



UNIVERSIDAD
DE ATACAMA

FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA

MANTENIMIENTO PREDICTIVO

YAZMÍN ANDREA CASTRO ACEVEDO
Copiapó, año 2022



UNIVERSIDAD
DE ATACAMA

FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA

MANTENIMIENTO PREDICTIVO

“TRABAJO DE TITULACIÓN EN CONFORMIDAD PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERÍA DE EJECUCIÓN EN INSTRUMENTACIÓN Y AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL, ENMARCADO DENTRO DE LOS PROGRAMAS ACADÉMICOS FLEXIBLES Y CONTEXTUALIZADOS DE TITULACIÓN (DECRETO EXENTO 07/2021), BAJO LA MODALIDAD DE EXPOSICIÓN DE DESEMPEÑO LABORAL”

PROFESOR GUÍA:
Dr. Wilson Castillo Rojas

YAZMÍN ANDREA CASTRO ACEVEDO
Mayo, año 2022

Agradecimientos

En este proceso de titulación, quiero agradecer en primero lugar a Dios por guiar y cuidar cada uno de mis pasos. Mis siguientes agradecimientos van a mi pareja, por su incondicional apoyo en este proceso, por motivarme en culminar lo que alguna vez había comenzado y creer en mí siempre. Agradecer también a mis amistades, que con los años se han convertido en mi familia, por incentivar, aconsejarme y apoyarme en tomar una de las decisiones más importantes de mi vida.

Quiero destacar y agradecer la importante labor de mi profesor guía Wilson Castillo Rojas, por su dedicación, gran compromiso y paciencia desde el inicio del proceso de titulación.

Y, por último, a mis colegas de Pucobre, por dedicar su tiempo, brindarme apoyo y facilitar información que fue fundamental para mi preparación y difusión de las charlas a presentar.

Resumen

A través del análisis de las distintas gráficas y tendencias de las variables disponibles que nos otorga las vibraciones mecánicas, temperaturas, desgaste y de operación en los sistemas de control, se podrá saber el comportamiento de los equipos en cada periodo, a esto, se le conoce como mantenimiento predictivo o basado en la condición, permitiendo priorizar y optimizar el mantenimiento preventivo. Como resultado, podrá reducir detenciones imprevistas y tomar mejores decisiones en los planes de producción y mantenimiento.

Es importante mencionar, que uno de los factores prioritarios, es la oportunidad de apoyo en la gestión de repuestos, ya que, la importancia de esta estrategia de mantenimiento, es detectar fallas en etapas incipientes, otorgando un periodo de tiempo considerable para la planificación de un futuro cambio. También, existen conjuntos de piezas, difíciles de obtener en un corto plazo, ya sea, por su confección o bien su procedencia, además, de su alto costo, como por ejemplo: conjunto de engranes y descansos de gran magnitud, por lo tanto, el monitoreo de condiciones es primordial, especialmente en los equipos críticos. El correcto monitoreo de condición puede ofrecer el beneficio de una mayor vida útil y programación precisa para dichos componentes, de esta manera, la inversión que conforma dicho mantenimiento muestra resultados a muy corto plazo.

Maximizar la capacidad producción y asegurar la confiabilidad de los equipos, es el objetivo principal de la aplicación de esta estrategia de mantenimiento, cumpliendo con los planes de producción y un ambiente de trabajo seguro y sustentable.

Índice de Contenidos.

Contenidos	Página
Capítulo 1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Misión, Objetivo y Visión	1
1.2 Ubicación	2
1.3 Disponibilidad y Confiabilidad	3
Capítulo 2 MEDICIÓN Y ANÁLISIS DE VIBRACIONES	4
2.1 Estrategia de Mantenimiento	4
2.1.1 Mantenimiento Correctivo	5
2.1.2 Mantenimiento Preventivo o Basado en el Tiempo	6
2.1.3 Mantenimiento Predictivo o Basado en Condición	7
2.1.4 Mantenimiento Proactivo	9
2.2 Conceptos Básicos de Vibraciones Mecánicas	10
2.2.1 Recolectores de Datos.....	12
2.2.2 Puntos de Medición	14
2.2.3 Interpretación de Datos.....	15
2.2.4 Pendiente de Ski.....	17
2.3 Fallas Comunes en Equipos Rotatorios	17
2.3.1 Desbalanceo de rotores	18
2.3.2 Desalineamiento	19
2.3.3 Solturas Mecánicas	20
2.3.4 Vibraciones Generadas en Bombas	21
2.3.5 Excentricidad Estática o Desiguales Entre - Hierro	22
2.4 Charla de Medición y Análisis de Vibraciones	24
Capítulo 3 MEDICIÓN Y ANÁLISIS DE TERMOGRAFÍAS	30
3.1 Importancia de la Medición Termográfica	30
3.2 Descubrimiento de Radiación Infrarroja	31
3.3 Principio de Operación de Cámaras Térmicas	32
3.4 Conceptos Básicos	33
3.4.1 Mecanismos de Transferencia de Calor	35
3.5 Medición Infrarroja	36

