

**Mantenimiento Industrial: Implementación de Análisis de Vibraciones y
Termografía Infrarroja en Maquinas Rotantes**



RODRIGUEZ GUSTAVO OMAR

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

AÑO 2026

Mantenimiento Industrial: Implementación de Análisis de Vibraciones y Termografía Infrarroja en Maquinas Rotantes

RODRIGUEZ GUSTAVO OMAR

Director: **Mg.Ing. AUDISIO Orlando Anibal**

Co-director: Ing. **ROSSI, Mariano Nicolás**

Presentado a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Comahue como
requisito para la obtención del grado de
INGENIERO MECÁNICO

Neuquén - Argentina

AÑO 2026

Mantenimiento Industrial: Implementación de Análisis de Vibraciones y Termografía Infrarroja en Maquinas Rotantes

RODRIGUEZ, GUSTAVO OMAR

Aprobado en fecha X de XXXXX de 2026

Tribunal evaluador:

- Ing. TROFFÉ, Mario.
- Ing. ZAPPA, Andrés.
- Ing. RAMOSKA, Leandro.

Este proyecto está dedicado a:

Mis padres, Griselda y Daniel, que con su amor y apoyo incondicional nunca dejaron de motivarme y alentarme en cada paso de mi vida, a mis hermanos, Paula, Eliana y Federico que me dieron las fuerzas y energía para terminar esta etapa, a mis amigos que siempre confiaron en mí, sin ellos nada de esto hubiese sido posible, ni mucho menos culminado.

¡Eternamente gracias!

AGRADECIMIENTOS

La introducción al mundo de la formación profesional, es la suma de muchos factores y responsabilidades que no se adquieren y contemplan cuando se es adolescente, sin embargo, el intervalo de vida transcurrido en esta odisea, marca en cada persona momentos imborrables.

Ser breve para describirlo, es muy difícil, ya que muchísimas personas comparten nuestro camino, pero comienzo por dar las gracias a cada profesor que escuche, a cada uno que me aconsejo y ayudo a ser mejor persona y estudiante, a mis amigos adolescentes y estudiantes, por compartirnos conocimientos y fuerzas entre mates y resúmenes, a las instituciones por brindarnos ese lugarcito para crecer cada día un poco más, y particularmente a esa forma tan exquisita de conocer personas que de no haber incurrido en esta carrera hubiese sido posible conocer, gracias de corazón y alma.

A Orlando Audisio por brindarme su apoyo y conocimiento mezclado entre risas y muletillas, generando siempre ese clima sin barreras entre docente y alumno, apoyándome en momentos duros que nos da la vida, ¡gracias por estar!

A Mariano Rossi, amigo, y compañero de vida, con incontables anécdotas compartidas, a cada amigo y compañero que se cruzó en este viaje tan arduo pero nutrido de tantas experiencias inolvidables. Es un ciclo que se cierra, y esto solo es posible si el trabajo es en conjunto, eternamente agradecido.

Mantenimiento Industrial: Implementación de Análisis de Vibraciones y Termografía Infrarroja en Maquinas Rotantes

Autor: RODRIGUEZ, GUSTAVO OMAR

Director: AUDISIO ORLANDO ANIBAL

Co-Director: ROSSI, MARIANO NICOLÁS

Resumen

El presente proyecto integrador profesional (PIP) tiene como objetivo principal demostrar la aplicación práctica de dos técnicas de mantenimiento predictivo ampliamente utilizadas en diversas industrias regionales (frutícola, papelera, Oil & gas, entre otras).

El trabajo se estructura en dos partes principales, a saber:

A. Marco Teórico: Se abordan los fundamentos físico-matemáticos que rigen el funcionamiento de las herramientas de mantenimiento predictivo seleccionadas.

B. Sección Práctica y Experimental: Se lleva a cabo la aplicación real de las herramientas mediante la inspección y mediciones en equipos industriales operativos ubicados en las provincias de Neuquén y Río Negro.

Donde el proceso práctico se desarrolló en las siguientes fases:

I. Inspección Industrial: Se inspeccionaron diversas industrias de la región para identificar y registrar detalladamente los equipos que componen su inventario.

II. Medición y Registro: Se realizaron las mediciones pertinentes a los equipos seleccionados, utilizando las herramientas de mantenimiento predictivo.

III. Elaboración de Informes: Finalmente, se generó un informe completo que documenta las anomalías detectadas en los equipos y se establecieron recomendaciones específicas sobre las acciones de mantenimiento que la organización debe implementar para optimizar su operatividad.

Palabras clave: Mantenimiento correctivo, preventivo, predictivo, Técnicas de mantenimiento predictivo, Análisis de vibraciones, Termografía infrarroja, Detección y análisis de falla, Propuestas de mantenimiento.

Industrial Maintenance: Implementation of Vibration Analysis and Infrared Thermography in Rotating Machines

Author: RODRIGUEZ, GUSTAVO OMAR

Advisor: AUDISIO ORLANDO ANIBAL

Co-Advisor: ROSSI, MARIANO NICOLÁS

Summary:

The main objective of this professional integrative project (PIP) is to demonstrate the practical application of two predictive maintenance techniques widely used in various industries such as (fruit, paper, Oil & gas, among others).

The work is structured in two main parts, namely:

A. Theoretical Framework: The physical-mathematical foundations that govern the operation of the selected predictive maintenance tools are addressed.

B. Practical and Experimental Section: The actual application of the tools is carried out through inspection and measurements on operational industrial equipment located in the provinces of Neuquén and Río Negro.

Where the practical process was developed in the following phases:

I. Industrial Inspection: Various industries in the region were inspected to identify and record in detail the equipment that makes up their inventory.

II. Measurement and Recording: Pertinent measurements were carried out on the selected equipment, using predictive maintenance tools.

III. Report Preparation: Finally, a complete report was generated that documents the anomalies detected in the equipment and specific recommendations were established on the maintenance actions that the organization must implement to optimize its operation.

Keywords: Corrective, preventive, predictive maintenance, Predictive maintenance techniques, Vibration analysis, Infrared thermography, Failure detection and analysis, Maintenance proposals.

Índice

1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS	3
3. ALCANCE	3
4. MARCO TEORICO	4
4.1 Tipos de mantenimiento	7
4.2 Parametros a controlar	12
4.3 Definiendo el mantenimiento predictivo	13
4.4 Ventajas de aplicar mantenimiento predictivo	15
4.5 Mantenimiento predictivo basado en termografia infrarroja	15
4.5.1 El espectro electromagnético	16
4.5.2 Transmisión de calor	18
4.5.3 Mecanismos de transmisión de calor	19
4.5.4 Fundamentos de la radiacion infraroja	22
4.5.5 Intercambio de radiacion	25
4.5.6 Tipos de análisis	30
4.5.7 Compensación de la imagen térmica	31
4.5.8 Temperatura aparente reflejada (RTC)	31
4.5.9 Medición de la temperatura aparente reflejada	32
4.6 Determinación de la emisividad	33
4.6.1 Análisis con termómetro de superficie	33
4.6.2 Análisis con cinta de emisividad conocida	34
4.7 Tipo de reflexion	34
4.8 Equipo de medición de temperatura infrarroja	35
4.8.1 Equipo de medición FLIR E6-XT	35

4.9 Aplicaciones de la termografia.....	36
4.9.1 Sistemas eléctricos	36
4.9.2 Instalaciones mecánicas	38
4.9.3 Tuberías.....	38
4.9.4 Instalaciones refractarias y petroquímicas	39
4.9.5 Detección de nivel de depósitos	40
4.9.6 Ventajas de utilizar termografia infraroja	41
5 Mantenimiento predictivo basado en el análisis de vibraciones	42
5.1 Vibración mecánica.....	42
5.1.1 Ecuaciones de movimiento	43
5.1.2 Definiciones aplicables al movimiento armónico simple	46
5.2 Concepto de fase	48
5.3 Amortiguamiento	49
5.3.1 Amortiguamiento crítico	51
5.3.2 Respuesta a una excitación armónica	54
5.4 Transductores de vibración	57
5.4.1 Sensor de proximidad.....	57
5.4.2 Sensor sísmico de velocidad.....	58
5.4.3 Acelerómetro piezoeléctrico.....	59
5.5 Analisis espectral	61
5.6 Transformada discreta de Fourier (DFT)	62
5.6.1 Procedimiento de muestreo	64
5.6.2 Muestreo de la señal analógica.....	65
5.6.3 Criterio de Nyquist	66
5.7 Comportamiento espectral según la unidad de medición.....	68
5.8 Equipo de medición de vibraciones	68
5.8.1 Equipo DSP Logger MX-300.....	68
5.8.2 Ventajas del análisis de vibraciones.....	69

6 DESARROLLO	70
6.1 Casos prácticos utilizando la técnica de análisis de vibraciones	70
6.1.1 Desbalance puro	70
A. Equipo decantador	72
6.1.2 Desbalance de rotor en voladizo	79
B. Turbo pasadora	80
6.1.3 Desalineación	84
C. Equipo de bombeo	87
6.1.4 Holgura rotacional	93
D. Ventilador industrial	95
6.1.5 BPFO (Ball Pass Frequency Outer)	100
E. Rodamiento de Decanter	104
6.2 Casos prácticos utilizando la técnica de termografía infrarroja	111
6.2.1 Motor eléctrico con anomalía térmica	111
6.2.2 Motor eléctrico, refrigeración defectuosa	115
6.2.3 Tableros eléctricos	117
6.2.4 Rodamientos	120
6.2.5 Aislación	123
7 CONCLUSIONES	124
8 REFERENCIAS	125
• B.1. Norma 10816-3	125
• B.2. Norma 18434-1	125
• B.3. Norma NETA	125
• Teoría y práctica del mantenimiento industrial avanzado” / francisco j. Gonzalez Fernandez (2005).	125
• Guía de la termografía infrarroja, aplicaciones en ahorro y eficiencia energética (2011).	125

• Transferencia de calor y masa, “fundamentos y aplicaciones” / Yunus.A. Cengel 2011	
125	
• Estudio de fallas incipientes en rodamientos usando la técnica de la envolvente y cepstrum /Jabid E. Quiroga1 Gerson Trujillo1 Sergio Quintero1	125
• Vibraciones mecánicas, curso ME4701/ 2012	125
• Formación en análisis de vibraciones mecánicas	125
• SEMAPI S.A / servicios y equipamientos para mantenimiento predictivo, revisión 2012	
125	
• VCAT II, procesamiento de señales-ISO 18436-Mobius Institute	125
• Discretización de la señal (Enrique Santiso, Fco. Javier Meca. Departamento de Electrónica. Universidad de Alcalá).....	125
• Dominio en tiempo vs Dominio en frecuencias (Dr-Ing: Pedro Saavedra).....	125
• Introducción al análisis de vibraciones/ Glen White	126
• Carta ilustrada de diagnóstico de vibración	126
• Tabla de severidad ISO 10816 parte III	126
9 ANEXOS	127
• A.1. Equipo de medición de temperatura infrarroja . Manual de operación: Modelo Flir E6-XT.....	127
• A.2. Equipo de medición de vibraciones. Manual de operación: Modelo DSP-logger MX300	127
• A.3. Manual de operación alfa-laval-nx-934. Manual de operación: Decantador centrifugo	
127	

Índice de Figuras

Figura 1: Evolución del Mantenimiento (Desarrollo propio).....	4
Figura 2: Metodologías de Mantenimiento (Desarrollo propio)	11
Figura 3: Curva de Potencial de falla (Desarrollo propio)	14
Figura 4: Elementos de una onda (Desarrollo propio)	17
Figura 5 : Espectro electromagnético (Fenercom.com)	17
Figura 6: Transmisión de calor (Fenercom.com)	18
Figura 7: Transmisión de calor a través de una placa plana (Yunus.A. Cengel 2011).....	19
Figura 8: Transferencia de calor de una superficie caliente hacia el aire por convección (Yunus.A. Cengel 2011)	21
Figura 9: Ley de desplazamiento de Wien (Fenercom.com 2011).....	24
Figura 10 : Balance de radiación incidente de un cuerpo (Desarrollo propio).....	26
Figura 11 : Radiación emitida por el cuerpo (Desarrollo propio)	27
Figura 12 : Radiación saliente de un cuerpo (Desarrollo propio)	28
Figura 13: Radiación saliente de un cuerpo opaco (Desarrollo propio).....	30
Figura 14 : Porcentajes de radiación (Desarrollo propio)	32
Figura 15 : Termografía en alta tensión (Fenercom.com).....	36
Figura 16 : Termografía en media y baja tensión (Fenercom.com)	37
Figura 17 : Averías mecánicas (Fenercom.com).....	38
Figura 18 : Fugas y defectos de aislamiento (Fenercom.com)	39
Figura 19 : Inspecciones de aislamiento (Fenercom.com).....	40
Figura 20 : Medición de niveles (Fenercom.com)	40
Figura 21: Movimiento vibratorio del cojinete de una máquina (Desarrollo propio)	43
Figura 22: Sistema masa-resorte horizontal (Desarrollo propio)	43
Figura 23: Solución de la ecuación de movimiento para un sistema de un grado de libertad (Viviana Meruane; Vibraciones mecánicas.2012)	45
Figura 24: Diferencia de fases (Viviana Meruane; Vibraciones mecánicas.2012)	49
Figura 25: Esquema de un amortiguador (Viviana Meruane; Vibraciones mecánicas.2012)	50
Figura 26: Sistema de un grado de libertad con amortiguador (Viviana Meruane; Vibraciones mecánicas.2012).....	50
Figura 27: Respuesta de un sistema con amortiguamiento débil: $0 < \zeta < 1$ (Viviana Meruane; Vibraciones mecánicas.2012).....	52
Figura 28: Respuesta de un sistema sobre-amortiguado $\zeta > 1$ (Viviana Meruane; Vibraciones mecánicas.2012).....	53

Figura 29: Sistema masa-resorte con excitación armónica (Viviana Meruane; Vibraciones mecánicas.2012).....	54
Figura 30: Respuesta de un sistema sin amortiguamiento con $w_n = 1$ rad/s a una excitación armónica de $w = 2$ rad/s (Viviana Meruane; Vibraciones mecánicas.2012).....	56
Figura 31: Respuesta de un sistema excitado en su frecuencia natural ($w = w_n$) (Viviana Meruane; Vibraciones mecánicas.2012)	57
Figura 32: Descripción de un sensor de proximidad inductiva (www.power-mi.com)	58
Figura 33: Descripción de un sensor sísmico de velocidad (www.power-mi.com).....	59
Figura 34: Descripción de un acelerómetro piezoeléctrico (www.power-mi.com)	60
Figura 35: Acelerómetro sin amplificador de carga (www.semapi.com.ar -2000).....	60
Figura 36: Acelerómetro con amplificador de carga (www.semapi.com.ar -2000).....	61
Figura 37: Espectro de una señal de vibración compleja (www.power-mi.com).....	62
Figura 38 : Dominio en tiempo vs Dominio en frecuencias (Dr-Ing: Pedro Saavedra)	63
Figura 39 : Conversión de analógico a digital (Glen White 2010)	64
Figura 40 : Discretización de la señal (Enrique Santiso, Fco. Javier Meca. Departamento de Electrónica. Universidad de Alcalá).....	65
Figura 41 : Muestreo de la forma de onda (VCAT II, procesamiento de señales-ISO 18436-Mobius Institute)	66
Figura 42 : Perfil trazado (VCAT II, procesamiento de señales-ISO 18436-Mobius Institute) .	66
Figura 43 : Aumento de la tasa de muestreo (VCAT II, procesamiento de señales-ISO 18436-Mobius Institute)	67
Figura 44 : Comportamiento espectral en cada magnitud de vibración (www.power-mi.com) .	68
Figura 45 : Desbalance estático (www.power-mi.com).....	70
Figura 46 : Espectro de frecuencia en desbalance (www.power-mi.com).....	71
Figura 47 : Partes del Decanter (Desarrollo propio)	73
Figura 48 : Decanter (Desarrollo propio).....	73
Figura 49 : Puntos de medición (Desarrollo propio).....	74
Figura 50 : Espectro de velocidad punto 4H (Desarrollo propio)	75
Figura 51 : Espectro de velocidad punto 4V (Desarrollo propio).....	75
Figura 52 : Espectro cascada (Desarrollo propio).....	76
Figura 53 : Trend punto 4V (Desarrollo propio).....	77
Figura 54 : Trend punto 4H (Desarrollo propio).....	78
Figura 55 : Tornillo helicoidal (Desarrollo propio).....	78
Figura 56 : Rotor en voladizo desbalanceado (www.power-mi.com).....	79
Figura 57 : Espectro de vibración característico (www.power-mi.com).....	80

Figura 58 : Turbopasadora (Desarrollo propio)	81
Figura 59 : Puntos de medición (ISO 10816).....	81
Figura 60 : Espectro de velocidad en dirección axial (Desarrollo propio).....	82
Figura 61 : Espectro de velocidad en 4H (Desarrollo propio).....	82
Figura 62 : Espectro de velocidad en 4V (Desarrollo propio).....	82
Figura 63 : Desalineación paralela (offset) (Desarrollo propio)	84
Figura 64 : Espectro característico de desalineación paralela (www.power-mi.com)	85
Figura 65 : Desalineación angular (Gap) (Desarrollo propio)	86
Figura 66 : Espectro característico de desalineación angular (www.power-mi.com).....	86
Figura 67 : Equipo de bombeo con sus respectivos puntos de medición (www.power-mi.com)	87
Figura 68 : Descripción de los componentes del equipo (Desarrollo propio).....	88
Figura 69 : Espectro de velocidad punto 3V (Desarrollo propio)	91
Figura 70 : Diagrama de cascada, valores de velocidad RMS en el punto 3V (Desarrollo propio)	91
Figura 71 : Diagrama de cascada, valores de velocidad RMS en el punto 3H (Desarrollo propio)	92
Figura 72 : Trend valor RMS de aceleración punto 3 (Desarrollo propio)	93
Figura 73 : Holgura en elementos rotativos (www.power-mi.com).....	94
Figura 74 : Principales partes de un ventilador centrífugo (www.power-mi.com).....	95
Figura 75 : Equipo VH02 (Desarrollo propio)	96
Figura 76 : Puntos típicos de medición (ISO 10816)	96
Figura 77 : Espectro de velocidad medido en el punto 4 (Desarrollo propio).....	97
Figura 78 : Estado de base de chumacera, rodamiento y eje (Desarrollo propio).....	98
Figura 79 : Trend punto 4 (Desarrollo propio).....	99
Figura 80 : Trend punto 4 (Desarrollo propio).....	99
Figura 81 : Componentes de un rodamiento (www.power-mi.com).....	100
Figura 82 : Fórmulas para el cálculo de frecuencias (www.power-mi.com)	101
Figura 83 : Representación de la señal de falla (Quiroga, Trujillo y Quintero: Estudio de fallas incipientes en rodamientos usando la técnica de la Envolvente y Cepstrum,2011)	102
Figura 84 : Espectro de la señal simulada (Quiroga, Trujillo y Quintero: Estudio de fallas incipientes en rodamientos usando la técnica de la Envolvente y Cepstrum,2011).....	103
Figura 85 : Espectro de la envolvente para la señal simulada (Quiroga, Trujillo y Quintero: Estudio de fallas incipientes en rodamientos usando la técnica de la Envolvente y Cepstrum,2011)	104
Figura 86 : Decanter N° 8 (Desarrollo propio)	105

Figura 87 : Aumento de las vibraciones en aceleración (Desarrollo propio)	106
Figura 88 : Espectro de aceleración en el punto 4V (Desarrollo propio).....	106
Figura 89 : Espectro de la señal envolvente (Desarrollo propio)	107
Figura 90 : Espectro de envolvente; detección del componente deteriorado (Desarrollo propio)	108
Figura 91 : Rodamiento deteriorado 6220 M/C3 (Desarrollo propio)	109
Figura 92 : Espectro de aceleración, disminución de los valores de aceleración (Desarrollo propio)	110
Figura 93 : Espectro cascada, seguimiento de los valores de aceleración (Desarrollo propio). 110	
Figura 94: Motor eléctrico E1 a la izquierda, a su derecha termograma (Desarrollo propio)..	111
Figura 95: Motor eléctrico E2 a la izquierda, a su derecha termograma (Desarrollo propio)...	112
Figura 96: Motor eléctrico F1 a la izquierda, a su derecha termograma (Desarrollo propio) ...	115
Figura 97: Estado del motor F1 (Desarrollo propio)	116
Figura 98: Tablero eléctrico a la izquierda, a su derecha termograma (Desarrollo propio).....	117
Figura 99: Tablero eléctrico a la izquierda, a su derecha termograma (Desarrollo propio).....	119
Figura 100: Equipos de vacío (Desarrollo propio).....	120
Figura 101: Medición en los rodamientos de la bomba (Desarrollo propio)	121
Figura 102: Perdidas de calor (Desarrollo propio).....	123

Índice de Tablas

Tabla 1: Tipos de radiacion.....	26
Tabla 2: Parámetros de vibración.....	48
Tabla 3: Medición del punto 4V-4H-4A	74
Tabla 4: Medición de los valores globales en 4H-4V-4A	81
Tabla 5: Valores globales en los puntos de medición	88
Tabla 6: Especificaciones de motores eléctricos E1-E2.....	111
Tabla 7: Valores de temperatura en los puntos de medición de los equipos E1- E2.....	113
Tabla 8: Especificaciones de motor eléctrico F1.....	115
Tabla 9: Acciones en función del aumento de temperatura	118

1. INTRODUCCIÓN

Históricamente, las tareas de mantenimiento en equipos industriales han evolucionado significativamente, adoptando un enfoque cada vez más innovador y más tecnológico. Todas estas iniciativas comparten el mismo objetivo: alcanzar un nivel óptimo de eficiencia en cada uno de los procesos empresariales. Para lograr esta meta, se ha desarrollado una base teórica extensa y se han implementado múltiples técnicas y métodos orientados a resolver una necesidad esencial: garantizar el buen estado de los equipos en los establecimientos los cuales se han tornado cada vez más complejos tanto en diseño como en funcionamiento.

En la actualidad, muchas organizaciones continúan basando su gestión del mantenimiento en el enfoque correctivo. Si bien este método cumple su principal función, que es reparar los equipos cuando resulta necesario, presenta limitaciones significativas dentro de una concepción obsoleta. Las reparaciones realizadas suelen tener una duración cada vez más efímera y, con frecuencia, pueden derivar en fallos crónicos del equipo. A esto se suman las tareas improductivas, los tiempos muertos, los costos asociados y los retos en la gestión de recursos humanos y de inventarios.

Por otro lado, la industria se encuentra inmersa en una revolución profunda en numerosos aspectos. Actualmente atravesamos la cuarta revolución industrial, conocida como Industria 4.0. Este concepto se basa en una fabricación impulsada principalmente por la información y una inmensa cantidad de datos generados en tiempo real, las 24 horas del día. En este contexto, la inteligencia artificial se posiciona como el eje central de esta nueva era, permitiendo a las organizaciones recopilar, analizar y aprovechar estos datos para predecir el comportamiento de sus equipos y procesos.

Esto último facilita las intervenciones realizadas en el momento óptimo y contribuye a una gestión de mantenimiento cada vez más eficiente desde el punto de vista tecno-económico.

Es en este marco que se desarrolla el presente trabajo el cual expone la implementación de dos técnicas de mantenimiento predictivo que han ganado relevancia y aplicación dentro de industrias tales como Oil&Gas, Agrícola, Papelera y Frutícola ubicadas en todo el mundo, en particular el trabajo muestra la implementación dentro de la provincia de Río Negro y del Neuquén, el análisis de vibraciones para equipos rotativos (como bombas centrifugas, sopladores, cajas reductoras y turbocompresores) según norma **ISO 10816-3** y el análisis de temperatura mediante la técnica de termografía infrarroja, aplicable a instalaciones eléctricas y equipos rotativos, siguiendo los lineamientos según norma **ISO 18434-1**.

2. OBJETIVOS

Exponer, a través de fundamentos teóricos y prácticos, los beneficios de implementar un plan de mantenimiento predictivo en equipos rotativos. Se hará una breve mención a las diversas técnicas empleadas en la industria, con un énfasis particular en los métodos de medición basados en el análisis de vibraciones y la termografía infrarroja.

Esto permitirá predecir posibles modos de fallas en equipos rotativos, complementando la teoría con actividades prácticas y específicas aplicadas a equipos que operan en el sector industrial local.

De igual manera introducir los principios físicos y teóricos que rigen el funcionamiento de los instrumentos de medición utilizados. Presentar parámetros experimentales de análisis y soluciones implementadas en empresas de sectores industriales como Oil & Gas, frutícola y papelerero, destacando ejemplos aplicados en la región.

3. ALCANCE

En el sector industrial, es habitual utilizar equipos que funcionan con alta potencia y a velocidades significativas. Este estudio se enfocó particularmente en máquinas y equipos cuya velocidad de operación no superase las 3000 revoluciones por minuto y cuyas capacidades de potencia se sitúen entre 15 kW y aproximadamente 45 kW. El objetivo principal de esta investigación radica en el análisis y diagnóstico de equipos rotativos mediante las técnicas predictivas como son el análisis de vibraciones y termografía infrarroja, abarcando dispositivos tales como bombas centrífugas, motores eléctricos, ventiladores y sopladores. Este enfoque se desarrolló tomando como referencia las directrices establecidas por la norma **ISO 10816-3**.

Cabe señalar que el alcance del estudio excluye equipos de naturaleza alternativa, tales como compresores alternativos y motores de combustión interna, los cuales no están contemplados dentro del presente trabajo.

En conjunto, la norma **ISO 18434-1** representa un recurso esencial para estandarizar y mejorar el uso de la termografía infrarroja en el monitoreo de las condiciones de equipos electromecánicos. En este trabajo, se aplicó en motores eléctricos, tableros, y equipos estacionarios, facilitando así que las organizaciones obtengan no solo imágenes térmicas, sino también información técnica precisa, coherente y práctica. Estos datos resultan cruciales para tomar decisiones estratégicas, particularmente en el ámbito del mantenimiento predictivo.

4. MARCO TEORICO

Las principales referencias en diversa bibliografía, han concluido en establecer cuatro grandes etapas sin una clara frontera temporal que las separe, pero si dan una idea de cuál ha sido la evolución de las técnicas y organizaciones que se han ido implementado durante dicho siglo.

El hecho de no poder divisar cierta frontera entre etapas se debe a varios factores, fundamentalmente es que cada sector de la industria ha evolucionado de manera diferente, es decir, la aeronáutica ha ido siempre muy por delante del sector industrial ferroviario y naval.

Se ha convenido sin embargo que la evolución del mantenimiento durante el siglo XX se puede visualizar por etapas, las cuales llamaremos a partir de ahora, de primera, segunda, tercera y cuarta generación.

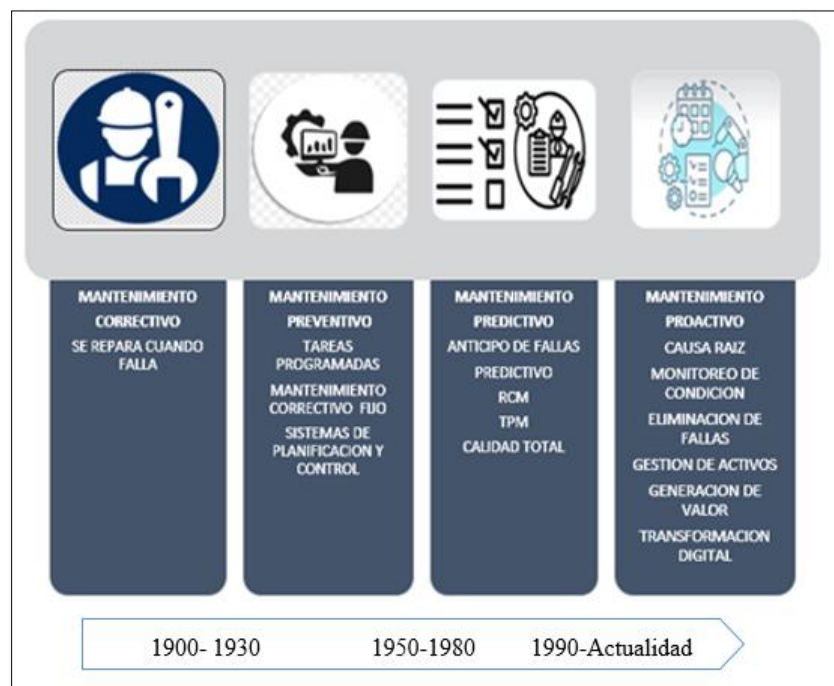


Figura 1: Evolución del Mantenimiento (Desarrollo propio)

La figura 1, muestra la evolución del mantenimiento a lo largo de los años. En la primera generación entre 1930 y 1950, en la 2da G.M, en la que, con excepciones podemos decir que las actividades de mantenimiento se ceñían a reparar todo aquello que se averiaba, y a periódicos reengrases, lubricaciones y limpiezas.

A partir de la 2da G.M, y motivados por los avances en sectores industriales fabriles para la industria armamentística, y, por la evolución en el mundo de la aviación, nos encontramos con la segunda generación, en ella se definen como objetivos las disponibilidades operacionales de los medios de producción, así también que los equipos duren lo máximo posible en condiciones operativas idóneas, y todo ello con los costos más bajos.

La enorme competencia industrial habida entre 1950 y finales de los años 70, con la incorporación de los fabricantes orientales al mundo occidental, es uno de los desencadenantes de una continua búsqueda de mejores resultados, para obtener los objetivos planteados en la segunda generación se ponen en marcha sistemas de mantenimiento preventivo, basados en revisiones cíclicas de los equipos e instalaciones, las cuales se definían según cada sector por número de horas, cantidad de kilómetros recorridos, horas de vuelo, etc.

Obviamente el mantenimiento de segunda generación incorpora las reparaciones precisas en caso de fallo o reparaciones programadas. La optimización de este mantenimiento de segunda generación basado en mantenimientos preventivos rutinarios y mantenimiento correctivo fijo, se fundamenta en avanzados sistemas de planificación de actividades y de control de trabajos realizados, entendiendo por control, tanto al lanzamiento de órdenes de trabajo como a la retroalimentación y verificación de los datos obtenidos en tales órdenes.

A partir de los años 70 se generalizó el uso de herramientas informáticas, todos estos sistemas de planificación y todas estas actividades de control, se fueron cargando en bases de datos informatizadas, cuyo tratamiento ha ido optimizando los sistemas y por ende la toma de decisiones.

En la década de los 80 se llegó a la conclusión de que este tipo de mantenimiento una vez optimizado, llegaba a un punto de estancamiento, esto es, los índices más relevantes de cualquier actividad de mantenimiento se estabilizaban, estos eran; **la fiabilidad, la disponibilidad y los costos**. Ello fue objeto de investigación y reflexiones para los grandes autores expertos en el tema.

Esta situación de estancamiento se alcanzaba en un determinado límite en el que cualquiera de las tres relaciones a mejorar, implicaba un detrimento de las otras dos asociadas, es decir, si queríamos optimizar los costos, reduciendo los insumos de repuestos o reduciendo la mano de obra, la disponibilidad y/o fiabilidad caían, si se pretendía aumentar la disponibilidad, minimizando las paradas por revisión, la fiabilidad mermaba, y si se quería aumentar la fiabilidad mediante mayor estudio y análisis de las averías repetitivas o complejas, o mediante la implementación de reformas en los equipos o instalaciones, la disponibilidad disminuía.

Ante dicha situación en los años 80, se empezó a hablar del mantenimiento de tercera generación. Este fundamenta sus objetivos no solo en fiabilidad, disponibilidad y costos, sino que también aborda complementariamente otros aspectos tales como la calidad en los servicios relacionada con la norma ISO 9000 en 1984, la protección del medio ambiente con la norma ISO 14000, la duración de los equipos mediante el ciclo de vida (LCC, *life cycle cost*) paso a ser determinante en las decisiones de compra de equipos, ya no solo era importante que el sistema, instalación o equipo, fuese fiable y mantenible, era necesario que su costo total del ciclo de vida, entendiendo como tal la primera inversión, costos financieros y costos de operación, mantenimiento y reemplazo, fueran los menores posibles, o contenidos al menos.

La filosofía y técnicas de mantenimiento de tercera generación se basan en la incorporación de nuevos métodos más proclives a intervenir los equipos e instalaciones solo cuando sea necesario, así pues, aparecen los mantenimientos según condición o peritados previamente.

Aparece en los años 90, el mantenimiento de cuarta generacion conceptualizado como “calidad total”, mediante una adecuada gestion del mantenimiento es posible aumentar la disponibilidad al tiempo en que se reducen costos, es el mantenimiento basado en el riesgo (MBR), se concibe el mantenimiento como un proceso de la empresa al que contribuyen tambien otros departamentos. Se identifica al mantenimiento como fuente de beneficios, frente al antiguo concepto de “mal necesario”.

La posibilidad que una maquina falle y las consecuencias asociadas para la empresa es un riesgo que hay que gestionar, teniendo como objetivo la disponibilidad necesaria en cada caso al minimo coste. Integrados todos los conceptos anteriores, la gestion del mantenimiento se orienta a la satisfaccion del cliente. ([Francisco J. Gonzalez Fernandez 2005](#))

4.1 Tipos de mantenimiento

Los tipos de mantenimiento surgieron como consecuencia de su evolución misma. El orden cronológico se corresponde con el grado de complejidad y efectividad del mantenimiento. A las formas más primitivas siguen otras más elaboradas. Sin embargo, aquellas no se dejan de usar, sino que complementan a las posteriores.

Las fallas son algo no deseado y por lo tanto el control que tengamos sobre su ocurrencia determina la primera gran división: la falla nos toma por sorpresa o bien, sabiendo que ocurrirá, nos anticipamos realizando acciones para evitarla. Así surgen primeramente el **Mantenimiento correctivo o a rotura** y luego el **Mantenimiento Programado o Planificado**.

I. Mantenimiento correctivo

Este tipo de mantenimiento tiene por misión intervenir para restablecer de manera inmediata la parada de la maquinaria a como dé lugar. Tiene la característica de ser intempestivo y desorganizado y, por lo tanto, está lejos de ser planificado en principio. Es una actividad reactiva o sea actúa una vez ocurrido el hecho. Por lo tanto, es costosa pues aparecen las temidas pérdidas por paradas de producción, mano de obra directa ociosa y atrasos en las entregas de los programas.

En este ambiente es poco probable que la reparación sea satisfactoria. Sin duda que estas intervenciones están lejos de ser las ideales. Evidentemente sino se realizan intervenciones idóneas, las fallas serán cada vez más frecuentes y profundizarán sus efectos con el notable incremento en los costos. Por otro lado, las condiciones originales de la máquina se pierden, disminuyendo así la capacidad operativa, calidad, y el valor residual estará lejos de los valores de mercado acelerando su depreciación. Pese a todo, éste tipo de mantenimiento nunca desaparecerá, pero si deberá ser reducido al mínimo.

Como vimos, el gran salto hacia la planificación del mantenimiento lo marcó el ritmo impuesto por la industria. Y es lógico que en esos períodos la escasez de recursos y tiempo hagan necesaria la planificación en todas las actividades. Esta forma de mantenimiento se diferencia notablemente de su antecesor en la medida en que planifica las intervenciones aun aquellas que son emergentes.

II. Mantenimiento preventivo

El Mantenimiento Preventivo se fundamenta en una serie de labores o actividades planificadas que son llevadas a cabo dentro de periodos definidos, se diseña con el objetivo de garantizar que los activos de las compañías cumplan con las funciones requeridas dentro del entorno de operaciones para optimizar la eficiencia de los procesos; para prevenir y adelantarse a las fallas de los elementos, componentes, máquinas o equipos; como también hace referencia a diferentes acciones, como cambios o reemplazos, adaptaciones, restauraciones, inspecciones, evaluaciones, etc.

Sin duda ésta metodología es el pilar fundamental de todo departamento de mantenimiento que se precie de serio y profesional. Consta de dos tipologías: El mantenimiento basado en el tiempo o TBM (Time Based Maintenance) y el mantenimiento predictivo o CBM (Conditions Based Maintenance).

III. Mantenimiento basado en el tiempo

Es una metodología de intervención partiendo de la definición de los puntos críticos de los equipos a fin de minimizar los tiempos de paradas o de bajo rendimiento de los mismos. Esta forma de mantenimiento se basa en la planificación, construcción de estándares y en revisiones sistemáticas con el fin de detectar señales de mal funcionamiento.

La determinación de los lugares neurálgicos de control tiene su origen en la ingeniería de mantenimiento. Está sobre la base de recomendaciones del fabricante del equipo expresadas en forma directa en el momento de la instalación o bien recabada a partir de los manuales, como así también la experiencia adquirida por el personal en el desarrollo de su tarea profesional, o la recibida a partir de una capacitación específica.

Con estos elementos se confeccionan los estándares, es decir los procedimientos que establecen que es lo que se debe hacer, como efectuarlo y la frecuencia de las inspecciones en cada medio. Este tipo de mantenimiento requiere un soporte informático donde se cargarán los datos de los equipos y sus criticidades como así también los registros de las intervenciones y toda información adicional acerca de los mismos, que servirá como historial. Este medio permite realizar la planificación de las tareas, asignando recursos humanos, materiales y tiempos de ejecución.

La tarea, en síntesis, consiste en la realización de rutinas periódicas de inspección en los puntos mencionados, efectuando pequeños ajustes y relevando las novedades para conformar una posible intervención al detectar anomalías. Estas rutinas desplegadas a lo largo del tiempo serán cumplidas por operarios especializados si las tareas son de cierta complejidad o pueden ser realizadas por operarios de producción si son más simples.

