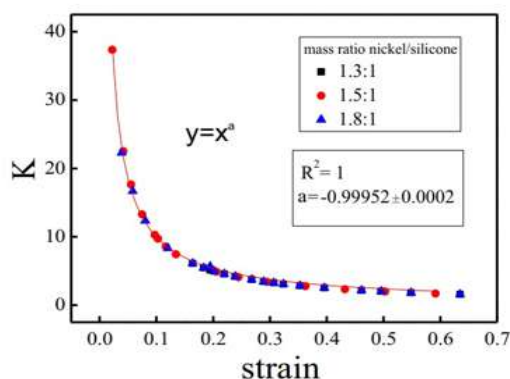


Figura 2.27 Curvas de factores de calibre en función de la deformación por compresión.

El compuesto de alta sensibilidad a la presión con bajo contenido de metal fue fabricado con partículas micrómetros y anométricas de níquel en adición a la matriz de silicona. El comportamiento mostrado piezoresistivo tiene una excelente repetibilidad, especialmente después del varios ciclos de compresión. Los factores de calibre de los compuestos podrían cambiar con la deformación, independientemente del contenido de níquel. El compuesto representa un nuevo enfoque de bajo costo para el sensor de presión de alta sensibilidad con un amplio espectro de aplicaciones, como en sensores de presión y piel electrónica [85].

Luheng Wang, Fangfang Ma, Qianshu Shi, Huanghai Liu y Xueting Wang (2011) desarrollan un estudio de un compuesto de silicona dopado con fibras de carbón y caracterizan su tiempo de recuperación a la fuerza compresión ciclica. Los cambios en la resistencia eléctrica del material flexible sensible a la presión basada en negro de carbón se analizaron compuestos de silicona adicionadas durante la fluencia y recuperación de compresión. La relación entre el incremento instantáneo de la presión y el incremento instantáneo de la

resistencia del compuesto aumentaron monotónicamente. La resistencia con el tiempo después de el compuesto se carga a presión constante o se descarga a presión cero. Los datos experimentales se realizaron para obtener la resistencias de compresión durante el arrastre y la recuperación de compresión.

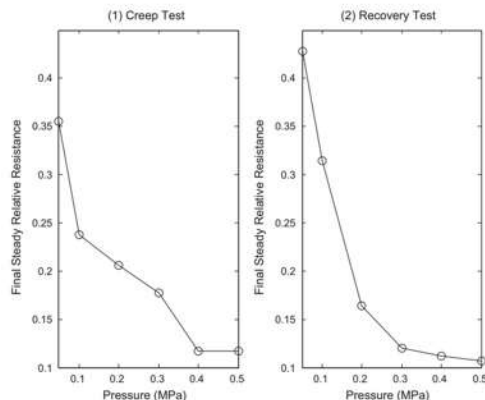


Figura 2.28 Resistencias relativas de fluencia y la prueba de recuperación.

La resistencia eléctrica del material flexible sensible a la presión basado en el compuesto de silicona adicionada con negro de carbón aumenta instantáneamente cuando el compuesto se carga de 0 MPa a una presión constante (0–0.5 MPa). La resistencia eléctrica disminuye con el tiempo cuando la presión se mantiene constante después de la compresión. La resistencia eléctrica aumenta rápidamente cuando el compuesto se descarga rápidamente desde un presión constante (0–0.5 MPa) a 0 MPa. La resistencia eléctrica disminuye con el tiempo cuando la presión se mantiene en cero después de la descompresión figura 2.29.

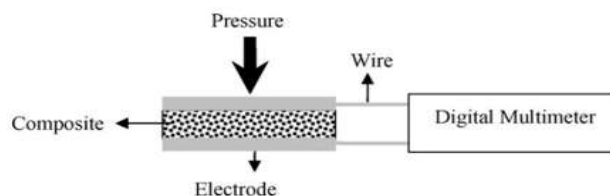


Figura 2.29 Esquema de la configuración experimental para medir la resistencia.

El incremento de la resistencia aumenta con el aumento del incremento y decremento de la presión rápidamente en el momento de la compresión y descompresión. Los datos experimentales para la resistencia relativa durante la fluencia compresiva y la recuperación puede ajustarse mediante la suma de funciones exponenciales. La resistencia relativa constantes finales en la prueba de fluencia y recuperación disminuyen con el aumento de la presión instantánea de carga y descarga [86].

Vineet Kumar, Dong-Joo Lee y Jin-Yong Lee (2016) realizaron otro estudio de silicona RTV dopado con nanocompuestos de grafito nanoaditivos vulcanizados (GR) con escamas de superficie de medida entre (150-450 m<sup>2</sup>/g) fueron estudiados para aplicaciones industriales. La Silicona vulcanizada a temperatura ambiente (RTV) usa caucho como matriz para preparar las muestras. La micrografías (AFM) revelan nivel molecular dispersión de GR con partículas distribuidas en el rango de 7-12 nm. La carga compresiva a 5 phr aumentó en 85% en presencia de un campo magnético. A medida que aumenta el área de superficie de GR, el módulo de compresión a 10 phr disminuye en un 35% y el desplazamiento de acción a 15 phr aumenta en 340%. El comportamiento de transición en las propiedades mecánicas fue casi lineal hasta 300 m<sup>2</sup>/g y luego disminuyó mucho. Las características de los compuestos vulcanizados están influenciadas por el efecto a



nanoescala de los aditivos, rápida transferencia de tensión del polímero a las partículas de adición y conectividad entre partículas constantes en la matriz de silicona.

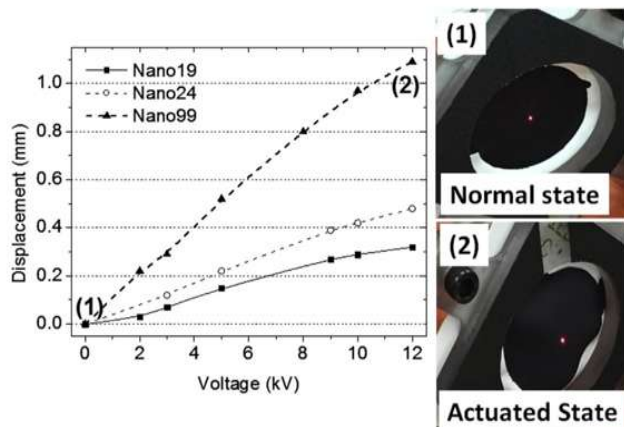


Figura 2.30 Mediciones del desplazamiento de actuación para GR a 15 phr en matriz de goma.

El tamaño de GR nanométrico con área de superficie moderada (150-450 m<sup>2</sup>/g) y estructura de alto orden (Nano19) mostró un equilibrio óptimo de propiedades mecánicas, eléctricas y de actuación mejoradas vistos en la figura 2.30. El GR con superficie mayor a 350 m<sup>2</sup>/g (Nano24, Nano99) mostró un alto grado de exfoliación. El Nano19 tiene escamas delgadas y aisladas, una estructura ordenada y una reflexión prominente en el estudio de difracción XRD. Las micrografías AFM revelaron dispersión a nivel molecular con partículas distribuidas en el rango de 7-12 nm. La media más baja de la rugosidad (2.5-4.5) de los componentes dispersos refleja su distribución homogénea vistos en la figura 2.31.

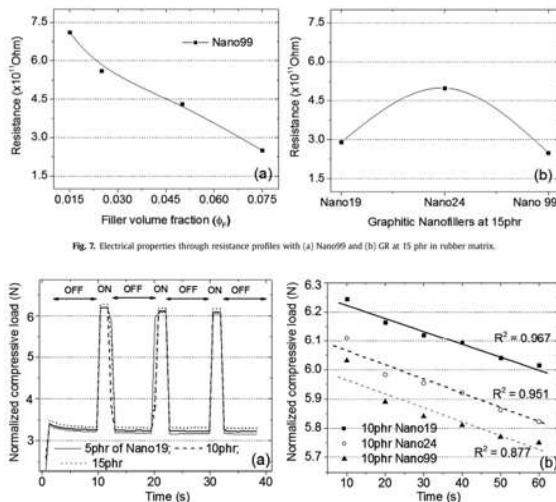


Fig. 7. Electrical properties through resistance profiles with (a) Nano99 and (b) GR at 15 phr in rubber matrix.

Figura 2.31 Respuesta cíclica a través de la tensión de compresión normalizada: (a) para Nano99 como nanofibras de grafo; (b) carga de compresión a lo largo del tiempo para GR en presencia de un campo magnético.

Chiwon Lee, Myungjoon Kim, Yoon Jae Kim y Nhayoung Hong (2017) realizaron una revisión del estado del arte al rededor de la robótica suave. El compuesto Nano19 mostró una óptima resistencia a la compresión y a la tracción con módulo de Young de 3.07 MPa para el Nano19, 2.97 MPa para el Nano24 de 2.71 MPa. Los problemas debidos a la alta agregación y la disipación de energía encontrada en GR con área de superficie alta puede por lo tanto, restringirse mediante el uso de nano-GR con área de superficie

moderada. Los modelos teóricos tiene más cerca acuerdo que el modelo GGS con los resultados experimentales. La carga de compresión aumenta en casi 85% al aumentar la carga en presencia de un campo magnético. La resistencia fue menor para las muestras Nano99 de ( $2.5 \times 10^{11}\Omega$ ) que Nano24 ( $5 \times 10^{11}\Omega$ ) y Nano19 ( $2.9 \times 10^{11}\Omega$ ) sometido a carga de 15 phr. La muestra Nano99 exhibió un mayor desplazamiento de actuación 1 mm a 10 kV que Nano19 (0.29 mm) y Nano24 (0,42 mm). Se encontró una característica de transición en las propiedades con respecto a superficie, la tendencia fue casi lineal hasta un valor aproximado a 300 m<sup>2</sup>/g y luego cayó bruscamente [87]. La robótica suave a menudo se inspiran en sistemas biológicos que consisten en materiales blandos o son accionados por materiales activados eléctricamente. Hay varias ventajas de los robots blandos en comparación con los robots convencionales; interacción segura hombre-máquina, adaptabilidad a dispositivos portátiles, sistema de agarre simple, etc. Debido a la características y ventajas únicas, los robots blandos tienen una considerable gama de aplicaciones. Los sistemas de actuación para robots blandos se pueden clasificar y analizar en tres tipos: tendón de longitud variable, actuación fluidica y polímero electroactivo (EAP). La propiedad deformable de los robots blandos restringe el uso de muchos sensores rígidos convencionales como codificadores, medidores de tensión, o unidades de medida de inercia. Por lo tanto, los enfoques sin contacto para detección y/o sensores con bajo módulo son preferibles para los robots suaves. Los sensores incluyen elastómeros de bajo módulo (<1 MPa) con canales llenos de material en fase líquida y son apropiados debido al grado de curvatura. En perspectiva de control, la idea de control debe desarrollarse porque las técnicas de control convencionales pueden ser inadecuadas para manejar robots.

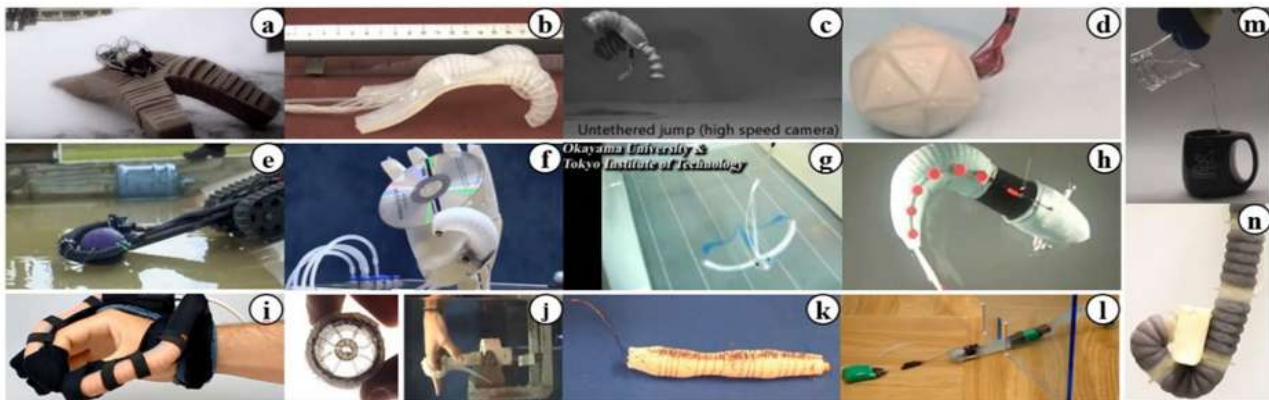


Figura 2.32. Robótica suave. (a) Un robot resistente y sin ataduras. (b) Robot suave multigait. (c) Robot de Salto sin ataduras. (d) Bloqueo de la locomoción habilitada para la piel (JSEL). (e) OctArm. (f) Mano robótica obediente y poco activada. (g) Manta robot de natación. (h) Peces robóticos blandos autónomos hidráulicos. (i) Guantes robóticos suaves. (j) Robot de pulpo. (k) Robot Meshworm. (l) GoQbot. (m) Atasco granular universal. (n) Atasco robot granular.

La robótica suave es un área de rápido crecimiento en robótica, ya que se alivian los inconvenientes de los robots convencionales, como la interacción hombre-máquina y la adaptabilidad. Además, los robots han evolucionado para realizar tareas intensivas, repetitivas y simples, a tareas más interactivas, hábiles y tareas de alto nivel. Las demandas de robots que interactúan con humanos en las áreas militar, medicina, rehabilitación, tecnología de asistencia, etc., continuará creciendo y los robots blandos posiblemente podrían responder a estas demandas. Futuro robots blandos con inteligencia artificial integrada podrían ser desarrollado en navegación autónoma (vigilancia de zonas de difícil acceso, misión de rescate en zonas de desastre, etc.) y manipulación (embalaje y organización de bienes) sistemas que traen beneficios industriales, médicos y militares. Los robots suaves generalmente se inspiran en las criaturas vivientes e

imitan su piel muscular (actuación) (barrera) y órganos de observación (sensores) que reconocen movimientos más eficientes y robustos. Esto aspectos dan a los robots suaves muchos beneficios en comparación con los convencionales robots como la capacidad de compensar las incertidumbres en el ambientes e interacción segura con humanos y organismos. Muchos animales son vertebrados o insectos que tienen marcos estructurales rígidos junto con materiales blandos, entonces una mezcla de robots blandos con robots convencionales son esenciales para maximizar sus beneficios para lograr la mejor solución. Este artículo de revisión ha cubierto una amplia gama de aplicaciones robots desarrollados en las últimas décadas y beneficiaría a la comunidad de investigación de robots blandos al proporcionar información general con algunos detalles e información actualizada [88].

## CAPÍTULO 3.

### TRABAJO EXPERIMENTAL Y RESULTADOS.

#### 3.1.- Sistema experimental.

La metodología usada para el desarrollo experimental, propuesta para lograr los objetivos de esta investigación se divide en dos etapas: la primera es el desarrollo de un sistema de medición y procesamiento de señales de sensores piezoeléctricos acoplados en el soporte de los rodamientos de bolas, mediante el procesamiento de las señales de vibraciones con un instrumento virtual implementado en Labview. Con esto se realiza el análisis de las vibraciones en los rodamientos y el registro de los parámetros de vibraciones. La segunda etapa es la fabricación de un compuesto flexible para la construcción de un soporte aislador de vibraciones sensible a las mismas en el conjunto de máquinas rotativas. Se observa en la figura 3.1.

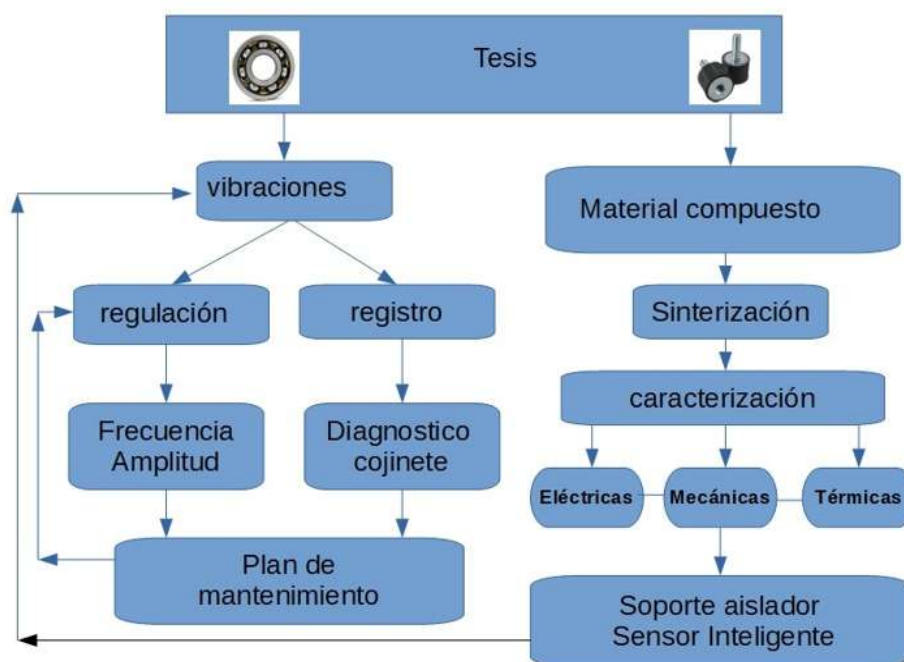


Figura 3.1 Diagrama de la metodología en la investigación y experimentales.

#### 3.2.- Análisis de vibraciones en un sistema de rodamientos de bolas.

Para realizar el análisis de vibraciones se construyó un dispositivo de pruebas de laboratorio visto en la figura 3.2, donde se realizaron todos los ensayos necesarios. Tales como la adquisición de la señal de los sensores y el desarrollo de un software de procesamiento para su análisis. La fabricación de un compuesto flexible su caracterización para posteriormente construir un soporte aislador de vibraciones para las máquinas rotativas del proyecto P29.



Figura 3.2 Sensores piezoeléctricos ensayo en chumacera y soporte en el laboratorio.

Este prototipo permitirá el desarrollo de la instrumentación virtual necesaria para identificar los parámetros como por ejemplo: los tonos que producen los rodamientos esto en el dominio del tiempo y la frecuencia, graficando el espectro de armónicos presentes tanto del fundamental como de sus múltiplos. En la figura 3.2 se observan los rodamientos de la flecha acoplada con una banda dentada a un motor primario de corriente directa C.D.  $\frac{1}{4}$  de HP. con control de velocidad desde 0-3600 RPM, son visibles también los sensores de golpeteo (Knock) usados en motores de combustión interna tipo piezoeléctrico, sujetos mediante un tornillo de 8mm a la parte superior de la chumacera. Estos sensores detectaran la vibraciones en el eje perpendicular a la flecha de acoplamiento con el motor primario.

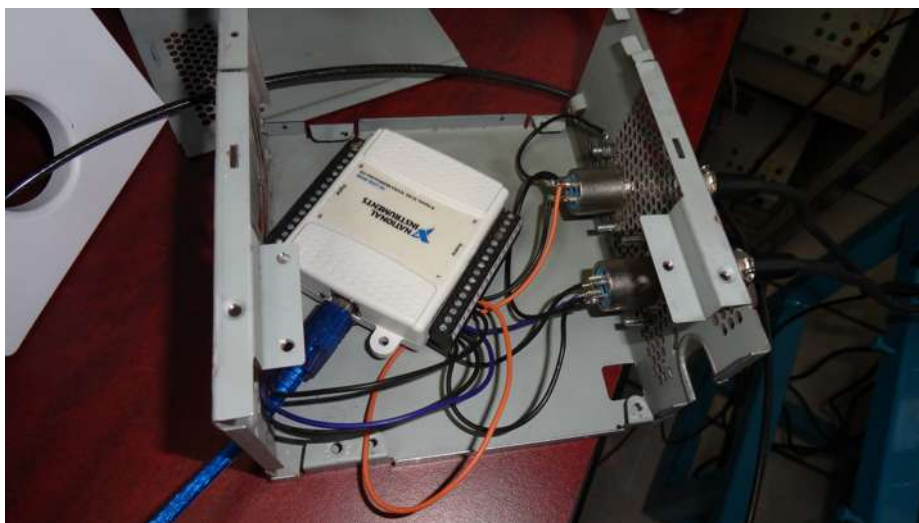


Figura 3.3 Tarjeta de adquisición del sensores piezoeléctricos en chumacera .

En la figura 3.3 se observa la tarjeta de adquisición de datos de la casa de National Instruments la cual hace uso de dos canales configurados para muestreos de dos mil muestras por segundo y un ancho de banda de 0-200hz, adicionalmente fueron configurados para recibir señales analógicas de los sensores de +/-15v que es un voltaje diferencial activo.

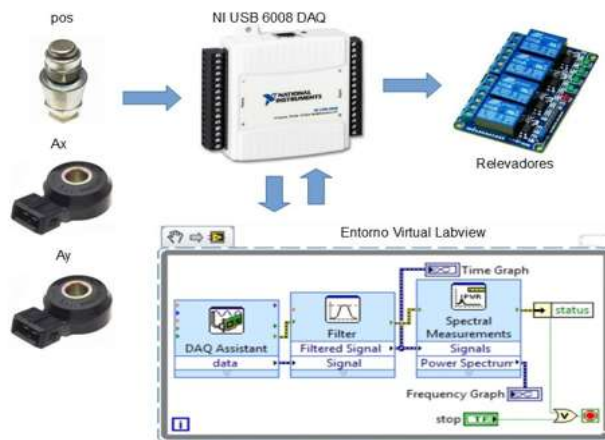


Figura 3.4 Esquema del analizador de vibraciones en LABVIEW.

En la figura 3.4 se observa la configuración de conexión de las señales generados por los sensores (Acelerómetros Knack Sensor) y el sensor de velocidad de la flecha en pulsos por segundo o RPS, los cuales son adquiridos en la tarjeta de adquisición de datos (DAQ), estas señales son procesadas en el entorno virtual de Labview.

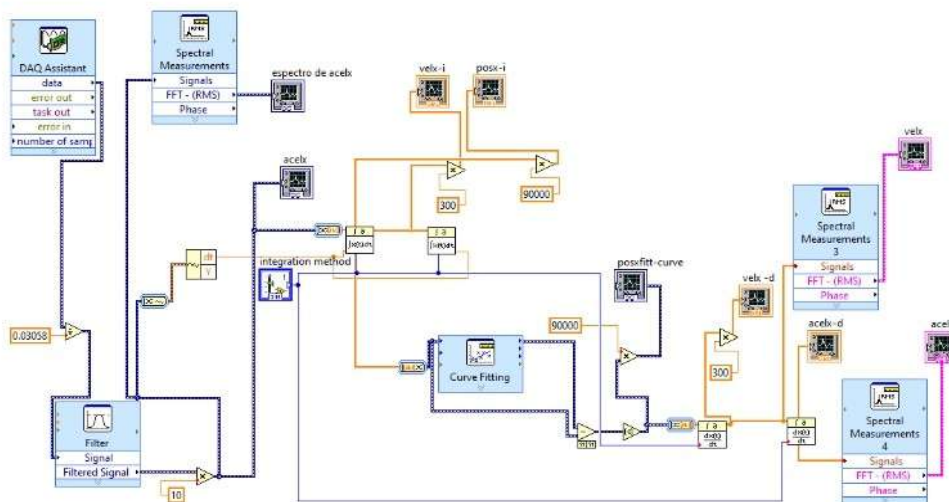


Figura 3.5 Diagrama del software desarrollado en Labview del analizador de vibraciones.

La figura 3.5 se muestra el diagrama del programa en el entorno virtual de Labview y la estrategia para el procesamiento de las señales como: el filtrado, la calibración de la magnitud de la señal, filtrado de la curva para anular las constantes de integración, calibración, linealización y el uso de herramientas como la obtención de la (FFT). También se obtiene el espectro de la frecuencia. Estas señales se convierten en los parámetros de vibraciones los cuales serán registrados en un archivo, que servirán en la diagnosis y la prognosis del sistema.

### 3.3.- Desarrollo de un soporte para máquinas rotativas.

Se construyó una base para ensayo de un conjunto de máquinas rotativas de laboratorio con una base aisladora de vibraciones, que usa el compuesto flexible piezoresistivo que se fabricó como parte de esta investigación vistos en la figura 3.6. Cuatro apoyos del compuesto flexible fueron fijados y soportan el peso del conjunto de máquinas. Estos apoyos están conectados eléctricamente en forma de puente de Wheatstone, el cual producen una señal diferencial pasiva que será adquirida por la DAQ, vista en la figura 3.4.



Figura 3.6 Soporte de un conjunto de máquinas con sensor flexible y aislador de vibraciones.

En la figura 3.7 podemos observar con mas detalle los apoyos del compuesto flexible entre la base de cimentación y la base de soporte del conjunto de máquinas separadas por el compuesto flexible. En la figura 3.8 se presenta el esquema completo de la conexión eléctrica entre el puente de Weatstone y la DAQ6008 conectada por el puerto USB a la computadora. Esta adquiere las señales de aceleración de las vibraciones mediante la plataforma virtual donde se procesan y registran los parámetros de vibración como lo son: la velocidad angular de la flecha del motor primario en RPM, aceleración, velocidad y desplazamiento de las ondas vibratorias en el dominio del tiempo y de la frecuencia. Esta base del soporte solo tiene libertad de movimiento solo en el eje vertical. En este eje el soporte es comprimido por el peso de las máquinas y la presencia de la vibraciones es detectada con mayor intensidad en ese eje.



Figura 3.7 Vista de los sensores conectados en forma de puente en la base del aislador.

Las máquinas usada para este ensayo son LABVOLT de  $\frac{1}{4}$  de HP a 208v y una velocidad variable de 0-3000 RPM acoplada con un electro-dinámometro de 0-27LBs-In2. En la figura 3.8 se aprecia el esquema de la metodología para realizar el procesamiento de la señal de este soporte. En el entorno virtual son obtenidos 3 parámetro en el dominio del tiempo como magnitudes absolutas de la aceleración, velocidad y desplazamiento, también los espectros del contenido armónico de estos tres parámetro que son procesados finalmente se calibran y registran en el entorno virtual.



Figura 3.8 Circuito eléctrico usado para el procesamiento de la señal en el soporte del motor.



### **3.4.- Fabricación y caracterización de un compuesto flexible piezoresistivo.**

Como ya se refirió la finalidad de la fabricación de un compuesto flexible es que sea usado para construir un soporte de motor aislador de vibraciones sensible a ellas. Para este fin se realizaron una serie de ensayos que se describen a continuación, se implementaron equipos especializados de ensayo para caracterizar el material como, ensayos para obtener la conductividad eléctrica y térmica, dilatación, ensayos de tensión compresión, microscopía electrónica de barrido, espectroscopia de impedancias y espectroscopia de vibraciones entre otros. Para finalmente obtener un circuito eléctrico equivalente de este compuesto flexible.