3.5.1 Emisividad (ϵ)	36
3.5.2 Reflexión (ρ)	37
3.5.3 Transmisión (τ)	37
3.5.4 Ley de Radiación de Kirchhoffs	37
3.6 Conceptos de Termografía Práctica.....	38
3.6.1 Determinación Práctica de la Emisividad	40
3.6.2 Recomendaciones para Evitar Errores en Medición por Infrarrojo	41
3.6.3 Condiciones Óptimas para Medición por Infrarrojo	42
3.6.4 Imágenes Térmicas Perfectas	43
3.7 Manejo Básico de Cámara Termográfica Fluke	44
3.8 Termografía Infrarroja en la Minería.....	46
3.9 Charla de Medición y Análisis de Termografías	51
Capítulo 4 MEDICIÓN DE ULTRASONIDO	57
4.1 Historia de la Detección de Discontinuidades	57
4.2 Clasificación de las Pruebas no Destructivas.....	58
4.3 Ensayos no Destructivos.....	59
4.4 Ultrasonido Industrial	62
4.4.1 Ventajas y Desventajas de Inspección por Ultrasonido.....	63
4.5 Naturaleza de las Ondas.....	64
4.6 Conceptos Básicos	66
4.7 Modo de Ondas Ultrasónicas	68
4.8 Generación de Vibraciones.....	70
4.8.1 Materiales Piezoeléctricos	72
4.8.2 Material de Respaldo.....	73
4.8.3 Placa Frontal	73
4.9 Clasificación de Transductores	73
4.9.1 Operación de un Transductor	75
4.9.2 Transductor de Banda Ancha y Angosta.....	76
4.10 Características del Haz Ultrasónico	77
4.11 Charla de Medición e Interpretación de Ultrasonido.....	79

Capítulo 5 CONCLUSIONES	85
5.1 Medición y Análisis de Vibraciones	85
5.2 Medición y Análisis de Termografías.....	85
5.3 Medición de Ultrasonido.....	85

Índice de Figuras.

Figura	Página
Figura 1.1 Ubicación Planta San José [Fuente: Google Maps]	2
Figura 2.1 Tendencia vibración global [Fuente: Mantto. Pucobre].....	8
Figura 2.2 Espectro de vibraciones [Fuente: Mantto. Pucobre].....	9
Figura 2.3 Onda sinusoidal [Fuente: Fdo S., Universidad del Bío Bío].....	11
Figura 2.4 Onda temporal compuesta [Fuente: Mantto. Pucobre].....	12
Figura 2.5 Trans. Furier [Fuente: Universidad tecnologica de Pereira]	13
Figura 2.6 Espectro frecuencia en cascada [Fuente: Mantto. Pucobre]	13
Figura 2.7 Analizador de vibraciones [Fuente: Mantto. Pucobre].....	14
Figura 2.8 Espectros de altas frecuencias [Fuente: Mantto. Pucobre]	16
Figura 2.9 Espectros en velocidad [Fuente: Mantto. Pucobre]	16
Figura 2.10 Pendiente ski [Fuente: Ing. Pedro Saavedra, categoría I]	17
Figura 2.11 Forma de onda [Fuente: Ing. Pedro Saavedra]	18
Figura 2.12 Desalineamiento paralelo [Fuente: Ing. Pedro Saavedra]	19
Figura 2.13 Desalineamiento angular [Fuente: Ing. Pedro Saavedra].....	19
Figura 2.14 Soltura mecánica [Fuente: Ing. Pedro Saavedra].....	20
Figura 2.15 Frecuencia de paso de alabes [Fuente: A-MAQ, Colombia]...	21
Figura 2.16 Cavitación [Fuente: A-MAQ, Colombia].....	21