Pero como contrapartida de lo expresado este mantenimiento es oneroso, pues requiere una estructura técnica, humana y administrativa y solamente pueden implementarse en aquellas empresas cuya tecnología de procesos, niveles productivos y recursos lo permitan.

IV. Mantenimiento predictivo

El mantenimiento predictivo o CBM se encuadra dentro del mantenimiento programado y de idéntica manera al TBM realiza inspecciones en plazos preestablecidos con el fin de detectar fallas, pero se diferencia fundamentalmente porque en el TBM los estándares requerían que, a intervalos regulares, se registraran datos y realizaran inspecciones periféricas, pequeños ajustes y limpieza.

En cambio, en el CBM se predice la ocurrencia de una falla a través de la apreciación de síntomas o señales que la máquina emite y según la complejidad de las mismas éstas serán detectadas con los sentidos humanos o con instrumentos.

Al igual que en el mantenimiento Periódico o TBM, aquí se establecen puntos de importancia que deben ser monitoreados con una frecuencia dada. Naturalmente en el caso del control no especializado la búsqueda de señales será guiada por un check list que utilizará por lo general el operario de producción.

Por otro lado, en el mantenimiento predictivo especializado, la detección de futuras fallas se efectúa por medio de instrumentos y ensayos de cierta complejidad, basados en desarrollos tecnológicos y siguiendo una serie de procedimientos normalizados. Se fijan secuencias de control de los puntos críticos según el tipo de ensayo y se lleva un historial de los resultados. De esta manera se tiene una idea de cuándo ocurrirá la falla y por lo tanto permite planificar la intervención.

V. Mantenimiento proactivo

La última innovación en el campo del mantenimiento predictivo es el mantenimiento proactivo, que usa gran cantidad de técnicas para alargar la duración de operación. La parte mayor de un programa proactivo es el análisis de las causas fundamentales de las fallas en máquinas.

Esas causas fundamentales se pueden remediar y los mecanismos de falla se pueden eliminar gradualmente en cada máquina. Es sabido que el **desbalanceo** y la **desalineación** son las causas fundamentales de la mayoría de las fallas en máquinas.

Ambos fenómenos provocan una carga en los rodamientos con fuerzas indebidas y acortan su vida útil. Una política seria de llevar a cabo un balanceo y alineación de precisión en la máquina y verificar los resultados por medio de un análisis de vibraciones.

En la figura 2 se presenta un diagrama de flujo que ilustra las metodologías de mantenimiento utilizadas en este trabajo, destacando únicamente las técnicas aplicables en nuestro contexto específico. Es importante señalar que existen muchas otras prácticas de mantenimiento, como aquellas orientadas a la calidad total, (TQM) la confiabilidad de equipos (RCM), el mantenimiento total de la producción (TPM), entre otras. Todas estas son igualmente válidas y podrían combinarse de manera complementaria con diferentes estrategias para integrarse eficazmente en nuestra organización. (Francisco J. Gonzalez Fernandez 2005)

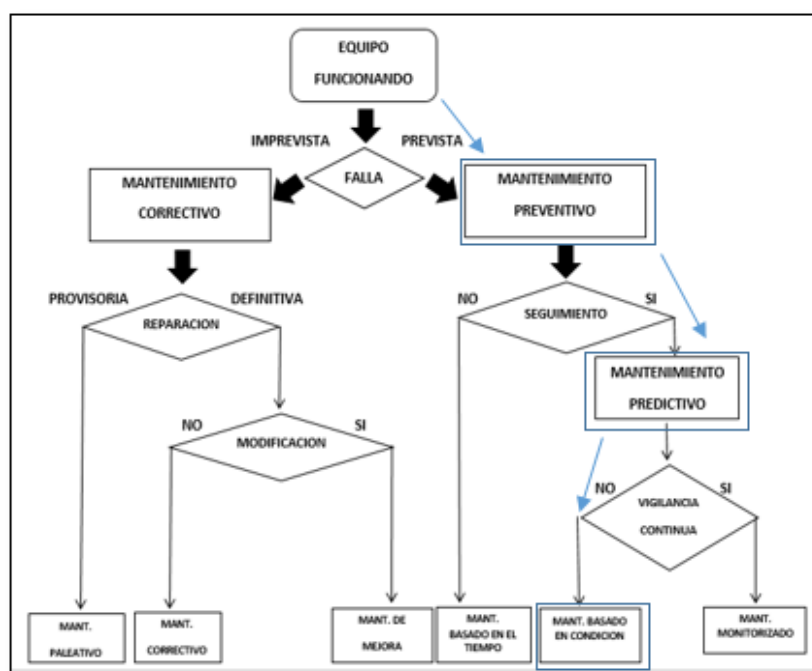


Figura 2: Metodologías de Mantenimiento (Desarrollo propio)

4.2 Parámetros a controlar

I. Vibraciones anómalas

Los elementos rotantes de las máquinas como rodamientos, manchones de acople, engranajes, ejes, rotores, poleas, etc., pueden estar desgastados, desbalanceados, desalineados, deformados, lo que origina al principio pequeñas vibraciones imperceptibles a los sentidos y luego a medida que el deterioro continúa se incrementan llegando al colapso.

A través de un análisis del espectro de vibraciones se tiene clara idea de cuan cerca el elemento está de la rotura y por lo tanto permite programar su reemplazo o reparación.

II. Temperaturas elevadas

Se puede analizar el exceso de temperatura en los componentes eléctricos o en los mecánicos. En los primeros es difícil percibir la sobre-temperatura porque los operadores para detectarla deben hacer contacto con el elemento anómalo y siendo un circuito eléctrico eso no es posible.

Para ello, mediante el análisis termográfico infrarrojo, se detecta los puntos calientes del sistema que generalmente son producto de una sobrecarga o de un falso contacto. En cuanto a la sobre-temperatura de índole mecánico, generalmente son de detección más sencilla porque se puede acceder a los puntos críticos sin riesgos y se puede controlar con instrumentos de contacto como el termómetro digital.

Ejemplos de este tipo de anomalía son los elementos carentes de una buena lubricación o lubricantes con sus características de diseño alteradas. Puede ocurrir que los elementos mecánicos que manifiestan alta temperatura tengan asociado también la emisión de ruidos y vibraciones anómalas.

III. Potencia absorbida

Los motores eléctricos están calibrados para erogar una determinada potencia nominal de servicio. Cuando por alguna causa la carga que deben mover excede su capacidad se produce un incremento en la intensidad y con ello un aumento en la potencia absorbida.

La carga a que se hace referencia puede ser originada por elementos rotantes o sistemas de traslación con excesivo rozamiento o desgaste causados por un juego entre partes no correcto o por una lubricación deficiente.

IV. Análisis de lubricantes

Los lubricantes son sustancias muy útiles para determinar que está pasando en los mecanismos, ya sea porque se degradan fuera de los límites de diseño denotando anomalías de funcionamiento o porque en ellos se detectan partículas metálicas, óxido o contaminación líquida (agua u otros aceites).

Igualmente, en las máquinas que utilizan la oleo-hidráulica como principal fuente de potencia, el estado del aceite hidráulico determina la situación del equipo o bien si existe riesgo de una falla potencial.

4.3 Definiendo el mantenimiento predictivo

Entendiendo que es una metodología que basa las intervenciones en la máquina o instalación sobre la que se aplica, en la evolución de una determinada variable que sea realmente identificadora de su funcionamiento y fácil de medir. Diferenciándolo del mantenimiento preventivo en el que se planifica intervenciones de forma constante y con base a una periodicidad concreta, el mantenimiento predictivo no define ninguna periodicidad concreta, sino que aconseja el lanzamiento de una orden de trabajo preventiva cuando la variable medida comienza a encontrarse en una zona de peligrosidad funcional de la máquina, y lógicamente siempre antes de un fallo catastrófico.

Muchos autores han tratado de explicar este tipo de mantenimiento con la curva P-F; en la que se simboliza como la variable medida va evidenciando un determinado nivel de deterioro de la maquina a partir del punto P, para que, antes de que esta falle, punto F, se produzca la intervención.

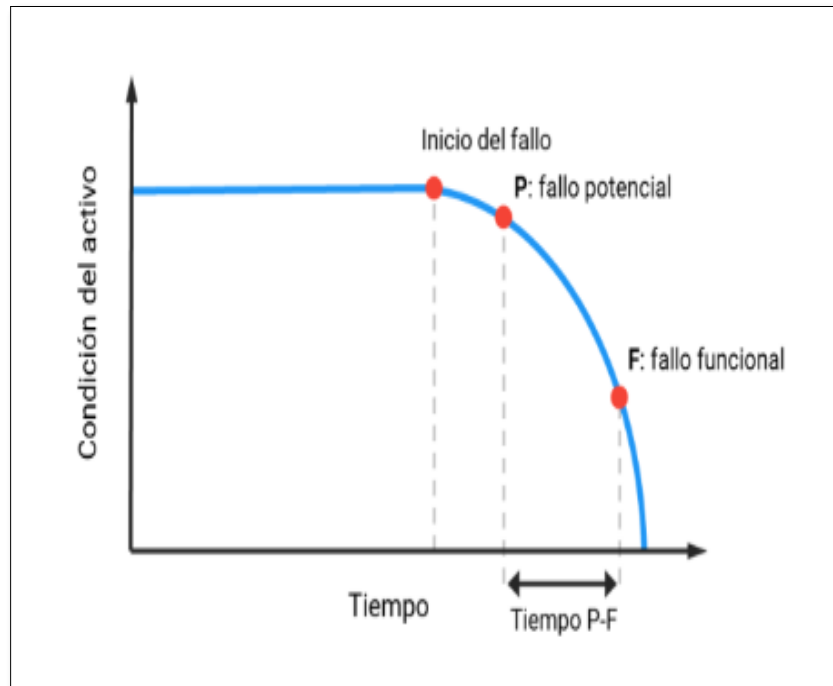


Figura 3: Curva de Potencial de falla (Desarrollo propio)

En la figura 3 se advierte como un fallo potencial es un estado físico identificable que indica que la falla se encamina a una falla funcional, sino intervenimos.

El intervalo P-F, es el tiempo transcurrido entre un fallo potencial y su empeoramiento hasta que se convierta en un fallo funcional. La dificultad de implantar este tipo de mantenimiento es, en primer lugar, la localización de dicha variable identificadora y, en segundo lugar, correlacionar niveles de aceptación o rechazo de dicha variable con estados reales de la maquina fácilmente medibles.

Este tipo de mantenimiento no es de inmediata aplicación y precisa un significativo tiempo de interiorización por el equipo técnico de mantenimiento y una adecuada formación del mismo.

El mantenimiento predictivo debe verse complementado por la utilización de técnicas estadísticas, no es un mantenimiento que se base en la intuición y en la experiencia solamente del operador o del técnico, se apoya en mediciones rigurosas de variables, en curvas de regresión de fallos, y en una predicción de las condiciones futuras del equipo o sistema basándose en las condiciones presentes que estamos midiendo.

4.4 Ventajas de aplicar mantenimiento predictivo

- I. Mayor disponibilidad de los equipos gracias a la reducción de paradas no planificadas.
- II. Maximización de la vida útil de equipos y maquinaria.
- III. Aumento en la confiabilidad de equipos.
- IV. Reducción de mantenimientos correctivos.
- V. Se requiere menos personal activo, afectado al mantenimiento.
- VI. Se minimizan los costos de repuestos, y costos de stock innecesario.
- VII. Mejora continua de los procesos, basada en recopilación y análisis de datos.
- VIII. Integración con tecnologías emergentes como la IA, proporcionando ventaja competitiva en entornos industriales modernos.

4.5 Mantenimiento predictivo basado en termografía infrarroja

La termografía es una técnica con aplicaciones muy concretas, basada en el hecho de que todos los cuerpos, por estar a temperatura superior al cero absoluto, emiten radiación electromagnética, las evidencias o variables más identificadoras de la degradación funcional de un gran número de elementos tales como rodamientos, reductores, conexiones eléctricas, componentes electrónicos y juntas, es la temperatura.

Dicha temperatura provoca como ya hemos mencionado, una radiación, y los sistemas de termografía infrarroja son capaces de captar tal radiación y de convertirla en una imagen que representa la distribución de temperatura superficial del objeto observado.

El sistema de mantenimiento predictivo basado en termografía infrarroja se fundamenta principalmente en captar, mediante una cámara, la emisividad de la superficie del equipo, sistema, conexión o componente que estemos analizando.

Estas medidas por infrarrojos tienen muchas ventajas, pues posibilitan obtener la temperatura de objetos móviles y con difícil acceso. Al ser una técnica sin contacto, no interfiere con el funcionamiento y el comportamiento del propio elemento que estamos analizando, sumado a esto, poder captar grandes superficies con un tiempo rápido de respuesta y con una elevada precisión y repetitividad por lo que es fácil realizar un archivo histórico evolutivo de estas medidas. Una cámara termográfica es el dispositivo que va a detectar el patrón térmico del cuerpo al que se apunta, en el espectro de la longitud de onda infrarroja y sin entrar en contacto con ese cuerpo.

Una imagen radiométrica es una imagen térmica que contiene cálculos de las medidas de temperatura en todos los puntos de la imagen. La información térmica corresponde a un patrón, un estado puntual en cuanto a su temperatura, se dice que es puntual ya que no se considera el objeto como algo aislado, sino que estará rodeado de otros objetos que le influyan. (Fenercom.com 2011)

4.5.1 El espectro electromagnético

Tras esta pequeña introducción, se hace necesario hablar del espectro electromagnético, el cual corresponde al rango de todos los tipos de radiación electromagnética clasificados por longitud de onda.

Una onda es la propagación de una perturbación que transfiere energía progresivamente de un punto a otro a través de un medio y que puede tener la forma de deformación elástica, una variación de presión, intensidad magnética o eléctrica o de temperatura. Los elementos que describen toda onda se detallan a continuación y se identifican en la figura 4.

- **Cresta:** Es el punto más alto de dicha amplitud o punto máximo de saturación de la onda.
- **Período:** Es el tiempo que tarda la onda en ir de un punto de máxima amplitud al siguiente.
- **Amplitud:** Es la distancia vertical entre una cresta y el punto medio de la onda: nótese que pueden existir ondas cuya amplitud sea variable, es decir, crezca o decrezca con el paso del tiempo.
- **Frecuencia:** Número de veces que es repetida dicha vibración. En otras palabras, es una simple repetición de valores por un período determinado.
- **Valle:** Es el punto más bajo de una onda.
- **Longitud de onda:** Distancia que hay entre dos crestas consecutivas de dicho tamaño.

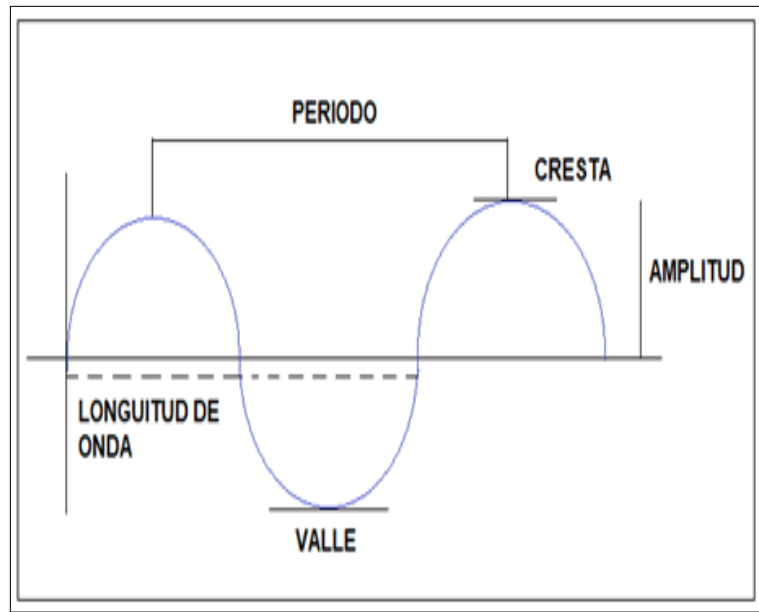


Figura 4: Elementos de una onda (Desarrollo propio)

Las ondas se distribuyen, en función de su energía a lo largo del espectro electromagnético, en la figura 5 vemos como este se extiende desde la radiación de menor longitud de onda como los rayos gamma y los rayos X, pasando por la luz ultravioleta, la luz visible y los rayos infrarrojos, hasta las ondas electromagnéticas de mayor longitud de onda, como son las ondas de radio.

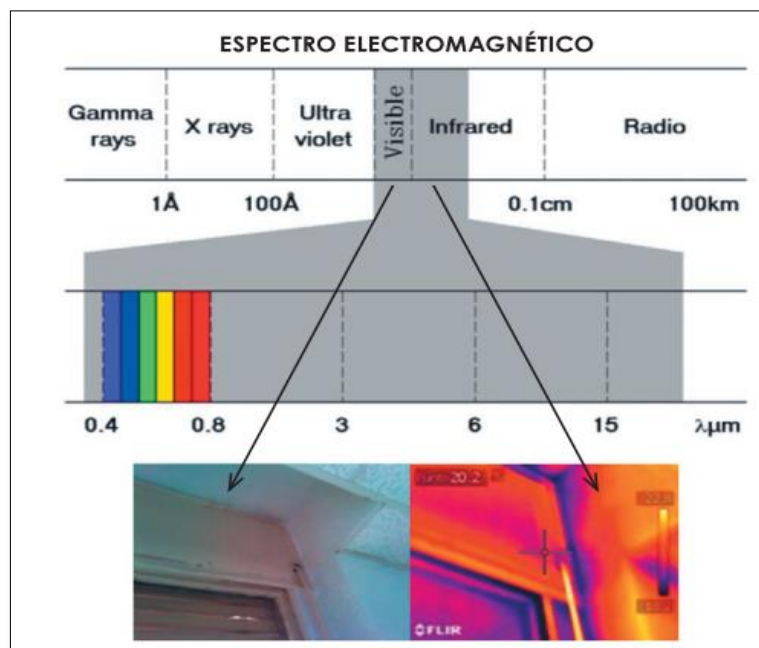


Figura 5 : Espectro electromagnético (Fenercom.com)

En este espectro, existe una banda cuya radiación tiene la capacidad de transmitir calor por emisión o absorción. Como se ha dicho antes, sus límites no están marcados exactamente, pero se sabe que la radiación térmica va desde el ultravioleta al infrarrojo, pasando por el visible, donde tiene la intensidad más elevada. El calor no es exclusivo del infrarrojo.

4.5.2 Transmisión de calor

Siempre que exista una diferencia de temperaturas entre dos cuerpos o entre dos porciones de un mismo cuerpo, se dice que el calor fluye en una dirección de mayor a menor temperatura. Hay tres métodos fundamentales mediante los cuales ocurre este intercambio de calor que se observa en la figura 6.

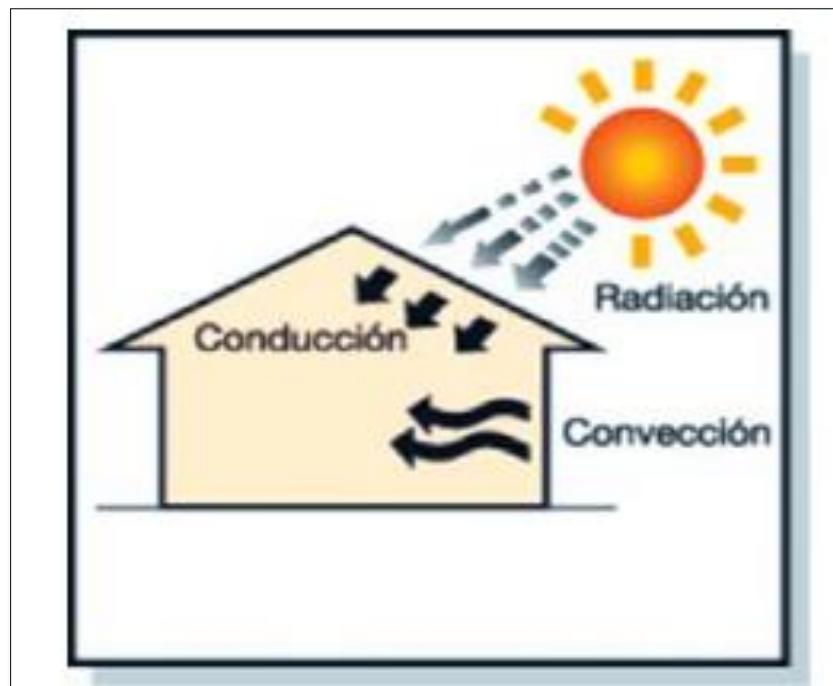


Figura 6: Transmisión de calor (Fenercom.com)

4.5.3 Mecanismos de transmisión de calor

I. Conducción

La conducción es la transferencia de energía de las partículas más energéticas de una sustancia hacia las adyacentes menos energéticas, como resultado de interacciones entre esas partículas. La conducción puede tener lugar en los sólidos, líquidos o gases. En los gases y líquidos la conducción se debe a las colisiones y a la difusión de las moléculas durante su movimiento aleatorio. En los sólidos se debe a la combinación de las vibraciones de las moléculas en una red y al transporte de energía por parte de los electrones libres.

El valor del flujo de calor (en condiciones estacionarias) es directamente proporcional a la conductividad térmica del objeto, a la sección transversal a través de la que fluye el calor, y a la diferencia de temperatura entre los puntos del cuerpo bajo estudio. Es también inversamente proporcional a la longitud, o distancia entre ambos puntos, como lo expresa la ecuación (1).

$$\dot{Q} = -kA \frac{dT}{dx} ; (W) \quad (1)$$

La cual se llama ley de Fourier de la conducción del calor, dT/dx es el gradiente de temperatura, el cual es la pendiente de la curva de temperatura en un diagrama T-x. El calor es conducido en la dirección de la temperatura decreciente y el gradiente de temperatura se vuelve negativo cuando esta última decrece al crecer x. El signo negativo en la ecuación (1) garantiza que la transferencia de calor en la dirección x positiva sea una cantidad positiva.

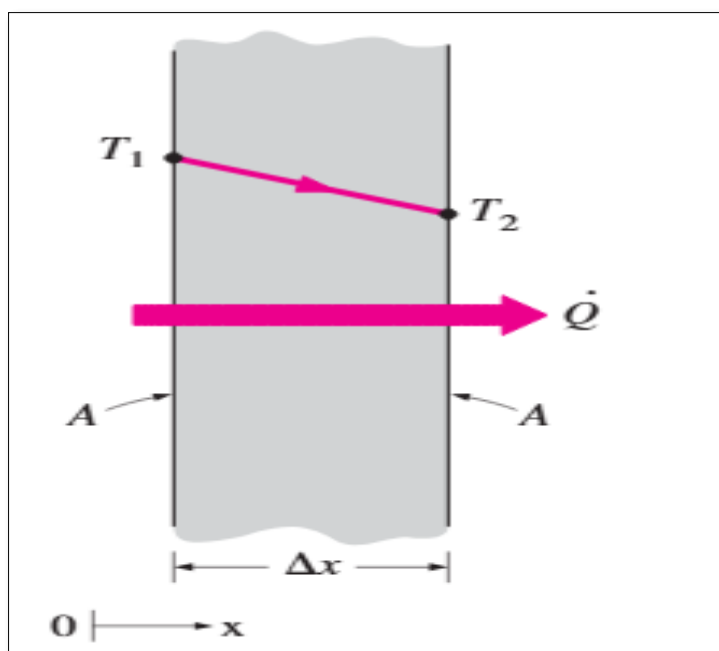


Figura 7: Transmisión de calor a través de una placa plana (Yunus.A. Cengel 2011)

Pese a tratarse de modelos cuya descripción fenomenológica es muy diferente, la expresión final que permite calcular el flujo de calor es similar.

Por lo tanto, si bien las características del fenómeno son distintas según se trate de gases, líquidos o sólidos, el hecho que en todos los casos pueda establecerse una proporcionalidad entre el flujo de calor y el gradiente de temperaturas hace que se agrupe a todos estos mecanismos dándoles el nombre único de conducción, con lo que la expresión matemática de la ecuación (1) se transforma en la única definición posible de dicho mecanismo.

Para **determinar el calor transmitido por conducción**, se necesita conocer qué factores intervienen y cómo afectan, es decir:

La transmisión de calor por conducción se ve afectada por 4 factores:

- K : (W/m. k): Conductividad térmica del material.
- A : (m^2): Área de la sección transversal.
- $T_1 - T_2$: (K): Diferencia de temperatura.
- L : (m): Longitud de la trayectoria de conducción.

II. Convección

La convección es el modo de transferencia de energía entre una superficie sólida y el líquido o gas adyacente que está en movimiento y comprende los efectos combinados de la conducción y el movimiento de fluidos. Entre más rápido es el movimiento de un fluido, mayor es la transferencia de calor por convección. En ausencia de cualquier movimiento masivo de fluido, la transferencia de calor entre una superficie sólida y el fluido adyacente es por conducción pura. La presencia de movimiento masivo del fluido acrecienta la transferencia de calor entre la superficie sólida y el fluido.

Consideremos el enfriamiento de un bloque caliente al soplar aire frío sobre su superficie superior figura 8. La energía se transfiere primero a la capa de aire adyacente al bloque, por conducción. En seguida, esta energía es acarreada alejándola de la superficie, por convección; es decir, por los efectos combinados de la conducción dentro del aire, que se debe al movimiento aleatorio de moléculas de éste, y del movimiento masivo o macroscópico de ese aire que remueve el aire calentado cercano a la superficie y lo reemplaza por otro más frío. (Yunus.A. Cengel 2011).

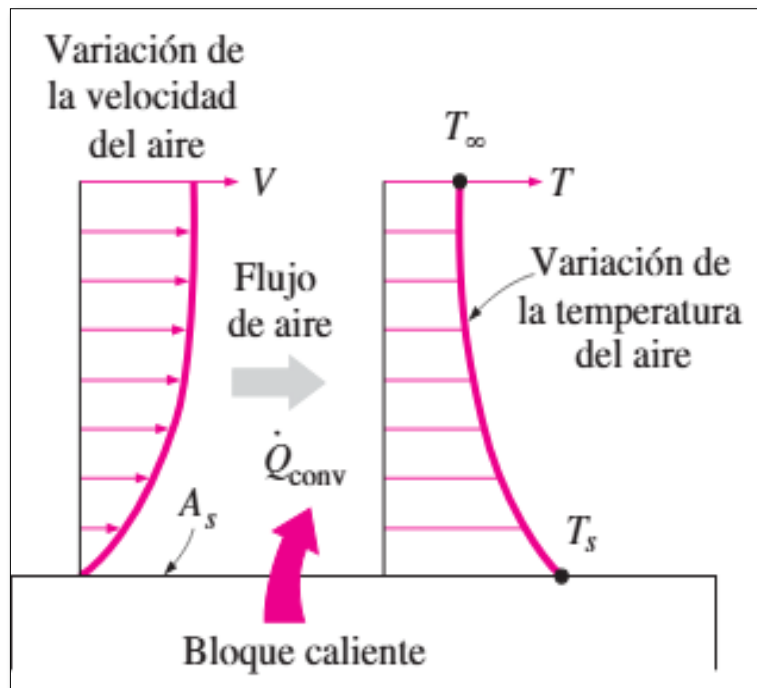


Figura 8: Transferencia de calor de una superficie caliente hacia el aire por convección (Yunus.A. Cengel 2011)

A pesar de la complejidad de la convección, se observa que la rapidez de la transferencia de calor por convección es proporcional a la diferencia de temperatura y se expresa en forma conveniente en la ecuación (2) denominada ley de Newton del enfriamiento.

$$\dot{Q} = hA_s(T_s - T_{\infty}) ; (W) \quad (2)$$

Donde:

- h : Coeficiente de transferencia de calor por convección ($W/m^2 \cdot ^\circ C$).
- A_s : Área superficial (m^2).
- T_s : Temperatura de la superficie ($^\circ C$).
- T_{∞} : Temperatura del fluido suficientemente alejado de esta superficie ($^\circ C$).

III. Radiación

La radiación es la energía emitida por la materia en forma de ondas electromagnéticas (o fotones) como resultado de los cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas. A diferencia de la conducción y la convección, la transferencia de calor por radiación no requiere la presencia de un medio interventor. De hecho, la transferencia de calor por radiación es la más rápida (a la velocidad de la luz) y no sufre atenuación en un vacío.

Todos los cuerpos a una temperatura arriba del cero absoluto emiten radiación térmica, la radiación es un fenómeno volumétrico y todos los sólidos, líquidos y gases emiten, absorben o transmiten radiación en diversos grados. Sin embargo, la radiación suele considerarse como un fenómeno superficial para los sólidos que son opacos a la radiación térmica, como los metales, la madera y las rocas, ya que las radiaciones emitidas por las regiones interiores de un material de ese tipo nunca pueden llegar a la superficie, y la radiación incidente sobre esos cuerpos suele absorberse en unas cuantas micras hacia adentro de dichos sólidos. (Yunus.A. Cengel 2011)

4.5.4 Fundamentos de la radiación infrarroja

- En el año 1840 los señores William y John Herschel determinaron el ancho de banda para las diferentes franjas del espectro infrarrojo, que se limita entre 0,01 μm y 100 μm de longitud de onda.
- En 1860 Kirchhoff demuestra que la capacidad que tienen los cuerpos para emitir es la misma que tienen para absorber energía radiante. El término cuerpo negro, es un cuerpo imaginario que absorbe toda la radiación térmica que recibe en cualquier longitud de onda.
- En 1879 La razón máxima de la radiación que se puede emitir desde una superficie a una temperatura termodinámica T (K) es expresada por la ecuación (3), llamada ley de Stefan-Boltzmann.

$$\dot{Q}_{max} = \sigma A_s T_s^4 ; (W) \quad (3)$$

La superficie idealizada que emite radiación a esta razón máxima se llama cuerpo negro y la radiación emitida por éste es la radiación del cuerpo negro.

La radiación emitida por todas las superficies reales es menor que la emitida por un cuerpo negro a la misma temperatura y se expresa en (4) como:

$$\dot{Q} = \varepsilon \sigma A_s T_s^4 ; (W) \quad (4)$$

en donde “ ε ” es la emisividad de la superficie. La emisividad cuyo valor está en el intervalo, $0 \leq \varepsilon \leq 1$, es una medida de cuán próxima está una superficie de ser un cuerpo negro, para el cual $\varepsilon = 1$. (Yunus.A. Cengel 2011)

Donde:

- $\dot{Q}$ Potencia emisiva superficial (W).
- σ Constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$).
- T Temperatura (K).
- En 1884 fue formulada por Wilhelm Wien otra ley de la radiación, conocida como la Ley de desplazamiento; La ecuación (5) establece la relación entre la temperatura y la longitud de onda donde ocurre la máxima emisión de energía:

$$\lambda_{max} = \frac{2,898}{T} (\mu m) \quad (5)$$

Donde,

- λ Longitud de onda.
- T Temperatura.

Las consecuencias de la ley de Wien es que cuanto mayor sea la temperatura de un cuerpo negro menor es la longitud de onda en la cual emite.

En la figura 9 se observa una gráfica de Longitud de Onda Vs Energía radiada por un objeto a diferentes temperaturas, con una mayor temperatura el pico de energía ocurre en una longitud de onda más corta, por el contrario, a bajas temperaturas el pico de energía se produce en una longitud de onda larga.

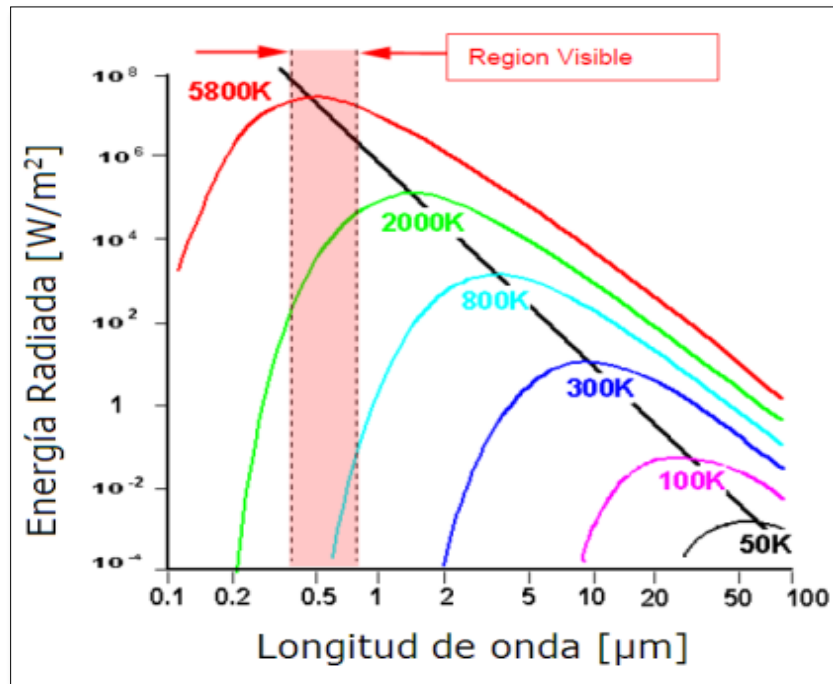


Figura 9: Ley de desplazamiento de Wien (Fenercom.com 2011)

- En 1900 Max Planck establece la distribución de la potencia radiada por un cuerpo negro a lo largo del espectro, ecuación (6).

$$W = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 * \left(e^{\frac{hc}{\sigma \lambda T}} - 1 \right)} \quad (6)$$

Donde:

- W Potencia emisiva superficial ; (W/m^2 ; μm).
- λ Longitud de onda.
- T Temperatura (k).
- h Constante de Planck $6,626 \times 10^{-34}$ (J/s).
- c Velocidad de la luz en el vacío $2,997 \times 10^8$ (m/s).
- σ Constante de Stefan-Boltzmann $1,4 \times 10^{-23}$ (J/K).

Para varias temperaturas se produce una familia de curvas, cuanto más alta es la temperatura menor es la longitud de onda para la cual W es máxima. La radiación térmica es propia de todos los cuerpos y cada uno de ellos irradia energía al espacio circundante.

Al caer sobre otros cuerpos una parte de esta energía se absorbe, la otra se refleja y la tercera pasa a través del cuerpo. Aquella parte de la energía radiante que es absorbida por el cuerpo, se transforma de nuevo en energía térmica.

La parte de energía que se refleja, incide sobre otros cuerpos (circundantes) y es absorbida por éstos. Lo mismo ocurre con aquella parte de energía que pasa a través del cuerpo. De este modo, después de una serie de absorciones, la energía de emisión (radiante) se distribuye por completo entre los cuerpos circundantes. Por consiguiente, cada cuerpo no solo irradia ininterrumpidamente, sino absorbe sin cesar la energía radiante.

4.5.5 Intercambio de radiación

La transmisión de calor por radiación se lleva a cabo por emisión y absorción de radiación térmica. Esta energía se transfiere a la velocidad de la luz, de ahí que la termografía sea tan útil detectando la radiación en continuo. Todos los cuerpos emiten y absorben radiación térmica al mismo tiempo. El calor neto transmitido será la diferencia entre lo que se ha absorbido y lo que se ha emitido.

A. Radiación incidente

La radiación incidente es toda la radiación que llega a un objeto desde cualquier fuente de su entorno. Se puede observar en la figura 10 cómo de una (en este caso) o varias fuentes (caso real), sale una determinada radiación, ésta llega a la superficie de un objeto y, una parte de esa energía la absorbe el cuerpo (α), otra parte es reflejada (ρ) por el objeto y por tanto no le afecta y la última parte de la energía la transmite (τ) y tampoco afecta al objeto.

$$W(\alpha) + W(\rho) + W(\tau) = W_{inc} \quad (7)$$

La proporción en que la radiación incidente se reparta entre estas variables dependerá de las propiedades del cuerpo descritas en la siguiente tabla:

Tabla 1: Tipos de radiacion

Tipo de radiación	Efecto	Letra griega	Propiedad del cuerpo
Emitida	Radiación emitida	ϵ	emisividad
Absorbida	Radiación absorbida	α	Absortividad
Reflejada	Radiación reflejada	ρ	reflectividad
Transmitida	Radiación transmitida	τ	transmisividad

Por la ley de conservación de la energía, tenemos entonces:

$$\alpha(\lambda) + \rho(\lambda) + \tau(\lambda) = 1 \quad (8)$$

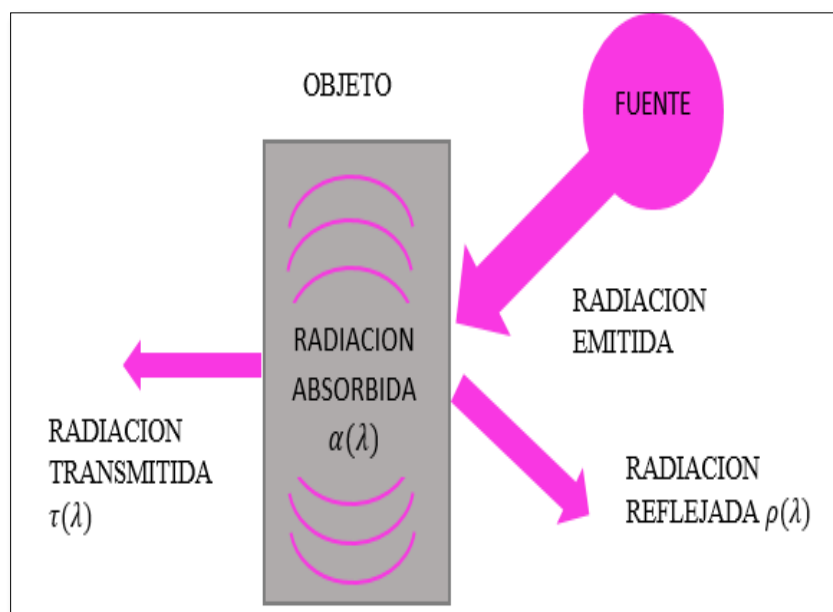


Figura 10 : Balance de radiación incidente de un cuerpo (Desarrollo propio)

B. Radiación saliente

La radiación saliente es toda la radiación que abandona la superficie de un cuerpo, independientemente de su fuente original.