#### **3.4.1.- Diseño del compuesto flexible piezoresistivo.**

La elaboración del compuesto inicia con una experimentación preliminar en el laboratorio que permite saber si el material propuesto presentará las características adecuadas para la elaboración de un soporte aislador. ¿Que elastómero se usará para fabricar el soporte?, ¿qué cantidad serán adicionada como refuerzo para obtener la rigidez mecánica y sensibilidad a la vibraciones?. De los resultados preliminares se parte para seleccionar los equipos requeridos para su caracterización, otras características esenciales a considerar son la flexibilidad, resistencia al desgarre, deformación elástica, que el compuesto sea sensible a fuerzas externas estáticas y dinámicas (piezoresistividad). Como ya se mencionó este se usa para fabricar un soporte elastómero-metal. El análisis preliminar del compuesto basado en silicona RTV, como matriz flexible resultó ser el más factible y el aditivos de fibras de carbono como refuerzo, arroja resultados alentadores para iniciar con la fabricación de dicho compuesto. Entonces fueron construidas probetas cilíndricas con relación física de 1:2, fáciles de fabricar mediante un molde. Se fabricaron 4 probetas de cada espécimen para los ensayos que se efectúan como fuerza-deformación, relación de Poisson, fuerza-resistividad, temperatura-resistividad, temperatura-dilatación, conductividad térmica, difusividad térmica, análisis vibratorio, espectroscopia de impedancia y análisis micro estructural. Los valores de ensayos de las 4 probetas fueron promediadas para obtener un valor por cada espécimen. Las probetas fueron un total de 16 por cada espécimen, para el C100, C75 y C50. Su denominación es "C" por compuesto y 100 por el porcentaje de fibra en adición, para el C100 por ejemplo, por cada gramo de silicona incluido el diluyente y catalizador se adiciona un gramo de microfibras de carbono. El procedimiento para la fabricación del compuesto inicia con la preparación de la silicona RTV incluyendo un 15% de aceite de silicona como diluyente y 1.5% de catalizador líquido, fue mezclada y sometida a un proceso de extracción de burbujas de aire usando una cámara de vacío a 23 in-Hg. Posteriormente se adicionó el porcentaje de fibras indicadas para cada probeta. El compuesto fue inyectada en un molde y se dejó vulcanizar como mínimo 72hr.

#### **3.4.2.- Análisis de microscopía electrónica de barrido (MEB).**

El análisis que se realizó mediante la microscopía electrónica de barrido (MEB) arroja resultados útiles para analizar la composición química de elementos, forma, tamaño, distribución, orientación e interfaces del compuesto a escala nano-métrica y micro-métrica. El equipo usado es un JEOL Field Emission Scanning Electron Microscope Model JSM-7600F equipado con Bruker Quantax EDS-X Ray detector, Model XFLASH 6/30. Se realizaron estudios de EDS, Mapping y tamaño de partículas mediante este instrumento. También se determinó la composición química y pureza de los reactivos que se usaron para fabricar el compuesto flexible mediante difracción de Rayos X DRX. En la figura 3.9, 3.10 y 3.11 se observan las Micro-Interfaces Entre Fibras (MIEF) conectadas de manera aleatoria las cuales determinan la resistividad eléctrica del compuesto, que es la suma de la resistividad de las fibras de carbono y la resistividad de contacto en todas las fibras conectadas a los electrodos. Se puede observar que por las propiedades hidrofobias de la silicona (Aceite diluyente) y la superficie lisa de las fibras de carbono no son completamente impermeabilizadas por la silicona, permitiendo la conexión de las fibras de carbono molidas (FCM).

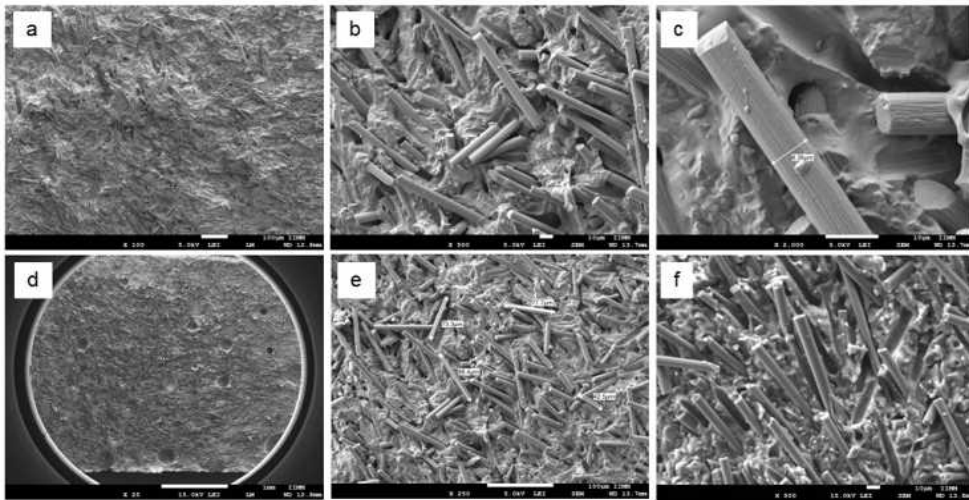


Figura 3.9 MEB del compuesto flexible reforzado con fibras de carbono distribuidas de forma aleatoria C100 con un contenido de 50% de fibras de carbono y 50% de silicona del peso total.

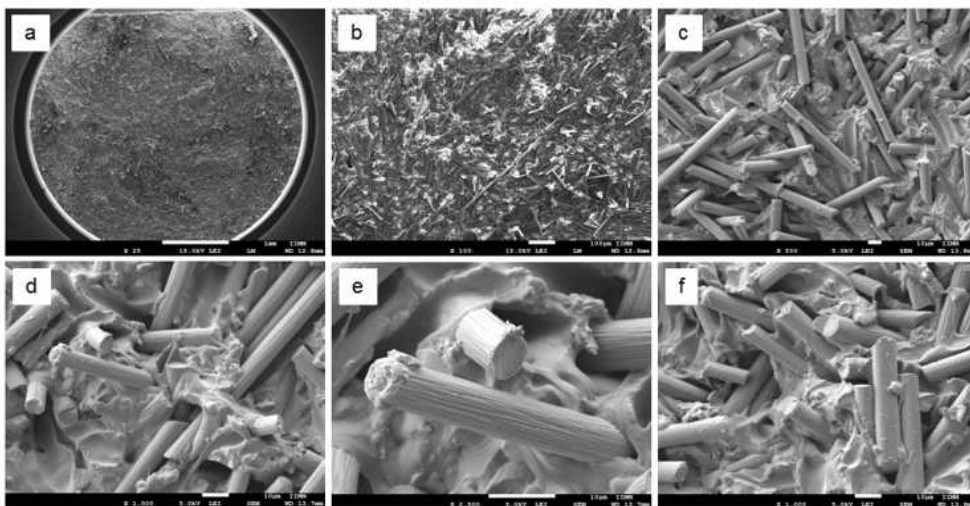


Figura 3.10 MEB del compuesto flexible reforzado con fibras de carbono, C50 con un contenido de 25% de fibras de carbono y 75% de silicona del peso total.

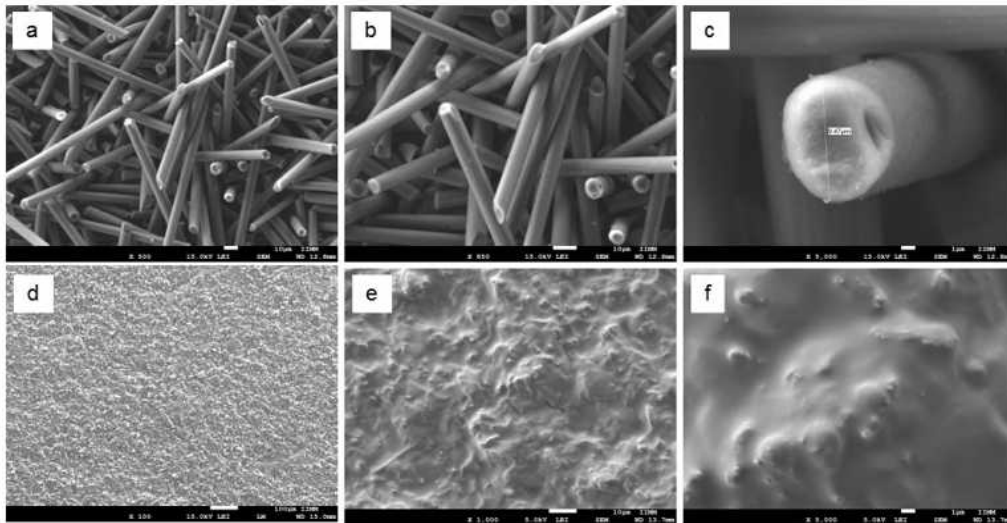


Figura 3.11 MEB del los reactivos usados para el compuesto, fibras de carbono y silicona RTV, la figura a), b) y c) son las FCM, d), e) y f) son la superficie de la silicona vulcanizada.

### 3.4.3.- Análisis de difracción de rayos X (DRX).

Con la microscopia (MEB), se determinó y comprobó mediante el análisis de composición químico elemental puntual de mapeo el contenido y la pureza mayor al 99.9% de la FCM. Visto la figura 3.12a, 3.12b, 3.12c y 3.12e.

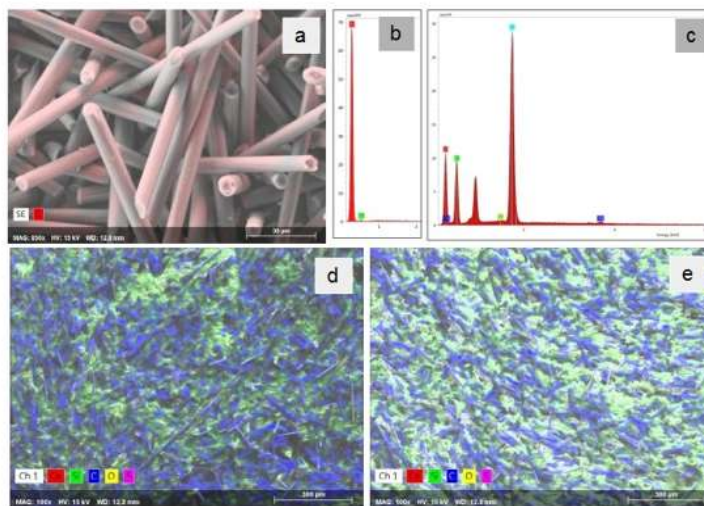


Figura 3.12 La MEB del compuesto flexible reforzado con fibras de carbono, 3.12d del compuesto C100 y 3.12e compuesto C50. La figura 3.12b y 3.12c muestra la Difracción de Rayos X (DRX) de las fibras y del compuesto C100.

Para el caso de la silicona se realizó mapeo del compuesto C100 visto en la figura 3.12d en la cual se observa un contenido de elementos en la silicona como calcio (Ca), azufre (S) y obviamente un alto

contenido de silicio (Si) estos elementos como el Ca y S tienen un contenido muy pequeño, son usados por el fabricante de la silicona para dar volumen (rellenar) y también adicionado al catalizador y el aceite mineral de silicona que se usa para lubricar y diluir. Las imágenes 3.11d, 3.11e y 3.11f, muestran un escaneo con amplificación de x100 a x5000 mostrando una superficie casi lisa y impermeable, de gran rigidez dieléctrica y con dureza Shore A de 40, considerado un elastómero medio blando en escala Shore A. La presencia de cúmulos relacionados con su pureza y los agregados para darle volumen lo hacen más económico así como también los efectos de granulado por porcentaje de catalizador adicionado, que contribuyen en su densidad y a una reticulación no perfecta. Finalmente en la figura 3.9, 3.10 y 3.11 se puede observar el compuesto C100 y C50 en un mapeo de la superficie a 100x muestra la misma composición pero con un contenido diferente de fibras de carbono. El resultado de la difracción de rayos X DRX, realizada con el equipo BRUKER Discover D8, que se realizó a las fibras de carbono, determinó una gran pureza del 99.9% y una forma cilíndrica homogénea.



Figura 3.13 Equipo de microscopia electrónica de barrido de Instituto de Investigaciones metalúrgicas y materiales de la UMSNH.

#### **3.4.4.- Ensayos mecánico a compresión y piezoresistividad.**

La piezoresistividad de los compuestos flexibles puede ser determinada mediante un conjunto de ensayos que someten al material a cambios físicos estos modifican la conductividad y su impedancia, por ejemplo la temperatura, los campos eléctricos, magnéticos, las ondas vibratorias y las cargas estáticas como fuerza ejercidas a tracción y compresión. Al cambiar la forma física su resistividad específica cambia y por consecuencia su impedancia total. El material debe ser caracterizado mecánicamente en un ensayo a compresión (máquina universal de ensayos), se requiere un ensayo de temperatura-dilatación, respuesta a las vibraciones (espectroscopia de impedancia vibratoria), para encontrar un circuito eléctrico equivalente que se aproxime al compuesto flexible. Finalmente se realiza un análisis de distribución de partículas mediante fotografías de Rayos X al compuesto y termografía superficial IR.



Figura 3.14 Máquina universal de ensayos tensión compresión 500Kg. Medición de carga, deformación transversal y longitudinal, así como la medición de resistencia eléctrica.

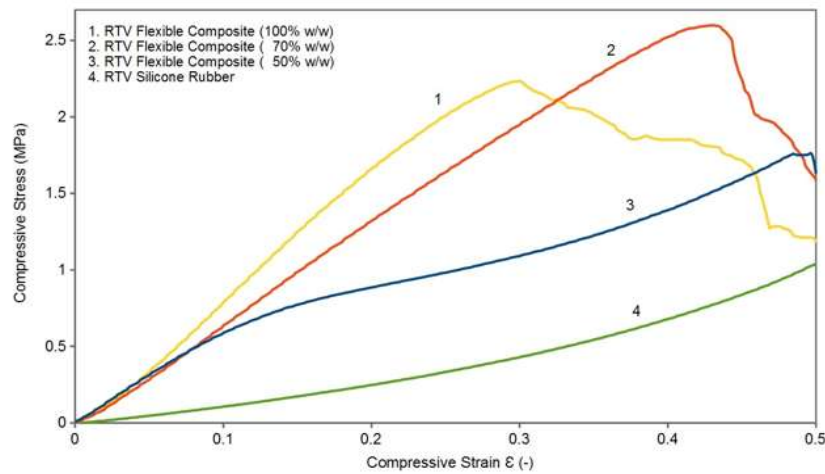


Figura 3.15 Ensayo destructivo a compresión de 4 cilindros de compuesto flexible con diferente dureza específica C100, C75, C50 y uno de silicona pura usado como referencia.

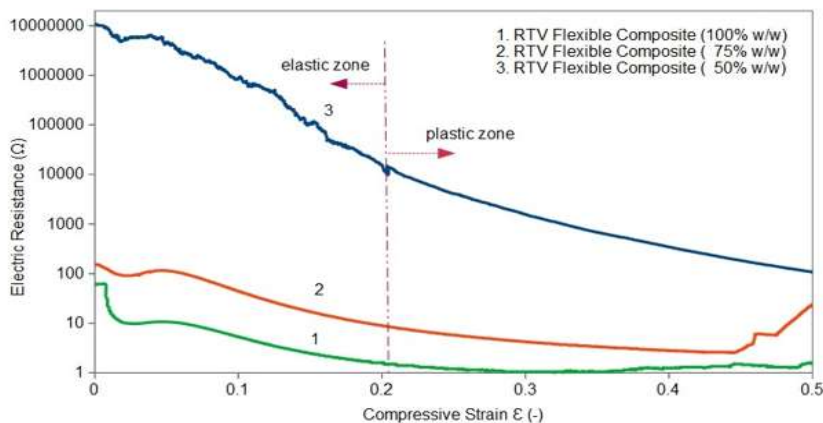


Figura 3.16 Ensayo de compresión de 3 cilindros de compuesto flexible piezoresistivo con diferente resistividad específica C100, C75, C50.

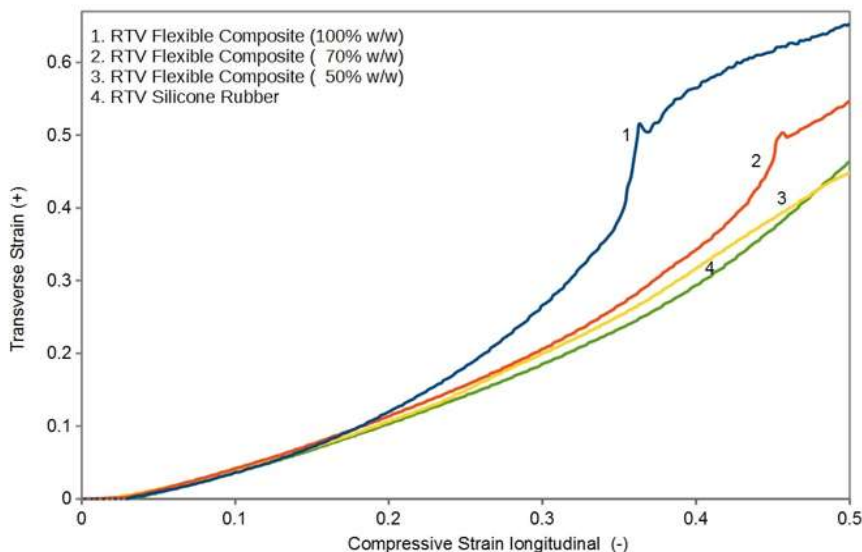


Figura 3.17 Coeficiente de Poisson, relación de la deformación trasversal con la de formación longitudinal de los compuestos C50, C75, C100 y silicona pura RTV.

Las curvas obtenidas en el ensayo a compresión visto en la figura 3.15 se observa el comportamiento de deformación, debida a la fuerza de compresión ejercida. Este ensayo destructivo considera una deformación lineal del 50% de la probeta. La curva, muestra el comportamiento del compuesto flexible C100 que es el que tiene una cantidad mayor de fibras de refuerzo, presentando una mayor rigidez, por tal la matriz del compuesto tiene una tendencia mayor a desgarrarse y presentar deformación plástica y grietas a esfuerzo de compresión  $-\epsilon=0.2$ , inicialmente presenta fallo tipo “Barreling”, agrietamiento y formación de grandes cúmulos, posteriormente falla por fractura frágil a  $-\epsilon=0.3$  que es más del 30% de la deformación lineal de la

probeta visto en la figura 3.18. En la figura 3.17 la curva 4 representa a una probeta cilíndrica fabricada sin fibras de carbono, presenta la menor rigidez, es más flexible, su matriz tiene menos tendencia al desgarre y puede deformarse más de 50% de su longitud inicial, esto es a  $-\epsilon=0.5$  se aprecia una deformación plástica pequeña, también presenta deformación plástica y falla “Barreling” figura 3.18a. Las curvas 2 y 3 de la figura 3.15, muestran fallas a mayor valor de deformación respecto a la de mayor rigidez C100, evidentemente por su menor contenido de fibras de carbono. La imagen b) de la figura 3.18 muestra la probeta C50 con deformación plástica y presenta fallo tipo “Barreling-Michelin”, este tipo de fallo también es conocido como “Buckling Symmetrical”. Para el caso del compuesto C75 figura 3.18c presentan grietas grandes, su matriz se desgarró más formando cúmulos o islas, presentando fallo “Barreling” por fractura frágil. Y finalmente la probeta 3.18d C100 con mayor rigidez presentando falla por fractura frágil.

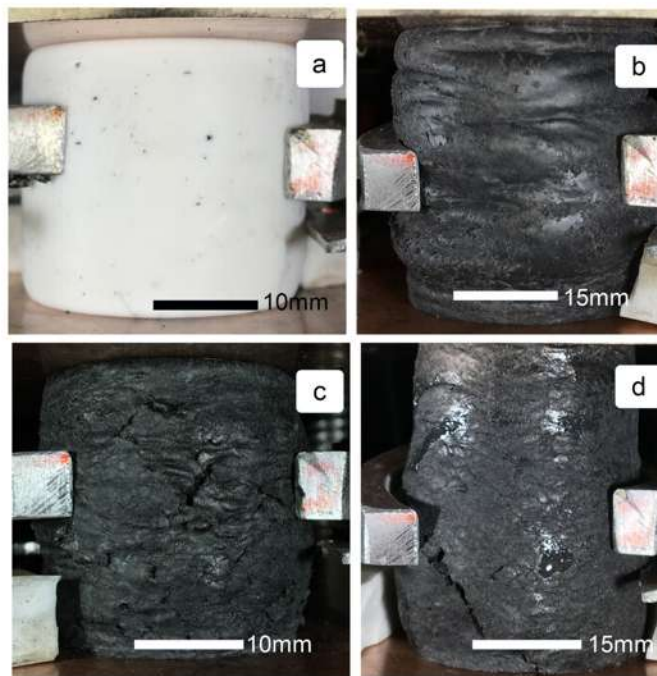


Figura 3.18 Falla de las probetas de compuesto a una deformación del 50% a) compuesto silicona pura falla “Barreling” c) falla “Barreling-Michelin” c) falla fractura frágil-cúmulos d) falla por fractura frágil.

En la figura 3.16 se observa los resultados de ensayo del comportamiento resistivo del compuesto para tres probetas con diferente contenido de fibras de carbón respecto a la fuerza de compresión aplicada, que produce una deformación elástica en el compuesto, afectando su resistencia eléctrica, presentando un comportamiento piezoresistivo. Este comportamiento será usado para otorgarle sensibilidad al soporte a la carga dinámica y estática. De acuerdo con estos resultados se determinará cual podría ser el porcentaje de FCM que se deben agregar al compuesto como refuerzo. Para posteriormente fabricar un soporte aislador con propiedades piezoresistivas, que sirva también como sensor vibratorio. Idealmente el soporte debería tener una elasticidad y una rigidez que fuera suficiente para no deformarse con el peso de las máquinas y la cimentación y presentar un valor de aislamiento considerable. La eficiencia mecánica como aislante debería de ser mayor del 80% y desde luego presentar valor de resistencia eléctrica baja, unas decenas de ohms o máximo unos cuantos Kilo-Ohms ( $K\Omega$ ). Esta baja resistencia permitirá la conexión eléctrica a otros componentes que acondicionarán la señal a voltajes más bajos de 5-24v. La conexión eléctrica como divisor de tensión o mejor aún en conexión de puente completo para poder producir una señal diferencia más inmune al ruido, que no requiere fuente de alimentación especial. Con esta consideración se puede

seleccionar el compuesto más óptimo con una rigidez media y valor de resistencia bajas para fabricar el soporte aislador. El compuesto C50 presenta resistencia en el orden de  $10\text{M}\Omega$ . Que se usará para aplicaciones donde el voltaje de alimentación al sensor puede llegar a valores de hasta  $220\text{V}$ . Los cilindros de ensayo son sometidos a fuerza de compresión, sufren una deformación volumétrica, mientras su longitud disminuye la matriz y las fibras son compactadas de los extremos del cilindro que es donde se aplica el esfuerzo hacia el centro de la probeta y esta región tiende a expandirse “Barreling” (toma forma de barril) y aumenta su diámetro medio. La relación entre la deformación lineal y la deformación transversal es conocida como relación de Poisson, su valor se aprecia en las curvas de la figura 3.17.

### 3.4.5.- Ensayo de espectroscopia de impedancias.

La espectroscopia de impedancias electroquímicas (EIS) es una técnica muy versátil y adecuada para el estudio de los materiales de uso habitual como por ejemplo biomateriales, ya que permite el estudio tanto de la corriente como de la impedancia de transferencia del sistema estudiado. Es uno de los métodos que más información proporciona sobre las propiedades de la interfase de un compuesto. Aplicando una señal de excitación AC/DC de pequeña amplitud al material y registrando su respuesta, es posible obtener información de la cinética de la transferencia de carga a través de la interfase, de la estructura y propiedades de la interfase, ya sea para simplemente analizar el acabado superficial del compuesto, para caracterizar la capa de óxido pasiva superficial o un recubrimiento protector, en el caso de que el compuesto disponga del mismo. Si se quiere aplicar esta técnica a un material sólido que presenta una impedancia, se deberá saber con precisión que se busca en el ensayo, por ejemplo para medir la impedancia de un material con dos electrodos se requiere de una variación a esta técnica, es decir los electrodos que miden corriente y los de voltaje deben ser reconfigurados mediante una divisora de tensión externa vista en la figura 3.19 el voltaje  $V_r$  es usado para determinar la corriente que circula por la probeta o compuesto que se ensaya,  $I_r = V_r/330\Omega$  y  $V_m$  es el voltaje en probeta de ensayo. Con estos dos valores medidos se determina la impedancia mediante un osciloscopio digital de dos canales y el uso de un generador de señal se realiza el barrido de frecuencias, variando la amplitud y frecuencia del generador, en ocasiones llamado “Espectro” de un ancho de banda de  $1\text{Hz}$  hasta  $1\text{MHz}$ .

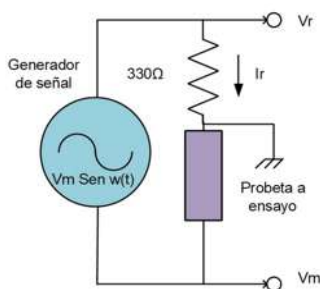


Figura 3.19 Configuración para la determinación de la espectroscopia de impedancia en un sólido de 2 electrodos usando un osciloscopio para su medición.

Como ya se mencionó este ensayo fue realizado con un generador de funciones y osciloscopio digital marca Rigol visto en la figura 3.20, el cual excita eléctricamente al compuesto. La corriente es calculada con el valor medido de  $V_r$ , la corriente que circula por el compuesto, mediante la resistencia Shunt de  $330\Omega$  y el voltaje en el compuesto. Los resultados se observan en la figura 3.2 la respuesta del compuesto C100, C75, C50 y el ángulo de fase del C100.





Figura 3.20 Equipos usados en espectroscopia de impedancia mediante la técnica de medición de impedancia indirecta a diferentes frecuencia 0-1MHz.

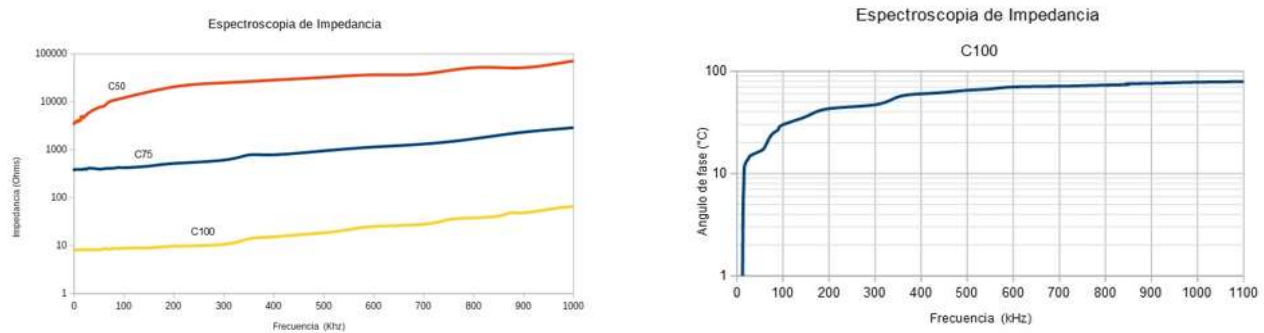


Figura 3.21 Espectroscopia de impedancias, barrido de frecuencia y ángulo de fase 3.21a y 3.21b.