Figura 2.17	Turbulencia [Fuente: A-MAQ, Colombia].....	22
Figura 2.18	Excentricidad estática [Fuente: Ing. Pedro Saavedra].....	23
Figura 3.1	Cámaras infrarrojas [Fuente: Marca Fluke y Flir]	30
Figura 3.2	Experimento Herschel [Fuente: experimentada.com].....	31
Figura 3.3	Proceso IR [Fuente: Ignacio Mártel, U Complutense].....	32
Figura 3.4	Esquema calor y temperatura [Fuente: slidetodoc.cl].....	33
Figura 3.5	Espectro electromagnético [Fuente: es.wikipedia.org]	34
Figura 3.6	Radiación Infrarroja [Fuente: es.wikipedia.org]	34
Figura 3.7	Esquema transferencia de calor [Fuente: es.wikipedia.org]	35
Figura 3.8	Reflejo [Fuente: Mantenimiento Pucobre]	39
Figura 3.9	Sol [Fuente: Mantenimiento Pucobre].....	39
Figura 3.10	Suciedad y partículas [Fuente: Mantenimiento Pucobre]	39
Figura 3.11	Paleta de colores [Fuente: Mantenimiento Pucobre].....	43
Figura 3.12	Escala de temperatura [Fuente: Manual de uso Fluke]	43
Figura 3.13	Enfoque de imagen [Fuente: Mantenimiento Pucobre].....	43
Figura 3.14	Funciones cámara infrarroja [Fuente: Manual de uso Fluke]..	45
Figura 3.15	Alta temperatura en motor [Fuente: Mtto Pucobre]	46

Figura 3.16	Alta temperatura en rodamiento [Fuente: Mtto Pucobre].....	46
Figura 3.17	Alta temperatura en unidad vibratoria [Fuente: Mtto Pucobre]	47
Figura 3.18	Desgaste en casco del Molino [Fuente: Mtto Pucobre]	47
Figura 3.19	Condición interna del casco [Fuente: Mtto Pucobre].....	47
Figura 3.20	Desgaste en carcasa de bomba [Fuente: Mtto Pucobre].....	48
Figura 3.21	Desgaste en ductos [Fuente: Mtto Pucobre]	48
Figura 3.22	Condición interna de ductos [Fuente: Mtto Pucobre].....	48
Figura 3.23	Delta de temperatura entre fases [Fuente: Mtto Pucobre].....	49
Figura 3.24	Mal montaje de prensa [Fuente: Mtto Pucobre].....	49
Figura 3.25	Riesgo tolerable [Fuente: Mtto Pucobre]	50
Figura 3.26	Riesgo importante [Fuente: Mtto Pucobre].....	50
Figura 3.27	Riesgo crítico [Fuente: Mtto Pucobre]	50
Figura 4.1	Pruebas no destructivas superficiales [Fuente: Mtto Pucobre] .	58
Figura 4.2	Pruebas no destructivas volumétricas [Fuente: Mtto Pucobre] .	59
Figura 4.3	Soporte de carga, ejes de poleas [Fuente: Poleas Revesol]	60
Figura 4.4	Esquema de frecuencias [Fuente: Ensayos ultrasónicos]	62
Figura 4.5	Recorrido de onda ultrasónica [Fuente: elearning.itecpro.cl]....	62
Figura 4.6	Componentes básicos [Fuente: elearning.itecpro.cl].....	63

Figura 4.7 Ondas mecánicas [Fuente: https://slideplayer.es]	65
Figura 4.8 Partes de una onda [Fuente: https://slideplayer.es]	67
Figura 4.9 Ondas longitudinales [Fuente: elearning.itecpro.cl].....	68
Figura 4.10 Ondas transversales [Fuente: elearning.itecpro.cl]	69
Figura 4.11 Ondas superficiales [Fuente: elearning.itecpro.cl].....	69
Figura 4.12 Partes de un transductor [Fuente: llog]	70
Figura 4.13 Tipos de transductores [Fuente: raquelserrano.com]	71
Figura 4.14 Efecto inverso [Fuente: es.wikipedia.org].....	71
Figura 4.15 Efecto directo [Fuente: llog]	72
Figura 4.16 Transductor de haz recto [Fuente: llog]	74
Figura 4.17 Transductor de doble cristal [Fuente: llog]	75
Figura 4.18 Transductor de banda ancha [Fuente: llog].....	76
Figura 4.19 Transductor de banda angosta [Fuente: llog].....	77
Figura 4.20 Comparación de transductores [Fuente: llog]	77
Figura 4.21 Haz ultrasónico [Fuente: elearning.itecpro.cl]	78

Índice de Tablas.

Tabla	Página
Tabla 3.1 Emisividad de un objeto	36
Tabla 3.2 Referencia estándar ANSI/NETA [Fuente: www.emb.cl]	49
Tabla 4.1 Velocidad de propagación de materiales [Fuente: Docplayer]..	61

Capítulo 1 INTRODUCCIÓN

Este trabajo de titulación está enfocado en temáticas del mantenimiento predictivo y experiencias extraídas del trabajo que se realiza en la empresa minera Pucobre.

Pucobre es una empresa especializada en la explotación de yacimientos de cobre de mediana minería, y que agrega valor a los minerales mediante su procesamiento en plantas. De este proceso, se obtienen dos productos diferentes: Concentrados de cobre para las fundiciones y cátodos de cobre destinados a la exportación. Las operaciones se ubican principalmente en la Región de Atacama contando con diversos puntos de extracción y procesamiento de este mineral.

