

**Estudio, desarrollo y comparación
de tecnologías para la detección temprana de falla
en Equipos Rotantes**



TROFFE, Santiago Javier.

PROYECTO INTEGRADOR PROFESIONAL

Presentado a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del

Comahue como requisito para la obtención del grado de

INGENIERO MECÁNICO

Neuquén – Argentina

2021

**Estudio, desarrollo y comparación
de tecnologías para la detección temprana de falla
en Equipos Rotantes**

TROFFE, Santiago Javier.

Director: Ing. **Troffe, Mario Guillermo.**

Co-Director: **KATCOFF, Carlos.**

Presentado a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del

Comahue como requisito para la obtención del grado de

INGENIERO MECÁNICO

Neuquén – Argentina

2021

**Estudio, desarrollo y comparación
de tecnologías para la detección temprana de falla
en Equipos Rotantes**

TROFFE, Santiago Javier.

Aprobado en Fecha 1 de Diciembre de 2021.

Tribunal evaluador:

- Ing. KEIL, Germán.
- Ing. AUDISIO, Orlando.
- Ing. CAMPOS, Damián.

.....

Ing. TROFFE, Mario G.

Director

Dedicatoria

A mi familia.

AGRADECIMIENTO

A través del siguiente espacio, deseo poder agradecer en mi primera instancia a mi familia principalmente a mis padres Ana y Mario; sin su apoyo llegar a estas instancias hubiera sido imposible. No quiero olvidarme de mis hermanos, quienes de un modo u otro estuvieron conmigo a lo largo de esta carrera, con frases como las de Nicolas “Si está flojo con 2 tornillos coloca 4”. A mi novia Ayelén, y su siempre gran variedad de música a la hora de estudiar.

De mis amigos y compañeros de estudios increíbles que me dio esta carrera, Juan, Zangan, Juli, Mati, Cris, Anto y muchos más.

Quiero agradecer a toda la gente de la Facultad de Ingeniería. Desde el personal de limpieza con quienes tenía charlas a las 8 am esperando el agua para el mate, a los ayudantes y docentes de las 40 materias que curse. Sin su paciencia y ganas de enseñar, hoy no sería quien soy.

Al departamento de Mecánica, quienes me dieron su apoyo en todo momento yendo conmigo a realizar distintas actividades.

A las Empresas por la buena atención y colaboración recibida. Por brindarme todo lo necesario para la realización del presente trabajo. Por la paciencia del todo el personal a la hora de instruirme sobre ciertos equipos.

Gracias a todos por estar en el día a día y ayudarme a formarme tanto como persona como profesional.

Estudio y desarrollo de nuevas tecnologías para la detección temprana de fallas.

Autor: TROFFE, Santiago Javier.

Director: TROFFE, Mario Guillermo.

Co-Director: KATCOFF, Carlos.

Resumen

El presente trabajo está orientado a generar avances en cuanto a tecnologías, dispositivos y procedimientos que permitan no solo reducir costos al contratar a especialistas externos, sino también, aumentar la posibilidad de identificar e interpretar potenciales fallas, que se obtienen con la acción de la detección por los cinco sentidos. Esto también permitirá establecer el momento en que sea necesaria la consulta a un especialista, por ejemplo, al superar un límite medible establecido.

El trabajo se enfoca en analizar y estudiar equipos rotantes, en potencias que hasta los 100 HP (como bombas centrifugas, compresores centrífugos y a tornillo), los cuales se encuentran presentes en la mayoría de las industrias locales (gas, petróleo, frutícola, y otros servicios). Estos son propensos a fallas, causadas por desgastes y esfuerzos dinámicos a los que están sometidos, a lo que se suma operaciones deficientes, sobrecargas y trabajo fuera de los rangos nominales.

Se seleccionaron tres técnicas que permiten identificar fallas en estados incipientes de evolución: vibración mecánica, lubricación y termografía. Estas son las habitualmente utilizadas y sobre las cuales hay una amplia experiencia, normativa y bibliográfica.

Una vez identificadas las posibilidades, se procede a tomar mediciones en empresas locales con los equipos disponibles. Con el objeto de realizar una comparativa técnica económica, que permite la selección acorde al contexto y posibilidades de cada industria.

Palabras claves: Mantenimiento Preventivo, Mantenimiento Correctivo, Mantenimiento Basado en Condición (CBM), Vibración, Termografía, Lubricación, Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM), Mantenimiento Productivo Total (TPM),

Study and development of new technologies for early fault detection.

Author: TROFFE, Santiago Javier.

Direction: TROFFE, Mario Guillermo.

Co-director: KATCOFF, Carlos.

Abstract

This work is aimed at generating advances of technologies, devices and procedures that allow not only to reduce costs by hiring external specialists, but also to increase the possibility of identifying and interpreting potential failures, which're obtained with the action of detection by the five senses. This would also make it possible to establish the time when a specialist consultation is necessary, for example, when exceeding an established measurable limit.

The work focuses on analyzing and studying rotating equipment, in powers up to 100 HP (such as centrifugal pumps, centrifugal and screw compressors), which are present in most local industries (gas, oil, fruit, and others). services). These are prone to failures, caused by wear and tear and dynamic stresses to which they are subjected, to which is added poor operations, overloads and work outside the nominal ranges.

Three techniques were selected that allow identifying faults in incipient stages of evolution: mechanical vibration, lubrication and thermography. These are the ones commonly used and on which there is extensive normative and bibliographic experience.

Once the possibilities have been identified, measurements are taken in local companies with the available equipment. In order to carry out an economic technical comparison, which allows the selection according to the context and possibilities of each industry.

Índice General

AGRADECIMIENTO.....	iv
Resumen.....	v
Abstract.....	vi
Índice General.....	viii
Índice de Imágenes.....	x
1 INTRODUCCIÓN.....	13
2 OBJETIVO.....	14
3 ALCANCE.....	14
4 MARCO TEÓRICO.....	14
4.1 Vibración mecánica.....	15
4.2 Termografía.....	16
4.3 Lubricación.....	17
4.2 Fundamentación.....	17
5 DESARROLLO.....	25
5.1 Metodología.....	25
5.2 Investigación y resultados de tecnologías.....	25
5.2.1 Análisis de Vibración.....	25
5.2.2 Termografía y análisis de temperatura.....	35
5.2.3 Análisis de Lubricación.....	39
6 CONCLUSIONES.....	41
7 ANEXOS.....	43
Anexo I Benchmarking.....	43
1. Vibración.....	43
Vibration Isolator Pro.....	43
My frequency Free.....	43
Resonance.....	44
Bearing Defender.....	45
Sistema de Monitoreo de Vibraciones ERBESSD Instruments.....	49
Módulo de adquisición de datos QuantumX MX1615B.....	55
Hardware DSP Logger MX 300.....	55
DAQ USB-1608FS.....	57

2. Termografía.....	57
Sensor de temperatura Termopar.....	57
Sensor de temperatura por resistencia (RTD)	58
Sensor de temperatura por cambio de estado	59
Cámaras termográficas portátiles de mano.....	59
Cámaras termográficas enlazadas a celulares.....	67
Móvil Caterpillar	69
Sensores de Temperatura de ERBESSD	73
3. Lubricación.....	75
Laboratorio Portátil	75
Análisis en laboratorios:	76
Anexo II Gráficos de las mediciones de vibración.....	79
Anexo III Gráficos de Dispersión y Matrices de Correlación	88
Anexo IV Referencias	93

Índice de Imágenes

Figura 1: Curva A, (Troffé, 2017).....	18
Figura 2: Curva B, (Troffé, 2017)	18
Figura 3: Curva C (Troffé, 2017)	19
Figura 4: Curva D (Troffé, 2017).....	19
Figura 5: Curva E (Troffé, 2017)	19
Figura 6: Curva F (Troffé, 2017)	19
Figura 7: Curva P-F (Troffé, 2017).....	21
Figura 8 Categoría de Mantenimiento (Norma ISO 14224, 2016, traducida).....	23
Figura 9: Curva P-F, zona de detección (Troffé, 2017)	24
Figura 10: Gráficos de dispersión (Rango dinámico vs otros parámetros)	27
Figura 11: Gráficos de dispersión (precio vs ancho de bandas).....	27
Figura 12: Características de los Equipos de Vibración	28
Figura 13: Ancho de banda de los Equipos de Vibración	28
Figura 14: Puntos establecidos por la Norma ISO 8528-9.....	30
Figura 15: Puntos donde se llevaron las mediciones.....	31
Figura 16: Puntos donde se llevaron las mediciones.....	31
Figura 17: Resultado de las mediciones obtenidas con la aplicación Vibration Isolator Pro ..	32
Figura 18: Resultado de las mediciones obtenidos en el punto 5z con la placa (Sigview)	33
Figura 19: Resultado de las mediciones obtenidos en el punto 5z con el adquisidor MX 1615 B (Catman)	33
Figura 20: Gráficos de Dispersión Temperatura Máxima vs otros Parámetros	36
Figura 21: Gráficos de Dispersión Precio vs otros Parámetros.....	36
Figura 22: Características de los Equipos Termográficos.....	37
Figura 23: Rango de Temperaturas de los Equipos Termográficos	38
Figura 24: Ejemplo de comparación Visual (Pall, 2007)	41
Figura 25: Sensor de Bearing Defender (https://www.acoem.com)	46
Figura 26 Kit de Bearing Defender, (https://www.acoem.com)	47
Figura 27: Sensores Eagle (https://www.acoem.com)	48
Figura 28: Sensor EPH-V10 (https://store.erbessd-instruments.com/)	50
Figura 29: Sensor EPH-V11 (https://store.erbessd-instruments.com/)	50
Figura 30: Sensor EPH-V12 (https://store.erbessd-instruments.com/)	51
Figura 31: Sensor ATEX (https://store.erbessd-instruments.com/)	52
Figura 32: Mini sensor (https://store.erbessd-instruments.com/).....	52
Figura 33: Sensor All in One (https://store.erbessd-instruments.com/).....	53

Figura 34: Sensor Wiser 3x (https://store.erbessd-instruments.com/)	53
Figura 35: Sensor EI-Wiser (https://store.erbessd-instruments.com/)	54
Figura 36: QuantumX MX1615B (https://store.erbessd-instruments.com/)	55
Figura 37: DSP Logger MX 300 (https://www.es.semapi.com/)	56
Figura 38: DAQ USB-160FS	57
Figura 39: Sensor Termopar (https://es.omega.com/)	57
Figura 40: Sensor RTD (https://es.omega.com/)	58
Figura 41: Sensor de cambio de estado (https://termometros.com.ar/)	59
Figura 42: cámara A700-EST (https://www.flir.com.mx/)	60
Figura 43: Cámara E96 (https://www.flir.com.mx/)	61
Figura 44: Cámara TG275 (https://www.flir.com.mx/)	62
Figura 45: Cámara E54 (https://www.flir.com.mx/)	62
Figura 46: Cámara E8-XT (https://www.flir.com.mx/)	63
Figura 47 Cámara TG297 (https://www.flir.com.mx/)	63
Figura 48: Cámara T1020 (https://www.flir.com.mx/)	64
Figura 49: Cámara T840 (https://www.flir.com.mx/)	65
Figura 50: Cámara T540 (https://www.flir.com.mx/)	65
Figura 51: Cámara C5 (https://www.flir.com.mx/)	66
Figura 52: Cámara C3-X (https://www.flir.com.mx/)	67
Figura 53: Cámara One Pro (https://www.flir.com.mx/)	68
Figura 54: Móvil Caterpillar S60 (https://www.catphones.com/es-ar/)	70
Figura 55: Móvil Caterpillar S61 (https://www.catphones.com/es-ar/)	71
Figura 56: Móvil Caterpillar S62 (https://www.catphones.com/es-ar/)	72
Figura 57: Sensor EPH-T20 (https://store.erbessd-instruments.com/)	73
Figura 58: Sensor EPH-T21 (https://store.erbessd-instruments.com/)	74
Figura 59: Laboratorio Portátil (https://www.oleotec.com.mx/)	75
Figura 60: Espectro del punto 1, Sigview	79
Figura 61: Espectro del Punto 1, Catman	80
Figura 62: Espectro del Punto 2, Sigview	80
Figura 63: Espectro del Punto 2, Catman	80
Figura 64: Espectro del Punto 3, Sigview	81
Figura 65: Espectro del Punto 3, Catman	81
Figura 66: Espectro del Punto 3, Vibration Isolator Pro	81
Figura 67: Espectro del Punto 4, Sigview	82
Figura 68: Espectro de Punto 4, Catman	82

Figura 69: Espectro del Punto 5 z, Sigview	82
Figura 70: Espectro del Punto 5 z, Catman	83
Figura 71 Espectro del Punto 5 z, Vibration Isolator Pro	83
Figura 72: Espectro del Punto 5 y, Sigview	83
Figura 73: Espectro del Punto 5 y, Catman.....	84
Figura 74: Espectro del Punto 6, Sigview	84
Figura 75: Espectro del punto 6, Sigview	84
Figura 76: Espectro del punto 6, Catman	85
Figura 77 Espectro del punto 6, Catman	85
Figura 78: Espectro del punto 6, Vibration Isolator Pro	85
Figura 79: Espectro del Punto 6 y, Sigview	86
Figura 80: Espectro del Punto 6 y, Catman.....	86
Figura 81: Espectro del Punto 6 z, Sigview	86
Figura 82: Espectro del Punto 6 z, Catman	87
Figura 83: Espectro del Punto 7, Sigview	87
Figura 84: Espectro del Punto 7, Catman.....	87
Figura 85: Espectro del Punto 7, Isolator Vibration Pro	88
Figura 86: Gráficos de Dispersión entre los distintos Parámetros de los Equipos de Vibración	89
Figura 87: Matriz de Correlación entre los distintos Parámetros de los Equipos de Vibración	90
Figura 88: Gráficos de Dispersión entre los distintos Parámetros de los Equipos de Termografía.....	91
Figura 89: Matriz de Correlación entre los distintos Parámetros de los Equipos de Termografía.....	92

1 INTRODUCCIÓN

El objetivo principal al llevar a cabo tareas de mantenimiento es el poder conservar las propiedades y características del equipo, así como sus funciones. Hay una gran cantidad de clases y tipos de equipos. El mantenimiento busca poder prevenir, evitar o mitigar fallas catastróficas, como, por ejemplo, accidentes al personal, detención de la producción e impacto ambiental.

Existe una serie de técnicas de mantenimiento. Según la Norma [ISO 14224 \(2016\)](#), tenemos dos grandes clasificaciones: Mantenimiento Preventivo y Mantenimiento Correctivo.

En la década del 70, el mantenimiento tuvo una importante evolución conceptual, a partir de los trabajos realizados por [Heap y Nowlan \(1978\)](#), quienes introdujeron en la industria aeronáutica el Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM), más tarde expandido a toda la industria, como estándar. En su publicación llama la atención una estadística realizada sobre los Boeing 747, donde el 70% de las fallas en su estado de evolución incipiente, eran detectadas por los operadores de las aeronaves, en donde un porcentaje similar en horas hombre se necesitaba para reacondicionar los componentes que mostraban deterioro.

Esto quiere decir, que el operador era capaz de detectar una falla incipiente por lo general con el solo uso sus cinco sentidos. Entonces, si el 70% de las fallas incipientes eran detectadas por operadores simplemente con sus cinco sentidos, ¿Cuánto podría aumentar este porcentaje si el operador dispone de otras herramientas simples y que estén económicamente a su alcance?

Como el mundo del mantenimiento es tan vasto se opta por estudiar tres técnicas en particular que ayudan a identificar fallas en estados incipientes de evolución: Vibración Mecánica, Análisis de Lubricación y Termografía. Es por esto que se realizó un Benchmarking, para conocer cuáles son las aplicaciones y tecnologías disponibles asociadas a estas técnicas. A su vez, nos enfocaremos en dispositivos que sean útiles para analizar equipos rotantes hasta los 100 HP (como bombas centrifugas, compresores centrífugos y a tornillos, entre otros equipos). Se enfocó la búsqueda hacia equipos de esta potencia ya que están presentes en la mayoría de las industrias y tienen un número de intervenciones importantes, debido a que son propensos a fallas, causadas por desgaste y esfuerzos dinámicos a los que están sometidos, a lo que se puede sumar operaciones deficientes, sobrecargas y trabajo fuera de los rangos normales.

Para poder corroborar si los equipos ayudaran al operador a detectar una falla incipiente, se llevarán a cabo mediciones con distintitos equipos en empresas de la zona. Luego se sacarán

conclusiones sobre si es recomendable o no su uso, teniendo en cuenta costos, características del equipo, facilidad de uso del mismo y necesidades de entrenamiento.

2 OBJETIVO

- Investigar sobre la aplicación de instrumentos, dispositivos, aplicaciones móviles y sus beneficios en cuanto a posibles mejoras en la interpretación de fallas y costos asociados, con relación a equipos específicos.
- Determinar el alcance de las aplicaciones de celulares/Tablets de acuerdo a las técnicas de mantenimiento por condición mencionadas.
- Identificar potencias de los equipos, límites de los parámetros medidos y marco de referencia que determine la necesidad cuando recurrir a un especialista.
- Concluir sobre el balance técnico económico, para definir la factibilidad del uso de estas tecnologías.
- Elevar el nivel técnico de los mantenedores y operadores, ampliando su capacidad de diagnósticos, es decir, promover la posición jerárquica de todo el personal.

3 ALCANCE

Como se mencionó con anterioridad, en la mayoría de las Industrias podemos encontrar equipos rotantes hasta los 100 HP. Además, se debe tener en cuenta que los equipos de mayor potencia suelen depender de otros equipos auxiliares para su correcto uso, como una bomba de lubricación.

Los equipos rotantes suelen presentar fallas o gran cantidad de intervenciones no programadas. El poder prevenir paros inesperados o poder detectar una falla incipiente y seguirla por tendencia hasta un valor establecido sería un meta a cumplir alineadas con el plan estratégico de la gestión de activos (PEGA), definidos por la alta dirección de la empresa.

Por lo que el trabajo se enfocará en analizar y estudiar equipos rotantes (como ser bombas centrifugas, compresores centrífugos y a tornillo), con la aplicación de los móviles y dispositivos (sensores, otros) estudiados en el Benchmarking y se tengan disponibles para llevar a cabo las mediciones.

4 MARCO TEÓRICO

Dentro de la técnica del RCM, está el diagrama de decisión, se inicia de la manera más simple la detección de las fallas preguntando si la falla a valorar puede ser detectada por el

operador y subsiguientemente, si existe alguna técnica de mantenimiento por condición (CBM), pues el trabajo de [Heap y Nowlan \(1978\)](#) apunta a dicho mantenimiento como el más conveniente, evitando las tareas intrusivas, con el riesgo, entre otros, de la inducción de fallas y el error humano.

Desde entonces ha habido una evolución continua en equipos de mediciones indirectas para conocer las condiciones internas de los equipos, tanto estáticos como rotativos. Estas tecnologías, en general son de alto costo y normalmente utilizados por personal solo dedicado a los diagnósticos, lo cual implica un extenso período de capacitación y experiencia. Otra desventaja es el tiempo que se requiere para que el personal capacitado se traslade al lugar de estudio para llevar a cabo su diagnóstico.

Una de las estrategias más utilizadas y más conocidas es el Mantenimiento Productivo Total (TPM), asigna un lugar relevante a la inspección de los equipos con los 5 sentidos. La misma se podría potenciar usando herramientas de mediciones indirectas desde aplicaciones en celulares / tablets. Es decir, que a través de tecnologías disponibles y su posible aplicación o acople con móviles y tablets el operador tendría una nueva herramienta que le ayude a identificar fallas incipientes, en estados más tempranos y patrones de fallas que no se pueden registrar con los 5 sentidos, de manera que permitan planificar la intervención. Dicho de otra forma, generar nueva información que permita tomar decisiones acertadas, bajando los niveles de incertidumbre sobre el estado de los equipos y por ende disminuyendo riesgos y mejorando la confiabilidad.

A continuación, se presentan las tres técnicas de mantenimiento que se utilizan para la detección de fallas incipientes y para seguir por tendencia cambios en los parámetros de los equipos. Estas son: Vibración mecánica, Análisis de Lubricación y termografía.

4.1 Vibración mecánica

Es una técnica utilizada para identificar y predecir anomalías mecánicas en maquinaria industrial, midiendo la vibración e identificando las frecuencias involucradas. Esta vibración es registrada, por ejemplo, con un acelerómetro y los datos son procesados por un analizador de espectro.

Entre las fallas más comunes están:

1. Desbalanceo.
 2. Fallas en rodamientos.
-

3. Holgura mecánica.
4. Desalineamiento.
5. Resonancia y Frecuencias naturales.
6. Fallas eléctricas en motores.
7. Torsión de eje.
8. Fallas en cajas de engranes.
9. Cavitación en bombas.
10. Velocidades críticas.

Esta técnica no necesita ningún desmontaje ni que la máquina sea detenida, por lo tanto, es un método no invasivo. El principio fundamental es la medición de la vibración mediante sensores que transforman el movimiento en una señal eléctrica que es interpretada y almacenada por un analizador. Las mediciones se pueden distinguir entre globales y espectrales. Cuando se realizan mediciones globales, el resultado de la medición es el promedio de todos los armónicos presentes. Mientras que una medición espectral, da información sobre el diagnóstico (que componente puede estar fallando).

Lo que se busca con esta técnica, es poder identificar fallas incipientes, por ejemplo, cuando los valores que se obtienen al medir son superiores a los de un límite establecido. También se lo puede utilizar para seguir un parámetro por tendencia. En dicho caso, se podría detener la maquinaria para revisar elementos de la misma, dar aviso que se superó el límite para decidir los pasos a seguir.

4.2 Termografía

A través de la radiación infrarroja invisible es posible supervisar el funcionamiento y el estado de las instalaciones eléctricas y mecánicas de forma segura. Algunos instrumentos de medición pueden ser sensores o cámaras termográficas.

Como la termografía es una técnica no invasiva, es probable que no sea necesario detener la máquina o la producción mientras los valores que se midan no estén por encima de algún valor límite o no cambie la tendencia de los mismos. Con esta técnica se pueden poner en evidencia energías mecánicas, que se transforman en calor y el exceso se puede identificar como zonas de deterioro prematuras. Es decir, que se detecta calor que se ha generado por algún factor desfavorable. También se pueden detectar el desgaste de aislaciones.

4.3 Lubricación

El propósito de la lubricación es la separación de dos superficies con deslizamiento relativo entre sí de tal manera que no se produzca daño en ellas; se intenta con ello que el proceso de deslizamiento sea con el rozamiento más pequeño posible. Por ello, se busca siempre que sea posible, que haya una película de lubricante (gaseoso, líquido o sólido) de espesor suficiente entre las dos superficies en contacto para evitar el desgaste.

La técnica de análisis de lubricantes no se considera invasiva, ya que en muchas máquinas es posible tomar una muestra sin que la misma sea detenida. Hay una gran variedad de métodos para estimar si el nivel de lubricación es el óptimo, si el aceite aun cumple su función, o bien si el mismo está muy utilizado (llegó al fin de su vida útil).

También, los análisis de lubricante identifican el contenido de partículas, seas estas de contaminantes o desprendimiento de los componentes. Esto sumado a lo anterior da la posibilidad de interpretar las condiciones del equipo.

4.2 Fundamentación

Profesionales, operadores, mantenedores, futuros ingenieros pueden cuestionarse: ¿Por qué investigar sobre nuevas aplicaciones móviles, o investigar sobre dispositivos para la medición? ¿Cuál es el beneficio de implementar estas aplicaciones y dispositivos que le permiten al operador y mantenedor la posibilidad de interpretar una falla con mayor anticipación? ¿vale la pena el armar un plan de mantenimiento que ayude al operador y mantenedor a decidir qué tecnología o aplicación le permite interpretar fallas y hasta qué punto? ¿es necesario el controlar periódicamente las máquinas y sus componentes?

Toda empresa tiene niveles de criticidad en sus equipos, haciendo referencia a que tan crítico sería que la máquina no pueda funcionar. Para definir el nivel de criticidad se debe analizar cómo afecta a la producción la detención de la máquina o equipo, cuanto tiempo debe estar detenida para reparaciones, si hay repuestos o stock de partes dañadas y si no las hay cuanto se tarda en conseguirla. Además del costo que conlleva tener o no stock de repuesto de dichos componentes, y otras cuestiones que pueden ser propias de las empresas. Lo dicho precedentemente sirve para que el personal de mantenimiento pueda armar planes de mantenimiento, en donde se especifique cuándo, cómo y qué mediciones deben realizarse, qué partes deberían reemplazarse o reacondicionar en ciertos casos, decidir si vale la pena tener stock, establecer intervalos de inspección.

En general no es recomendable hacer reemplazos sistemáticos de componentes si no se conocen los patrones de fallas. Para comprender mejor esto se presentan los patrones de fallas y sus respectivas curvas.

Las 6 curvas de manifestación de los componentes fueron denominadas, A, B, C, E, F. En el eje de las abscisas “X” se grafica la probabilidad de falla y en el eje de las ordenas “Y” se grafica el tiempo o el parámetro en relación con la probabilidad de falla, el patrón de desgaste principal, como puede ser cantidad de maniobras, toneladas procesadas, kilómetros; es decir que estas curvas muestran el aumento de la probabilidad de falla, principalmente.

- La curva A es denominada “curva de la bañera”. Se inicia con una probabilidad de fallas altas, llamada “mortalidad infantil”, y continua con una probabilidad constante que aumenta hasta la zona de desgaste del componente, es decir, hasta el llamado límite de vida. Es la típica curva que caracteriza la puesta en marcha de una instalación nueva, arranca con una tasa importante de fallas hasta que se van corrigiendo los errores y conociendo el proceso, luego se estabiliza con un periodo de falla con probabilidad constante y más tarde aparece el envejecimiento, por lo tanto, vuelve a aumentar la tasa de falla. Se puede observar la curva A en la Figura 1.

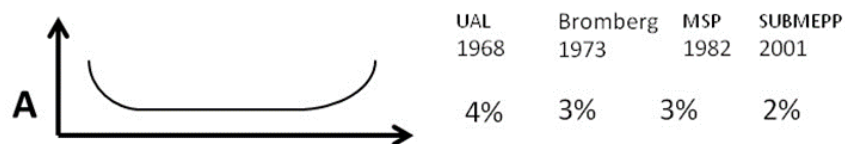


Figura 1: Curva A, (Troffé, 2017)

- La curva B (Figura 2), tiene una tasa de falla constante, que luego de un período aumenta hasta llegar a la zona de desgaste. Este patrón de falla es típico de algunos componentes de máquinas recíprocas y de las cajas de engranajes.



Figura 2: Curva B, (Troffé, 2017)

- La curva C (Figura 3), muestra un crecimiento gradual de la probabilidad de falla sin una zona de desgaste identificable. No es deseable nominar un punto límite de edad. Es la curva características de las turbinas.

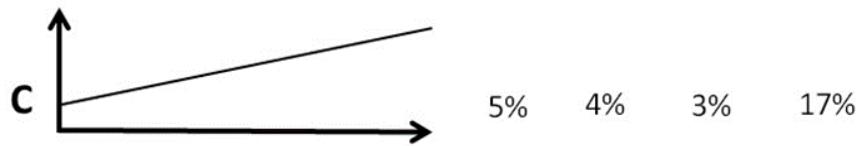


Figura 3: Curva C (Troffé, 2017)

- La curva D (Figura 4), se inicia con una baja probabilidad de falla que posteriormente se mantiene constante, siendo un ejemplo de ella cualquier componente electrónico.

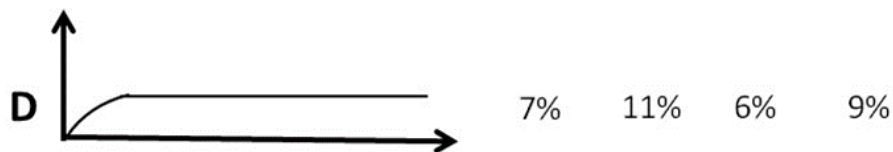


Figura 4: Curva D (Troffé, 2017)

- La curva E (Figura 5), muestra una baja probabilidad de falla que se mantiene constante durante toda la vida del componente.