Esta radiación será la que el termógrafo determine con su cámara. Como se ha visto, está formada por tres tipos diferentes de radiación.

La primera componente es la radiación emitida ($W\varepsilon$) que es la capacidad del cuerpo de emitir por sí mismo en todas las direcciones ver figura 11, y la cantidad de radiación emitida depende de la temperatura y la emisividad del cuerpo.

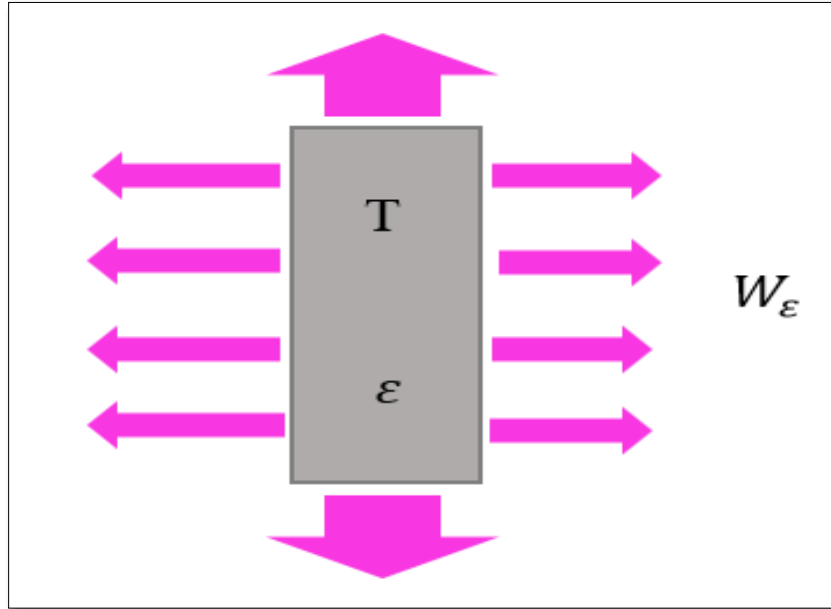


Figura 11 : Radiación emitida por el cuerpo (Desarrollo propio)

Las otras dos fuentes de radiación son cuerpos que se encuentran detrás o frente del cuerpo, éste reflejará su radiación o permitirá el paso de la radiación a través de él. Por lo tanto, la radiación total saliente de un cuerpo proviene de diferentes componentes, a saber, la emitida por el objeto. La reflejada desde una fuente externa al cuerpo y la transmitida desde una fuente detrás del objeto.

Podemos expresarlo de la siguiente manera:

$$W \varepsilon(\lambda) + W \rho(\lambda) + W \tau(\lambda) = W_{sal} \quad (9)$$

Por conservación de la energía:

$$\varepsilon(\lambda) + \rho(\lambda) + \tau(\lambda) = 1 \quad (10)$$

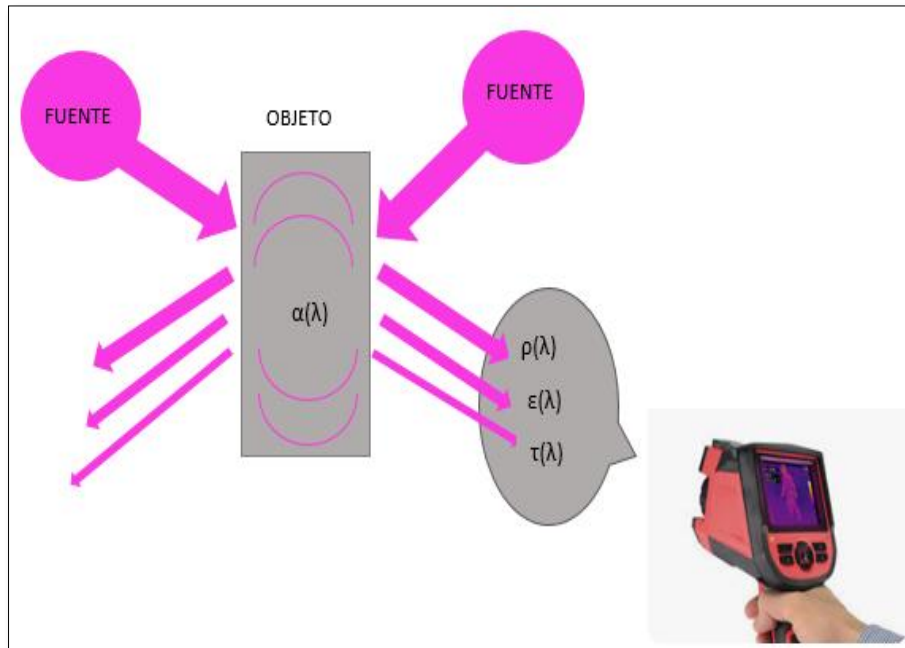


Figura 12 : Radiación saliente de un cuerpo (Desarrollo propio)

La magnitud de las componentes de la radiación reflejada y radiación transmitida, dependen de la reflectividad y transmisividad del cuerpo y la radiación proveniente del objeto depende de la temperatura y emisividad de él.

La capacidad de un cuerpo para absorber energía en forma de radiación incidente siempre coincide con su capacidad para emitir su propia energía como radiación, si el mismo está en equilibrio térmico. (Ley de Kirchhoff).

$$\varepsilon = \alpha \quad (11)$$

Entonces, el balance de radiación saliente de un cuerpo dependerá de la capacidad del cuerpo y su suma es:

$$\varepsilon(\lambda) + \rho(\lambda) + \tau(\lambda) = 1 \quad (12)$$

Un cuerpo negro emite el 100% de su energía, lo que significa que no existe ningún otro objeto que sea capaz de emitir más energía. Por consiguiente, sus características son:

$$\varepsilon = 1 \quad (13)$$

$$\rho + \tau = 0 \quad (14)$$

En la vida real los objetos pueden poseer todas las características, es decir, la habilidad de emitir, absorber, reflejar y transmitir radiación infrarroja, aunque la mayoría de los cuerpos sólidos no transmiten porque son opacos, esto significa:

$$\tau = 0 \quad (15)$$

Por consiguiente, la radiación saliente solo tiene dos componentes, la radiación reflejada y la radiación emitida, por lo tanto:

$$\varepsilon + \rho = 1 \quad (16)$$

Los objetos reales no son cuerpos negros, entonces, la emisividad de los cuerpos es distinta a uno ($\varepsilon \neq 1$) y la componente de reflexión es diferente de cero ($\rho \neq 0$).

Lo anterior expresa que sólo se consideran dos fuentes de radiación (la emitida por el objeto en sí mismo y la reflejada por el entorno) en la medición de temperatura por medio de la radiación infrarroja como se observa en la figura 13, por lo tanto, el balance de la radiación saliente se encuentra definido por la ecuación 17.

$$W_{\varepsilon} + W_{\rho} = W_{saliente} \quad (17)$$

Es importante comprender que la radiación saliente proviene de dos fuentes diferentes y esto permite interpretar correctamente la información suministrada por la medición de la radiación infrarroja de un cuerpo. Sí el cuerpo no es opaco se deben hacer otras consideraciones para la medición de temperatura.

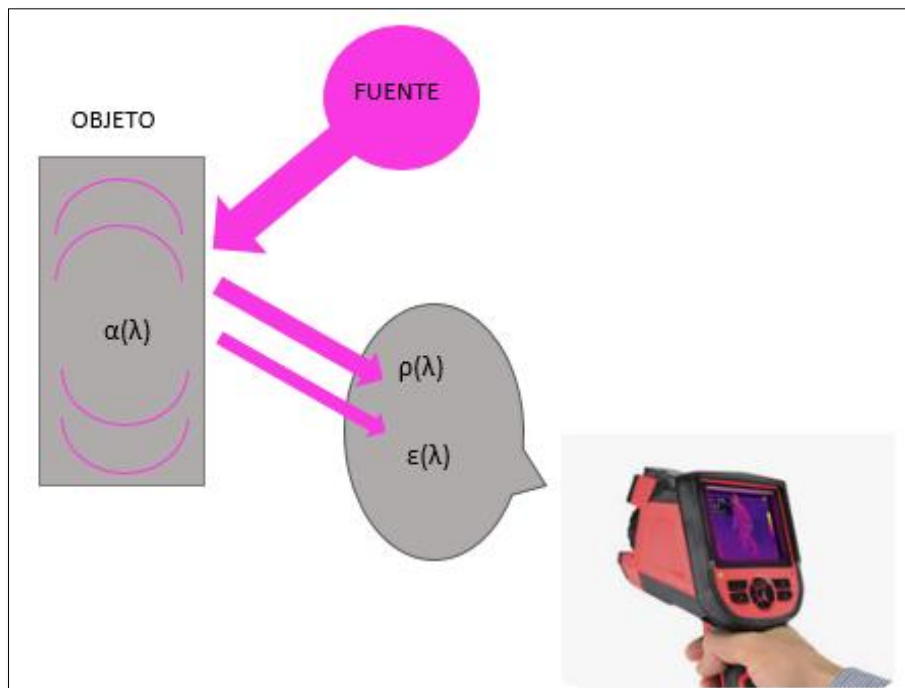


Figura 13: Radiación saliente de un cuerpo opaco (Desarrollo propio)

4.5.6 Tipos de análisis

Existen dos tipos básicos de análisis de la misma imagen infrarroja, en función de sus intereses, el grado de exactitud que necesite o de las necesidades del cliente para el que trabaja. Se puede hacer un análisis cualitativo de la imagen obtenida, o cuantitativo. Veamos en qué consiste cada uno.

I. Análisis cualitativo

La imagen térmica es analizada para poner de manifiesto anomalías de distinta magnitud, localizarlas y evaluar el nivel de gravedad. Es el primer análisis que hace el termógrafo, aunque se quiera hacer otro tipo de análisis, inevitablemente al comienzo se tratará rápidamente de buscar aquello que en nuestra cabeza no encaja o se ve que se aleja de lo normal para el objeto bajo estudio. El 90% de las inspecciones serán de este tipo, lo cual no quiere decir que sea ni más sencillo ni más complejo, simplemente es un tipo de análisis.

II. Análisis cuantitativo

Determina la temperatura o temperaturas de las partes de la imagen térmica que interesan para que a partir de éstas se puedan extraer las conclusiones sobre las anomalías detectadas.

Este análisis se realiza con temperaturas reales, con compensación de los parámetros de objeto de emisividad y temperatura aparente reflejada.

4.5.7 Compensación de la imagen térmica

Todas las cámaras infrarrojas van a permitir modificar los “parámetros de objeto”, temperatura aparente reflejada, emisividad, distancia, temperatura exterior y humedad relativa. Esto permite pasar de temperatura aparente a temperatura real.

4.5.8 Temperatura aparente reflejada (RTC)

El RTC es un valor de temperatura en grados Celsius ($^{\circ}\text{C}$), que nos resume el efecto global que tienen las radiaciones de entorno que se reflejan en la superficie a la que estamos apuntando. Es direccional, es decir puede ser que en un determinado ángulo reciba radiaciones que no recibe en otro ángulo, entonces para determinar la RTC, debemos tener en cuenta la posición en que se realiza la medición y solo es válida al momento de la toma de la misma, ya que las condiciones pueden variar de medición en medición.

Sabemos que, si medimos un objeto de emisividad conocida, conocemos el valor de reflectividad ($\epsilon + \rho = 1$), sin embargo esto solo es la proporción en la que la radiación recibida fue emitida o reflejada por la superficie, pero para corregir los efectos de la radiación reflejada necesitamos más información para cuantificarla, la emisividad y reflectividad son dependientes de la superficie, pero el reflejo del entorno depende de las condiciones ambientales y de los objetos que tenga alrededor, Ver figura 14.

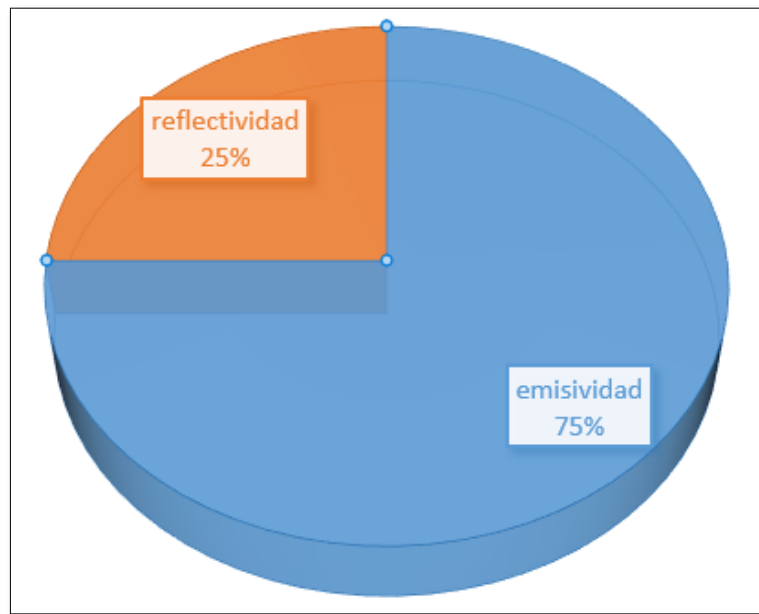


Figura 14 : Porcentajes de radiación (Desarrollo propio)

Conocemos la proporción en la que influye la radiación del entorno, ¿Pero a cuanto equivale esa energía expresada en valores de temperatura?

Mientras menor sea la emisividad mayor será la influencia que tendrá la RTC sobre nuestra medición, así mismo a mayor emisividad menor será la influencia sobre los valores medidos y posiblemente podamos hacer simplificaciones.

4.5.9 Medición de la temperatura aparente reflejada

Asumir un valor de RTC igual a la temperatura ambiente, es factible, si se ha neutralizado cualquier posible fuente de interferencia que pudiera afectar la medición, entonces la temperatura infrarroja reflejada es igual a la temperatura ambiente, y podemos medirla con un termómetro de aire e ingresar el valor en la cámara termográfica.

Alternativamente podemos obtener un valor aproximado si tomamos un promedio de piso, techo y paredes de la sala, recordemos que esto es válido si trabajamos con superficies de alta emisividad.

Cuando no podemos asumir el valor de RTC igual a la temperatura ambiente, debemos medir improvisando con un radiador Lambert, es un objeto que refleja la radiación incidente con la difusión óptima, y con la misma intensidad en todas las direcciones.

Si apuntamos con la cámara a este espejo de radiaciones, el 100% de lo que llega a la cámara y que la misma transforma en valores de temperatura, es el valor de RTC, y es el valor que deberemos ingresar a nuestra cámara termográfica.

La manera de improvisar un radiador Lambert, es utilizando un papel aluminio el cual se arruga y luego se vuelve a estirar, el mismo se coloca sobre el objeto a medir o a su lado, el aluminio es un material de alta reflectividad y gracias a las arrugas la radiación se refleja de manera uniformemente difusa.

Si bien la emisividad del aluminio es muy baja, para realizar esta medición, se ajusta en la cámara una emisividad de valor unitario $\varepsilon = 1$, con esto, le estamos diciendo a la cámara que convierta el 100% de la radiación tal como viene a valor de temperatura utilizando la ley de Stefan-Boltzmann, como el 100% de la radiación que incide en el lector de la cámara será reflejo del entorno, entonces es equivalente a la RTC que estamos buscando. Este valor de RTC se ajusta en la cámara y luego se puede medir la temperatura del objeto con la emisividad ajustada a la superficie del mismo.

4.6 Determinación de la emisividad

Se puede tener una orientación a través de tablas de emisividad, para diferentes elementos y condiciones, pero se puede determinar de forma empírica, para poder realizar esto, necesitamos que la superficie de análisis tenga una diferencia de temperatura de por lo menos 15°C con respecto a la RTC, para poder realizar este paso se puede utilizar una pistola de calor para calentar la superficie.

4.6.1 Análisis con termómetro de superficie

- A. Obtener una muestra del material o el mismo material a una temperatura distinta a la RTC por más de 15°C .
- B. Medir la temperatura superficial con un termómetro de contacto en un punto, este valor debe ser anotado.
- C. Teniendo el valor de RTC lo configuramos en la cámara además de colocar la emisividad en 1, sin salir del menú de configuración de la cámara apuntamos con ella en el mismo punto medido con el termómetro de contacto.

Vamos variando el valor de emisividad lentamente, la cámara nos mostrara en pantalla el valor recalculado de temperatura para esa nueva emisividad, la idea es encontrar para que valor de emisividad la cámara nos muestra la misma temperatura medida por el termómetro.

4.6.2 Análisis con cinta de emisividad conocida

- A. Obtener una muestra del material o el mismo material a una temperatura distinta a la RTC por más de 15°C. pegamos una cinta de emisividad conocida (aislante o cinta de papel) y esperamos a que tome la temperatura de la superficie.
- B. Medimos sobre el recubrimiento aplicado, configurando el valor de RTC y la emisividad, tomamos nota del valor de temperatura sobre la superficie que será el correcto.
- C. Ahora apuntamos con la cámara a un punto cercano a la superficie sin cubrir, configuramos la emisividad en 1.
- D. Vamos a ir variando este valor de emisividad, hasta que el valor de temperatura de la superficie no cubierta coincida con el valor de temperatura que tomamos sobre la superficie cubierta con emisividad conocida. Si solo queremos saber el valor de temperatura que la superficie tiene, con el paso 2 ya lo tenemos cubierto.

4.7 Tipo de reflexion

Se introduce adicionalmente otro concepto que, si bien no repercute en la configuración de la cámara, se puede observar en la práctica, independientemente de su emisividad.

Especlaridad

Como dijimos independientemente que la superficie tenga una emisividad alta o baja, el reflejo que se produce sobre ella puede ser de forma ordenada o desordenada según el acabado sobre ella, si la superficie es pulida el ángulo de incidencia o de reflejo de la radiación sobre la superficie será el mismo.

En cambio si la superficie es rugosa el reflejo que se produce es difuso, para nuestro análisis es conveniente que los reflejos sean difusos, si es así, significa que el valor de RTC es homogéneo para toda la superficie, si el reflejo es especlar puede suceder entonces que los objetos que se reflejen en la superficie aparezcan en la imagen interfiriendo con la medición y análisis, en tal caso la superficie se comporta como tuviese distintos valores de RTC, estos reflejos no tienen solución y podemos evitarlos, ya sea cambiado de ángulo con la cámara o bien apantallando la fuente de interferencia.

4.8 Equipo de medición de temperatura infrarroja

4.8.1 Equipo de medición FLIR E6-XT

La serie Ex de FLIR está formada por cámaras compactas. Estas representan una opción económica frente a un termómetro infrarrojo, ya que no solo generan una imagen térmica, sino que también ofrecen información de temperatura vinculada a cada píxel. Con características innovadoras como la tecnología MSX y variados formatos visuales, su facilidad de uso destaca notablemente.

Las cámaras de la serie Ex de FLIR combinan facilidad de manejo, diseño compacto y alta resistencia, lo que las hace ideales para operar en entornos exigentes. Además, su amplio campo de visión las convierte en una herramienta sobresaliente para aplicaciones en el sector de la construcción. (ver Anexo A.1)

4.9 Aplicaciones de la termografía

Las cámaras termográficas son una herramienta tan valiosa y versátil que resulta imposible enumerar todas sus posibles aplicaciones. Algunas de las formas en las que se pueden usar las cámaras termográficas en el contexto del mantenimiento predictivo se explican a continuación.

4.9.1 Sistemas eléctricos

4.9.1.1 Instalaciones de alta tensión

El calor es un factor importante en las instalaciones de alta tensión. Cuando la corriente eléctrica pasa a través de un elemento resistivo, genera calor. Una mayor resistencia produce un aumento del calor. Con el tiempo, la resistencia de las conexiones eléctricas aumenta, debido, por ejemplo, a la holgura y la corrosión. El correspondiente incremento de la temperatura puede hacer que los componentes fallen, lo que puede provocar cortes de tensión inesperados e incluso lesiones. Además, la energía empleada en generar calor provoca pérdidas de energía innecesarias.

Ejemplos de fallos en instalaciones de alta tensión que se pueden detectar con termografía:

- Oxidación de interruptores de alta tensión.
- Conexiones recalentadas.
- Conexiones mal aseguradas.
- Defectos de aislamiento.

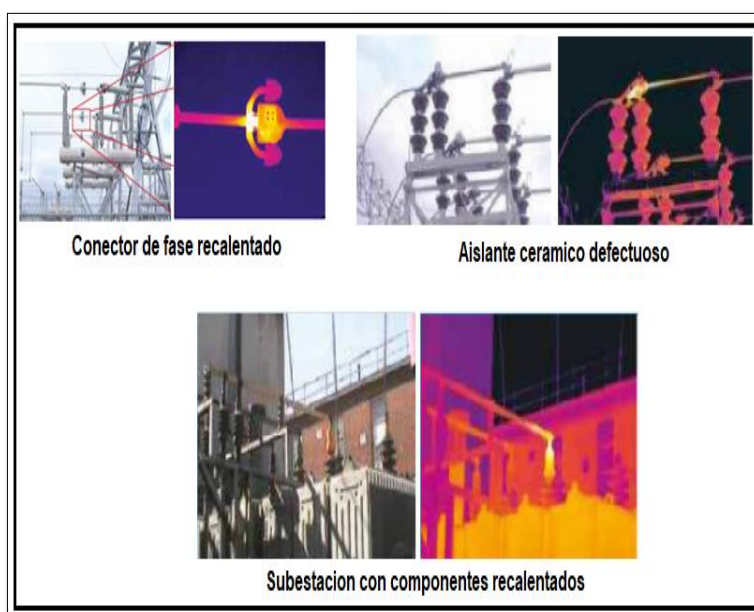


Figura 15 : Termografía en alta tensión (Fenercom.com)

4.9.1.2 Instalaciones de baja tensión

Además de conexiones sueltas, los sistemas eléctricos sufren desequilibrios de carga, corrosión y aumentos de impedancia de corriente. Las inspecciones térmicas permiten localizar rápidamente puntos calientes, determinar la gravedad del problema y calcular el tiempo en el que se debe reparar el equipo.

Ejemplos de fallos en equipamiento de baja tensión que se pueden detectar con termografía:

- Conexiones de alta resistencia.
- Conexiones corroídas.
- Daños internos en los fusibles.
- Fallos internos en los disyuntores.
- Conexiones defectuosas y daños internos.

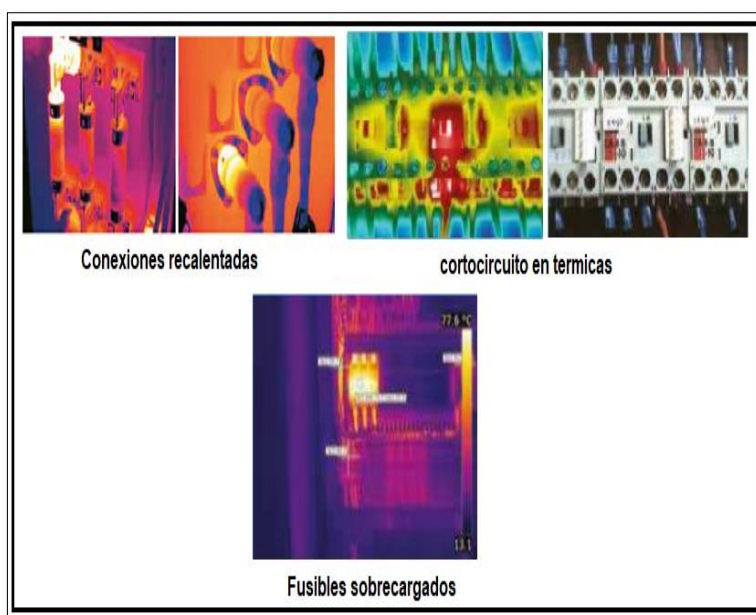


Figura 16 : Termografía en media y baja tensión (Fenercom.com)

4.9.2 Instalaciones mecánicas

Cuando los componentes mecánicos se desgastan y pierden eficiencia suelen disipar más calor. Como resultado, los equipos o sistemas defectuosos aumentan rápidamente su temperatura antes de averiarse. Al comparar periódicamente lecturas de una cámara termográfica con el perfil de temperatura de una máquina en condiciones de funcionamiento normales, es posible detectar una gran cantidad de fallos distintos.

Ejemplos de averías mecánicas que se pueden detectar con la termografía:

- Problemas de lubricación.
- Errores de alineación.
- Motores recalentados.
- Rodillos sospechosos.
- Bombas sobrecargadas.
- Ejes de motor recalentados.
- Rodamientos con exceso de temperatura.

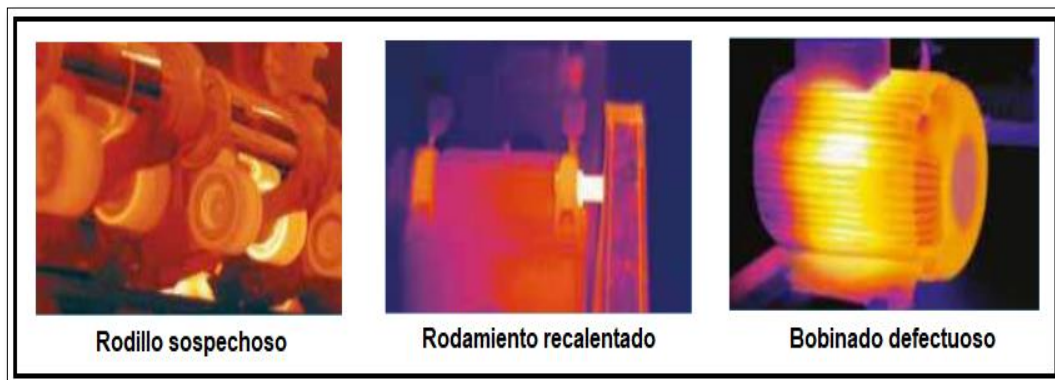


Figura 17 : Averías mecánicas (Fenercom.com)

4.9.3 Tuberías

La inspección del estado del material de aislamiento que rodea las tuberías puede ser vital. Las pérdidas de calor por un aislamiento defectuoso se detectan con mucha claridad en la termografía, lo que permite reparar rápidamente el aislamiento y evitar importantes pérdidas de energía u otros daños. Las válvulas de proceso son otro buen ejemplo de equipamiento de tuberías que se suelen inspeccionar con cámaras termográficas.

Además, para la detección de fugas, una cámara termográfica también se puede utilizar para determinar si la válvula se encuentra abierta o cerrada, incluso a distancia.

Ejemplos de averías en tuberías que se pueden detectar con la termografía:

- Fugas en bombas, tuberías y válvulas.
- Averías del aislamiento.
- Obstrucciones en tuberías.

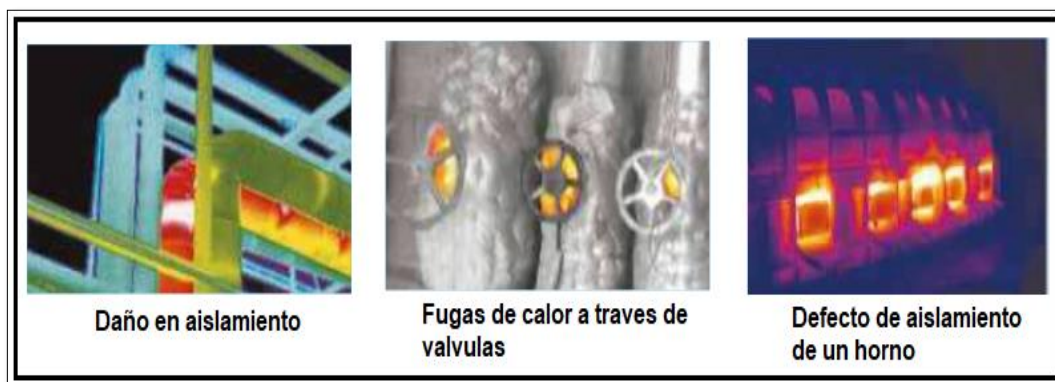


Figura 18 : Fugas y defectos de aislamiento (Fenercom.com)

4.9.4 Instalaciones refractarias y petroquímicas

Una gran variedad de industrias emplea hornos y calderas en sus procesos, sin embargo, las tuberías refractarias de los hornos, calderas, estufas, incineradoras, equipos de craqueo y reactores tienden a la degeneración y a la pérdida de rendimiento. Mediante una cámara termográfica, el material refractario dañado y la correspondiente pérdida de calor se pueden localizar con facilidad, puesto que la transmisión de calor se observará claramente en la termografía.

Las cámaras termográficas también se utilizan ampliamente en el sector petroquímico. Ofrecen un método de diagnóstico rápido y preciso para el mantenimiento de hornos, la gestión de la pérdida refractaria y la inspección de aletas de condensador. Los intercambiadores de calor se pueden inspeccionar para detectar conductos obstruidos.



Figura 19 : Inspecciones de aislamiento (Fenercom.com)

4.9.5 Detección de nivel de depósitos

La termografía también se utiliza para detectar niveles en depósitos. Gracias a los efectos de emisividad o a las diferencias de temperatura, son capaces de indicar de forma clara el nivel de líquido.

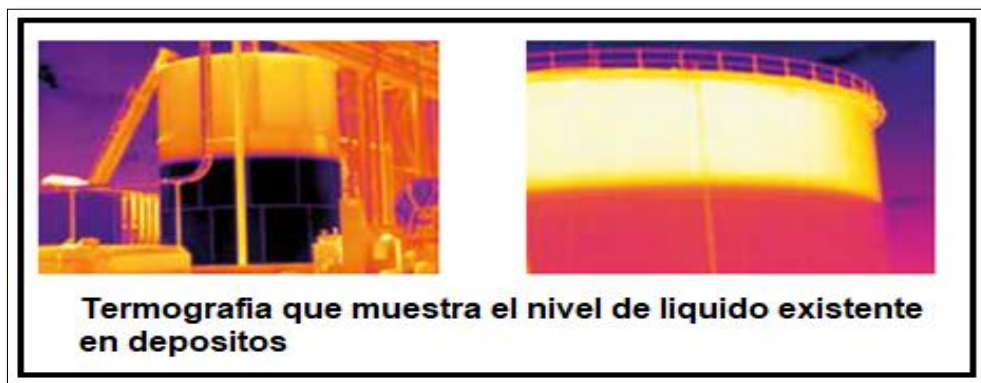


Figura 20 : Medición de niveles (Fenercom.com)

4.9.6 Ventajas de utilizar termografía infraroja

La gran mayoría de los problemas y averías en el entorno industrial ya sea de tipo mecánico, eléctrico y de fabricación están precedidos por cambios de temperatura que pueden ser detectados mediante la monitorización de temperatura con sistema de Termovisión por Infrarrojos. La implementación de programas de inspecciones termográficas como mantenimiento predictivo en instalaciones, maquinaria, cuadros eléctricos, minimiza el riesgo de un fallo de equipos y sus consecuencias, a la vez que también ofrece una herramienta para el control de calidad de las reparaciones efectuadas.

Con el uso de la termografía se consiguen las siguientes ventajas:

- I. Método de análisis sin detención de procesos productivos, ahorra gastos.
- II. Baja peligrosidad para el operario por evitar la necesidad de contacto con el equipo.
- III. Determinación exacta de puntos deficientes en una línea de proceso.
- IV. Reduce el tiempo de reparación por la localización precisa del fallo.
- V. Facilita informes muy precisos al personal de mantenimiento.
- VI. Ayuda al seguimiento de las reparaciones previas.
- VII. Protección contra los inconvenientes producidos por el fallo inesperado de algún elemento, al detectarlo antes de que se produzca.

5 Mantenimiento predictivo basado en el análisis de vibraciones

El mantenimiento predictivo mediante vibraciones es, hoy en día, uno de los métodos concretos en los que más se ha avanzado dentro de las tecnologías de mantenimiento de la tercera generación.

Por muy perfectas que sean las máquinas, tuberías, válvulas, intercambiadores de calor, etc., vibran en funcionamiento, dentro de tal vibración se almacena gran cantidad de información que puede ser útil para conocer el estado de la máquina. Esto es, analizando la “forma de vibrar” se puede deducir el estado con una eficaz base de datos y análisis de tendencias, y así poder programar la intervención preventiva para el momento en que realmente sea necesaria.

5.1 Vibración mecánica

En su forma más sencilla, una vibración se puede considerar como la oscilación o el movimiento repetitivo de un objeto alrededor de una posición de equilibrio. La posición de equilibrio es a la que llegará cuando la fuerza que actúa sobre él sea cero.

Este tipo de vibración se llama vibración de cuerpo entero, ya que todas las partes del cuerpo se mueven juntas en la misma dirección en cualquier momento.

La vibración de un objeto es causada por una fuerza de excitación. Esta fuerza se puede aplicar externamente al objeto o puede tener su origen dentro del mismo. La proporción (frecuencia) y la magnitud de la vibración de un objeto dado, están completamente determinados por la fuerza de excitación, su dirección y frecuencia.

Esa es la razón porque un análisis de vibración puede determinar las fuerzas de excitación actuando en una máquina, esas fuerzas dependen del estado de la máquina, y el conocimiento de sus características e interacciones, permite diagnosticar un problema de la máquina.

Una forma de ilustrar una vibración mecánica y su medición a través de un transductor de vibraciones se muestra en la figura 21. El transductor de vibraciones esta rígidamente unido a la superficie externa del cojinete, por lo tanto, se mueve de la misma forma y mide el movimiento de este elemento.

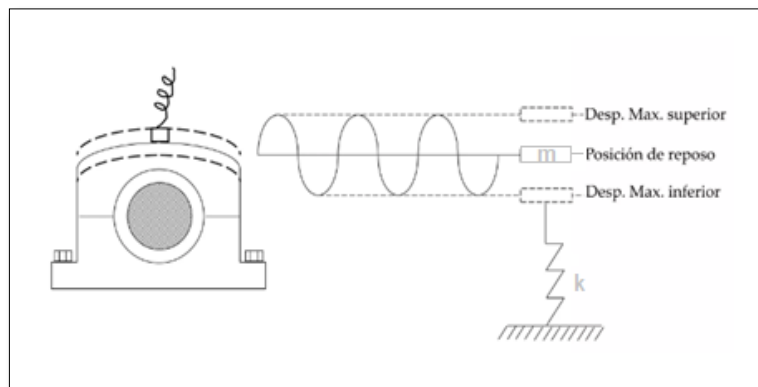


Figura 21: Movimiento vibratorio del cojinete de una máquina (Desarrollo propio)

5.1.1 Ecuaciones de movimiento

Consideremos ahora un resorte en posición horizontal como el de la figura 22, el que es elongado x_0 desde su posición de equilibrio. La masa del objeto es m y la rigidez del resorte es k . La única fuerza actuando sobre la masa es la fuerza del resorte.

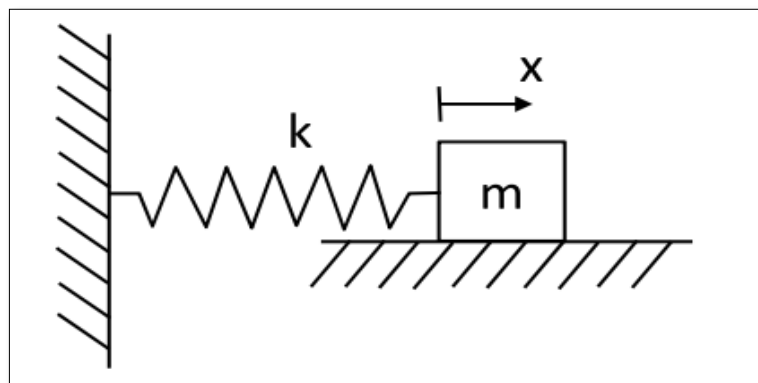


Figura 22: Sistema masa-resorte horizontal (Desarrollo propio)

Por suma de fuerzas se obtiene la ecuación de movimiento en la dirección x :

$$m\ddot{x}(t) = -kx(t) \quad \text{o} \quad m\ddot{x}(t) + kx(t) = 0 \quad (18)$$

donde $\ddot{x}(t)$ denota la segunda derivada del desplazamiento (i.e., la aceleración). La solución de esta ecuación se puede escribir como:

$$x(t) = A \sin(w_n t + \phi) \quad (19)$$

Esta ecuación describe un movimiento oscilatorio de frecuencia w_n y amplitud A , w_n se denomina frecuencia natural, determina el intervalo de tiempo en el que la función se repite, ϕ , denominada fase, muestra el valor inicial de la función sinusoidal.

La fase se mide en radianes (rad), mientras que la frecuencia se mide en radianes por segundo (rad/s). Muchas veces la frecuencia natural es medida en ciclos por segundo (Hertz). La frecuencia en Hertz se obtiene al dividir la frecuencia natural por 2π .

$$f_n = \frac{w_n}{2\pi} \text{ (Hz)} \quad (20)$$

Para verificar que la ecuación (19) sea efectivamente una solución de la ecuación de movimiento, la sustituimos en la ecuación (18):

$$-mw_n^2 A \sin(w_n t + \phi) = -k A \sin(w_n t + \phi) \quad (21)$$

Esta última ecuación se satisface si,

$$w_n^2 = \frac{k}{m} \quad \text{o} \quad w_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (22)$$

Las constantes ϕ y A , están definidas por las condiciones iniciales del problema.

Consideremos que el resorte se encuentra en una posición x_0 , en $t = 0$, la fuerza inicial kx_0 va a iniciar el movimiento.