Es importante mencionar que, actualmente se encuentra desarrollando dos proyectos para la explotación de cobre, el Espino y Tovaku, ambos yacimientos son de mediana minería y se ubican en la Región de Coquimbo y la Región de Antofagasta respectivamente.

Los principales valores de Pucobre son: la persona, su seguridad y desarrollo profesional y humano.

1.1 Misión, Objetivo y Visión

La misión de Pucobre es *“Crear valor a través del desarrollo y explotación de recursos minerales, preferentemente de cobre, protegiendo y potenciando a las personas y su entorno”*.

El objetivo final de la estrategia de Pucobre es maximizar el valor de la compañía para sus accionistas, con foco en la generación del mayor valor posible en la mina punta del cobre, explorando ecotadamente opciones de crecimiento disponibles y razonables.

Por último, la visión 2024 son las siguientes: cumplir un 100% con alta adherencia los planes de producción y costos, mantener como un lugar atractivo para trabajar, desarrollar proyectos y desarrollar una minería sustentable.

1.2 Ubicación

Las operaciones se realizan en la Región de Atacama y las oficinas generales están localizadas en la ciudad de Copiapó, distante a 805 km al norte de Santiago de Chile, aproximadamente a 20 km de distancia de las oficinas generales se ubican las minas Punta del Cobre, Mantos de Cobre y Granate, yacimientos que abastecen de minerales sulfurados de cobre a la Planta San José.

Las minas Punta del Cobre y Mantos de Cobre, se encuentran aproximadamente a 5 km de la planta y la mina Granate se ubica adyacente a planta San José que obtiene como producto final concentrados de cobre.

Además, a 13 km de Copiapó por el camino Internacional a Argentina, se encuentra la Planta Biocobre productora de cátodos, la que se abastece de minerales oxidados de cobre provenientes de la mina Punta del Cobre. Cuenta con oficinas administrativas en Santiago, las cuales se encuentran ubicadas en la comuna de Las Condes. La Figura 1.1, muestra la ubicación de las dependencias de sus oficinas y faenas mineras en la Región de Atacama.



Figura 1.1 Ubicación Planta San José [Fuente: Google Maps]

1.3 Disponibilidad y Confiabilidad

La operación continua de equipos industriales es indispensable para que las plantas mineras, puedan cumplir con sus compromisos de producción, pero las máquinas pueden fallar durante la operación, por lo que es importante realizar acciones periódicas de mantenimiento para aumentar su vida útil o mantenerla operativa y productiva.

Entre las diferentes estrategias de mantenimiento existentes, actualmente en la compañía se aplican el mantenimiento: correctivo, preventivo y predictivo, éste último, se implementa como una de las estrategias de mantenimiento fundamentales para la compañía, ya que, su principal objetivo es asegurar la disponibilidad y confiabilidad de los equipos a bajo costo para una continuidad operacional.

El mantenimiento predictivo o basado en condición, es aquel que, a través de los diferentes síntomas que los equipos emiten, se pueden utilizar diversas técnicas para detectar, identificar y evaluar la condición de un equipo, monitoreando variables específicas durante la operación de los equipos, con la frecuencia de medición necesaria y la tecnología apropiada. Una vez identificado el potencial de falla, se reporta y se estima el tiempo productivo disponible para una detención programada. Este enfoque, tiene como ventajas principales que las intervenciones de mantenimiento, sólo se realizan para los equipos que reportan probabilidad de falla y cuándo se estime conveniente, brindando más tiempo de operación eficiente. Adicionalmente, el número de fallas y detenciones inesperados se reduce y extiende el tiempo de vida de las máquinas. Dentro de sus desventajas principales: el costo de los instrumentos, el tiempo de capacitación del personal y el costo de los servicios de ingeniería asociados a este enfoque.

Las técnicas predictivas o de monitoreo de condición, aplicadas con mayor frecuencia en los equipos de la planta, como parte de una estrategia de mantenimiento predictivo, son las siguientes: Medición y análisis de vibraciones, termografías y ultrasonido.

Capítulo 2 MEDICIÓN Y ANÁLISIS DE VIBRACIONES

2.1 Estrategia de Mantenimiento

La evolución tecnológica en la que se vive actualmente, ha dado gran relevancia al mantenimiento predictivo, una de las estrategias de mantenimiento más populares del momento, aun teniendo esta popularidad, no es la única estrategia disponible para gestionar los procesos de mantenimiento. Existen varios tipos de mantenimiento que se adaptan a las empresas e incluso funcionan mejor en diferentes situaciones.