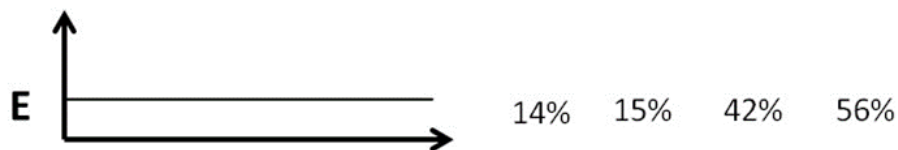


Figura 5: Curva E (Troffé, 2017)

- La curva F (Figura 6), tiene una alta mortalidad infantil que desciende hasta mantener una probabilidad de falla constante.

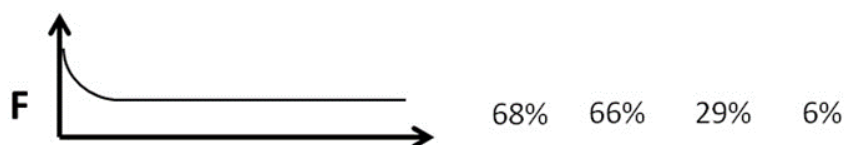


Figura 6: Curva F (Troffé, 2017)

Observando estas curvas y sus comportamientos, se puede deducir que no todas las fallas tienen que ver con el desgaste del componente en un tiempo determinado repetible, por lo que, las tareas de reacondicionamiento cíclico o las tareas de reemplazo cíclico no garantizan un nuevo periodo de confiabilidad, exceptuando los casos que se conozca con certeza y repetibilidad, que un componente tiene un comportamiento para las curvas A, B, o C. Siendo este uno de los motivos por los cuales sería de utilidad el poder, a través de tecnologías, evitar

tareas de reacondicionamiento innecesarias y además poder identificar una falla con antelación. Las curvas A y F, son curvas en donde se puede apreciar que la probabilidad de falla es alta al comienzo, sobre todo en la curva F. Es decir, que el cambiar algo que quizás funcionaba y aún no era necesario, el reemplazo de un componente nos puede elevar la probabilidad de falla.

[Heap y Nowlan \(1978\)](#), en la compañía United Air Line (UAL) identifican los siguientes porcentajes: solamente el 11% de los componentes, son los que presentan patrones de falla tipo a, b, c, son sobre los que habría que realizar este tipo de tareas cíclicas (reacondicionamiento o reemplazo), ya que el desgaste está directamente relacionado con el paso del tiempo o algún parámetro relacionado con el desgaste o pérdida de la resistencia a la rotura. El 89% restante está relacionado con patrones de fallas aleatorias que requieren otro tipo de tareas preventivas.

En las curvas también se aprecian estadísticas de otras compañías, en otros tipos de industria, verificándose los datos relevados por [Heap y Nowlan \(1978\)](#).

Lo mencionado con anterioridad ayuda a comprender que no siempre es necesario una vigilancia o control constante sobre todos los elementos o maquinaria de la empresa. Sin embargo, se entiende que, dependiendo de la criticidad del equipo, el tipo de falla potencial (roturas múltiples o catastróficas), disponibilidad de stock, conocimientos sobre la vida de la máquina se podrá decidir con mayor precisión intervalos de mantenimiento, medición o intervención.

Entonces, ¿con los 5 sentidos será evidente para los operadores la pérdida de una función causada por alguna falla en circunstancias normales? ¿se pueden detectar mecanismos de fallas o fallas incipientes? La respuesta claramente es no, no siempre se podrá depender del operador y de sus 5 sentidos, por lo que la aplicación de nuevas tecnologías será una estrategia sencilla para ayudar al operador a detectar los modos de falla a tiempo. A su vez, si el operador puede llevar un registro de las mediciones o proveerle información al mantenedor, este podrá tomar decisiones con mayor conocimiento y precisión o derivar a un especialista.

Es por esto que se investigará cuáles podrían ser los equipos, dispositivos, aplicaciones móviles que permitan por parte del operador aumentar a través de mediciones o señales (ya sean estas sencillas o avanzadas), la posibilidad de identificar una falla. Por otro lado, en el caso que el operador detecte algo con duda, o que no puede interpretar en el momento y es crítico, que rápidamente pueda enviar información al especialista, ya sea esta de vibración, termografía o lubricación. Se indagará sobre posibles alarmas con nuevas tecnologías, ya sea a través de sensores o indicadores, que alerten al operador con un cambio de color, sonido, aviso al dispositivo. Teniendo siempre presente el tipo de curva F, también se espera que con estas

nuevas tecnologías el operador pueda llevar alguna secuencia de pasos que le permitan corroborar o corregir posibles fallas inducidas en intervenciones.

Llegado a este punto, teniendo sensores, aplicaciones, ¿es técnicamente factible y merece la pena realizar mantenimiento basado en condición (CBM), para detectar si está ocurriendo o si está por ocurrir una falla?

La mayoría de los componentes, en general, dan alguna advertencia de que hay una falla incipiente con potencial para afectar a la función de la máquina, por lo tanto, se puede prevenir la falla funcional o mitigar sus consecuencias. Es decir, que es posible identificar el estado de deterioro de un componente con observaciones, mediciones directas e indirectas de los parámetros del equipo.

Para comprender como el uso de nuevas tecnologías puede ayudar a operadores y mantenedores, se analiza la curva P-F (falla potencial y falla funcional), Figura 7.

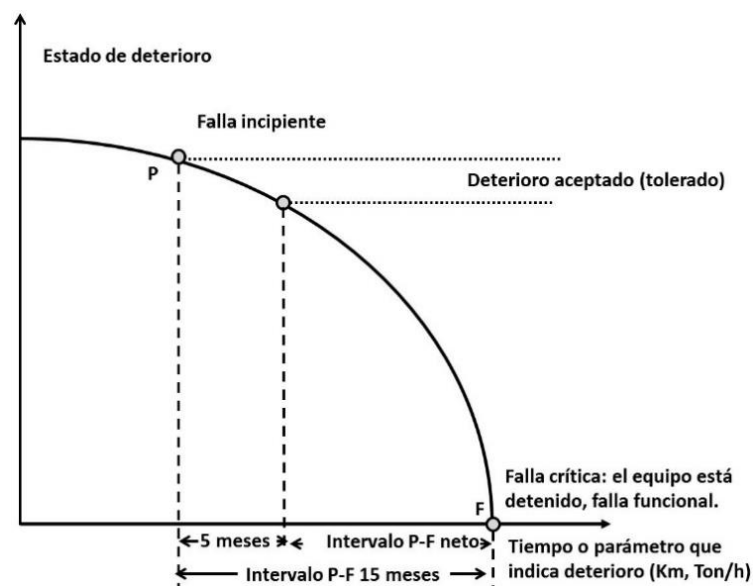


Figura 7: Curva P-F (Troffé, 2017)

Esta curva muestra como el desgaste aumenta en función del tiempo, pasando desde una falla incipiente, donde la falla empieza a mostrar signos del deterioro que evoluciona hacia un grado de severidad por degradación, llegado a cierto punto donde se comienza a percibir fallas funcionales del equipo. Finalmente, si la falla continúa avanzando, se llega a una falla crítica con la detención del equipo y pérdida total de la función. Con las curvas P-F, se determina el intervalo P-F, que corresponde al tiempo transcurrido desde la detección de la falla en su estado incipiente hasta la falla crítica.

Con la ayuda de estas curvas, operadores y mantenedores pueden definir qué grado de deterioro estaría permitido o sería aceptable, sin llegar nunca al punto F de falla crítica. Por lo que se busca encontrar un punto de deterioro aceptable o tolerable, donde se prevé restaurar las condiciones del equipo. El grado de deterioro se puede evaluar con el aumento de las vibraciones, de la temperatura, de soldadura de un componente, de contaminantes y partículas en un lubricante y sus combinaciones.

Con la puesta en uso de las aplicaciones móviles, los dispositivos y equipos de medición analizados durante el Benchmarking, este intervalo puede ser más sencillo de determinar. A su vez, como ya se mencionó, pueden ayudar a interpretar o dar aviso a los encargados de mantenimiento sobre una falla incipiente. Dicho de otro modo, detectar cuando se está llegando al nivel de deterioro no aceptable, aunque falte para la intervención.

Por lo tanto, se puede ayudar a determinar el intervalo P-F neto, que es el tiempo que puede transcurrir desde el momento de la inspección con alguna técnica de CBM, hasta la falla funcional. A priori nadie conoce una curva P-F, ya que la definición de un intervalo de inspección tal vez sea la decisión más compleja de tomar, pero con la experiencia de un experto y el conocimiento de los componentes en cuestión, se podría determinar una frecuencia inicial que podrá ser ajustada acorde a cómo evolucione el comportamiento del componente. Esto es lo que se conoce como “exploración de la edad”, y este es uno de los principales argumentos para el desarrollo del presente trabajo.

La [Norma ISO 14224 \(2016\)](#), establece que la clase de mantenimiento se divide en dos, mantenimiento correctivo y mantenimiento preventivo. Dentro del mantenimiento preventivo se encuentra el Mantenimiento Predictivo y el CMB, en el cual se basa el presente trabajo, que a su vez puede ser continuo o periódico. El continuo, se refiere a que el equipo debe ser seguido en tiempo real, esto es con señales continuas (por ejemplo, dejar fijo un sensor que controle cierto parámetro). Son los casos de equipos Hipercríticos, o que dependiendo del contexto su criticidad es extrema o que el tiempo de desarrollo de una falla es muy estrecho. Otro caso es cuando no se puede detener el equipo de manera imprevista y es necesario seguirlo por tendencia. Sin embargo, se debe tener en cuenta, que hay componentes que pueden afectar a otros al fallar y llevar a una falla catastrófica. Por lo tanto, hay casos en donde se puede controlar un componente en particular y su parámetro y no todo el equipo. En la Figura 8 podemos observar las categorías de mantenimiento.

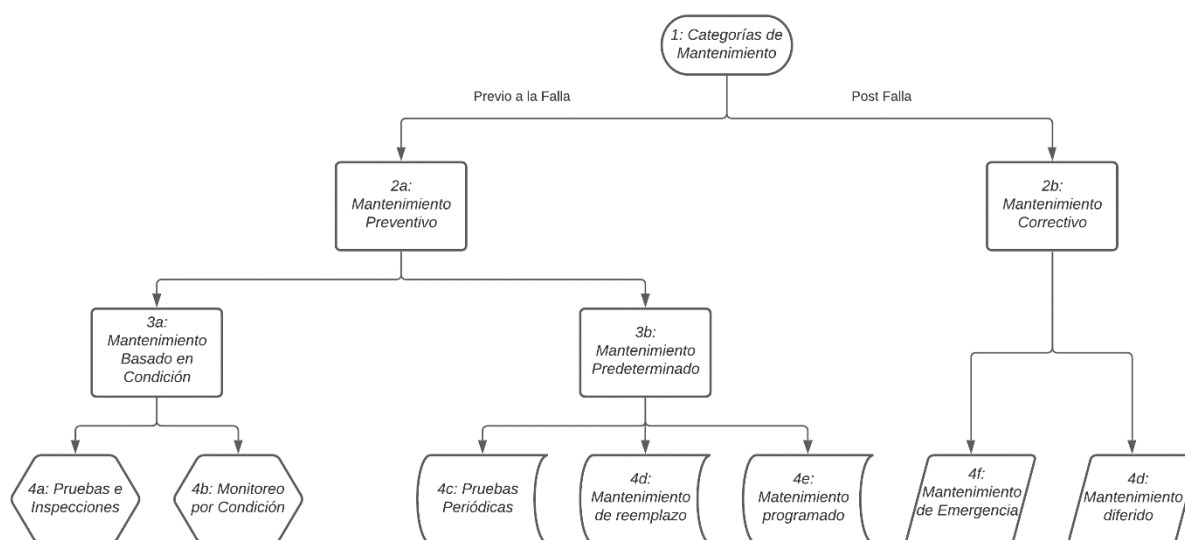


Figura 8 Categoría de Mantenimiento ([Norma ISO 14224, 2016, traducida](#))

Para el caso de monitoreo periódico, se pueden determinar tres niveles de profundidad y complejidad, para el desarrollo de una gestión de CBM.

1. Nivel Básico: hace referencia a mediciones e inspecciones que estén disponibles al operador y otras más específicas para el mantenedor, tales como vibraciones globales, termografía, de manera que el objetivo sea simplemente identificar un desvío, es decir ver tendencias. La superación de valores límites es otro criterio a utilizar, con la configuración de alarmas. Su implementación es sumamente sencilla y trae aparejada la ventaja de detectar un porcentaje de fallas que puede ser superior al 60%, de acuerdo a los datos proporcionados por [Heap y Nowlan \(1978\)](#). Para este nivel se necesitaría entrenar al personal en las técnicas y establecer objetivos. En cuanto al costo, se busca que sea bajo.
2. Nivel Especialista: bajo este criterio, se debe tener personal entrenado en técnicas que permitan avanzar sobre el desvío detectado, es decir, llegar a poder dar conclusiones e información, diagnosticar. Este personal puede ser especialista en vibraciones, analista de lubricantes, personal certificado en general. La diferencia entre este nivel y el anterior se puede visualizar en la Figura 9. El especialista podrá ver el desarrollo de una falla incipiente, antes que puede ser advertido por el operador o mantenedores, o antes de que pueda ser identificada con técnicas básicas del nivel básico 1, anteriormente mencionadas. Hay que tener en cuenta que no es necesario que todos los equipos tengan este tipo de diagnóstico.

3. Nivel experto: incluye los casos exhaustivos donde es necesario un conocimiento particular. En general se refiere a equipos de altos costos que no son detenidos antes de un año y que el descubrimiento de fallas, en sus etapas incipientes, depende de una amplia experiencia y especialización. Sin embargo, muchas veces el costo de equipo de monitoreo, específico según el parámetro a detectar, no justifica desarrollarlo en una operación con un experto propio, sino que es mejor contratarlo.

En la Figura 9, podemos visualizar los 3 niveles de zonas de detección.

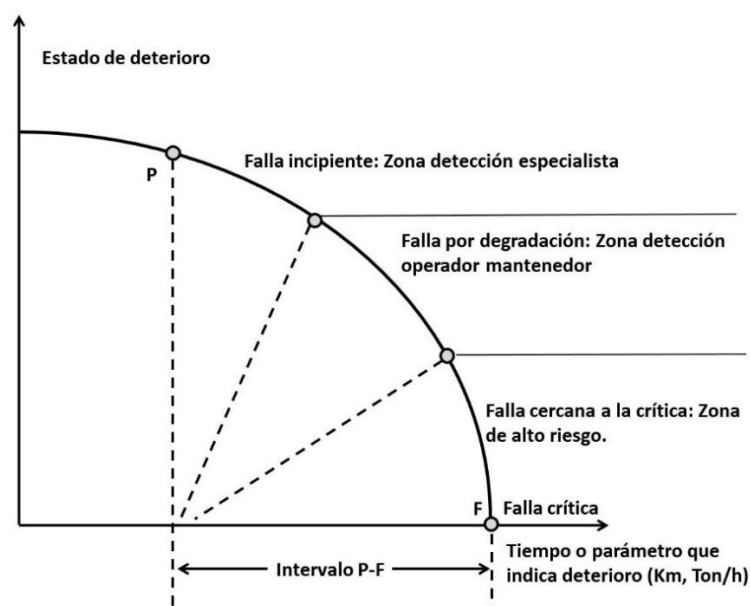


Figura 9: Curva P-F, zona de detección (Troffé, 2017)

Para finalizar, con lo explicado en los párrafos precedentes se buscó fundamentar las causas, motivos, los periodos de inspección, los posibles costos que conlleva no controlar adecuadamente las máquinas y los “por qué” de este trabajo. Buscando no simplemente tecnologías nuevas, aplicaciones móviles o controles a distancia, sino en poder dar herramientas, en especial al operador, que lo ayuden a llevar un mejor control e identificar desvíos para informar a mantenimiento. Además, que el mantenedor pueda decidir según la máquina, el alcance que se desea determinar, el nivel de seguimiento requerido para la misma, que tipo de dispositivo sería de utilidad, tanto para él por la información que obtendría, como para el operador de la máquina.

5 DESARROLLO

5.1 Metodología

El presente trabajo comienza con la búsqueda e investigación de nuevas tecnologías que se puedan aplicar a las 3 técnicas de mantenimiento establecidas (análisis de vibración, termografía, análisis de lubricación). Todo proyecto tiene como objetivo principal obtener resultados con cierto nivel de calidad deseada, un plazo establecido y con costos mínimos. Es por esto que se analizará distintas opciones para cada una de las técnicas. Con esto presente, los pasos a seguir durante el desarrollo serán:

1. Investigar sobre nuevas aplicaciones, tecnologías para las tres técnicas especificadas. Explicando brevemente cómo funcionan.
2. Identificar los valores de las mediciones, con las nuevas tecnologías. Es decir, su rango de aceptación, por ejemplo, ancho de banda, temperaturas, etc. Ya sea estos valores, de aplicaciones con móviles-Tablet o bien con dispositivos específicos.
3. Teniendo en cuenta la situación sanitaria en la que nos encontramos, llevar a cabo las mediciones con las distintas técnicas y equipos de medición disponible.
4. Armar tablas, gráficos, que sirvan para sacar conclusiones tangibles sobre la investigación y las mediciones realizadas.
5. Deducir, si gracias a la aplicación de estas nuevas tecnologías, el operario puede o no detectar de manera temprana y efectiva una posible falla, antes de detectarlo con los sentidos o que produzca interferencia con producción.
6. Argumentar si el costo que podría llevar emplear estas aplicaciones es conveniente.
7. Valorar de dichas tecnologías si efectivamente ayuda a las pymes a mejorar los tiempos de parada de mantenimiento, disminución de riesgos y aumento de la confiabilidad de los equipos, con la consecuente mejora de los costos.
8. Informar sobre la situación final de los resultados.

5.2 Investigación y resultados de tecnologías

5.2.1 Análisis de Vibración

Se comienza analizando los dispositivos móviles y Tablet. Estos dispositivos tienen en su interior un acelerómetro, que es un componente electromecánico el cual sirve para que el dispositivo sepa en que orientación está. El acelerómetro del móvil consta de una parte móvil que se mueve dependiendo de la aceleración que le apliques, y de otra fija que interpreta el

voltaje resultante de este movimiento para determinar la velocidad a la que lo hace y su orientación. En los móviles suelen estar compuestos de tres ejes para medir el movimiento en un espacio tridimensional.

Entonces, es posible con estos dispositivos medir niveles de vibración. Pero con el solo hecho de analizar situaciones, es probable que haya casos en donde medir con un móvil sea imposible por la vibración de la máquina, ya que si los niveles son altos es probable dañar el dispositivo.

En primer lugar, se investigan aplicaciones para dispositivos móviles y Tablet. Entre las aplicaciones se encontraron las siguientes: Vibration Isolator Pro, My frequency Free, Resonance. Durante la investigación se encontraron aplicaciones que a través de bluetooth enlazan el móvil o tablets a sensores, donde en algunos casos estos tienen la posibilidad de tomar temperatura. Esto dio pie a una posterior investigación sobre este tipo de sensores.

En el [Anexo I](#), en la sección de Vibración, se encuentra disponible toda la información obtenida de la investigación.

A continuación, se presentan tablas y gráficos. Donde se pueden analizar ventajas y desventajas de los diferentes equipos. Con el fin de observar si existe o no alguna tendencia entre los diferentes parámetros que ofrecen los equipos, se realizaron gráficos de dispersión Figura 86 y una matriz de correlación Figura 87 que se encuentran en el [Anexo III](#).

Los parámetros que se tuvieron en cuenta son:

- Anchos de banda en los 3 ejes [kHz].
- Rango dinámico [G].
- Distancia máxima a la que se puede estar del dispositivo con el que medimos [m].
- Frecuencia de muestreo, con 6 segundos de toma de datos [Hz].
- Frecuencia máxima, con 6 segundos de toma de datos [Hz].
- Ruido espectral [$\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$].
- Temperaturas mínima y máxima de operación.
- Precio [USD].

La Figura 86, muestra la nube de puntos de los datos junto a su respectiva regresión lineal y el área del intervalo de confianza al 95 %, esto quiere decir que hay un 95 % de probabilidades que los puntos caigan dentro de éste área.

Se extrajeron gráficos de la Figura 86 que se presentan en las Figura 10 y Figura 11:

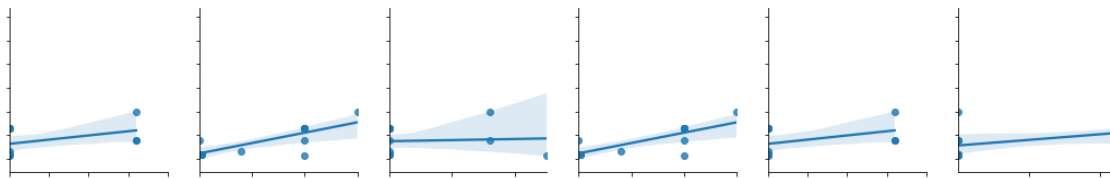


Figura 10: Gráficos de dispersión (Rango dinámico vs otros parámetros)

En la Figura 10, tenemos en el eje de las coordenadas el rango dinámico y en el de las abscisas los anchos de banda en los distintos ejes. De izquierda a derecha tenemos los valores mínimos y máximos en Hz en los ejes X, Y y Z. Podemos observar que a medida que aumentamos el rango dinámico del dispositivo con el que medimos, mayor será la frecuencia que podemos medir.

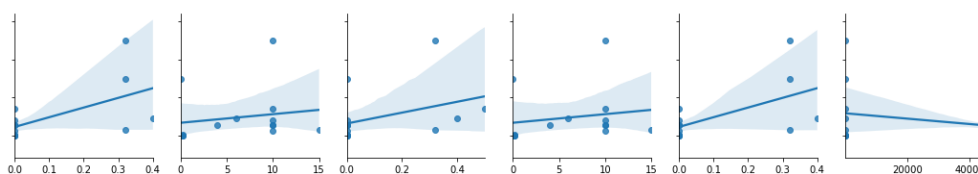


Figura 11: Gráficos de dispersión (precio vs ancho de bandas)

En la Figura 11, tenemos en el eje de las coordenadas el precio de los dispositivos o equipos en el de las abscisas los anchos de banda en los distintos ejes. De izquierda a derecha tenemos los valores mínimos y máximos en Hz en los ejes X, Y y Z. Se pueden concluir que a medida que aumentamos los anchos de banda de los dispositivos su precio aumenta.

En la Figura 87 se muestran los valores del coeficiente de correlación de las regresiones en forma de matriz.

Al correlacionar los parámetros se observa una baja dependencia entre ellos, con lo cual se concluye que no es posible establecer relaciones directas entre la mayoría de ellos. Sin embargo, se puede hacer mención que la frecuencia de muestreo y el rango dinámico están correlacionados.

En la Figura 12, podemos observar de 15 equipos estudiados en el Benchmarking que cantidad de ellos tiene características que ayudarían al operador a detectar fallas incipientes y, a su vez, sean de uso sencillo. Podemos observar que todos los equipos miden aceleración, más de la mitad de los mismos (nueve) se puede conectar vía bluetooth a algún dispositivo para observar los datos, en algunos casos de forma permanente en otras a la hora de tomar mediciones. Once de los equipos de medición tiene la posibilidad de medir en los tres ejes. Dato no menor es que poco más de la mitad (ocho) tienen una alarma programable, es decir, el

operador puede colocar el sensor colocar un valor de alarma, seguir con sus otras actividades y dejar el sensor controlando.



Figura 12: Características de los Equipos de Vibración

En la Figura 13 podemos observar los anchos de banda para los distintos dispositivos de medición estudiados, en el eje de las abscisas tenemos kHz. Sensores recomendados para la medición son aquellos que miden en un rango de 200 Hz a 10000 Hz. Podemos observar que ninguna de las aplicaciones móviles mide en este rango, pero todos los otros dispositivos con solo observar las líneas del valor máximo están 6 kHz o por encima de este valor.

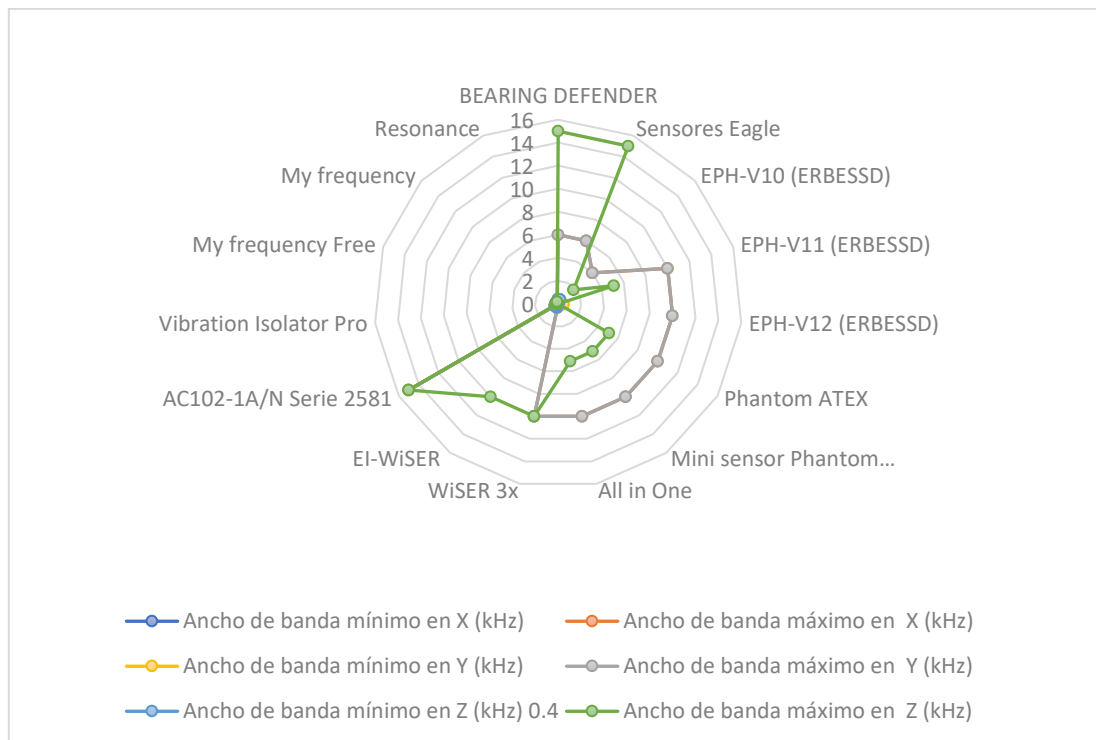


Figura 13: Ancho de banda de los Equipos de Vibración

Con la información obtenida, si se tiene que optar por un sensor en particular, el EPH-11 tiene características que lo harían ideal para ayudar al operador a detectar una falla incipiente de manera temprana. Ya que, mide aceleración en los 3 ejes, tiene alarma programable, se puede enlazar por varios métodos, se lo puede dejar en la máquina de modo constante, pudiendo realizar de este modo mantenimiento basado en condición continuo.

Al analizar los distintos tipos de adquisidores de datos, hay que tener en cuenta que se busca. El DSP Logger MX 300 es sin lugar a dudas el más práctico y cómodo para llevar a cabo mediciones, ya que es portátil y se puede observar en su pantalla los espectros obtenidos de la medición, dando la posibilidad de poder tomar una decisión en ese mismo momento. Claro que el precio es el más elevado de todos por la cantidad de funciones que este ofrece. Sin embargo, por los resultados obtenidos que se presentaran en la siguiente sección, la placa (DAQ) USB-1608FS es la mejor opción para las Pymes, y para que operadores aumentan la posibilidad de detectar una falla incipiente si los sensores ya quedan colocados en puntos establecidos y el operador puede ver el espectro de las mediciones.

Esto se puede asegurar, porque los espectros obtenidos con este adquisidor son cuantitativamente similares a los espectros que se obtienen con el adquisidor DSP Logger. El poder tener estos espectros le permite al operador, por ejemplo, el detectar por tendencia si hay algún cambio en los picos de los espectros y en cuyo caso si desconoce su interpretación avisar.

Mediciones de vibración

Debido a la situación sanitaria, las mediciones se llevaron a cabo en una única oportunidad. Las mediciones se realizaron a cabo en una empresa zonal. Se tomaron mediciones sobre un Moto-generador. Durante las mediciones se utilizaron distintos adquisidores de datos y un único acelerómetro. Las mediciones fueron almacenadas y guardadas para un posterior análisis.