Si adicionalmente conocemos la velocidad inicial v_0 , tenemos que:

$$x_0 = x(0) = A \text{sen}(\phi) \quad (23)$$

$$v_0 = \dot{x}(0) = \omega_n A \cos(\phi) \quad (24)$$

Resolviendo ambas ecuaciones se obtiene:

$$A = \frac{\sqrt{\omega_n^2 x_0^2 + v_0^2}}{\omega_n} \quad y \quad \phi = \tan^{-1} \frac{\omega_n x_0}{v_0} \quad (25)$$

Por lo tanto, la solución de la ecuación de movimiento para el sistema masa-resorte es:

$$x(t) = \frac{\sqrt{\omega_n^2 x_0^2 + v_0^2}}{\omega_n} \text{sen} \left(\omega_n t + \tan^{-1} \frac{\omega_n x_0}{v_0} \right) \quad (26)$$

La solución es la que se esquematiza en la figura 23:

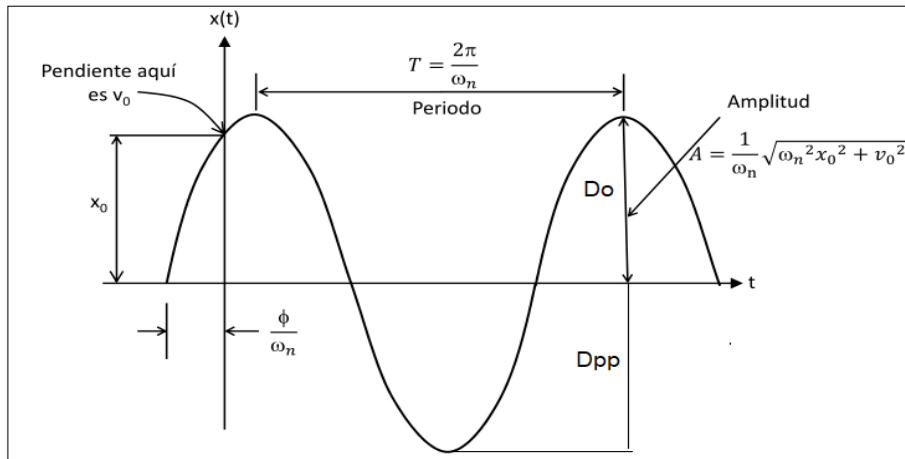


Figura 23: Solución de la ecuación de movimiento para un sistema de un grado de libertad (Viviana Meruane; Vibraciones mecánicas.2012)

5.1.2 Definiciones aplicables al movimiento armónico simple

- $x(t)$: Es el desplazamiento vibratorio, y es la distancia a la que se encuentra el cuerpo en cualquier instante de tiempo “ t ”.
- D_o : Desplazamiento pico o amplitud máxima del desplazamiento.

Se utiliza como medición indirecta de los esfuerzos generados por la vibración en los descansos hidrodinámicos.

- D_{pp} : Desplazamiento pico a pico o máxima distancia que se desplaza la masa mientras vibra.

Se utiliza para controlar que el rotor no toque el estator, es decir, el D_{pp} debe ser menor al juego diametral entre rotor y estator.

- T : El periodo de la onda, es el tiempo necesario para un ciclo, o para un viaje ida y vuelta, o de un cruce del nivel cero hasta el siguiente cruce del nivel cero en la misma dirección. El periodo se mide en segundos o milisegundos dependiendo de qué tan rápido se cambie la onda.
- f : La frecuencia de la onda : $1/T$, es el número de ciclos que ocurren en un segundo, y sencillamente es el recíproco del período.
- RPC o RMS: Amplitud Raíz del Promedio de los Cuadrados.

Es la raíz cuadrada del promedio de los cuadrados de los valores de la onda. En el caso de una onda senoidal el valor RPC es igual a 0. 707 del valor pico, pero esto es solo válido en el caso de una onda senoidal. Define la severidad vibratoria según Norma ISO 10816.

Esta es la misma curva que la de una función senoidal trigonométrica, y se puede considerar como la más sencilla y básica de todas las formas repetitivas de ondas. La velocidad del movimiento es igual a la proporción del cambio del desplazamiento, o en otras palabras a que tan rápido se cambia su posición.

Derivando la expresión (19) respecto al tiempo tenemos:

$$v = \frac{dx}{dt} = Aw_n \cos(w_n t + \phi) \quad (27)$$

Donde:

v = Velocidad instantánea.

Aquí se puede ver que la forma de la función de velocidad también es senoidal, pero ya que está descrita por el coseno, está desplazado 90 grados.

La aceleración del movimiento que aquí se describe está definida como la proporción de cambio de la velocidad, o que tan rápido la velocidad está cambiando en cualquier momento.

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2} = -Aw_n^2 \sin(w_n t + \phi) \quad (28)$$

Donde:

a = Aceleración instantánea.

También aquí hay que notar que la función de aceleración fue desplazada por 90 grados adicionales como lo indica el signo negativo.

Si examinamos estas ecuaciones, se ve que la velocidad es proporcional al desplazamiento por la frecuencia, y que la aceleración es proporcional al cuadrado de la frecuencia por el desplazamiento. Eso quiere decir que con un gran desplazamiento y a una alta frecuencia, resultan velocidades muy altas, y se requerirían niveles de aceleración extremadamente altos.

Tabla 2: Parámetros de vibración

MEDIDA	UNIDADES	DESCRIPCION
DESPLAZAMIENTO	Mils p-p (sist. Ingles) Micras p-p (sist. Métrico)	Movimiento de la máquina, estructura o rotor, relativo al esfuerzo
VELOCIDAD	Pulg/seg 0-p; RPC (sist. Ingles) Mm/seg (sist. Métrico)	Relacionado con la fatiga, condiciones generales de la máquina.
ACELERACION	Gs o pulg/seg ²	Relacionado con los esfuerzos presentes en los componentes de las máquina.

5.2 Concepto de fase

Fase es una medida de la diferencia de tiempo entre dos ondas senoidales. Aunque la fase es una diferencia verdadera de tiempo, siempre se mide en términos de ángulo, en grados o radianes.

La diferencia en fase entre dos formas de onda se llama a veces el desplazamiento de fase. Por ejemplo, un desplazamiento de 90 grados es un desplazamiento de un cuarto del periodo de la onda.

El desplazamiento de fase puede ser considerado positivo o negativo; eso quiere decir que una forma de onda puede ser retrasada relativa a otra o una forma de onda puede ser avanzada relativa a otra. Esos fenómenos se llaman atraso de fase y avance de fase respectivamente.

En la figura 24 se observa como la onda de velocidad tiene un avance de 90° con respecto a la onda de posición, así mismo la curva de aceleración tiene un avance de 90° con respecto a la curva de velocidad y de 180° con respecto a la posición. Esto quiere decir que la aceleración de un objeto vibrando siempre estará en la dirección opuesta al desplazamiento.

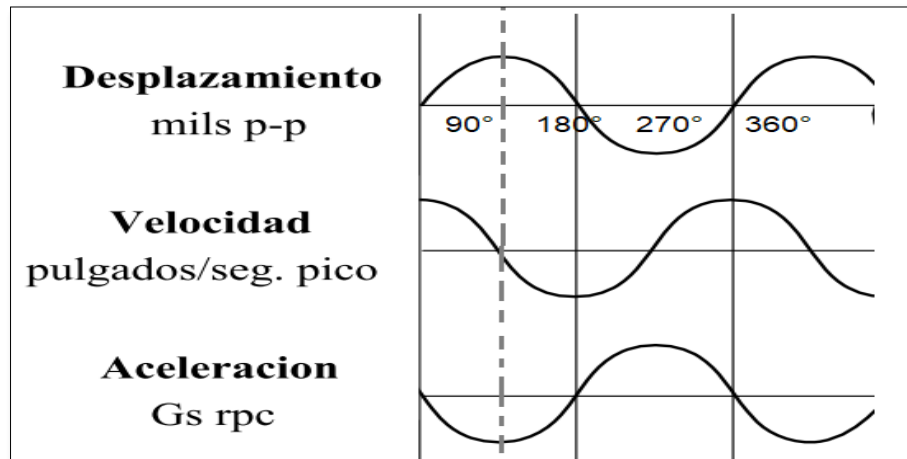


Figura 24: Diferencia de fases (Viviana Meruane; Vibraciones mecánicas.2012)

5.3 Amortiguamiento

La respuesta del sistema masa-resorte vista predice que el sistema va a oscilar indefinidamente. Sin embargo, la gran mayoría de los sistemas oscilatorios eventualmente decaen y dejan de moverse. Esto sugiere que el modelo debe modificarse para incluir este decaimiento.

Añadiendo un término $c\dot{x}(t)$ a la ecuación de movimiento se obtiene una solución que decae en el tiempo. Esto se conoce como amortiguamiento viscoso. Mientras que un resorte representa un modelo físico para guardar energía potencial y por lo tanto causar vibraciones; un amortiguador representa un modelo físico para disipar energía y entonces amortiguar la respuesta de un sistema mecánico.

Un ejemplo de un amortiguador corresponde a un pistón que debe deslizarse en un cilindro lleno de aceite, tal como se muestra en la figura 25. Para ello se le realizan hoyos al pistón de manera que el aceite pueda pasar de un lado del pistón al otro.

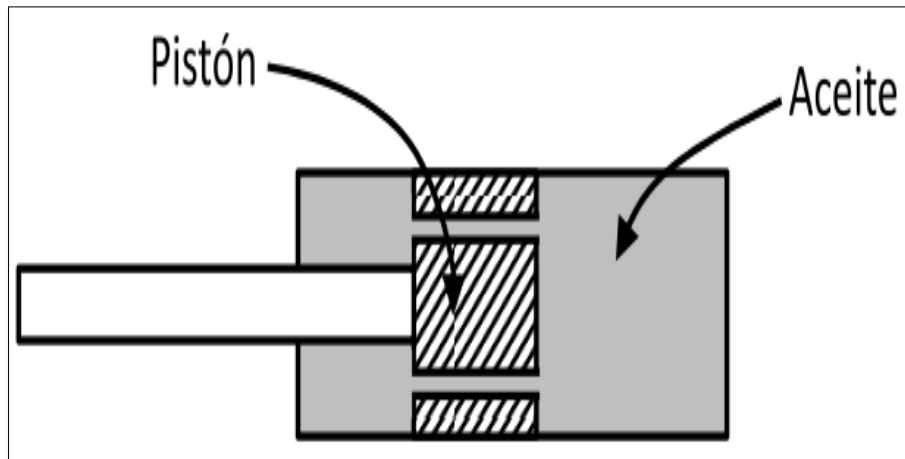


Figura 25: Esquema de un amortiguador (Viviana Meruane; Vibraciones mecánicas.2012)

La fuerza que ejerce un amortiguador es proporcional a la velocidad del pistón, en una dirección opuesta al movimiento:

$$f_c = -c \dot{x}(t) \quad (29)$$

donde " c " es una constante relacionada con la viscosidad del aceite.

Esta constante se denomina coeficiente de amortiguamiento y tiene unidades de fuerza por velocidad ($Ns/m = kg/s$).

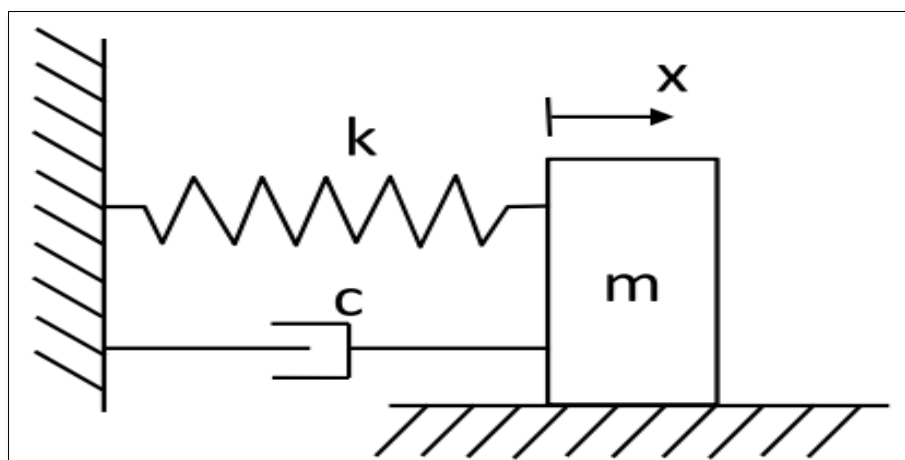


Figura 26: Sistema de un grado de libertad con amortiguador (Viviana Meruane; Vibraciones mecánicas.2012)

Consideremos el sistema de un grado de libertad de la figura 26. En este caso la ecuación de movimiento viene dada por:

$$m \ddot{x} + c \dot{x} + kx = 0 \quad (30)$$

Para resolver la ecuación de movimiento amortiguada, se asume una solución de la forma $x(t) = Ae^{\lambda t}$. Substituyendo en la ecuación (30):

$$m\lambda^2 Ae^{\lambda t} + c\lambda Ae^{\lambda t} + kAe^{\lambda t} = 0 \quad (31)$$

Dividiendo por $Ae^{\lambda t}$ se obtiene la ecuación característica del sistema:

$$m\lambda^2 + c\lambda + k = 0 \quad (32)$$

Las raíces de esta ecuación son:

$$\lambda_{1,2} = -\frac{c}{2m} \pm \frac{1}{2m} \sqrt{c^2 - 4km} \quad (33)$$

Vemos que las raíces pueden tener valores complejos o reales dependiendo del valor del discriminante, $c^2 - 4km$. Si $c^2 - 4km > 0$, las raíces λ_1 y λ_2 son dos números reales negativos. En caso contrario, si el discriminante es negativo, las raíces λ_1 y λ_2 son dos complejos conjugados con la parte real de valor negativo. Si el discriminante es cero, las raíces son números reales negativos iguales.

5.3.1 Amortiguamiento crítico

Se define como **amortiguamiento crítico** al amortiguamiento que hace que el discriminante sea cero:

$$C_c = 2\sqrt{km} = 2m \sqrt{\frac{k}{m}} = 2mw_n \quad (34)$$

A partir de esta ecuación, se define la razón de amortiguamiento, ζ , como:

$$\zeta = \frac{c}{c_c} \quad (35)$$

Se dice que el sistema tiene amortiguamiento débil si la razón de amortiguamiento ζ es menor a 1 y el discriminante de la ecuación (33) es negativo.

Las constantes A y ϕ vienen dadas por las condiciones iniciales al igual que en el caso sin amortiguamiento:

$$A = \sqrt{\frac{(v_0^2 + \zeta w_n x_0)^2 + (x_0 w_d)^2}{w_d^2}} \quad (36)$$

$$\phi = \tan^{-1} \frac{x_0 w_d}{v_0 + \zeta w_n x_0} \quad (37)$$

$$x = e^{\zeta w_n t} \left(\frac{v_0 + \zeta w_n x_0}{w_d} \sin w_d t + x_0 \cos w_d t \right) \quad (38)$$

Donde $w_d = w_n \sqrt{1 - \zeta^2}$; Es la frecuencia natural amortiguada.

En la figura 27, se ilustra la respuesta de un sistema con amortiguamiento débil, ecuación (38). En este caso se obtiene una respuesta oscilatoria que decae en el tiempo. La tasa de decaimiento está dada por la razón de amortiguamiento ζ . Este tipo de respuesta corresponde al caso más común en sistemas mecánicos.

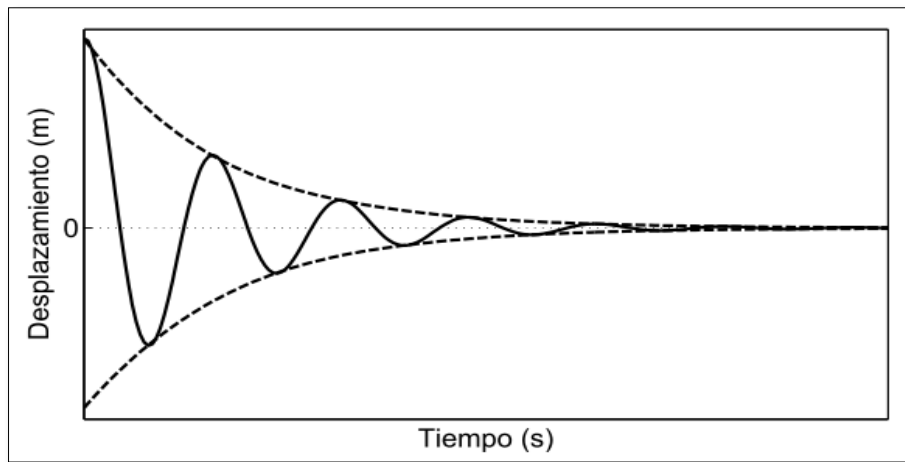


Figura 27: Respuesta de un sistema con amortiguamiento débil: $0 < \zeta < 1$ (Viviana Meruane; Vibraciones mecánicas.2012)

Cuando la razón de amortiguamiento es mayor a 1 ($\zeta > 1$), se dice que el sistema está sobre-amortiguado. En este caso, el discriminante de la ecuación (33) es mayor a cero, el resultado es un par de raíces reales, lo que representa una respuesta no oscilatoria.

Respuestas típicas se ilustran en la figura 28, en donde se observa que la respuesta es claramente no oscilatoria. Un sistema sobre-amortiguado no oscila, sino que se dirige exponencialmente hacia su posición de equilibrio.

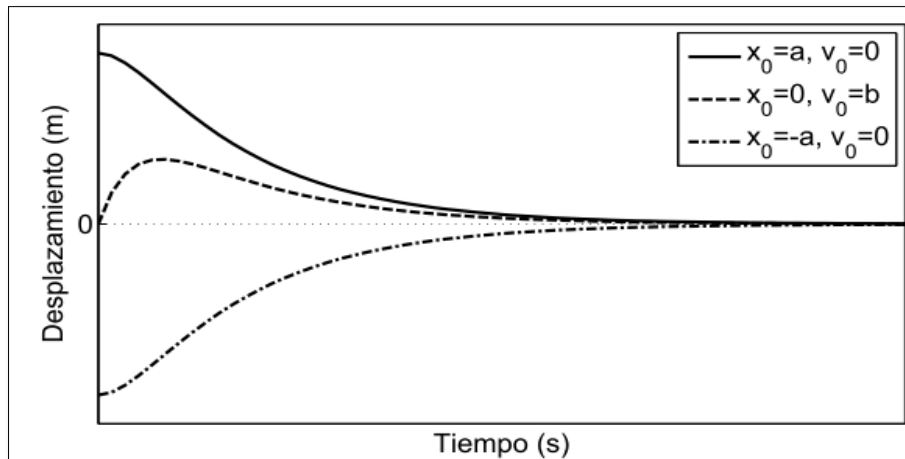


Figura 28: Respuesta de un sistema sobre-amortiguado $\zeta > 1$
(Viviana Meruane; Vibraciones mecánicas.2012)

Si la razón de amortiguamiento es exactamente uno ($\zeta = 1$) y el discriminante de la ecuación (33) es cero.

Las respuestas en este caso son similares a las de la figura 28. Los sistemas con amortiguamiento crítico se pueden ver desde distintos puntos de vista. Estos representan al sistema con el menor valor de amortiguamiento que lleva a movimiento no oscilatorio. El amortiguamiento crítico también se puede ver como el caso que separa la no oscilación de la oscilación, o el valor de amortiguamiento que entrega el decaimiento hacia cero más rápido sin oscilación.

5.3.2 Respuesta a una excitación armónica

Excitación armónica en sistemas sin amortiguamiento

Consideremos el sistema de la figura 29. Existen diferentes formas de modelar la excitación armónica, $F(t)$. Una función armónica se puede representar por un seno, un coseno o por una exponencial compleja. Definiremos la función de excitación $F(t)$ como:

$$F(t) = F_0 \cos(\omega t) \quad (39)$$

donde F_0 representa a la magnitud, o amplitud máxima y ω denota la frecuencia de la fuerza aplicada. La frecuencia ω también se denomina frecuencia de entrada o frecuencia de excitación o frecuencia de funcionamiento y tiene unidades de rad/s.

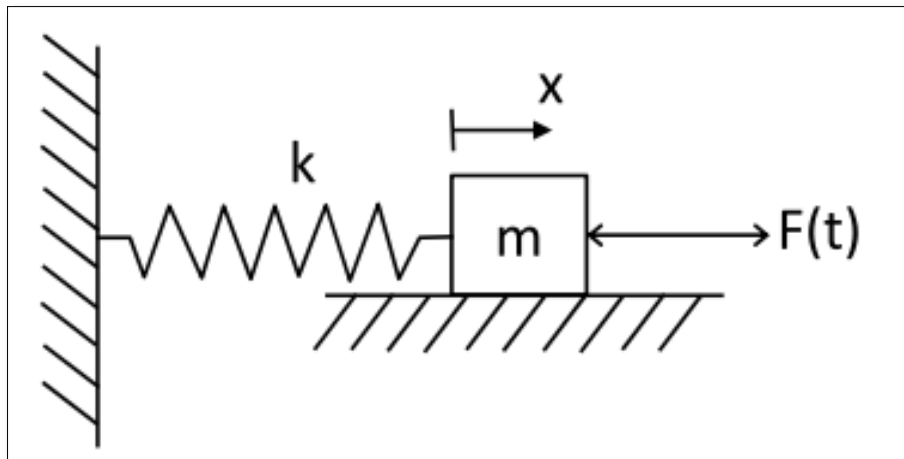


Figura 29: Sistema masa-resorte con excitación armónica
(Viviana Meruane; Vibraciones mecánicas.2012)

Alternativamente, la fuerza de excitación armónica se puede representar por un seno.

$$F(t) = F_0 \sin(\omega t) \quad (40)$$

o como una exponencial compleja:

$$F(t) = F_0 e^{j\omega t} \quad (41)$$

A partir de la figura 29, se puede escribir la ecuación de movimiento del sistema:

$$m\ddot{x}(t) + kx(t) = F_0 \cos(\omega t) \quad (42)$$

dividiendo por m y definiendo $f_0 = F_0/m$, se obtiene la siguiente ecuación diferencial:

$$\ddot{x}(t) + \omega_n^2 x(t) = f_0 \cos(\omega t) \quad (43)$$

Se sabe que la solución de la ecuación (43), está compuesta por la suma de la solución homogénea (i.e. la solución cuando $f=0$) y la solución particular, x_p , que se puede encontrar asumiendo que la respuesta tiene la misma forma que la fuerza de excitación:

$$x_p(t) = X \cos(\omega t)$$

donde X es la amplitud de la respuesta forzada. Substituyendo esta respuesta en (43):

$$-\omega^2 X \cos(\omega t) + \omega_n^2 X \cos(\omega t) = f_0 \cos(\omega t) \quad (44)$$

factorizando,

$$(-\omega^2 X + \omega_n^2 X - f_0) \cos(\omega t) = 0 \quad (45)$$

Dado que $\cos(\omega t)$ no puede ser cero para todo t , el coeficiente acompañado al coseno debe ser cero. Igualando el coeficiente a cero y despejando X se obtiene,

$$X = \frac{f_0}{\omega_n^2 - \omega^2} \quad (46)$$

Por lo tanto, siempre que la frecuencia de excitación ω y la frecuencia natural ω_n sean distintas, la solución particular será de la forma:

$$x_p(t) = \frac{f_0}{\omega_n^2 - \omega^2} \cos(\omega t) \quad (47)$$

Dado que el sistema es lineal, la solución final viene dada por la suma de la solución homogénea más la solución particular. La solución homogénea se puede escribir como $A_1 \sen w_n t + A_2 \cos w_n t$. Por lo tanto, la solución final para la ecuación (43) es de la forma:

$$x(t) = A_1 \sen w_n t + A_2 \cos w_n t + \frac{f_0}{w_n^2 - w^2} \cos(wt) \quad (48)$$

En la figura 30 se ilustra la respuesta de un sistema no amortiguado a una excitación armónica.

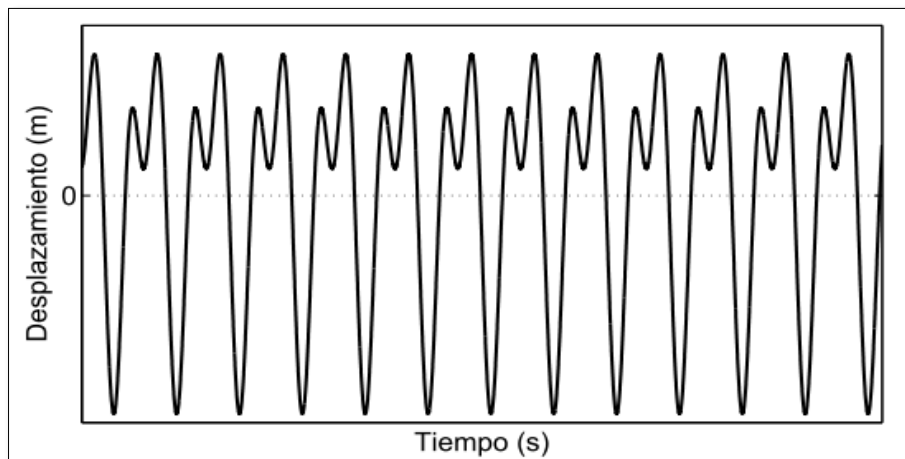


Figura 30: Respuesta de un sistema sin amortiguamiento con $w_n = 1$ rad/s a una excitación armónica de $w = 2$ rad/s (Viviana Meruane; Vibraciones mecánicas.2012)

Cuando la frecuencia de excitación tiene valores cercanos a la frecuencia natural la amplitud de la respuesta crece mucho, este elevado aumento en la amplitud de las vibraciones se conoce como "**el fenómeno de resonancia**", tal vez el concepto más importante en el análisis de vibraciones, La figura 31 muestra la respuesta de un sistema excitado en su frecuencia natural ($w = w_n$)

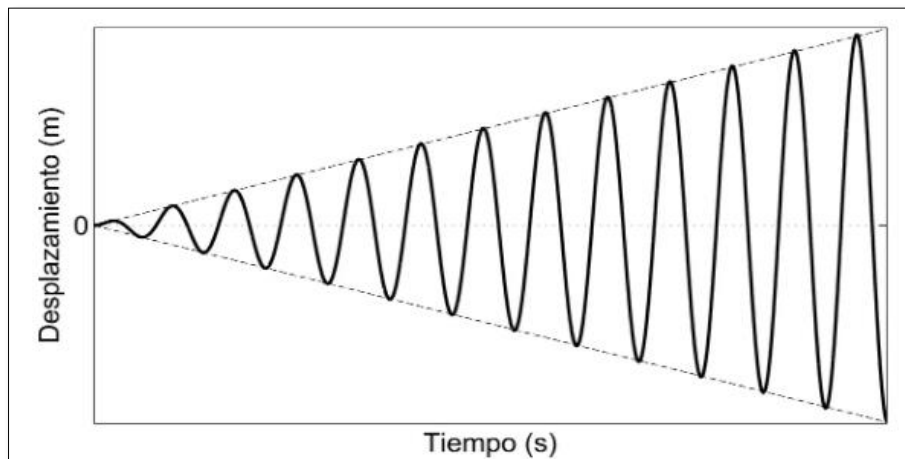


Figura 31: Respuesta de un sistema excitado en su frecuencia natural ($\omega = \omega_n$)
(Viviana Meruane; Vibraciones mecánicas.2012)

5.4 Transductores de vibración

Un transductor es un elemento que transforma la vibración mecánica en una señal eléctrica analógica, para ser posteriormente procesada y analizada. Los transductores de vibración más frecuentemente utilizados son: Sensor de proximidad, Sensor sísmico de velocidad y Acelerómetros piezoeléctricos.

Las lecturas de velocidad son generalmente las de mayor campo de aplicación, ya que la velocidad es directamente proporcional al esfuerzo y al desgaste del sistema mecánico. La velocidad se puede medir directamente mediante un sensor de velocidad o mediante un acelerómetro cuya señal es posteriormente integrada. Por otro lado, las mediciones de aceleración son las mejores para analizar fenómenos de altas frecuencias. La aceleración es el parámetro que ofrece la mejor medida de la fuerza asociada a una fuente particular de vibración.

5.4.1 Sensor de proximidad

Un sensor de proximidad, conocido también como “de corriente Eddy”, se aplica normalmente a bajas frecuencias (entre 0 y 1000Hz) para medir vibraciones en sistemas rotatorios. Utilizados para medir desplazamiento radial o axial de ejes. Se instalan usualmente en la cubierta de los rodamientos y miden el desplazamiento relativo entre el eje y la posición de anclaje del sensor.

Un sistema de captación de proximidad de tipo Eddy se compone del propio sensor, un cable de extensión y un acondicionador de señal. En la figura 32 se ilustra el esquema de funcionamiento de un proxímetro de inductivo, éste posee una bobina electromagnética que se usa para detectar la distancia a un objeto metálico. Este tipo de sensores ignora objetos no metálicos.

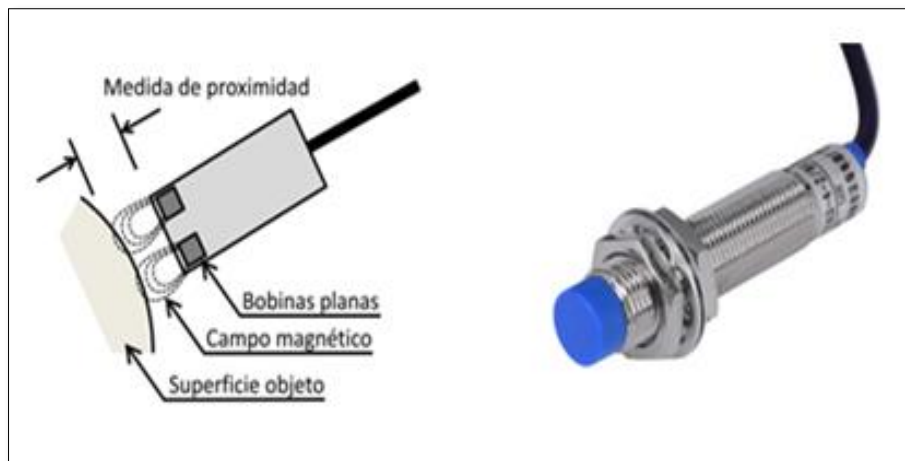


Figura 32: Descripción de un sensor de proximidad inductiva
(www.power-mi.com)

5.4.2 Sensor sísmico de velocidad

Los sensores sísmicos de velocidad se utilizan en equipos con altos niveles de vibración. Como se muestra en la figura 33, se componen de un imán permanente ubicado en el centro de una bobina de hilo de cobre. Cuando el sensor vibra, se crea un movimiento relativo entre el imán y el bobinado, induciéndose por la ley de Faraday una tensión proporcional a la velocidad del movimiento. Tienen la ventaja que miden directamente la velocidad, que es proporcional a la severidad de la vibración.

Sin embargo, las dimensiones del transductor son relativamente grandes, necesitando grandes bases magnéticas para su sujeción. En consecuencia, el rango de frecuencias es, en cierto modo, restrictivo: 10-1.000 Hz.

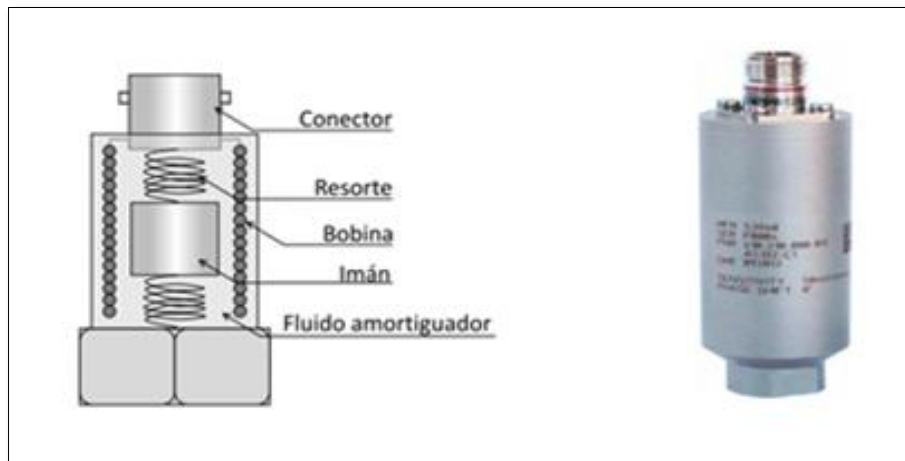


Figura 33: Descripción de un sensor sísmico de velocidad
(www.power-mi.com)

5.4.3 Acelerómetro piezoeléctrico

Este tipo de transductor genera una tensión eléctrica proporcional a la aceleración por presión sobre un cristal piezoeléctrico. Un acelerómetro piezoeléctrico puede captar con precisión señales entre 1 Hz y 15.000 Hz. Estos dispositivos son muy apropiados para tomar datos de vibración a alta frecuencia, donde aparecen grandes esfuerzos con desplazamientos relativamente pequeños. También existen sensores de velocidad piezoeléctricos, los que se construye igual que un acelerómetro, pero con un amplificador de señal que realiza una integración lógica.

Aprovechando así, las buenas características de respuesta en frecuencia de un acelerómetro, de modo que genera una salida lineal en un rango de frecuencia mucho mayor que el velocímetro sísmico. Los transductores de tipo ICP o IEPE tiene un acondicionador de señal interno, el que transforma la carga del cristal en voltaje, ver figura 34.

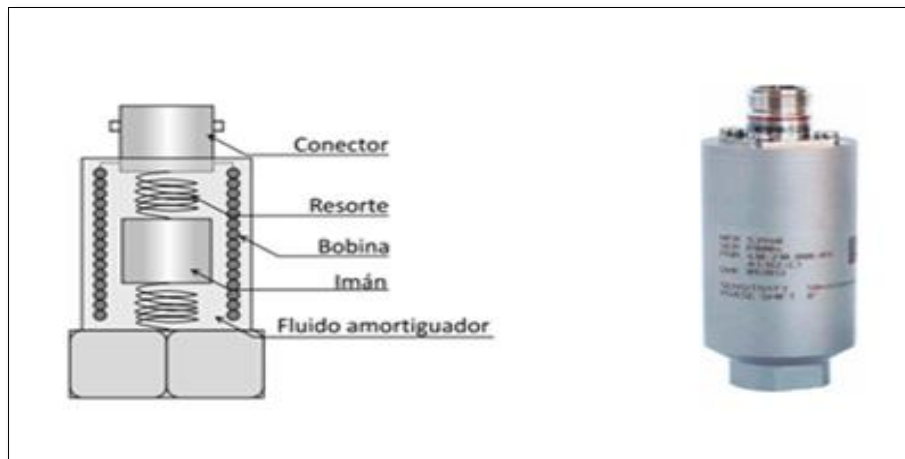


Figura 34: Descripción de un acelerómetro piezoeléctrico
(www.power-mi.com)

Podemos considerar a la acción de la masa que actúa sobre los cristales, como la fuerza de inercia dada por la ley de Newton.

$$F = ma$$

De tal forma que la aceleración del sistema, producirá una fuerza proporcional a la masa que deformará los cristales produciendo una variación de carga eléctrica.

La señal, de por sí, generada es de muy baja amplitud (del orden de 10 a 20 pico coulomb/g) y existen dos formas de medirla. Sin amplificador de carga incorporado En este caso, al acelerómetro, se lo llama pasivo pues no requiere alimentación y la salida es directa desde los cristales ver figura 35.

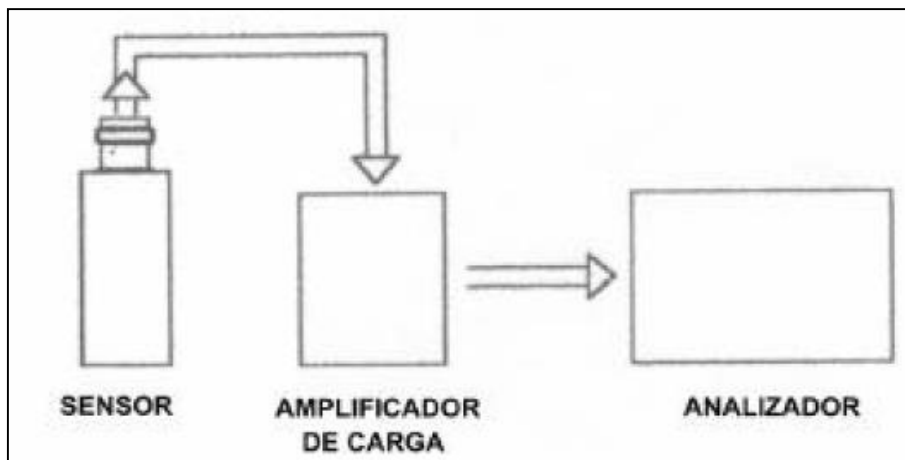


Figura 35: Acelerómetro sin amplificador de carga (www.semapi.com.ar -2000)

En esta configuración resulta sumamente crítico el cable (coaxial) entre el sensor y el amplificador de carga, ya que, por la capacidad que tiene el cable de generar señales espurias (que se suman a las señales genuinas del sensor) está limitado en el largo (no más de 4 metros) y se debe evitar el movimiento del mismo en el momento de realizar la medición.

Al incorporar el amplificador dentro del sensor, se logra una señal del orden de los 50 mv/g, y se consigue disminuir la influencia del cable, que aquí puede llegar a un largo de 100 metros. Ver figura 36, el inconveniente que presenta esta configuración es la limitación de temperatura de trabajo (aprox. 100°) que tiene el acelerómetro debido a los componentes electrónicos que lleva en su interior.