Los resultados de la espectroscopia de impedancias reflejan valores de impedancia que no varían mucho, por ejemplo del compuesto C100 su impedancia inicial a corriente directa (CD) es de poco menos de  $10\Omega$  y crece al aumentar la frecuencia a 1MHz a un valor menor de  $80\Omega$  a (1Mhz), este aumento de la impedancia se debe al efecto reactivo del compuesto integrado por la capacitancia  $C_e$ , la inductancia  $L_e$  y su resistencia  $R\Omega$ , esta última es la resistencia que presenta el compuesto en CD. El parámetro de capacitancia  $C_e$  tiene un valor pequeño esto reflejan la poca capacidad del material de almacenar carga eléctrica (capacidad farádica), entre las fibras conductoras y la matriz (aislante), medida en las terminales colocadas en los extremos de la probeta cilíndrica. Para el caso de la inductancia también tiene un valor pequeño pues es la inductancia propia de circuitos de fibras conectadas en serie y paralelo entre los electrodos. La reactancia inductiva equivalente es  $X_{eq} = X_{le} + X_{ce}$ . La impedancia del compuesto es  $Z_m = V_m/I_r$ . En resumen el comportamiento visto en la espectroscopia de impedancias confirma que el valor de reactancia equivalente  $X_{eq}$  tiene un valor pequeño comparado con el valor de resistencia  $R\Omega$  en CD, que es la resistencia debida a la conductividad de las fibras conectadas a las terminales y a su forma física. La impedancia también tiene un valor de  $Z_m = \sqrt{(R\Omega^2 + X_{eq}^2)}$ . Estos valores pueden observarse en la figura 3.21a, a frecuencia de 1000KHz ó 1MHz por tanto  $Z_m = 80 - 10 = 70\Omega$ .

### 3.4.6.- Ensayo mecánico-eléctrico, espectroscopia de impedancia vibratoria.

Para realizar este ensayo fue necesario construir una máquina de ensayo de laboratorio vista en la figura 3.22. Para lograr la caracterización completa del compuesto flexible se debe determinar esta respuesta ante fuerzas externa variantes en el tiempo, esto permitirá observar su grados de linealidad y sensibilidad a las variaciones rápida de excitación mecánica externa, adicionalmente su respuesta mecánica y eléctrica. También se practicó un análisis preliminar para elegir las probetas que se ensayaron, fueron seleccionadas la C100 y C75. Pues presentan una tendencia a aumentar su impedancia cuando se aumenta la frecuencia en el orden de las decenas de Mega-Ohms ( $M\Omega$ ), por tal, la probeta C50 queda descartada por su alta impedancia inicial y no es simple las mediciones, con el equipo que se dispone. Para la calibración y medición de las vibraciones se usó un equipo analizador de vibraciones GE Commtest BV7 de dos canales. Fue medida la magnitud de velocidad de las ondas de excitación y la magnitud de velocidad de la onda estacionaria en el compuesto flexible, considerada esta, la respuesta mecánica del compuesto y se determinó su contenido armónico. Fue medida la respuesta dinámica eléctrica (piezoresistividad), en una rango de 8 a 300Hz, visto en la figura 3.23, 3.25.

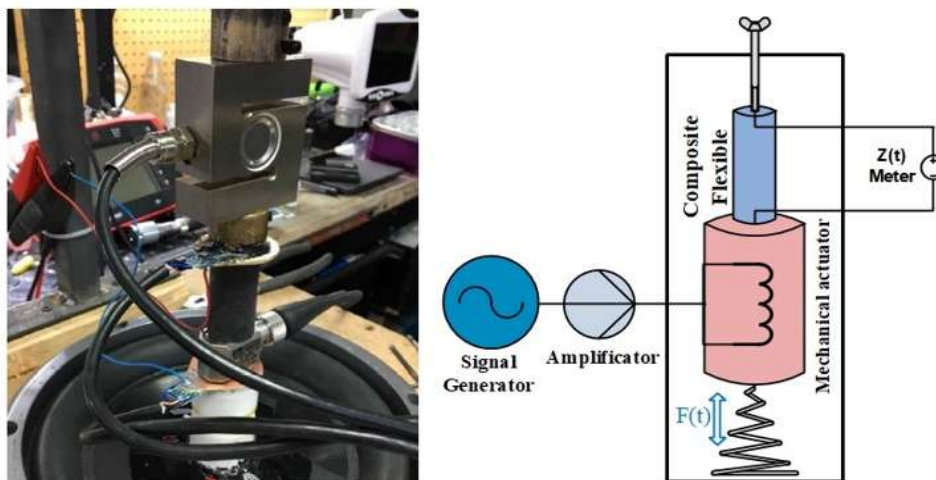


Figura 3.22 Máquina de ensayo vibratorio uniaxial respuesta a la frecuencia vibratoria.  
(Espectroscopia de impedancia vibratoria)

Como ya se mencionó se construyó un actuador lineal que excita con ondas vibratorias de forma senoidal a la probeta vista en la figura 3.22, se mide la magnitud de la excitación, la frecuencia y el valor de la resistencia dinámica nuevamente mediante una divisora de tensión entre una resistencia conocida de  $330\Omega$  y el compuesto, este voltaje es considerado la respuesta eléctrica dinámica del compuesto. Visto en la figura 3.23 y 3.25. Se muestra un espectro en el dominio de la frecuencia de la excitación, frecuencia, magnitud y todos los armónicos presentes, adicionalmente tanto mecánicos como eléctricos.

Los resultados de los ensayos de espectroscopia de impedancias y espectroscopia muestran la respuesta mecánica y eléctrica de los compuestos C100 y C75 para un rango de 5-300hz, en la figura 3.23 y 3.25 se muestran los armónicos fundamentales y sus múltiplos marcado en el eje x como: 1, 2, 3.. .8 y sus magnitudes o respuesta, mostrando su sensibilidad a esa frecuencia en específico.

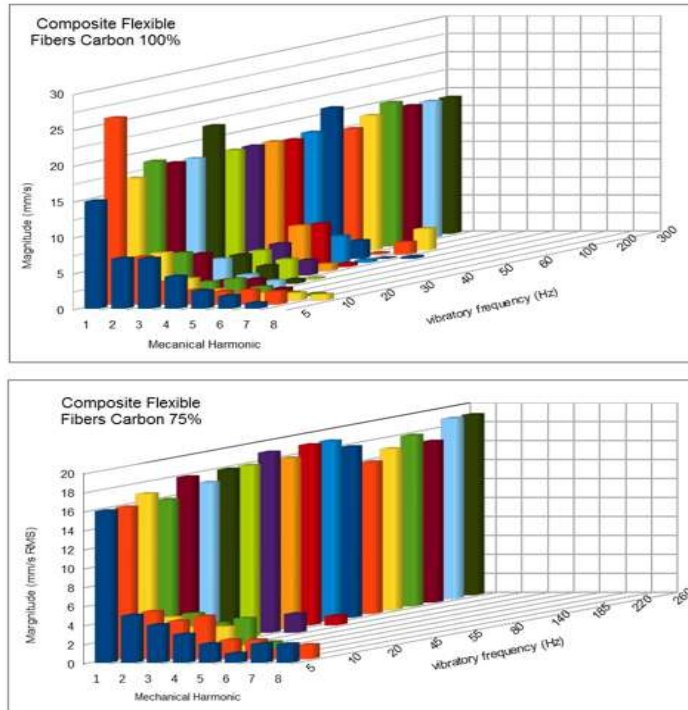


Figura 3.23 Contenido armónico mecánico de los compuestos C75 y C100.

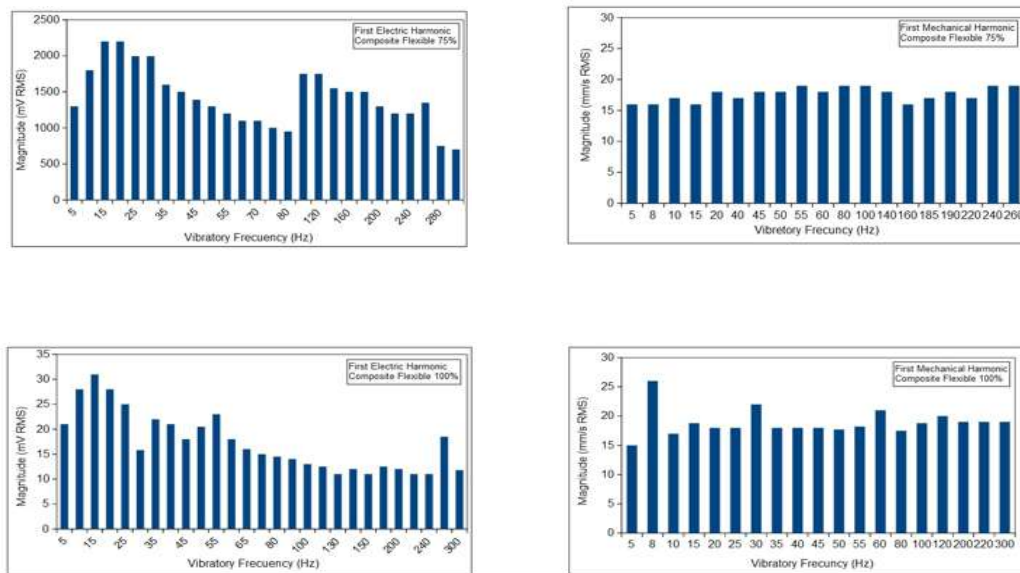


Figura 3.24 Contenido armónico fundamental mecánico y eléctrico de los compuestos C75 y C100.

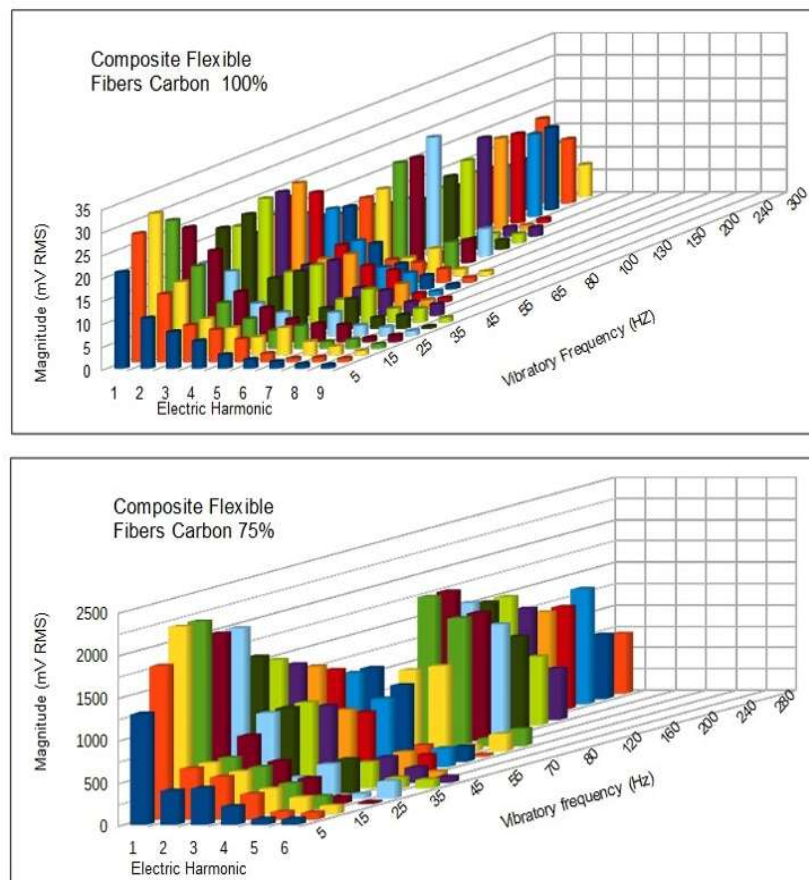


Figura 3.25 Contenido armónico total eléctrico de los compuestos C75 y C100, espectroscopia de vibraciones.

Como ya se mencionó los resultados de contenido armónico fueron obtenidos mediante el uso de un actuador vibratorio de frecuencia (0-300Hz) y magnitud variable, con desplazamientos de hasta 6mm de desplazamiento longitudinal al cilindro. Para el caso de la determinación de la eficiencia mecánica vibratoria se excitó con el actuador de vibraciones a un extremo del cilindro y el otro extremo del cilindro se colocó una masa de 2kg con libertad de movimiento en el eje vertical, se midió la magnitud RMS de la velocidad de la onda. La velocidad de la onda de excitación se mantuvo siempre constante en 20mm/s, fue medida la respuesta mecánica en el extremo del cilindro, esta es la magnitud de respuesta del compuesto flexible. Para el caso de la obtención del contenido armónico eléctrico, el material fue excitado por un extremo del cilindro mediante el actuador y por el otro extremo fue inmovilizado mecánicamente a un soporte sin libertad de movimiento. Se conectaron dos electrodos conductores de cobre en forma de placa aislada a las dos secciones trasversales denominada micro-interfase compuesto electrodo (MICE), se usó placa fenólica cubierta de metal "PCB" con recubrimiento de cobre de espesor de 0.025 pulgadas. Estas placas fueron pegadas con un adhesivo basado en silicona líquida con resistencia eléctrica muy baja usando grafito sintético de alta conductividad y pureza, molido finamente en tamaño promedio de 5-50 micras. Con esto se puede medir la impedancia del cilindro vista en la figura 3.26. Para la determinación de la respuesta dinámica del compuesto se considera el efecto reactivo ante ondas vibratorias que afectará la impedancia

equivalente total y que se integrará al comportamiento piezoresistivo. Fue necesario usar la técnica de divisora de tensión, conectando el material en serie con una resistencia conocida de  $330\Omega$  y alimentarlo a una fuente constante de voltaje de 10VCD. Se mide la caída de tensión en corriente alterna en el compuesto y la resistencia mediante un osciloscopio digital para medir valores de voltaje RMS a cualquier frecuencia dentro del rango de 0-100MHz. Con estos dos valores se puede determinar la magnitud de la reactancia  $X$  del material y en consecuencia de la impedancia.  $Z = \sqrt{R^2 + X^2} = V_{ca}/I_{ca}$ , que es el voltaje de corriente alterna en el cilindro entre la corriente que circula por el compuesto. La corriente que circula por el compuesto también es el voltaje en la resistencia de  $330\Omega$  entre el valor de la resistencia, esto es  $I_{ca} = V_r/330$ .

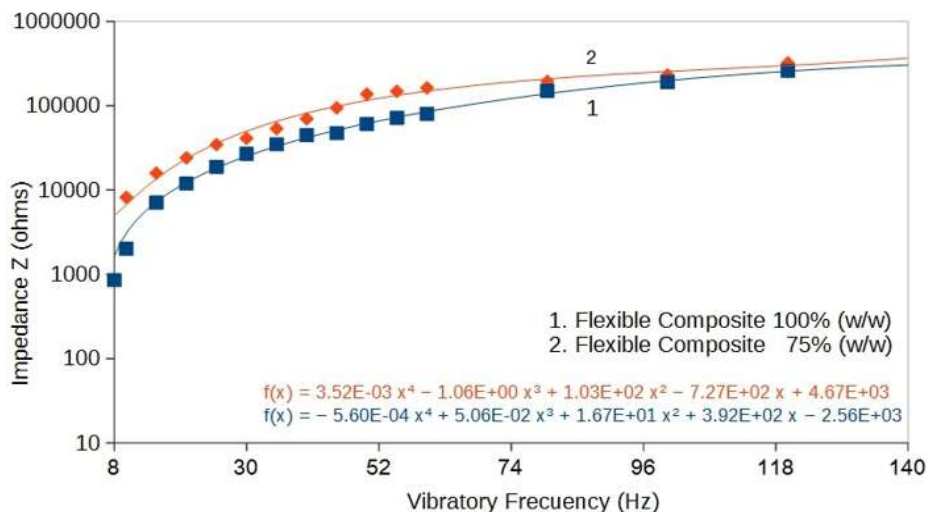


Figura 3.26 Curva de tendencia, respuesta a la frecuencia ZV, de los compuestos C75 y C100.

### 3.4.7.- Eficiencia mecánica vibratoria del compuesto y frecuencia de resonancia.

Como se mencionó anteriormente para la determinación de la eficiencia mecánica del compuesto se utilizó el equipo analizador de vibraciones referido, se midió la magnitud de la velocidad de vibración en valor RMS en la base fija del soporte  $V_o$  (un extremo) y la vibración en la parte superior de la base en las máquinas  $V_i$  (el otro extremo, eje vertical). La eficiencia del compuesto se determinó con la siguiente relación de magnitudes de velocidades:  $\eta = (1 - (V_o/V_i)) * 100$ . Los resultados del ensayo se muestran en la figura 3.27, la curva 1 se presenta un efecto de resonancia para el soporte de silicona estándar, sucede a una frecuencia aproximada de 25Hz y se amplifica la señal mecánicamente 4.5 veces respecto a la magnitud de excitación encontrando que la eficiencia toma un valor de 450%. Este punto de operación no es muy recomendable para que el sistema opere y es debido a la elasticidad de la silicona y al sistema, para el caso de las probetas con un contenido mayor de fibras su rigidez es mayor y la resonancia del sistema se reduce mucho, por ejemplo el C75 de la figura 3.27, la curva 3 el punto donde todo el sistema entra en resonancia la eficiencia se eleva 250% equivalente a 2.5 veces la magnitud de excitación.

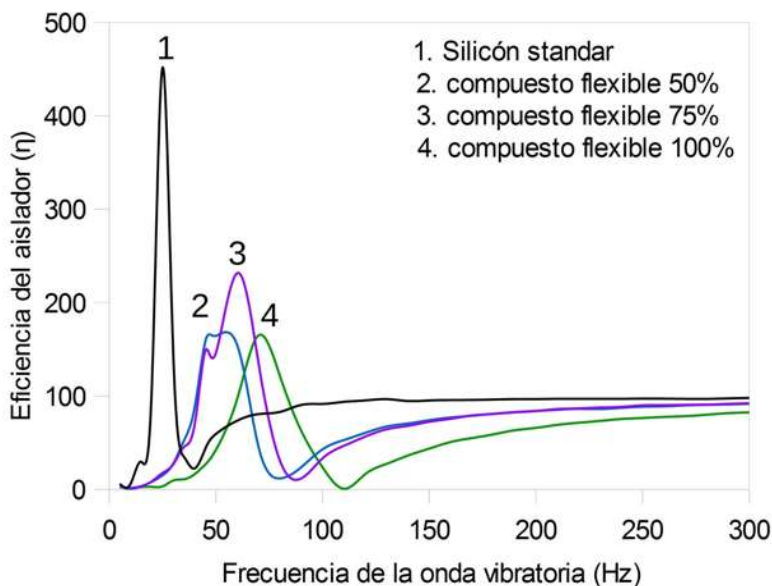


Figura 3.27 Eficiencia mecánica vibratoria ( $\eta$ ) del compuesto flexible.

### 3.4.8.- El calor específico del compuesto flexible.

Los resultados del ensayo termofísicos realizado al compuesto flexible muestran algunos parámetros que permiten una mejor caracterización del compuesto con vías a obtener un circuito equivalente aproximado. El calor específico no está directamente relacionado con la conductividad eléctrica ni térmica. Esto es porque la conductividad eléctrica y térmica se deben a los electrones circulantes, sin embargo, el calor específico es principalmente debido a las vibraciones de moléculas. Los electrones casi no contribuyen en nada en el calor específico en materiales aislantes, los fonones constituyen en el proceso primario por el cual se establece la conducción de calor en los aislantes.

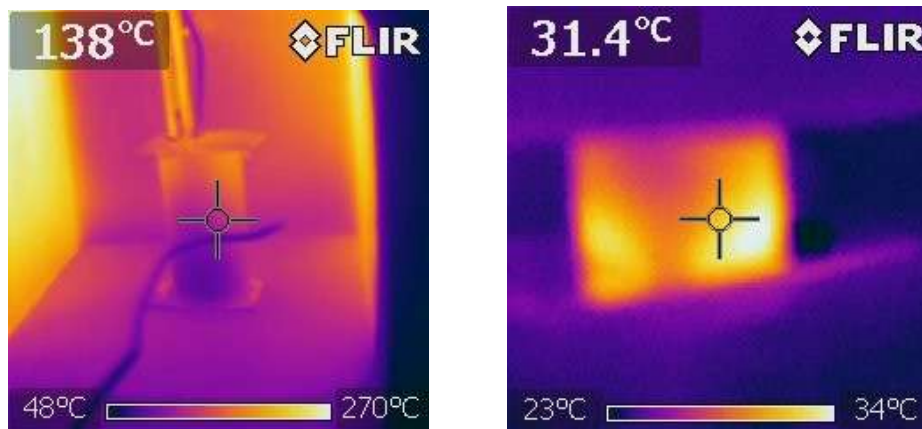


Figura 3.28 Ensayo para la obtención de las propiedades termofísicas, a) calor fluyendo hacia la probeta b) calor fluyendo del interior de la probeta por efecto Joule al medioambiente.

Los defectos o impurezas de un material influyen en la conductividad térmica solo un poco, pero el calor específico no será afectado de manera significativa. Para el ensayo de conductividad térmica se registró la energía calorífica aplicada a la probeta cilíndrica de 25mm de diámetro por 25mm de longitud. Esta energía aplicada se determina por  $Q = m \cdot C_p \cdot \Delta T$ , donde (m) masa de la probeta, ( $C_p$ ) calor específico y ( $\Delta T$ ) el diferencial de temperatura. Los componentes que integran el compuesto tienen las siguientes características. La conductividad térmica de las fibras de carbono FCM tiene un valor de alrededor de 55-80 W/m<sup>2</sup>K según refiere el fabricante. La conductividad térmica de la silicona RTV según el fabricante es de 0.22-0.24 W/m<sup>2</sup>K. El calor específico del carbono es de 710 J/kg<sup>2</sup>K. El calor específico de la silicona es de 1265 J/kg<sup>2</sup>K. En General los materiales que presenten un elevado calor específico serán buenos aislantes térmicos. En el ensayo de dilatación térmica lineal se procedió a fijar la probeta dentro de una mufla que calienta el compuesto flexible de temperatura ambiente hasta 140°C, fue medida la dilatación lineal con un indicador de caratula externo con precisión de 0.001 pulgadas. Dos termopares miden la temperatura interior en el centro de la probeta y el exterior, adicionalmente se mide la resistencia eléctrica en terminales de las probetas C100 y C75 vista en la figura 3.34. Se puede observar en la curva la dilatación lineal de la matriz con una magnitud mayor que las probetas C75 y C100 dado que la de mayor rigidez se dilata menos a la misma temperatura. Cuando un cuerpo se alarga linealmente al aumentar su temperatura 1°C y no se considera su deformación transversal entonces:  $\Delta L = \gamma \Delta T L_0$  donde:  $\gamma$  es el coeficiente de dilatación lineal,  $\Delta L$  es el diferencial de la longitud del cilindro,  $L_0$  es la longitud inicial del cilindro y  $\Delta T$  es el incremento de temperatura o diferencial de temperatura, con esta ecuación podemos determinar el coeficiente de dilatación lineal en el ensayo.

### 3.4.9.- Ensayo de dilatación lineal térmica y conductividad térmica.

La matriz de silicona RTV tiene una conductividad térmica baja, significa que es un buen aislante térmico. Por definición la resistencia térmica es el inverso de la conductividad térmica:  $R_t = 1/K$ . El caso de las fibras de carbono molidas FCM, tiene conductividad térmica que depende del tamaño de las fibras y la pureza del carbono. Entonces se espera que adicionando las fibras de refuerzo a la matriz flexible, la conductividad térmica del compuesto aumentará y su resistencia eléctrica disminuye. En el caso de los sólidos porosos, la conductividad térmica depende de la forma, el tamaño de los poros y del fluido o gases que este dentro de estos huecos. El compuesto flexible manufacturado presenta un comportamiento de sólido amorfo por la distribución y orientación de las fibras dentro de la matriz de silicona. En el proceso de manufactura se integra un contenido significativo de huecos conteniendo esencialmente de aire y otros gases, como solventes que contiene el catalizador y aceite suavizador. Estos quedan atrapados en el proceso de vulcanizado del compuesto flexible, afectando no sólo la conductividad térmica, también la eléctrica. Una vez que el material alcanza valores de temperatura próximos a los 80°C la resistencia eléctrica aumenta mucho en el orden de los cientos de Mega-Ohms (M $\Omega$ ), la conductividad térmica sólo se limita a la conducción de calor por la vibración molecular, comportandose casi como un aislante térmico con valores próximos a la conductividad térmica de la matriz de silicona o un poco mayor en función al contenido de fibras de carbono adicionadas al compuesto flexible y del contenido poroso "burbujas". Una manera común de medir la conductividad térmica de un material es usar el método de prueba estándar norma ASTM C177, un calefactor eléctrico resistivo R, construido por un disco térmico, entre dos muestras cilíndricas del mismo material, como se muestra en la figura 3.29. El espesor del calefactor (resistencia eléctrica R) debe ser delgado. Agua fría circulante o aire, mantiene los extremos expuestos de las muestras a temperatura constante. Las superficies laterales de las probetas están bien aisladas para garantizar que la transferencia de calor a través de las muestras sea unidimensional. Se colocan dos termopares en cada una de las muestras, separados cierta distancia L, con un medidor de temperatura diferencial se lee la caída de temperatura  $\Delta t$ , a lo largo de cada muestra. Cuando se alcanzan condiciones estacionarias de operación, la razón total de transferencia de calor a través de las dos muestras se iguala con la potencia eléctrica suministrada por el

calefactor R. En el ensayo se usa una probeta cilíndrica con un diámetro de 25mm y una longitud de 30mm. Los dos termopares están colocados con una separación de  $L=10\text{mm}$ . Las dos muestras a medir están en equilibrio térmico es decir el flujo de calor  $Q$  que produce el calefactor fluye por las dos muestras de manera simétrica  $Q/2$  visto en la figura 3.29 [12].

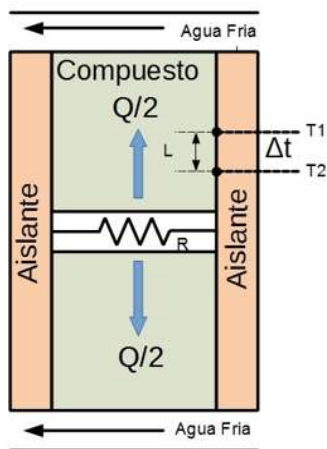


Figura 3.29 Ensayo de conductividad térmica norma C177 ASTM.

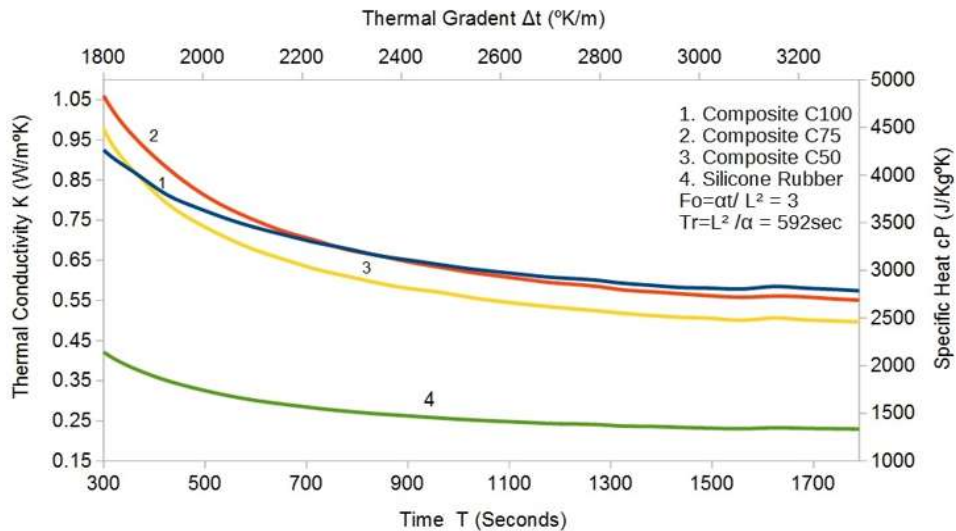


Figura 3.30 Coeficiente de conductividad térmica  $K$  y calor específico.