Las características del equipo sobre las que se realizaron las mediciones son:

- Moto-generador:
 - Marca: Commins.
 - Modelo: C120D5.
 - N° de serie: B13T026263.
 - Peso seco: 1771 [kg].

Al momento de realizarse las mediciones se tomaron las siguientes condiciones de operación:

- Velocidad: 1500 rpm [50 Hz].
- Carga: 100 [kW].

Como se mencionó, se utilizaron cuatro tipos de equipo para las mediciones. Con un mismo acelerómetro se utilizaron 3 módulos de adquisición de datos, QuantumX MX1615B, DSP Logger MX 300 y la placa (DAQ) USB-1608FS. A su vez se utilizaron las aplicaciones del celular Vibration Isolator Pro y Resonance. Las características a destacar del acelerómetro utilizado son: acelerómetro multipropósito AC102-1A/N° Serie 2581. Tiene un costo de 140 USD. Rango dinámico: ± 50 G, PEAK.

Se siguió el procedimiento establecido por la [Norma ISO 8528-9 \(2017\)](#), para la medición de los puntos definidos por la norma y así evaluar el comportamiento de las vibraciones mecánicas externas. En el procedimiento no solo se indica los puntos en donde medir, sino además que se debe tener en cuenta el montaje del equipo. Gracias a las características del acelerómetro, se pudo medir en todos los puntos establecidos por la norma, mientras que con el Móvil solo fue posible en los puntos 3, 5y, 5z y 7. En las Figuras 14, 15 y 16 se pueden visualizar los puntos establecidos por la Norma y los puntos donde se midió en el equipo.

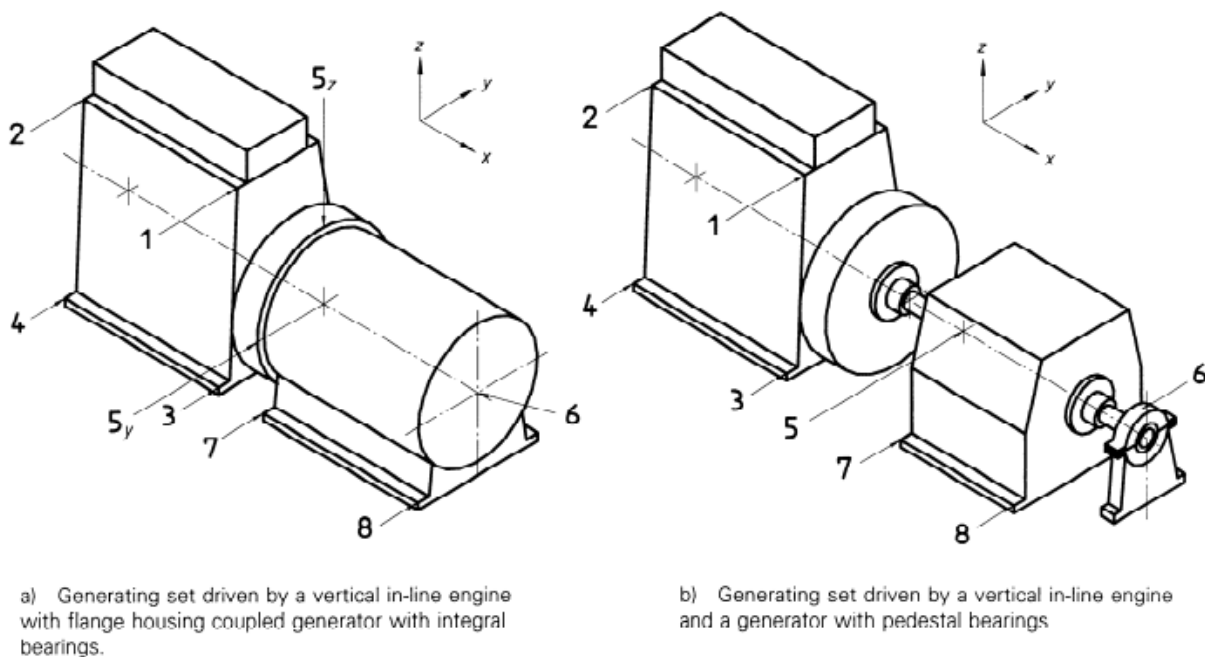


Figura 14: Puntos establecidos por la Norma ISO 8528-9



Figura 15: Puntos donde se llevaron las mediciones



Figura 16: Puntos donde se llevaron las mediciones

Como se aclaró al momento de presentar las aplicaciones móviles, las mediciones que se pueden llevar a cabo son a bajas frecuencias y nos dan en este rango de frecuencias los valores de la amplitud en aceleración. A modo de ejemplo se observa la Figura 17.

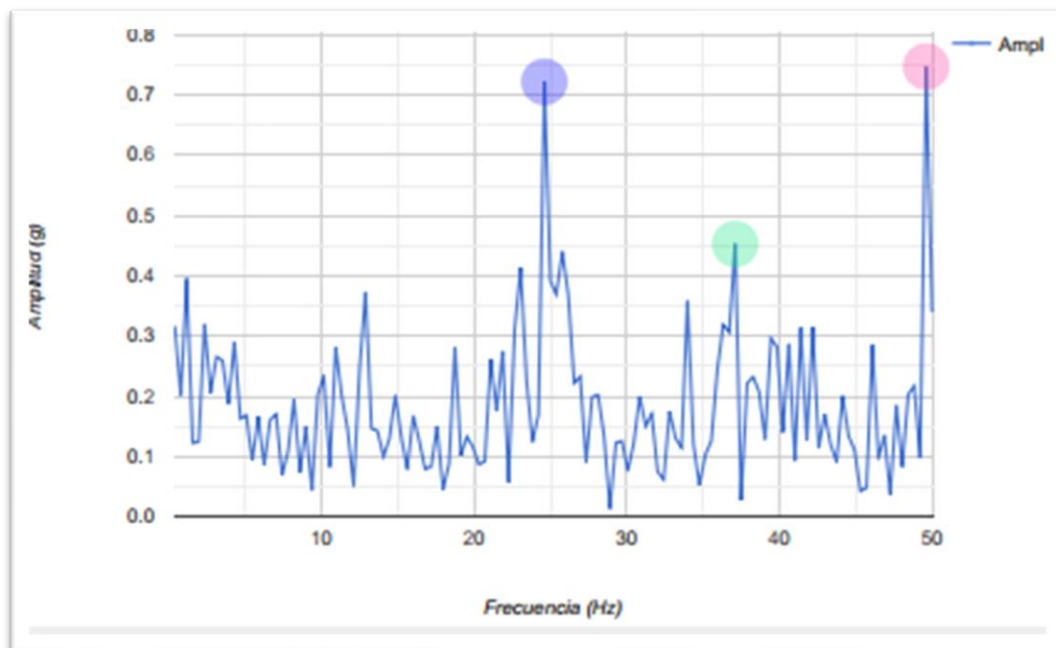


Figura 17: Resultado de las mediciones obtenidas con la aplicación Vibration Isolator Pro

Lo único que se pudo concluir de las mediciones obtenidas con las aplicaciones móviles es que para este tipo de equipos no proporcionan ninguna solución para la detección temprana de una falla incipiente. ¿Por qué podemos decir esto? pues porque ni cuantitativamente los valores coinciden con los obtenidos con los adquirentes de datos, ni cualitativamente ya que al poder observar solo hasta 50 Hz de frecuencia no podemos observar gran parte del espectro con el cual al menos se podría obtener alguna conclusión. Otro aspecto importante a tener en cuenta es que no es aplicable en todos los puntos que indica la norma. Sin embargo, los sensores que se pueden enlazar por bluetooth serían una buena solución para este problema.

En cuanto a las mediciones obtenidas con los adquirentes de datos y la placa DAQ, se trabajó con dos programas o software diferentes para su posterior análisis.

Las mediciones obtenidas con la placa adquirenta de datos son gráficos donde tenemos frecuencia vs tensión como podemos observarlas en la Figura 18, mientras que las obtenidas con QuantumX MX1615B tenemos frecuencias vs gravedad (o energía disipada) como podemos observarlas en la Figura 19.

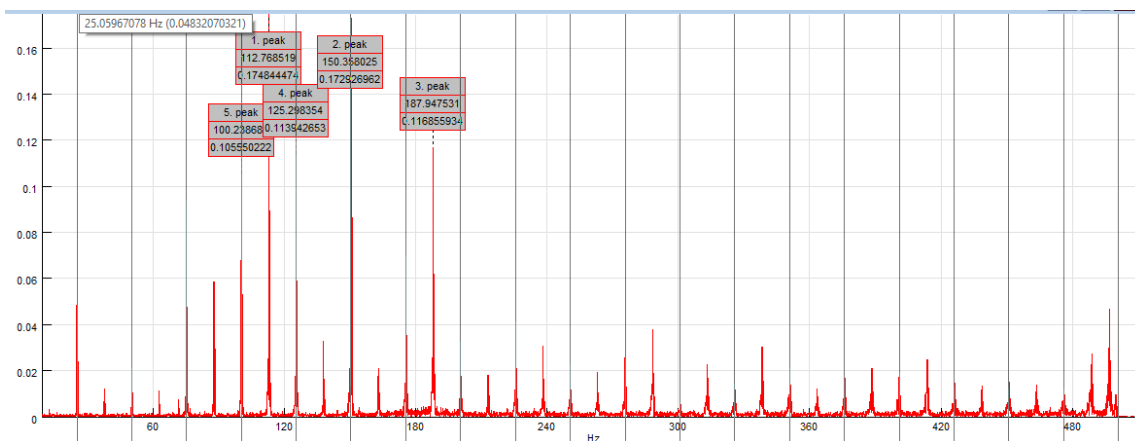


Figura 18: Resultado de las mediciones obtenidos en el punto 5z con la placa (Sigview)

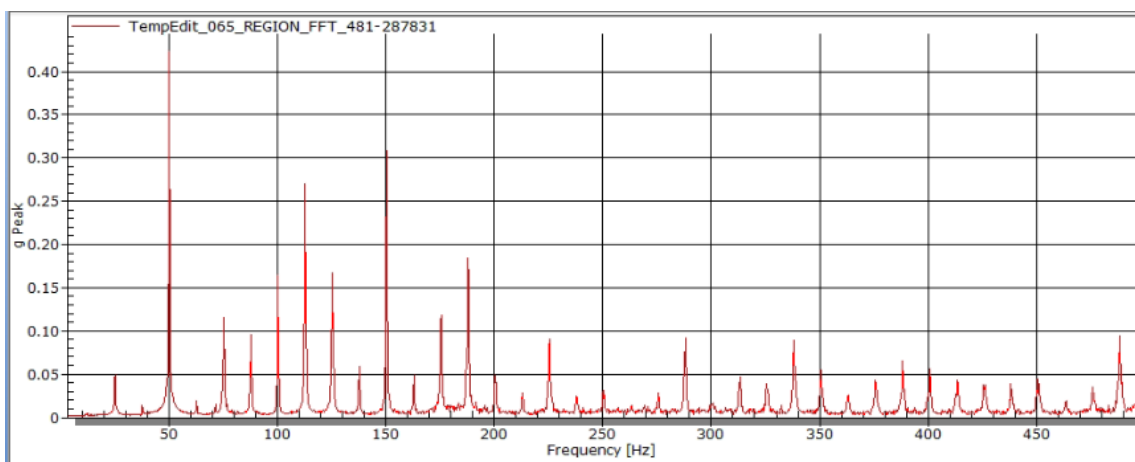


Figura 19: Resultado de las mediciones obtenidos en el punto 5z con el adquisidor MX 1615 B (Catman)

El gráfico obtenido de los datos de la placa se analizó con el software Sigview, el cual a su vez nos permite identificar las frecuencias 1X, 2X, etc. Mientras que el gráfico obtenidos del adquisidor se analizó con el software Catman.

De los 11 puntos medidos con el mismo acelerómetro, se tomó datos para analizar con los distintos programas, con lo cuales se pudo concluir lo siguiente:

- Similitud entre los gráficos analizados en los distintos softwares.
- Los armónicos se diferencian en no más de 5 Hz entre ellos.
- Posibilidad de intuir una falla incipiente si se conoce sobre análisis de vibraciones. Es decir, a través del espectro se puede inferir si se tiene un problema de balanceo, eje curvo, rodamiento atravesado, etc.

Análisis de los resultados y conclusiones

Las aplicaciones que se pueden descargar e instalar en los dispositivos móviles o tablets, en su mayoría no sirven para detectar niveles de vibración, o no ayudarían al operador a detectar

de manera anticipada una falla, ya que trabajan a muy baja frecuencia y difícilmente puedan aportar mediciones que a través de tendencias se pueda interpretar algún cambio en el equipo. Sin embargo, aplicaciones que sirven para enlazar el dispositivo con algún sensor (ya sea por cable, bluetooth, Wi-Fi) serían de gran provecho tanto para los operadores como para los mantenedores.

A continuación, se detallan los pasos a seguir para llevar a cabo las mediciones, ya sean estas llevadas a cabo con sensores inalámbricos o no, tomando como referencia lo realizado durante las mediciones de campo.

- 1) Analizar si para el equipo que se irá a medir se tiene alguna norma de referencia para llevar a cabo las mediciones.
- 2) Al llegar al establecimiento, verificar si es posible colocar el acelerómetro en los puntos especificados según norma de referencia.
- 3) Armar el equipo de adquisición de datos, con la computadora portátil para guardar las mediciones realizadas.
- 4) Llevar a cabo las mediciones en los puntos establecidos, guardando la información. Si se tienen disponibles sensores inalámbricos, que pueden enlazarse a los móviles y enviar información a estos el siguiente paso se omite ya que las aplicaciones levantan los gráficos. Además, estos últimos sensores se pueden programar con un valor predeterminado que en caso de que se detecte dar alarma.
- 5) Una vez realizado las mediciones, utilizar el programa para poder analizar los datos obtenidos. Con este software podremos levantar los espectros de las mediciones.
- 6) Teniendo los espectros, el operador puede analizarlos por tendencia y verificar si observa algún cambio, ya sea en las frecuencias o en la amplitud e informar. O bien, enviar directamente a un especialista el espectro para que lo analice.

En caso de que se necesite controlar un equipo en particular, se puede dejar armado el equipo de adquisidor de datos y colocar periódicamente el sensor para obtener datos. Al operador le resultaría útil, porque puede visualizar sin grandes esfuerzos los niveles de vibración donde el sensor este aplicado. A su vez, el mantenedor, podrá tener un historial del momento en donde los niveles cambiaron su tendencia y en algunos casos simples diagnosticar.

En cuanto a los resultados obtenidos de las mediciones con los adquisidores de datos y analizados en los distintos programas (Sigview y Catman), se puede afirmar que los gráficos obtenidos con la placa sirven cualitativamente para un especialista en análisis de vibración ya que puede interpretar alguna falla incipiente en los espectros obtenidos y diagnosticar la causa.

Además, que el operador puede seguir los parámetros por tendencia. Por lo que el uso de placa en conjunto con un sensor, aumenta las posibilidades de que el operador pueda interpretar una falla incipiente de manera temprana, o bien, seguirla por tendencia.

Para cerrar, del Benchmarking realizado se obtuvo distintos tipos de sensores con diferentes características como: los anchos de banda, si es triaxial, biaxial o mono axial y otras características. Por lo que, al momento de elaborar un plan de mantenimiento, teniendo esta información presente, resultará sencillo seleccionar que dispositivos nos dará información sobre fallas incipientes.

5.2.2 Termografía y análisis de temperatura

Como ya se hizo mención, con esta técnica se busca poder localizar y observar variaciones de temperatura en las máquinas. Hay que tener en cuenta, que al igual que al medir las vibraciones, las mediciones de temperatura pueden ser locales o globales. Teniendo esto en cuenta es que se comenzó a investigar sobre tecnologías y aplicaciones que permitan al operador y mantenedor poder medir variaciones de temperatura, y a su vez que los ayuden a detectar una falla incipiente.

La búsqueda comenzó con simples preguntas como: ¿tiene que ser algo tecnológico únicamente? ¿Algo que dependa exclusivamente del uso de móviles o Tablet? ¿tiene que ser algún dispositivo o instrumento que solo personal clasificado pueda interpretar? Las respuestas a estas preguntas fueron no. Por ende, se investigaron otras aplicaciones y dispositivos además de las que se pondrían utilizar con elementos obvios como cámaras termográficas.

El Benchmarking realizado parte desde los dispositivos típicos para medir temperatura, los termómetros. Hay una gran variedad de estos, todos con sus pros y contras. La mayoría tienen características que para uno u otro ambiente pueden ser más útiles. La búsqueda continua con cámaras termográficas tanto portátiles, como incorporadas en móviles. Finalmente, se estudian sensores portátiles.

En el [Anexo I](#), en la sección de Termografía, se encuentra disponible toda la información obtenida del estudio de estas aplicaciones.

A continuación, se presentan tablas y gráficos. Donde se pueden analizar ventajas y desventajas de los diferentes equipos. Con el fin de observar si existe o no alguna tendencia entre los diferentes parámetros que ofrecen los equipos, se realizaron gráficos de dispersión Figura 88 y una matriz de correlación Figura 89 que se encuentran en el [Anexo III](#).

Los parámetros que se tuvieron en cuenta son:

- Temperaturas mínimas y máximas medibles [°C].
- Precisión [°C].
- Corrección de emisividad.
- Resolución Infrarroja IR [píxeles].
- Resolución de pantalla [píxeles].
- Distancia mínima de enfoque.
- Precio [USD].

La Figura 88, muestra la nube de puntos de los datos junto a su respectiva regresión lineal y el área del intervalo de confianza al 95 %, esto quiere decir que hay un 95 % de probabilidades que los puntos caigan dentro de éste área.

Se extrajeron gráficos de la Figura 88 que se presentan en la Figura 20 y Figura 21:

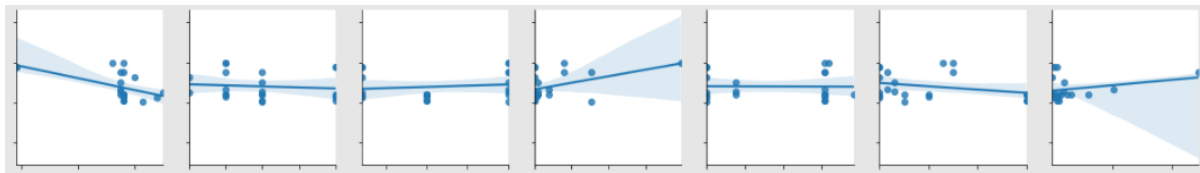


Figura 20: Gráficos de Dispersión Temperatura Máxima vs otros Parámetros

En la figura tenemos en el eje de las coordenadas la temperatura máxima o y en el de las abscisas de izquierda a derecha tenemos las variables temperatura mínima, precisión, corrección de emisividad, Resolución IR, Resolución de Pantalla, Distancia mínima de enfoque y el precio. Podemos observar que a medida que la temperatura mínima aumenta, la máxima tiende a disminuir. También que a medida que aumentamos el rango de la temperatura máxima el precio de los equipos aumenta.

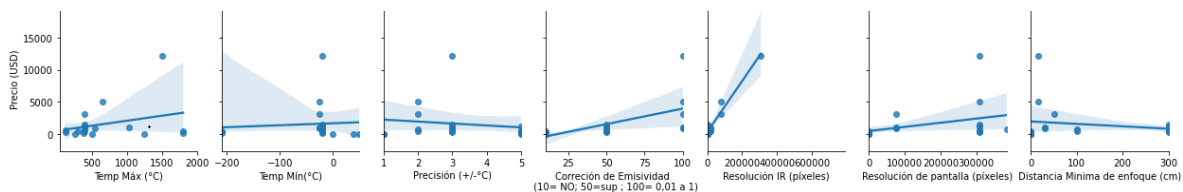


Figura 21: Gráficos de Dispersión Precio vs otros Parámetros

En la Figura 21 podemos observar como el precio tiende a aumentar siempre que las características del equipo aumentan, lo cual es totalmente lógico.

En la Figura 89 se muestran los valores del coeficiente de correlación de las regresiones en forma de matriz. Al correlacionar los parámetros se observa una baja dependencia entre ellos, con lo cual se concluye que no es posible establecer relaciones directas entre ellos.

En la Figura 22 podemos observar características de los equipos estudiados. Son pocos los que tienen una alarma programable y son solo los sensores, en donde la alarma se programa en el adquisidor de datos y al superar un valor alerta. Solo algunos equipos no necesitan estar conectados por cable para su correcto funcionamiento, esto sin lugar a dudas es una gran ventaja. Además, la gran mayoría puede enlazarse por bluetooth o Wi-Fi, no solo los sensores sino también las cámaras, es decir que podemos no solo enlazarlos, sino que también descargar la información por este medio.

Algo vital a la hora de decir que cámara termográfica puede ayudar a un operador a detectar una falla incipiente son las resoluciones tanto la infrarroja como la de las pantallas del equipo. Si la pantalla del equipo es de baja calidad, es decir es bajo el nivel de pixeles, al operador le costará distinguir en la pantalla cual es el punto caliente en concreto, visualizara más sectores calientes que puntos. Esto puede ser útil para detectar sectores calientes en ciertos equipos, pero no será de gran utilidad para distinguir que componente es el que elevó su temperatura. La resolución infrarroja básicamente nos indica en la pantalla del equipo con mayor claridad la distinción de cambios de temperatura del objeto que el operador está observando. Teniendo esto en cuenta menos de la mitad de los equipos tiene una resolución infrarroja con la cual el operador podría distinguir con mayor claridad el elemento de temperatura elevada.

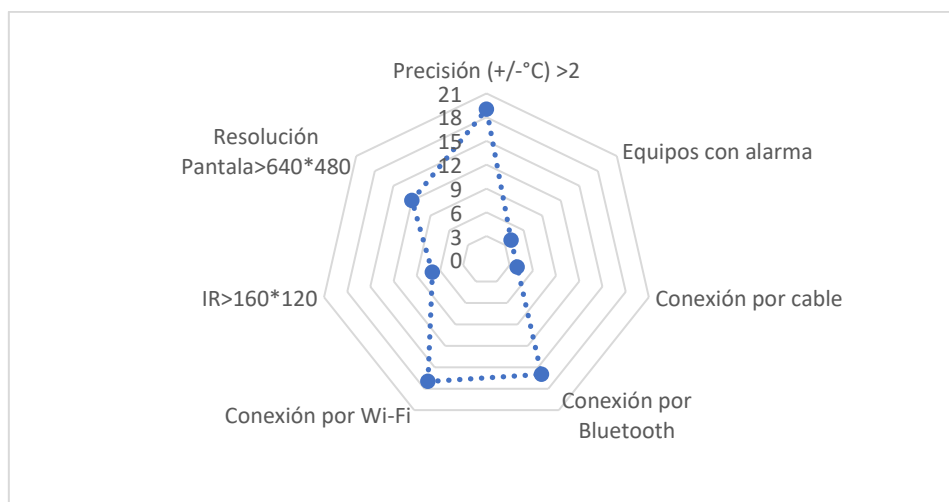


Figura 22: Características de los Equipos Termográficos

En la Figura 23 podemos observar los rangos de temperatura de cada equipo de medición. Teniendo en cuenta los rangos de temperatura y los costos, uno podría optar por utilizar directamente sensores de temperatura como el EPH-T21 o el All in One. El problema que tienen estos, es que la temperatura que detectan es puntal de la zona donde se instaló (radio 5 mm aproximadamente).

Sin embargo, las cámaras termográficas T840 y T1020 trabajan con un rango similar de temperatura, pero abarcando la máquina completa o un amplio sector de la misma, identifican gradientes de variación temperatura y en una sola visualización permite identificar el componente con mayor o menor temperatura. Acá es donde las cámaras termográficas serán de mayor utilidad. Acá se debe tener en cuenta la Resolución Infrarroja de las mismas para definir qué cámara se adapta mejor a las necesidades.

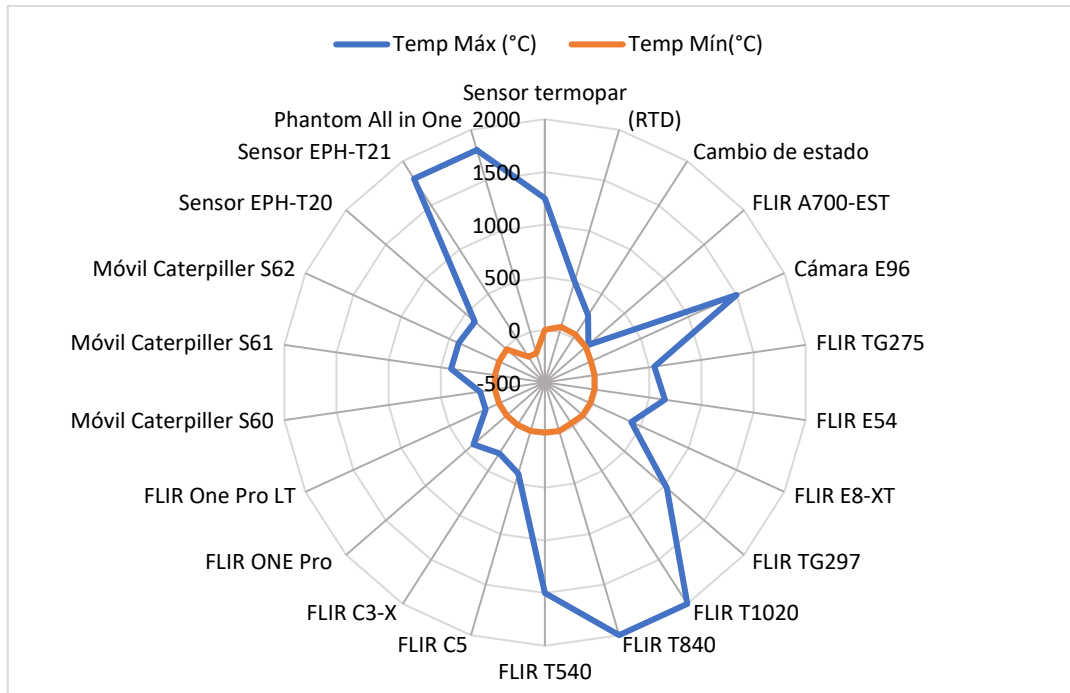


Figura 23: Rango de Temperaturas de los Equipos Termográficos

Resultados de Análisis de termografía y temperatura

Se puede empezar a descartar ciertos dispositivos que no serían de mucha utilidad, tanto para detectar cambios de temperatura, como para que el operador o mantenedor puedan obtener información que les resulte oportuno para la toma de decisiones.

Por ejemplo, los instrumentos o sensores de cambios de temperatura (entre ellos etiqueta) que tienen rangos de temperatura muy bajos y no tendrían muchas opciones de uso. Las cámaras de montaje fijo tienen aún menor rango de temperaturas que las etiquetas por lo que no tendrían mucha aplicación en la industria. Las cámaras de los Móviles Caterpillar, o las cámaras Go-Pro de Flir, tienen el inconveniente que la resolución Infrarroja que ofrecen es muy baja. Esto evitaría que se pueda interpretar de manera adecuada en qué puntos la temperatura comienza a variar. La resolución Infrarroja mínima que se buscaría para poder distinguir correctamente puntos calientes sería 160×120 píxeles.

Los sensores fijos de temperatura que se pueden enlazar a dispositivos móviles y configurar alarmas, tienen distintos rangos de temperatura, por lo que da un abanico de opciones según la temperatura que la empresa maneje.

Si la empresa desea controlar temperaturas en equipos en donde solo se busca detectar un punto caliente, como en tableros eléctricos, no necesitará una cámara de alta gama, ya que en estos el componente que levanta temperatura es uno solo. Caso contrario, si desean controlar equipos vitales para el funcionamiento de la empresa y que trabaja altas temperaturas, deberán optar por una que pueda satisfacer estas necesidades.

5.2.3 Análisis de Lubricación

Como se hizo mención, con esta técnica se busca poder comprobar el estado de las máquinas en cuanto al desgaste interno de la misma o de los componentes internos. En especial los elementos que necesitan de una capa de lubricante entre ellos para que las superficies no entren en contacto, como por ejemplo los cojinetes y rodamientos.