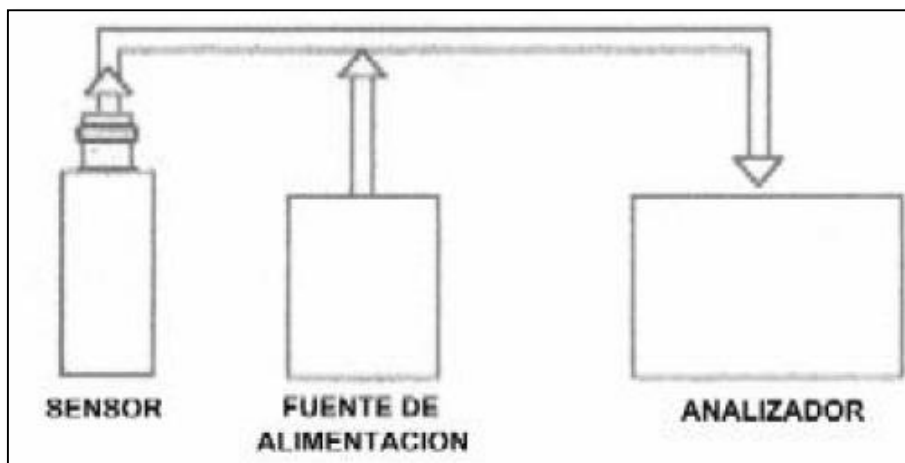


Figura 36: Acelerómetro con amplificador de carga (www.semapi.com.ar -2000)

5.5 Analisis espectral

Los transductores de vibración entregan la señal capturada directamente de la estructura o máquina, esta señal contiene información importante sobre el comportamiento de cada componente de la máquina. Sin embargo, existe un problema a la hora de realizar un diagnóstico, estas señales están cargadas de mucha información, la que comprende las señales características de cada componente de la máquina, por lo cual resulta prácticamente imposible distinguir a simple vista sus comportamientos característicos.

Una forma de separar cada componente de la señal es mediante el análisis espectral, en donde se estudian las señales en el dominio de frecuencias. El matemático francés Jean Baptiste Fourier (1768 - 1830) encontró la forma de representar una señal compleja en el dominio del tiempo por medio de series de curvas sinusoidales con valores de amplitud y frecuencia específicos. Entonces lo que hace un analizador de espectros que trabaja con la transformada rápida de Fourier es capturar una señal, calcular todas las series de señales sinusoidales que contiene la señal compleja y por ultimo mostrarlas de forma individual en una gráfica de espectro.

En la figura 37 puede verse una señal de vibración compleja. A dicha señal se le calculan las señales sinusoidales que la componen y por último se muestra cada una de ellas en el dominio de la frecuencia.

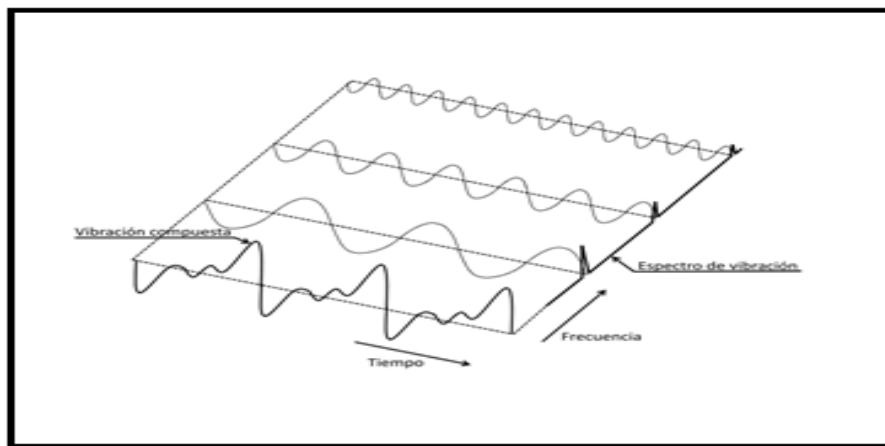


Figura 37: Espectro de una señal de vibración compleja (www.power-mi.com)

5.6 Transformada discreta de Fourier (DFT)

La transformada discreta de Fourier (DFT), es un proceso matemático relativamente sencillo pero que implica el empleo reiterado de operaciones simples y la manipulación de una gran cantidad de datos y, por lo tanto, requiere cierta cantidad de recursos computacionales.

El espectro obtenido de la ecuación matemática (49) entrega componentes tanto para frecuencias positivas como negativas, llamado espectro a dos lados, considerando que en ingeniería las frecuencias negativas no tienen significado físico y que el espectro es simétrico respecto al origen, los analizadores de vibraciones presentan el espectro solo para frecuencias positivas (llamado espectro a un lado) multiplicando su valor por dos.

Notemos que $x(f)$ es un número complejo y por lo tanto tiene componentes real e imaginaria, es costumbre expresar este número imaginario por su módulo ($|x(f)|$) y su fase $\phi(f)$, como se observa en la figura 38.

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) * e^{-i2\pi ft} * dt \quad (49)$$

Transformada de Fourier directa

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(f) * e^{-i2\pi ft} * df \quad (50)$$

Transformada de Fourier inversa

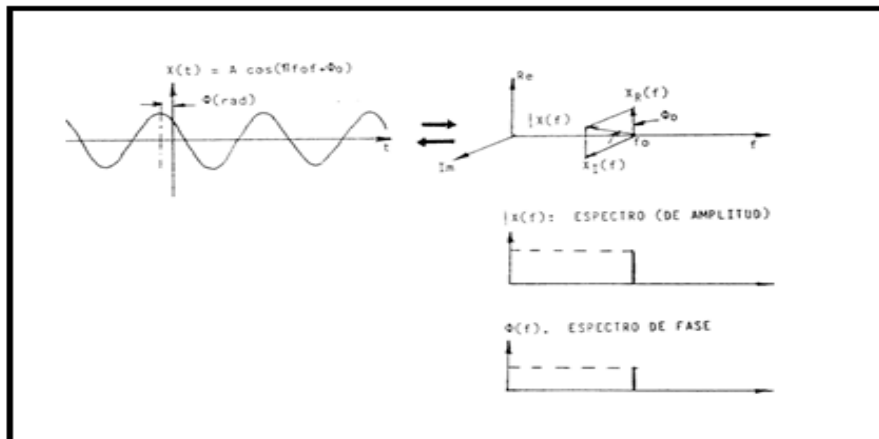


Figura 38 : Dominio en tiempo vs Dominio en frecuencias (Dr-Ing: Pedro Saavedra)

Una Transformada de Fourier Discreta (DFT) es el nombre dado a la transformada de Fourier cuando se aplica a una señal digital (discreta) en vez de una analógica (continua).

Una Transformada de Fourier Rápida (FFT) es una versión más rápida de la DFT que puede ser aplicada cuando el número de muestras de la señal es una potencia de 2. Un cálculo de FFT toma aproximadamente $N * \log_2(N)$ operaciones, mientras que DFT toma aproximadamente N^2 , por lo que FFT es significativamente más rápida.

La mayoría de los analizadores FFT permiten la transformación de 512, 1024, 2048, 4096 muestras, hoy en día más. El rango de frecuencias cubierto por el análisis FFT depende de la cantidad de muestras recogidas y de la proporción de muestreo.

5.6.1 Procedimiento de muestreo

El muestreo es un procedimiento análogo, no digital, y se realiza con un circuito “tomar muestras y detener”. La salida de este circuito es una secuencia de niveles de voltaje, que se mandan a un convertidor de análogo a digital.

Los niveles de voltaje se convierten en palabras digitales que representan cada nivel de toma de muestras.

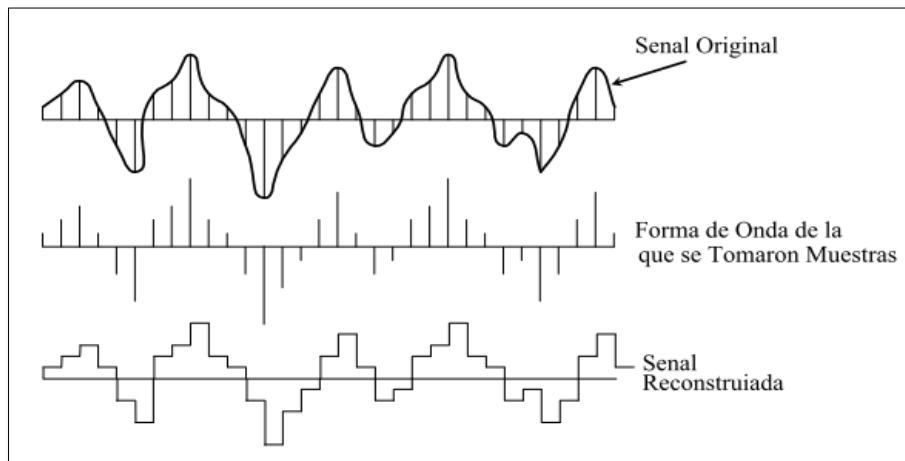


Figura 39 : Conversión de análogo a digital (Glen White 2010)

Para grabar y analizar la vibración se digitaliza la señal. Se necesita convertir la señal analógica continua en una serie de números discretos, llamado registro temporal.

Esto es así, debido a que los colectores de datos y ordenadores no pueden trabajar con señales analógicas, los sistemas digitales no pueden procesar informaciones de tamaño infinito por lo que se hace necesario discretizar las señales continuas. ([VCAT II, procesamiento de señales-ISO 18436-Mobius Institute](#))

5.6.2 Muestreo de la señal analógica

El primer paso es digitalizar la señal, obteniéndose mediciones individuales a intervalos discretos de tiempo, como se observa en la figura 40.

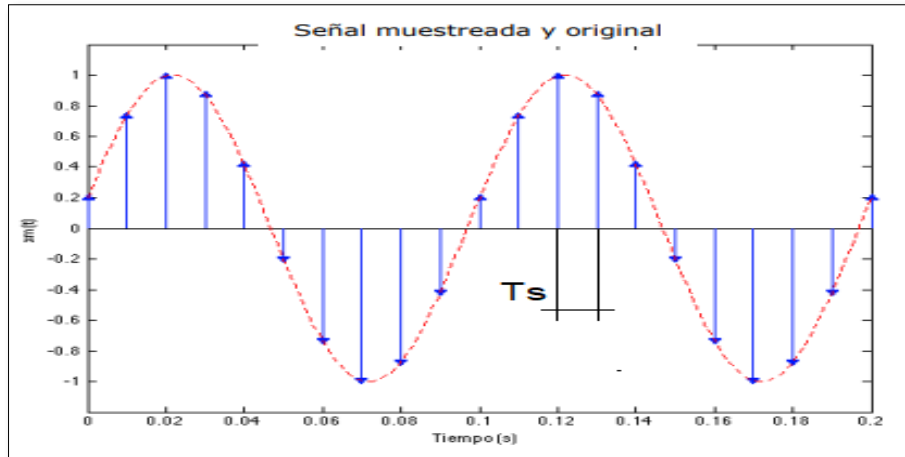


Figura 40 : Discretización de la señal (Enrique Santiso, Fco. Javier Meca. Departamento de Electrónica. Universidad de Alcalá)

Hay un tiempo discreto entre cada muestra, es el periodo de muestreo “ T_s ”, a menudo la velocidad con la cual se toma las muestras, o la cantidad de muestras que se tomen por segundo, también es denominada frecuencia de muestreo “ F_s ” y es simplemente la inversa del periodo.

- N : Número de muestras.
- F_s : Frecuencia o velocidad de muestreo.
- T_s : Tiempo entre muestras o periodo de muestreo.

La velocidad para la cual se toman las muestras afecta dos aspectos.

- Precisión con la cual se puede observar la forma de onda.
- La frecuencia más alta que se pueda ver en el espectro.

Cualquier cosa que suceda entre dos muestras sucesivas en la forma de onda no se mide.

5.6.3 Criterio de Nyquist

Cuando la tasa de muestreo o velocidad a la cual se toman muestras, es demasiado baja aparece un problema conocido como “efecto alias” o aliasing, y pasa cuando se quiere convertir una onda analógica a digital, pero su muestreo es el mostrado en la figura 41.

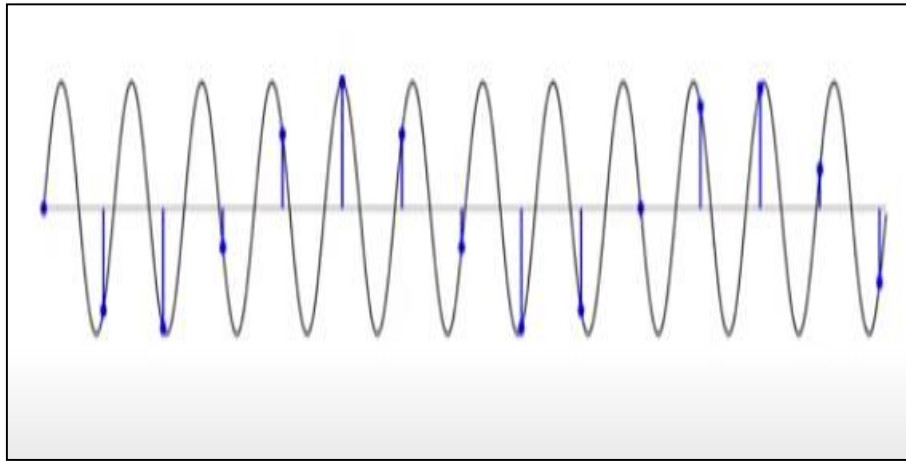


Figura 41 : Muestreo de la forma de onda (VCAT II, procesamiento de señales-ISO 18436-Mobius Institute)

Al unir los puntos tomados, las muestras trazaran el siguiente perfil, figura 42.

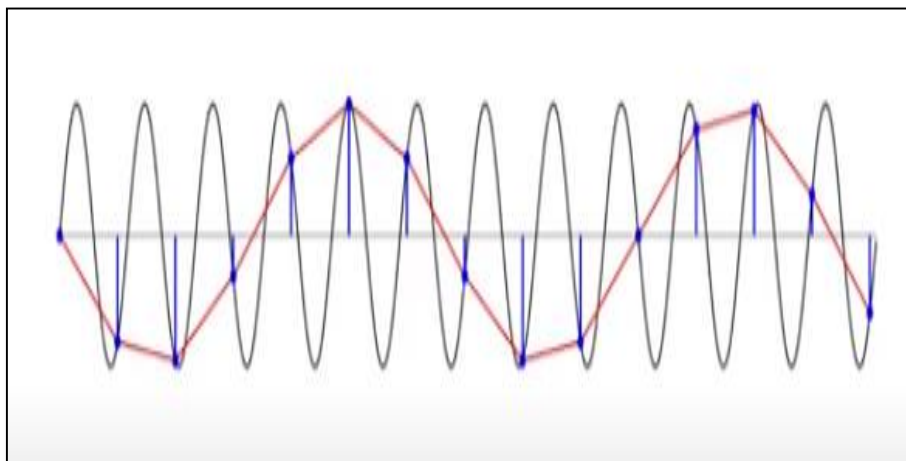


Figura 42 : Perfil trazado (VCAT II, procesamiento de señales-ISO 18436-Mobius Institute)

Es decir, aparece una señal digital con una frecuencia distinta a la señal analógica que intentamos medir, cuando esto ocurre la señal original no se puede recuperar, y hay que volver a grabar con una tasa de muestreo más elevada como aparece en la figura 43.

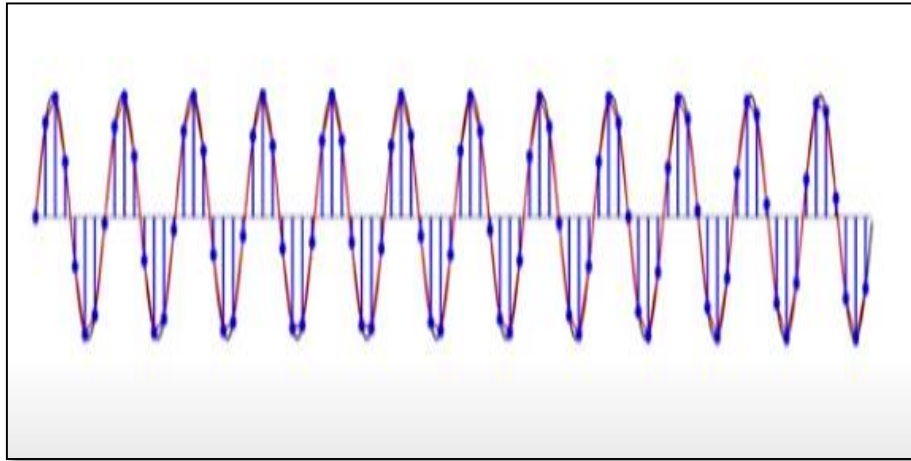


Figura 43 : Aumento de la tasa de muestreo (VCAT II, procesamiento de señales-ISO 18436-Mobius Institute)

Para poder evitar este problema, la frecuencia de muestreo debe ser mayor que el doble de la frecuencia más alta de interés (F_{max}).

$$F_s > 2 * F_{max}$$

5.7 Comportamiento espectral según la unidad de medición

Ambos gráficos muestran que a bajas frecuencias se visualizan mejor las amplitudes, generalmente por debajo de los 10 Hz, midiendo el desplazamiento de la vibración, existe un rango de entre los 10 Hz a 1000 Hz en los que se amplifican las amplitudes midiendo la velocidad de la vibración, y por encima de los 1000 Hz se amplifican las amplitudes midiendo la aceleración de la vibración.

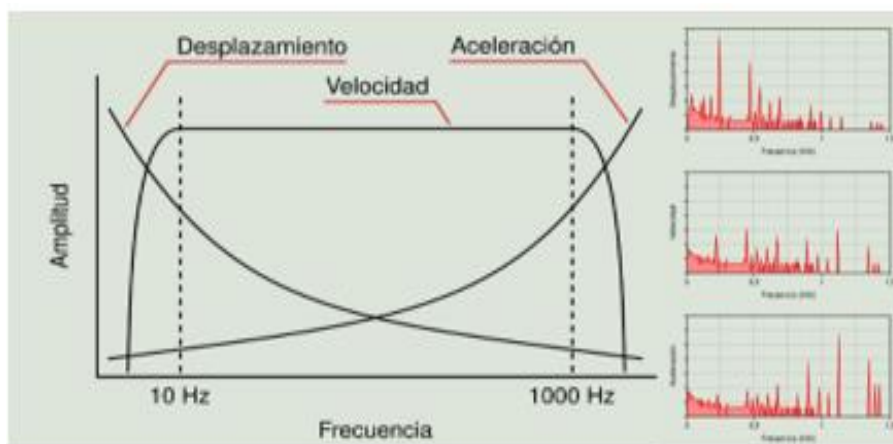


Figura 44 : Comportamiento espectral en cada magnitud de vibración (www.power-mi.com)

5.8 Equipo de medición de vibraciones

5.8.1 Equipo DSP Logger MX-300

El DSP Logger Expert es un hardware multi-canal, Analizador FFT para el mantenimiento predictivo y diagnóstico de máquinas.

Es capaz de medir, procesar, mostrar y almacenar una amplia variedad de funciones de análisis. Puede funcionar como un instrumento independiente o se pueden descargar sus mediciones en el software. (ver : Anexo 2)

5.8.2 Ventajas del análisis de vibraciones

En cualquier máquina en operación, suelen producirse vibraciones debido a factores como holguras, ligeros desequilibrios de carga, fricciones, tolerancias de ajuste, esfuerzos variables, flexión de ejes, entre otros. Adicionalmente, si la máquina presenta algún defecto, como desalineación, desequilibrio dinámico, transmisión deteriorada, cojinetes en mal estado o un funcionamiento irregular con discontinuidades, generalmente se desencadenará un proceso de desgaste progresivo que puede manifestarse de diversas maneras. La utilidad del análisis de vibraciones aplicado al mantenimiento de máquinas se resume a continuación.

- I. Detección precoz e identificación de defectos sin necesidad de parar ni desmontar la máquina.
- II. Seguir la evolución del defecto en el transcurso del tiempo hasta que este se convierta en una falla peligrosa.
- III. Programación con tiempo de antelación del suministro de repuestos, mano de obra para acometer la reparación particular.
- IV. Programación de la parada para corrección dentro de un tiempo muerto o parada rutinaria del proceso productivo.
- V. Reducción del tiempo de reparación, ya que se tienen perfectamente identificados los elementos desgastados, averiados o, en general, posibles a fallar.
- VI. Permite una selección satisfactoria de las condiciones de operación de la máquina.
- VII. Funcionamiento más seguro de la planta y toma de decisiones más precisas de los ejecutivos de la empresa industrial.

6 DESARROLLO

6.1 Casos prácticos utilizando la técnica de análisis de vibraciones

6.1.1 Desbalance puro

El desbalance es una condición en la que la línea central geométrica y la línea central de masa de un eje no coinciden, en otras palabras existe un punto pesado en algún lugar a lo largo del eje. Si el rotor pudiese girar libremente en el espacio, lo haría girando alrededor del centro de masa, pero se ve obligado a girar alrededor del eje (dentro de los rodamientos), esto genera una gran cantidad de esfuerzos en toda la máquina. Si el rotor girara sobre dos cojinetes, el mismo se detendría cuando la masa o punto pesado se encuentre en la parte inferior del mismo.

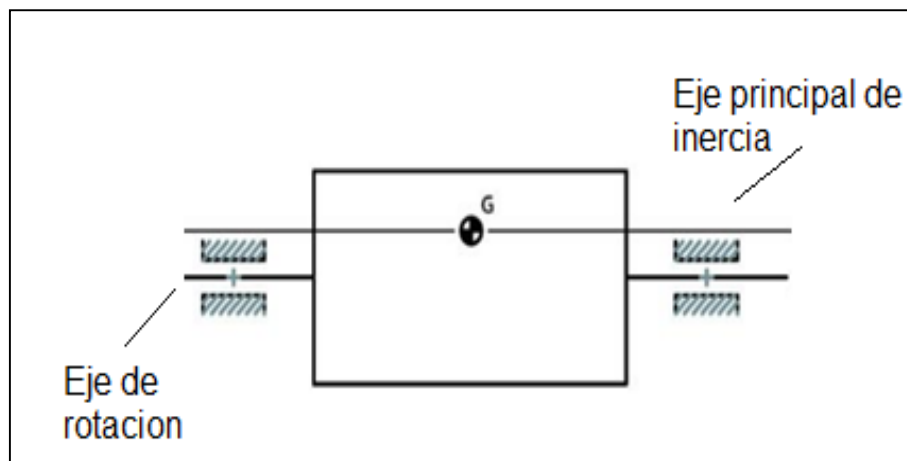


Figura 45 : Desbalance estático (www.power-mi.com)

A continuación se detallan las diversas causas que pueden generar esta anomalía:

- a. Componentes dañados.
- b. Defectos de fabricación.
- c. Acumulación desigual de suciedad en ventiladores.
- d. Falta de homogeneidad en los elementos de máquina, en particular en piezas fundidas.
- e. Errores de mecanizado en piezas.
- f. Falta de pesos de balanceo.
- g. Rotores excéntricos.

Fuerzas de desbalance:

Las fuerzas generadas debido al desbalance son mucho más altas cuanto mayor es la velocidad de giro, un punto pesado de masa “m”, generara una fuerza centrífuga en los rodamientos según la siguiente expresión:

$$F = m * r * \omega^2$$

Donde “r” es la distancia del punto pesado al centro geometrico, multiplicado por la velocidad de rotacion al cuadrado.

Diagnostico de desbalance:

Un rotor desbalanceado provocará un valor de amplitud elevado a la frecuencia de la velocidad de giro del eje debido a la fuerza centrífuga de la masa de desbalance, por lo tanto, se espera que la máquina en tal condición genere una onda sinusoidal y un pico dominante en el espectro correspondiente a la velocidad de giro del eje en 1X.

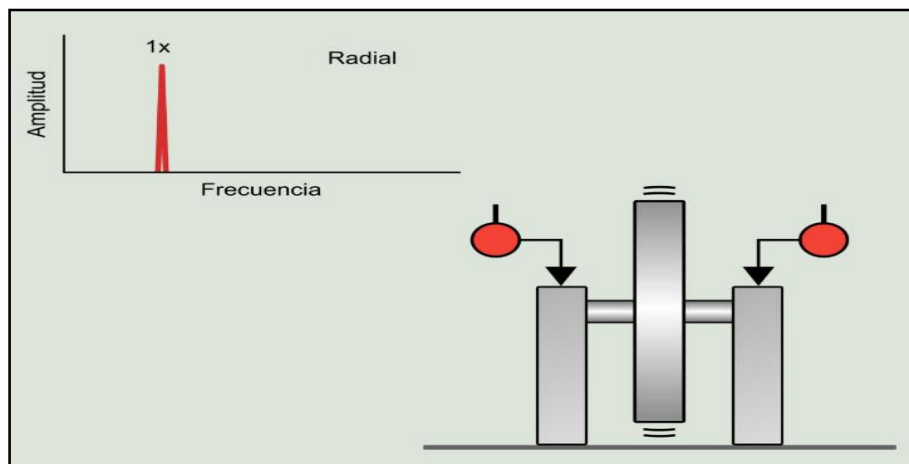


Figura 46 : Espectro de frecuencia en desbalance (www.power-mi.com)

Tipicamente otras fuentes de vibración tambien pueden estar presentes por lo que la forma de onda de tiempo no es puramente sinusoidal, tales fuentes podrian ser: holgura, desalineacion, rodamientos, etc.

Generalidades del desbalance:

- Se observa un pico a 1X radial predominante en el espectro.
- Onda de tiempo aproximadamente sinusoidal.
- Diferencia de fase entre dirección vertical y horizontal en cada rodamiento; de $90^\circ \pm 30^\circ$.
- Los rodamientos de cada extremo están en fase entre sí.

A. Equipo decantador

Equipo:	alfa Laval nx 934
Tag:	Decanter 006
Empresa:	alimenticia
Ubicación:	General Roca; Río Negro
Descripción general del equipo Los decantadores industriales son separadores horizontales que se emplean en el procesamiento de mezclas heterogéneas, sean sólidos-líquidos o líquido-líquido, pero con diferentes densidades. Un decanter se puede considerar un tanque de sedimentación en torno a un eje. En el tanque de sedimentación, las partículas sólidas, que son más pesadas que el líquido, caen por gravedad y forman un sedimento (fase sólida) en el fondo. La separación de la fase sólida y líquida se da gracias a la aceleración centrífuga, en el tambor giratorio.	

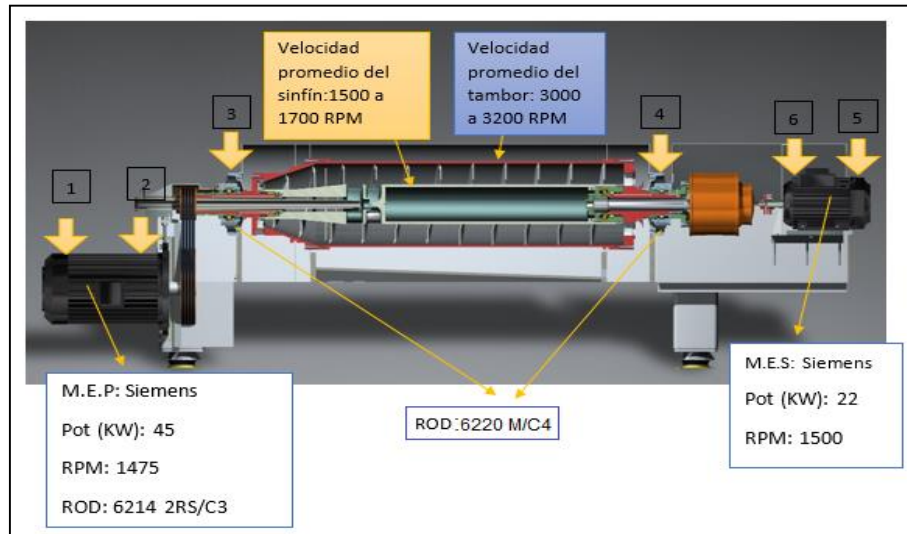


Figura 47 : Partes del Decanter (Desarrollo propio)



Figura 48 : Decanter (Desarrollo propio)

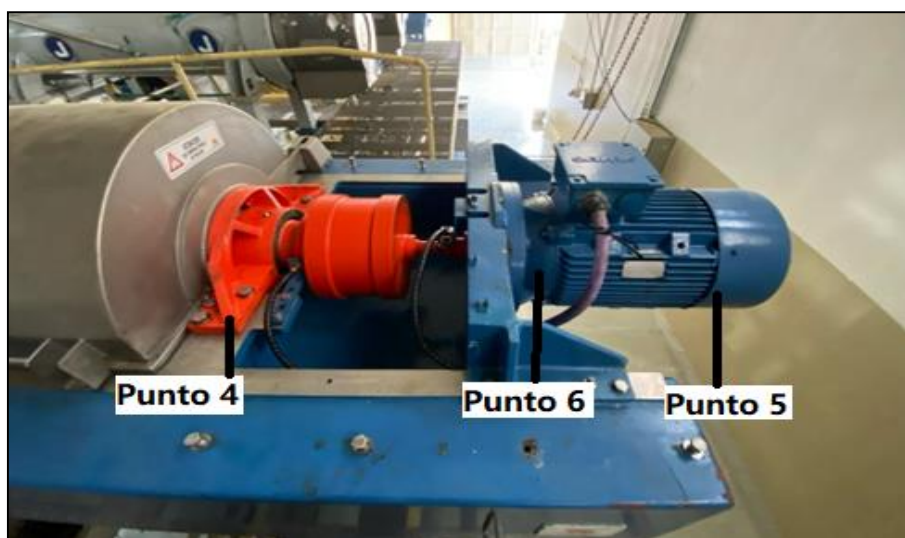


Figura 49 : Puntos de medición (Desarrollo propio)

Tabla 3: Medición del punto 4V-4H-4A

DECANTER 6			RMS				
Equipo	Punto	Medición	16/1/2024	17/2/2024	15/3/2024	12/4/2024	25/7/2024
Rodamiento SKF6220 M/C4	4A	Aceleración	0,17	0,37	0,96	0,63	1,07
		Velocidad	1,62	2,68	4,45	5,14	3,67
	4H	Aceleración	0,56	0,53	0,51	0,67	0,49
	4H	Velocidad	12,56	12,84	11,2	21,95	13,8
	4V	Aceleración	0,66	0,56	0,48	1,39	0,76
	4V	Envolvente	0,17	0,2	0,15	0,34	0,25
	4V	Velocidad	15,64	15,25	13,35	21,79	17,84

En la figura 49 identificamos los puntos de medición recomendados por la norma ISO 10816, donde se resaltan los valores de velocidad y aceleración, particularmente para el punto 4 de forma radial y axial.

Prestando especial interés a la velocidad de vibración en el punto 4H y 4V, en donde se observa un incremento en los valores globales RMS a partir del mes de abril del año 2024. En base a la visualización de los espectros para el punto de análisis, ambos representados en las figuras 50-51, se detectaron valores de amplitud en la componente 1X de 16,93 mm/s y 15,93 mm/s respectivamente a una frecuencia de 3319 CPM, que corresponde a la velocidad de giro del tambor.

Este aumento precipitado de los valores globales se debe a la acumulación constante de sedimento sobre las paredes del tambor producto del proceso y de las fuerzas actuantes.

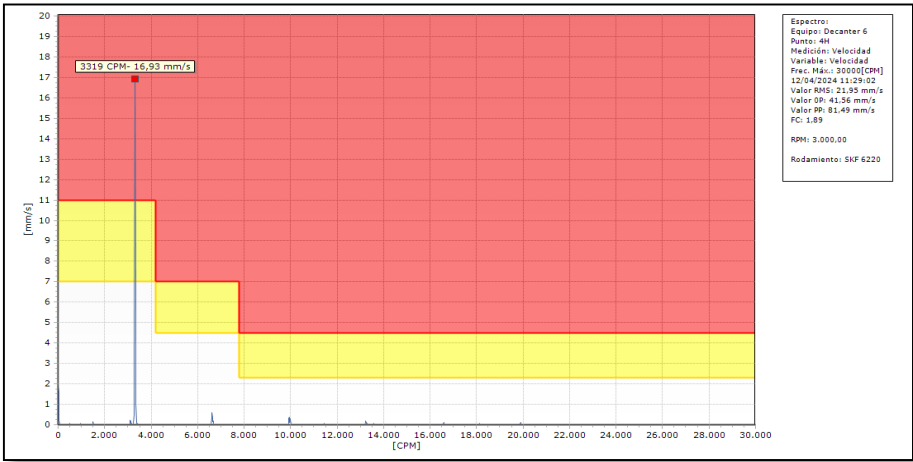


Figura 50 : Espectro de velocidad punto 4H (Desarrollo propio)

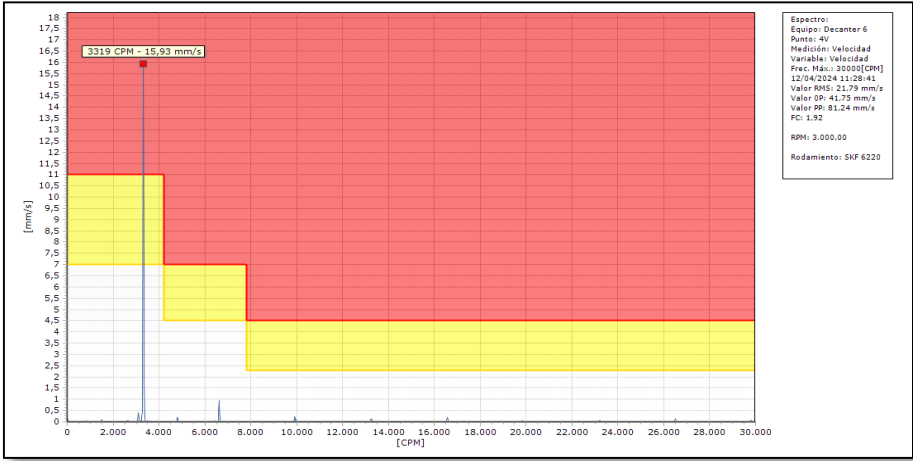


Figura 51 : Espectro de velocidad punto 4V (Desarrollo propio)

Espectro de cascada:

La cascada es un gráfico tridimensional donde son exhibidos hasta 10 espectros de un punto de monitoreo, esto nos ayuda a analizar e identificar las tendencias de fallas a partir del crecimiento de amplitud de vibración, en particular se detalla el punto 4V para la velocidad, con un total de 5 espectros exhibidos.

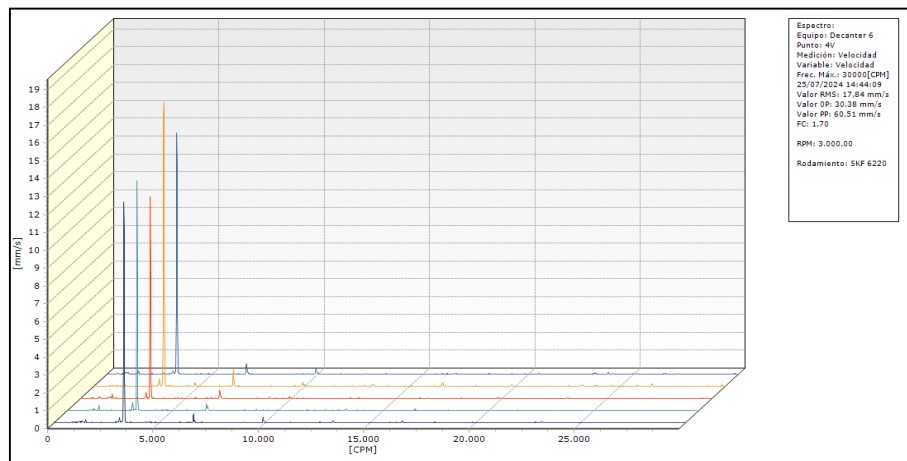


Figura 52 : Espectro cascada (Desarrollo propio)

Diagnostico:

A pesar de que esté perfectamente equilibrado, cualquier elemento rotativo tiene siempre algún desbalance residual. Como el rotor y el tornillo transportador son dos unidades que se equilibran independientemente y que giran a distinta velocidad, el más ligero desequilibrio de cualquiera de ellas puede coincidir con la otra y producir un aumento momentáneo de ruido y vibraciones.

El tiempo en que se produzca este fenómeno depende de la diferencia de velocidad entre el rotor y el transportador. Cuanto mayor sea esa diferencia, el período será más corto y viceversa.

El desequilibrio creado por los desgastes y/o acumulación de sólidos puede hacer que aumente la amplitud del ruido y las vibraciones. Si el rotor no se ha limpiado después de su funcionamiento, sino que se ha dejado que se sequen los sólidos, se debe limpiar antes de volver a poner en marcha el decantador, porque los sólidos secos pueden causar graves desequilibrios y posiblemente producir sobrecargas.

Funciones de supervisión:

Este tipo de máquinas son equipadas con interruptores de vibración en el que, si se excede el nivel máximo de vibraciones, corta la corriente al motor principal y a la bomba de alimentación para evitar daños al Decanter.

El interruptor de vibración consiste en un monitor de medida de la vibración equipado con un sistema de alarma de dos niveles, acepta una señal de aceleración, y lleva a cabo una integración de una etapa, por lo tanto, también puede actuar como un monitor de velocidad o de aceleración.