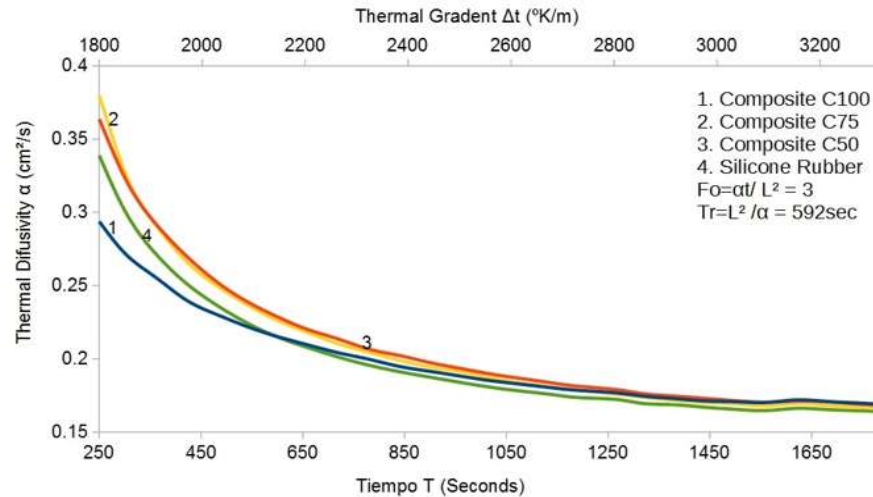


Figura 3.31 Difusividad térmica del compuesto flexible.

En el caso de la dilatación térmica lineal del compuesto referida anteriormente, se procedió a fijar la probeta dentro de una mufla que calienta el compuesto flexible de temperatura ambiente hasta 140 grados centígrados, se mide la dilatación lineal con un indicador de caratula, dos termopares miden la temperatura interior del centro de la probeta y el exterior del cilindro además de la resistencia eléctrica en terminales de las probetas C100 y C75. Vista en la figura 3.34 donde la escala de la dilatación lineal  $\Delta L$  en mm, y la temperatura en el eje horizontal. Se puede observar en la curva los resultados de la dilatación lineal del material estándar, una dilatación mayor que la probeta C75 y C100 debido a su mayor rigidez se dilata menos a la misma temperatura.

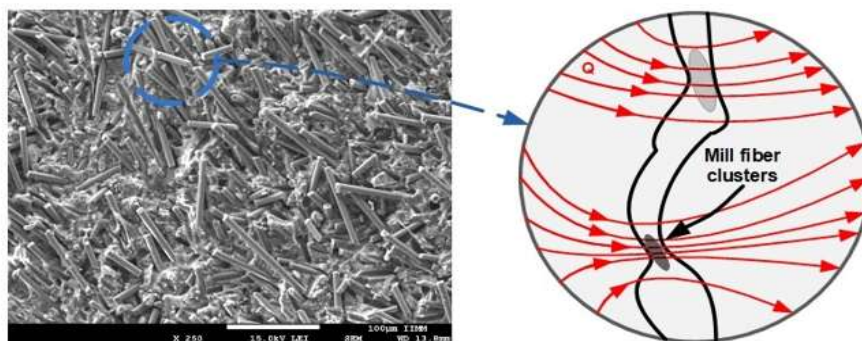


Figura 3.32 Contacto térmico imperfecto entre las FCM y la matriz de silicona, distribución de temperatura y desviación del flujo de calor  $Q$  a lo largo de la interfase (MIFM) del compuesto flexible debido a la variación de la conductividad térmica y eléctrica por formación de clústers.

Los resultados de los ensayos térmicos aplicados a las probetas son mostrados en las figuras 3.30 y 3.31 las curvas de 4 probetas ensayadas y su comportamiento de conductividad térmica, calor específico y difusividad en estado transitorio, después de un tiempo de ensayo de aproximadamente de 1800 segundos se alcanzan sus valores en estado estable. En la figura 3.30 se muestra la diferencia de la magnitud en la

conductividad térmica (K) de la silicona sin fibras de refuerzo, la curva 4. En la parte superior de esta figura están las curvas 1, 2 y 3 correspondientes a la silicona con diferente contenido de FCM, mostrando una mayor conductividad térmica y calor específico. El tiempo de relajación térmica fue calculado en 592 segundos. En la figura 3.31 podemos ver las 4 curvas mostrando el comportamiento de la difusividad térmica en estado transitorio y el valor en estado estable después de un tiempo de relajación  $T_r$ . Estos valores de difusividad tienden a ser casi iguales en estado estable.

### 3.4.10.- Dilatación térmica y la estabilidad por el efecto Joule.

La dilatación térmica volumétrica cambia la interconexión de las FCM cambiando la impedancia total del compuesto, dependiendo de la cantidad de fibras en el compuesto visto en la figura 3.32. Esto provoca un aumento de impedancia, por ley de Ohm la corriente disminuye inversamente en proporción. Si el compuesto se usa como elemento calefactor, el compuesto autorregula su temperatura debido a esta característica. Cuando la temperatura aumenta la dilatación lineal y volumétrica también aumentan, la resistencia eléctrica aumenta de manera significativa. Este efecto puede ser estabilizado, conociendo el valor de la dilatación lineal a una cierta temperatura si se conoce, se puede someter el compuesto a una compresión para disminuir esta dilatación, con la finalidad de que la resistencia eléctrica no aumente tanto a temperatura nominal de  $80^{\circ}\text{C}$ . Por ejemplo, si el compuesto C100 se dilata un total de 1mm a  $80^{\circ}\text{C}$ , el compuesto debe ser comprimido con una fuerza tal que evite la dilatación, por lo tanto la conductividad eléctrica disminuye. Esto puede verse como una estabilización por compresión provocando un efecto que no permite que el valor de resistencia eléctrica aumente mucho a esa temperatura. Por lo tanto se produce una cantidad de calor mayor para ese punto de operación. El compuesto podrá operar a un rango de temperatura mayor entre  $T_a-200^{\circ}\text{C}$  con el mismo voltaje aplicado al compuesto. En la figura 3.33, se ensaya la probeta C100 con forma de solera cuadrada en un recipiente, el cual comprime 1.2mm esto limita la dilatación a un valor menor. La resistencia eléctrica limita el crecimiento de su valor, esto provoca un aumento en la producción de calor, también una distribución más homogénea de calor en el volumen total. Se pueden lograr temperaturas más alta que 145 grados centígrados con el mismo voltaje. En resumen esto equivale a confinar el compuesto dentro de un recipiente que limite la expansión volumétrica, estabilizando la producción de calor por efecto Joule para que el material opere a mayor temperatura cercanas a los 200 grados, que es la temperatura límite del silicona RTV comercial. En la figura 3.33 se observa la distribución de calor para diferentes temperaturas variando el voltaje de 0 a 12VCD.

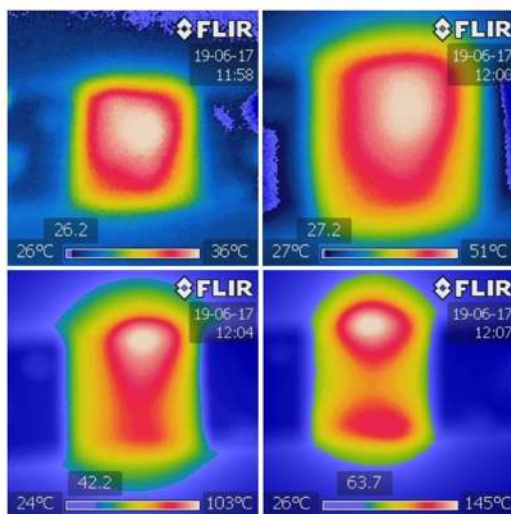


Figura 3.33 Estabilización térmica de una probeta solera 19x19x8mm por efecto Joule a compresión C100.

El resumen de los resultados termo físicos realizados al compuesto flexibles muestran en las figuras 3.34 y 3.35, donde se observan un conjunto de curvas de la dilatación térmica lineal de las probetas C100, C75 y silicona pura. Mostrando su comportamiento no lineal para el caso de la silicona pura y una magnitud de dilatación mayor que la C100 y C75 debido a su mayor rigidez. Para el caso de la figura 3.35 las dos curvas representan el comportamiento de la resistencia eléctrica de las probetas C100 y C75 cuando la temperatura aumenta de la ambiente a 80°C. Estas curvas pueden ser transformadas en curvas de tendencia para generalizarlas aún más y obtener una ecuación que la represente. La figura 3.36 muestra una relación comparativa entre la variación de la resistencia eléctrica y la dilatación lineal respecto a la temperatura.

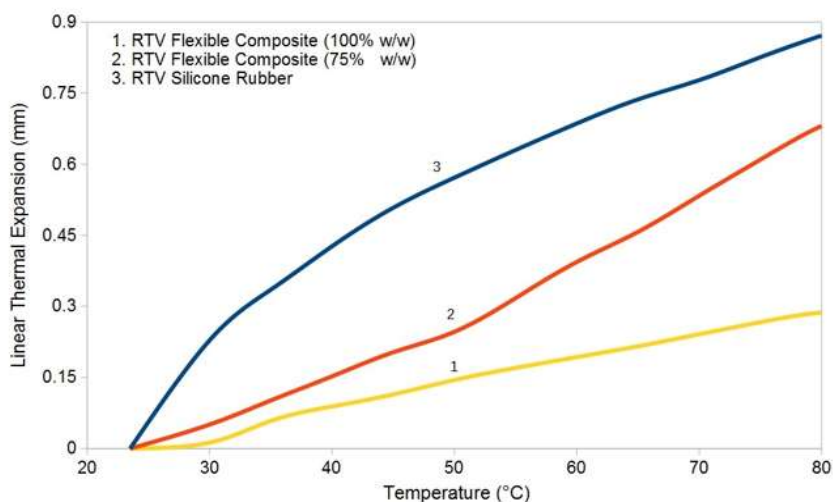


Figura 3.34 Dilatación térmica lineal del compuesto flexible.

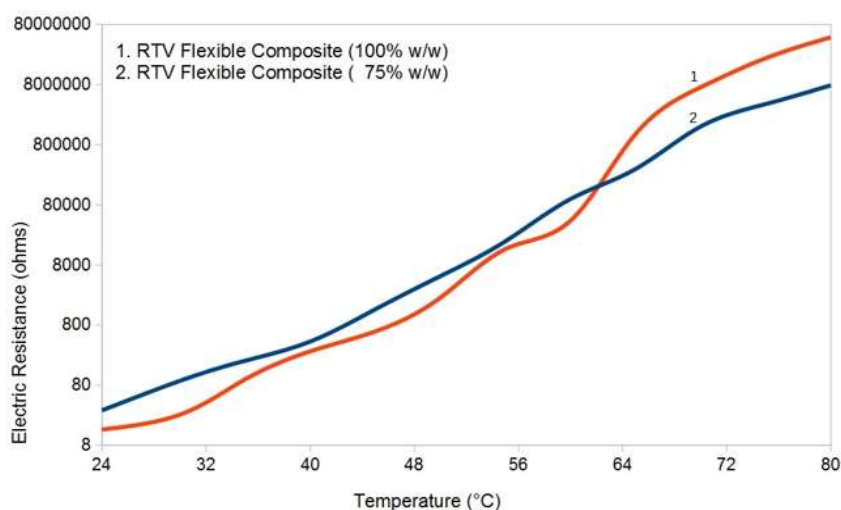


Figura 3.35 Variación de la resistencia eléctrica con la temperatura.

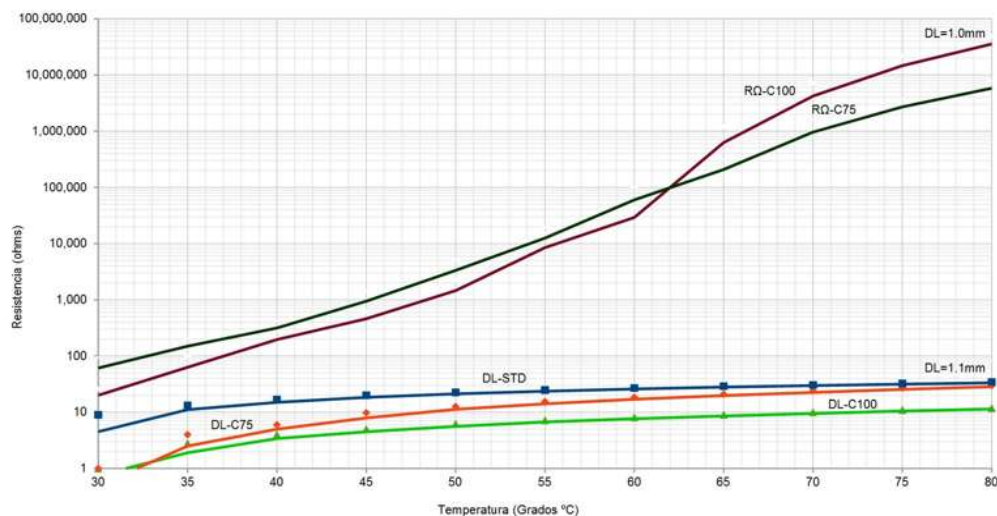


Figura 3.36 Dilatación térmica lineal del compuesto flexible RTV y variación de la resistencia eléctrica.

### 3.4.11.- Distribución y orientación de las fibras de carbono molidas en la matriz.

En el análisis de microscopía electrónica de barrido MEB, realizada al compuesto, se observa una distribución y orientación de las fibras en la matriz del elastómero (silicona) en todo el volumen visto en la figura 3.10, esta orientación de fibras es aleatoria y su distribución no es completamente homogénea. El proceso de fabricación del compuesto, pretende una mezcla homogénea, por ejemplo en el caso del compuesto C100 se usan 100 gramos de silicona (incluido el diluyente y catalizador) se adicionan 100 gramos de fibras de carbono molidas (MFC) que son fibras refinadas de grafito de tamaño promedio de 80x9.5 micras y pureza de 99.9%. Esto forma inicialmente una mezcla muy densa difícil de procesar por medios manuales, entonces se usó una extrusora y mezcladora de tornillo por un periodo de 2-3 minutos para obtener una masa poco fluida. Esta mezcla es sometida a extrusión e inyectada a presión en un molde cilíndrico de PVC de 50 mm de longitud por 25mm de diámetro interior. El proceso de extrusión e inyección es determinante para lograr una buena calidad en la manufactura y lograr un compuesto más homogéneo. Esto determinará una mejor interconexión eléctrica entre fibras y la matriz de silicona.

### 3.4.12.- Variación de la conductividad eléctrica y térmica por efecto Joule.

Como se mencionó anteriormente, si por el compuesto flexible circular una corriente eléctrica, se espera que en función a su impedancia total y la magnitud de la corriente que circula por él, se produzca una cantidad de calor en las fibras, por efecto Joule que es  $Q = I^2 R$  por segundo, producida por la red de circuitos de conexión entre las micro fibras de grafito a lo largo y ancho del cilindro. En el compuesto manufacturado se forman cúmulos o racimos (clúster) de fibras que tiene mayor cantidad de fibras que producen mayor cantidad de calor en ciertas regiones (no es completamente homogéneo). Por lo tanto se crea un diferencial de temperatura en esa región y una dilatación térmica también no homogénea a lo largo de la probeta. En las fotos IR de la figura 3.37, se observan los cúmulos que producen más calor a 29.2 °C, en el centro de la probeta y próximos a las terminales en forma anular discontinua, después de un tiempo el calor aumenta y la dilatación térmica también, propiciando nuevos cúmulos en un área diferente vista en la termografía a 38.3°C. En este punto la impedancia total aumenta, disminuyendo la corriente y la cantidad de calor

producida de forma cuadrática. Este es un fenómeno que limita la producción de la cantidad de calor en la probeta, para el caso de probeta C100 la impedancia aumenta en el orden de los Kilo-ohms  $K\Omega$ , la corriente disminuye produciendo menos calor  $Q$ , el voltaje aplicado permanece constante. Los cúmulos que producen más calor los denomino “Puntos Calientes” y dan cuenta de la distribución y orientación de las fibras en la matriz y de las regiones con mayor cantidad de fibras a una temperatura específica. Este fenómeno físico produce cambios, discontinuidad en la conductividad térmica lineal y volumétrica en el compuesto, debidas al contacto imperfecto entre la matriz y las fibras, modifican la forma en que el flujo de calor se desplaza por el compuesto. Se presentan cambios de la resistencia térmica total, adicionalmente hay cambios también en la conductividad eléctrica que produce mayor o menor calor en ciertas zonas “Puntos Calientes” vistos en la imagen de la figura 3.39. Entonces se produce un diferencial de temperatura  $\Delta T$  y el flujo de calor es distribuido o desviado obligándolo a circular por las regiones de menor resistencia térmica presentándose este fenómeno de “Punto Caliente” que se observan en las termografía de la figura 3.37.

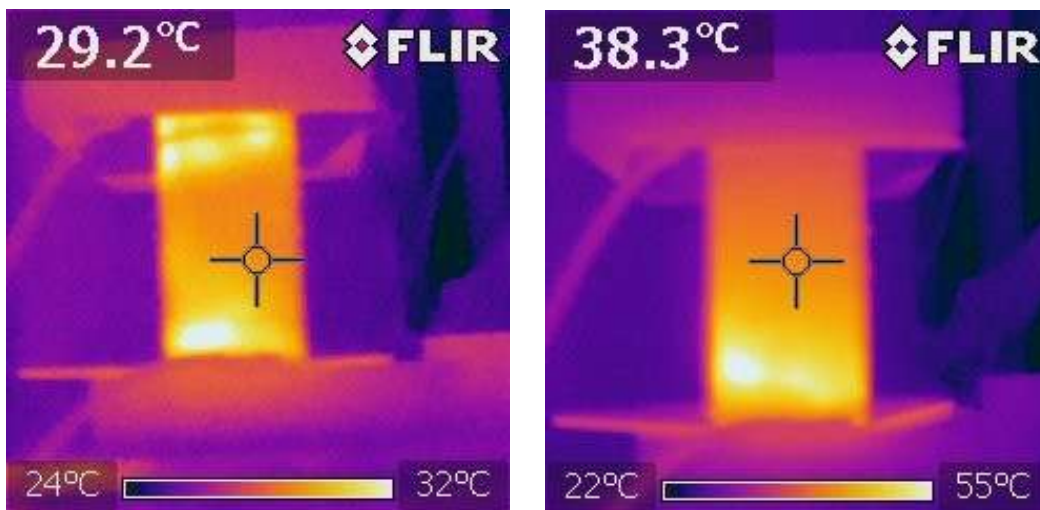


Figura 3.37 Termografía, migración de los “Puntos Calientes” por efecto joule en el compuesto RTV C75.

### 3.4.13.- Distribución de partículas usando fotografías de Rayos X y Termografía IR.

Se prepararon probetas en forma de solera cuadrada de 19x19 mm y espesor de 8mm para este ensayo vistas en la figura 3.39 del compuesto C100, con la finalidad de comprobar una distribución y orientación volumétrica de las fibras en la matriz.

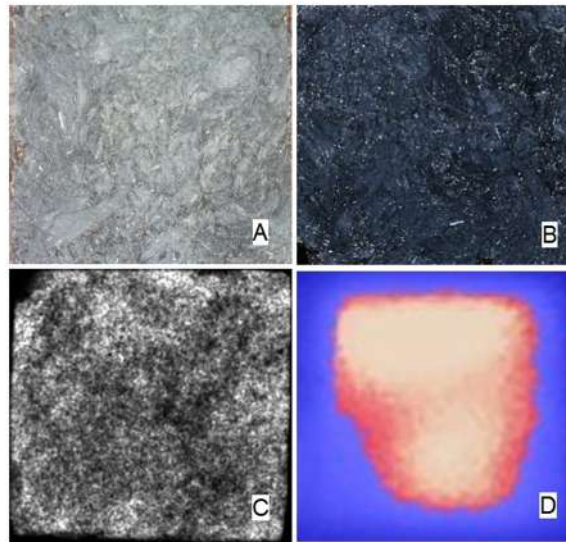


Figura 3.38 Compuesto C100 mostrando la distribución de las fibras y los cúmulos, Microscopias Estereoscópica superficial a 75x (A), Fotografía digital superficial a 75x (B), Morfología, Fotografía de Rayos X-proyección-3D (C), Termografía IR Superficial (D).

En la figura 3.38 (A, B) se aprecia una distribución de las fibras de manera superficial, se distinguen claramente los cúmulos de fibras a nivel superficial. En la figura 3.38 (C) se presenta la radiografía digital mostrando una densidad y la presencia de los cúmulos en las tres dimensiones, su morfología en proyección 3D-X-Ray, en la figura 3.38 (D) vemos la termografía de rayos infrarrojos IR de la placa sometida a una corriente eléctrica que produce una cantidad de calor por efecto Joule en las fibras de carbono, mostrando donde se encuentra el cúmulo de mayor resistencia eléctrica, mayor cantidad de calor a esa temperatura. La radiografía muestran características de distribución superficial de micro-fibras y orientación en el volumen del compuesto, en una placa cuadrada.

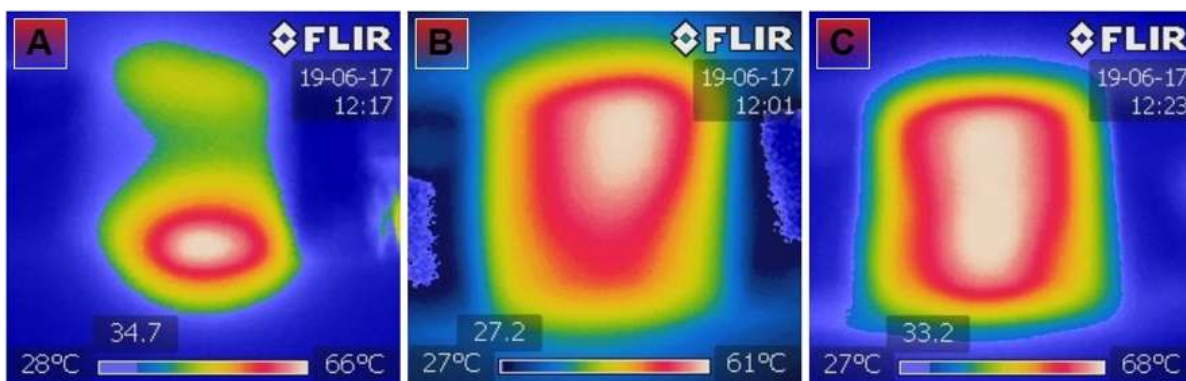


Figura 3.39. Efecto Joule al aplicar energía eléctrica, distribución del calor, compuesto C50(A) se aplican 220v, compuesto C75 (B) a una tensión de 50v y el compuesto C100 (C), aplicando 12v.

En la figura 3.39 se puede apreciar la distribución del calor generado por el paso de la corriente en el compuesto una placa con dimensiones 8x19x19mm. La potencia  $P = i^2R$ , en el caso de la figura 3.39(A) se

aplican 220v después de un tiempo de produce calor, la presencia de un cúmulo de fibras de carbono con mayor resistencia eléctrica la cual producen mayor cantidad de calor que otras partes del compuesto, después de un tiempo el resto del compuesto es bloqueado eléctricamente, cuando se dilata. Para tener una idea del tamaño, una fibra promedio mide 9.5x80 micras la matriz se dilata linealmente 1100 micras a 80°C. La resistencia aumenta favoreciendo aún más este efecto de concentración de calor en esta región. El compuesto C75 contiene una cantidad mayor de fibras de carbono que el C50, desde luego que mayor conductividad eléctrica visto en la figura 3.39(B) se refiere a la probeta C75 que se alimenta con un voltaje de 50v y su temperatura es de 61°C, El calor es mejor distribuido por todo el compuesto, pudiendo identificar la región de mayor acumulación de las fibras respecto a otras regiones del mismo compuesto. Para el caso del compuesto C100 con el mayor contenido de fibras de carbono, presenta una distribución más homogénea de las fibras y una distribución de calor más uniforme en todo el volumen, visto en la figura 3.39(C) esta probeta fue energizada con un voltaje de 12v.

#### 3.4.14.- Radiografías de Rayos X-3D.

Para complementar el análisis de la distribución de partículas se tomaron radiografías al compuesto flexible con el equipo de Rayos X, se usa un sensor de Intra-Oral con excelente calidad de imagen, marca FONA CDRelite Tecnología CMOS APS (Active pixel sensor) Avanzada, vista en la figura 3.40.

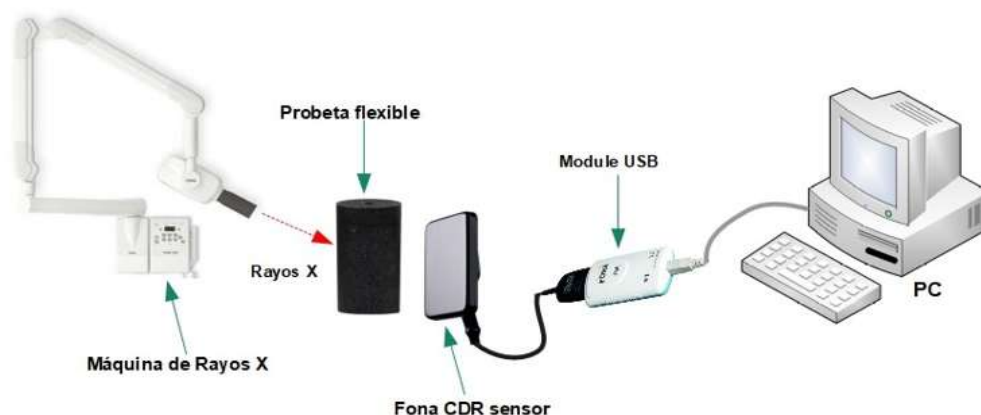


Figura 3.40 Sistema de radiografías digitales Fona CDRelite del compuesto flexible.

En la figura 3.41 y 3.42 muestra las imágenes de la morfología superficial y proyección de imagen en 3D se la distribución de partículas en la silicona estándar figura 3.41(A) la presencia de relieves en ese eje “z” con una pequeña intensidad, muestra un compuesto homogéneo y sirve como referencia (este compuesto es la matriz). Para el caso del compuesto C50 visto en la figura 3.41(B) se tiene una distribución dispersa de partículas en la matriz mostrando la presencia de las fibras de carbono y pequeñas aglomeraciones de estas fibras que no están perfectamente distribuidas en el volumen. Para el caso del compuesto C75 figura 3.41(C) se observa que, una mayor magnitud de los relieves 3D de mayor intensidad. Finalmente, el compuesto C100 muestra en la figura 3.41(D) donde es visible el incremento de la magnitud de los relieves 3D indicando que este compuesto tiene mayor cantidad de fibras y cúmulos de mayor tamaño en todo el volumen del compuesto flexible comparado con la matriz inicial en 3.41(A). Precisamente estos cúmulos se formaron en el proceso de manufactura del compuesto y propician una variación en la densidad volumétrica, la conductividad eléctrica y térmica.