Para elegir una estrategia de mantenimiento de éxito, es esencial tener un conocimiento profundo de los principios y prácticas de la gestión del mantenimiento, así como del rendimiento de los bienes e instalaciones. Aunque no existe una combinación perfecta para elegir la estrategia de mantenimiento y obtener los mejores resultados, en la mayoría de los casos el proceso de selección abarca una combinación de diferentes tipos de mantenimiento, según el valor y la prioridad de cada equipo.

Para que una estrategia sea eficaz, debe tener en cuenta el aumento del rendimiento y el tiempo de funcionamiento del equipo, equilibrando al mismo tiempo los recursos y los costos asociados a este proceso [1].

Estas estrategias se clasifican en las siguientes categorías:

1. Mantenimiento Correctivo: Sustitución de elementos por falla.
2. Mantenimiento Preventivo: Sustitución de elementos antes de la falla (basado en el tiempo).
3. Mantenimiento Predictivo o basado en condición: Sustitución de elementos según los síntomas.
4. Mantenimiento proactivo: Busca causa de la falla.

Es importante mencionar que en Pucobre no se utiliza el mantenimiento proactivo, sin embargo, se aplica el mantenimiento mejorativo basado en diseño del equipo.

2.1.1 Mantenimiento Correctivo

También conocido como “a la falla”, en esta estrategia se permite al equipo funcionar hasta la falla. En ese instante se realiza la reparación o reemplazo del componente. Como las reparaciones no están planificadas, es un buen método a utilizar para el equipo que no es esencial o crítico para las operaciones o que tiene un costo menor.

Por otra parte, si este tipo de mantenimiento no se utiliza estratégicamente, puede dar lugar a paradas imprevistas cuando falla un equipo crítico. En otras palabras, es una estrategia basada únicamente en el mantenimiento correctivo, que significa un mayor tiempo de inactividad y mayores costos de mantenimiento. [2]

A continuación, se presentan algunas de las ventajas y desventajas del Mantenimiento Correctivo:

Ventajas:

- Deja que el equipo funcione hasta que falle.
- Se aprovecha la vida útil al máximo de los equipos.
- Requiere de una organización simple.
- No requiere de personal especializado.

Desventajas:

- Falla grave o catastrófica por no reparar el equipo a tiempo.
- Gran costo por pérdida de producción debido al mayor tiempo que el equipo está detenido por no planificar su detención.
- Mayor tiempo en reparación.
- Mayor disponibilidad en horas hombre (H.H).
- No se lleva un registro de condición mecánica o salud de los equipos de la planta.
- Esta estrategia no es entonces conveniente de aplicar a máquinas críticas.

2.1.2 Mantenimiento Preventivo o Basado en el Tiempo

En esta estrategia se interviene el equipo a ciertos intervalos de tiempo prefijados, para realizar ciertas reparaciones o cambios de componentes o piezas de la unidad, aun cuando la máquina esté operando satisfactoriamente. El tiempo de reemplazo de los componentes son determinados de manera estadística. Generalmente es el fabricante del equipo el que recomienda estos tiempos, basado en los datos de un gran número de casos que conoce.

El objetivo de esta estrategia es reducir la probabilidad de fallas o pérdidas de rendimiento de una unidad y alargar la vida útil de los equipos.

La mayoría de las organizaciones que realizan este tipo de mantenimiento, utilizan un software o módulo dedicado exclusivamente para la gestión de órdenes de trabajo, estas se generan de forma automática a partir de un plan con frecuencias predefinidas. Esta forma de trabajo permite a las empresas automatizar la mayoría de los procesos de programación, lo que constituye un factor clave en este enfoque preventivo. Dado que la planificación se hace con mucha antelación, es más fácil tener las partes y los recursos necesarios para completar cada tarea. [2]

A continuación, se presentan algunas de las ventajas y desventajas del mantenimiento preventivo:

Ventajas:

- Trabajo programado que permite planificar con anterioridad los componentes necesarios para la intervención (materiales, horas hombre, repuestos, herramientas, equipos de apoyo y otros.).
- Tiende a disminuir los eventos no deseados (falla inesperada).

Desventajas:

- Puede tener el riesgo de aumentar las fallas debido a las sustituciones preventivas realizadas.
- Lleva a programar mantenciones potencialmente innecesarias, influyendo en disminuir la disponibilidad y aumentar el costo de mantención.

2.1.3 Mantenimiento Predictivo o Basado en Condición

En esta estrategia de mantenimiento se evalúa la condición mecánica del equipo y como esta condición va evolucionando en el tiempo. Esto se realiza a través del análisis de diversos síntomas que emite al exterior mientras esté operando. En base a esto, se programan las necesidades de mantenimiento cuando se detecta un problema en la máquina.