Los ajustes estándar para estos equipos rondan los 19 mm/s como nivel de alarma y 31 mm/s como nivel de parada del Decanter, muy por encima de los valores que especifica la norma ISO 10816. Para más información ver 3.3.2.1 interruptor de vibraciones en el manual de operación. (ver Anexo A.3)

Propuesta de mantenimiento:

Si bien los valores adquiridos en el espectro de vibraciones son elevados, superando las alarmas recomendadas por la norma ISO 10816. Eran los esperables con los datos del manual de operación del equipo. No obstante, se optó por comentarles la propuesta de mantenimiento del activo en la cual se recomendó limpiar el equipo con agua a presión y analizar el estado del helicoidal y tambor. Luego de la limpieza, los valores disminuyeron considerablemente como puede observarse en la figura 53-54 respectivamente.

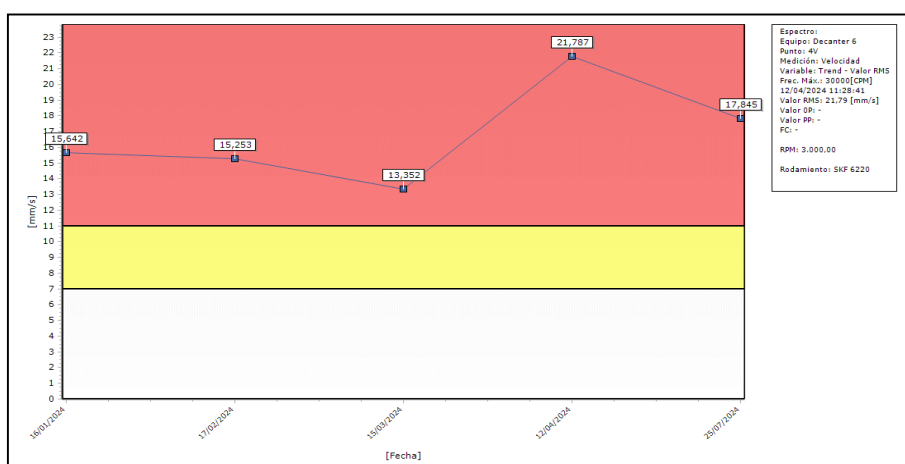


Figura 53 : Trend punto 4V (Desarrollo propio)

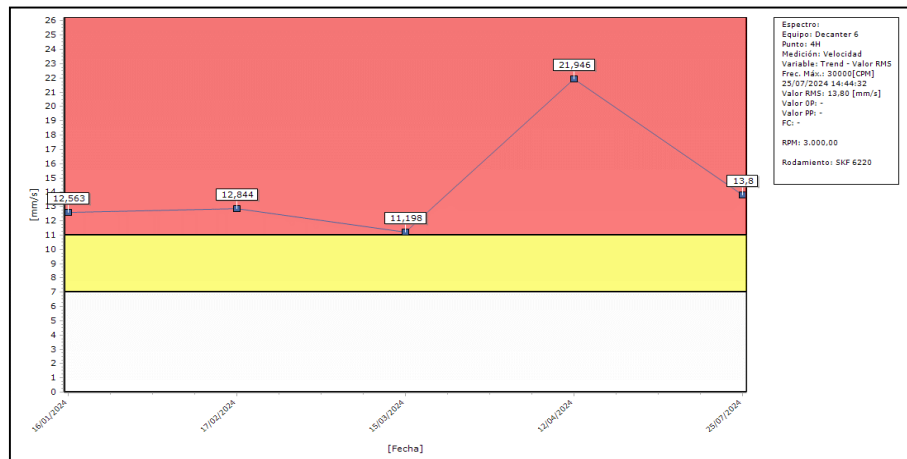


Figura 54 : Trend punto 4H (Desarrollo propio)

Tornillo helicoidal:

En las imágenes a continuación podemos observar cómo se deteriora el tornillo helicoidal por el paso del fluido de proceso, como así también los pesos de balanceo instalados por el proveedor.

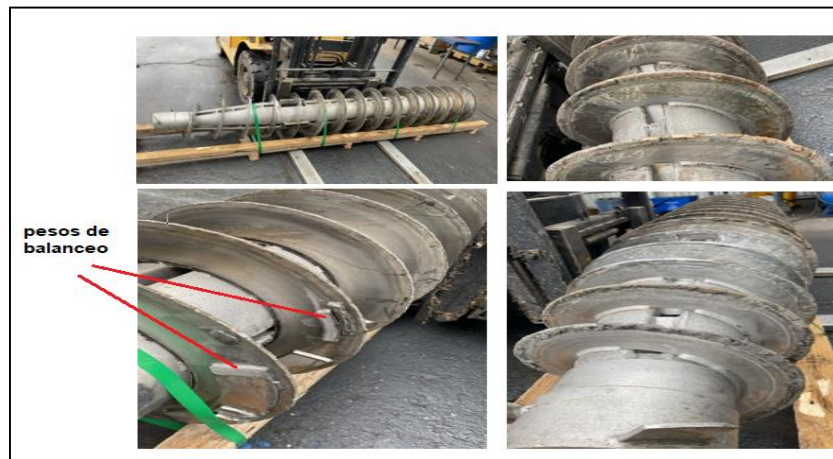


Figura 55 : Tornillo helicoidal (Desarrollo propio)

6.1.2 Desbalance de rotor en voladizo

En una máquina con rotor en voladizo se producirán vibraciones 1X en la dirección radial y también en su dirección axial en el rodamiento más cercano al rotor, esto es debido al hecho que el desbalanceo provoca un momento de flexión en la flecha y causa que la carcasa del rodamiento se mueva en la dirección axial.

Ejemplos de rotores en voladizo son bombas con acoplamiento cercano, ventiladores con flujo axial, y pequeñas turbinas.

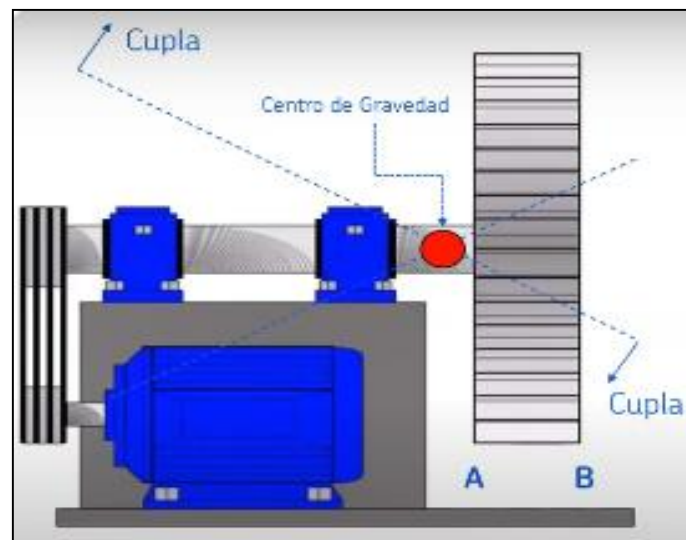


Figura 56 : Rotor en voladizo desbalanceado (www.power-mi.com)

Diagnóstico de desbalance de rotor en voladizo:

Ocurre en rotores que se encuentran en el extremo de un eje. Es producido por desgaste en la superficie del rotor y doblamiento del eje. El espectro presenta vibración dominante en 1xRPM del rotor, muy notoria tanto en dirección axial como radial.

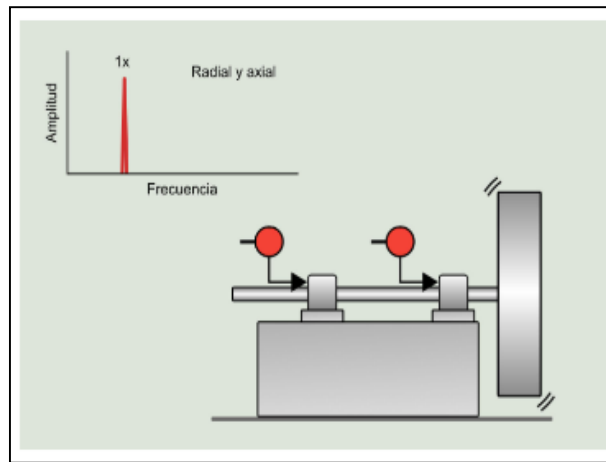


Figura 57 : Espectro de vibración característico (www.power-mi.com)

Generalidades del desbalance:

- Se observa un pico a 1X radial en el espectro.
- Se observa un pico a 1X axial en el espectro.
- Lecturas de fase axial entre los rodamientos normalmente en fase.
- Onda de tiempo aproximadamente sinusoidal.
- Diferencia de fase entre dirección vertical y horizontal de un cojinete de $90^\circ \pm 30^\circ$.
- Las medidas de fase en dirección radial entre los rodamientos podrían estar desfasadas.

B. Turbo pasadora

Equipo:	turbo pasadora
Tag:	turbo 2c
Empresa:	alimenticia
Ubicación del activo:	Villa Regina; Rio Negro
Descripción general del equipo Maquinaria imprescindible en la industria de los concentrados, purés, jugos y zumos de frutas y verduras, utilizan la fuerza centrífuga para proyectar producto contra las paredes perforadas de un tamiz cilíndrico, reducir su tamaño y separar partículas no deseadas. las pasadoras o turbopasadoras, también llamadas extractores o turboextractores, son máquinas despulpadoras que se utilizan para extraer la pulpa del tomate, manzana, pera, uva, frutos rojos, etc. dicho producto puede venir ya troceado en caliente (extracción en caliente), a temperatura ambiente o congelado (extracción en frío).	



Figura 58 : Turbopasadora (Desarrollo propio)

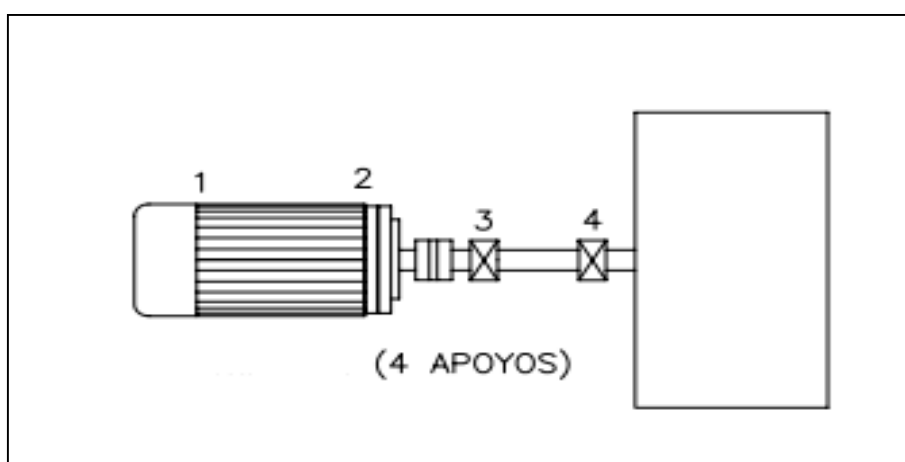


Figura 59 : Puntos de medición (ISO 10816)

Tabla 4: Medición de los valores globales en 4H-4V-4A

TURBO 2C		RMS
Punto	Medición	24/5/2024
4A	Velocidad	10,91
4H	Velocidad	15,28
4V	Velocidad	14,69

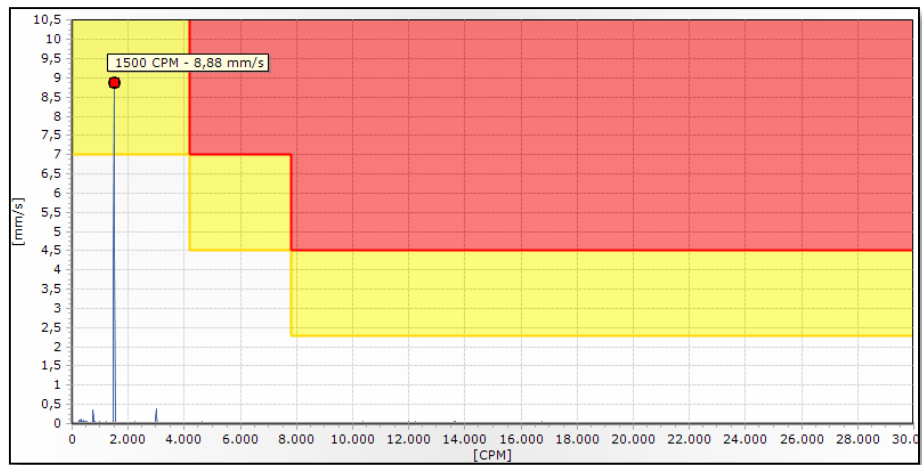


Figura 60 : Espectro de velocidad en dirección axial (Desarrollo propio)

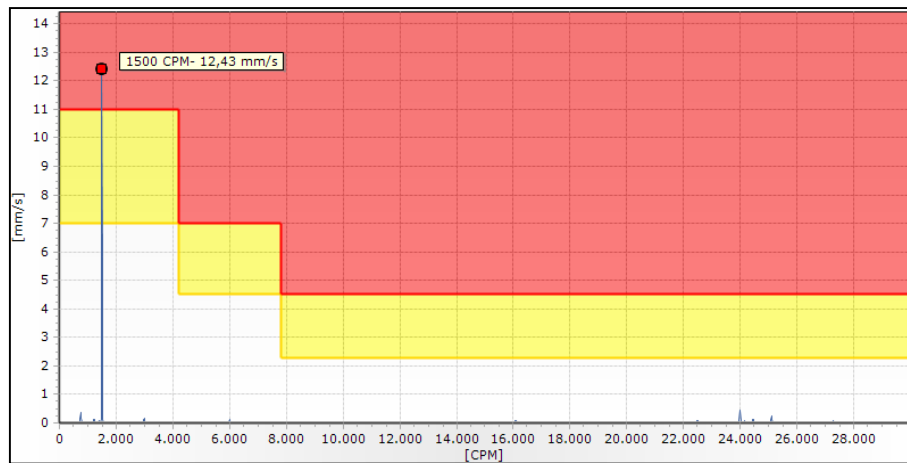


Figura 61 : Espectro de velocidad en 4H (Desarrollo propio)

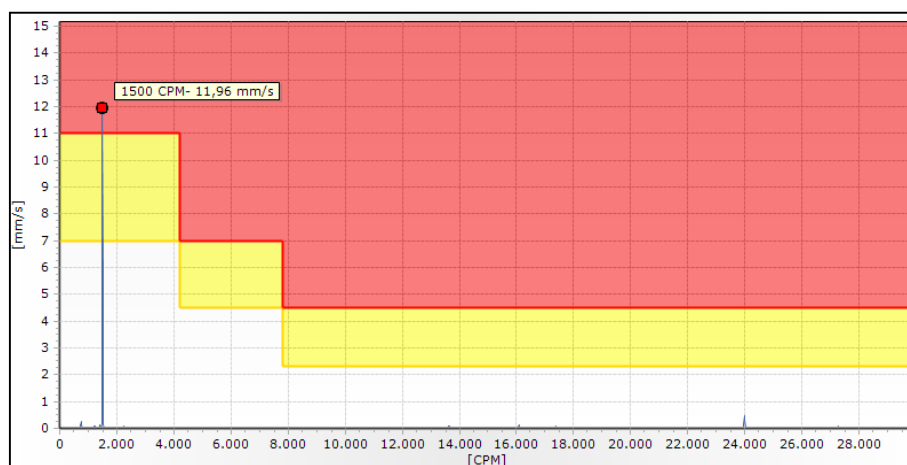


Figura 62 : Espectro de velocidad en 4V (Desarrollo propio)

En la figura 59 se identifican los puntos de medición en este tipo de equipos, como es de esperar para maquinas con rotor en voladizo y según la figura 60, se evidenció un pico a 1X en la dirección axial de 8,88 mm/s a (1500 CPM o 25Hz). De igual manera se vuelcan los valores radiales, es decir, 1X de 12,43 mm/s en dirección horizontal y 1X de 11,96 mm/s en dirección vertical a 1500 CPM en las figuras 61-62 respectivamente. Otro aspecto característico de este tipo de falla es que la amplitud en la componente 1X representa más del 80% de la amplitud global en el punto medido.

Diagnostico:

Teniendo en cuenta el equipo, conociendo el proceso y su funcionamiento, era de esperarse obtener valores como los representados en las ilustraciones previamente expuestas, cabe resaltar que existe un valor 1X en la dirección horizontal que es mayor a las direcciones axial y vertical evaluadas en el punto en cuestión, esto depende tanto de la rigidez del montaje de la máquina, como a la cantidad de desbalance residual, es decir, se observaran niveles 1X más elevados en donde la máquina tenga menor rigidez.

Propuesta de mantenimiento:

I. Como mencionamos anteriormente, revisar la máquina de forma íntegra a través de inspección visual es uno de los puntos más relevantes, verificar las condiciones del rotor estructuralmente y realizar una limpieza del mismo para remover alguna posible acumulación de sedimentos que genere desbalance, propio del flujo del proceso y de la materia prima a ser procesada.

II. Luego de la inspección visual y la limpieza, repetir la medición y de no disminuir los valores, programar el balanceo del activo.

III. Establecer un periodo de inspección con el departamento de la empresa, y promover el seguimiento de las maquinas a través de un historial de mediciones, que en conjunto con el manual del proveedor y las normas asociadas poder disponer de una base sólida de datos, brindando así un funcionamiento saludable a los activos.

6.1.3 Desalineación

El efecto de desalineación es considerado como uno de los principales modos de fallas en equipos rotativos con transmisión bajo acoplamiento (elastomérico, correas, etc.); produciendo fallas en rodamientos, sellos, ejes y acoplamientos, se calcula que un 50% de las fallas se debe a este efecto. Si los dos ejes de una máquina están correctamente alineados, hay menos tensión en los sellos, cojinetes/rodamientos, ejes y acoplamientos de la máquina. La misma funcionará con mayor fluidez.

Causas de desalineación:

- a. Montaje impreciso de componentes, como motores y bombas.
- b. Posición relativa de los componentes desviada después del montaje.
- c. Distorsión debido a fuerzas ejercidas por las tuberías.
- d. Distorsión de soportes flexibles debido al par.
- e. Crecimiento inducido por la temperatura de la estructura de la máquina.
- f. Pata coja, donde la máquina se desplaza cuando se aprietan los pernos.

Tipos de desalineación:

- Desalineación paralela

Dos ejes están desalineados paralelamente cuando los mismos son paralelos y están separados una determinada distancia. La desalineación puede ser vertical u horizontal.

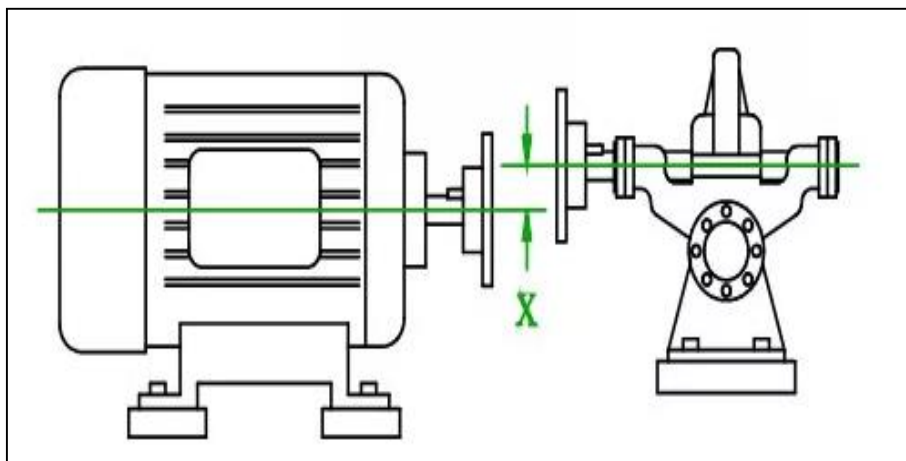


Figura 63 : Desalineación paralela (offset) (Desarrollo propio)

Generalidades de desalineación paralela

- La desalineación paralela produce una fuerza de corte y un momento flector en el extremo acoplado de cada eje.
- Se observan altos niveles de vibración a 1X y 2X en las direcciones radiales de los rodamientos/cojinetes cercanos al acople.
- A menudo la componente 2X puede ser mayor que 1X.
- En el caso de tener un desalineamiento paralelo puro, los niveles axiales 1X y 2X serán bajos.
- La vibración esta $180^\circ \pm 30^\circ$ fuera de fase a través del acoplamiento en la dirección radial.
- La comparación de fase vertical y horizontal en un solo punto, no es de 90° , como si lo es en desbalance.

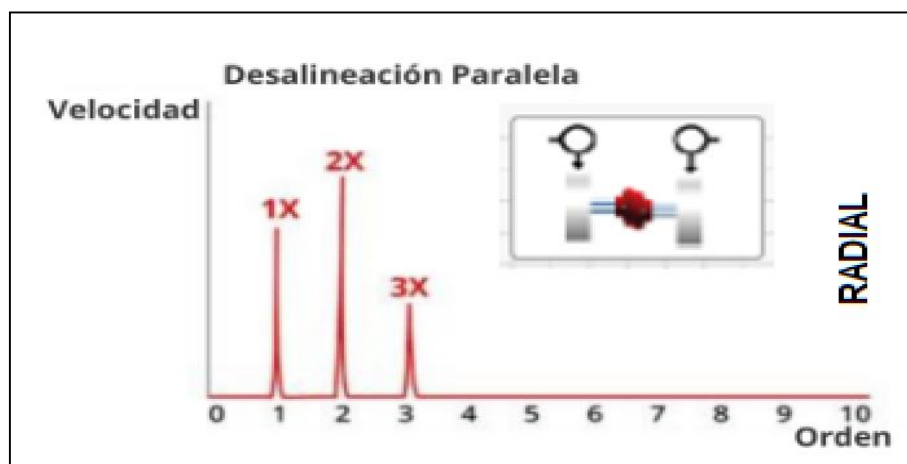


Figura 64 : Espectro característico de desalineación paralela (www.power-mi.com)

- Desalineación angular:

Hay desalineación angular cuando las líneas centrales de dos ejes se cortan formando un ángulo.

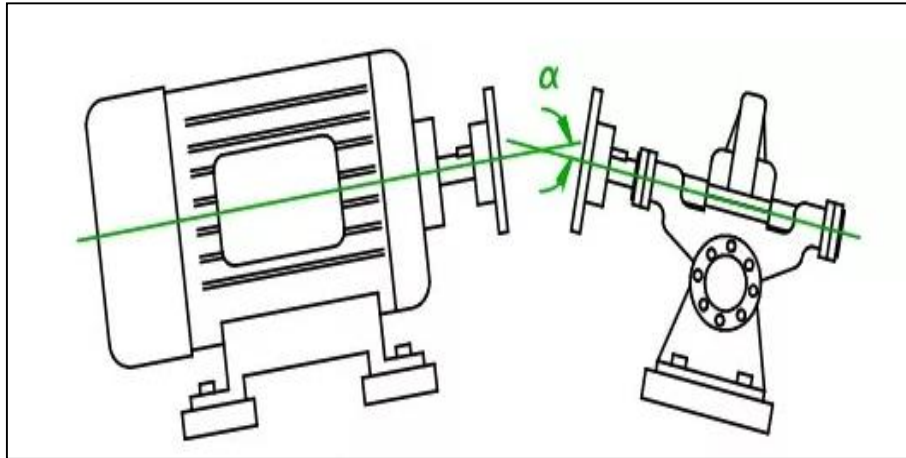


Figura 65 : Desalineación angular (Gap) (Desarrollo propio)

Generalidades de desalineación angular:

- La desalineación angular produce un momento flector en cada eje, generando fuerte vibración a 1X y algo de vibración a 2X en dirección axial en ambos rodamientos.
- Aparición de niveles de vibración 1X y 2X radial.
- La vibración se encuentra 180° fuera de fase a través del acoplamiento en dirección axial, y en fase en dirección radial.

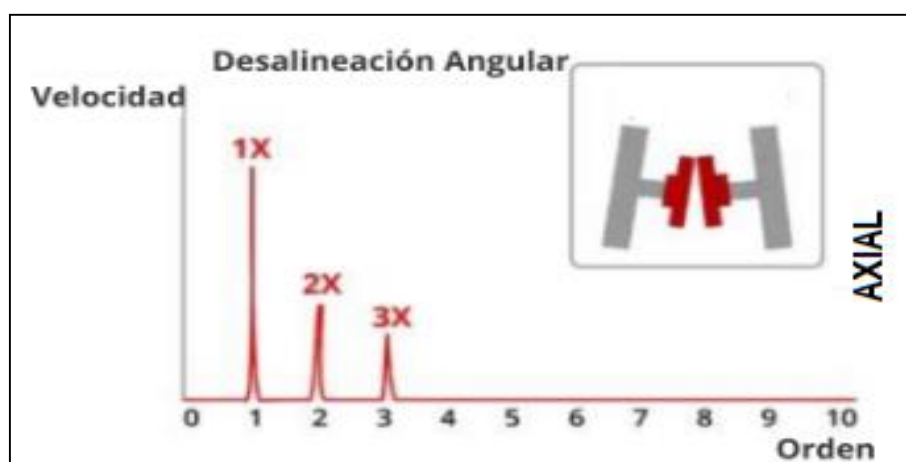


Figura 66 : Espectro característico de desalineación angular (www.power-mi.com)

Es interesante destacar que en la mayoría de las desalineaciones que se observan en la práctica son de carácter combinatorio de estos dos casos.

C. Equipo de bombeo

Equipo:	Equipo de bombeo
Tag:	motor eléctrico: me 117 bomba centrífuga: bo65
Empresa:	alimenticia
Ubicación del activo:	General Roca, Rio Negro
Descripción general del equipo Equipos utilizados para incrementar la velocidad de los fluidos para movilizar cantidades considerables durante grandes distancias; debido a ello, son una de las bombas de mayor aplicación en diversas industrias. debido a lo anterior, estas son muy comunes en la industria energética, petrolera, en la agricultura, en particular este equipo se utiliza para alimentar con agua una caldera.	

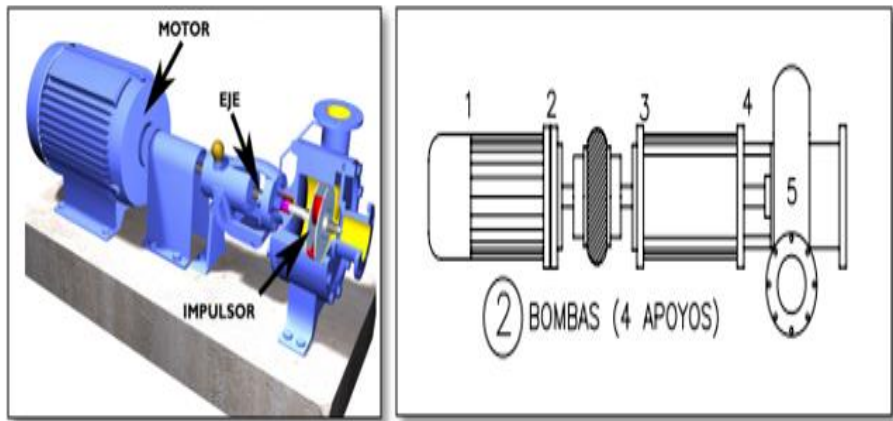


Figura 67 : Equipo de bombeo con sus respectivos puntos de medición (www.power-mi.com)



Figura 68 : Descripción de los componentes del equipo (Desarrollo propio)

Tabla 5: Valores globales en los puntos de medición

ME 117 – B 065		RMS			
Punto	Medición	17/2/2024	15/3/2024	12/4/2024	25/7/2024
1A	Aceleración	0,85	0,8	1,54	0,41
	Velocidad	8,03	13,46	7,76	6,88
1H	Aceleración	0,42	0,74	0,49	0,54
	Velocidad	4,17	7,27	9,92	3,45
1V	Aceleración	0,43	0,54	0,48	0,53
	Envolvente	0,21	0,17	0,14	0,18
	Velocidad	2,67	11,87	9,63	10,23

ME 117- B 065		RMS			
Punto	Medición	17/2/2024	15/3/2024	12/4/2024	25/7/2024
2A	Aceleración	0,49	0,63	0,57	1,12
	Velocidad	7,97	12,98	7,74	9,86
2H	Aceleración	1,5	0,59	2,3	0,36
	Velocidad	5,63	6,16	6,5	5,58
2V	Aceleración	1,01	0,4	0,5	0,52
	Envolvente	0,22	0,15	0,16	0,18
	Velocidad	11,1	5,73	9,95	9,11

ME 117- B 065		RMS			
Punto	Medición	17/2/2024	15/3/2024	12/4/2024	25/7/2024
2A	Aceleración	0,49	0,63	0,57	1,12
	Velocidad	7,97	12,98	7,74	9,86
2H	Aceleración	1,5	0,59	2,3	0,36
	Velocidad	5,63	6,16	6,5	5,58
2V	Aceleración	1,01	0,4	0,5	0,52
	Envolverte	0,22	0,15	0,16	0,18
	Velocidad	11,1	5,73	9,95	9,11

BC - 065		RMS			
Punto	Medición	17/2/2024	15/3/2024	12/4/2024	25/7/2024
3A	Aceleración	0,96	0,82	1,19	1,59
	Velocidad	8,35	13,27	7,59	8,67
3H	Aceleración	0,92	0,9	2,48	1,67
	Velocidad	10,88	6,01	8,61	8,07
3V	Aceleración	1,44	0,84	1,46	1,9
	Envolverte	0,32	0,28	0,51	0,82
	Velocidad	15,55	8,32	13,16	12,39

BC - 065		RMS			
Punto	Medición	17/2/2024	15/3/2024	12/4/2024	25/7/2024
4A	Aceleración	0,61	0,71	0,71	0,76
	Velocidad	8,78	13,74	8,83	8,79
4H	Aceleración	0,75	1,1	1,64	2,69
	Velocidad	7,4	6,98	4,22	3,69
4V	Aceleración	1,09	1,37	1,87	1,96
	Envolvente	0,43	0,82	0,89	1,21
	Velocidad	11,63	4,51	6,86	7,2
Punto	Medición	17/2/2024	15/3/2024	12/4/2024	25/7/2024
5	Aceleración	0,98	0,84	0,99	1,01
	Envolvente	0,4	0,43	0,42	0,53
	Velocidad	3,64	5,59	4,81	3,07

En la tabla 5, se exponen los valores globales RMS medidos en cada punto y en sus respectivas fechas de inspección, el punto 3 en particular representa tanto en dirección horizontal como vertical altos valores RMS, a continuación, se vuelcan en las distintas ilustraciones el espectro característico de desalineación para este punto.



Figura 69 : Espectro de velocidad punto 3V (Desarrollo propio)

En la figura 69 se observa un valor de 7,58 mm/s a 2963 CPM, representado por 1X, y el segundo pico, 2X a 9,07 mm/s a 5944 CPM.

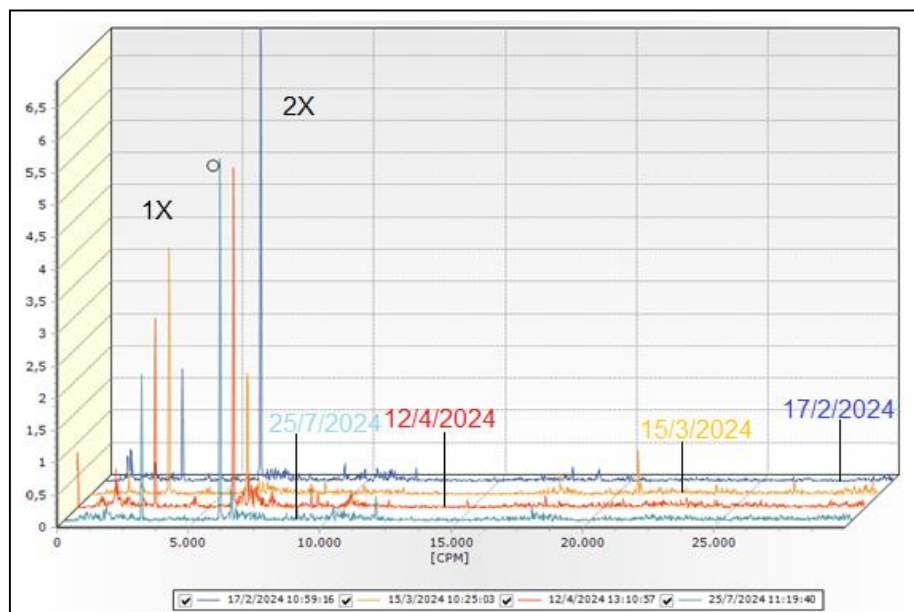


Figura 70 : Diagrama de cascada, valores de velocidad RMS en el punto 3V (Desarrollo propio)

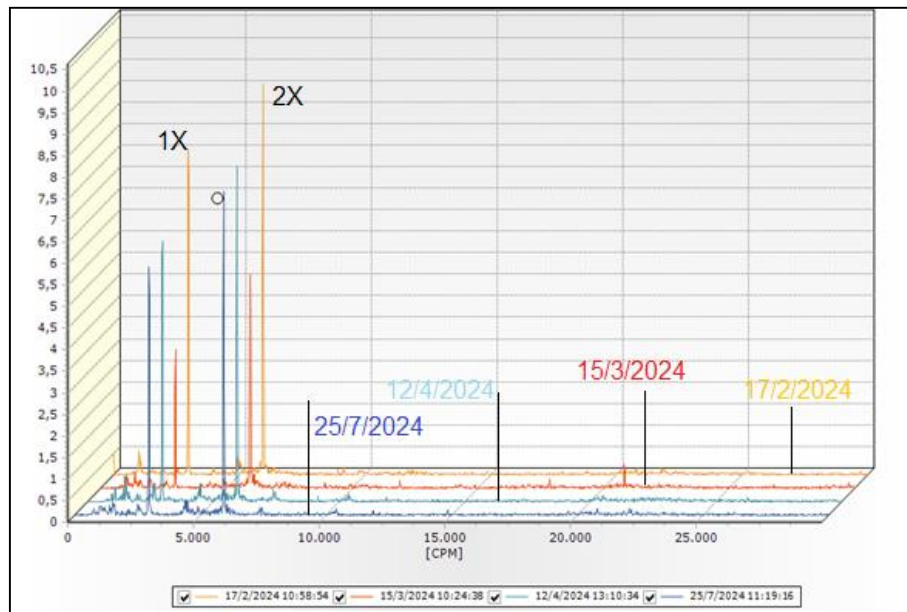


Figura 71 : Diagrama de cascada, valores de velocidad RMS en el punto 3H (Desarrollo propio)

En las figuras 70-71 respectivamente se puede ver como el efecto de desalineación se hace presente, nótese la variabilidad en los valores de los picos 1X y 2X en los diagramas de cascada en cada inspección, esto particularmente se debe a que las mediciones de vibración se realizaron en condiciones de temperatura del equipo algo diferentes, se sabe que cuando las maquinas adquieren temperatura el material se expande y el efecto térmico acompaña al efecto de la desalineación.

En la figura 72 se observa el trend del valor RMS de aceleración para el rodamiento ubicado en el punto 3, se ve claramente como aumenta su vibración global y su inminente falla producto de una deficiente alineación en tiempo y forma.

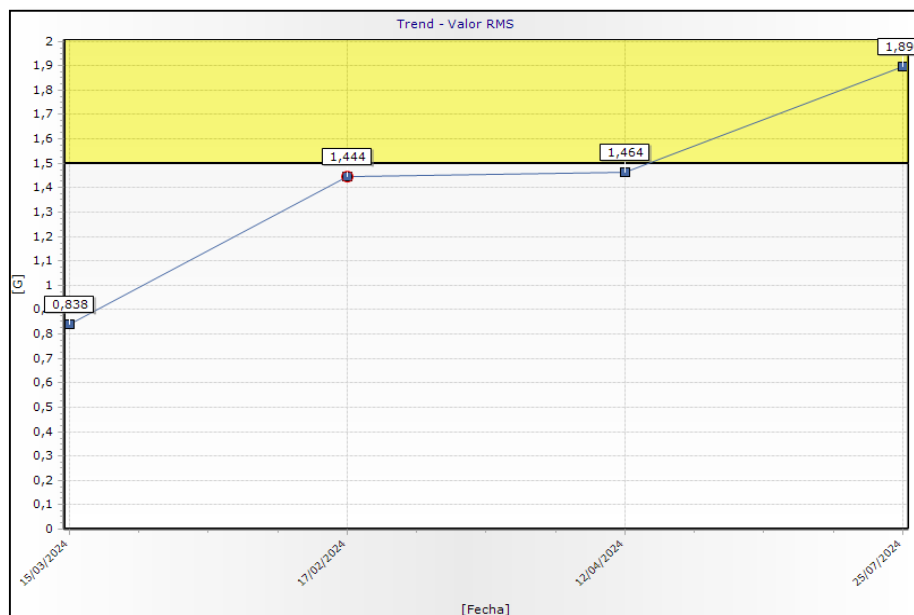


Figura 72 : Trend valor RMS de aceleración punto 3 (Desarrollo propio)

6.1.4 Holgura rotacional

Holgura mecánica

Las holguras mecánicas pueden tener naturaleza muy distinta a saber, falta de apriete entre distintos elementos mecánicos (aflojamiento de pernos, rotura de anclajes, etc.), aumento de tolerancias producidas por desgastes (holguras en cojinetes, rodamientos, engranajes, etc.), las mismas se manifiestan en las medidas de vibración siempre y cuando exista una fuente de excitación debida a un problema ajeno a la propia holgura, como pueden ser desequilibrio, desalineación, etc., de forma que pequeñas fuerzas de excitación exterior pueden producir elevadas amplitudes de vibración, en presencia de holguras.

Fundamentos de holgura rotacional

Las holguras rotacionales son causadas por un espacio libre excesivo entre los elementos giratorios y estacionarios de la máquina. La frecuencia forzada en holgura giratoria es 1X, el eje giratorio entonces fuerza lo que esta suelto haciéndolo impactar una vez por revolución.