Con estos análisis o estudios el operador y mantenedor pueden indagar sobre el estado del lubricante utilizado en el equipo y en parte de los componentes del mismo, ahorrar costos en lubricantes (ya sea para no cambiarlo antes de tiempo, o evitar e identificar deterioro y desgaste prematuro en los equipos). Cabe aclarar, que la toma de decisión sobre qué equipos se realizará el análisis, cuáles serán los puntos de muestreo, que tipo de pruebas efectuar, estándares, métodos, y frecuencia con que se lleven los análisis quedará en manos del mantenedor de la instalación. Sin embargo, se puede tomar como referencia en cuanto a frecuencias y puntos medición los detallados en la [Norma ISO TEC 108 SC 5 WG4 \(1993\)](#).

Se investigará en la presente sección, si con las tecnologías disponibles no sólo se puede aumentar la posibilidad de detectar una falla con mayor anticipación, sino también, poder ofrecer al operador una idea sobre qué tipo de desgaste está teniendo el equipo, ya sea este abrasivo, contaminación, adhesivo, por fatiga o bien por corrosión. Además, que el operador pueda interpretar si la degradación del lubricante ha superado un valor determinado, que indicaría si se debe renovar el lubricante del equipo.

Lo primero a tener en cuenta, es que muchos de los análisis que se llevan a cabo hoy en día, la prueba o toma de la muestra, se efectúan en el campo, pero el análisis cuantitativo se lleva a cabo en un laboratorio. Esto demanda no solo tiempo, sino también costos económicos. Es por eso que actualmente existen “laboratorios portátiles” para análisis de lubricantes que

permiten disponer de análisis rápido sobre el lubricante en el campo o en la industria y a su vez reducir costos.

Con estos laboratorios portátiles o talleres para análisis rápido de muestras, se miden algunos de los siguientes parámetros:

- Constante dieléctrica: sirve para evaluar el deterioro del lubricante y su contaminación.
- Contenido en agua: se utiliza para evaluar su contaminación, que puede darse a causa de refrigerantes o condensación de la misma.
- Índice de desgaste férrico: sirve para localizar desgastes de piezas de la máquina tales como engranajes, rodamientos y cojinetes.
- Indicador de partículas no férricas: se utiliza para verificar si existen contaminantes entrantes.
- Viscosidad, para comprobar la efectividad del lubricante y estudiar su degradación química o entrada de contaminantes líquidos.

En el [Anexo I](#), en la sección de Lubricación, se encuentra disponible toda la información obtenida del estudio relacionado a esta técnica.

Resultados obtenidos para lubricación y conclusiones

Con las técnicas mencionadas, se puede concluir que los análisis de lubricación son en su gran mayoría complejos y de poca utilidad para que un operador pueda detectar una falla incipiente. Ya que estas técnicas requieren de análisis o equipos de estudios que suelen estar en laboratorios y de especialistas que interpreten los resultados.

Cabe mencionar que hay una basta variedad de análisis y en el presente trabajo solo se mencionaron algunos de ellos. Tampoco hay que olvidar que, aunque no se haya mencionado entre los análisis el operador siempre puede tener un manual o una tabla con colores que identifiquen cierto nivel de deterioro del lubricante. Permitiendo que el operador pueda interpretar algún inconveniente en la máquina o bien tener establecido que al tener el lubricante cierto aspecto debe reemplazar el mismo o informar a un especialista.

Esta técnica, la de comparación visual, es recomendable para las Pyme por su bajo costo y practicidad acorde a las limitaciones de no tener valores cuantitativos como se describió en los análisis, sin embargo, también es aplicable en industrias de alta complejidad. Un intermedio entre la técnica de comparación visual y el análisis cuantitativo completo realizado en laboratorios son los laboratorios portátiles, que si bien son equipos de alto costo para una Pyme

son de simple uso tanto para el operador como mantenedor ya que compara valores límites preestablecidos. La Figura 24 es un ejemplo de comparación visual de muestras tomadas con laboratorio portátil.

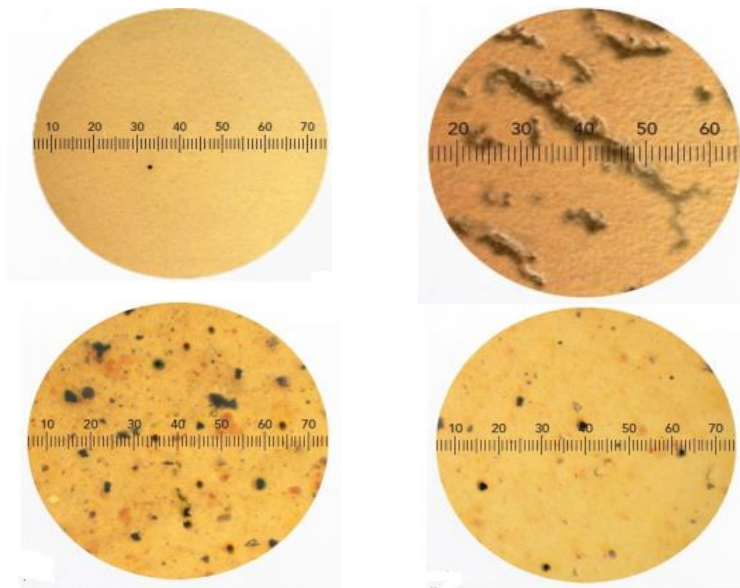


Figura 24: Ejemplo de comparación Visual (Pall, 2007)

6 CONCLUSIONES

Durante el desarrollo del presente trabajo se investigó sobre el uso de aplicaciones móviles, instrumentos, dispositivos y sus posibles beneficios en cuanto a diversas mejoras en la interpretación de fallas y costos asociados. Para ello se desarrolló distintas opciones para tres técnicas de mantenimiento.

Se determinó un alcance para cada uno de las tecnologías involucradas durante la investigación: en cada una de las secciones se pudo especificar un límite en función del equipo que se utilice. Ya sea el ancho de banda en vibraciones, las temperaturas y índice de Infrarrojo en cámaras termográficas y tamaño de partículas en el análisis de lubricantes.

Analizando la técnica de vibración, se pudo especificar el alcance para las distintas opciones presentadas para esta técnica. Por ejemplo, el uso directo de un dispositivo móvil o Tablet, no tiene beneficio alguno a la hora de medir vibraciones, ya que los niveles que pueden interpretar y el ancho de banda no son aceptables para máquinas cuya potencia ronda los 100 HP. Esto es debido a que las aplicaciones en los móviles manejan un bajo rango dinámico y el espectro no supera los 100 Hz. Sin embargo, no hay que descartar la opción de sincronizar estos dispositivos móviles con sensores a través de conexión Wi-Fi o bluetooth, donde a través de una aplicación compatibles con estos sensores se puede visualizar mejor los parámetros, como ser el ancho de banda.

Gracias a las mediciones llevadas a cabo durante el desarrollo del presente trabajo, se pudo verificar que más allá que los valores en los armónicos de los espectros no son iguales (haciendo referencia a la amplitud), los espectros tienen una similitud, con lo cual un especialista en vibración al observar estos espectros podría interpretarlos. Si se utiliza el criterio de seguimiento por tendencia de los picos, hace que la herramienta sea eficiente. El resultado de las mediciones se puede ver en el [Anexo II](#).

Hay una gran diversidad de tecnologías disponibles en el mercado que pueden ayudar al operador a detectar una falla incipiente, o bien medir un valor y enviarla a un especialista inmediatamente para que éste la analice. Si conviene o no el uso de estas tecnologías depende enormemente de qué busca la Pyme a la hora de armar sus planes de mantenimiento ya que debe analizar el costo-beneficio de su uso. La gran mayoría son de uso simple, con lo cual no debería generar un gasto extra en entrenamiento al personal. Claramente el uso de estas tecnologías permitirá al operador detectar una falla incipiente, dar aviso y así poder analizar la mejor alternativa para solucionar el problema.

Con todo esto dicho, los objetivos del presente Proyecto quedan alcanzados en lo que respecta a la técnica de vibración. Ya que se investigó y analizó distintas alternativas, se definió el alcance de las mismas, se puede observar los frutos de utilizarlas, se eleva el nivel técnico del personal y se le da a las Pyme opciones sobre las cuales decidir si le es o no conveniente el uso de estas, haciendo referencia a los resultados obtenidos de las mediciones.

Sin embargo, debido a la situación sanitaria no se pueden llevar a cabo mediciones que involucren las técnicas de termografía y lubricación ni ampliar a otras clases de equipos rotantes la técnica de vibración. Por lo que se dejan abiertas estas técnicas para que un futuro se pueda continuar con la investigación y el desarrollo de las mismas.

Desde mi punto de vista, el uso de estas tecnologías sin lugar a duda traerá grandes beneficios en un futuro inmediato, ya que dará más oportunidad al operador de detectar de manera tempranas las fallas incipientes. Ayudará no solo al mantenimiento sino también a personal de diseño, ya que se podrá obtener un mejor conocimiento a la hora de desarrollar las curvas P-F, es decir, mejorar la exploración de la edad de los equipos o elementos.

7 ANEXOS

Anexo I Benchmarking

1. Vibración

Vibration Isolator Pro

Es una aplicación de AMC Mecanocaucho. Fabrica desde 1969 soportes anti vibratorios, soportes de caucho y componentes de ingeniería de caucho-metal adherido.

Entre las especificaciones de la aplicación se puede leer el siguiente mensaje, *“para la medición, la aplicación móvil utiliza un hardware y software que no es equivalente en calidad a la tecnología de análisis y medición profesional”*.

A su vez nos da la posibilidad de medir con el sensor interno del dispositivo cuyo rango de frecuencia es de 0-50 Hz. O bien medir con un sensor externo cuyo rango de frecuencia varia de 0-500 Hz. Al utilizar el sensor interno del celular, nos da 3 posiciones para colocarlo antes de medir. Al realizar alguna medición, para una frecuencia en particular, la aplicación permite poner peso de la máquina, numero de soportes y una atenuación deseada para con estos datos verificar si la empresa tiene algún soporte anti vibrador útil.

Esta aplicación resulta extremadamente útil y de uso intuitivo. Además, una vez realizada la medición permite al operador enviar en formato PDF el espectro de la medición a una dirección de mail. Por lo que, en caso de que el operador no pueda interpretar algo de la medición, tiene la posibilidad de consultar a un experto. Otro punto a resaltar, es que esta aplicación se encuentra de manera gratuita.

My frequency Free

Como lo indica su nombre, esta aplicación es sin costos, pero es posible acceder a más funciones si se utiliza la versión paga. Esta aplicación es de fácil uso y permite utilizar al celular como un acelerómetro para detectar vibraciones/oscilaciones, frecuencias naturales/frecuencias propias y valores de amortiguación de objetos, máquinas y estructuras. Además, puede detectar las fuerzas a la que son sometidos los cables o elementos similares a cables, como colgadores de puentes.

Sus principales características son:

- Medición en tiempo real de aceleraciones en los tres ejes (X, Y y Z).
 - Espectro de frecuencia en tiempo real durante la medición.
-

- Almacenamiento de todos los archivos de medición en su dispositivo como archivos.txt. (que se pueden enviar por correo electrónico).
- Análisis FFT de la señal - Generación de espectros de frecuencia.
- Interacción, fácil de usar.
- Determinación de valores de amortiguación a partir de procesos de decaimiento.
- Detección de frecuencias naturales de estructuras.
- Detección de aceleraciones máximas y valores RMS (es el valor del voltaje o corriente en C.A. que produce el mismo efecto de disipación de calor que su equivalente de voltaje o corriente directa).

El sensor de aceleración registra la vibración en los tres ejes y almacena las señales en un archivo de texto en el dispositivo para su análisis directo en el teléfono o para su posterior procesamiento en otro dispositivo. Los datos pueden transferirse mediante un cable USB o directamente en la aplicación con un correo electrónico, por ejemplo, a una computadora. Según las especificaciones que se pueden ver al abrir la aplicación, se puede medir frecuencia de 0-200 Hz.

El inconveniente que se tiene con esta aplicación, principalmente es que la versión gratuita solo mide en el eje z, y lo que se observa es que en el eje de las abscisas se tiene la variable tiempo y en el eje de las ordenadas, la aceleración del objeto que se está midiendo en el eje z de este. Además, no se puede guardar la medición ni enviarla por mail. La versión paga tiene un precio de 12,25 USD.

Dado que para probar la aplicación no se obtiene la versión premium, la información que se obtiene con versión free es escasa para llevar a cabo un correcto análisis.

Resonance

Sobre esta aplicación, cabe mencionar que los creadores aclaran que en lo posible debe ser utilizada para uso de ingeniería estructural. De sus especificaciones se puede resaltar lo siguiente:

- Recopilación de datos de vibración del acelerómetro integrado al dispositivo.
 - Análisis de contenido de frecuencia rápido y preciso mediante la transformada rápida de Fourier.
 - Medición del período fundamental de las estructuras en voladizo.
 - Diagnostica problemas debido a las vibraciones del piso.
 - Verifica la resonancia en varias máquinas.
 - Estima amortiguamiento y desplazamiento.
-

- Graba y guarda los resultados en su dispositivo.

Otro dato a destacar, es que la versión gratuita tiene pocas herramientas habilitadas. La única herramienta habilitada de interés para el presente proyecto es la intensidad de la aceleración en los tres ejes y la frecuencia en cada uno de estos ejes. Pero no nos permite ver el espectro. Si se pagara por la versión premium por 2,14 USD, se podría visualizar otras herramientas como: estimación de amortiguación, frecuencia de muestreo, acceso a todas las funciones disponibles, resultados de análisis mejorados, capacidad de exportar datos a CSV (es un formato de archivo sencillo compatible por aplicaciones variadas, por ejemplo, por editores de texto.) y aceleración máxima.

El problema de esta aplicación es que si no se obtiene la versión premium es muy poca la información que podemos obtener y no tenemos habilitado el poder enviar la información obtenida a nadie, solo se permite guardarla en el dispositivo.

Bearing Defender

Es una aplicación que es compatible con los sensores que ofrece la empresa ACOEM.

Proporciona un cálculo de las frecuencias de fallas del rodamiento y diagnóstico automático en cuestión de segundos al utilizar el sensor de vibración inalámbrico ONEPROD.

Las especificaciones dicen lo siguiente: ONEPROD Bearing Defender, computa automáticamente las mediciones inalámbricas triaxiales, esto asegura que la maquinaria rotativa funcione sin riesgo, sin necesidad de ninguna experiencia para el uso de éste. Independientemente de la posición del sensor inalámbrico al colocarlo sobre el rodamiento, realiza automáticamente un análisis de vibración completo y confiable de la máquina. Incluso se pueden detectar fallas mecánicas como el desequilibrio o la resonancia estructural que pueden ocurrir en una sola dirección. No hace falta ser experto para manejar esta aplicación para medir vibración y llevar a cabo diagnósticos. Con sus indicadores automáticos inteligentes, la aplicación Bearing Defender presenta claramente la condición de salud del rodamiento, la presencia de un desequilibrio o un problema de desalineación, e incluso es capaz de determinar si otro tipo de falla podría poner a la máquina en riesgo. Los resultados aparecen, mediante alarmas estándar [Norma ISO 10816 \(2015\)](#), en una sola pantalla, en colores para que sea fácil identificar las fallas de los activos rotantes.

Las principales características que posee y ofrece esta aplicación son:

- Posee un calculador de frecuencia de fallas de rodamientos con más de 30.000 referencias de rodamientos.

- Tres mediciones de vibración direccional (velocidad, aceleración, desplazamiento) en las direcciones X, Y y Z.
- Comparación automática de la velocidad de vibración con el estándar ISO [Norma ISO 10816-3 \(2015\)](#) y visualización de las alarmas de vibración mediante un código de color (verde, amarillo, rojo).
- Diagnóstico automático del estado de salud del rodamiento (desgaste del rodamiento o problema de lubricación), desequilibrio o desalineación u otro error.
- Señal de audio en vivo escuchando la señal medida por el sensor, p.ej. mientras engrasa el rodamiento.
- Visualización de espectro 3D combinando las direcciones X Y y Z para una fácil confirmación de diagnóstico de vibración: ONEPROD ZYXtrum™.
- Fácil elaboración de informes gracias a la función de captura de pantalla.
- Posibilidad de actualizar a una solución experta en análisis de vibración ya que el sensor inalámbrico compatible con ONEPROD Bearing Defender también es compatible con el analizador portátil ONEPROD FALCON.

Lo que resulta interesante de esta aplicación, es que ya viene programada para funcionar por conexión de bluetooth. Es decir, que bajando esta aplicación y enlazando por esta conexión al móvil con el sensor se puede obtener toda esta información.

A su vez, esta empresa ofrece varios tipos de sensores, con sus respectivas características. A continuación, se presenta una lista de los sensores, y sus especificaciones.

Aplicación BEARING DEFENDER



Figura 25: Sensor de Bearing Defender (<https://www.acoem.com>)

- Bueno para la detección de fallas de rodamientos con un ancho de banda de hasta 15 kHz a +/-3dB. Específicamente:
 $\pm 3 \text{ dB (Z) } 0.4 \text{ Hz} - 15 \text{ kHz}$
 $\pm 3 \text{ dB (XY) } 0.4 \text{ Hz} - 6 \text{ kHz}$

- Bueno para la mayoría de las máquinas industriales con una dinámica de +/- 80g.
- Permite la medición inalámbrica de máquinas acceso difícil (habitación cerrada, detrás de puertas).
- Batería recargable para 8 horas de actividad de medición.
- El Bearing Defender solo tarda 10 segundos en capturar, procesar y mostrar los datos resultantes de la medición en las tres direcciones.



Figura 26 Kit de Bearing Defender, (<https://www.acoem.com>)

Este dispositivo tiene asociada la aplicación mencionada con anterioridad, la cual se puede encontrar en la tienda Playstore de los dispositivos móviles y tablets y se encuentra de manera gratuita su descarga. En la Figura 26 podemos visualizar el sensor y el kit que ofrecen.

Sistema de monitoreo inalámbrico Eagle

EAGLE es un sistema de monitoreo inalámbrico para maquinaria rotativa crítica. Mide automáticamente la vibración en tres direcciones, así como la temperatura del rodamiento. EAGLE es un sensor inalámbrico autoalimentado. No se necesita absolutamente ningún cable. La puerta de enlace inalámbrica se puede instalar hasta cien metros del sensor y el alcance se puede ampliar mediante expansores inalámbricos. La transmisión inalámbrica de datos de vibración al software de análisis se logra con alta confiabilidad.

Su calidad de medidas la hace adecuada para la monitorización de cualquier máquina rotativa, a partir de 100 rpm. EAGLE no es solo un transductor. Esta unidad inalámbrica inteligente incorpora procesamiento de señales: indicadores avanzados, así como la FFT de envolvente que se calculan localmente, lo que permite registrar las mediciones incluso si se produce una alarma de vibración o temperatura del cojinete. La frecuencia de almacenamiento de datos se ajusta automáticamente según la condición de la máquina. Los datos están disponibles para un análisis detallado utilizando la plataforma de mantenimiento predictivo NEST, que proporciona herramientas únicas como el filtro Shock Finder™. Las operaciones de mantenimiento se pueden programar antes de que ocurra cualquier falla. En la Figura 27 se pueden observar los sensores de este sistema de monitoreo.



Figura 27: Sensores Eagle (<https://www.acoem.com>)

Sus sensores tienen las siguientes características:

- 1 o 3 ejes de vibración (precisión ± 3 dB):
Ancho de banda: 1 Hz a 15 kHz para el eje Z; 1 Hz a 6 kHz para los ejes X e Y.
- Temperatura: -20 a 60°C.
- Análisis FFT hasta 20 kHz.
- Medición con alarma, es decir, se puede establecer un valor para el cual el sistema de alarma.
- Monitorización de máquinas a partir de 100 RPM.
- Soporta una temperatura de contacto de 120 °C.
- Soporta ambientes corrosivos.
- Inmunidad a interferencias con otras redes inalámbricas (WiFi, Bluetooth, HART inalámbrico, protocolos propietarios).
- Datos seguros.
- Transmisiones de muy baja potencia para garantizar condiciones seguras para personas e instalaciones.

Analizador de vibraciones Falcon

Los dos tipos de sensores analizados para medir vibración que ofrecen la empresa no es la única herramienta que sería de utilidad para el objetivo de este trabajo. El analizador de vibraciones Falcon, es una herramienta innovadora para la medición y el análisis de vibraciones que pone el mantenimiento basado en condición al alcance de todos los usuarios. Algunas de sus características se presentan a continuación:

- Sensor inalámbrico patentado de tres ejes, que toma medidas de vibración simultáneas en todas las direcciones.
- Luz estroboscópica incorporada para medir la velocidad de rotación.
- Pirómetro láser incorporado para medir la temperatura de los rodamientos.

- Cámara incorporada para una fácil identificación de la máquina, posicionamiento del sensor e ilustración de informes.
- 4 canales analógicos para medición síncrona, además de la entrada de disparo.
- El alcance entre el sensor inalámbrico y el dispositivo es de 10 a 20 metros: las mediciones pueden realizarse bajo cubiertas de protección o detrás de puertas y el usuario no tiene por qué situarse junto a la máquina en entornos a altas temperaturas.

Sistema de Monitoreo de Vibraciones ERBESSD Instruments

Lo primero a destacar, es que este sistema no es una aplicación, sino un conjunto de sensores y otros dispositivos. Se analiza este sistema de monitoreo de vibraciones, el cual es un conjunto de elementos involucrados en la adquisición y análisis de uno o más parámetros con el fin de identificar cambios en el comportamiento de la maquinaria. De hecho, su objetivo principal es el de ayudar en las decisiones sobre las actividades de mantenimiento.

El Sistema de vibraciones y monitoreo continuo ayuda no solo a predecir las fallas de las maquinarias, sino también a ahorrar los enormes costos de paro no programados en la producción.

Ofrecen un kit de 12 unidades de sensores phantom, los cuales pueden ser de rango bajo o rango alto, junto a una puerta de enlace fantasma, adaptadores de corriente y llave magnética, por un precio de 3295 USD. También ofrecen un kit de 4 unidades de sensores y el resto de los elementos ya mencionados a un precio de 1295 USD.

Las posibles fallas que se pueden identificar con este sistema de monitoreo continuo y algunas características son:

- Desbalanceo.
- Desgaste de la flecha y cojinetes.
- Holgura mecánica.
- Desalineamiento.
- Ruido eléctrico.
- Resonancia.
- Conexión sencilla: se adhiere la base a la máquina, se coloca el sensor Phantom a la base, se configura el software.
- Los sensores pueden colocarse dentro de gabinetes metálicos y aun así recibir sus mediciones a 60 metros de distancia. Sin obstáculos se podría llegar a tomar medidas a 1 km de distancia.

- Frecuencia del sensor rango 10 kHz (x, y) 5,1 kHz (z)

A continuación, se presentan algunos de los dispositivos que podrían ayudar a cumplir los objetivos del presente trabajo. Tener en cuenta que los dos primeros, vienen en conjunto con el sistema Phantom, o el sistema de medición mencionado, el resto son otros dispositivos que suministran.

EPH-V10 Sensor de Vibración Inalámbrico-Alta Sensibilidad

El Phantom EPH-V10 (Figura 28) es un Sensor de Vibración de Alta Sensibilidad capaz de enviar simultáneamente 3 grabaciones de FFT y de forma de onda en el tiempo. El Sensor de Vibración Inalámbrico, se activa con niveles de vibración altos y de esta manera envía datos y alarmas.



Figura 28: Sensor EPH-V10 (<https://store.erbessd-instruments.com/>)

Características:

- Triaxial.
- Datos completos de forma de onda y espectro.
- Disparador RMS interno programable.
- Máximo 6400 líneas de resolución
- Tiene un precio de 279.95 USD cada sensor.
- Los rangos de frecuencia son 4 kHz (x, y); 1,8 kHz (z).

Acelerómetro MEMS triaxial de alto rango Phantom EPH-V11

El Acelerómetro Bluetooth Phantom EPH-V11 (Figura 29) es un sensor de vibración inalámbrico diseñado para montaje permanente. Phantom registra la vibración FFT de 3 ejes simultáneamente X, Y y Z.



Figura 29: Sensor EPH-V11 (<https://store.erbessd-instruments.com/>)

Características:

- Rango de frecuencia: 10 kHz (x, y); 5,1 kHz (z).
- Triaxial.
- Datos completos de forma de onda y espectro.
- Disparador RMS interno programable.
- Máximo 6400 líneas de resolución.
- Dimensiones $4 \times 4 \times 6$ cm.
- Tiene un precio de 279.95 USD cada sensor.

Acelerómetro inalámbrico MEMS biaxial EPH-V12

EPH-V12 (Figura 30) es un Acelerómetro Biaxial Inalámbrico. Este sensor incorpora 2 acelerómetros ICP estándar de ultra bajo ruido. Capaz de enviar simultáneamente 2 grabaciones de FFT y en forma de onda en el tiempo para 2 ejes de manera inmediata. De igual manera, nuestro acelerómetro inalámbrico, se activa con niveles de vibración altos y de esta manera enviar datos y alarmas.

Este Sensor de Vibración Inalámbrico Biaxial fue diseñado para maquinaria de baja velocidad. El EPH-V12 contiene un integrador, esto hace que internamente pueda calcular parámetros de velocidad para las alarmas. De esta manera, los valores de RMS pueden ser enviados con una periodicidad personalizable.



Figura 30: Sensor EPH-V12 (<https://store.erbessd-instruments.com/>)

Características:

- Biaxial.
- Datos completos de forma de onda y espectro.
- Disparador RMS interno programable.
- Tiene un precio de 695 USD cada sensor.
- Los rangos de frecuencia son (X, Y): (0.5Hz - 10kHz).
- Dimensiones (DxH) 48 x 44 mm.

Phantom ATEX Sensor de Vibración Triaxial

Phantom ATEX (Figura 31) es un sensor triaxial que tiene la capacidad de grabar FFT de vibración en tres ejes simultáneamente; X, Y y Z. Los sensores de vibración triaxial se activan con altos niveles de vibración para poder enviar datos y alarmas.



Figura 31: Sensor ATEX (<https://store.erbessd-instruments.com/>)

Características:

- Triaxial.
- Datos completos de forma de onda y espectro.
- Disparador RMS interno programable.
- Máximo 6400 líneas de resolución
- Tiene un precio de 279.95 USD cada sensor.
- Los rangos de frecuencia son 10kHz (x,y); 5.1kHz (z).
- Dimensiones (d x h) 48 x 34 mm.

Acelerómetro MEMS triaxial de alto rango-Mini sensor Phantom Gen 2

Similar al anterior, pero de menor tamaño.



Figura 32: Mini sensor (<https://store.erbessd-instruments.com/>)

Características:

- Triaxial.
- Datos completos de forma de onda y espectro.
- Disparador RMS interno programable.

- Máximo 6400 líneas de resolución.
- Tiene un precio de 134.95 USD cada sensor.
- Ancho de banda: 10kHz (x,y); 5.1kHz (z).
- Dimensiones (d x h) 35 x 24 mm.

Phantom All in One Vibración, Corriente y Temperatura



Figura 33: Sensor All in One (<https://store.erbessd-instruments.com/>)

El sensor All in One (Figura 33) monitorea 3 tipos de parámetros de medición con solamente un módulo: Vibración, Corriente y Temperatura. Realiza mediciones de FFT de vibración en 3 ejes de manera simultánea X, Y y Z.

Características:

- Triaxial.
- Forma de onda y espectro completos.
- RMS interno programable.
- Máximo de 6400 líneas de resolución.
- Puede medir temperaturas entre -210°C a 1800°C.
- Ancho de banda: 10kHz (x, y); 5.1kHz (z).
- Tiene un precio de 395 USD.
- Dimensiones: 100 mm x 77 mm x 26 mm.

Acelerómetro Inalámbrico Triaxial ICP



Figura 34: Sensor Wiser 3x (<https://store.erbessd-instruments.com/>)

WiSER 3x es un Acelerómetro Inalámbrico de 3 ejes especialmente diseñado para el análisis de vibraciones, compatible con cualquier analizador de vibraciones disponible en el mercado. WiSER 3x envía datos de vibración de 3 ejes. Además, WiSER 3x es un acelerómetro inalámbrico de ultra bajo ruido.