Se utilizan un conjunto de técnicas instrumentadas de medida y análisis de variables para caracterizar en términos de fallos potenciales la condición operativa de los equipos productivos. Su misión principal es optimizar la confiabilidad y disponibilidad de equipos al mínimo costo [2].

A continuación, se presentan algunas de las ventajas y desventajas de este tipo de mantenimiento Predictivo:

Ventajas

- Solo se detiene el equipo cuando sea estrictamente necesario.
- Aumento de la disponibilidad de la maquinaria.
- Mejora de la confiabilidad global.
- Menos pérdidas de materia prima por paradas no planificadas.
- Reducción del índice de intervenciones/año de los equipos.
- Se evitan los imprevistos.
- La detección incipiente de fallas evita reparaciones de alto costo o inoportunas y eventuales efectos graves o catastróficos.
- Reducción del gasto en repuestos.
- Se reduce la mano de obra.
- Se crea un historial del equipo y su tendencia para chequear su evolución en el tiempo.
- El mantenimiento está determinado por el estado real del equipo y no por suposiciones.
- La monitorización tiene como consecuencia la reducción de accidentes y el aumento de la seguridad.

Desventajas

- Mas costo en inversiones de equipos y entrenamiento.
- La operación del equipo y la interpretación de los resultados requiere técnicos experimentados.
- Se necesita tiempo para desarrollar la tendencia de las señales medidas y determinar los umbrales de alarma.

El mantenimiento predictivo es similar a la medicina actual en las personas, se quiere determinar su condición mecánica (o salud) del equipo [2].

Las metas y objetivos que se espera conseguir con la implementación de una estrategia de mantenimiento predictiva son las siguientes:

a) Monitoreo de la condición de la máquina

Monitorear es la acción de medir y comparar la medición realizada con un valor de referencia (valor de aviso).

La Figura 2.1, se puede observar si su tendencia se encuentra estable, disminuye o aumenta, el cual da la posibilidad de generar una alerta.

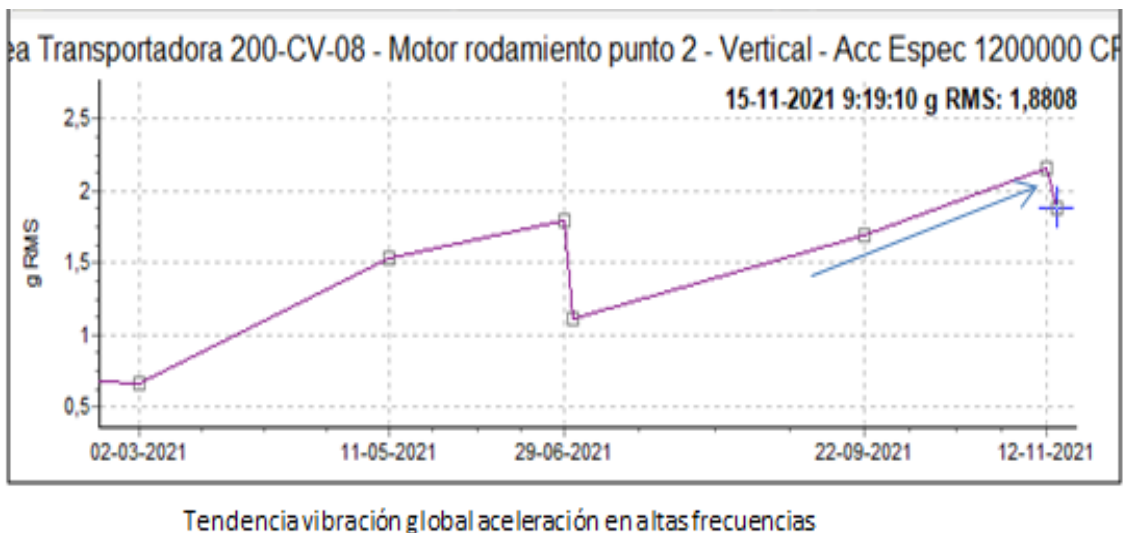


Figura 2.1 Tendencia vibración global [Fuente: Mantenimiento Pucobre]

b) Diagnóstico de fallas.

Diagnosticar cuál es la falla específica que se ha generado.

La Figura 2.2, se puede observar una excitación en altas frecuencias, debido a una lubricación deficiente en rodamiento motor.