Podríamos tener holgura rotacional debido al desgaste de un rodamiento, por ejemplo, generalmente aparece después que se han detectado otros defectos de rodamientos, el mismo podría encontrarse suelto en la carcasa o chumacera debido a un ajuste inadecuado. Así mismo se observa un patrón similar en los datos de vibración si un perno de sujeción/retención estuviese suelto.

Diagnóstico de holgura rotacional

Este tipo de holguras se caracterizan por presentar un espectro con una gran cantidad de frecuencias relacionadas con la frecuencia de giro del rotor, pudiendo distinguirse: armónicos ($1X$, $2X$, $3X$, etc.), a medida que la condición de holgura empeora, el número y la amplitud de los armónicos aumenta, se podrán llegar a visualizar picos más elevados si existiese coincidencia de resonancia estructural u otras fuentes de vibración, como por ejemplo frecuencia de paso de paletas.

Si la holgura/soltura es excesiva en rodamientos y cojinetes de deslizamiento se pueden producir subarmónicos ($0,5X$) y medios armónicos ($1,5X$, $2,5X$, $3,5X$, etc), incluso ($1/3X$), producido por fricciones o impactos severos, los cuales a su vez provocan truncado en la onda de vibración y una elevación del piso espectral.

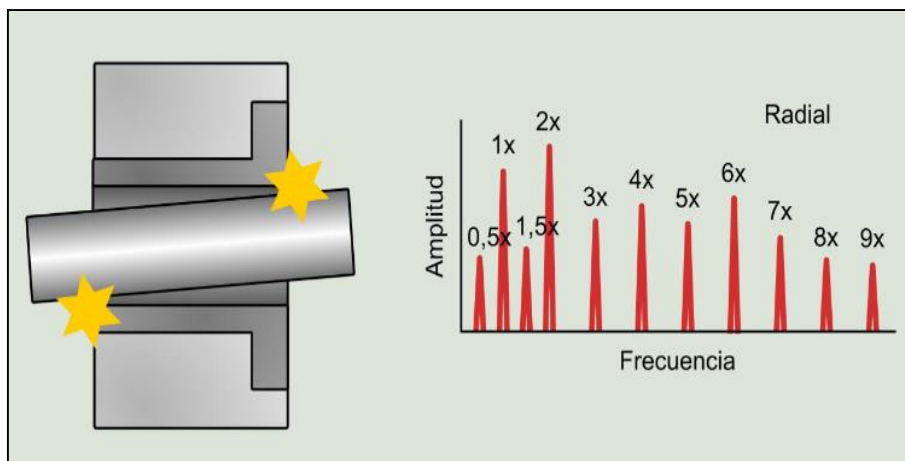


Figura 73 : Holgura en elementos rotativos (www.power-mi.com)

D. Ventilador industrial

Equipo:	Ventilador de horno
Tag:	vh 02
Empresa:	papelera
Ubicación del activo:	Neuquén; Neuquén
Descripción general del equipo Los ventiladores son esenciales para la industria actual. su aplicación fundamental es la de transporte o impulsión de aire, gases o vapores en sistemas de ventilación, sistemas de intercambio de calor o procesos que involucren combustión de gases. pero también se puede aprovechar el flujo de aire para transportar otro tipo de productos, como polvos o pequeños sólidos, uso típico en industrias como la de alimentos y el cemento, papeleras, sistemas de ventilación edilicia, etc.	

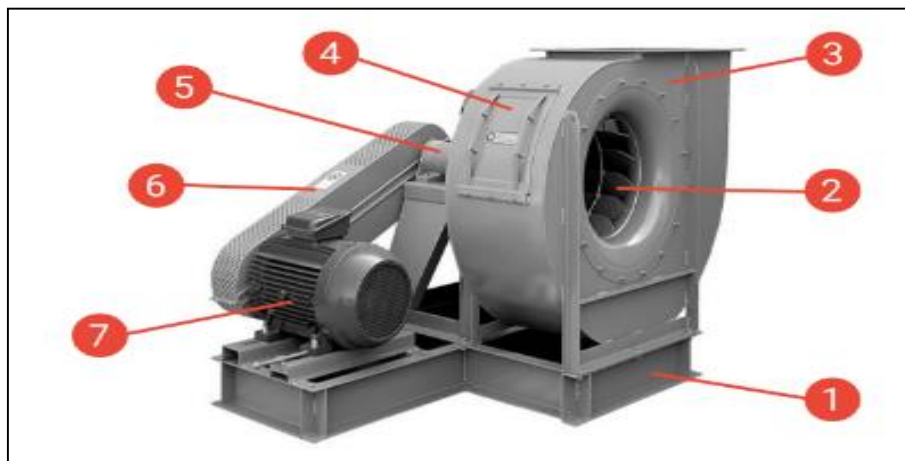


Figura 74 : Principales partes de un ventilador centrífugo (www.power-mi.com)

Partes de la máquina:

- I. Base o soporte estructural.
- II. Impulsor y álabes.
- III. Voluta o carcasa.
- IV. Boca de inspección.

- V. Rodamientos o cojinetes.
- VI. Sistema de transmisión (por correas).
- VII. Equipo conductor.



Figura 75 : Equipo VH02 (Desarrollo propio)

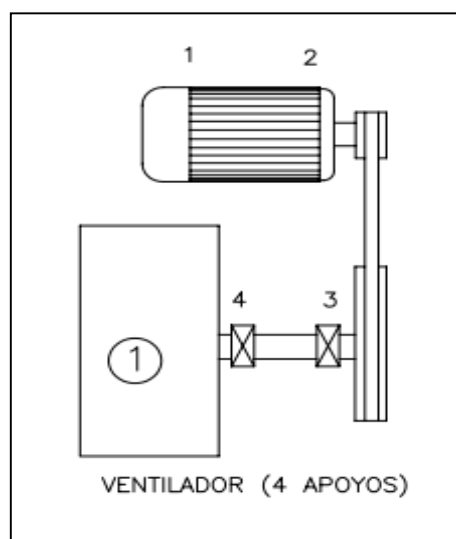


Figura 76 : Puntos típicos de medición (ISO 10816)

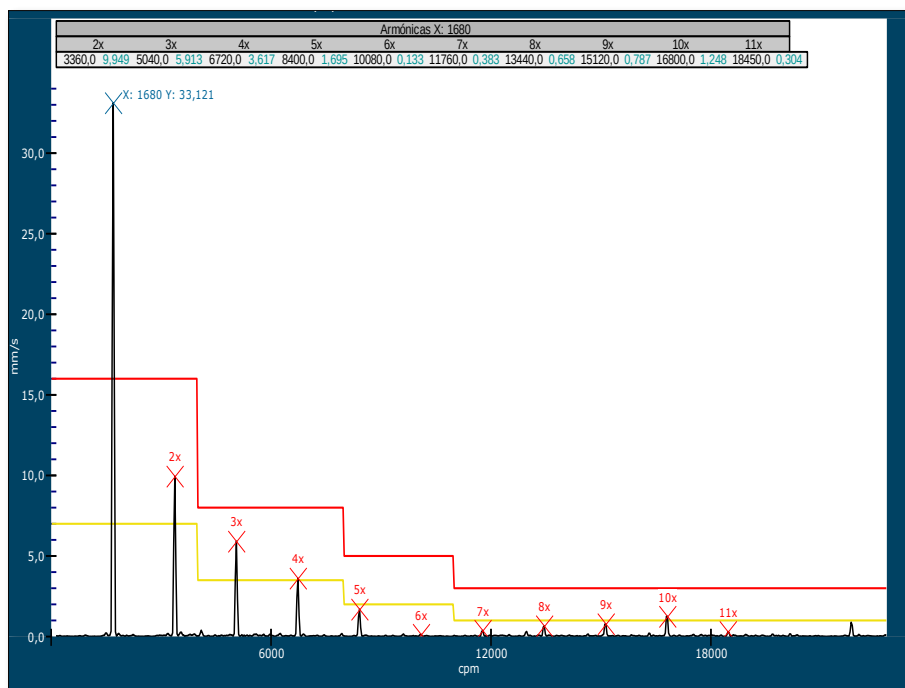


Figura 77 : Espectro de velocidad medido en el punto 4 (Desarrollo propio)

En la figura 77 se puede observar el valor de vibración global de 1X altamente predominante de 33,121 mm/s a 1680 CPM, esta velocidad es la del eje conducido, seguido de sus armónicos de menor amplitud, los cuales se pueden apreciar hasta un 11X.

Diagnostico

Es de esperar este tipo de espectros en rodamientos ya que los mismos trabajan con una holgura predeterminada, pero se observa claramente un incremento del valor 1X muy por encima del valor ceteado de alarma, propio de la existencia de un ajuste inadecuado del mismo, y de una insuficiencia estructural de la base de las chumaceras como se aprecia en la figura 78.



Figura 78 : Estado de base de chumacera, rodamiento y eje (Desarrollo propio)

Propuesta de mantenimiento

- I. Limpieza y revisión de las aspas del ventilador, minimizando así las adherencias de partes extrañas o suciedad.
- II. Garantizar el correcto ajuste de rodamientos.
- III. Lubricación de los rodamientos del equipo.
- IV. Verificar el torque de apriete del equipo en general.

Posterior a las acciones recomendadas se observan las mejoras en las siguientes ilustraciones.

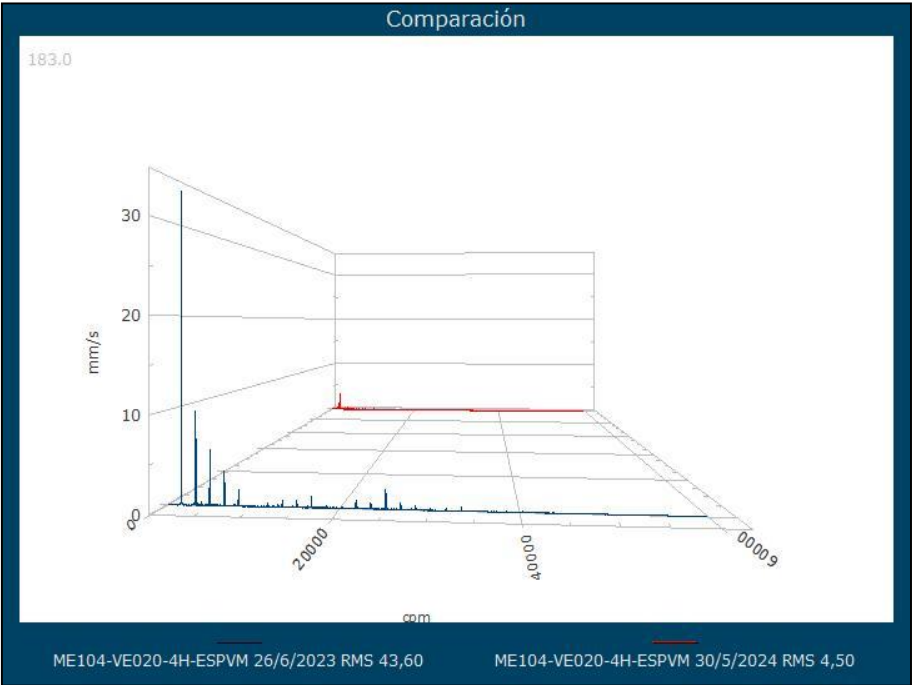


Figura 79 : Trend punto 4 (Desarrollo propio)

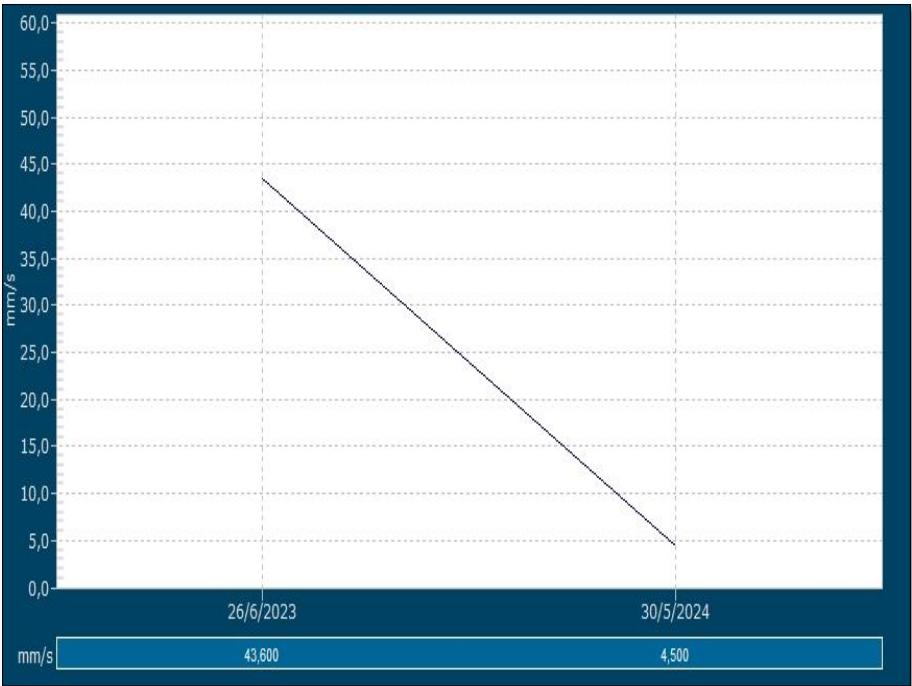


Figura 80 : Trend punto 4 (Desarrollo propio)

Las figuras 79-80 marcan una disminución de los valores globales RMS, es decir gracias a la intervención se logró pasar de 43,6 mm/s RMS a 4,5 mm/s RMS.

6.1.5 BPFO (Ball Pass Frequency Outer)

(Frecuencia de paso de los elementos rodantes por un defecto en pista externa)

Los rodamientos son elementos mecánicos presentes en la mayoría de las máquinas rotativas. Los estudios muestran que menos del 10% de estos elementos, alcanzan su vida útil, y esto se debe generalmente a una serie de factores tales como: carga, velocidad de trabajo, lubricación, montaje, temperatura, fuerzas exteriores causadas por desalineaciones, desequilibrios, etc., de ahí que sea prácticamente imposible determinar su duración por métodos analíticos. La importancia y criticidad de estos elementos hace necesaria la utilización de técnicas modernas de mantenimiento predictivo (basadas en el análisis de vibraciones)

Técnicas de alta frecuencia como el análisis de envolvente, y mediante equipos de última tecnología, nos permitirá identificar las frecuencias de fallas más comunes de sus componentes.

Concepto de frecuencia de deterioro de la pista exterior (BPFO)

Se corresponde físicamente con el número de bolas o rodillos que pasan por un punto de la pista exterior cada vez que el eje realiza un giro completo. Si hubiera daño en la pista exterior, esperaríamos observar un “pulso” periódico de vibración a esta velocidad.

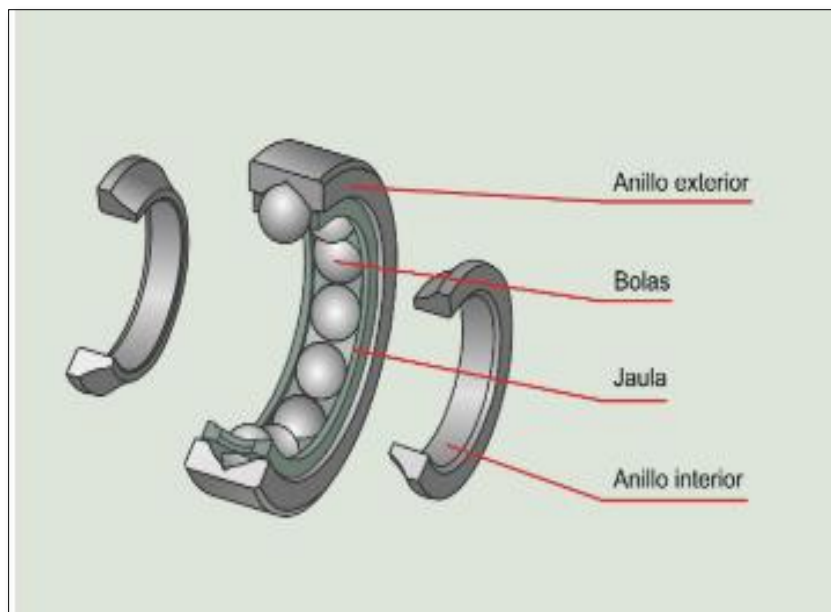


Figura 81 : Componentes de un rodamiento (www.power-mi.com)

Fórmulas para el cálculo de las frecuencias de fallo de un rodamiento

Cada rodamiento tiene unas características geométricas propias a partir de las cuales podemos determinar sus frecuencias de deterioro. Estas frecuencias aparecerán en las firmas espectrales cuando el rodamiento está deteriorado. Para la mayoría de los rodamientos estas frecuencias de deterioro no serán números enteros, por lo que la vibración dominante, cuando exista un defecto de alguno de los componentes del rodamiento, será no síncrona (no coincidente con armónicos de la frecuencia de giro del eje).

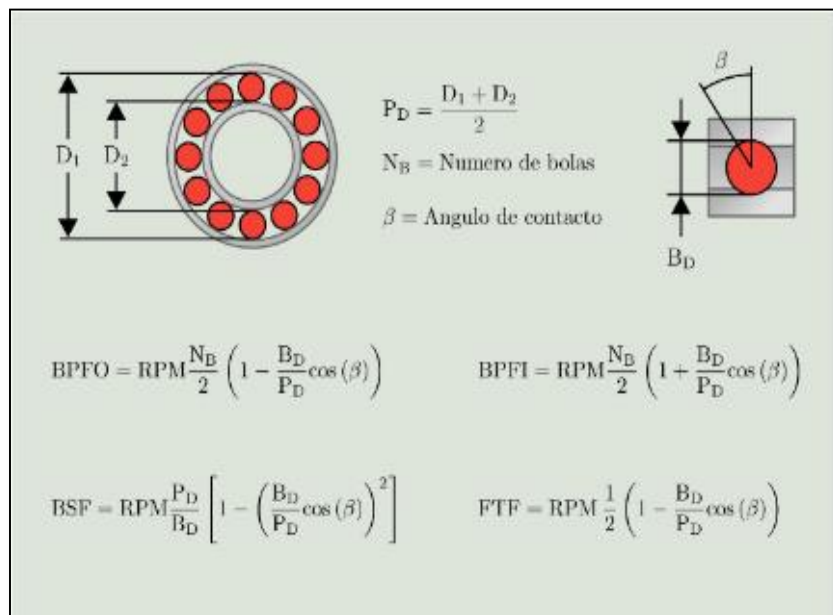


Figura 82 : Fórmulas para el cálculo de frecuencias (www.power-mi.com)

Cuando alguno de los componentes del rodamiento está dañado distinguiremos en el espectro de frecuencias la frecuencia fundamental correspondiente al elemento dañado, acompañada siempre de armónicos.

Técnica de envolvente

La técnica de envolvente permite extraer las frecuencias de interés a partir de la definición de la señal modulada. Este proceso implica el uso de una secuencia de operaciones con la señal de vibración que inicia con la eliminación de componentes de baja frecuencia asociadas a otras condiciones del equipo rotativo, como desbalanceo o desalineamiento.

Posteriormente, se demodula la señal a través de la Transformada de Hilbert, encargada de rectificar la señal y determinar la señal envolvente con una frecuencia que corresponde a los valores de BPFO y BPFI. Como última etapa se eliminan las altas frecuencias y se obtiene del espectro de la señal resultante.

Ejemplo de la técnica de envolvente

Cuando se presenta un desperfecto en la pista interna o externa del rodamiento, el elemento rodante produce un pequeño impulso de baja energía, provocando que el rodamiento vibre. Este impulso excita la frecuencia natural del conjunto cuyo valor depende de las propiedades de los materiales y la geometría del sistema.

Esta vibración es atenuada por el amortiguamiento del sistema, decayendo rápidamente. Durante la operación, con cada revolución, un número específico de elementos rodantes golpean el defecto en la pista, provocando un tren de respuestas, ver figura 83.

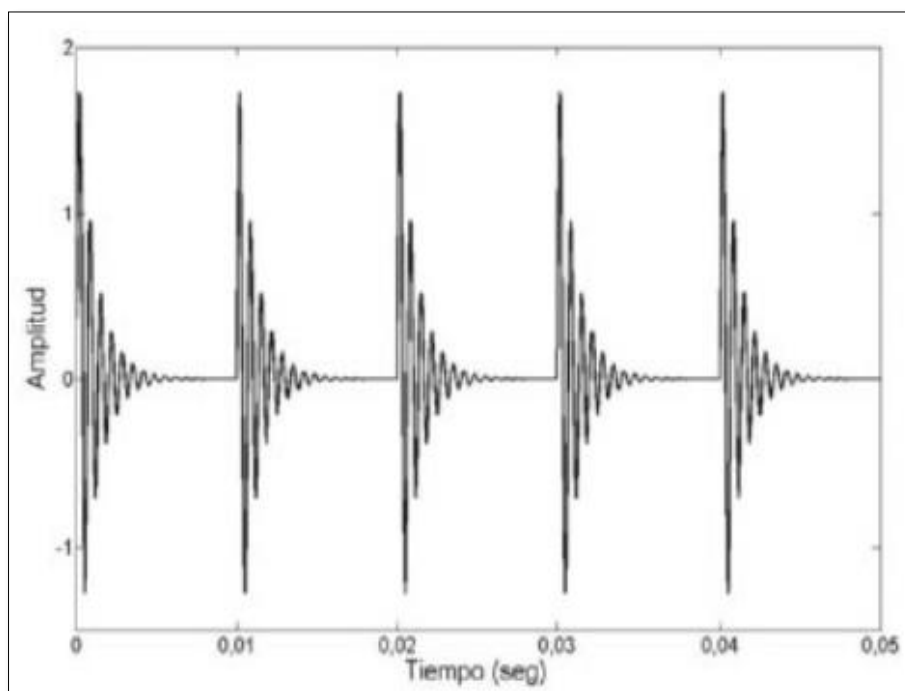


Figura 83 : Representación de la señal de falla (Quiroga, Trujillo y Quintero: Estudio de fallas incipientes en rodamientos usando la técnica de la Envolvente y Cepstrum,2011)

la representación de esta señal ha sido simulada, y su espectro utilizando FFT, se muestra a continuación.

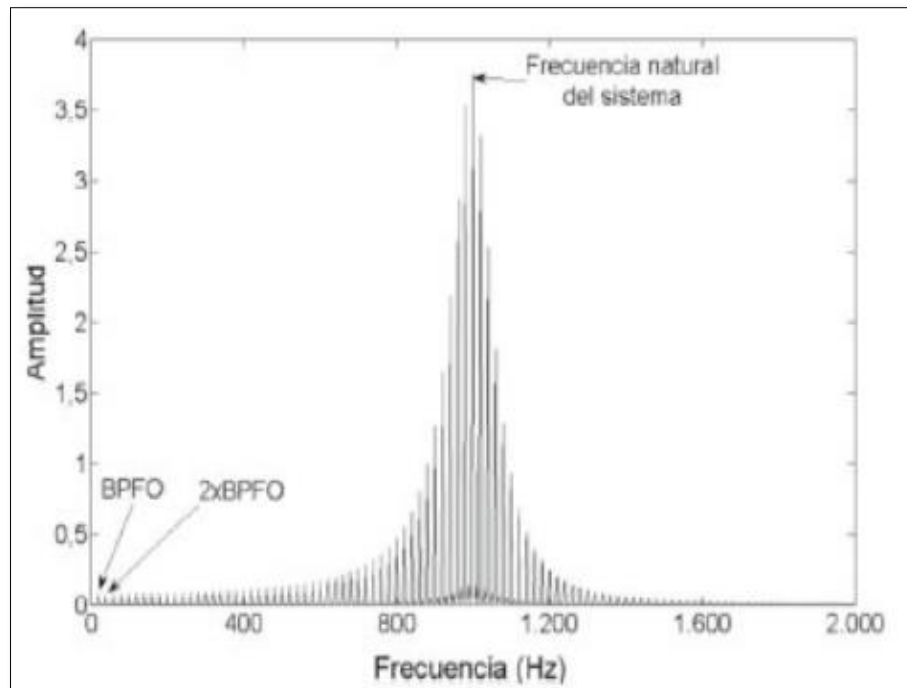


Figura 84 : Espectro de la señal simulada (Quiroga, Trujillo y Quintero: Estudio de fallas incipientes en rodamientos usando la técnica de la Envolvente y Cepstrum,2011)

El proceso de demodulación, base de la técnica de la envolvente, consiste en obtener a partir de la vibración original una nueva señal que contenga únicamente la señal modulada. Esta nueva señal también se conoce como envolvente de la señal original. El espectro de la señal demodulada se denomina espectro de demodulación y para el caso de la señal simulada se muestra en la figura 85. El espectro de demodulación obtenido contiene picos armónicos, amplificados en el caso de la frecuencia de BPFO de 260 veces respecto al valor obtenido con la FFT de la señal de vibración original.

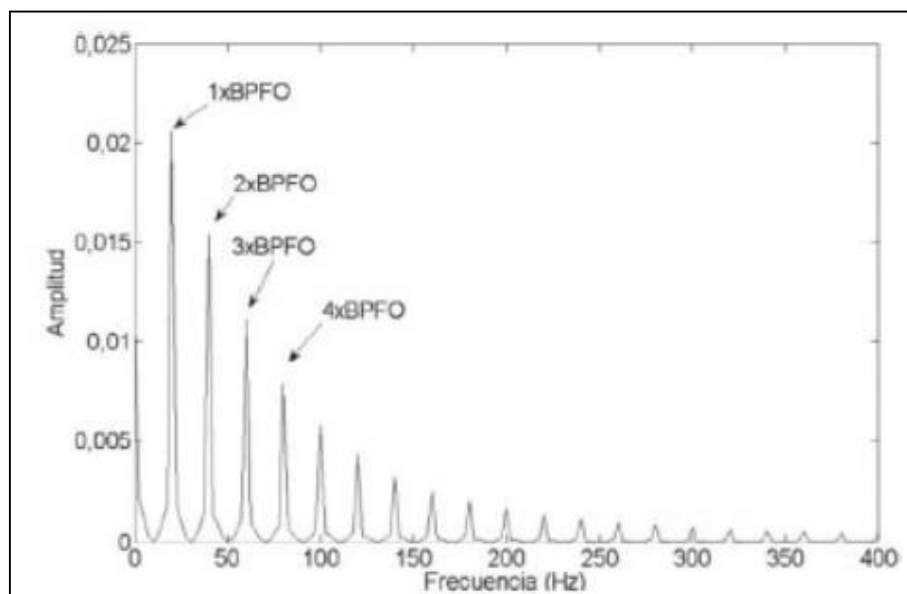


Figura 85 : Espectro de la envolvente para la señal simulada (Quiroga, Trujillo y Quintero: Estudio de fallas incipientes en rodamientos usando la técnica de la Envolvente y Cepstrum,2011)

E. Rodamiento de Decanter

Equipo:	Decanter n° 8	
Industria:	alimenticia	
Ubicación del activo:	General Roca, Rio Negro	
Componente de estudio:	Rodamiento	6220 m/c3
	Falla : bpfo	marca: fag



Figura 86 : Decanter N° 8 (Desarrollo propio)

Observaciones:

La compañía tiene como política de mantenimiento, cada 2 años realizar un mantenimiento Overhaul de sus equipos.

Para el mes de agosto del año 2021 el equipo se envió al proveedor externo para realizar esta tarea de desarme general.

Previo a enviar el activo, se realizó una inspección de vibraciones y se observaron los valores típicos de estos equipos por el fenómeno de desbalance. Esto se debe a que el tornillo helicoidal se desgasta por el fluido de proceso y pierde material generando una diferencia del centro geométrico con el centro de rotación. En esta inspección llevada a cabo el mes de julio del mismo año, los rodamientos del activo no presentaban fallas incipientes.

Para el mes de enero del 2022 el activo regreso a la empresa y se puso en funcionamiento. Con menos de 100 horas de operación y debido a ruido notorio, se realizó una nueva inspección mediante la técnica de análisis de vibraciones. En esta oportunidad se encontró una anomalía crítica en el punto 4 de medición, correspondiente al rodamiento FAG 6220 M/C3.

Las vibraciones en aceleración y envolvente presentaban valores elevados, no así en la medición de velocidad. Lo que suponía como falla en el rodamiento. En un primer momento se sospechó de un montaje inadecuado del mismo.

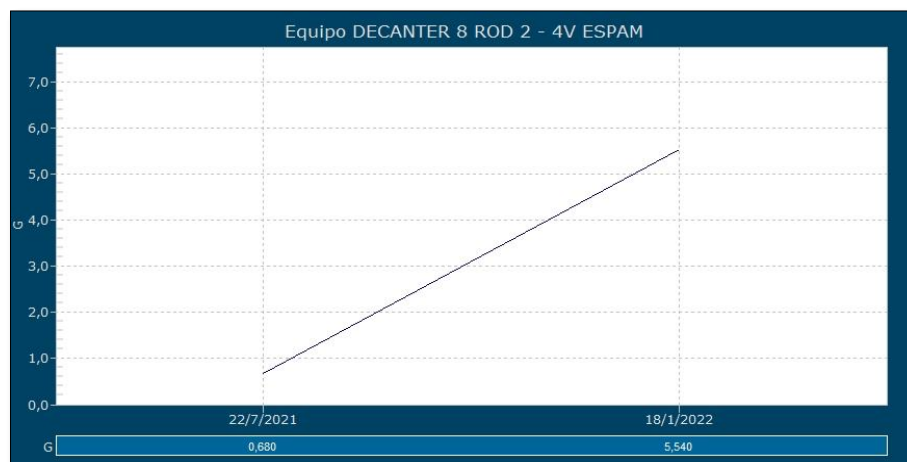


Figura 87 : Aumento de las vibraciones en aceleración (Desarrollo propio)

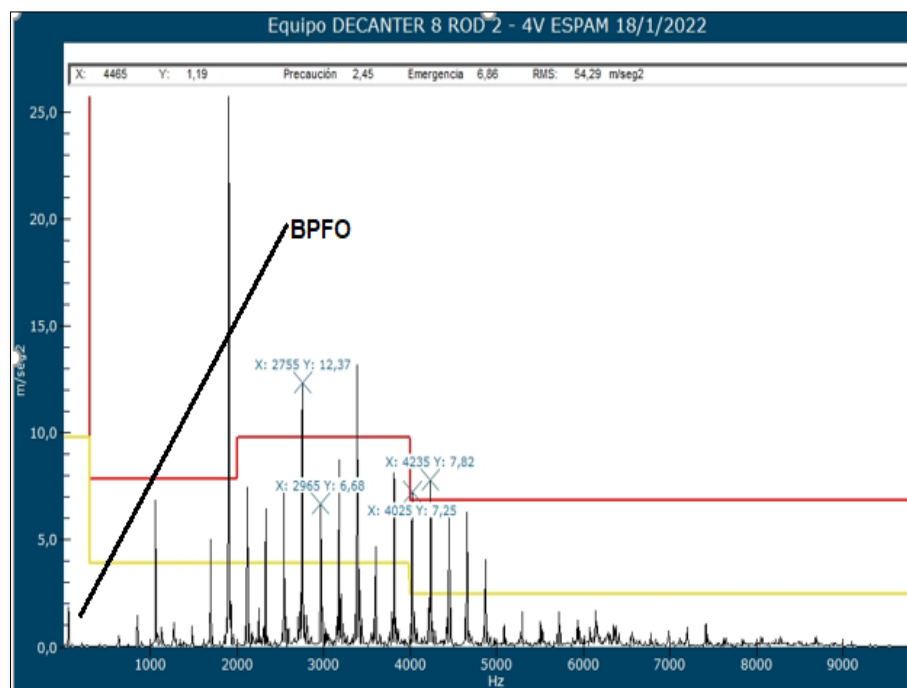


Figura 88 : Espectro de aceleración en el punto 4V (Desarrollo propio)

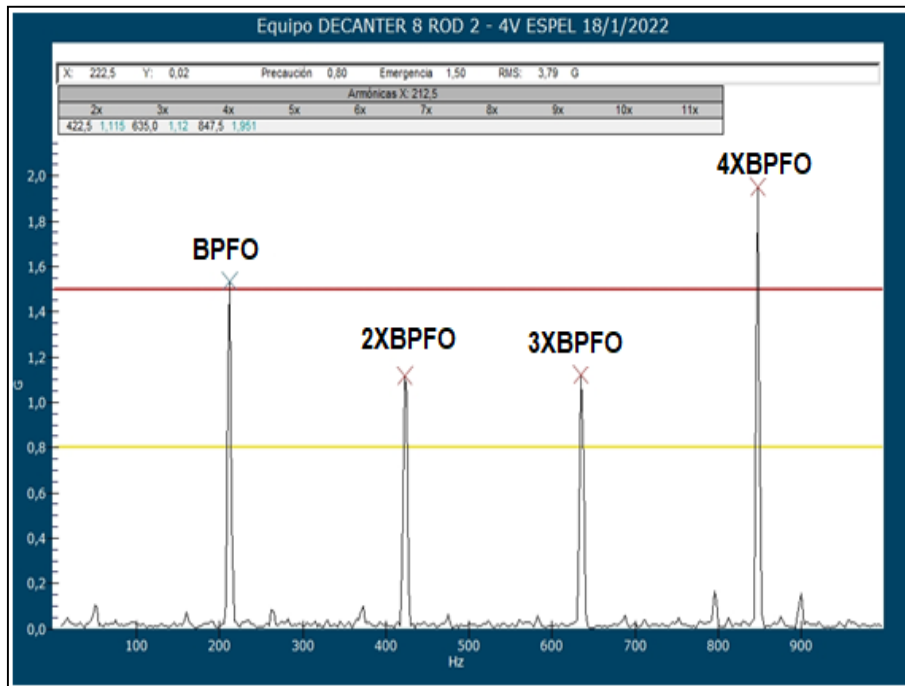


Figura 89 : Espectro de la señal envolvente (Desarrollo propio)

Lo observado en las figuras permite concluir que, con el uso de la FFT para las señales, las frecuencias BPFO son opacadas por la gran amplitud de los armónicos de alta frecuencia correspondientes en su mayoría a la frecuencia natural del sistema y al ruido.

Pero este rodamiento se encuentra en una etapa donde aparecen las frecuencias características de defectos y sus armónicos. A medida que el daño progresa se incrementa tanto la amplitud de las frecuencias de fallo y sus armónicos ver figura 89, como así también la vibración en aceleración a alta frecuencia como se visualiza en la figura 88.

Conclusiones:

Gracias a la capacidad del equipo de medición DSP Logger MX300 y su función de envolvente, demodulación de amplitud, y a través de la carga de datos del rodamiento específico, se pudieron obtener en que componente del rodamiento se presentó la falla. Obteniendo como resultado una falla en la pista externa del rodamiento.

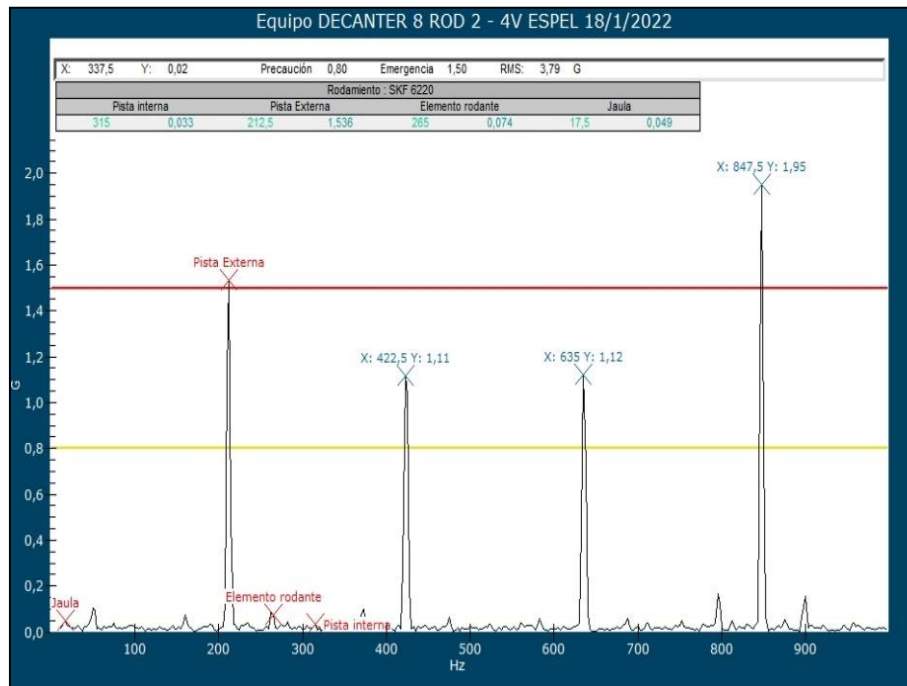


Figura 90 : Espectro de envolvente; detección del componente deteriorado (Desarrollo propio)

Acciones:

Se notificó al personal para realizar la intervención inmediata y realizar el análisis y recambio del rodamiento.

En el desmontaje del mismo se observó que este era de la marca FAG 6220 M/C3. Por lo que la falla se debió a un mal dimensionamiento y selección del rodamiento para este tipo de activos. Este tipo de máquinas se proveen para su funcionamiento de un rodamiento 6220 M/C4, la diferencia radica en la holgura entre bolas o rodillos y sus pistas.



Figura 91 : Rodamiento deteriorado 6220 M/C3 (Desarrollo propio)

Verificación de la acción:

En análisis posteriores luego de la reparación se observó la disminución de los valores de vibraciones (aceleración y envolvente), mostrados en las *figuras 92-93*. En sus gráficos de tendencia y cascada respectivamente.