Tiene las siguientes características:

- Triaxial.
- Dimensiones (DxB): 48.9; 92.4 mm.
- Distancia de operación 20 m.
- Ancho de banda: 0.32 kHz a 10 kHz.
- Tiene un precio de 2495 USD.

Acelerómetro ICP inalámbrico de un solo eje EI-WiSER



Figura 35: Sensor EI-Wiser (<https://store.erbessd-instruments.com/>)

Es un sensor de vibraciones especialmente diseñado para el análisis de vibraciones con compatibilidad universal. EI-WiSER es un acelerómetro inalámbrico que envía los datos de vibración del eje a cualquier recolector de datos del mercado. Además, WiSER es un acelerómetro inalámbrico de ruido ultra bajo.

Características:

- Dimensiones (DxB): 40.19; 91.50 mm.
- Distancia de operación 30 m.
- Ancho de banda: 0.32 kHz a 10 kHz.
- Tiene un precio de 1495 USD.

Módulo de adquisición de datos QuantumX MX1615B

El módulo de adquisición de datos QuantumX MX1615B es un amplificador compacto para galgas extensométricas, capaz de proporcionar resultados de precisión, tanto en mediciones estáticas como dinámicas. En la Figura 36 podemos observar el adquisidor.

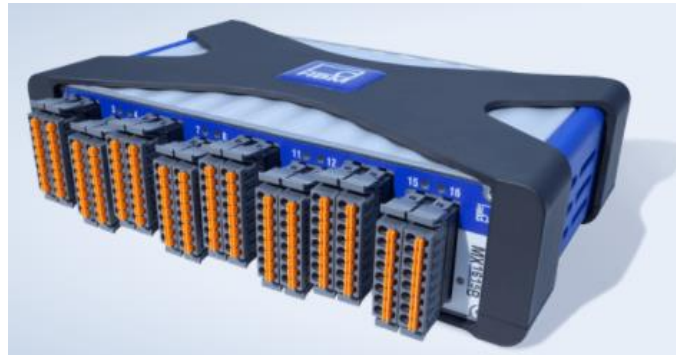


Figura 36: QuantumX MX1615B (<https://store.erbessd-instruments.com/>)

Es perfecto para adquirir de forma precisa y segura datos de galgas extensométricas con configuración de puente completo, medio puente y cuarto de puente. También son compatibles con transductores de galgas extensométricas, potenciómetros, termómetros de resistencia (PT100) o tensión normalizada (± 10 V). Eso significa que esta unidad de adquisición de datos es una elección ideal para adquirir deformaciones, fuerzas y desplazamientos, y también cuando la influencia de la temperatura es significativa

Algunas de sus características más relevantes son:

- 16 entradas de señal configurables, distribuidas en una carcasa muy compacta.
- Frecuencias de muestreo individualmente configurables de hasta 20 kS/s por canal.
- Apto para un amplio intervalo de temperatura ambiente (-20 °C ... $+65$ °C), con un diseño robusto.
- Resultados instantáneos con ayuda del software catman de HBM de registro y análisis de datos.

Hardware DSP Logger MX 300

El DSP Logger MX 300 es un hardware poderoso, con amplia capacidad de cálculo, rapidez en las mediciones y 16 Mb de memoria que lo convierten en una herramienta competitiva en el presente y el futuro, dado que las actualizaciones de las versiones de su sistema operativo y sus programas puede hacerse por Internet.

Incorpora además de las mediciones vibratorias, nuevas posibilidades de medición como variables de procesos industriales, admitiendo cualquier señal 4-20 mA, 0-10 V, 0-5 V de CC

o CA, Temperatura con medidores infrarrojos y realizar análisis espectral de medidores de ultrasonido.

En todas las mediciones incorpora espectros con definiciones configurables en 400, 2000 y 4000 líneas de resolución.

Además de permitir en los espectros la utilización de herramientas en el campo como Cursores, Armónicas, Detección de frecuencias de falla de rodamientos y da la posibilidad de ver los valores RMS de cada banda en las alarmas del espectro.



Figura 37: DSP Logger MX 300 (<https://www.es.semapi.com/>)

El DSP Logger MX 300 permite también realizar espectros de corriente gracias a sus dos entradas dedicadas para pinzas amperométricas, esta herramienta sumada a la definición espectral permite detectar problemas eléctricos en equipos rotantes.

Se puede utilizar para medir u observar:

- Espectro de Aceleración
- Espectro de Velocidad
- Espectro de Envolvente (3 filtros configurables)
- Forma de onda
- Aceleración RMS, 0-pico y Pico-Pico
- Velocidad RMS, 0-pico y Pico-Pico
- Desplazamiento 0-pico y Pico-Pico
- Costos: 16603 USD.

DAQ USB-1608FS



Figura 38: DAQ USB-160FS

El dispositivo de adquisición de datos (DAQ) USB-1608FS proporciona muestreo simultáneo con una frecuencia de muestreo máxima de 50 kS/s para cualquier canal y hasta 100 kS/s agregado para múltiples canales. El dispositivo también cuenta con un contador de eventos de 32 bits, 8 líneas de E / S digitales, activación digital externa y un reloj bidireccional. Ofrece rangos de entrada analógica seleccionables por software para ± 10 V, ± 5 V, ± 2 V y ± 1 V.

Dimensiones (L×An×Al): 79 × 82 × 27 mm.

2. Termografía

Sensor de temperatura Termopar

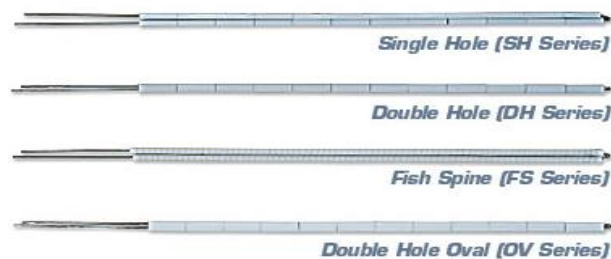


Figura 39: Sensor Termopar (<https://es.omega.com/>)

Un termopar (Figura 39) es un sensor para medir la temperatura. Se compone de dos metales diferentes, unidos en un extremo. Cuando la unión de los dos metales se calienta o enfría, se produce una tensión que es proporcional a la temperatura. Las aleaciones de termopar están comúnmente disponibles como alambre.

Los termopares están disponibles en diferentes combinaciones de metales o calibraciones para adaptarse a diferentes aplicaciones. Los tres más comunes son las calibraciones tipo J, K y T, de los cuales el termopar tipo K es el más popular debido a su amplio

rango de temperaturas y bajo costo. El termopar tipo K tiene un conductor positivo de níquel-cromo y un conductor negativo de níquel-aluminio. Existen calibraciones tipo R, S, B, G, C y D para alta temperatura que ofrecen un rendimiento de hasta 2320 ° C. Estos están hechos de metales preciosos (platino / rodio y tungsteno / renio) y por lo tanto son relativamente caros.

Cada calibración tiene un rango de temperatura y un entorno de trabajo diferente. Aunque la calibración del termopar dicta la gama de temperaturas, el alcance máximo también está limitado por el diámetro del cable del termopar. Es decir, puede ser que un termopar muy delgado no logre alcanzar el rango de temperatura deseado.

Por lo tanto, según el diámetro de los cables, el material, variará el rango de temperatura en cual puede se puede trabajar. A rasgos generales, el J trabaja 0°C a 750°C, el K de -200°C a 1250°C y el T de -250°C a 350°C.

Sensor de temperatura por resistencia (RTD)



Figura 40: Sensor RTD (<https://es.omega.com/>)

Es un sensor de temperatura basado en la variación de la resistencia de un conductor con la temperatura. Al calentarse un metal habrá una mayor agitación térmica, dispersándose más los electrones y reduciéndose su velocidad media, aumentando la resistencia. A mayor temperatura, mayor agitación, y mayor resistencia. Es decir que, los dispositivos termométricos de resistencia aprovechan el hecho de que la resistencia eléctrica de un material cambia al cambiar su temperatura. Su rango de temperatura, según el tipo que sea, varía en general de -50°C a 500°C.

Sensor de temperatura por cambio de estado

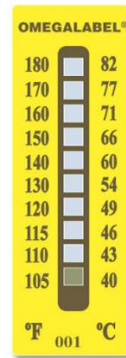


Figura 41: Sensor de cambio de estado (<https://termometros.com.ar/>)

Los sensores de cambio de estado (Figura 41) consisten en etiquetas, pellets o gránulos, crayones, lacas o cristales líquidos cuya apariencia cambia una vez que se alcanza cierta temperatura. Se usan por ejemplo con trampas de vapor: cuando una trampa supera una cierta temperatura, un punto blanco en una etiqueta de sensor adherida a la trampa se volverá negra. El tiempo de respuesta típicamente es de varios minutos, así que estos dispositivos con frecuencia no responden a los cambios de temperatura transitorios, y la precisión es más baja que con otros tipos de sensores. Además, el cambio en estado en la mayoría es irreversible, excepto por ejemplo las pantallas de cristal líquido.

A pesar que el cambio de estado es irreversible en algunos de estos sensores, son de uso sencillo, fácil de cambiar, simples para controlar puntos específicos de las máquinas. Además, se tienen dos tipos de etiquetas, las reversibles y las irreversibles. Las etiquetas indicadoras de temperatura reversibles de temperatura son aquellas que pueden volver a su estado inicial según sea necesario para proporcionar una indicación de la temperatura actual. Una ventaja de las etiquetas de temperatura reversibles es que se pueden utilizar una y otra vez. Las etiquetas no reversibles de temperatura son de un solo uso indicando que la temperatura especificada ha sido alcanzada. Las etiquetas son prácticas en una situación en la que un operador no está disponible o no tiene acceso a la etiqueta de un producto bajo prueba. En cualquier momento futuro una etiqueta no reversible se podrá examinar para ver si la temperatura especificada ha sido obtenida.

El rango de temperatura de estos sensores es variable, pero para dar una idea, su rango va desde los 40°C a los 260°C según el tipo que sea.

Cámaras termográficas portátiles de mano

Hay una amplia gama de cámaras termográficas portátiles. Cada una de estas tienen sus pros y sus contras. Algunas son sencillas y cómodas, de fácil transporte. El rango de medición

de temperatura también es variable. A su vez, la calidad de las mediciones o precisión también es variable de una cámara a otro.

Se requiere indagar sobre la posibilidad que, una vez realizada la medición, sea posible enviar el archivo de manera remota e inmediata a un experto para que analice la medición. A su vez, no hay que perder de vista que se requiere que esta herramienta sea de utilidad para el operador, ayudándolo a detectar una falla incipiente, por lo tanto, debe ser sencilla y de fácil uso. Se buscará poder definir ambientes de uso, o elementos sobre los cuales sirve la medición de cada tipo de cámara.

Para ello, se toma como referencia las cámaras suministradas por “FLIR Systems”, quienes diseñan, desarrollan, fabrican, comercializan y distribuyen tecnologías que mejoran la percepción.

FLIR A700-EST, de montaje fijo

Es una herramienta de detección sin contacto que actúa como primera línea de defensa frente a los posibles riesgos para la salud. Su principal función es la detección y localización térmica, mostrando las fuentes de calor para de este modo identificar rápidamente a los individuos con una temperatura elevada de la piel. El detector de 640×480 píxeles ofrecen la mayor resolución térmica dentro de la gama de cámaras de montaje fijo, lo que le permite realizar mediciones más precisas. Es compatible con varios programas.



Figura 42: cámara A700-EST (<https://www.flir.com.mx/>)

- Precisión: $\pm 0,3$ ° C.
- Rango de temperatura del objeto: De 15°C a 45 °C, la cámara ofrece contraste de -20 °C a 120 °C, pero no ofrecerá información de temperatura.
- Almacenamiento de vídeo: Hasta 10 vídeos en H.264 almacenados en función de la alarma; 5 s antes o después de la alarma.
- Interfaz Ethernet: Con cable; Wi-Fi.
- Corrección de emisividad: Variable de 0,01 a 1,0.
- Resolución IR: 640×480 píxeles.

Cámara termográfica avanzada FLIR E96

Cámara con empuñadura de pistola y una resolución térmica de 640×480 píxeles para que los inspectores puedan examinar objetivos peligrosos de alta tensión de manera segura y diagnosticar rápidamente averías eléctricas y mecánicas (puntos calientes). Las lentes intercambiables ofrecen una cobertura completa de objetivos cercanos y distantes, y el medidor de distancia con láser garantiza el enfoque nítido necesario para una medición precisa de la temperatura. Algunas de sus características se presentan a continuación:



Figura 43: Cámara E96 (<https://www.flir.com.mx/>)

- Promedio de muestreo en modo Screen-EST: 30 a 45 ° C a temperatura ambiente estable.
- Interfaces de comunicación: USB 2.0, Bluetooth, Wi-Fi, DisplayPort.
- Precisión en modo Screen-EST: $\pm 0,3$ ° C.
- Rango de temperatura del objeto: -20 a 120 °C; de 0 a 650 °C; 300 a 1500 °C.
- Posibilidad de medir distancias con un láser.
- Anotaciones de voz.
- Rango de temperatura de almacenamiento: De -40 a 70 ° C.
- Resolución de pantalla: 640×480 píxeles.
- Resolución de lente IR: 640×480 píxeles.

Nota: Tiene un amplio rango de temperaturas, una contra es que no es una cámara precisa en cuanto a zoom o definición de figura. Las recomendaciones de usos para ser más direccionadas hacia instalaciones eléctricas.

Hay una gran variedad de modelos de diseño similar, cada uno con diferentes características o usos. Por ejemplo:

- Cámara térmica para diagnósticos de automoción FLIR TG275, el rango de temperaturas medibles es de -25 a 550 °C, aclarando que es útil para demostrar a clientes que las fugas de calor fueron reparadas. Esta cámara termográfica es

ideal para diagnosticar problemas en relés y conmutadores, drenaje parásito en la batería, componentes del tren propulsor, sistemas de climatización (conductos) y mucho más. Otras características son: resolución de pantalla 320 × 240 píxeles; resolución IR 160 × 120 píxeles; corrección de emisividad con 4 niveles preestablecidos con ajuste personalizado de 0,1 a 0,99. En el [Enlace externo 23](#), se puede ver otras características.



Figura 44: Cámara TG275 (<https://www.flir.com.mx/>)

- Cámara termográfica avanzada FLIR E54, el rango de temperatura con el que puede trabajar es de -20 a 650°C, con medidor de distancia incorporado, tarjeta SD extraíble. Las lentes intercambiables de calibración automática, desde teleobjetivo hasta gran angular, permiten a los usuarios identificar puntos calientes eléctricos de forma segura, buscar averías mecánicas y examinar rápidamente techos o envolventes de edificios. Otras características son: resolución de pantalla 640 × 480 píxeles; resolución IR 320 × 240 píxeles.

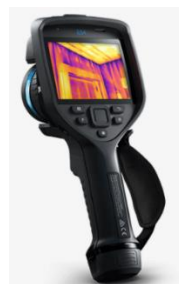


Figura 45: Cámara E54 (<https://www.flir.com.mx/>)

- Cámara de infrarrojos con MSX® y wifi FLIR E8-XT: es la herramienta perfecta para diagnosticar problemas eléctricos, mecánicos, sobre todo en edificios. Algunas de sus características son: resolución de pantalla 320 x 240 píxeles; resolución IR 320 × 240 píxeles; rango de temperaturas medibles -20 a 400 °C con un 2% de precisión; posibilidad de conectarse por WiFi corrección de

emisividad (Tabla de emisividad de materiales predefinidos/variable de 0,1 a 1,0).



Figura 46: Cámara E8-XT (<https://www.flir.com.mx/>)

- Cámara térmica de alta temperatura industrial FLIR TG297: es una herramienta de diagnóstico industrial única en su clase que combina la medición precisa de temperatura con la capacidad de capturar imágenes de temperaturas de hasta 1030 °C. Es ideal para usos industriales de alta temperatura como, por ejemplo, la medición del calor de hornos de vidrio, hornos de secado y forjas, así como para aplicaciones de fabricación, lo que le permite detectar con precisión posibles averías, realizar reparaciones y supervisar procesos. Permite grabar imágenes para garantizar al operador que la maquinaria y los sistemas funcionan de forma segura y con la máxima eficacia. Tiene una precisión $\pm 1,5$ °C para temperaturas de 50 a 100 °C; hasta ± 3 °C de -25 a 50 °C y de 100 a 1030 °C. Su Rango de temperatura del objeto es de -25 a 1030 °C. Además, tiene las siguientes características de interés: resolución de pantalla 320 × 240 píxeles; resolución IR 160 × 120 píxeles; corrección de emisividad con 4 niveles preestablecidos con ajuste personalizado, de 0,1 a 0,99.



Figura 47 Cámara TG297 (<https://www.flir.com.mx/>)

Cámara termográfica de alta definición con visor FLIR T1020

Produce imágenes térmicas nítidas con hasta 3,1 millones de píxeles. La T1020 es lo bastante sensible para detectar diferencias de temperatura de menos de 20 mK, para obtener resultados de calidad y con poco ruido que le ayudarán a que no pasen desapercibidos posibles problemas durante las inspecciones.



Figura 48: Cámara T1020 (<https://www.flir.com.mx/>)

Tiene la posibilidad de grabar videos, incluyendo con sonido, es decir, que el operador al grabar podrá grabar su inquietud o su descubrimiento. Tiene incorporada una tarjeta SD, se la carga por medio de USB, y por este medio también se puede descargar información de la tarjeta. Pide una distancia no mayor a 1,3 m del objetivo.

- Precisión: $\pm 0,3$ °C.
- Cantidad de Medidores puntuales: 10.
- Precisión de rango de temperatura del objeto: ± 1 °C o ± 1 % a 25 °C para temperaturas de entre 5 °C y 150 °C; ± 2 °C o ± 2 % de lectura a 25 °C para temperaturas de hasta 1200 °C.
- Rango de temperatura del objeto: -40°C a 2000 ° C.
- Almacenamiento de imágenes: JPEG estándar, incluidos datos de medición e figura digital, en la tarjeta de memoria.
- Conexiones a través de USB, WiFi, USB de alta velocidad.
- Cambiar las lentes.
- Posibilidad de realizar videos con grabación de voz.
- Posibilidad de agregar notas escritas en las imágenes.
- Resolución de pantalla: 800×480 píxeles.
- Resolución IR: 1024×768 píxeles.
- Corrección de emisividad: Variable de 0,01 a 1,0 o seleccionada en la lista de materiales.
- Rango de temperatura de almacenamiento -40 a + 70 °C.

- Rango de temperatura operativa -15 a 50 °C.

Nota: esta cámara posee un rango de temperaturas interesantes para sectores de la industria con temperaturas elevadas. Tiene además posibilidad de cambiar lentes, enfoque. Gran cantidad de medidores puntales.

Se observa otros tipos de cámaras similares en cuanto a diseño, pero de diferentes características como:

- Cámara térmica de alta definición con visor para inspecciones en exteriores
FLIR T840: está diseñada para ayudar a profesionales de servicios de suministro eléctrico y a otros profesionales de la termografía a inspeccionar cómodamente equipos en interiores o exteriores para encontrar fallos durante toda la jornada. La precisión de la temperatura es similar, pero el rango de temperatura es hasta 1500 °C. Resumiendo, sus características son: rango de temperatura medible desde -20 a 2000 °C; resolución de pantalla 640 x 480 píxeles y posibilidad de rotarla; resolución de IR 464 x 348 píxeles. En el [Enlace externo 29](#) se encuentran más características.



Figura 49: Cámara T840 (<https://www.flir.com.mx/>)

- Cámara termográfica profesional : Se utiliza para hallar y solucionar los problemas en puntos calientes, encontrando fallas ocultas y para confirmar las reparaciones rápidamente. La precisión de la temperatura medida es similar a las anteriores. Las temperaturas del objeto a medir no pueden superar los 1500 °C.



Figura 50: Cámara T540 (<https://www.flir.com.mx/>)

Otras características son: resolución de pantalla 640 x 480 píxeles con posibilidad de rotación; resolución IR 464 x 348 píxeles; corrección de emisividad variable de 0,1 a 1,0 o seleccionado de la lista de materiales.

Esta cámara tiene un modelo T540-EST, es una herramienta de detección sin contacto que actúa como primera línea de defensa frente a los posibles riesgos para la salud. Localiza y muestra las fuentes de calor para identificar rápidamente a los individuos con una temperatura elevada de la piel.

Cámara térmica compacta FLIR C5

Con la FLIR C5, el operador se encuentra en condiciones para encontrar fusibles calientes, fugas de aire frío, problemas de fontanería, etc. Identificar problemas que están ocultos a simple vista con el generador de imágenes térmicas. La C5 carga y almacena directamente sus imágenes en la nube de FLIR Ignite™, desde donde podrá organizarlas y crear copias de seguridad. A continuación, podrá compartir al instante las imágenes con los clientes o crear informes profesionales que documenten el problema y las tareas de reparación necesarias.



Figura 51: Cámara C5 (<https://www.flir.com.mx/>)

- Precisión: A temperatura ambiente, de 15 a 35 °C y temperatura del objeto superior a 0 °C, de 0 a 100 °C: ±3 °C, de 100 a 400 °C (de 212 a 752 °F): ±3 %.
- Rango de temperatura del objeto: -20°C a 400 °C.
- Conexiones y comunicaciones: Bluetooth, Memoria interna, USB, Wifi.
- Resolución de pantalla: 800 × 480 píxeles.
- Resolución IR: 160 × 120 píxeles.
- Corrección de emisividad: mate / semimate / semibrillante + valor personalizado, temperatura aparente reflejada, en función de una compensación atmosférica.
- Rango de temperatura de almacenamiento -40 a + 70 °C.
- Rango de temperatura operativa -15 a 50 °C.

Nota: un punto negativo es que el uso de la batería no es superior a las 4 horas. No sé específica sobre medidores puntuales. Dentro de las condiciones que mencionan para medir, no se incluyen medir temperatura en objetos como bombas, cojinetes. Otra cámara de similares características que ofrecen es:

- Cámara térmica compacta FLIR C3-X: es una herramienta de inspección asequible para aplicaciones eléctricas o mecánicas, de construcción y de mantenimiento. Los valores de precisión son similares, pero solo toma valores de temperatura hasta los 300 °C. Además, tiene una resolución de pantalla de 640 x 480 píxeles; una resolución IR de 128 x 96 píxeles y una corrección de mediciones por Emisividad, mate / semimate / semibrillante + valor personalizado, temperatura aparente reflejada, en función de una compensación atmosférica.



Figura 52: Cámara C3-X (<https://www.flir.com.mx/>)

Cámaras termográficas enlazadas a celulares

Este tipo de cámaras podrían compararse con las cámaras Go-Pro o Noblex, que utilizan los deportistas al conectarlas, engancharlas en sus cascos por ejemplo y poder grabar su rendimiento durante el desempeño de su actividad.

Se requiere instalar una aplicación en el dispositivo móvil, cuya función principal es que al conectar estas cámaras en los puertos USB de los móviles, la reconozcan enlacen y permita desde la pantalla del móvil visualizar las imágenes a través de la cámara.

Cámara térmica de clasificación profesional para smartphones FLIR ONE

Pro

El módulo FLIR ONE Pro da la capacidad de encontrar problemas invisibles con mayor rapidez. Con capacidad para medir temperaturas de hasta 400 °C, con hasta tres medidores puntuales de temperatura y seis regiones de interés de temperatura. Se la puede utilizar para inspeccionar paneles eléctricos o buscar problemas de climatización o daños causados por agua.

Además, se ofrecen distintos modelos con sus respectivos puertos USB, es decir, micro USB o USB-C.



Figura 53: Cámara One Pro (<https://www.flir.com.mx/>)

- Precisión: ± 3 °C o ± 5 %, de la diferencia entre la temperatura ambiente y de la escena.
- Rango dinámico de escena: De -20 a 400 °C.
- Duración de la batería: Aproximadamente 1 hora.
- Tiempo de carga de la batería: 40 minutos.
- Distancia mínima al objeto: 15 cm.
- Paleta de colores: Gris (caliente blanco), más caliente, más frío, hierro, arcoíris, lava y rueda.
- Formatos de archivo Imágenes fijas: jpeg radiométrico; Vídeo: MPEG-4 (formato de archivo MP4).
- Resolución térmica o IR: 160 x 120 píxeles.
- Ajustes de emisividad según color principal del objeto: Mate: 95 %, semi mate: 80 %, semi brillante: 60 %, brillante: 30 %.

Nota: los archivos, ya se imagen o video se guardan en la memoria de teléfono, ya sea interna o en la SD del mismo. Se pueden adjuntar vía wifi, USB o bluetooth. La poca duración de la batería es algo a tener en cuenta.

Ofrecen cámaras de similares características como:

- FLIR One Pro LT: El conector ajustable se extiende hasta 4 mm, para que pueda fijar la FLIR ONE Pro LT a su dispositivo móvil sin tener que quitarle la funda protectora. Se tiene la posibilidad de optar por distintos tipos de conectores. La precisión es similar, sin embargo, su rango de temperatura es de -20°C a 120°C. La resolución térmica es de 80 x 60 píxeles. Los formatos de archivos son: imágenes fijas - vídeo jpeg radiométrico - MPEG-4 (MOV).

Móvil Caterpillar

Caterpillar es el mayor fabricante del mundo de equipos de construcción y minería, motores diésel y de gas natural, turbinas a gas industriales y locomotoras diésel-eléctricas.

Esta empresa ofrece dispositivos móviles, los cuales tienen integrados una cámara de imágenes térmicas. La cámara de imágenes térmicas FLIR® integrada en el Cat S60 y los últimos teléfonos inteligentes Cat S61 y Cat S62 se pueden utilizar para supervisar y diagnosticar los problemas más rápidamente y ahorrar tiempo en la obra. Tiene varios usos su aplicación, entre los que se incluyen: detección de pérdida de calor alrededor de ventanas y puertas; detección de humedad y falta de aislamiento; identificación de sobrecalentamiento de electrodomésticos y circuitos; y visualización en oscuridad total.

Las mejoras del nuevo Cat S61 incluyen un intervalo de temperaturas medibles ampliado a 400°C en comparación con los 120°C del Cat S60, y una actualización del detalle VGA a HD de la cámara visible.

Al día de hoy, esta empresa ofrece distintos modelos de celulares como:

- Cat B26.
- Cat S31.
- Cat S40.
- Cat S42.
- Cat S52.
- Cat S60.
- Cat S61.
- Cat S62.

Cabe hacer mención que algunos de estos dispositivos tienen una aplicación que se utiliza para medir distancias, “MEDICIÓN DE DISTANCIA Y ÁREA”, lo cual puede ser una herramienta que puede aportar ventajas. Sin olvidar, que hay aplicaciones que se pueden instalar en los móviles y se puede utilizar a los mismos para obtener valores de vibración.

Como se dijo con anterioridad, no todos los modelos tienen integrada una cámara termográfica. Por ende, se investiga sobre esto al estudiar los manuales provistos por la empresa para poder observar sus características. Actualmente de los modelos que ofrecen, solo los S60, S61 y S62 poseen cámaras termográficas incorporadas. A continuación, se analizan estos modelos.

Cat S60

De las características, datos interesantes pueden ser su temperatura optima de trabajo, la cual no debe variar de -25°C a 55°C . Posee un acelerómetro, los cual también ayuda a que se puedan pedir vibraciones con las aplicaciones mencionadas en otro apartado.



Figura 54: Móvil Caterpillar S60 (<https://www.catphones.com/es-ar/>)

Detecta la energía calorífica invisible a una distancia de hasta 30 metros, captan y miden cualquier cambio de temperatura en forma de imagen o vídeo térmicos. Utiliza de forma conjunta la cámara visible y la cámara de imágenes térmicas, mientras que la tecnología MSX patentada de FLIR superpone las imágenes para crear una imagen más nítida, más fácil de reconocer y con mayor detalle. Las cámaras de imágenes térmicas no pueden captar señales de calor en algunos objetos, como materiales reflectantes y el agua, y aunque pueden ver a través de elementos opacos como el humo, no pueden ver a través de las paredes, sino que detectan cambios de temperatura producidos por objetos situados detrás de la pared.