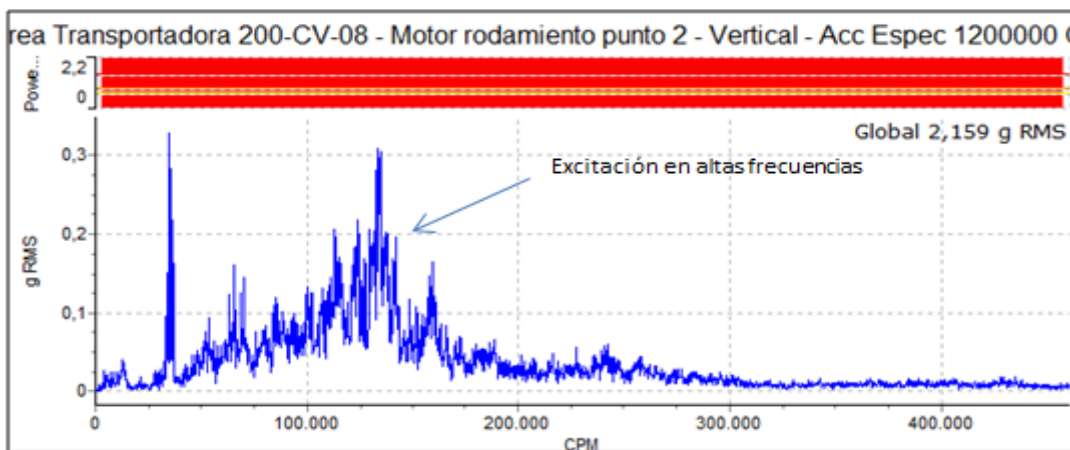


Figura 2.2 Espectro de vibraciones [Fuente: Mantenimiento Pucobre]

c) Pronóstico de esperanza de vida.

Interés por estimar cuánto tiempo puede seguir trabajando la máquina sin riesgo para ella.

2.1.4 Mantenimiento Proactivo

El Mantenimiento Proactivo busca mejorar las tareas cotidianas y esenciales. Identificar cómo y dónde se originan las fallas para combatirla desde este origen (causa raíz). Los cuidados esenciales de activos industriales son la clave del desempeño, estadísticamente una gran cantidad de fallas tienen su origen en labores previas de mantenimiento y en la operación inadecuada de la maquinaria, las fallas asociadas al desgaste normal de los componentes representan un porcentaje mucho más bajo; en este sentido mantener y operar proactivamente un activo asegura la eliminación de un amplio porcentaje de problemas. Pero no se trata de la cantidad o la frecuencia del mantenimiento, se trata de hacer el mantenimiento justo y necesario, con los procedimientos óptimos, en resumen, realizar mantenimiento de precisión [2].

2.2 Conceptos Básicos de Vibraciones Mecánicas

Vibraciones Mecánicas: En términos muy simples, una vibración puede ser considerada como el movimiento de un equipo o estructura o de una parte de ellas, alrededor de su posición de reposo o de equilibrio [2].

Vibración simple: La forma de onda más sencilla es la sinusoidal o armónica simple. Existen dos parámetros que definen su vibración, su valor y frecuencia [2].

Frecuencia: Esta definida como el número de ciclos u oscilaciones que efectúa un cuerpo o un punto en cada segundo. Sus unidades de medida son Hz o ciclos por segundo o CPM (ciclos por minuto) [2].

Vibración compuesta: La vibración de un equipo, difícilmente se presenta como armónica simple, lo más probable es que su forma sea de forma más compleja. Esto se debe a que al sensor de vibraciones recibe simultáneamente vibraciones provenientes de distintos elementos y/o causas, y el sensor capta la suma de ellas [2].

Desplazamiento de la vibración: El desplazamiento de la vibración es la distancia que recorre la pieza mientras vibra, puede ser del punto de reposo al máximo llamado desplazamiento cero-pico o desplazamiento total llamado pico-pico. El desplazamiento vertical es positivo cuando el punto se desplaza hacia arriba y negativo cuando se desplaza hacia abajo [3].

Vibración aleatoria: No cumple con los patrones especiales que se repiten constantemente, o es demasiado difícil detectar donde comienza un ciclo y donde termina. Estas vibraciones están asociadas, generalmente a turbulencias, problema de lubricación y contacto entre metales [4].

La Figura 2.2, muestra una onda sinusoidal con algunas de sus principales características espaciales: desplazamiento vibratorio, periodo y frecuencia.

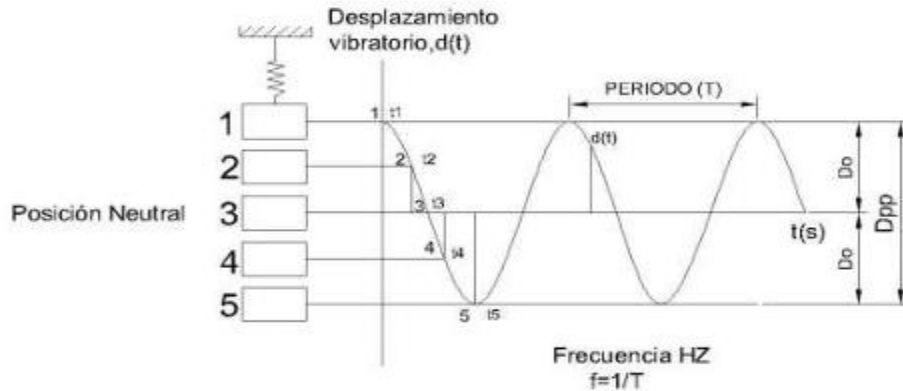


Figura 2.3 Onda sinusoidal [Fuente: Fernando Sanhueza, Universidad del Bío Bío, 2014]