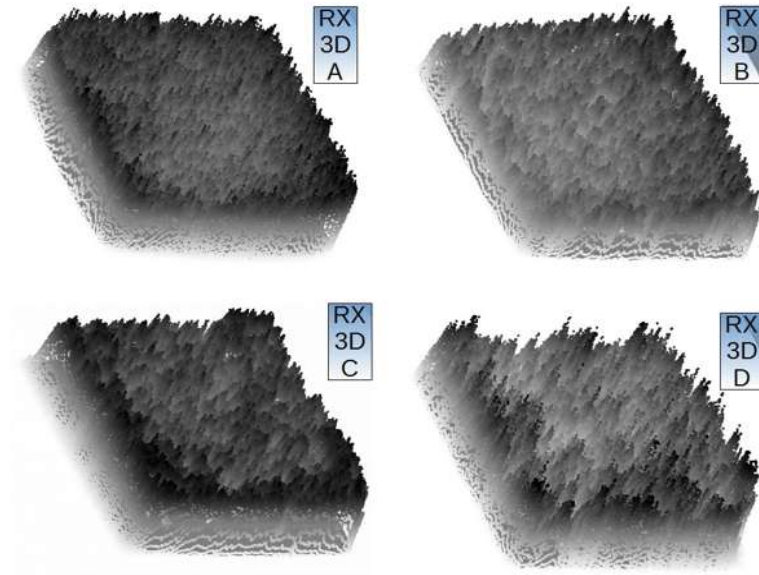


Figura 3.41 Morfología de Rayos X proyección 3D en espécimen de 8x19x19mm, Silicona STD (A), C50(B), C75(C), C100 (D).

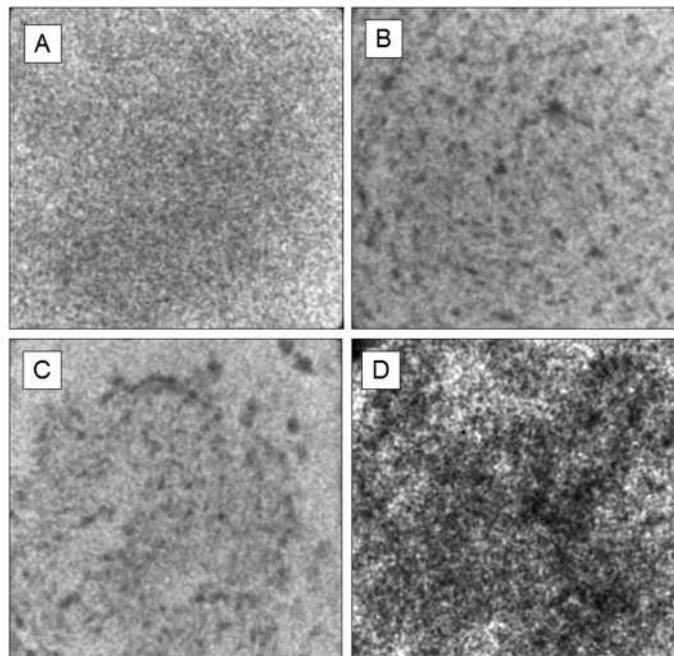


Figura 3.42 Morfología de Rayos X-2D en espécimen de 8x19x19mm, Silicona STD (A), C50(B), C75(C), C100 (D).



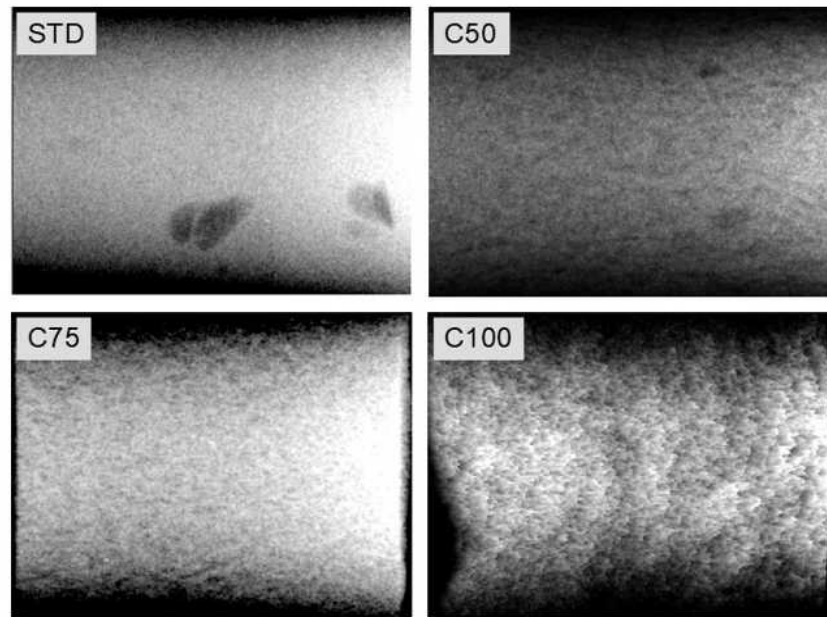


Figura 3.43 Morfología mediante Rayos X-3D en espécimen cilíndrico.

En la figura 3.43 podemos apreciar la morfología del compuesto de una probeta cilíndrica de mostrando la distribución de las fibras en la matriz. En la figura 3.43C100 podemos observar la porosidad en donde están contenidas las fibras de carbono molidas respecto a la matriz figura 3.43STD que muestra un compuesto homogéneo sin fibras de refuerzo y con la presencia de algunas grandes burbujas de aire.

La densidad de un cuerpo ( $\rho$ ) resulta del cociente entre masa y su volumen.  $\rho = m/v$ . Como ya se dijo el calor específico determina la capacidad de un material para acumular calor. Por ejemplo, su valor depende del tipo de material, y tiene un rango de variación pequeño para la mayoría de materiales usados por ejemplo en la construcción; el rango está comprendido entre 500 y 200 J/kg $^{\circ}$ K y pocos materiales salen de este rango. Un caso especial es el agua, cuyo calor específico es particularmente elevado (4187 J/kg $^{\circ}$ K). Por ello, el agua es utilizada como medio de almacenamiento térmico en una gran variedad de aplicaciones. La difusividad térmica ( $\alpha$ ) expresa la capacidad de un material para transmitir una variación de temperatura, este valor describe cuán rápido un material reacciona a un cambio de temperatura. Es un índice que expresa la velocidad de cambio del flujo de calor, en un material hasta que alcanza el equilibrio térmico (estado estable).  $\alpha = K/\rho C_p$ , donde: K es la conductividad térmica  $\rho$  es la densidad y  $C_p$  es el calor específico, sus unidades son m $^2$ /s. En otras palabras es calor conducido entre calor almacenando. Un material que tiene una alta conductividad térmica o una baja capacidad calorífica tiene una gran difusividad térmica. Entre mayor es  $\alpha$ , más rápida es la propagación del calor hacia el medio. Un valor pequeño de  $\alpha$  significa que, en su mayor parte, el calor es absorbido o desviado por el material y una pequeña cantidad de ese calor será conducido. La Efusividad térmica ( $\beta$ ) expresa la capacidad de un material para absorber o devolver un flujo de calor o potencia térmica. Esta se conoce también como “Coeficiente de Contacto”. Y juega un papel importante cuando los cuerpos, en este caso objetos de metal y madera, entran en contacto con la piel humana, es posible considerar un escenario en el que se tienen dos cuerpos con temperaturas T1 y T2 donde T1 > T2, en un contacto ideal, la interfase de contacto adquiere una temperatura de contacto. La efusividad del metal es mucho mayor que la de la piel y la de la madera; pero la de la madera es menor que la de la piel

y por tanto se deduce que cuando un cuerpo con una efusividad mayor entra en contacto con un cuerpo con menor se siente frío y cuando un cuerpo con efusividad menor entra en contacto con otro de mayor se siente templado. La efusividad térmica se determina mediante  $\beta = (K.\rho.C_p)^{1/2}$ . El número de Fourier  $Fo = \alpha T/L^2$  y el tiempo de relajación del material  $Tr = L^2 /\alpha$ , deben ser analizados. El calor sensible es aquel que un cuerpo o sustancia es capaz de absorber o ceder sin que por ello ocurran cambios en su estructura molecular, o sea, en su estado físico. El calor absorbido o cedido depende de la presión que se ejerce sobre él, a mayor presión mayor calor sensible. El calor latente es el calor que no produce incremento en la temperatura, en el caso del calentamiento del agua comienza a aumentar su temperatura hasta alcanzar la ebullición (calor sensible), a partir de ese punto la temperatura no aumenta permanece constante y toda la energía que se siga aplicando se usará para cambiar de estado de líquido a vapor y coexistirán las dos fases (calor latente). Sus unidades son J/Kg. El número Fourier o módulo de Fourier ( $Fo$ ) es un número adimensional que caracteriza la conducción de calor. Conceptualmente es la relación entre la velocidad de la conducción de calor y la velocidad del almacenamiento de energía. [13]. La difusividad térmica típica es  $\alpha \approx 10^{-4}$  m<sup>2</sup>/s para metales y gases, y de un valor  $\alpha \approx 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s para no metales y líquidos. El número de Fourier  $Fo$  sirve para tener una idea del grado de avance del estado transitorio hacia el estacionario.

## CAPÍTULO 4.

### ANÁLISIS DE RESULTADOS.

#### *Discusión de los resultados.*

Apartir de los hallazgos encontrados aceptamos la hipótesis de que una vez realizado el análisis detallado de las señales y determinados los parámetros de las vibraciones en un conjunto de máquinas rotatorias (turbo-generador), se puede diseñar e implementar un sistema de regulación usando un soporte aislador de vibraciones, de silicona-metal, sensible a ellas y a cargas dinámicas, mediante el efecto piezoresistivo, auxiliados en el desarrollo de un software para el registro, medición y control. Existe una relación entre los niveles de anormales de los parámetros de vibraciones y el mal funcionamiento de sus componentes. Estos resultados guardan relación con los obtenidos por

**Edgar Estupiñán P., César San Martín y Rene Solaligue M.** (2005) ellos realizaron un diseño e implementación de un analizador virtual de vibraciones mecánicas. este desarrollo de la electrónica y la computación ha propiciado de manera satisfactoria el desarrollo de técnicas de análisis de señales con aplicación al procesamiento de señales vibratorias. El alto costo de instrumentos comerciales para la recolección y análisis de vibraciones, así como su arquitectura cerrada, ha llevado a buscar nuevas alternativas. Los “instrumentos virtuales” o instrumentos basados en sistemas de adquisición de datos constituyen una herramienta poderosa para el desarrollo de instrumentos más económicos y flexibles. En este trabajo se describe el diseño e implementación de un analizador virtual de vibraciones de dos canales, desarrollado en ambiente LabVIEW. En éste se han incluido varias técnicas de análisis de señales útiles para el diagnóstico de fallas de máquinas rotatorias y con la posibilidad de ser controlado y/o monitoreado remotamente por medio de una red Internet o Intranet. Pero no así en la el procesamiento de las señales y la obtención de parámetros vibratorios.

También guarda una relación con el trabajo de tesis de especialidad de **Cristian Hamilton Sánchez Saquín** (2017) en este trabajo expone que se acondicionará un sistema de adquisición de datos a un shaker (agitador) que cumple la función de una máquina vibrando. El sistema de adquisición de datos consta de un acelerómetro triaxial 4506 Brüel and Kjaer, tarjeta de adquisición de datos Hi-Speed USB Carrier NI USB-9162 de National Instruments, un generador de señales Tektronix AFG 3151C, Shaker VR520 Vibration Research Corporation, software Excel y LabVIEW. El sistema de adquisición de datos hará posible que obtengamos el espectro de frecuencias mediante la Transformada de Fourier, con este espectro se realizará el análisis de vibraciones y así, se determinará el tipo de falla y la severidad que se tiene en el shaker. Para determinar la falla y severidad de la señal, se realizará la comparativa entre la señal de entrada y una norma para severidades de vibración ISO2372. Referente a la fabricación de un compuesto flexible el trabajo realizado guarda una relación con el trabajo publicado por **Ana Luísa Silva a y Matheus Millen Correa** (2017) denominado “Desarrollo de compuestos de grafito y silicona para su uso como electrodos flexible” en el cual se aboca únicamente ala caracterización del compuesto para que sea usado como electrodos conductores flexibles. Asimismo tambien guarda relacion con el trabajo de **Aline Carlos de Oliveira, Sidne, Xavier dos Santos y Eder Tadeu Gomes Cavalheiro**. Denominado “Electrodo compuesto de caucho de silicona y grafito, preparación y posibilidades de aplicación analítica”. También el trabajo con el que guarda una relación es el trajo publicado por **Luheng Wang** (2016) titulado, ”Material sensor piezoresistivo de presión basado en de la micro-hojuelas de grafito como refuerzo en caucho de silicona.” en el cual realiza una caracterización de este compuesto con diferentes contenidos de partículas de grafito como refuerzo y explica como es que funcionan las micro interfases de las hojuelas de grafito con las matriz de silicona. También el estudio muy similar el realizado por **Luheng Wang, Fangfang Ma, Qianshu Shi, Huanghai Liu y Xueting Wang** (2010) denominado “ Estudio sobre la fluencia de resistencia a la compresión y recuperación de flexibles sensibles a la presión de un compuesto de caucho de silicona con

refuerzo de negro de humo “ en el cual se estudian algunas características de tiempo de recuperación a la compresión y su respuesta piezoresistiva y el efecto de las líneas conductoras efectivas en la matriz y el grafito adicionado ante fuerzas de compresión. Finalmente con esta discusión es posible diferenciar la relación que existe entre la hipótesis general planteada al inicio de esta investigación y el marco teórico, se pueden observar claramente los aportes de este trabajo de investigación. Los resultados de los experimentales que se aplicaron al análisis de vibraciones mediante la plataforma de instrumentación virtual Labview dan como resultado el desarrollo de un software para el acondicionamiento e instrumentación de los parámetros de vibración en el dominio del tiempo y la frecuencia, el cual será aplicado en los rodamientos del conjunto de máquinas rotativas contempladas en esta investigación. Adicionalmente el desarrollo de un compuesto con propiedades mecánicas y eléctricas que servirán para culminar esta investigación con la fabricación de un soporte aislador de vibraciones, y lograr los objetivos. Se realizaron los experimentos en esta tesis que se describen a continuación y que serán analizados brevemente.

#### **4.1.- Propiedades micro-estructurales.**

La porosidad del compuesto flexible es una característica inherente a este compuesto flexible dado que el compuesto es homogéneo a nivel macroscópico, esto es, tiene una distribución uniforme de las fibras la matriz de silicona y una orientación aleatoria, esta distribución, orientación, cantidad, tamaño y forma, determinará las características del compuesto flexible. Otro factor importante que afectará su comportamiento mecánico, eléctrico y térmico es sin duda la porosidad. La porosidad no sólo cambia la rigidez del compuesto, su tolerancia al desgarre, su conductividad térmica y eléctrica a un nivel macro y microestructural. En el proceso de vulcanización en la silicona el fabricante recomienda el uso del porcentaje adecuado del diluyente 10-15% y catalizador 1-5%, los porcentajes adecuados pueden hacer menos fluida la silicona y cambian el tiempo de reticulación y vulcanizado final de la silicona. Este tiempo es de unos cuantos minutos dependiendo del porcentaje de catalizador adicionado, permitiendo que en este tiempo se pueda extraer las burbujas de aire y otros solventes que se producen en el mezclado, algunos de estos contenidos en el diluyente y el catalizador, esto puede lograrse mediante un tiempo de relajación, mezclado y agitación mecánica antes de que comience a gelar. Otro método efectivo es meter la mezcla a una cámara de vacío por un par de minutos para extraer por diferencia de presión casi todas las burbujas de la silicona y el compuesto, mucho antes que inicie la gelación. Para el caso de los compuestos C50 y C75, el proceso es necesario pues el contenido de fibras adicionadas es pequeño y el compuesto es mucho más fluido y tiene mayor capacidad de atrapar las burbujas. Para lograr la extracción de estas burbujas debemos mezclar y extruir el compuesto, sometiendo la mezcla a compresión, expulsando así una gran cantidad de estas burbujas y mejorando la distribución aleatoria de las fibras en la matriz, de esta manera su densidad aumenta y disminuye la porosidad. Otro problema del proceso de manufacturas de las probetas cilíndricas, es que al ser inyectadas a presión dentro del molde las fibras fluyen hacia los extremos del molde forzando a que las burbujas que aún quedan se desplacen por equilibrio de presiones al centro de la probeta cilíndrica vista en la figura 4.2, esto provoca un cambio en la densidad en esta región central, formando finalmente una pequeña variación volumétrica en el centro de la probeta que producirá pequeños cambios en el comportamiento del compuesto. La “Zonas Porosas” equivalen por un lado a que el material físicamente tenga una sección transversal menor y una conductividad menor en el centro del cilindro vista también en las radiografías de la figura 3.43 y por otro lado se observa en la microscopia electrónica de barrido que las fibras de carbono no son impermeabilizadas por completo con la silicona, permitiendo que se forme la (MIEF) y espacios vacíos entre ella (micro-poros). Esto afectará también otra la micro-interfase entre fibras y matriz (MIFM), los micro-espacio debe ser reducido en el proceso de extrusión, pero no se puede lograr por completo dada la densidad de la silicona y por el efecto de tensión superficial entre las fibras y la matriz, adicionalmente la propiedad de la silicona de ser hidrofóbica con las FCM. La (MICE) es determinante en el comportamiento del compuesto flexible, si se quiere usar como sensor deberán colocarse

dos electrodos en los extremos del cilindro, el eje longitudinal del compuesto será sensible a fuerzas externas, los electrodos normalmente son los apoyos mecánicos del compuesto, deben tener una rigidez mecánica y estar bien adheridos al compuesto para darles estabilidad mecánica y eléctrica, la resistencia de contacto debe ser reducida a un valor pequeño y estable, para que no afecte casi nada la respuesta piezoresistiva total. Este efecto es grave e indeseable en la conexión de estos dos elementos. Es el caso que sucede entre los electrodos y el compuesto, por tal debe ser estabilizada la (MICE) vista en la figura 4.1.

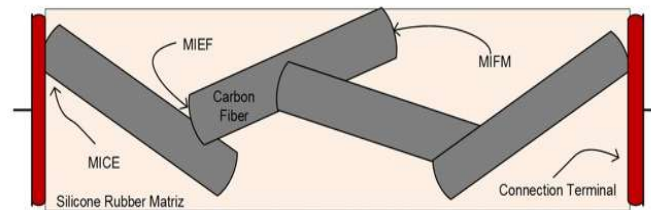


Figura 4.1 La Interacción de las micro-interfases formadas en el compuesto determinaran gran parte de su comportamiento y características.



Figura 4.2 Corte central de la probeta muestra la porosidad de una probeta C75.

#### 4.2.- Propiedades mecánicas y eléctricas.

En los resultados de los ensayos realizados al compuesto flexible con variación en el porcentaje de FMC, en resumen se encontró un incremento de la dureza proporcional a la cantidad de FMC, esto fue medido mediante un equipo de medición de la dureza para materiales elásticos de clase SHORE A vistos en la tabla 7. Los ensayos de tensión compresión sólo fueron acotados al ensayo de compresión debido a que la finalidad para la aplicación del compuesto es usará como soporte aislador de vibraciones que trabajará casi siempre a compresión. Como se mencionó se realizaron ensayos preliminares al inicio de esta investigación para determinar que equipos se requerían para realizar estos ensayos, encontrando la necesidad de construir los equipos, no se disponía de los equipos que fueran compatibles para la experimentación al compuesto flexible. Por ejemplo el caso de la construcción de una máquina de ensayo universal de tensión-compresión sensible a pequeñas cargas y velocidades de ensayo variable de 1-100mm/min, y 0-500kg. Adicionalmente la característica para medir la resistencia eléctrica, la deformación trasversal y longitudinal. Incluye una tarjeta de adquisición de datos en una memoria SD con velocidad de 60 muestras por segundo. El otro ensayo realizado al compuesto para la obtención de la respuesta eléctrica y mecánica ante la presencia de vibraciones mecánica de excitación periódica, la necesidad de la construcción de una máquina de ensayo vibratoria, para obtener un equivalente a espectroscopia de impedancia vibratoria y respuesta en el tiempo.

Encontrando la respuesta del material ante un espectro amplio de ondas vibratoria a diferentes frecuencias de 6-300Hz con excitación de frecuencia senoidal a velocidad contante a 20mm/seg, para mantener la aplicación de la energía constante.

#### 4.3.- Propiedades termo-físicas.

Para lograr este objetivo, fue construido una reactor de ensayo para determinar el calor específico, la conductividad y difusividad térmica basado en la norma ASTM C177. En este ensayo se usó una probeta con silicona pura, como referencia para realizar la calibración de la conductividad, difusividad térmica y el calor específico, dado que los valores de esta son aportados por el fabricante y se usan como referencia. Otro ensayo que se realizó es la determinación de la dilatación térmica lineal en relación con su resistencia eléctrica, la cual es fundamental para encontrar una aproximación de un circuito equivalente que represente el comportamiento del compuesto flexible. Los resultados de esta propiedades termofísicas se aprecian en el resumen en la tabla 7.

Tabla 7. Resumen del experimental y las características del compuesto flexible en estado estable térmico.

Compuesto	Resistencia estática inicial 22°C	Dureza Chore A 22°C	Resistividad especifica pe 22°C	Coefficiente de dilatación lineal $\gamma$ 1/°C	K W/m°K	$\alpha$ cm <sup>2</sup> /s	Pc J/kg°K	Fo at/L <sup>2</sup>	$\rho$ Kg/m <sup>3</sup>	$\Delta t$ °C	Tr seg	Tp seg
Silicón 100%	100 TΩ	40	89.17 TΩ.mm	0.00005102	0.23	0.164	1170.34	2.94	1195.33	83.1	609.7	1790
C50	15MΩ	50	344.23 MΩ.mm	0.00009702	0.50	0.166	2436.62	2.98	1225.37	36	601.3	1790
C75	300Ω	60	6.634 KΩ.mm	0.0001238	0.55	0.168	2636.62	3.01	1241.99	34.6	594.4	1790
C100	20Ω	74	533.48 Ω.mm	0.0001697	0.57	0.169	2680.78	3.02	1268.3	33.2	592.2	1790

#### 4.4.- Circuito equivalente del compuesto flexible.

Al obtener el circuito equivalente del compuesto se entra en una fase donde se integran todas las características del compuesto flexible y las variables físicas que lo afectan, cabe señalar que se trata de un circuito aproximado integrando parámetros eléctrico, mecánicos y térmicos, basado en los ensayos realizados.

##### 4.4.1.- El modelo equivalente del compuesto flexible propuesto.

El compuesto contiene elementos eléctricos y mecánicos que son parámetros que se ven afectados por la temperatura, resistividad específica, longitud, sección trasversal, campo magnético, eléctricos y ondas vibratorias. Estos elementos se representan en un modelo equivalente que integra los efectos de estas variables físicas y eléctricas en el compuesto. Este circuito equivalente considera la tabla 8 de equivalencias entre parámetros eléctricos y mecánicos, siendo conectados en serie y paralelo adquiriendo una topología de elementos en serie y paralelo visto en la figura 4.3.

Tabla 8 Equivalentes de parámetros en sistemas mecánico y eléctrico.

Concepto General	Sistema Mecánico	Sistema Eléctrico	Relación Matemática
Esfuerzo	$F(t)$	$E(t)$	$F(t)=E(t)$
Desplazamiento	$x(t)$	$q(t)$	$x=q$
Flujo	$v=dx/dt$	$i=dq/dt$	$v=i$
Oposición	$F=b.(dx/dt)$	$V=R.(dq/dt)$	$b=R$
Capacidad	$F=K.x$	$V=(1/C).q$	$K=1/C$
Inercia	$F=m.(d^2x/dt^2)$	$V=L.(d^2q/dt^2)$	$m=L$
Leyes	$\Sigma F=0$	$\Sigma V=0$	$\Sigma F=\Sigma V=0$
Potencia	$F.v$	$v.i$	$F.v = V.i$

#### 4.4.2.- La impedancia eléctrica $Z_e$ .

Este parámetro eléctrico es determinado mediante un ensayo, al sujetar mecánicamente la probeta y midiendo con el ohmetro el valor de resistencia en corriente directa (CD), adicionalmente se mide el valor de capacitancia e inductancia. Para obtener un valor preliminar y puntual de la impedancia  $Z_e$ , formada por los elementos  $R\Omega$ ,  $L_e$  y  $C_e$ . Los medidores RCL miden sólo valores de inductancia y capacitancia a una frecuencia específica. Si se desea ver la respuesta a diferentes frecuencias deberá hacerse un ensayo más completo, que se conoce como espectroscopia de impedancias. Cuando la frecuencia de excitación eléctrica es cero esto es, que se usa una fuente de CD, solamente se determina el valor  $R\Omega$  y no los valores de la rama paralelo entre  $L_e$  y  $C_e$ , presentando estos un valor de cero, por lo tanto  $Z_e = R\Omega$ . Cuando se excita con una fuente variante en el tiempo  $F(t) = V_m \text{seno}(\omega t)$  la impedancia de la rama paralelo tendrá un valor diferente a cero en este caso aumentará con una magnitud  $Z_e = \sqrt{(R\Omega^2 + X_e^2)}$ , donde  $X_e$  es la reluctancia equivalente predominante  $X_e = X_{L_e} - X_{C_e}$ .

#### 4.4.3.- La resistencia $R\Omega$ .

El parámetro eléctrico  $R\Omega$  es la resistencia que presenta el compuesto cuando esta relajado, sin someterlo a ninguna fuerza de compresión a temperatura ambiente constante, la resistencia eléctrica  $R\Omega$  es constante, se comporta como un elemento lineal y depende del porcentaje de silicón y de la cantidad adicionada de fibras molidas de carbono usadas como refuerzo y aporte de conductividad eléctrica, entre el 50 y 100% en adición (w/w). Este valor de resistencia es típicamente de valor bajo, alrededor de  $10\Omega$  para probeta C100 y valores de varios mega ohms para la probeta C50 este valor es medido mediante voltaje de CD.

#### 4.4.4.- La capacitancia $C_e$ .

El parámetro  $C_e$  es debido al efecto farádico dentro de la matriz del compuesto. Esta cantidad de filamentos conectados entre las terminales de la probeta cilíndrica y aislados de otros filamentos mediante la matriz que es buen aislante eléctrico, formando micro-elementos capacitivos a lo largo y ancho del compuesto. La capacitancia de terminales medida de forma preliminar a una frecuencia de 1KHz es  $L_e = 8\mu H$  y  $C_e = 139nF$ , lo que resulta en valores muy pequeños indicando la poca capacidad farádica del compuesto flexible, debida seguramente a la concentración y orientación aleatoria de las fibras de carbono.

#### 4.4.5.- La inductancia $L_e$ .

La inductancia  $L_e$  es producto de las conexiones de la red de interfase de una cantidad finita de fibras conectada entre las terminales de manera aleatoria, presenta una inductancia equivalente promedio total de  $8\mu H$ . El valor de  $L_e$  es bajo. En la impedancia  $Z_e$ , el valor del elemento predominante es la resistencia

eléctrica  $R\Omega$  y los valores de inductancia y capacitancia  $L_e$  y  $C_e$  son muy pequeños. Los elementos  $L_e$  y  $C_e$  del circuito equivalente deben ser determinados por el ensayo “Espectroscopia de Impedancias” para obtener un comportamiento más amplio y completo. Para lograr este ensayo, se realizó un barrido de frecuencia y se determinó la impedancia para cada punto desde 5Hz hasta 1MHz. Es evidente que a mayor contenido de fibra molidas de carbón en el compuesto, menor será la resistencia eléctrica  $R\Omega$ . La resistencia de la probeta  $R\Omega = \rho_e L/A$ , donde ( $\rho_e$ ) es el *coeficiente de resistividad específica* que depende de la cantidad de fibra de carbono adicionadas al compuesto. La probeta es un cilindro de 50mm de longitud y 25mm de diámetro.