Permite grabar imágenes fijas, vídeos y vídeos timelapse en un formato de archivo que se puede compartir inmediatamente por correo electrónico desde el dispositivo. Aplica medidores de puntos móviles y resalta un área dentro de la imagen para ver las diferencias de temperatura tanto en las imágenes en directo como retrospectivamente en las imágenes térmicas guardadas en la galería. También puedes seleccionar escalas de temperaturas personalizadas para resaltar objetos en un intervalo específico. La aplicación dentro del dispositivo para identificar temperatura se encuentra con el nombre de “medición puntual”.

Tiene nueve paletas de colores que se pueden elegir al capturar las imágenes térmicas. Por ejemplo, “Más caliente” para identificar rápidamente un fusible sobrecalentado en un circuito o “Más frío” para ver los niveles de líquido dentro de los depósitos.

- Rango dinámico de escena: -20°C a 120°C .
- Precisión: $\pm 5^{\circ}\text{C}$ o $\pm 5\%$. Porcentaje de la diferencia entre la temperatura ambiente y la escena.
- Ajuste de emisividad:

Mate: 95 %, semi mate: 80 %, semi brillante: 60 %, Brillante: 30 %.

- Resolución térmica: 80 x 60 píxeles.
- Resolución visual o pantalla: 640 x 480 píxeles.
- Precio: de 85000 ARS a 95000 ARS.

Nota: La temperatura indicada por el S60 de Cat siempre es una estimación calculada y no se puede considerar una medida exacta. La temperatura indicada se ve afectada por muchos factores, en especial por la emisividad del objeto que se observa y la distancia a la que se encuentra. En la temperatura pueden influir la hora del día, las condiciones meteorológicas u otros objetos fríos o calientes de alrededor del objeto que puedan reflejarse en él.

Cat S61

Incluye una cámara térmica, que puede visualizar y medir contrastes en las temperaturas de superficie. La cámara térmica se controla mediante la aplicación MyFLIR, que se encuentra en la pantalla de inicio.

De las características podemos observar valores similares a los del modelo S60. La temperatura de trabajo no debe variar de -25°C a 55°C . Posee un acelerómetro, los cual también ayuda a que se puedan pedir vibraciones con las aplicaciones mencionadas en otro apartado.



Figura 55: Móvil Caterpillar S61 (<https://www.catphones.com/es-ar/>)

El Cat S61 también tiene una nueva sección de consejos y trucos en la aplicación y un foro de la comunidad para aprovechar al máximo sus capacidades de imágenes térmicas.

Permite grabar imágenes fijas, vídeos y vídeos timelapse en un formato de archivo que se puede compartir inmediatamente por correo electrónico desde el dispositivo. Aplica medidores de puntos móviles y resalta un área dentro de la imagen para ver las diferencias de temperatura tanto en las imágenes en directo como retrospectivamente en las imágenes térmicas guardadas en la galería. También puedes seleccionar escalas de temperaturas personalizadas para resaltar objetos en un intervalo específico. La aplicación dentro del dispositivo para identificar temperatura se encuentra con el nombre de “medición puntual”.

Tiene nueve paletas de colores que se pueden elegir al capturar las imágenes térmicas, al igual que el modelo S60.

- Rango dinámico de escena: -20 °C a 400 °C.
- Precisión: ± 5 °C o ± 5 %. Porcentaje de la diferencia entre la temperatura ambiente y la escena. El dispositivo móvil 60 s es aplicable una vez que la unidad se encuentre entre 15 °C y 35 °C y la escena se encuentra entre -20 °C y 400 °C.
- Ajuste de emisividad:
Mate: 95 %, semi mate: 80 %, semi brillante: 60 %, Brillante: 30 %.
- Resolución térmica: 80 x 60 píxeles.
- Precio: 185000 ARS a 225000 ARS.

Nota: La temperatura indicada por el S61 de Cat siempre es una estimación calculada y no se puede considerar una medida exacta. La temperatura indicada se ve afectada por muchos factores, en especial por la emisividad del objeto que se observa y la distancia a la que se encuentra. En la temperatura pueden influir la hora del día, las condiciones meteorológicas u otros objetos fríos o calientes de alrededor del objeto que puedan reflejarse en él.

Cat S62

Incluye una cámara térmica que puede visualizar y medir diferentes temperaturas en las superficies. La cámara térmica se controla mediante la aplicación MyFLIR, que se encuentra en la pantalla de inicio.



Figura 56: Móvil Caterpillar S62 (<https://www.catphones.com/es-ar/>)

El Cat S62 presenta varias mejoras exclusivas que brindan aún más detalles térmicos para ayudar a localizar y diagnosticar la humedad, las corrientes de aire, las fugas, el punto de acceso, el cortocircuito eléctrico, el bloqueo o la temperatura elevada.

Está alimentado por el leptón FLIR de mayor resolución disponible en la actualidad, el sensor de grado profesional FLIR Lepton 3.5, que brinda un enorme aumento de 4 veces en la cantidad de píxeles térmicos. Combinado con la tecnología VividIR de FLIR, el Cat S62 Pro

ofrece una calidad de imagen mejorada, una imagen más nítida y una resolución térmica más alta.

Las imágenes térmicas se pueden combinar con la imagen visual de la cámara Sony de doble píxel de 12 MP de la S62 Pro, o se pueden usar con la tecnología MSX (Multi-Spectral Dynamic Imaging) de intensidad variable de FLIR que superpone detalles lineales de la escena en la imagen térmica, proporcionando un mayor contexto para ayudar a comprender las imágenes térmicas.

- Rango medible: 20 °C a 400 °C.
- Temperatura ambiente entre -25 °C y 55 °C para utilizar el dispositivo con la batería
- Tiene integrado acelerómetro, NFC.
- Precio: 230000 ARS a 270000 ARS.

Nota: La temperatura indicada es siempre una estimación y no debe tomarse como una medida exacta. La temperatura se ve afectada por numerosos factores, como la distancia respecto al objeto y la efectividad del objeto a la hora de emitir energía como radiación térmica (emisividad). Las temperaturas también pueden verse afectadas por la hora del día, las condiciones meteorológicas o el reflejo de objetos cercanos.

Sensores de Temperatura de ERBESSD

EPH-T20 Sensor Temperatura Inalámbrico-Infrarrojo

Este Sensor de Temperatura Inalámbrico contiene un sensor IR, además, tiene la comodidad que se lo puede utilizar sin cables. El sensor puede leer temperaturas de hasta +380°C con una distancia de 1 metro usando un termoreceptor de alta tecnología con una impresionante precisión. Se presentan algunas características:



Figura 57: Sensor EPH-T20 (<https://store.erbessd-instruments.com/>)

- Mide temperaturas ambientales y de objetos.
- Valor de alarmas configurable.
- Intervalo de Mediciones configurable.

- Posibilidad de configurar el sensor utilizando un dispositivo móvil.
- Rango de Temperatura Ambiental - 40°C a 125 °C
- Rango de Temperatura Objeto - 70°C a 380 °C
- Precisión de Temperatura $\pm 5^\circ\text{C}$.
- Dimensiones (DxH): 47,63 x 44,18 mm.
- Precio 179.95 USD cada sensor.

EPH-T21 Sensor Termopar Inalámbrico

Busca conectar fácilmente cualquier tipo de sensor termopar (K, J, T, N, R, S, E). Puede grabar de manera precisa desde -210°C hasta 1,800°C.

El Phantom EPH-T21 es un Sensor de Temperatura Bluetooth diseñado para monitorear altas temperaturas en máquinas. Además, el Phantom EPH-T21 también mide temperatura ambiental. Sus características se mencionan a continuación:



Figura 58: Sensor EPH-T21 (<https://store.erbessd-instruments.com/>)

- Mide temperaturas ambientales y de objetos.
- Fácil de instalar.
- Conectividad con cualquier tipo de Termopar.
- Intervalo de alarmas configurable.
- Modo de espera y larga duración de batería.
- Posibilidad de configurar el sensor utilizando un dispositivo móvil.
- Compatibilidad entre sensores: Termopar tipo K, J, T, N, R, S, E.
- Rango de temperatura ambiental: -40°C a 80°C.
- Rango de temperatura del objeto: -210°C a 1800°C.
- Modos de conexión: Bluetooth BLE 5.0.
- Precisión de Temperatura Interna $\pm 5^\circ\text{C}$.
- Dimensiones 10 × 5,8 × 2,8 cm.
- Precio 179.95 USD cada sensor.

Phantom All in One Vibración, Corriente y Temperatura

El Phantom de Temperatura es un sensor de temperatura Bluetooth diseñado para monitorear altas temperaturas. Fácilmente conectable a cualquier sensor termopar tipo K (no incluido). Este sensor de temperatura puede medir de manera precisa temperaturas entre -210°C y $1,800^{\circ}\text{C}$. Simplemente se lo coloca en algún punto de la máquina y se deja que este mida la temperatura. A continuación, se enuncian algunas características:

- Compatibilidad de sensores tipo K.
- Rango de Temperatura Ambiente -40°C a 80°C .
- Rango de Temperatura Objeto - 210°C a 1800°C (Depende del termopar).
- Precisión temp. Interna $\pm 5^{\circ}\text{C}$.
- Modos de conexión: Bluetooth BLE 5.0, Wifi.
- Dimensiones: 100 mm x 77 mm x 26 mm.
- Precio: 395 USD por sensor.

3. Lubricación

A continuación, se presenta el Benchmarking realizado para la técnica de vibración.

Laboratorio Portátil

La mayoría de los laboratorios portátiles tienen el mismo alcance de detección. A continuación, se puede observar un laboratorio portátil.



Figura 59: Laboratorio Portátil (<https://www.oleotec.com.mx/>)

Las pruebas que se pueden efectuar con el son las siguientes:

- Viscosidad del Aceite.
- Temperatura del Aceite.

- Grado de contaminación del Aceite (ISO4406).
- Tipos de contaminantes en el Aceite.
- % de agua en el aceite (0-1.5%).
- Numero básico (TBN).
- Numero de ácido (TAN).
- Detección de partículas magnéticas.

El equipo detector de contaminación de aceite ofrece un sistema rápido y sencillo de analizar en una muestra de aceite, la viscosidad, el % de agua, el grado de acidez, la contaminación y tipo de contaminantes que se encuentran en un sistema.

Este equipo es de gran ayuda, por ejemplo, para monitorear el grado de limpieza antes y después de efectuar la filtración de un sistema hidráulico o de lubricación.

Una guía suministrada por Rocky Mountain, Filtration Solution ayudaría también en gran medida a los operadores a interpretar los resultados y les daría la posibilidad de interpretar una falla incipiente.

Análisis en laboratorios:

Espectro metalografías

Esta técnica se emplea para detectar y cuantificar trazas de elementos metálicos que se encuentran en la muestra del lubricante. Se realiza para medir partículas metálicas menores a 10 micras. Esta técnica permite interpretar información sobre desgaste, contaminantes y aditivos, ya que se puede visualizar estos elementos en la muestra y sacar conclusiones. Un inconveniente es que solo se visualizan partículas menores a 10 micras, es decir, que si hay partículas de mayor tamaño que puedan indicar un mayor desgaste con esta técnica no se visualizan.

Espectrometría de Emisión (ICP)

La espectrometría de emisión o ICP (Inductively Coupled Plasma) consiste en emplear una muestra del lubricante, esta se calienta y se lleva a un estado de plasma. En este estado, los elementos contenidos en el lubricante emiten unas ciertas radiaciones en el espectro visible y ultravioleta. La intensidad de radiación recibida, es separada por difracción en diferentes parámetros de longitud de onda, esto permite calcular las concentraciones de diferentes elementos contenidos en la muestra del lubricante. Esta técnica permite mediciones de concentraciones de 1 a 1.000 ppm (partes por millón) y se emplea para medir concentraciones de aditivos, metales de desgaste y contaminantes. Por lo que es útil para la detección de concentraciones y detección de elementos. Sin embargo, a mayor cantidad de elementos, mayor

emisión de líneas en el espectro, produciendo interferencias espectrales que dificultan la identificación de elementos.

Análisis de espectrometría por infrarrojos

Los análisis infrarrojos son una forma de espectroscopía de absorción restringida en la región longitud de ondas espectrales infrarrojas. La prueba consiste en hacer atravesar a un haz de luz infrarroja una muestra de aceite usado, esto genera un espectro infrarrojo que se reproduce en una gráfica. Cada aceite tiene su propio espectro característico, por lo que esta técnica se reduce a la comparación del espectro del aceite nuevo y el usado, las diferencias entre las gráficas de los espectros muestran algunos de los cambios de los componentes que conforman el lubricante.

En función de estos cambios se puede medir la cantidad de TBN, estas siglas significan: número total de bases, generalmente se aplican a los aceites del cárter del motor diésel. Representa el nivel de reserva de alcalinidad disponible para neutralizar los ácidos formados durante el proceso de combustión y puede introducirse a través de gases de escape recirculados. Entonces, observando los cambios en la cantidad de TBN, se puede estimar cuanto se han consumido, el contenido de agua o la oxidación del aceite.

Ferrografía Analítica

Es una técnica importante para detectar la composición, se utiliza para captar partículas metálicas en el rango de 0.1 a 500 micras, por lo que el campo de amplitud no solo cubre el campo de desgaste anormal (10 a 100 micras) sino que también incluye el rango de espectrografía.

Con este sistema, se clasifican las partículas metálicas según la forma y el tamaño, determinando así el tipo de desgaste.

El principio de funcionamiento de la ferrografía analítica, consiste en separar sistemáticamente las partículas en suspensión en el lubricante sobre una placa de vidrio. Esta placa es examinada bajo el microscopio para distinguir tamaño, concentración, composición, morfología y condición superficial de las partículas ferrosas y no ferrosas que caracterizan el desgaste.

Identificación de las partículas y tipos de contaminación:

- Partículas blancas no ferrosas: frecuentemente son de aluminio o cromo. Aparecen blancas brillantes antes y después del tratamiento térmico. Están

depositadas aleatoriamente en la plaqueta con grandes partículas detenidas por las cadenas de las partículas ferrosas.

- Partículas de cobre: usualmente aparecen como amarillo brillante antes y después del tratamiento térmico, aunque puede cambiar a verde-gris. Estas también estarán depositadas aleatoriamente en la plaqueta con partículas grandes a la entrada y pequeñas a la salida.
- Partículas del babbitt: consisten en partículas delgadas de color gris (se ven como trozos de lata). Después del tratamiento siguen grises, pero con puntos azules y rojos, y más pequeñas con apariencia motosa. Su distribución es aleatoria.
- Contaminantes: usualmente son residuos de polvo principalmente silicio. Aparecen como unos cristales que son fácilmente identificados con la luz transmitida (verde). Su distribución es aleatoria.
- Fibras: causadas por desprendimientos de filtros y contaminación externa. Son largas cadenas en variedad de colores y usualmente no cambian su apariencia después del tratamiento térmico. Algunas veces esas partículas actúan como filtro colectando otras partículas. Pueden aparecer en cualquier parte del ferrograma, aunque tienden a estar en la salida.
- Partículas ferrosas: se identifican principalmente usando la luz roja (reflejada) y la luz blanca de la microscopia. La luz transmitida es totalmente bloqueada por la partícula.

Según la forma de la partícula se determina el tipo de desgaste:

- Partícula redondeada: Indica desgaste abrasivo.
- Partícula alargada o puntiaguda: Indica que la raíz del desgaste es más crítica.

Ventajas y desventajas:

Se detectan problemas mucho más tempranamente que con el análisis de espectrometría. Sin embargo, es costoso en comparación con otros métodos de análisis. A su vez, requiere tiempo y habilidad del analista.

Contador de Partículas

Este sistema funciona con una base óptica láser que permite la medición absoluta de las partículas con un tamaño mayor a dos micras en una muestra de aceite.

Estos equipos trabajan bajo las normas ISO de filtración como la ISO 4406 que especifica el grado de limpieza de un aceite con base a tres números:

- El primer número indica el número de partículas mayores o iguales a 2 micras
- El segundo número indica el número de partículas a 5 micras
- El tercer número indica el número de partículas a 15 micras

Nota: Todos estos conteos se realizan en una muestra de 100 ml de aceite.

Anexo II Gráficos de las mediciones de vibración

En este Anexo, podemos observar los espectros de las mediciones que se llevaron a cabo. Para los espectros analizados con Sigview, a la señal obtenida se le realizaron filtros para obtener una señal libre de ruido espurios.

Primero se la normalizo, luego se acoto su tiempo de lectura a 25 segundos como máximo, se la filtro el ancho de banda hasta un valor de 500 Hz, se la escalo y finalmente se le aplica a la señal la Transformada de Fourier (FFT). Donde la FFT se obtiene por la descomposición de una onda periódica de tiempo real en sus componentes armónicos. Con estos filtros se puede obtener el espectro de las siguientes Figuras.

Para el caso del programa Catman, los filtros son similares, y también se le aplica a la señal la FFT.

De los espectros de la aplicación Vibration Isolator Pro, se sabe que el programa utiliza un código para obtener a través de la FFT un espectro.

A continuación, se pueden ver los espectros, especificando el punto sobre el cual se obtuvieron. Notar, como se mencionó con anterioridad que los picos son coincidentes en la gran mayoría de los espectros cuando se comparan los obtenidos con uno y otro programa.

Punto 1:

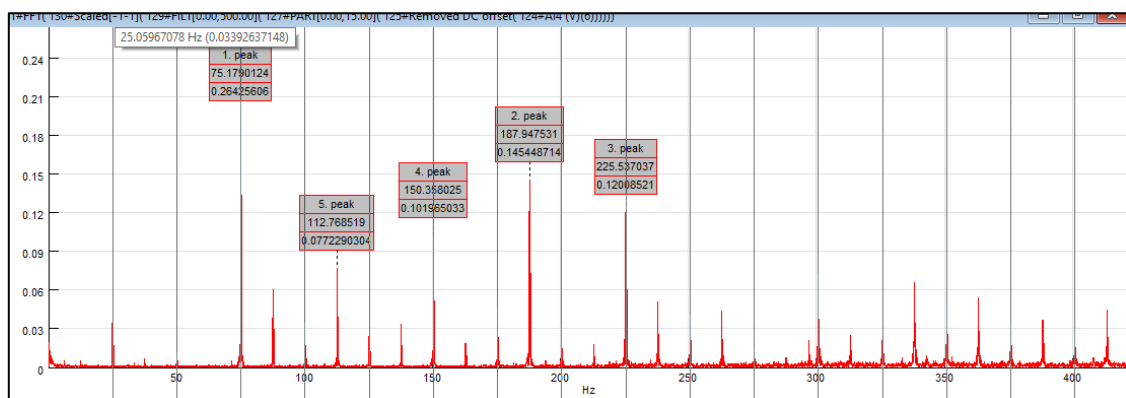


Figura 60: Espectro del punto 1, Sigview

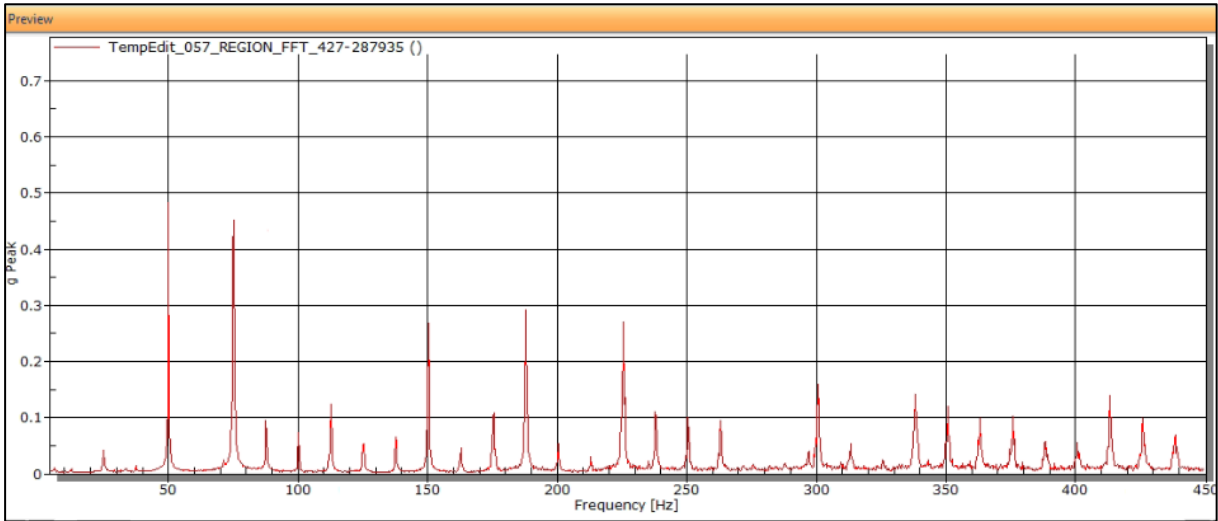


Figura 61: Espectro del Punto 1, Catman

Punto 2:

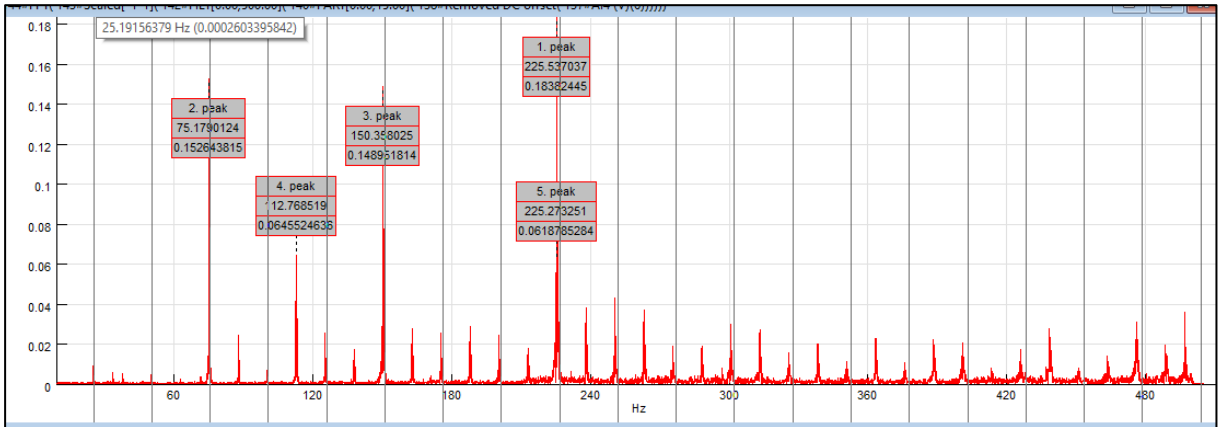


Figura 62: Espectro del Punto 2, Sigview

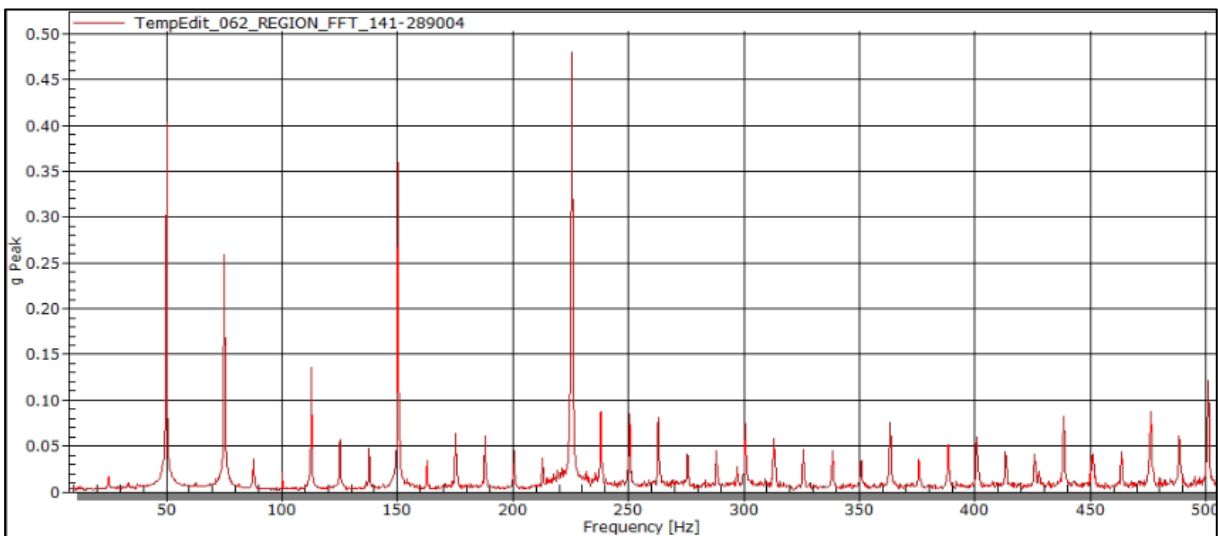


Figura 63: Espectro del Punto 2, Catman

Punto 3:

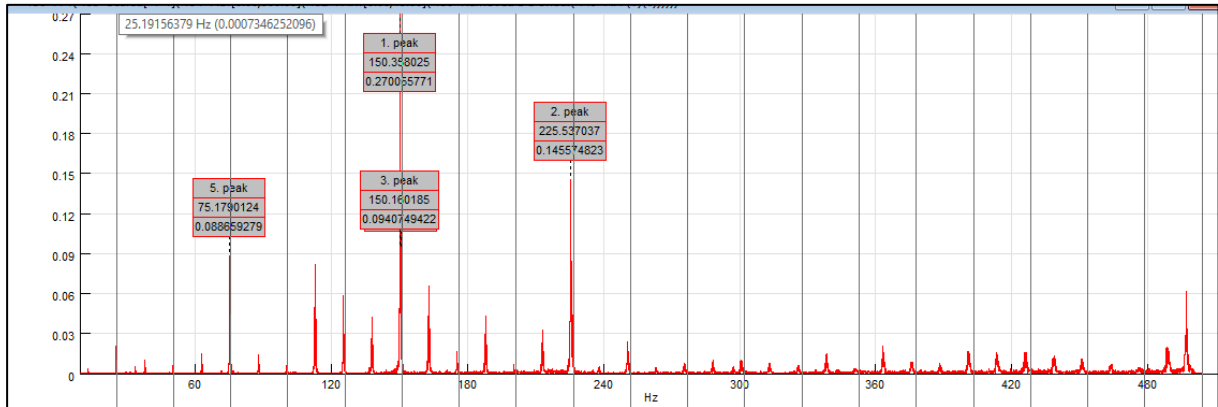


Figura 64: Espectro del Punto 3, Sigview

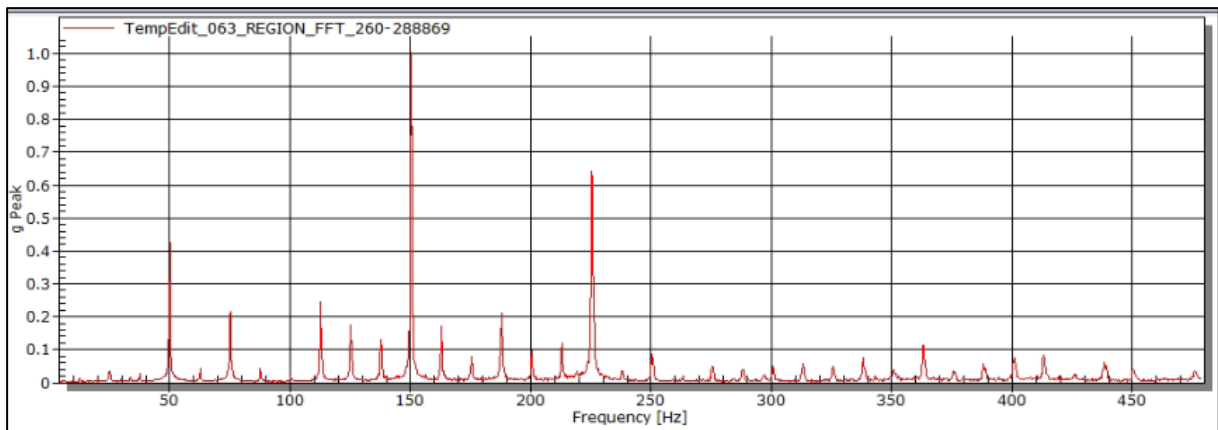


Figura 65: Espectro del Punto 3, Catman

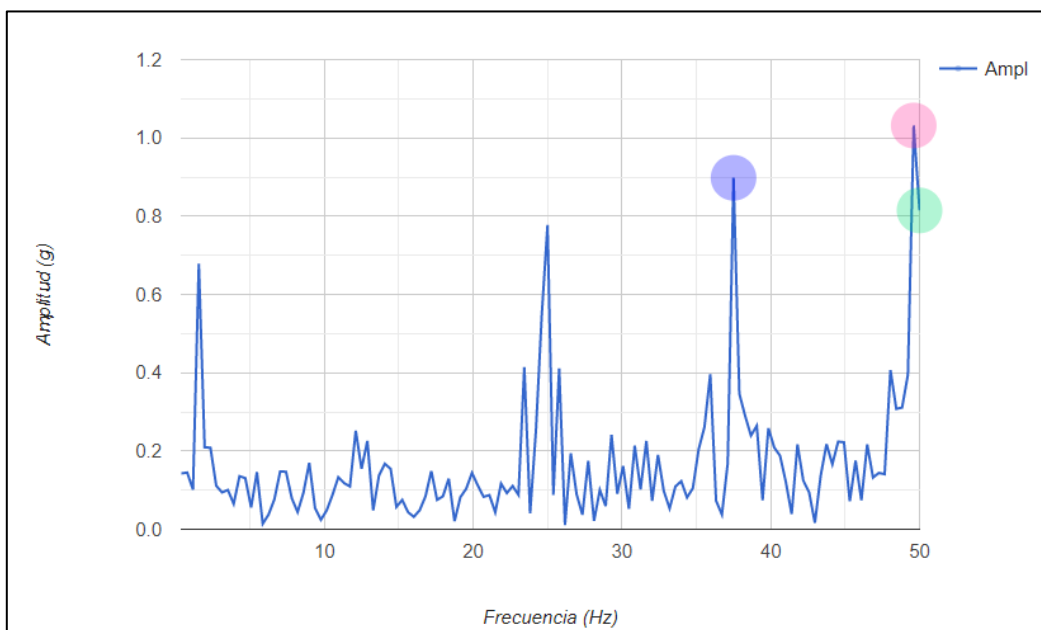


Figura 66: Espectro del Punto 3, Vibration Isolator Pro

Punto 4:

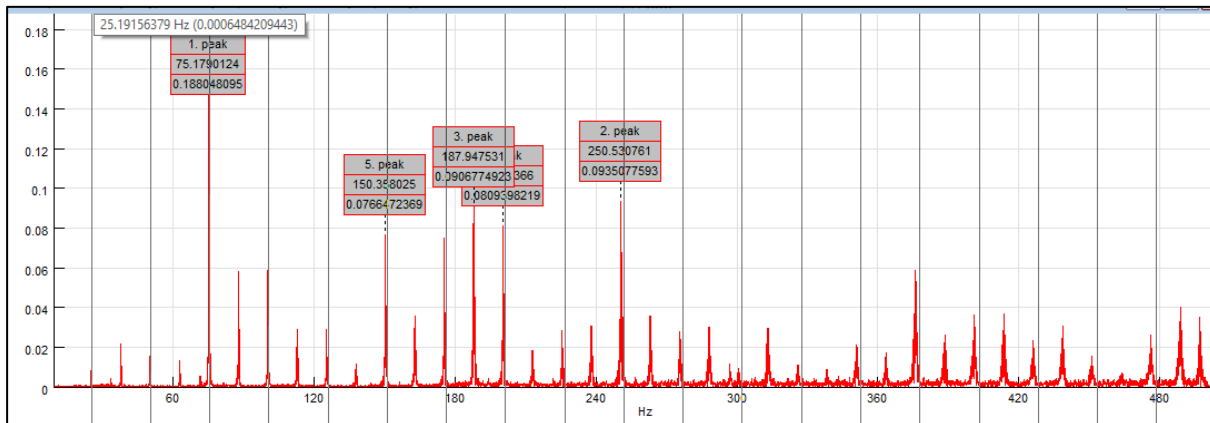


Figura 67: Espectro del Punto 4, Sigview

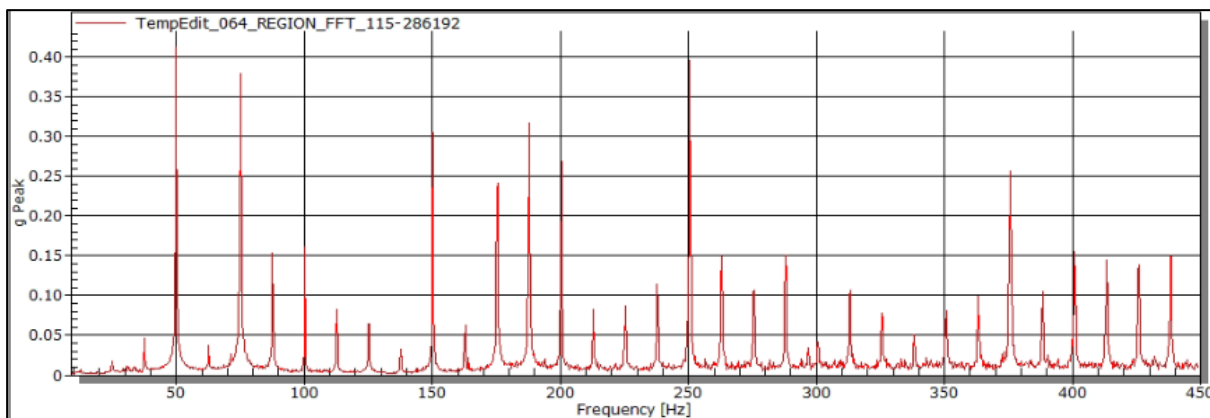


Figura 68: Espectro de Punto 4, Catman

Punto 5 z:

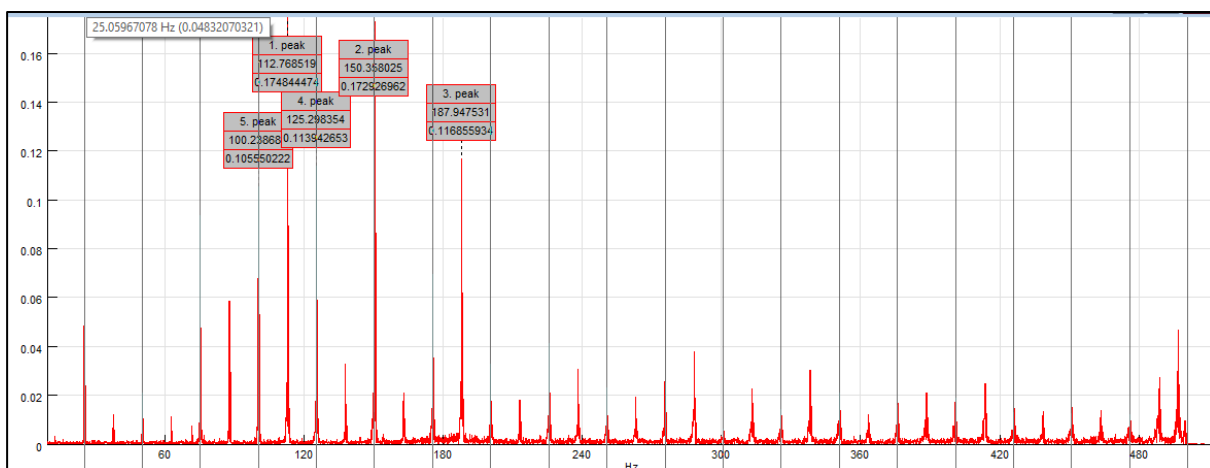


Figura 69: Espectro del Punto 5 z, Sigview

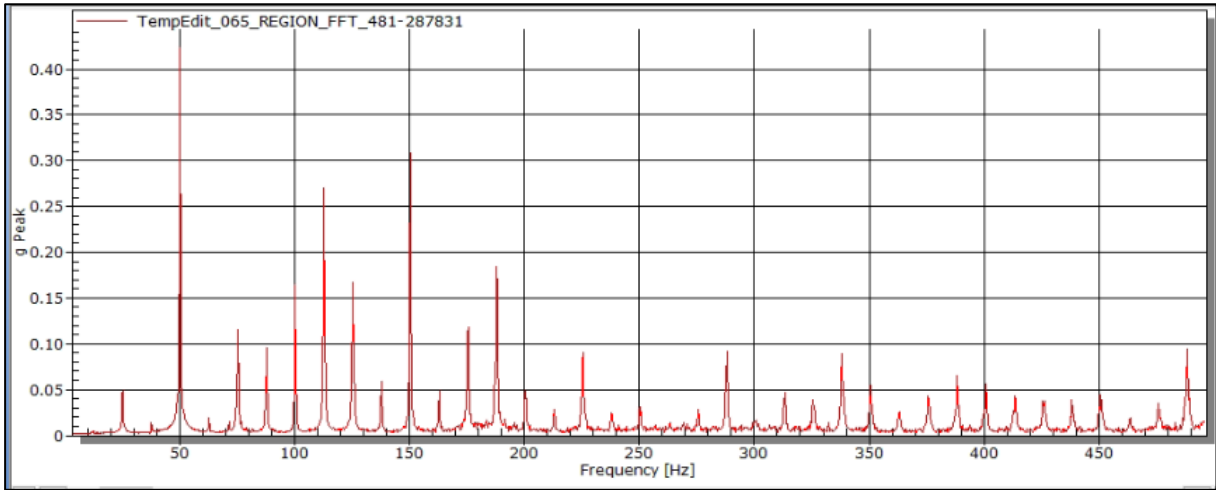


Figura 70: Espectro del Punto 5 z, Catman

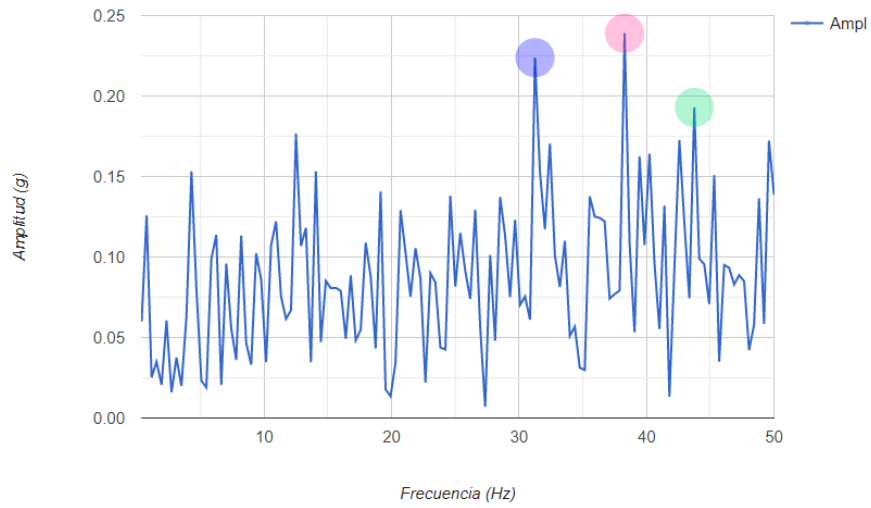


Figura 71 Espectro del Punto 5 z, Vibration Isolator Pro

Punto 5 y:

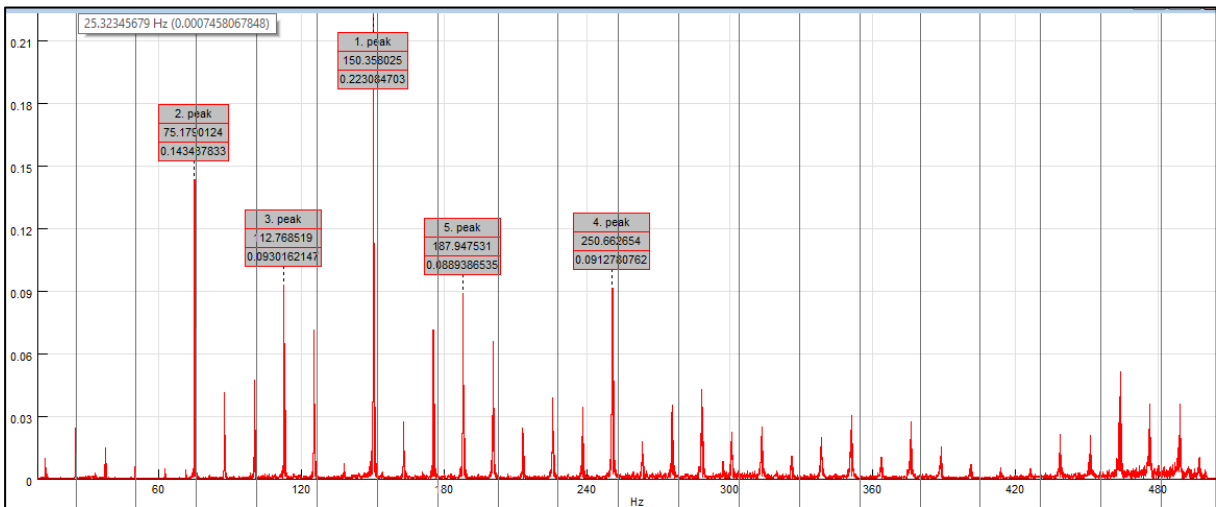


Figura 72: Espectro del Punto 5 y, Sigview

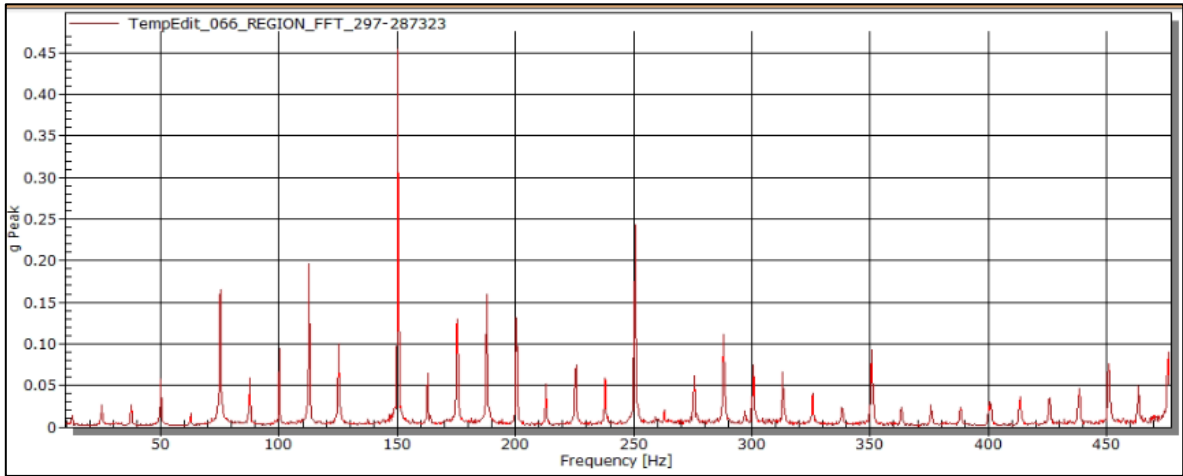


Figura 73: Espectro del Punto 5 y, Catman

Punto 6:

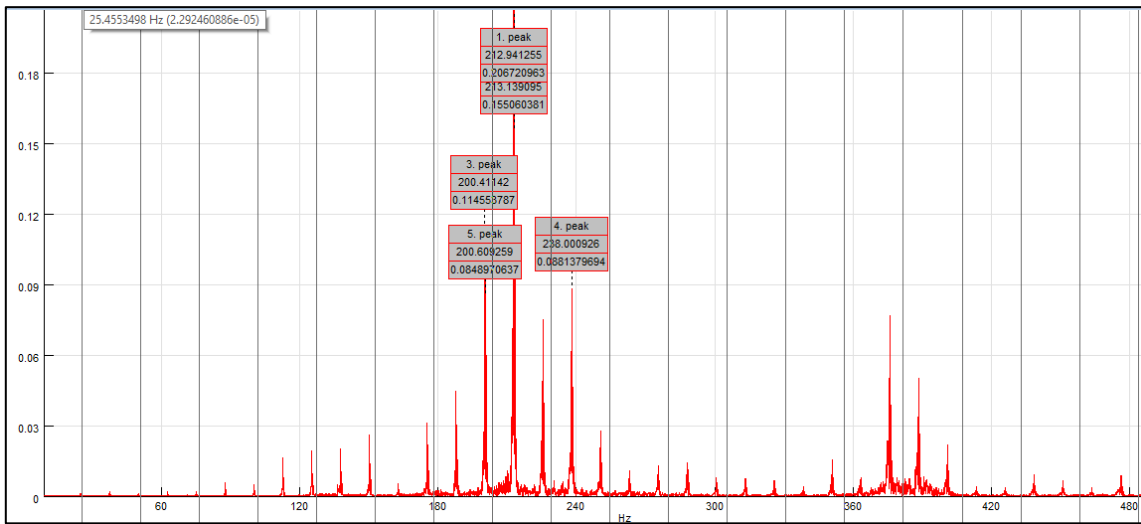


Figura 74: Espectro del Punto 6, Sigview

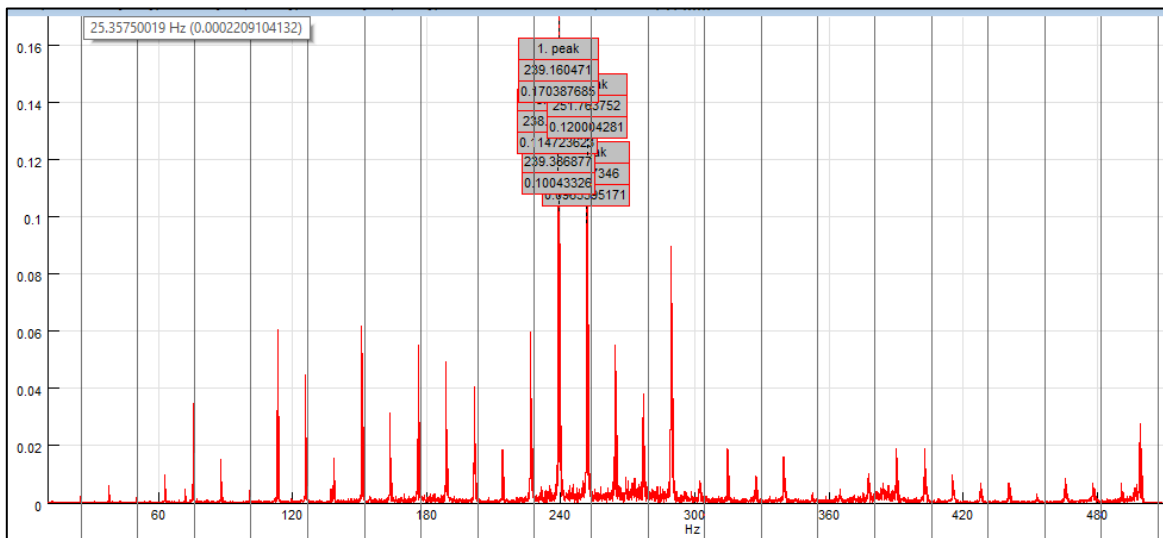


Figura 75: Espectro del punto 6, Sigview

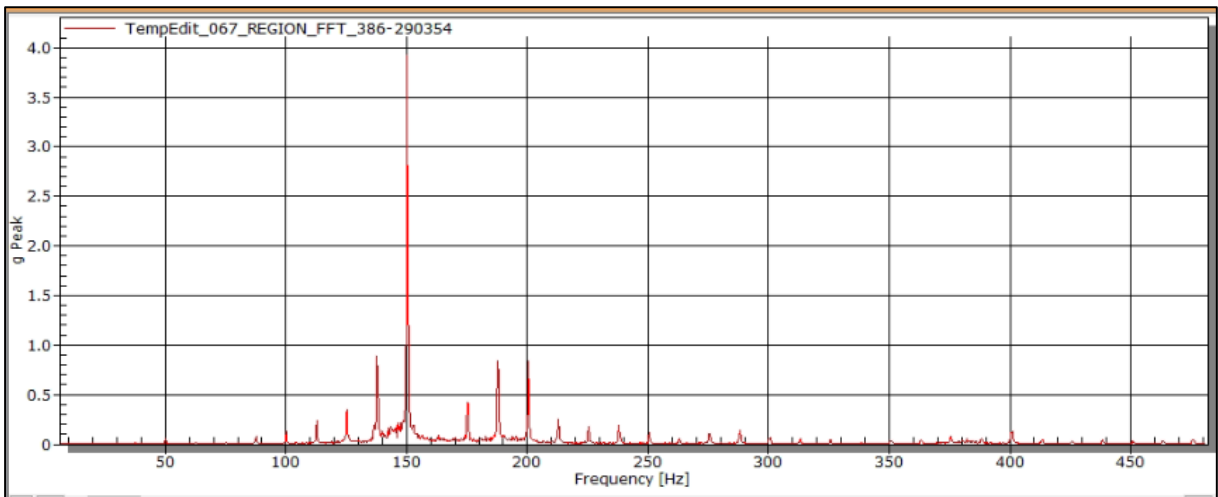


Figura 76: Espectro del punto 6, Catman

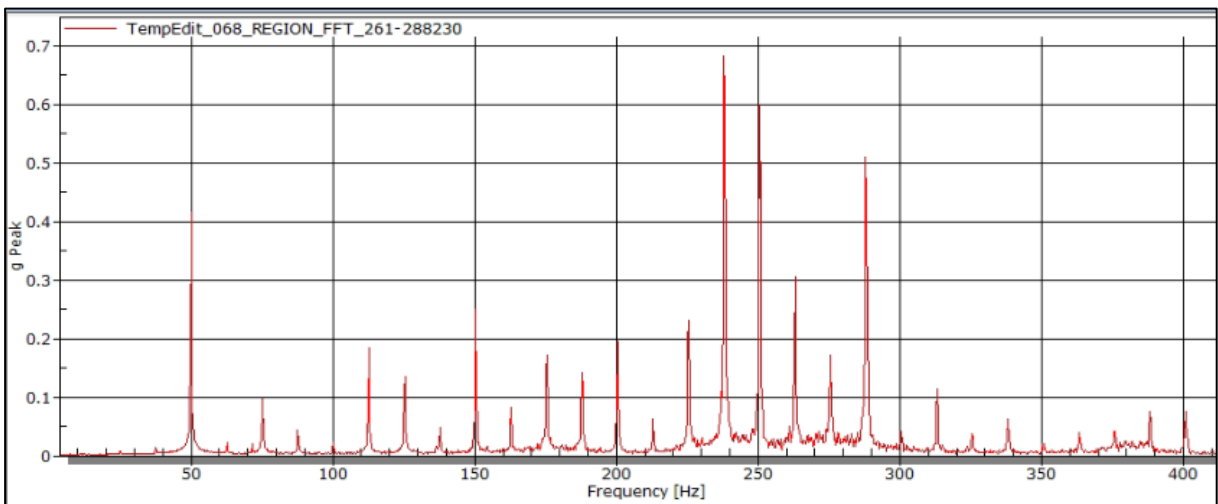


Figura 77 Espectro del punto 6, Catman

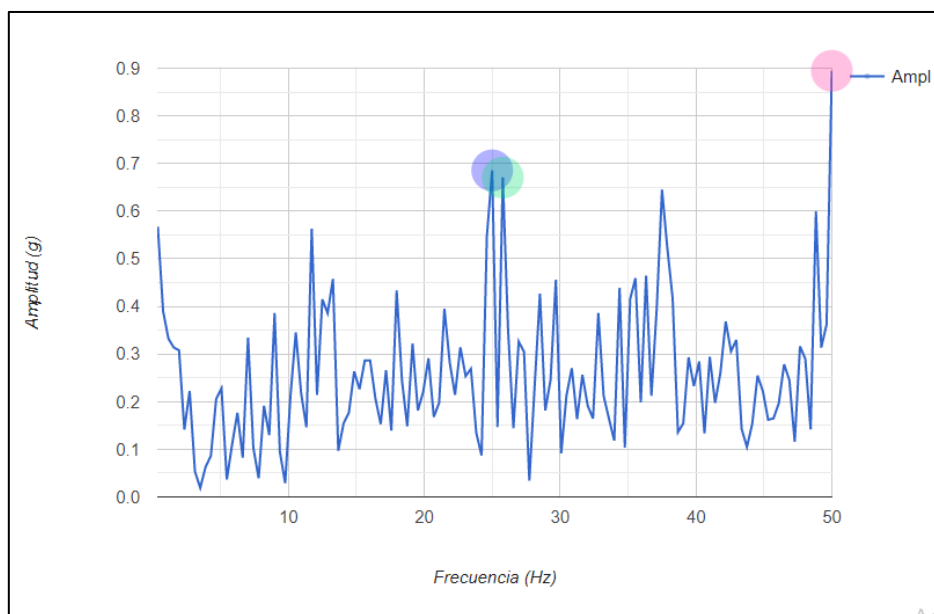


Figura 78: Espectro del punto 6, Vibration Isolator Pro

Punto 6 y:

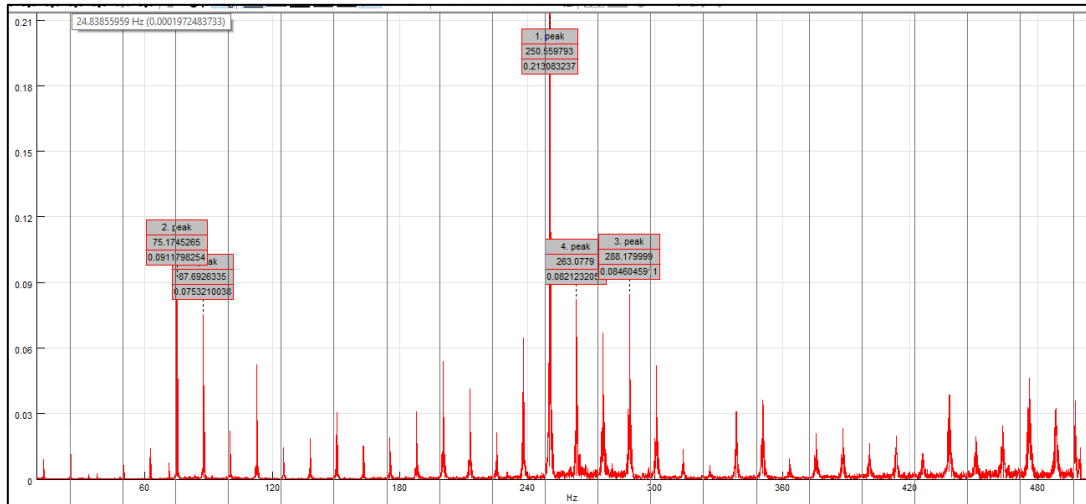


Figura 79: Espectro del Punto 6 y, Sigview

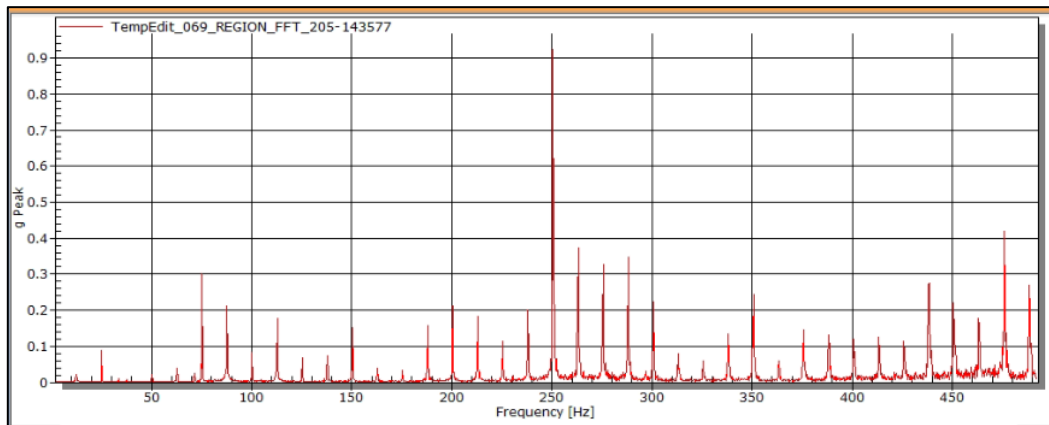


Figura 80: Espectro del Punto 6 y, Catman

Punto 6 z:

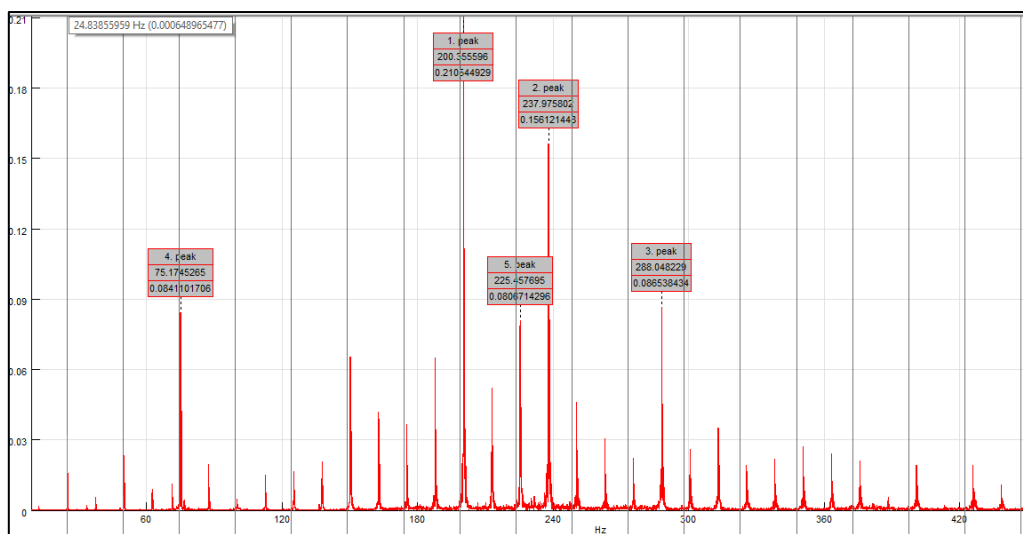


Figura 81: Espectro del Punto 6 z, Sigview

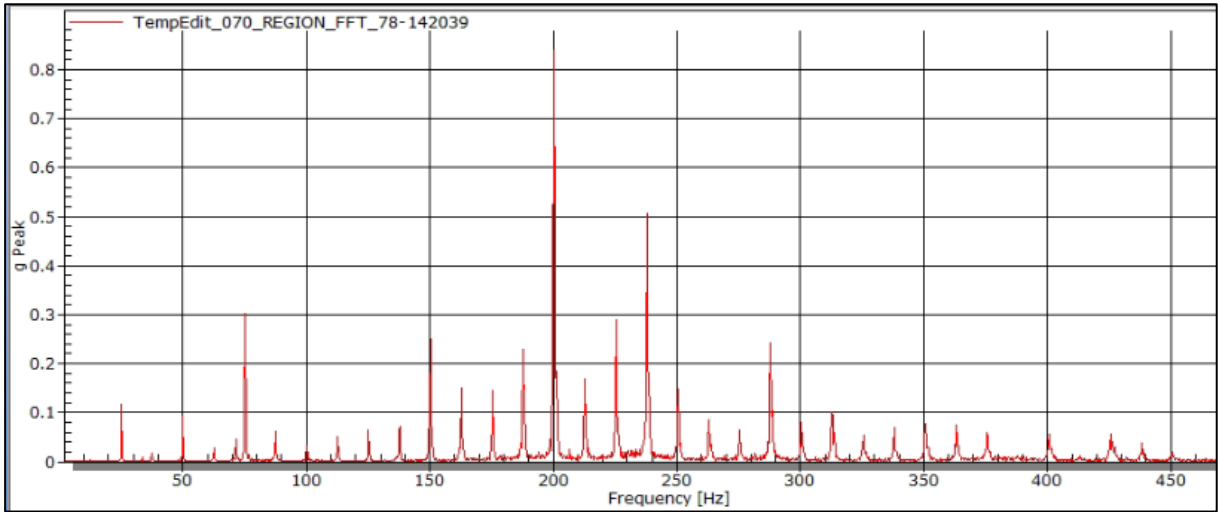


Figura 82: Espectro del Punto 6 z, Catman

Punto 7:

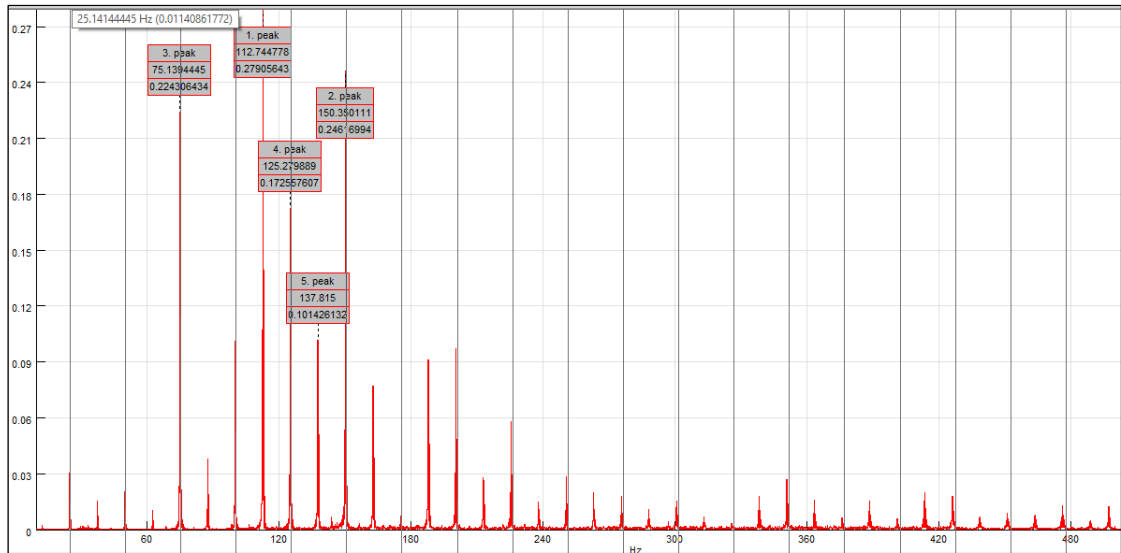


Figura 83: Espectro del Punto 7, Sigview

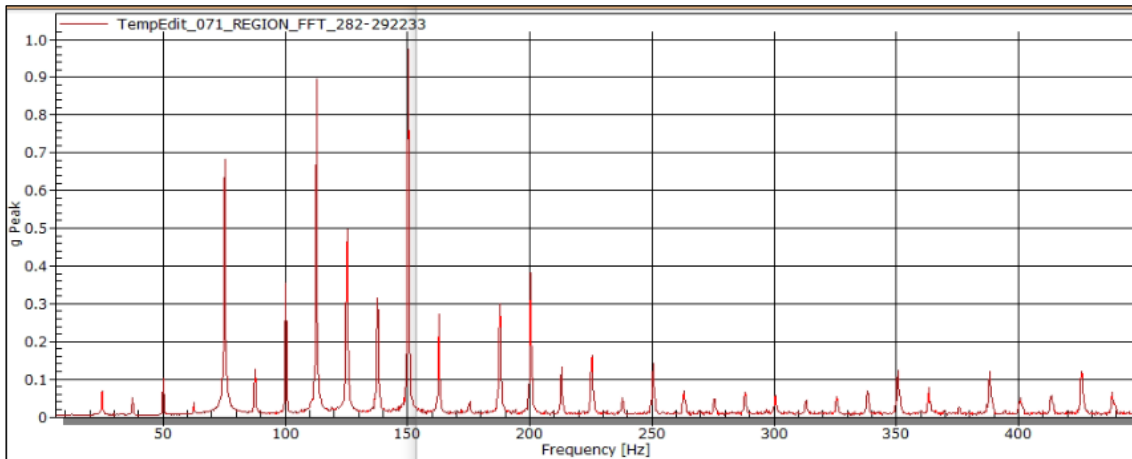


Figura 84: Espectro del Punto 7, Catman

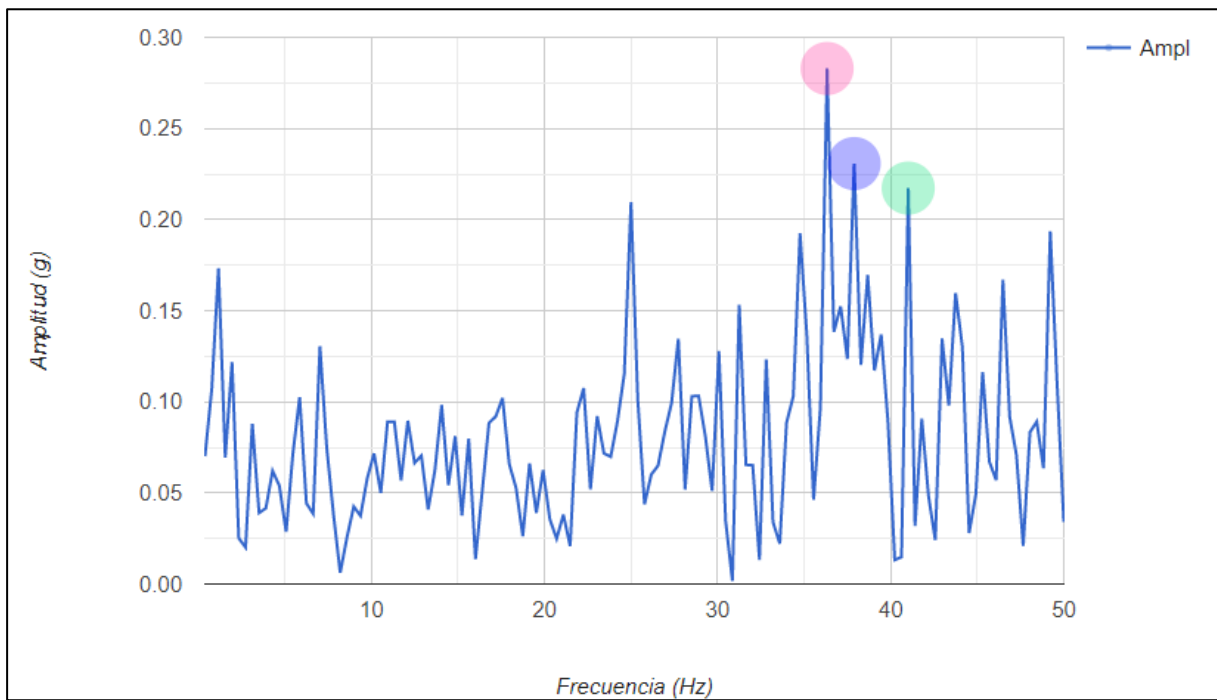


Figura 85: Espectro del Punto 7, Isolator Vibration Pro

Anexo III Gráficos de Dispersión y Matrices de Correlación

En esta sección podemos observar los resultados completos que se obtuvieron a la hora de realizar los gráficos de dispersión y las matrices de correlación para las distintas técnicas.

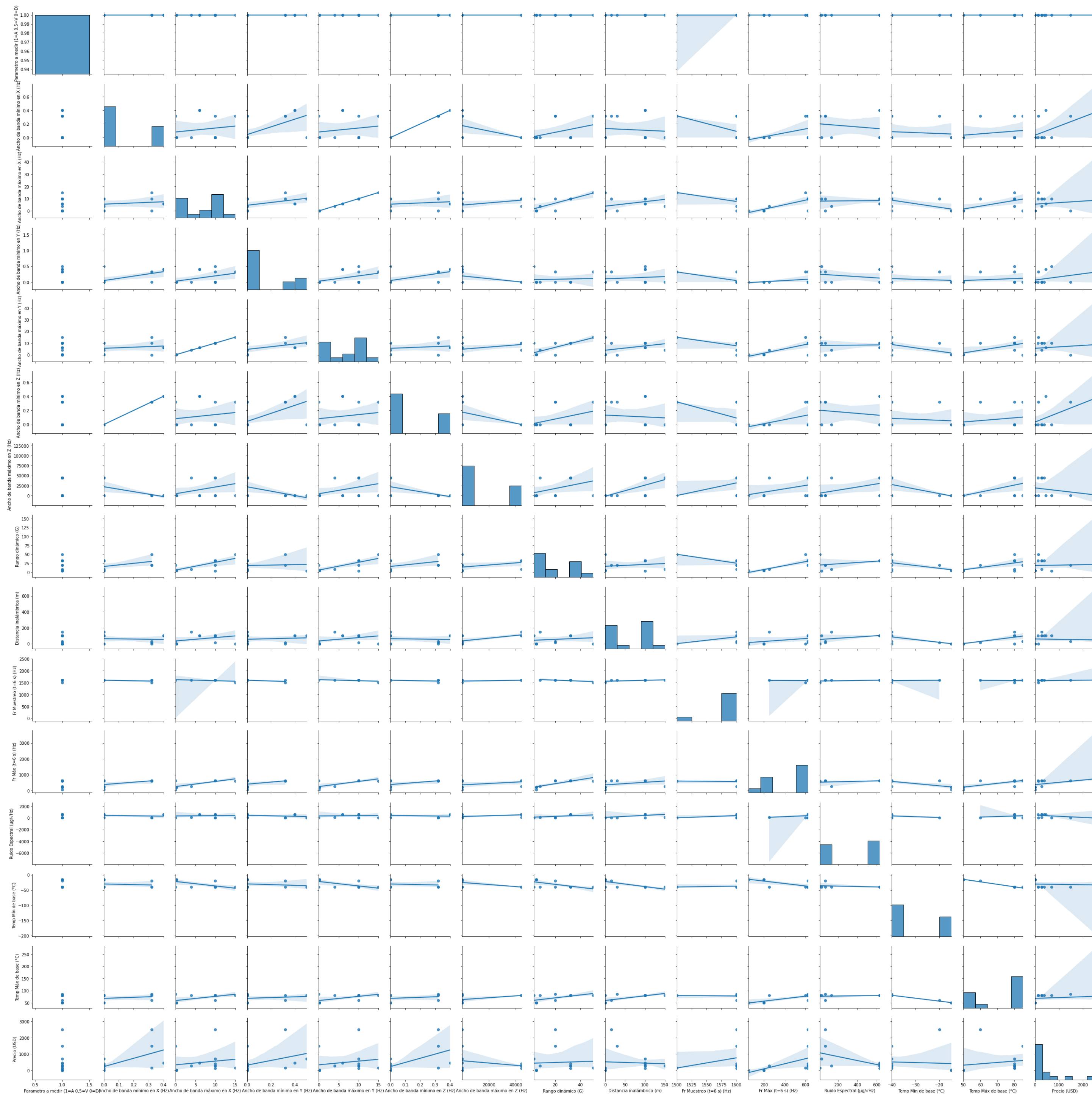


Figura 86: Gráficos de Dispersión entre los distintos Parámetros de los Equipos de Vibración

Parametro a medir (1=A 0,5=V 0=D) -

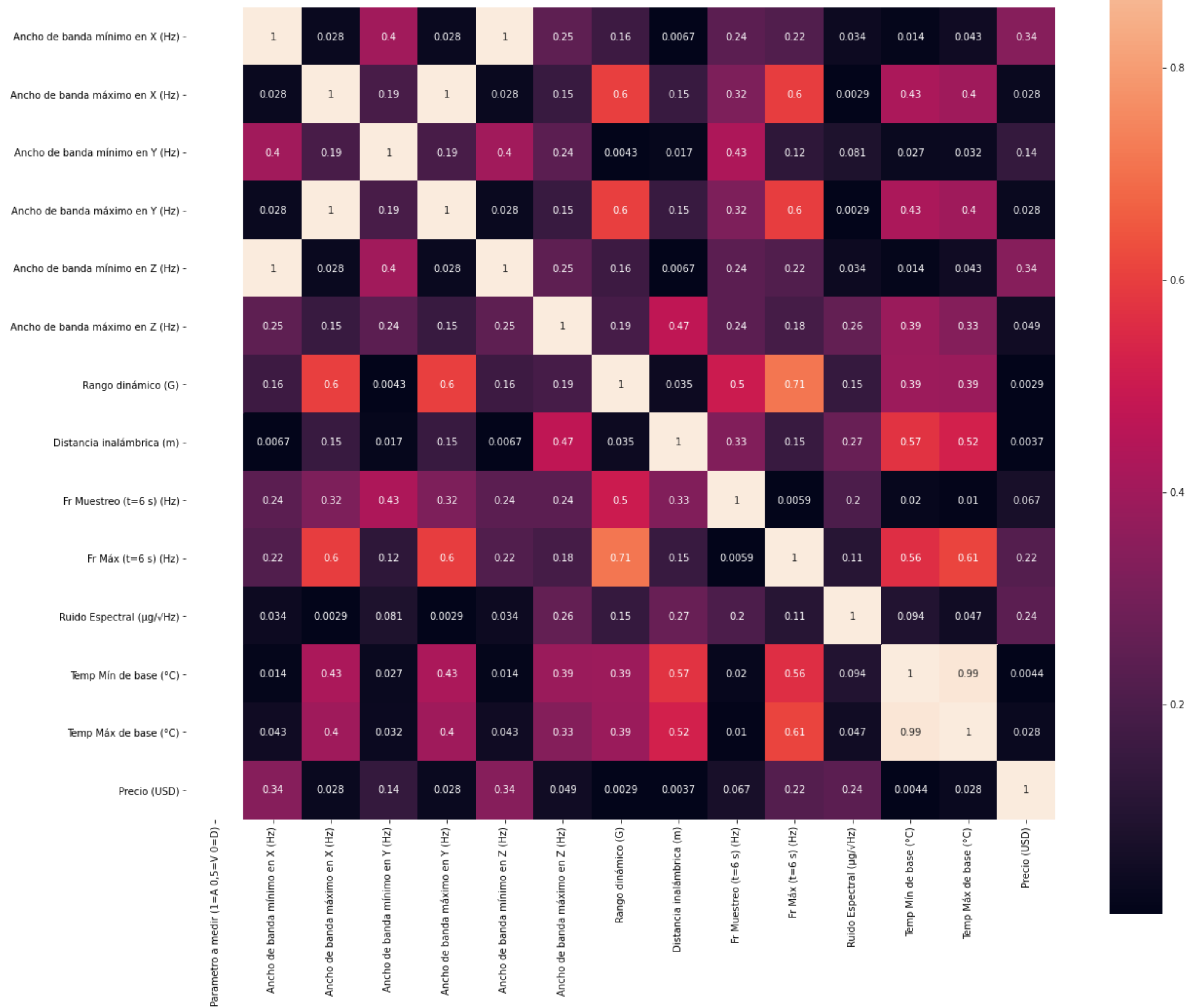


Figura 87: Matriz de Correlación entre los distintos Parámetros de los Equipos de Vibración

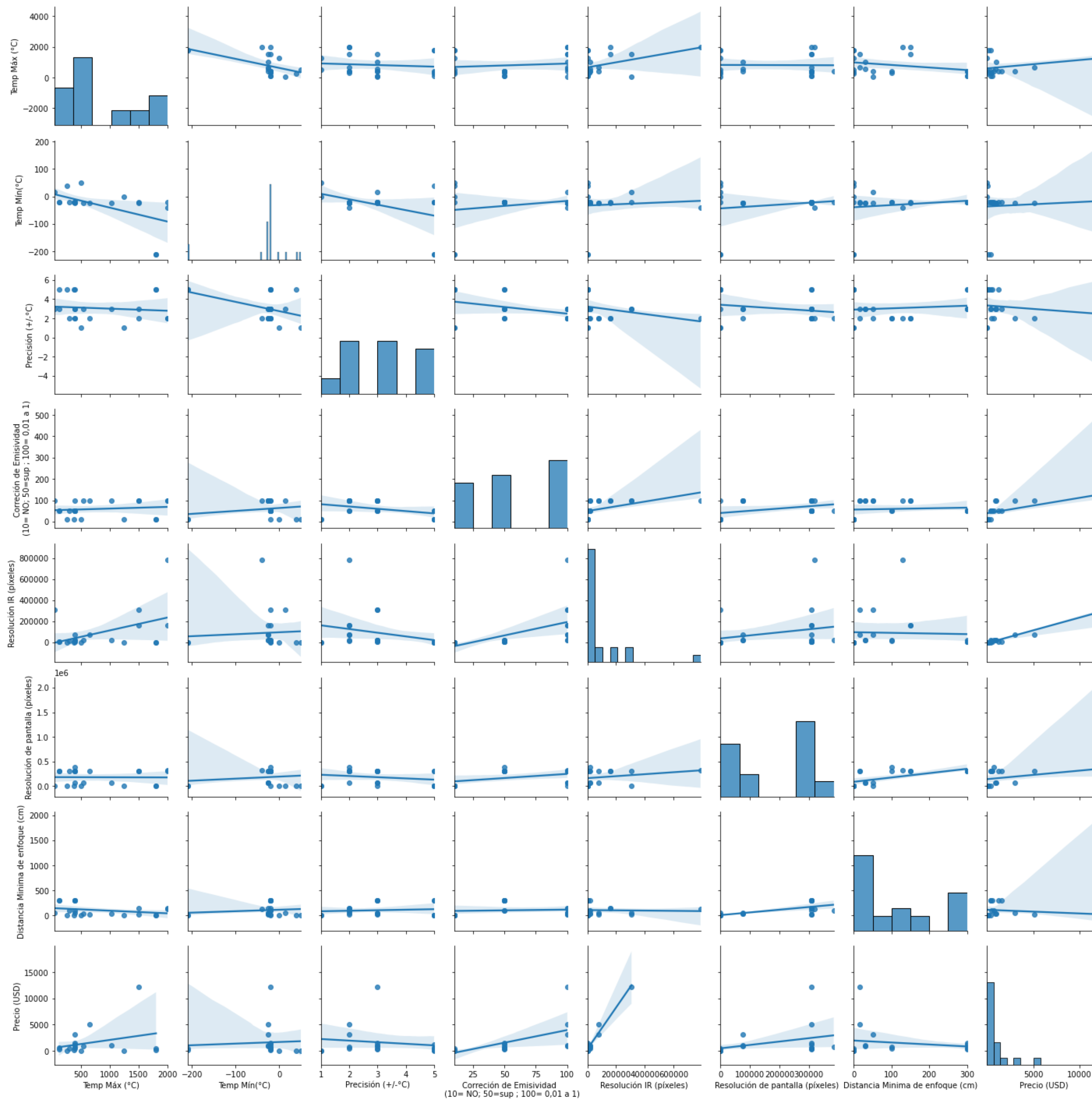


Figura 88: Gráficos de Dispersión entre los distintos Parámetros de los Equipos de Termografía

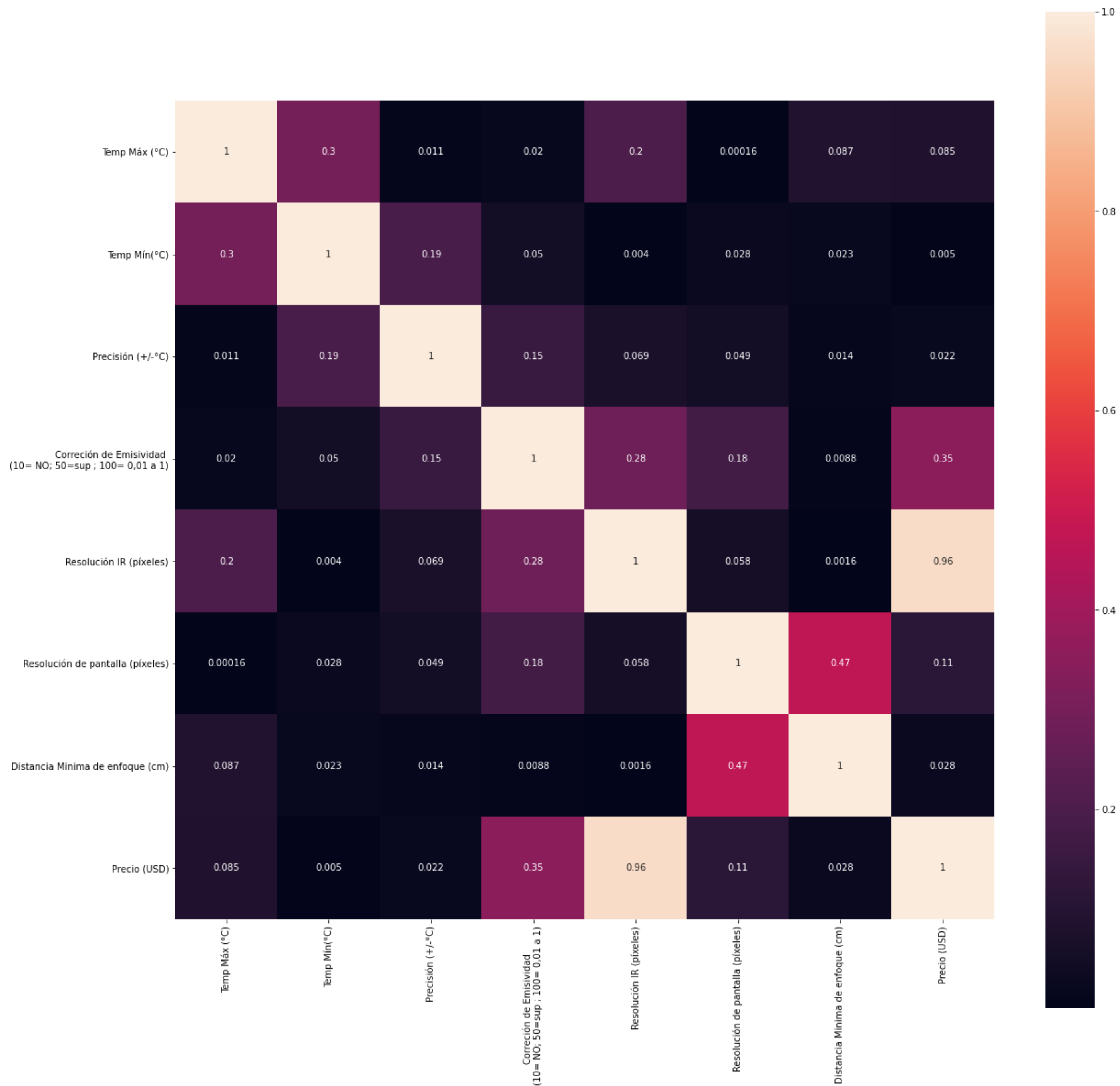


Figura 89: Matriz de Correlación entre los distintos Parámetros de los Equipos de Termografía

Anexo IV Referencias

- Heap y Nowlan. (1978), *Reliability Centered Maintenance*. Department of Commerce.
 - Troffé Mario G. (2017). *HEGI, Herramientas de Gestión Integrada*. Editorial Dunken
 - Norma ISO 14224. (2016). *Industria de Petróleo y Gas – Recolección e Intercambio de Datos de Confiabilidad y Mantenimiento de Equipos*.
 - Norma ISO 10816. (2015). *Condiciones y procedimientos generales para la medición y evaluación de vibraciones*.
 - Norma ISO 8528-9. (2017). *Grupos electrógenos de corriente alterna accionados por motor de combustión interna alternativo*.
 - Norma ISO 2372. (1974). *Guías para aceptación de la amplitud de vibración*.
 - Norma ISO 18436. (2003). *Monitoreo de condiciones de vibración y Diagnóstico de máquinas*.
 - Norma ISO 13373 (2017). *Monitoreo y diagnóstico del estado de las máquinas - Monitoreo del estado de vibraciones*.
 - Norma ISO TEC 108 SC 5 WG4. (1993). *Monitoreo y diagnóstico basados en tribología*.
 - Norma ISO 4406 (1999). *Código de Limpieza*.
 - Guía de Rocky Mountain. (2000?). *Filtration Solution*.
 - Glen White. (2000?). *Introducción al Analisis de Virbación*. Azima Dli
 - AMC Mecanocaucho, (<https://www.mecanocaucho.com/es/>)
 - Tienda PlayStore, (https://play.google.com/store?hl=es_AR&gl=US)
 - Productos Acoem, (<https://www.acoem.com>)
 - Productos ERBESSD, (<https://store.erbessd-instruments.com/>)
 - Productos HBM, (<https://www.hbm.com/es/10121/instrumentos/>)
 - Productos Semapi, (<https://www.es.semapi.com/>)
 - Sensores de temperatura Termopar, de temperatura por resistencia, (<https://es.omega.com/>)
 - Sensores por cambio de estado, (<https://termometros.com.ar/>)
 - Productos Flir, (<https://www.flir.com.mx/>)
 - Productos Catphones, (<https://www.catphones.com/es-ar/>)
 - Laboratorio portátil, (<https://www.oleotec.com.mx/laboratorio-portatil/>)
-