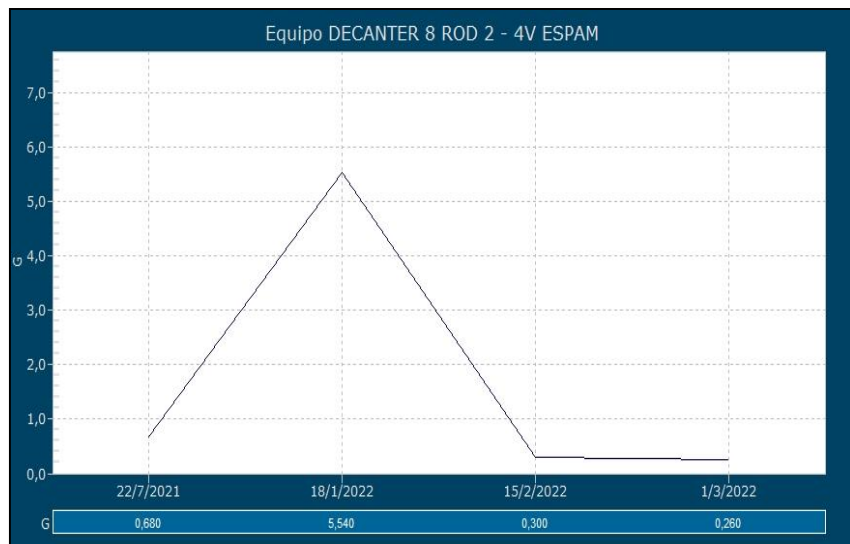


Figura 92 : Espectro de aceleración, disminución de los valores de aceleración (Desarrollo propio)

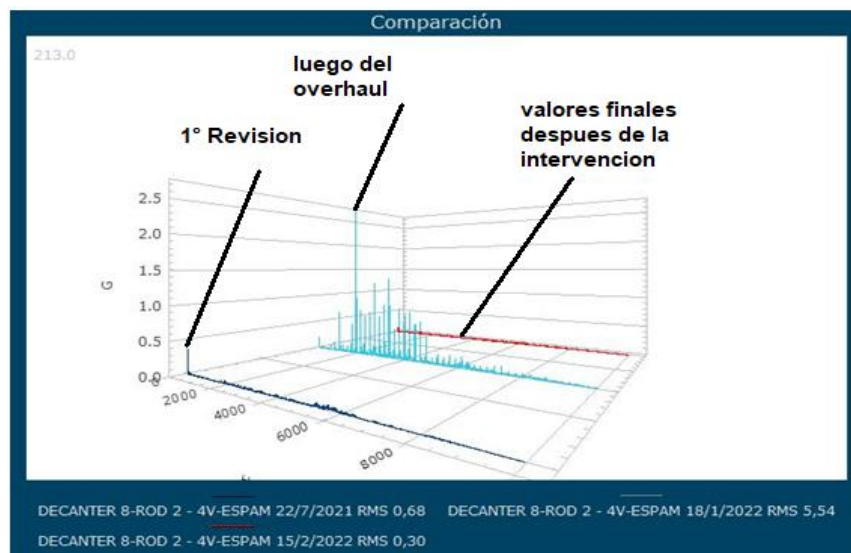


Figura 93 : Espectro cascada, seguimiento de los valores de aceleración (Desarrollo propio)

6.2 Casos prácticos utilizando la técnica de termografía infrarroja

En la sección siguiente se presentan mediciones específicas llevadas a cabo y casos ejemplares que han sido analizados empleando la técnica de termografía infrarroja.

6.2.1 Motor eléctrico con anomalía térmica

Tabla 6: Especificaciones de motores eléctricos E1-E2

Equipo:	Motores eléctricos
Tag:	E1-E2
Empresa:	Papelera Industrial S.A
Especificaciones:	7,5 KW, I= 14,7 A
Ubicación del activo:	Neuquén, Provincia del Neuquén
Descripción general del equipo: Motor eléctrico acoplado mediante transmisión de poleas y correas a un agitador, con el objetivo de mantener la recirculación de fluido en tanque de almacenamiento.	

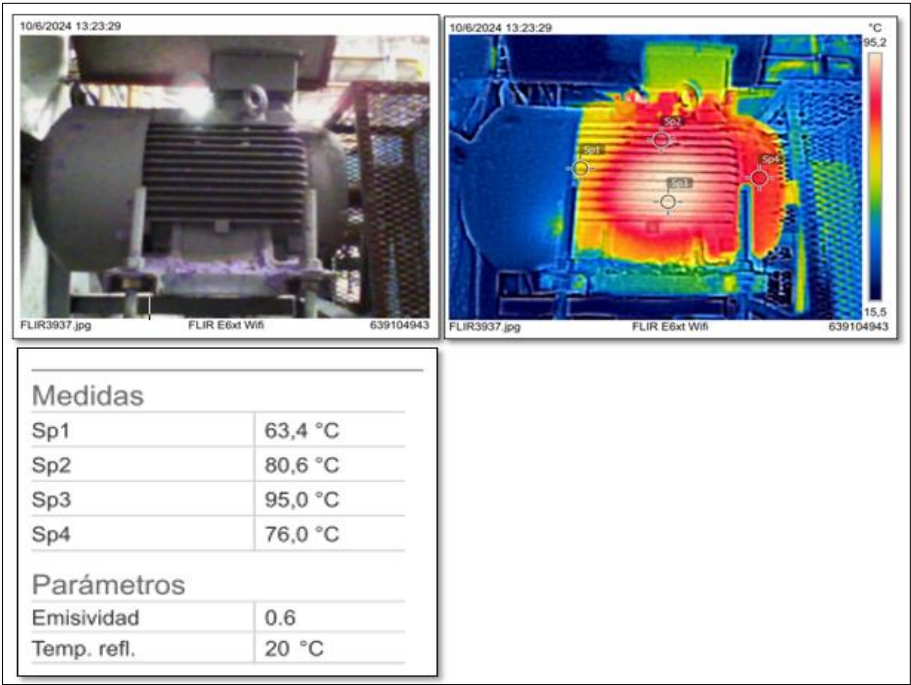


Figura 94: Motor eléctrico E1 a la izquierda, a su derecha termograma (Desarrollo propio)

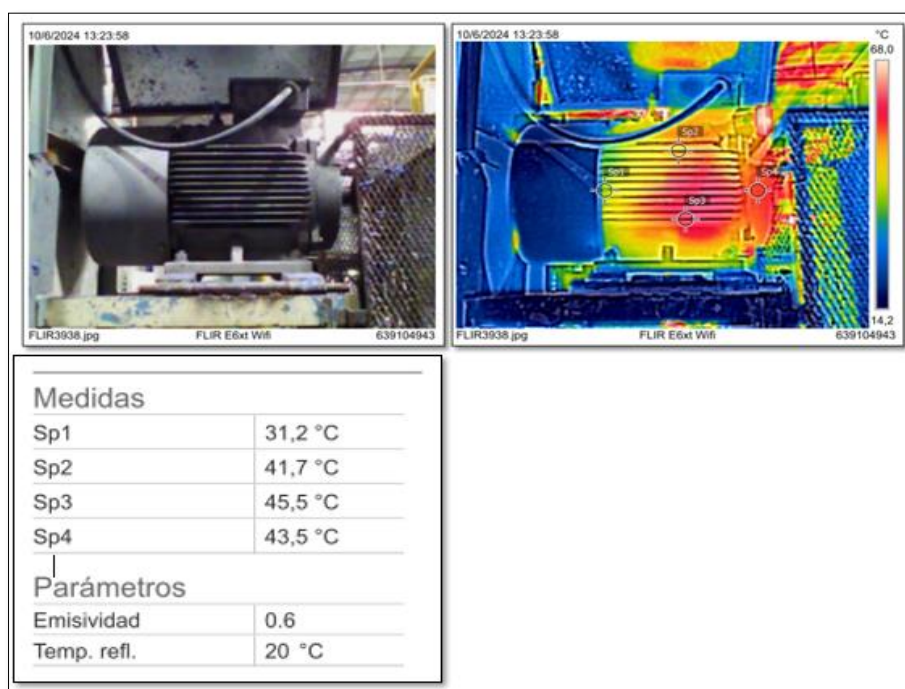


Figura 95: Motor eléctrico E2 a la izquierda, a su derecha termograma (Desarrollo propio)

Diagnóstico de los equipos:

Los motores E1 y E2 son motores eléctricos de características constructivas similares, operando en una línea de recirculación de fluidos, ambos se encuentran emplazados en el mismo entorno. Primeramente, se observó cómo trabajaban estos equipos en conjunto, es decir, bajo que cargas estaban sometidos durante el proceso y en qué estado el fluido ingresaba al tanque de recirculación en cada uno de ellos, se constató además que la ventilación en la parte trasera de cada motor no estuviese obstruida e interfiera en la disipación de calor de los mismos. Sin embargo, bajo el análisis de termografía infrarroja se observó que existían valores notablemente diferentes en puntos idénticos de medición. Esto sugirió la posible presencia de una condición de deterioro en uno de los motores. Para abordar esta situación, se llevó a cabo una evaluación siguiendo las directrices establecidas por la norma ISO 18434-1/ (2008), específicamente el inciso 5.1 sobre "Tipos de termografía comparativa". Dicha norma recomienda, en la medida de lo posible, aplicar la técnica comparativa cuantitativa o en su defecto la técnica comparativa cualitativa.

La técnica comparativa cuantitativa implica determinar un valor de temperatura para evaluar la gravedad de la condición, comparando la temperatura del objetivo con la de un equipo similar en operación o con datos de referencia. En la siguiente tabla se presentan los valores de T y ΔT obtenidos para los equipos durante este análisis.

Tabla 7: Valores de temperatura en los puntos de medición de los equipos E1- E2

Puntos de medición	E1(°C)	E2(°C)	ΔT
Sp1	63,4	31,2	32,2
Sp2	80,6	41,7	38,9
Sp3	95	45,5	49,5
Sp4	76	43,5	32,5

Como se puede observar, en algunos puntos de medición se obtienen valores que superan el 100%, mostrando diferencias de temperatura significativas. Aunque la normativa no especifica valores exactos de ΔT para cada componente o equipo que permitan establecer un criterio claro sobre la severidad de la condición, sí sugiere una referencia. Según dicha orientación, una diferencia de temperaturas de 5 °C se considera una condición de baja gravedad, mientras que una diferencia de 100 °C se clasifica como una condición crítica.

Analizando la situación desde la perspectiva de la técnica cualitativa, que se basa en comparar los perfiles o patrones térmicos de un componente con otro idéntico o similar, ambos operando bajo las mismas condiciones de funcionamiento y entorno, las anomalías se detectan por las variaciones de intensidad entre estos objetos. Este análisis no depende de valores absolutos de temperatura asociados a los patrones ni requiere ajustes del instrumento infrarrojo. Tal como se observa en las figuras 94 y 95, hay una zona con diferencias térmicas evidentes, evidenciadas por las variaciones de intensidad entre los patrones comparados.

Por lo tanto, aunque no contamos con un parámetro específico de diferencia de temperaturas ni una referencia establecida por una tendencia realizada por el personal de mantenimiento sobre estos equipos para determinar la severidad de la condición, es posible afirmar que existe una falla incipiente en el equipo identificado como E1.

Recomendación:

Tras analizar el termograma, se sugirió monitorear el equipo mediante un análisis de tensión y consumo en las fases. Esto es necesario porque la discrepancia en el consumo entre las fases provoca un incremento en la temperatura, lo que a su vez disminuye la vida útil del material aislante interno. Este deterioro compromete la aislación y, finalmente, conduce a una falla funcional del bobinado. Se recomienda que el personal de mantenimiento registre y catalogue cada motor eléctrico utilizando la información proporcionada en su placa de identificación.

Es fundamental conocer la temperatura máxima admisible del devanado, ya que un aumento entre 8°C y 10°C por encima del límite establecido para la clase térmica puede reducir a la mitad la vida útil del devanado.

Es importante considerar que una medición con termografía infrarroja solo reflejará la temperatura superficial de la carcasa, la cual no representa necesariamente la temperatura interna del motor.

En algunos casos, se ha estimado que la diferencia entre la temperatura de la carcasa y la del devanado es de aproximadamente 30°C. Por ejemplo, en el punto SP3 del motor E1, podríamos registrar una temperatura cercana a los 125°C. Por ello, es esencial confirmar que este valor no exceda los límites de resistencia térmica establecidos para el devanado durante un tiempo prolongado, con el fin de evitar daños o pérdida de eficiencia del motor.

En este marco, resulta aconsejable realizar una prueba de resistencia de aislamiento y registrar los valores obtenidos, con el objetivo de establecer una tendencia en los datos recopilados.

6.2.2 Motor eléctrico, refrigeración defectuosa

El siguiente caso es un equipo de extracción de agua de producción, constituido por un motor eléctrico de 7,5 Kw, acoplado mediante transmisión por correas a una bomba centrífuga. Inicialmente se realizó una inspección visual de las condiciones y el entorno al cual está sometido el equipo, luego se realizaron las mediciones termográficas pertinentes.

Tabla 8: Especificaciones de motor eléctrico F1

Equipo:	Motor eléctrico
Tag:	F1
Empresa:	Papelera Industrial S.A
Especificaciones:	7,5 KW, I= 14,7 A
Ubicación del activo:	Neuquén, Provincia del Neuquén
Descripción general del equipo: Motor eléctrico acoplado mediante transmisión de poleas y correas a una bomba centrífuga, utilizada para la extracción de agua de producción.	

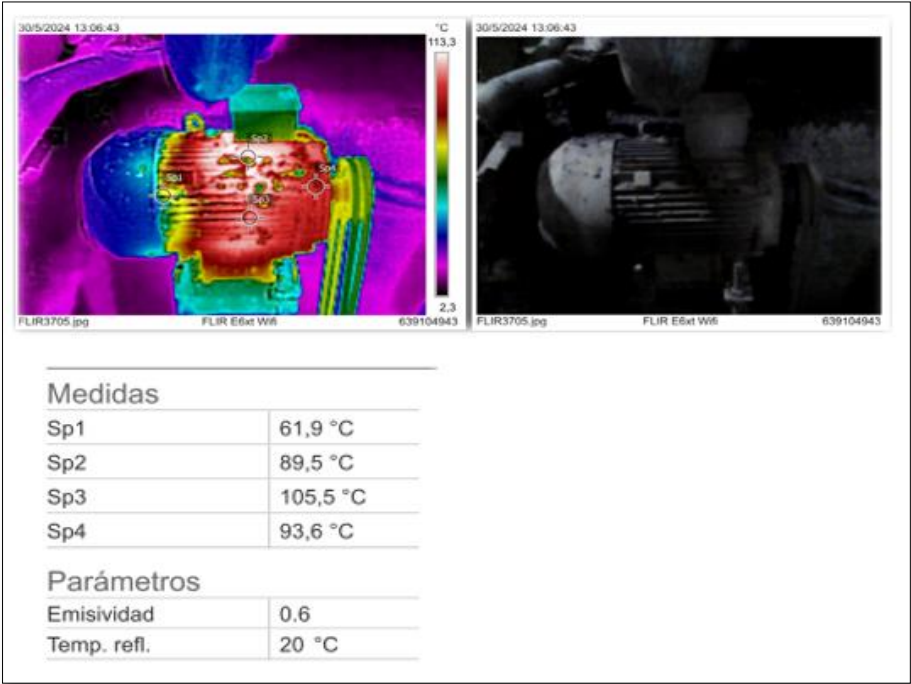


Figura 96: Motor eléctrico F1 a la izquierda, a su derecha termograma (Desarrollo propio)



Figura 97: Estado del motor F1 (Desarrollo propio)

Diagnóstico:

Por medio de la inspección de los termogramas, se identifica un incremento generalizado en la temperatura del activo en cuestión. Las imágenes que se presentan a continuación evidencian la causa principal de este exceso de temperatura. Se ha determinado que el sistema de refrigeración del activo es deficiente como consecuencia de la obstrucción en la rejilla del ventilador, evidenciado en la figura 97 lo cual impide el adecuado flujo de aire necesario para su correcta disipación de calor.

Recomendación:

Se sugirió limpiar completamente el equipo, poniendo especial atención en la tapa de refrigeración y las aletas de disipación de calor del motor. Además, se indicó al encargado de mantenimiento la importancia de fomentar la realización periódica de estas tareas.

6.2.3 Tableros eléctricos

Algunos casos típicos de sobrecalentamiento en tableros eléctricos, con causas asociadas a desajuste, contaminación y corrosión en terminales, integridad de los elementos defectuosa, inadecuada sección del cableado seleccionado, entre otras causas.

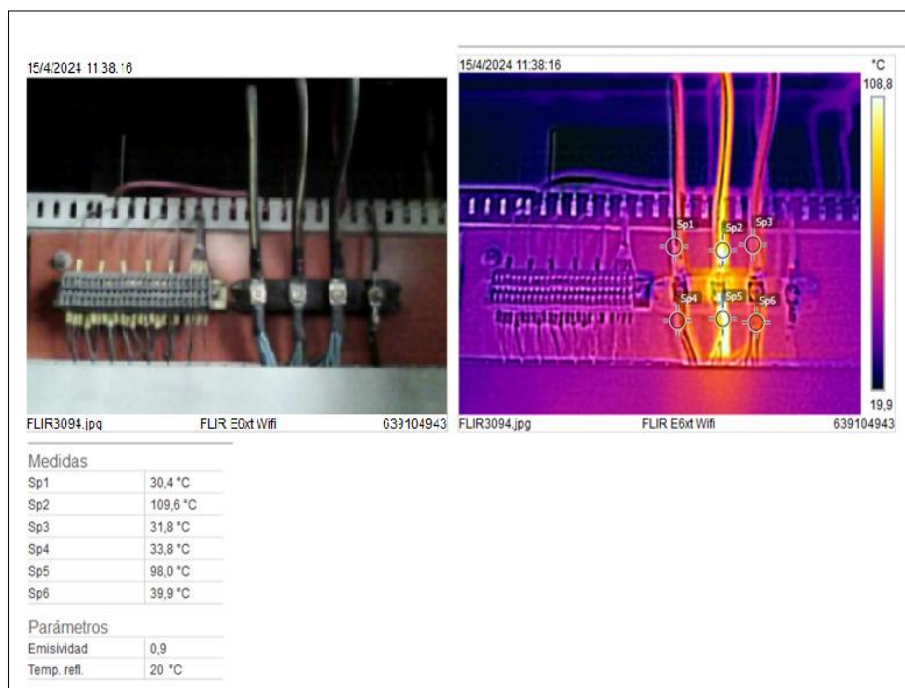


Figura 98: Tablero eléctrico a la izquierda, a su derecha termograma (Desarrollo propio)

Diagnostico:

A primera vista, se observa un aumento de temperatura en la fase correspondiente a los puntos de contacto [Sp2 y Sp5], el cual se extiende de forma casi uniforme a lo largo de los conductores. Esto podría estar asociado a una diferencia de valores entre fases, una posible sobrecarga, desajustes o incluso corrosión en las terminales.

Como referencia, se extrae la tabla 100.18 de la norma NETA (Asociación Internacional de Pruebas Eléctricas) Especificaciones de Pruebas Aceptadas para Sistemas y Equipos de Distribución de Potencia eléctrica capítulo 9.1 inspección termográfica

Tabla 9: Acciones en función del aumento de temperatura

TABLE 100.18 Thermographic Survey Suggested Actions Based on Temperature Rise		
Temperature difference (ΔT) based on comparisons between similar components under similar loading	Temperature difference (ΔT) based upon comparisons between component and ambient air temperatures	Recommended Action
1° C – 3° C	1° C – 10° C	Possible deficiency; warrants investigation
4° C – 15° C	11° C – 20° C	Indicates probable deficiency; repair as time permits
-----	21° C – 40° C	Monitor until corrective measures can be accomplished
>15° C	>40° C	Major discrepancy; repair immediately

Se ha calculado un delta de temperatura entre las fases de entrada Sp1 y Sp2, comparando componentes similares sometidos a cargas equivalentes. El resultado obtenido es:

$$\Delta T = 109,6 - 30,4 = 79,2 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

De manera similar, se realizó el cálculo para las fases de salida Sp4 y Sp5, obteniendo:

$$\Delta T = 98 - 33,8 = 64,2 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Con base en la recomendación de acción proporcionada por la tabla 100.18, se determina que existe una discrepancia de temperatura extremadamente elevada. Esto clasifica la situación con un nivel de severidad crítica, por lo que se requiere una reparación inmediata.

Recomendación:

Después del análisis termográfico, se evaluaron la tensión y la corriente en las fases, obteniéndose valores dentro de los límites admisibles. Se recomendó a los operarios de la planta realizar una limpieza con solvente dieléctrico, verificar la integridad de los componentes y, posteriormente, ajustar correctamente los terminales en la bornera.

En el siguiente termograma visualizamos otra anomalía detectada la cual se aplicó la misma metodología tomando como referencia la norma NETA.

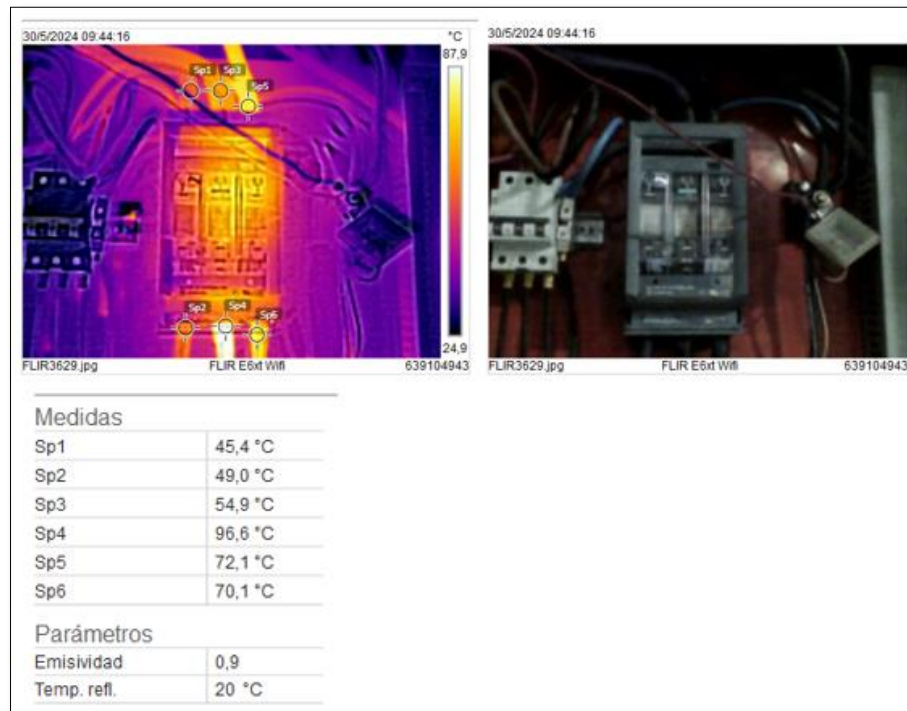


Figura 99: Tablero eléctrico a la izquierda, a su derecha termograma (Desarrollo propio)

Diagnostico:

Aquí se observa a los puntos [Sp4 y Sp5], con un elevado valor de temperatura en sus extremos, posiblemente alguno de estos contactos este desajustado o también el contactor este defectuoso. En base al cálculo de deltas de temperatura entre componentes similares, funcionando con cargas similares, procedemos a evaluar y caracterizar la anomalía detectada.

Veamos los puntos Sp2 y Sp4.

$$\Delta T = 96,6 - 49 = 47,6 \text{ °C}$$

Y los puntos Sp1 y Sp5

$$\Delta T = 72,1 - 45,4 = 26,7 \text{ °C}$$

De los valores obtenidos para los deltas de temperaturas y observando la tabla 100.18 Vemos que superan ampliamente el delta mayor de 15°C, por lo que la severidad de anomalía es crítica y debe corregirse inmediatamente.

Recomendación:

Siempre que sea factible desenergizar los equipos, se sugiere proceder con la limpieza de los contactos y contactor. En caso de detectar defectos en estos, se recomienda su reemplazo y garantizar un contacto óptimo mediante la aplicación de un torque de ajuste apropiado.

6.2.4 Rodamientos

En las ilustraciones siguientes presentamos el equipo examinado, se trata de bombas de vacío, accionadas por motores eléctricos por medio de correas. Los equipos de vacío son altamente eficientes para crear entornos controlados de baja presión. Su eficiencia en la evacuación de aire o gas ayuda a mantener condiciones consistentes durante todo el proceso, lo que es crucial para la precisión y la productividad.

Las bombas de vacío son esenciales en procesos como la destilación, el secado y la degasificación, donde controlar la presión del aire es fundamental.



Figura 100: Equipos de vacío (Desarrollo propio)

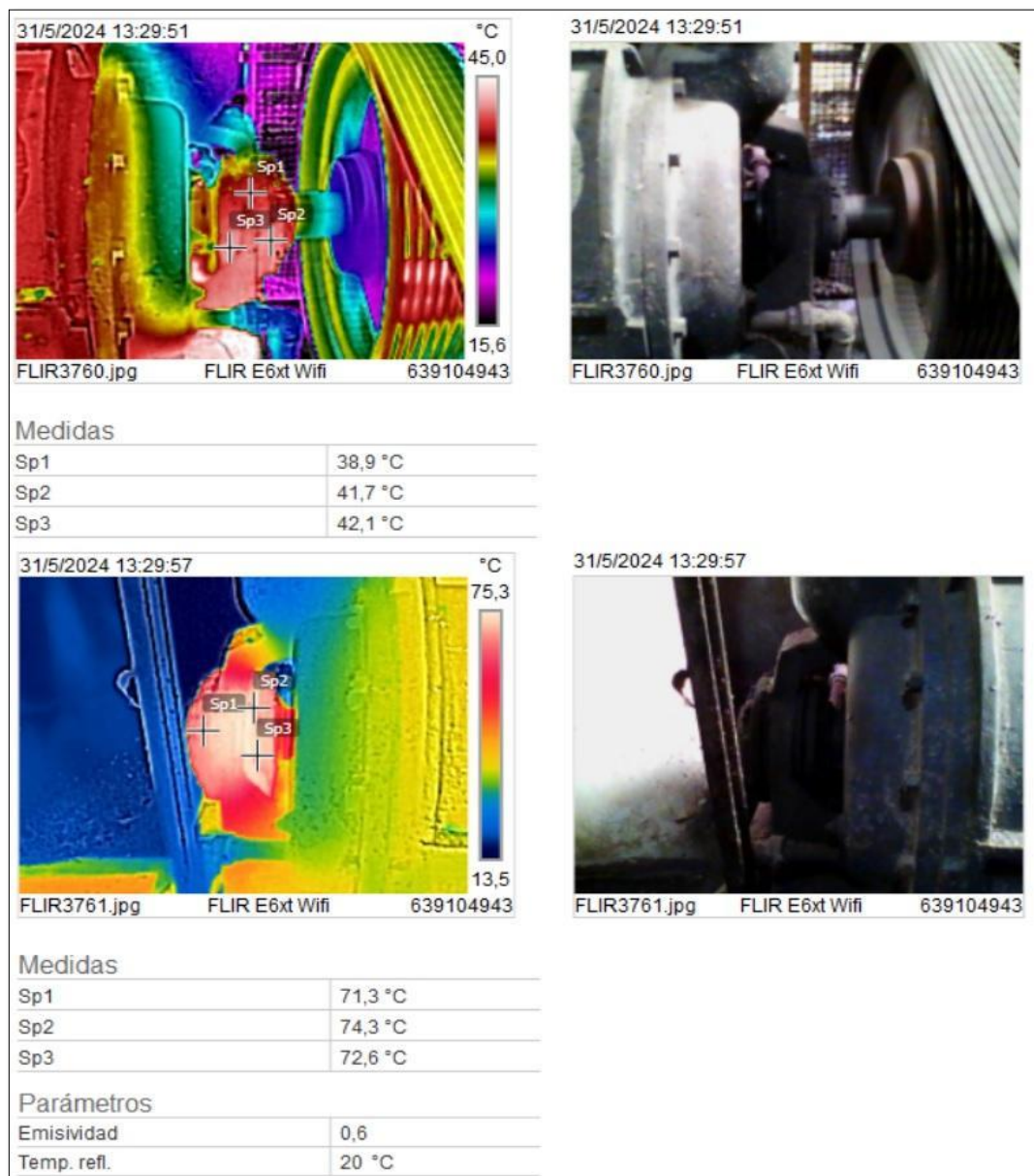


Figura 101: Medición en los rodamientos de la bomba (Desarrollo propio)

Diagnostico:

Cuando se detecta una temperatura elevada en el rodamiento libre de la bomba, se infiere que la anomalía térmica podría estar vinculada a una lubricación inadecuada del equipo, ya sea por exceso, insuficiencia o degradación del lubricante. En caso de que el rodamiento con mayor temperatura hubiera sido el que se encuentra próximo al acople, sería necesario evaluar también el grado de alineación del activo, dado que una desalineación considerable genera una carga adicional en el componente, lo cual deriva en un incremento de la temperatura.

Es importante considerar que las temperaturas registradas corresponden únicamente a las superficies de las carcasas de los rodamientos. Por lo general, las temperaturas internas reales de los rodamientos suelen ser entre 15 °C y 25 °C más altas. La acumulación de calor en estas carcasas puede dar lugar a mediciones más bajas, mientras que las temperaturas reales de los rodamientos podrían ser significativamente mayores.

Este fenómeno ocurre porque la acumulación actúa como un aislamiento, impidiendo la disipación del calor y generando un incremento adicional en la temperatura del rodamiento. En la mayoría de los casos, los equipos operan por debajo de los 82 °C, un rango que se suele considerar aceptable. Sin embargo, al tomar el escenario más crítico, es decir, sumando 25 °C adicionales a cada punto medido, las temperaturas reales podrían acercarse a los 98 °C.

Recomendación:

Es esencial disponer de un registro histórico de las temperaturas de operación de los equipos dentro de este rango para confirmar si se encuentran en niveles normales. Es importante analizar las condiciones del proceso y el ciclo de engrase más reciente. Debe revisarse tanto el estado como la calidad del lubricante, así como valorar la puesta en marcha de un plan de lubricación adecuado para garantizar el óptimo funcionamiento de los equipos en la planta.

6.2.5 Aislación

Tal como se comentó en la teoría introductoria de esta técnica, también es posible emplearla en activos estacionarios.

En este contexto, aplicado a un horno de la industria papelera, la herramienta FlirTools permite visualizar, con distintas paletas de colores, el flujo y las pérdidas de calor originadas por burletes defectuosos en las puertas.

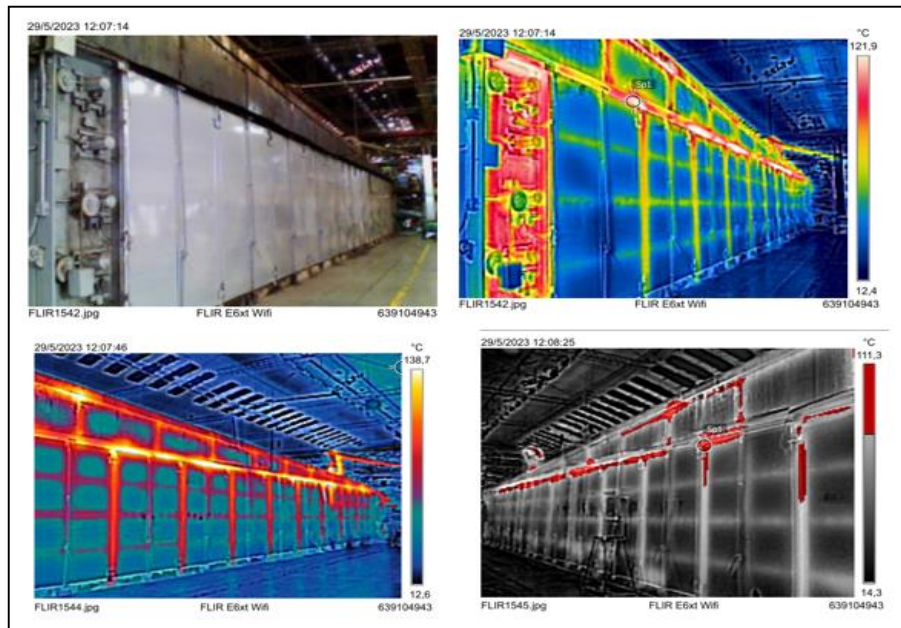


Figura 102: Pérdidas de calor (Desarrollo propio)

Diagnostico:

Se detectaron pérdidas de calor en el horno a través de las puertas de cierre. Esto podría deberse a un aislamiento deficiente provocado por el desgaste del propio material aislante.

Recomendación:

Llevar a cabo la instalación adecuada del aislamiento para el equipo, incorporar materiales refractarios de última generación y mayor eficiencia, considerando que estos equipos demandan una gran cantidad de tiempo y energía para alcanzar su régimen de operación.

7 CONCLUSIONES

En resumen, este trabajo ha confirmado que la monitorización y seguimiento a través del análisis de vibraciones y la termografía infrarroja son dos pilares fundamentales e indispensables del mantenimiento predictivo moderno. Contextualizado esto en la productividad de una industria, esta aumenta en la medida que las fallas en las máquinas mermen de una forma sustentable en el tiempo. Para lograr lo anterior, resulta indispensable contar con la estrategia de mantenimiento más apropiada y con personal capacitado tanto en el uso de las técnicas de análisis y diagnóstico de fallas implementadas, como así también en la idoneidad sobre las características de diseño y funcionamiento de las máquinas

Individualmente, ofrecen información crítica: el análisis de vibraciones es inigualable para detectar y diagnosticar fallos mecánicos internos como hemos visto, desalineación, desequilibrio, holguras y fallos en rodamientos antes de que se vuelvan catastróficos. Por su parte, la termografía es la herramienta de elección para identificar anomalías térmicas síntomas tempranos de sobrecargas eléctricas, fricción excesiva, o problemas de aislamiento que a menudo preceden o acompañan a los fallos mecánicos.

La principal conclusión es que integrar ambas técnicas ofrece una perspectiva integral del estado de salud de la maquinaria, superando las limitaciones que presentan por separado. El análisis de vibraciones mide el impacto dinámico de los fallos, mientras que la termografía permite observar la energía disipada y el estrés térmico asociado. Esta combinación sinérgica brinda a las empresas la capacidad de mejorar la fiabilidad de los equipos críticos, optimizar la planificación del mantenimiento y disminuir considerablemente los costos derivados de paros inesperados y fallos importantes.

La implementación rigurosa y cruzada de estas tecnologías no solo es una práctica recomendada, sino una necesidad estratégica para garantizar la eficiencia operativa y la sostenibilidad en la industria.

8 REFERENCIAS

- B.1. Norma 10816-3
<https://www.scribd.com/document/481075992/ISO-10816-3-2009-espanol>
- B.2. Norma 18434-1
<https://es.scribd.com/document/834645643/ISO-18434-1-1>
- B.3. Norma NETA
<https://pdfcoffee.com/norma-neta-espanol1-pdf-free.html>
- Teoría y práctica del mantenimiento industrial avanzado” / francisco j. Gonzalez Fernandez (2005).
https://books.google.com.pe/books?id=OzwXOAKv_QAC&printsec=frontcover#v=onepage&q&f=false.
- Guía de la termografía infrarroja, aplicaciones en ahorro y eficiencia energética (2011).
<https://www.fenercom.com/wp-content/uploads/2011/11/guia-de-la-termografia-infrarroja-fenercom-2011.pdf>
- Transferencia de calor y masa, “fundamentos y aplicaciones” / Yunus.A. Cengel 2011
https://www.academia.edu/38408494/Transferencia_De_Calor_y_Masa_4ta_ed_Cengel_McGraw_Hill
- Estudio de fallas incipientes en rodamientos usando la técnica de la envolvente y cepstrum /Jabid E. Quiroga1 Gerson Trujillo1 Sergio Quintero1
https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-33052012000300009
- Vibraciones mecánicas, curso ME4701/ 2012
<https://es.scribd.com/document/513541757/me4701-p>
- Formación en análisis de vibraciones mecánicas
<https://www.power-mi.com/es/content/formaci%C3%B3n-en-an%C3%A1lisis-de-vibraciones>
- SEMAPI S.A / servicios y equipamientos para mantenimiento predictivo, revisión 2012
www.semapi.com.ar
- VCAT II, procesamiento de señales-ISO 18436-Mobius Institute
- Discretización de la señal (Enrique Santiso, Fco. Javier Meca. Departamento de Electrónica. Universidad de Alcalá)
- Dominio en tiempo vs Dominio en frecuencias (Dr-Ing: Pedro Saavedra)
<https://es.scribd.com/document/739331462/Analisis-de-Vibraciones-Nivel-1-1710320875>

- Introducción al análisis de vibraciones/ Glen White

<https://es.scribd.com/doc/226688852/Introduccion-Al-Analisis-de-Vibraciones-Glen-WhiteIZ>

- Carta ilustrada de diagnóstico de vibración

https://www.academia.edu/33233137/TABLAS_DE_CHARLOTTE

- Tabla de severidad ISO 10816 parte III

<https://es.scribd.com/document/438108352/Tabla-de-Severidad-Iso-10816>

9 ANEXOS

- A.1. Equipo de medición de temperatura infrarroja . Manual de operación: Modelo Flir E6-XT

<https://www.flir.com.mx/support/products/e6-xt/#Documents>

- A.2. Equipo de medición de vibraciones. Manual de operación: Modelo DSP-logger MX300

https://www.dsplotter.com/_files/ugd/b0a75f_2aea6ae2eba0400ca76b02dbc214463c.pdf

- A.3. Manual de operación alfa-laval-nx-934. Manual de operación: Decantador centrífugo

<https://es.scribd.com/document/281585979/Alfa-Laval-FPNX-934-Manual-Partes>