#### 4.5.- Las micro-interfases del compuesto flexible.

La impedancia total de toda la red de fibras conectadas en el volumen de compuesto flexible, la referida en el circuito equivalente como  $Z_T$  es un parámetro que depende de la temperatura del compuesto. Si la temperatura es constante en condiciones del medio ambiente, este parámetro tiene un valor bajo. La impedancia  $Z_V$  es un parámetro que es función de la frecuencia vibratoria y su magnitud, cuando el compuesto es sometido a una excitación mecánica (vibraciones) el valor  $Z_V$  aumenta. Si la frecuencia de la onda vibratoria es cero, este parámetro presenta también un valor muy bajo, debido a que la micro-interfase de contacto entre fibras (MIEF) no se ve afectada. De tal manera que las ondas vibratorias afectan directamente la resistencia de contacto entre las fibras aumentando en proporción su valor con el incremento de la frecuencia de la onda y su magnitud. Cuando la matriz de silicona se comprime estas conexiones se desconectan y conectan con otras fibras de carbono cercanas, formando nuevas conexiones de una mayor densidad cambiando la resistividad específica  $\rho_e$ , esto explica la disminución de la impedancia total en terminales, el valor la impedancia  $Z_e$  también se modifica. Si el compuesto es sometido a una onda mecánica vibratoria a frecuencia alta, la matriz de silicona no tiene gran deformación, la velocidad a la que vibran las fibras de carbono es alta. Esto afecta únicamente la micro-Interfase entre fibras (MIEF) y en consecuencia se modifica la impedancia total  $Z_t$ . Pero cuando el compuesto se somete solamente a ondas vibratorias de magnitud y frecuencia variable el valor de  $R\Omega$  permanece constante, pues no se afecta  $\rho L/A$ , y la impedancia  $Z_T$  permanece constante a temperatura constante. El valor de  $Z_V$  sí aumenta, proporcionalmente a la frecuencia y su magnitud. Entonces al someter a una fuerza de compresión y tracción al compuesto flexible se deforma longitudinal y transversalmente cambiando la red de conexión eléctrica entre las fibras MIEF y la MIFM en consecuencia la impedancia total  $Z_t$ . En el caso de la MICE es una interfase que aporta una resistencia  $R_e$  en serie con la resistencia  $R\Omega$ , como ya se mencionó este parámetro cambia muy poco con la variación de temperatura, deformaciones o vibraciones dado que el compuesto esta adheridos con los electrodos o terminales fuertemente y presenta una conductividad muy baja, tiene poca deformación y buena conductividad térmica, esto lo hace estable mecánicamente y eléctricamente vista también en la figura 4.1. Al comprimir el compuesto la resistencia eléctrica tiende a disminuir y al estirarse aumentar. El ensayo a compresión muestran un comportamiento no lineal y la variación de la resistencia eléctrica con la compresión a velocidad de compresión de 3.3 mm/min.

##### 4.5.1.- Impedancia equivalente asociada a parámetros mecánicos $Z_m$ .

Como se mencionó anteriormente la probeta se sometió a variaciones de una fuerza vibratoria con forma  $F(t)=A \sin(\omega t)$  mediante un actuador vibrante que puede variar la amplitud  $A^1$ . Considerando que la onda mecánica de excitación en el compuesto viaja en dirección del eje  $x$ ,  $F_1(t)$  y la onda  $F_2(t)$  es una onda en sentido opuesto a  $F_1(t)$ . Por superposición de ondas:  $F_1(t) = A \sin(kx - \omega t)$ ,  $F_2(t) = A \sin(kx + \omega t)$ . La suma es  $F_e(t) = F_1(t) + F_2(t) = 2A \cos(\omega t) \sin(kx) = A^1 \sin(kx)$ . La onda  $F_e(t)$  no representa una ondas que se desplaza en la dirección de  $F_1(t)$  ó  $F_2(t)$ , sino que describe un movimiento armónico simple en dirección vertical de amplitud  $A^1$ , formando una onda estacionaria que contiene  $N$  nodos  $\sin(kx) = 0$ ,  $Kx = 0, \pi, 2\pi, \dots, n\pi$ , y crestas  $\sin(kx) = \pm 1$ ,  $Kx = \pi/2, 3\pi/2, \dots, (2n+1)\pi/2$ . Los nodos y crestas se distribuyen a lo largo de la



longitud  $L$  del material, dado que en un extremo se aplica la excitación mecánica y el otro extremo está rígidamente fijo. La impedancia  $Z_m$  es un parámetro eléctrico que representa un parámetro mecánico en el compuesto flexible integrado por un circuito paralelo entre el valor de elastancia del material que es un equivalente del coeficiente de elasticidad o proporcionalidad  $K$ , y puede ser sustituido en el modelo equivalente por  $1/K$ , este parámetro indica la cantidad de energía mecánica que puede almacenar el material en forma de energía cinética y/o potencial. Este parámetro no indica ni representa capacidad farádica. Conectado en paralelo con un inductor equivalente que representa la masa ( $m$ ) del compuesto (inercia) y una resistencia ( $b$ ) que representa el amortiguamiento del compuesto (conjunto, masa-resorte-amortiguador) visto en la figura 4.3.

#### 4.5.2.- Principio de conservación de energía.

Al variar la frecuencia de la excitación de la onda vibratoria aplicada al compuesto flexible, la impedancia de terminales se define como:  $Z_t = R\Omega + Z_V + R_e + R_T + Z_m$ , este valor aumenta con el aumento de la magnitud de la frecuencia. La velocidad de la onda vibratoria se mantiene a un valor constante 20 mm/s valor RMS. Esto mantiene la energía constante. La energía de un sistema vibratorio es parcialmente potencial y parcialmente cinética, la suma de estas dos energías permanece constante. La energía cinética se almacena en la masa del compuesto por efecto de su velocidad y la energía potencial se almacena en el compuesto por causa de la deformación elástica, en estos ensayos realizados es necesario mantener la energía constante al variar la frecuencia de ensayo.

#### 4.6.- La impedancia equivalente total o de terminales $Z_t$ .

El efecto total de la impedancia del circuito, es la suma de los valores de parámetros  $R\Omega$ ,  $R_e$ ,  $Z_e$ ,  $Z_m$ ,  $Z_V$  y  $Z_T$ . El modelo equivalente es una representación del comportamiento cualitativo y cuantitativo. Por ejemplo  $R\Omega$ , representa la resistencia eléctrica debida a la resistividad específica del compuesto (% de fibras adicionadas) a su sección transversal y su longitud la forma física. El parámetro  $L_e$  representa la inductancia eléctrica equivalente de las fibras y  $C_e$  es la capacitancia o capacidad farádica para almacenar carga eléctrica y magnética del compuesto en la red de fibras del compuesto estos valores son definidos por completo en la espectroscopia de impedancias realizada al compuesto. El parámetro  $b$  eléctricamente es una resistencia y mecánicamente representa el amortiguamiento o la oposición mecánica del compuesto flexible. El parámetro  $m$  es una medida de su inercia y representa la resistencia al cambio de velocidad también una medida de la energía cinética almacenada,  $E_c = \frac{1}{2} m V^2$ ,  $m = L$ . Y finalmente, el parámetro  $1/K$  se considera como la elastancia que es  $C = 1/K$ , donde  $C$  es la capacitancia, la capacidad del material debida a su elasticidad para almacenar energía mecánica. Este parámetro en sí no representa un efecto farádico, pero sí su equivalente mecánico. El compuesto flexible presenta valores máximos de  $K$  en la región elástica alrededor de 30 Nw/mm, entonces equivale a un valor de  $C = 1/30000 = 33.3\mu F$ . Por tal el valor de  $X_c = 1/(2\pi FC)$  a una frecuencia de 30Hz el valor de  $X_c = 159\Omega$ . Como se mencionó el valor del parámetro  $R_e$  resistencia de la MICE, es un valor de resistencia constante, su valor no se ve afectado casi nada por cargas mecánicas externa o la temperatura, presentado valor de resistencia de valor muy bajo alrededor de 2 ohms y dependen del adhesivo basado en silicona. Por ejemplo si la probeta vibra a 30Hz el circuito equivalente presentará una impedancia total de:  $Z_t = Z_e + Z_V + Z_T + Z_m$ ,  $Z_t = R\Omega + 30K\Omega + 0\Omega + 159\Omega$ . El parámetro  $R\Omega$  no cambia su valor pero el valor de  $Z_V$  si aumenta mucho en proporción de los  $K\Omega$ , mostrado en las curvas de la figura 3.16, alrededor de 30k $\Omega$ . El valor de  $R\Omega = 20\Omega$  para la probeta C100 visto en la figura 3.26 curva 1, de tal manera que para este punto  $Z_t = 20\Omega + 30k\Omega + 159\Omega = 30.162k\Omega$ , predominando el valor de  $Z_V$ .

#### 4.6.1.- Efectos de los cambios de temperatura en la impedancia ZT.

En la obtención del comportamiento del compuesto flexible, en vías para la obtención de un circuito equivalente aproximado que pueda ser usado como sensor, es necesario incluir un parámetro que esta en función de la temperatura y la impedancia, para obtener este parámetro se realizó un ensayo térmico calentando la probeta y midiendo su resistencia eléctrica en forma dinámica obteniendo el parámetro de impedancia ZT. Su comportamiento se observado en la figura 3.34 y 3.35 del capítulo anterior, estas curvas muestran la tendencia a una ecuación que describe este comportamiento y permite obtener valores de este parámetro. Cuando la temperatura es constante el valor de ZT es prácticamente cero, predominando el valor de  $R\Omega$  de la impedancia Ze.  $ZT = R_o (1 + \alpha \Delta t)$ . Sí  $\Delta t = 0$  entonces,  $ZT = R_o$  este valor corresponde con las curvas cuando cruzan por la temperatura ambiente visto en la figura 3.34. Describe un comportamiento que tiende a una ecuación exponencial y su valor inicial  $R_o$  corresponde con el valor de  $R\Omega$  a temperatura ambiente. Cuando el compuesto se comprime la resistencia eléctrica  $R\Omega$  disminuye su valor respecto al valor inicial en reposo o CD, donde la probeta presenta una resistencia inicial a temperatura ambiente de aproximadamente  $R\Omega + R_e$ , recordando que  $R_e$  es la resistencia que presenta la (MICE) de valor ya referido próximo a  $2\Omega$ . En la “Región Plástica” el material presenta una resistencia mínima de  $R\Omega$ . En esta región a pesar de que el material presenta deformaciones permanente micro fisuras y formación de cúmulos, el material mantiene su valor resistivo alrededor de  $R\Omega$  y sólo disminuyendo muy poco, visto en la figura 3.16 del capítulo anterior. En la figura 4.3 podemos apreciar el circuito equivalente del compuesto flexible que representa un modelo equivalente obtenido por los resultados de los ensayos.

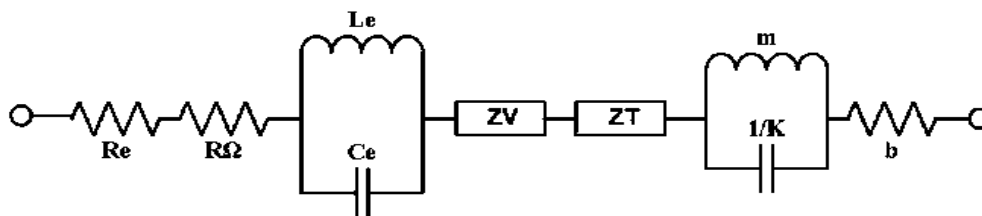


Figura 4.3 Circuito eléctrico equivalente de compuesto flexible.

#### 4.7.- Estudio físico de la vibraciones en los apoyos mecánicos (Soporte).

La presencia de armónicos de las vibraciones es inevitable y deber ser mitigada su magnitud al mínimo de acuerdo con criterios establecidos en las normas vigentes. Con el objetivo de que su presencia no ocasione mal funcionamiento y daños a corto y mediano plazo en los sistema, afectando su vida útil y continuidad del servicio. Los resultados obtenidos de los ensayos en el laboratorio son usados para determinar las características que debe contener el soporte que aporta una solución a esta problemática. Reiterando el trabajo realizado como objeto de este estudio es el análisis de las vibraciones mediante un entorno virtual de Labview, el diseño y la caracterización de un compuesto flexible piezoresistivo y la implementación de un soporte aislador de vibraciones con este compuesto y el análisis de las vibraciones. La recolección y el registro de los datos relevantes se inicia en el estado del arte, después se realizaron ensayos y pruebas preliminares, de elementos mecánicos y electrónicos asociados a esta investigación. Para realizar esta tarea se implementó la metodología para el procesamiento de las señales que provienen de los elementos sensibles y poder cuantificar los niveles de los parámetros de vibraciones en el conjunto de máquinas asociada. Otra parte importante en esta investigación es el desarrollo del software para el análisis de las vibraciones. También la metodología de fabricación de un compuesto flexible que es sensible a las

vibraciones mecánicas, que permitirá aislar dichas vibraciones. Una vez realizado la experimentación y el desarrollo de los elementos necesario se tienen los resultados:

- El desarrollo de un software de análisis de los parámetros de vibraciones.
- El diseño y fabricación de un compuesto flexible sensible a las vibraciones que además es buen aislante mecánico.
- El diseño de la metodología de la fabricación de un compuesto flexible.
- El diseño y construcción de los equipos para la caracterización del compuesto flexible.
- La fabricación de un soporte mecánico sensible a las vibraciones mecánicas.
- La implementación de un sistema aislador (soporte) y medición de los parámetros de vibraciones con el software desarrollado.

Estas actividades fueron propuestas para realizar los ensayos requeridos y logra la caracterización completa del material y finalmente proponer un circuito eléctrico equivalente del compuesto que permita posteriormente caracterizar un soporte aislador (metal-elástico) de vibraciones. La señal producida por el soporte fue procesada mediante el software para cumplir con los objetivos de la tesis y lo planteado en la hipótesis.

#### **4.7.1.- Experimentación de las vibraciones en el laboratorio de un conjunto de máquinas rotativas.**

Para logra los objetivos fue necesario el uso de equipos especializados para determinar algunas propiedades termo físicas y la respuesta del material ante la presencia de ondas vibratorias. La implementación de los equipos pese a que no es parte de los objetivos es indispensable para lograr cumplir lo planteado inicialmente en este proyecto de investigación en tiempo y forma.

#### **4.7.2.- Fabricación del soporte aislador de vibraciones con el compuesto flexible.**

Para la elección del aislante de vibraciones más adecuado, se consideran varios factores, como conocer la vibración que se produce, el espacio disponible para colocar los aisladores, el peso a soportar por los aisladores y las condiciones ambientales. Una vez definido esto se puede seleccionar el tipo de soporte anti-vibratorio adecuado para esta aplicación, entre los que se encuentran básicamente los elastómeros, que son de caucho sintético y natural. Pueden moldearse en diferentes formas y rigidez deseadas. En función de su naturaleza y calidad, son aptos para soportar grandes deformaciones para luego volver a su estado original sin sufrir ningún daño. Tienen una extensibilidad excepcional y una gran deformabilidad, por ello pueden utilizarse en alargamientos extremos. Los elastómeros de caucho natural ofrecen las propiedades mecánicas más favorables para el aislamiento, ya que ofrecen una débil disipación energética y esto hace que su transmisibilidad sea siempre inferior a otros cauchos sintéticos. Sus excelentes propiedades mecánicas permiten conseguir soluciones estables en el tiempo. El caucho natural tiene como limitaciones su deterioro bajo la influencia de aceites y temperaturas ambientales elevadas. La optimización de su mezcla favorece su resistencia a rayos UV y al Ozono. El caucho de silicona es uno de los elastómeros más caros del mercado, pero presenta propiedades notablemente estables y proporcionan un aislamiento eficaz en un amplio rango de temperatura. La mayoría de los aisladores elastoméricos no deben estar sujetos a grandes deformaciones estáticas durante períodos largos de tiempo. Un aislador con una gran deflexión estática puede dar un rendimiento satisfactorio temporalmente, pero la sobrecarga propicia deformaciones permanentes al igual que la rotura de cadenas poliméricas. Otra opción es usar aisladores de plástico, son de bajo coste y presentan una uniformidad excepcional. Los más utilizados son los materiales de polietileno y de estireno. El mayor inconveniente de estos aisladores son sus pobres propiedades mecánicas, es decir, presentan una capacidad inferior de resistir a las cargas o fuerzas al igual que su gran fluencia y deformación permanente.

Existen poliuretanos microcelulares que mejoran en gran manera estos inconvenientes anteriormente descritos, para estos últimos elastómeros. Los muelles de metal normalmente se emplean en aplicaciones que requieren grandes deflexiones estáticas. Estos aisladores se utilizan cuando se debe de llegar a frecuencias propias muy bajas y se requiere una estabilidad en la deflexión en el tiempo. Su inconveniente es que al tener propiedades de baja disipación energética, se deben de acoplar sistemas de amortiguación que encarecen mucho la solución. El aislante anti-vibratorio más utilizado está fabricado de un elastómero. Siendo el caucho natural el más popular, ya que los dispositivos son capaces de sostener grandes deformaciones y luego volver a su estado original prácticamente sin daños. Los soportes anti-vibratorios de caucho metal son los que mejores características ofrecen, además de presentar las mejores utilidades. Se encuentran en el mercado aisladores de caucho con multitud de formas y tamaños, pero hay que elegir el que mejor se adapte a las necesidades del proyecto. Por ello, antes de instalar un aislador para reducir la vibración, es recomendable realizar un cálculo anti-vibratorio teórico y después acompañarlo de una medición de vibraciones y así establecer cuál es la mejor solución para cada caso. Solo de esta manera dispondremos del soporte anti-vibratorio perfecto para nuestro problema y así reducir satisfactoriamente los efectos no deseados derivados de toda vibración [14].

Una clasificación de soportes por su forma de aisladores vibratorios comerciales marca EPIDOR:

- soporte de instrumentación
- soporte de forma o
- soporte doble U
- soporte cilíndrico
- soporte cónico
- soporte V
- soporte de máquinas
- soporte M
- soporte rectangulares
- soporte Hydrolager
- soporte Hydrobuchsen
- soporte tipo cojinete cilíndrico y esférico.

La selección de un tipo de soporte es una tarea que depende directamente de la aplicación, casi cualesquiera de las formas de soportes pueden servir para cumplir el propósito. Pero un factor determinante es el proceso de fabricación, el más simple es el tipo cilíndrico, para el caso de una silicona que se vulcanice a temperatura ambiente, la silicona RTV usada en esta investigación es de este tipo y esto facilita que la forma del soporte pueda ser fabricada mediante inyección y extrusión en un molde cilíndrico. Posteriormente se alcanza el tiempo de vulcanizado recomendado por el fabricante, el material deberá de adherirse al soporte metálico y colocadas las terminales eléctricas. Por lo tanto se puede iniciar mencionando algunas características generales de este tipo de soportes cilíndricos que son elementos diseñados para la absorción de vibraciones. Los elementos de fijación, tornillos o roscas unidos a la goma mediante adhesivos o vulcanización permiten una fácil utilización de las piezas. Los soportes cilíndricos aíslan vibraciones y compensan tensiones y holguras de fabricación entre la unión de varios elementos. Los soportes cilíndricos comerciales “FREUDENBERG” se distinguen de otros productos sobre todo por la forma especial de la goma y la unión con las partes metálicas (cóncava). Dicha unión hace disminuir las cargas laterales producidas en el reborde del soporte cilíndrico [15]. El material usado en una versión estándar es caucho natural de dureza entre 40,60,70,75 ó 80 en la escala Shore A. Para seleccionar el soporte cilíndrico más adecuado se recomienda el siguiente método:

- a) Determinar los valores máximos de carga sobre cada soporte.
- b) Elegir el soporte cuyo valor máximo de carga vista en las curvas de ensayo sea de una a dos veces mayor que este valor.
- c) Elegir el soporte en función de los siguientes parámetros:
  1. Condiciones geométricas del montaje (diámetro y longitud)
  2. Colocación constructiva (sujeción mecánica)
  3. Aislamiento requerido de vibraciones (dureza).



Figura 4.4 Soporte metal- elastómero cilíndrico marca Epidor.

#### 4.8.- Propuesta de un nuevo apoyo de metal y compuesto elástico de silicona conductora.

En el caso de grandes conjuntos de máquinas acopladas como el caso de motor-bomba o turbina generador. Las potencias son del orden de algunos cientos de Kilo-watts (Kw) su gran peso obliga a que el soporte que se usa debe ser rígido la base de soporte directamente sobre la cimentación, la rigidez de este acoplamiento permite que casi todas las reacciones producidas por el conjunto de máquinas sean disminuidas y transferidas a la cimentación. Se propone en esta investigación aplicar un soporte entre la cimentación y el conjunto de máquinas acopladas para evitar la transferencia de estas vibraciones a la cimentación con esto se logrará aislar esta ondas que se propagan a la cimentación y a otros equipos afectando su funcionamiento y que contaminan el medio ambiente. Después de realizada la fabricación del compuesto flexible se fabrica un soporte, este tiene propiedades piezoresistivas que otros soportes comerciales no tienen. Esta propiedad tiene la función de “sensor” y es sensible cargas dinámicas y estáticas que se presentan en el soporte. Después de realizada la selección del tipo de soporte adecuado a esta investigación se procedió a su fabricación de cuatro apoyos para lo cual se construyó una base metálica como base del compuesto flexible. Se trata de un soporte que se usa como prototipo antes de implementar un soporte para máquinas de gran tamaño que pueden llegar a pesar varias toneladas, para este caso se deberá aumentar el número de apoyos del soporte final y dividir la carga total, visto en la figura 4.5.



Figura 4.5 Conjunto de máquinas giratorias de 300Kw ancladas a cimentación rígida. Proyecto P29 en SIMIRAO Michoacán.

Los resultados de los ensayos al soporte muestran que el compuesto flexible cumple con las características requeridas para fabricar un soporte aislador.

Resumen de características:

- 1.- Rigidez dentro de los límites elásticos.
- 2.- Baja resistencia eléctrica que permiten conectarlo en forma de puente completo (no sensible al ruido).
- 3.- Buena sensibilidad piezoresistiva a un rango de frecuencias de 6-300hz.
- 4.- Sensible a cargas estáticas (sensor de carga).
- 5.- Fácil de fabricar en procesos industriales y de costo bajo.

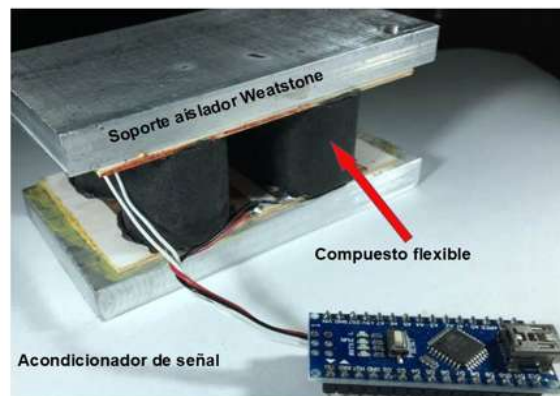


Figura 4.6 Soporte inteligente prototipo para máquinas de tamaño pequeño 100Kg.

#### 4.8.1.- Propuesta del método para la adquisición de los datos.

En forma general la metodología realizada inicia en la suposición de que es posible la regulación de las vibraciones mediante elementos mecánicos y electrónicos pasivos y activos. No obstante que en máquinas rotativas los equipos comerciales son probados, balanceados y sometidos a rigurosas pruebas para cumplir con normas y estándares de calidad, cabe siempre la posibilidad que estos equipos fallen de inmediato a corto y mediano plazo por fallas en sus componentes o por desgastes prematuros, por ello es necesario siempre contemplar sistemas de monitoreo y control de la planta, en específico de componentes susceptibles a fallar y que generen paradas de la planta. Por tal se requieren de sistemas de adquisición de parámetros de control de vibraciones, todos los elementos diseñados, ensayados e implementados finalmente son integrados en un sistema de adquisición de vibraciones para sistemas que incluyen máquinas rotativas de

pequeño tamaño menor a 1Hp y posteriormente se pueda adaptar de manera simple a máquinas de gran tamaño de hasta unos cuantos cientos de Kw, como es el caso de la planta generadora geotérmica de 300kw. Esta última es una característica importante de este proyecto que presenta el desarrollo tecnológico de un soporte aislador de vibraciones inteligentes que puede ser adaptado a casi cualquier máquina o conjunto de máquinas. Otra característica importante es el desarrollo de un nuevo producto que no existe en el mercado un soporte de motor piezoresistivo y la fabricación del compuesto flexible partir de materiales comerciales de bajo costo y fáciles de conseguir.

#### **4.8.2.- Adquisición de los datos en un ensayo de laboratorio.**

Para la elaboración de los ensayos se decidió escalar la máquinas de ensayo a 0.25Hp/220v, 187W dado que el laboratorio de Ingeniería eléctrica de la UMSNH. Cuenta con los equipos de experimentación de Labvolt de estas características, máquinas eléctricas, medidores de potencia módulos de carga eléctrica y mecánica, sus máquinas están caracterizadas y estudiadas al ser equipo didáctico de gran prestigio y calidad. Como etapa final de esta investigación queda pendiente la fabricación de un soporte mecánico de gran tamaño para soporta un conjunto de máquinas por ejemplo de 2 toneladas que es el peso aproximado de las máquinas mostradas en la figura 4.5 del proyecto P29. El desarrollo del software para la adquisición y procesamiento de las señales que provienen del soporte aislador fue desarrollado de manera muy simple dado el poder de esta plataforma virtual que dispone de herramientas de preprocesamiento virtual, filtros digitales para limpiar señales y eliminar variables de proceso que permiten medir en el dominio del tiempo valores RMS, instantáneos, promedio, etc. Cuanta también con módulos de integración de señal y módulos para transformar la señal al dominio de la frecuencia para visualizar espectros de frecuencia de las armónicas. Este desarrollo tecnológico se desarrollado sin muchos problemas. Los ensayos que costaron más tiempo dinero y esfuerzo fueron los que se requirieron para la fabricación del soporte aislante de vibraciones. Gran parte de los ensayos requeridos las Facultades de ingeniería y la UMSNH no cuenta con ellos por lo tanto debieron de ser construidos probados y calibrados. Adicionalmente la fabricación del compuesto y desde su caracterización fue todo un reto.

#### **4.8.3.- Evaluación y discusión de los resultados obtenidos en el soporte modificado.**

Los resultados obtenidos por el software para el soporte en el ensayo de laboratorio son presentados en la gráficas espectrales vista en las figuras 4.8, 4.9, 4.10 en donde el conjunto de máquinas giraba a diferentes velocidad vistas en la tabla 5, la presencia de armónicos por el soporte y procesados en Labview, la comparación de la señal medida mediante un equipo analizador de vibraciones que se uso como calibrador *Commtest VB7*, cabe mencionar que este equipo es propiedad de la UMSNH, visto en la figura 4.11. Estos resultados significan que el material responde muy bien al rango de frecuencia que se ensayo y las magnitudes de los armónicos presentes son calibradas en entorno virtual para su medición, además muestran una eficiencia mecánica también obtenida y comparada con el analizador *Commtest VB7* de entre 80-85%. La presencia de la no linealidad en la sensibilidad del soporte es ajustada en el entorno virtual. Los cuidados que se deben tener son que la carga total a la que se somete el soporte no debe llegas a una valor máximo de carga según las curvas de ensayo, esto podría crear deformaciones plásticas en el compuesto flexible a corto y mediano plazo, esta deformación podría ser compensada mediante el entorno virtual, siempre y cuando no presente grietas, pero mientras no se excedan estos valor de carga máxima el compuesto flexible no presentará fallas a mediano y largo plazo pues la silicona tiene un tiempo de vida largo y mucho más resistentes son las FCM. Otra limitación que tiene el soporte desarrollado es la interfase de contacto (MICE) entre el compuesto flexible y la base de metal, pues si no se usa un adhesivo resistente, presentará un incremento en su impedancia total esto produce una pequeña desviación del valor medido o peor aun desprendimiento del compuesto del soporte. Otra consideración es la compensación por temperatura que

debe ser tomada en cuenta en el programa, permitiendo medir esta la temperatura de trabajo mediante esta compensación.



Figura 4.7 Calibración del soporte aislador piezoresistivo, aplicado al conjunto de máquinas rotativas en el laboratorio. 2) muestra el sensor del soporte aislador. 1) muestra el acelerómetro de calibración.

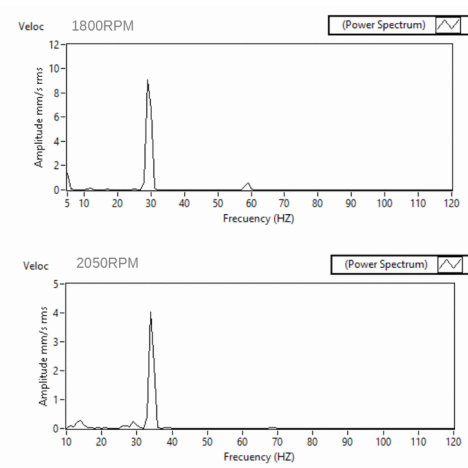


Figura 4.8 Respuesta del soporte C100 en el dominio del tiempo para una velocidad de rotación de 1800 y 2050 RPM.



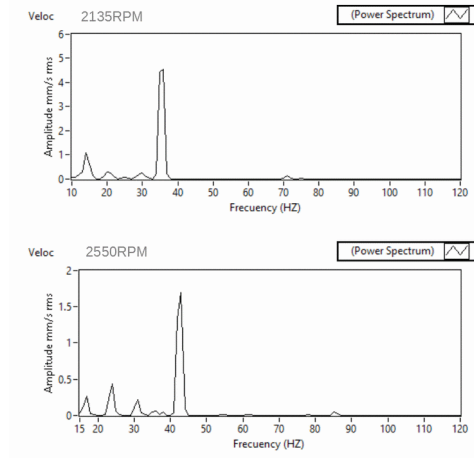


Figura 4.9 Respuesta del soporte C100 en el dominio del tiempo para una velocidad de rotación de 2135 y 2550 RPM.

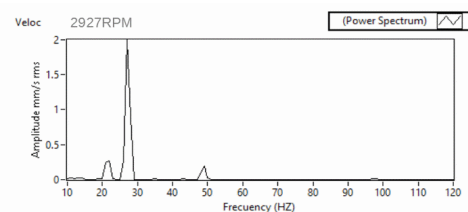


Figura 4.10 Respuesta del soporte C100 en el dominio del tiempo para una velocidad de rotación de 2927 RPM.

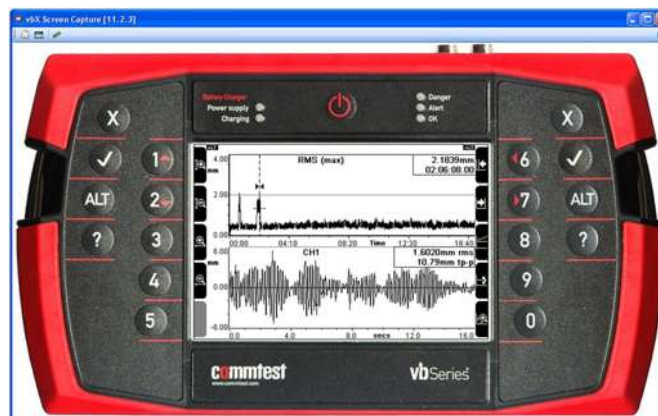


Figura 4.11 Analizador de vibraciones de General Electric G.E modelo Commtest VB7. Usado para la calibración del soporte.

La respuesta piezoresistiva del soporte, muestran la sensibilidad del compuesto C100 y de todo el conjunto, incluida la masa, peso y amortiguamiento. Los niveles del contenido armónico se muestran los cuales fueron ajustados con la curva de tendencia  $Z_v$ , este ajuste permite la medición de los niveles RMS y el

contenido armónico de los parámetros de vibración como: la aceleración, velocidad y desplazamiento. Las actividades programadas en los ensayos logran satisfacer los objetivos, se obtienen los resultados mostrados que fueron comparados con otro equipo comercial calibrado, obteniendo un circuito equivalente que caracteriza al compuesto sensible a diferentes variables físicas las cuales fueron consideradas inicialmente, el material fabricado y aplicado muestra resultados en los ensayos que sí efectivamente tienen las característica que son usados para construir un soporte aislador de vibraciones con propiedades piezoresistivas, sensible a cargas mecánicas estáticas, dinámicas y que presenta una buena estabilidad mecánica. Las limitaciones presentadas son algunas mecánicas y otras eléctricas. En las mecánicas están la rigidez del material respecto a su impedancia eléctrica. Como ya se mencionó sí el compuesto trabaja en los límites de la “Región Elástica” el compuesto flexible puede presentar deformaciones permanentes a mediano y largo plazo. Su tendencia al desgarre por el alto contenidos de FCM, pueden presentarse grietas, con cargas grandes que se presentan en la “Región plástica”. Otra limitación que presenta el compuesto es la frecuencias de resonancia, que si no es consideradas en el diseño y construcción del soporte su respuesta se verá afectada y puede desviar los valores RMS instrumentado, pero que también pueden ser considerada en el software. La correcta construcción del soporte aislador toma en cuenta que un buen diseño de las interfases mecánicas y eléctricas es esencial para que el soporte presente una buena estabilidad mecánica y térmica, así como una respuesta eléctrica más estable y vida larga. El compuesto presenta un comportamiento eléctrico no lineal. Sí no se fabrica adecuadamente la micro-interfase de contacto (MICE) limitará la aplicación de este compuesto. Esta deberá presentar una alta adherencia mecánica y una baja resistencia eléctrica, esto se logra con un proceso de manufactura adecuado. El análisis comparativo de las señales en el soporte aislador muestra el contenido armónico de la vibraciones absolutas en el conjunto de máquinas rotativas vista en la figura 4.8, 4.9, 4.10 donde podemos observar el valor del nivel de los armónicos presentes que al ser comparado con la referencia contenida en la norma ISO10816, muestran que estos niveles están por debajo de los criterios establecidos para este tipo de máquina en dicha norma esto asegura que la presencia de estos armónicos y su magnitud no afectara la operación ni la vida útil del conjunto de máquinas.

Tabla 9. Tabla comparativa de los resultados del análisis de vibraciones usando sensores piezoeléctricos y el soporte aislador fabricado mediante Labview en el conjunto de máquinas rotativas de la figura 4.7.

Velocidad del rotor	Sensor piezoeléctrico contenido armónico		Sensor piezoresistivo flexible contenido armónico calibrado	
	RPM	Frecuencia Hz	Armónico	Frecuencia Hz
1135	18.9	9 mm/s	18.9	9 mm/s
1800	30	8.5mm/s	30	8.4mm/s
2050	34.1	4.4mm/s	34.1	4.6mm/s
2550	42.5	1.7mm/s	42.5	1.6mm/s
2927	48.78	2mm/s	48.78	2mm/s

La tabla 9 muestras los resultados de la calibración del instrumento, fue necesario usar la curva de tendencia figura 3.26 par realizar el ajuste de la no linealidad del compuesto respecto a su respuesta ante la variación de frecuencia para obtener una curva de ganancia variable que caracteriza al compuesto. De esta manera se obtiene una correcta calibración de las mediciones de magnitud del espectro de frecuencias cuando se aplica

la transformada rápida de Fourier FFT. Esto fue posible usando el analizador de vibraciones comercial portátil de laboratorio *Commtest BV7* de casa General Electric, figura 4.11.

## CONCLUSIONES:

Dando respuesta a los objetivos planteados y a la observación de las hipótesis planteados inicialmente se tiene que:

1.- En síntesis se **desarrolló un software** para la adquisición y procesamiento de **los parámetros de vibración que fueron registrados** en el dominio del tiempo y la frecuencia usando instrumentación virtual en Labview. El cual se aplicó en un conjunto de máquinas de laboratorio, la **comprobación de su buen funcionamiento** usando sensores piezoeléctricos, el cual fue calibrado y sus resultados fueron comparado con un equipo comercial.

En el caso de la fabricación del soporte aislador se tiene en síntesis que:

2.- Con el aumento del porcentaje de las FCM que se adicionaron como refuerzo, se incrementa la conductividad térmica más de un 100% respecto a la conductividad térmica de la matriz (silicona) de 0.23 a un valor de 0.57W/m<sup>°K</sup> en el compuesto flexible. mostrado en la tabla 7 de resultados de los resultados del experimental realizados al compuesto.

3.- En el análisis realizado mediante la MEB y el análisis micro-estructural se identifican las causas que producen la conductividad eléctrica del compuesto, debido a la capacidad hidrofóbica de la matriz de silicón y las FCM forman una (MIFM), las fibras no son completamente impermeabilizadas por la matriz, esto es precisamente lo que permite el contacto físico entre las fibras creando otra micro-interfase entre fibras (MIEF), dependiendo de su distribución, concentración, orientación y espacio entre las fibras se determina la conductividad eléctrica, térmica, elasticidad y la porosidad del compuesto.

4.- El efecto del contacto entre el compuesto flexible y los electrodos afecta la impedancia total y su integridad estructural como soporte mecánico, esta interfase debe ser estabilizada mecánica y eléctricamente para que afecte al mínimo el comportamiento total. Idealmente el compuesto flexible debe ser adherido fuertemente a los electrodos y la sección trasversal del compuesto, el valor de la conductividad eléctrica de esta superficie de contacto llamada MICE, la resistencia eléctrica debe ser muy bajo tendiente a cero Ohms.

5.- La variación de la resistencia eléctrica con el incremento de la temperatura (debida a la dilatación térmica del compuesto) incrementa su magnitud en el orden de cientos de Mega-ohms (M $\Omega$ ) después de los 80°C presenta una dilación térmica lineal de aproximadamente 1mm/80°C. Esto afecta la MIEF desconectando fibras entre ellas, en definitiva son las que aportan la conductividad eléctrica. La dilatación térmica hace que disminuya también la conductividad térmica, en este punto no hay casi circulación de corriente eléctrica, inicialmente transportaban mucho calor y después de esta temperatura el material sólo transporta energía calorífica mediante la vibración fonónica, la cual resulta ser una cantidad de calor conducido mucho más pequeña que la inicial.

6.- La formación de cúmulos de fibras de carbono en ciertas regiones por mala distribución y orientación aleatoria, propician clústers “Puntos Calientes” o regiones de diferente conductividad eléctrica y térmica por la distribución no homogénea de las fibras en el volumen del compuesto. La formación de regiones porosas en la probeta cilíndrica, son creadas por burbujas de aire introducidas en el proceso de manufactura y el espacio entre fibras por su forma cilíndrica, mayormente en los compuestos C50 y C75 esta porosidad cambia la conductividad térmica y eléctrica. La “Región Porosa” afecta las dimensiones físicas efectivas, como la sección trasversal, longitud, la masa contenida y en general a su densidad.

7.- El fenómeno de la migración o desplazamiento de los “Puntos Calientes” a diferentes temperaturas como resultado de la dilatación térmica volumétrica así como la formación de cúmulos de FCM por desconexión y conexión de las fibras en la MIEF y MIFM para diferentes temperaturas..

8.- El compuesto flexible se comporta como una resistencia sensible al calor, caso de un Termistor de Coeficiente Positivo PTC, su resistencia aumenta con el aumento de temperatura el coeficiente de dilatación térmica también es positivo.

9.- La distribución, orientación y formación de cúmulos de fibras FCM en el volumen de la probeta por el proceso de manufactura, determinará su comportamiento piezoresistivo. El caso de la manufactura de la probeta C100 se logra una densidad volumétrica mucho más uniforme, se logra una mezcla más densa y seca que fluye menos, esto también facilita que en la inyección del compuesto en el molde se logre una distribución de FCM más uniforme a lo largo de toda la sección trasversal y longitudinal.

10.- La obtención de un circuito equivalente que describe su comportamiento eléctrico, térmico y mecánico que pueda ser aplicado como (sensor) de vibraciones y carga estática, también reducción de vibraciones transferidas a la cimentación y otros componentes asociados al conjunto de máquinas vibratorias debido a su eficiencia mecánica presentada en el ensayo para aislar vibraciones de un valor superior al 80%.

11.- **Se construyó un soporte** con la integración **del software desarrollado** para análisis de vibraciones en Labview con el soporte aislador **fabricado de compuesto flexible**, logrado así una solución integrada, funcional y competitiva tecnológicamente, su bajo costo comparada con equipos comerciales y ergonomía. En los que se observa **que existe una disminución de los niveles de vibración mediante el uso del soporte** aislador y su medición **basado en el registro de estos parámetros**.

12.- La calibración de la instrumentación es necesaria para la correcta medición y **operación del software desarrollado**, usando como referencia el analizador comercial Commtest VB7 de G.E. La linealización de los parámetros de vibración registrados fue realizada mediante el uso de la curva de respuesta que es una curva de tendencia obtenida con el ensayo de espectroscopia de vibraciones, esta permite una calibración mediante valores de la tabla y la ecuación característica obtenida por curva de tendencia. Encontrando que **los niveles de los parámetros medidos están relacionados** con el funcionamiento de sus componentes como rodamientos, alineación y balanceo.

#### APORTACIONES.

El desarrollo de software para el procesamiento de las vibraciones mecánicas en máquinas rotativas con el uso de este compuesto como sensor piezoresistivo y carga mecánica estática. La fabricación de un compuesto flexible usando materiales abundantes y económicos en el mercado. Una metodología para la caracterización en ensayos de materiales compuestos flexibles de bajo coste. Aplicación del compuesto flexible como sensores piezoresistivo, que se puede aplica en mucha áreas de la ingeniería. El diseño y construcción de soportes aisladores de vibraciones (soporte de máquinas rotativas) y al mismo tiempo sensor de vibraciones en conjunto de máquinas rotativas. Su posible aplicación como elementos calefactores flexibles, de temperatura auto-regulable, su aplicación en otros campos de la ingeniería, como en la robótica suave entre otros. La generación y divulgación del conocimiento mediante la publicación de más de un artículo científico indexado en ELSEVIER como la editorial de “Sensor and Actuator Physical A”.

#### TRABAJOS A FUTURO

Posteriormente se pretende que este trabajo sirva como referencia para la fabricación y caracterización de nuevos materiales compuestos flexible, no solo a nivel micro-estructural, también nanométricos usando grafeno y/o oxido de grafeno para otorgarle otras propiedades entre ellas la piezoresistividad, para aplicaciones en ingeniería mecánica, eléctrica, electrónica mecatrónica, química y civil. Adicionalmente se deberá realizar un estudio de la deformación plástica del compuesto durante la vida útil, su comportamiento, eficiencia y piezoresistividad al envejecer. Explorar la creación de un material compuesto flexible usando partículas plásticas, metálicas ferrosas y no ferrosa para darle características como sensor y actuador por efectos de campos magnéticos continuos y pulsados, la posible publicación de otros artículos indexados y creación de nuevos materiales para aplicaciones en la ingeniería. La aplicación de un soporte de dimensiones mayores para máquinas de gran tamaño y reajustando la instrumentación virtual del software desarrollado dada su versatilidad y ergonomía adicionada a que se puede hacer cualquier ajuste pues se cuenta con el código fuente del programa.

**REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- [1] Rodamiento de bolas. <https://adash.com>
- [2] Mantenimiento predictivo. <http://www.rodamientos.com/>
- [3] Vibraciones en Sistemas Físicos. Tadeusz Majewski Alfaomega, edición revisada 2017.
- [4] Clasificación de los plásticos. <https://blog.oxfamintermon.org/clasificacion-de-los-plasticos-cuanto-se-recupera/>
- [5] Tabla de dureza chore plásticos. <https://www.mexpolimeros.com/dureza.html>
- [6] Soportes antivibratorios para máquinas. <https://www.mecanocaucho.com/es/noticias/soporte-antivibratorio-para-m%C3%A1quinas/>
- [7] Composición de los elastómeros de silicona RTV. [https://es.qwe.wiki/wiki/Silicone\\_rubber](https://es.qwe.wiki/wiki/Silicone_rubber)
- [8] HISTORIA Y ANTECEDENTES DE LAS FIBRAS SINTÉTICAS Y ESPECIALES. noelisglez.wordpress.com.
- [9] Reportes de avance del proyecto Semie-Geo p29. 2014, 2015.  
<http://cemiegeo.org/index.php/proyectos/desarrollos-tecnologicos-para-explotacion/p29/297-p29-video>
- [10] [WWW.AIMPLAS.ES]
- [11] Calor específico de materiales. Tránsito de Calor, Kern, Editorial Patria.
- [12] Conductividad térmica ensayo norma c177. [http://www.cenam.mx/dme/pdf/PRE\\_E-Mie-5.pdf](http://www.cenam.mx/dme/pdf/PRE_E-Mie-5.pdf)
- [13] Isidoro Martínez, catedrático de la universidad politécnica de Madrid. Libro: Termodinámica Básica y Aplicada. Editorial Dossat. ISBN 84-237-0810-1
- [14] Engineering Manufacturing and Ativibration Assistance, Aplicaciones mecánicas del Caucho S.A. <https://www.mecanocaucho.com/>
- [15] Soportes de elastómero y metal. [<https://epidor-srt.com/>]
- [16] García P. J. 2000. Mantenimiento Predictivo en la Industria. Colombia.
- [17] [http://vibraciones.net23.net/index.php/Capitulo\\_I](http://vibraciones.net23.net/index.php/Capitulo_I) [citado el 10 de mayo de 2010]
- [18] A-MAC. Análisis de maquinaria <http://www.a-maq.com/tutoriales/Tutorial%20Vibraciones%20para%20Mantenimiento%20Mecanico%20A-MAQ%202005.pdf> [citado el 11 de mayo de 2010 ]
- [19] Azimadli. Introducción al análisis de vibraciones. <http://www.maquinadevibracion.com/downloads/IntroVibEspanol.pdf> [citado el 13 de mayo de 2010]
- [20] Confiabilidad.net. Incrementando la confiabilidad de su análisis de vibración. <http://confiabilidad.net/articulos/incrementando-la-efectividad-de-su-analisis-de-vibracion/> [citado el 14 de mayo de 2010]
- [21] Vibraciones Mecánicas. Mantenimiento predictivo y las vibraciones mecánicas. <http://vibracionesmecanicas01.blogspot.com/> > citado el 15 de mayo de 2010.
- [22] Análisis de vibraciones: una herramienta clave en el mantenimiento predictivo. Scientia et Technica Año XVI, No 45, Agosto de 2010. Universidad Tecnológica de Pereira. ISSN 0122-1701.
- [23] Singiresu s. Rao Pearson, Vibraciones Mecánicas. quinta edición revisada 2012.
- [24] S. Wagner, S. Bauer, Materials for stretchable electronics, MRS Bulletin, 37, (2012), pp. 207-213.
- [25] Y. Wan, Y. Wang, Chuan Fei Guo, Recent progress on flexible tactile sensors, Materials Today Physics 1 (2017) 61-73.
- [26] Chiwon Lee, et al., Soft Robot Review, Int. J. of Control, Automation and systems 15(1) (2017) 3-15.
- [27] Charles S. Smith, Piezoresistance Effect in Germanium and Silicon, Physical Review, 94, (1954) 42-49.
- [28] S. Santosh Kumar, B.D. Pant, Design principles and considerations for the 'ideal' silicon piezoresistive pressure sensor: a focused review, Microsyst Technol, (2014) 20:1213-1247.

- [29] Tsai HH, et al., Design and characterization of temperature-robust piezoresistive micro-pressure sensor with a double-Wheatstone-bridge structure, Proceedings of the symposium on design, test, integration and packaging of MEMS/MOEMS, Rome (2009), pp 363-368.
- [30] Malhaire C, Barbier D., Design of a polysilicon-on-insulator pressure sensor with original polysilicon layout for harsh environment, Thin Solid Films, (2003) 427:362-366.
- [31] Liu X, et al. Polysilicon Nanofilm pressure sensor. Sensor and Actuators A, (2009), 154:42-45.
- [32] Yang LJ, et al. A piezoresistive micro-pressure sensor fabricated by commercial DPDM CMOS process. Tamkang J Sci Eng, (2005), 8:67-73.
- [33] Zhang YH, et al. A novel pressure microsensors with 30 $\mu$ m thick diaphragm and meander-shaped piezoresistors partially distributed on high-stress bulk silicon region. IEEE Sens J (2007) 7(12):1742-1748.
- [34] Bian T, et al., The analysis and structural design of micro SOI pressure sensors. Proceedings of the 4<sup>th</sup> international conference on nano/micro eng and molecular systems, Shenzhen. (2009) pp 55-58.
- [35] Wu CH, et al., Fabrication and testing of bulk micromachined silicon carbide piezoresistive pressure sensors for high-temperature applications. IEEE Sens J (2006) 6:316-324.
- [36] D.D.L. Chung, Review Electrical applications of carbon materials. Journal of Materials Science, 39(2004), pp 2645-2661.
- [37] Dominik Jurków, et al., Overview on low temperature co-fired ceramic sensors, Sensors and Actuators A: Physical, (2015), 233, pp. 125-146.
- [38] Sara Cravanzola, et al. Chapter 4: Carbon-Based Piezoresistive polymer composites. Nanocomposites, Nanophotonics, Nanobiotechnology and applications. Springer Proceedings in physics 156, (2015), pp. 51-73.
- [39] Vineet Kumar, et al. Studies of RTV Silicone rubber nanocomposites based on graphitic nanofillers. Polymer testing 56 (2016), pp. 369-378.
- [40] Zeng You, et al., Effect of strain on the electrical resistance of carbon nanotube/silicone rubber composites. Journal of Wuhan University of Technology-Mater Sci., Vol 26, No.5, (2011) pp.812-816.
- [41] Sihai Wen, et al., Piezoresistivity in continuous carbon fiber polymer-matrix and cement-matrix composites. Journal of materials science 35 (2000) pp. 3669-3675.
- [42] Shouki Wang, et al., Negative piezoresistivity in continuous carbon fiber epoxy-matrix composite. J Mater Sci (2007) 42:4987-4995.
- [43] Baejin Kim, et al., Manufacture of elastic composite ring for planetary traction drive with silicon rubber and carbon fiber. Composite structures (2004) 66:543-546.
- [44] Eung Soo Kim, et al. Effect of incorporation of carbon fiber and silicon carbide powder into silicone rubber on the ablation and mechanical properties of the silicon rubber-based ablation material.
- [45] Ruin Wang, et al., The electromagnetic interference shielding of silicone rubber filled with nickel-coated carbon fiber. Polymer testing, (2014), 38:53-56.
- [46] Ana Luísa Silva, et al., Development of graphite/silicone composites for use as flexible electrode materials. Journal of alloys and compounds, (2017) 691:220-229.
- [47] Aline Carlos de Oliveira, et al., Graphite-silicone rubber composite electrode: Preparation and possibilities of analytical application. Talanta 74 (2008), 1043-1049.
- [48] Haixia Mei, et al., Impedance characteristics of surface pressure-sensitive carbon black/silicone rubber composites. Sensors and Actuators A: Physical, 233, (2015), pp.118-124.
- [49] Wang Luheng, et al., Effects of conductive phase content on critical pressure of carbon black filled silicone rubber composite. Sensors and Actuators A (2007) 135:587-592.
- [50] Luheng Wang, et al., Effects of instantaneous compression pressure on electrical resistance of carbon black filled silicone rubber composite during compressive stress relaxation. Composites Science and Technology, (2008), 68:3448-3450.

- [51] Peng Wang, et al., Creep of electrical resistance under uniaxial pressures for carbon black-silicone rubber composite. *J. Mater Sci* (2010), 45:3595-3601.
- [52] Igor Novák, et al., Electro-conductive resins filled with graphite for casting applications. *European Polymer Journal*, (2004), 40:1417-1422.
- [53] N. Forintos, T. Czigany, Multifunctional application of carbon fiber reinforced polymer composites: Electrical properties of the reinforcing carbon fibers-A short review. *Composites Part B* (2019), 331-343.
- [54] Ricardo González Alcorta, Sistemas de aislamiento de base para estructuras de soporte de máquinas rotativas. Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural A.C 2002 UANL Congreso XIII Puebla.
- [55] J.E. Escalante-Martinez , J.R. Laguna-Camacho , J.F. Gomez-Aguilar , C. Calderon-Ramon , M.I. Cruz-Orduna , R. Varguez-Fernandez, y J.C. Anzelmetti-Zaragozaa. (2016) Analisis del coeficiente de amortiguamiento viscoso en un sistema masa-resorte-amortiguador utilizando PPLANE y GEOGEBRA. *Revista Mexicana de Fisica E* 62 (2016) 66–72 .
- [56] Jason R. Stack, Student Member, IEEE, Ronald G. Harley, Fellow, IEEE, and Thomas G. Habetler, Fellow, IEEE (2002). An Amplitude Modulation Detector for Fault Diagnosis in Rolling Element Bearings. 0-7803-7474-6102/\$17.00 02002 IEEE.
- [57] Johannes Kellner, Student Member, IEEE, Herbert Schweinzer Institute of Electrical Measurements and Circuit Design Vienna University of Technology Vienna, Austria. 1051-0117/07/\$25.00 ©2007 IEEE. 2007 IEEE Ultrasonics Symposium.
- [58] Naoto Abe (2006) Semi-active Switching Vibration Control for Dynamic Absorber based on the Seismic Frequency. 0-7803-9796-7/06/\$20.00 ©2006 IEEE.
- [59] Xuejun LI, Guangfu BIN, B.S. Dhillon. Hunan provincial Key Laboratory of Health Maintenance for Mechanical Equipment Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, 411201, China. Department of Mechanical Engineering, University of Ottawa 161 Louis Pasteur, Ottawa, K1B 6N5, Canada. (2009) Reliability Analysis of an Integrated and Multifunctional Vibration Signal Measuring Instrument for Rotary Machine. 978-1-4244-4905-7/09/\$25.00©2009 IEEE.
- [60] Bartosz Pkosawski, Piotr Pietrzak, Maciej Makowski, Andrzej Napieralski Department of Microelectronics and Computer Science Technical University of Lodz Lodz, Poland. Enhancement of Piezoelectric Vibration Energy Harvester Output Power Level for Powering of Wireless Sensor Node in Large Rotary Machine Diagnostic System. Department of microelectronics and computer science, technical University of lodz.
- [61] Mohd Fitri Mohd Yakub#, Wahyudi Martono, and Rini Akmeliawati, Department of Electrical Engineering UTM International Campus, Kuala Lumpur, Malaysia (2010). Vibration Control of Two-Mass Rotary System Using Improved NCTF Controller for Positioning Systems. 978-1-4244-7240-6/10/\$26.00 ©2010 IEEE.
- [62] Fredy A. Sanz, Juan M. Ramirez, Member, IEEE, Rosa E. Correa. (2008). Hybrid Method for the Diagnosis of Electrical Rotary Machines by Vibration Signals.
- [63] W.Q Lim, D.H Zhang, J.H Zhou, Belgi P.H., Dr. H.L. Chan Singapore Institute of Manufacturing Technology 71 Nanyang Drive, Singapore 638075. (2010) Vibration-based Fault Diagnostic Platform for Rotary Machines. 978-1-4244-5226-2/10/\$26.00 ©2010 IEEE
- [64] Bohumil Skala, Vaclav Kus Dept. of Electromechanics and Power Electronic, Faculty of Electrical Engineering, University of West Bohemia in Pilsen.(2013) Simulation and Measurement of Angular Vibration of Induction Machine via Hilbert Transformation. 978-1-4673-4913-0/13/\$31.00 ©2013 IEEE.
- [65] Wei Guo, Kesheng Wang School of Mechanical, Electronic, and Industrial Engineering University of Electronic Science and Technology of China Chengdu, China, Ming J. Zuo School of Mechanical, Electronic, and Industrial Engineering University of Electronic Science and Technology of China Chengdu, China Department of Mechanical Engineering Faculty of Engineering, University of Alberta Edmonton,



Alberta T6G 2G8, Canada.(2013) An Adaptive Signal Processing Method for Extraction of A Weak Bearing Signal. 978-1-4799-1014-4/13/\$31.00 ©2013 IEEE.

[66] Satish Mohanty, K. K Gupta, Kota Solomon Raju, Arvind Singh, Snigdha S Birla Institute of Technology and Science Central Electronics Engineering Research Institute (CEERI)/Council of Scientific & Industrial Research (CSIR) Pilani 333031, Rajasthan, India. (2013) Vibro Acoustic Signal Analysis in Fault Finding of Bearing Using Empirical Mode Decomposition. 2013 International Conference on Advanced Electronic Systems.

[67] Irfan Anjum Manarvi Department of Engineering Management, Prince Sultan University Riyadh, Saudi Arabia, Muhammad Asim Qazi Centre for Advanced Studies in Engineering Islamabad, Pakistan. (2014) J69-T-25A Engine Component Failure Analysis. 978-1-4799-1622-1/14/\$31.00 ©2014 IEEE.

[68] Wen Zheng,Wang Pu, Gao Xuejin, Zhang Yachao. (2015). Fan Fault Diagnosis Based on Wavelet Spectral Analysis. Proceedings of the 34th Chinese Control Conference July 28-30, 2015, Hangzhou, China.

[69] Maciej Orman ABB Ltd. ABB Corporate Research Center Shanghai, P.R. China, Pawel Rzeszucinski, Agnieszka Tkaczyk ABB Corporate Research Center Krakow, Poland, Maciej Sulowicz Cracow Technical University ABB Corporate Research Center Krakow, Poland, Karthik Krishnamoorthi, Cajetan T. Pinto ABB Motor and Generator Service Mumbai, India.(2015) Bearing fault detection with the use of acoustic signals recorded by a hand-held mobile phone. 978-1-4673-7748-5/15/\$31.00 ©2015 European Union.

[70] Li-Pin Zhang, Hong-Mei Liuand Chen Lu. (2016) Fault Diagnosis Technology of Rolling Bearing Based on LMD and BP Neural Network. 2016 12th World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA) June 12-15, 2016, Guilin, China. 978-1-4673-8414-8/16/\$31.00 ©2016 IEEE.

[71] Zhiwei Zhu, Member, IEEE, Suet To, Kornel F. Ehmann, and Xiaoqin Zhou. (2017) Design, Analysis, and Realization of a Novel Piezoelectrically Actuated Rotary Spatial Vibration System for Micro-/Nanomachining. 1083-4435 © 2017 IEEE. Personal use is permitted, but republication/redistribution requires IEEE permission. See [http://www.ieee.org/publications\\_standards/publications/rights/index.html](http://www.ieee.org/publications_standards/publications/rights/index.html) for more information.

[72] CS II, eng. Constantin VILCU, eng. Filip NICULESCU, CS, eng. Andrei MITRU, eng. Cristian NECHIFOR, eng. Claudia-Irina BORZEA, ec. Camelia CORNEA, National Research and Development Institute for Gas Turbines COMOn, Bucharest, Romania.(2017) "HOLDERCPS" - A New Type Data Recorder System for Proactive Maintenance to Rotary Blade Machines. THE 10th INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ADVANCED TOPICS IN ELECTRICAL ENGINEERING March 23-25, 2017 Bucharest, Romania.978-1-5090-5160-1/17/\$31.00 ©20 17 IEEE.

[73] Vijay A. Gore Student of ME Product Design and Development, Bharati Vidyapeeth College of Engineering, Navi Mumbai, Sonal P. Sali Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Bharati Vidyapeeth College of Engineering, Navi Mumbai.(2017) 2017 International Conference on Nascent Technologies in the Engineering Field (ICNTE-2017). 978-1-5090-2794-1/17/\$31.00 ©2017 IEEE.

[74] Ricardo González Alcorta , Efraín Grajales Vargas y Antonio Daniel Martínez Dibene. (2002) SISTEMAS DE AISLAMIENTO DE BASE PARA ESTRUCTURAS DE SOPORTE DE MAQUINARIA ROTATORIA. Profesor de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Autónoma de Nuevo León.XIII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural. Puebla, Pue., México, 2002.

[75] Estupiñan, Edgar - Saavedra, Pedro Universidad de Concepción.(2002 ) TECNICAS DE DIAGNOSTICO PARA EL ANALISIS DE VIBRACIONES DE RODAMIENTOS. DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA (Casilla 160-C, Fono: 204327, Fax: 251142) Concepción – CHILE.

[76] Ademinsac. - (2013) CARTA ILUSTRADA DE DIAGNOSTICO DE VIBRACIÓN CARTA ILUSTRADA DE DIAGNOSTICO DE VIBRACIÓN.

[77] Vibraciones Mecánicas MC-571 . (2012) Facultad de Ingeniería Mecánica Universidad Nacional de Ingeniería. REDUCCIÓN DE VIBRACIONES.

- [78] Kulichevsky, R.; Sacchi, M.; Martín Ghiselli, A. (2014) MEDICIÓN Y ANÁLISIS DE VIBRACIONES: UNA HERRAMIENTA PARA LA PREDICCIÓN Y EVALUACIÓN DE FALLAS EN MAQUINARIAS. Estudio y Ensayo de Componentes Estructurales- U. A. ENDE- Comisión Nacional de Energía Atómica Av. Gral. Paz y Av. de los Constituyentes- (1650)- San Martín- Buenos Aires- Argentina e-mail: [kulichev@cnea.gov.ar](mailto:kulichev@cnea.gov.ar).
- [79] Evelio Palomino-Marín, Yanexi Cepero-Aguilera. (2011) Análisis de la eficiencia del sistema de aislamiento de vibraciones de grupos electrógenos MAN 18 V48/60 B. Ingeniería Mecánica. Vol. 14. No. 1, enero-abril, 2011, p. 31-39, ISSN 1815-5944.
- [80] Luheng Wang, Tianhuai Ding, Peng Wang. (2008) EFFECTS OF INSTANTANEOUS COMPRESSION PRESSURE ON ELECTRICAL RESISTANCE OF CARBON BLACK FILLED SILICONE RUBBER COMPOSITE DURING COMPRESSIVE STRESS RELAXATION. Composites Science and Technology, ELSEVIER. 0266-3538/\$ - see front matter 2008 Elsevier Ltd. All rights reserved. doi:10.1016/j.compscitech.2008.08.018.
- [81] Aline Carlos de Oliveira, Sidney Xavier dos Santos, Eder Tadeu Gomes Cavalheiro.(2008) Graphite-silicone rubber composite electrode: Preparation and possibilities of analytical application. ScienceDirect, ELSEVIER. Talanta 74 (2008) 1043–1049. 0039-9140/\$ – see front matter © 2007 Elsevier B.V. All rights reserved. doi:10.1016/j.talanta.2007.06.033.
- [82] S. Santosh Kumar · B. D. Pant (2014) Design principles and considerations for the ‘ideal’ silicon piezoresistive pressure sensor: a focused review. Microsyst Technol. S. S. Kumar · B. D. Pant Academy of Scientific and Innovative Research (AcSIR), New Delhi, India. (2014) 20:1213–1247 DOI 10.1007/s00542-014-2215-7.
- [83] SIHAI WEN, SHOUKAI WANG, D. D. L. CHUNG . (2000). Piezoresistivity in continuous carbon fiber polymer-matrix and cement-matrix composites. JOURNAL OF MATERIALS SCIENCE 35 (2000) 3669 – 3675 . Composite Materials Research Laboratory, State University of New York at Buffalo, Buffalo, NY 14260-4400, USA. 0022–2461. 2000 Kluwer Academic Publishers.
- [84] Luheng Wang. (2016) Pressure sensing material based on piezoresistivity of graphite sheet filled silicone rubber composite. School of Information Science and Engineering, Central South University, China. <http://dx.doi.org/10.1016/j.sna.2016.11.005> 0924-4247/© 2016 Elsevier B.V. All rights reserved.
- [85] Yuting Li, Zhiyong Liu, Tianxing Wang, Shuying Shang. (2016) High-piezoresistive sensitivity of silicone matrix composites with low metal filler content. a College of Physics and Materials Science, Henan Normal University, Xinxiang 453007, China. Henan Province Key Laboratory of Photovoltaic Materials, Xinxiang 453007, China. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matlet.2016.02.093> 0167-577X/& 2016 Elsevier B.V. All rights reserved.
- [86] Luheng Wang, Fangfang Ma, Qianshu Shi, Huanghai Liu, Xueting Wang. (2011) Study on compressive resistance creep and recovery of flexible pressure sensitive material based on carbon black filled silicone rubber composite. College of Information Science and Engineering, Northeastern University, No. 11, Lane 3, WenHua Road, Shenyang 110819, People’s Republic of China. 0924-4247/\$ – see front matter © 2010 Elsevier B.V. All rights reserved. doi:10.1016/j.sna.2010.10.023.
- [87] Vineet Kumar, Dong-Joo Lee, Jin-Yong Lee. (2016) Studies of RTV silicone rubber nanocomposites based on graphitic nanofillers. School of Mechanical Engineering, Yeungnam University, Gyeongsan, Republic of Korea. <http://dx.doi.org/10.1016/j.polymertesting.2016.11.004> 0142-9418/© 2016 Elsevier Ltd. All rights reserved.
- [88] Chiwon Lee, Myungjoon Kim, Yoon Jae Kim, Nhayoung Hong, Seungwan Ryu, H. Jin Kim, and Sungwan Kim. (2017). Soft Robot Review. International Journal of Control, Automation and Systems 15(1) (2017) 3-15 <http://dx.doi.org/10.1007/s12555-016-0462-3>. ICROS, KIEE and Springer 2016.

## LISTA DE FIGURAS

### Capítulo 1 Introducción.

Figura 1.1 Onda estacionaria gráfica de Lissajous.....	12
Figura 1.2 Esquema del vibrometro típico.....	12
Figura 1.3 Desarrollo en el entorno visual LABVIEW.....	16
Figura 1.4 Desarrollo de la aplicación del análisis en LABVIEW.....	16
Figura 1.5 Gráfica de las señales medidas en entorno virtual LABVIEW.....	17
Figura 1.6 Señal compuesta senoidal dominio del tiempo y dominio de la frecuencia mediante FFT.....	19
Figura 1.7 Aislador de vibraciones.....	21
Figura 1.8 Absorber dinámico de vibraciones.....	21
Figura 1.9 Eliminador activo de vibraciones.....	22
Figura 1.10 Eliminador sincrónico de vibraciones.....	22
Figura 1.11 Molécula de aceite de silicona (polidimetilsiloxano).....	23
Figura 1.12. Soportes aisladores de vibración comerciales elastómero-metal.....	25
Figura 1.13 Micro-Interfase en un Soporte Compuesto-Electrodo (MICE).....	28

### capítulo 2 Antecedentes.

Figura 2.1 Resultados experimentales de un Absorber semiactivo.....	31
Figura 2.2. Sistema de medición de vibración en máquinas.....	31
Figura 2.3 Diagrama a bloques del circuito de interfase del medidor de vibraciones.....	32
Figura 2.4 Estructura del NCTF con sistema de control de posición PTP.....	33
Figura 2.5 Red neuronal adaptiva.....	33
Figura 2.6 Arquitectura de la plataforma de diagnóstico.....	34
Figura 2.7 Alternativa a la transformada de Hilbert.....	34
Figura 2.8 Top de falla de componentes.....	35
Figura 2.9 Fallo sembrado en la pista exterior del rodamiento.....	37
Figura 2.10 Diagrama a bloques del sistema de gravado HolderCPS.....	38
Figura 2.11 Evolución del mantenimiento en el tiempo de máquinas rotativas.....	39
Figura 2.12 Análisis estructural estático del soporte aislador de vibraciones basado en silicona.....	40
Figura 2.13. Aisladores de neopreno en maquinaria rotatoria.....	40
Figura 2.14. Generación de impactos por la presencia de un defecto.....	41
Figura 2.15A El desbalance estático.....	42
Figura 2.15B El desbalance de un par de fuerzas.....	42
Figura 2.15C El desbalance dinámico.....	42
Figura 2.15D El desbalance de rotor en voladizo.....	43
Figura 2.15E Rotor excéntrico.....	43
Figura 2.15F Eje doblado.....	43
Figura 2.15G Desalineación angular.....	43
Figura 2.15H Desalineación paralela.....	44
Figura 2.15I Desalineación de rodamiento inclinado sobre el eje.....	44
Figura 2.16 Sistema de control pasivo bajo fuerzas externa(a) , sistema recibiendo una vibración de movimiento(b).....	45

Figura 2.17 Ilustración de la propagación de las ondas vibratorias en un sistema de máquinas giratorias y accesorios.....	45
Figura 2.18 Sistema de control activo de vibraciones.....	46
Figura 2.19 Criterios de severidad, armónicos presentes u causas de vibraciones.....	46
Figura 2.20 Distribución de los soportes o calzos antivibratorios de un motor de combustión interna V48. ....	47
Figura 2.21 Relación entre los ensayos de resistencia eléctrica, compresión y tensión.....	49
Figura 2.22 Electrodo de compuesto flexible.....	50
Figura 2.23 Resistividad con ciclos de tensión-compresión repetitiva.....	52
Figura 2.24 Relaciones entre la presión y la resistencia (C: contenido de la hoja de grafito).....	53
Figura 2.25 Cambios en las redes conductoras con contenido de hoja de grafito bajo y alto.....	54
Figura 2.26 Curvas de conductividad en tensión de compresión después de varios ciclos.....	55
Figura 2.27 Curvas de factores de calibre en función de la deformación por compresión.....	55
Figura 2.28 Resistencias relativas de fluencia y la prueba de recuperación.....	56
Figura 2.29 Esquema de la configuración experimental para medir la resistencia.....	56
Figura 2.30 Mediciones del desplazamiento de actuación para GR a 15 phr en matriz de goma.....	57
Figura 2.31 Respuesta cíclica a través de la tensión de compresión normalizada: (a) para Nano99 como nanofibras de grafo; (b) carga de compresión a lo largo del tiempo para GR en presencia de un campo magnético.....	57
Figura 2.32 Robots blandos. (a) Un robot resistente y sin ataduras. (b) Robot suave multigait . (c) Robot de Salto sin ataduras. (d) Bloqueo de la locomoción habilitada para la piel (JSEL) . (e) OctArm. (f) Mano robótica obediente y poco activada. (g) Manta robot de natación. (h) Peces robóticos blandos autónomos hidráulicos. (i) Guantes robóticos suaves. (j) Robot de pulpo. (k) Robot Meshworm . (l) GoQbot. (m) Atasco granular universal. (n) Atasco robot granular.....	58

### capítulo 3 Trabajo experimental y resultados.

Figura 3.1 Diagrama de la metodología en la investigación y experimentales.....	60
Figura 3.2 Figura 3.2 Sensores piezoeléctricos ensayo en chumacera y soporte en el laboratorio.....	61
Figura 3.3 Tarjeta de adquisición del sensores piezoeléctricos en chumacera.....	61
Figura 3.4 Esquema del analizador de vibraciones.....	62
Figura 3.5 Diagrama en entorno virtual de Labview del analizador de vibraciones.....	62
Figura 3.6 Soporte de un conjunto de máquinas con sensor flexible y aislador de vibraciones.....	63
Figura 3.7 Vista de los sensores conectados en forma de puente en la base del aislador.....	64
Figura 3.8 Circuito eléctrico usado para el procesamiento de la señal en el soporte del motor.....	65
Figura 3.9 MEB del compuesto flexible reforzado con fibras de carbono distribuidas de forma aleatoria C100 con un contenido de 50% de fibras de carbono y 50% de silicona del peso total.....	66
Figura 3.10 MEB del compuesto flexible reforzado con fibras de carbono, C50 con un contenido de 25% de fibras de carbono y 75% de silicona del peso total.....	66
Figura 3.11 MEB del los reactivos usados para el compuesto, fibras de carbono y silicona RTV, donde la figura a), b) y c) son las FCM, d), e) y f) son la superficie de la silicona vulcanizada.....	67
Figura 3.12 La MEB del compuesto flexible reforzado con fibras de carbono, 3.12d compuesto C100 y 3.12e compuesto C50 3.12b y 3.12c Difracción de Rayos X (DRX) de las fibras y DRX del compuesto C100.....	67
Figura 3.13 Equipo de microscopia electrónica de barrido de Instituto de Investigaciones metalúrgicas y materiales de la UMSNH.....	68

Figura 3.14 Máquina universal de ensayos tensión compresión 500Kg. Medición de carga, deformación transversal y longitudinal, así como la medición de resistencia eléctrica.....	69
Figura 3.15 Ensayo destructivo a compresión de 4 cilindros compuesto flexible con diferente dureza específica C100, C75, C50 y uno de silicona pura, usado como referencia.....	69
Figura 3.16 Ensayo de compresión de 3 cilindros de compuesto flexible piezoresistivo con diferente resistividad específica C100, C75, C50.....	70
Figura 3.17 Coeficiente de Poisson, relación de la deformación transversal con la de formación longitudinal de los compuestos C50, C75, C100 y silicona pura.....	70
Figura 3.18 Falla de las probetas de compuesto a una deformación del 50% a) compuesto silicona pura falla “Barreling” c) falla “Barreling-Michelin” c) falla fractura frágil-cúmulos d) falla por fractura frágil. ....	71
Figura 3.19 Configuración para la determinación de la espectroscopia de impedancia en un sólido de 2 electrodos usando un osciloscopio para su medición.....	72
Figura 3.20 Equipos usados en espectroscopia de impedancia usando la técnica de medición de impedancia indirecta a diferentes frecuencia 0-1MHz.....	73
Figura 3.21 Espectroscopia de impedancias, barrido de frecuencia y ángulo de fase 3.21a y 3.21b.....	73
Figura 3.22 Máquina de ensayo vibratorio uniaxial respuesta a la frecuencia vibratoria. (Espectroscopia de impedancia vibratoria).....	74
Figura 3.23 Contenido armónico mecánico de los compuestos C75 y C100.....	75
Figura 3.24 Contenido armónico fundamental mecánico y eléctrico de los compuestos C75 y C100.....	75
Figura 3.25 Contenido armónico total eléctrico de los compuestos C75 y C100, espectroscopia de vibraciones.....	76
Figura 3.26 Respuesta a la frecuencia ZV, de los compuestos C75 y C100.....	76
Figura 3.27 Eficiencia mecánica vibratoria ( $\eta$ ) del compuesto flexible.....	77
Figura 3.28 Ensayo para la obtención de las propiedades termofísicas, a) calor fluyendo hacia la probeta b) calor fluyendo del interior de la probeta por efecto Joule al medioambiente.....	78
Figura 3.29 Ensayo de conductividad térmica norma C177 ASTM.....	80
Figura 3.30 Coeficiente de conductividad térmica K y calor específico.....	80
Figura 3.31 Difusividad térmica del compuesto flexible.....	81
Figura 3.32 Contacto térmico imperfecto entre las FCM y la matriz de silicona, distribución de temperatura y desviación del flujo de calor Q a lo largo de la interfase (MIFM) del compuesto flexible debido a la variación de la conductividad térmica y eléctrica por formación de cúmulos.....	
Figura 3.33 Estabilización térmica de una probeta solera 19x19x8mm por efecto Joule a compresión C100. ....	82
Figura 3.34 Dilatación térmica lineal del compuesto flexible.....	83
Figura 3.35 Variación de la resistencia eléctrica con la temperatura.....	83
Figura 3.36 Dilatación térmica lineal del compuesto flexible RTV y variación de la resistencia eléctrica. ....	84
Figura 3.37 Termografía, migración de los “Puntos Calientes” por efecto joule en el compuesto RTV C75. ....	85
Figura 3.38 Compuesto C100 mostrando la distribución de las fibras y los cúmulos, Microscopias. Estereoscópica superficial a 75x (A), Fotografía digital superficial a 75x (B), Morfología, Fotografía de Rayos X-proyección-3D (C), Termografía IR Superficial (D).....	86
Figura 3.39. Efecto Joule al aplicar energía eléctrica, distribución del calor, compuesto C50(A) se aplican 220v, compuesto C75 (B) a una tensión de 50v y el C100 © aplicando 12v.....	86
Figura 3.40 Sistema de radiografías digitales Fona CDRelite del compuesto flexible.....	87

Figura 3.41 Morfología de Rayos X proyección 3D en espécimen de 8x19x19mm, Silicona STD (A), C50(B), C75(C), C100 (D).....	88
Figura 3.42 Morfología de Rayos X-2D en espécimen de 8x19x19mm, Silicona STD (A), C50(B), C75(C), C100 (D).....	88
Figura 3.43 Morfología mediante Rayos X-3D en espécimen cilíndrico.....	89

#### Capítulo 4 Análisis de resultados.

Figura 4.1 La Interacción de las micro-interfases formadas en el compuesto determinaran gran parte de su comportamiento y características.....	92
Figura 4.2 Corte central de la probeta muestra la porosidad de una probeta C75.....	92
Figura 4.3 Circuito eléctrico equivalente de compuesto flexible.....	97
Figura 4.4 Soporte metal- elastómero cilíndrico marca Epidor.....	100
Figura 4.5 Conjunto de máquinas giratorias de 300Kw ancladas a cimentación rígida. Proyecto P29 en <i>SIMIRAO Michoacán</i> .....	101
Figura 4.6 Soporte inteligente prototipo para máquinas de tamaño pequeño 100Kg.....	101
Figura 4.7 Calibración del soporte aislador piezoresistivo, aplicado al conjunto de máquinas rotativas en el laboratorio.....	103
Figura 4.8 Respuesta del soporte C100 en el dominio del tiempo para una velocidad de rotación de 1800 y 2050 RPM.....	103
Figura 4.9 Respuesta del soporte C100 en el dominio del tiempo para una velocidad de rotación de 2135 y 2550 RPM.....	104
Figura 4.10 Respuesta del soporte C100 en el dominio del tiempo para una velocidad de rotación de 2927 RPM.....	104
Figura 4.11 Analizador de vibraciones de General Electric G.E modelo Commtest VB7. Usado para la calibración del soporte.....	104

#### LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Se puede apreciar los trabajos mas recientes en el estudio de las vibraciones mecánicas en máquinas rotativas.....	9
<b>Tabla 2</b> Norma de rango de severidad de vibraciones en máquinas rotativas, según la Norma ISO 2372. ....	14
<b>Tabla 3</b> Escala de dureza chore para elastómeros comerciales.....	24
<b>Tabla 4</b> Eficiencia estimada para el sistema de aislamiento de vibraciones por banda de octavas en frecuencia para 10 de los 12 calzos objeto de análisis del sistema MAN18V48/60B.....	48
<b>Tabla 5</b> Propiedades de la silicona y el carbón negro.....	49
<b>Tabla 6</b> Resistencia eléctrica del compuesto flexible.....	51
<b>Tabla 7.</b> Resumen del experimental y las características del compuesto flexible en estado estable térmico. ....	93
<b>Tabla 8</b> Equivalentes de parámetros en sistemas mecánico y eléctrico.....	94
<b>Tabla 9.</b> Tabla comparativa de los resultados del análisis de vibraciones usando sensores piezoeléctricos y soporte aislador fabricado mediante Labview en el conjunto de máquinas rotativas de la figura 4.7. ....	105

**ANEXO.**

Publicación de un artículo y otro enviado a editorial ELSEVIER.

[p1] Carlos-Manuel Sánchez-González \*, Juan-Felipe Soriano-Pena, José-Carlos Rubio-Avalos, J.-Jesús Pacheco-Ibarra. (2020). Fabrication of flexible piezoresistive sensors based on RTV-silicone and milled carbon fibers and the temperatures effect on their electric resistance. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, C.P. 58030, Mexico. Sensors and Actuators A: Physical. ELSEVIER. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2019.111811> 0924-4247/© 2019 Elsevier B.V. All rights reserved.

**[p2] Submission Manuscript Details**

**Manuscript number:** SNA\_2020\_1222

**Title:** Thermal properties of flexible conductive silicone rubber composites and their effect on the electric resistance.

**Article type:** Research Paper

**Abstract:** Flexible and electrically conductive polymer composites are attractive smart-materials due to their wide range of applications. However, the electrical behavior of these materials depends on their thermal properties, the carbon fiber content, and their dispersion. This contribution is focused on their thermal properties and their effect on the electric resistance. Two series of Conductive Silicone Rubber composites (CSRs) were made by adding 75%, and 100% weight to weight (w/w) of milled carbon fibers and were tested from room temperature (30°C) up to 80°C to evaluate the electrical resistance variation; they show a huge change, starting at less 100 up to 10M in this short temperature range. Also from results, can be appreciated, how thermal conductivity (K) increases from 0.21 W/m<sup>o</sup>K for a commercial standard silicone rubber without carbon fiber addition up to 0.57 W/m<sup>o</sup>K for a conductive silicone rubber composite with 100% (w/w) of milled carbon fiber. Complementary, other thermal properties like thermal diffusivity, heat distribution, and linear thermal expansion were determined and they helped to explain the behavior and possible applications of these smart-composites. Keywords Flexible conductive polymer composites, Thermal and Electrical Properties, Smart-Materials.

**Manuscript category:** Physical Sensors (magnetic, temperature, and others) Corresponding Author Carlos-Manuel Sanchez-Gonzalez Corresponding Author's Institution UNIVERSIDAD MICHOCANA DE SAN NICOLAS DE HIDALGO. Order of Authors Carlos-Manuel Sanchez-Gonzalez, Juan-Felipe Soriano-Peña, Jose-Carlos Rubio-Avalos, J. Jesus Pacheco-Ibarra, Carlos Rubio-Maya Suggested reviewers WenGang Wu, Yu Sun, HIROYUKI FUJITA Submission Files Included in this PDF.