Donde:

$d(t)$; Distancia que se encuentra el punto de medición respecto a su posición de reposo a medida que transcurre el tiempo. Se escribe como $d(t)$, para indicar que esta distancia “d” está variando con el tiempo. Según la imagen, posición neutral o “t3” corresponde al equipo en reposo [3].

D_o ; Desplazamiento pico o amplitud del desplazamiento, es el mayor valor que alcanza la vibración, sea este valor negativo (-) o positivo (+). Para el caso de una armónica simple, ambos valores (máximo positivo y máximo negativo) son iguales, como se observa en la Figura 2.3 [3].

D_{pp} ; Desplazamiento pico a pico o distancia máxima que se desplaza la masa mientras vibra, es igual a 2 veces el desplazamiento D_o , como se observa en la Figura 2.3 [3].

Periodo; Tiempo que demora el cuerpo en efectuar una oscilación. Es inversamente proporcional a la frecuencia [3].

$$F(\text{Hertz})= 1/T(\text{seg.})$$

2.2.1 Recolectores de Datos

Los recolectores de datos registran la forma de onda medida (sinusoidal), sin embargo, debido a que los equipos están formados por múltiples piezas que trabajan en conjunto para lograr determinado objetivo, las vibraciones presentes en éstas no son más que la suma de todas las señales de vibración provenientes de cada una de sus partes. La Figura 2.4, muestra las señales vibratorias formadas por múltiples piezas [5].

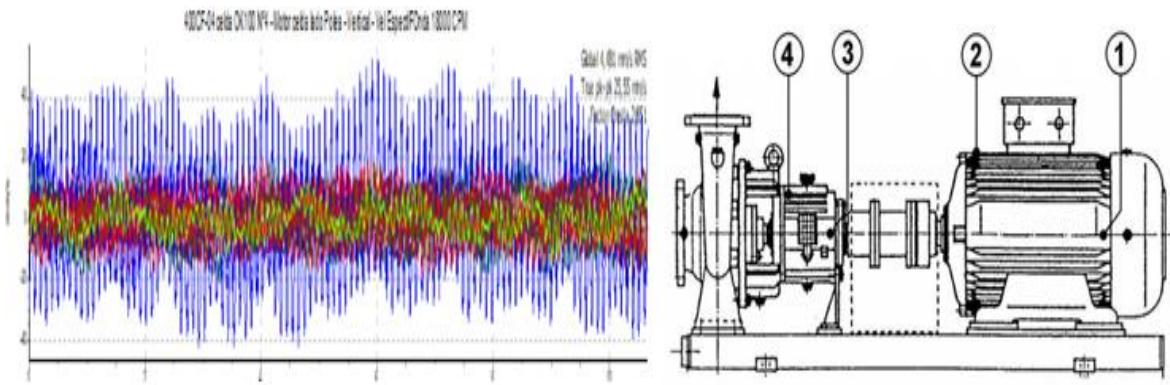


Figura 2.4 Tipo de máquina [Fuente: www.ecorfan.org, Múltiples Piezas]

Como se observa en la imagen, el equipo está acoplado (múltiples piezas) para llegar a un objetivo final, su funcionamiento, según el ejemplo se dividen en: motor, acoplamiento, caja porta-rodamiento y bomba, cada una de ellas presenta su propia velocidad de rotación, por lo tanto, se transmiten las vibraciones en todas las partes del equipo (vibración compuesta), por eso, es importante antes de realizar un análisis de vibraciones, conocer el equipo, para distinguir de donde proviene la falla, si bien, la onda del tiempo no es suficiente para diagnosticar una falla, el equipo realiza una ecuación compleja para poder analizar con precisión.

Debido a la complejidad que presentan las señales de las vibraciones, muchas veces, es necesario convertirlas en señales más sencillas para facilitar su análisis e interpretación. Esto se consigue transformando la señal al dominio de la frecuencia a través de la transformada rápida de Fourier (FFT), la cual captura la señal en el tiempo, la transforma en una serie de señales sinusoidales y finalmente las conduce al dominio de la frecuencia. En la Figura 2.5 se muestra el proceso de transformación de una señal desde el dominio del tiempo hasta el dominio de la frecuencia [5].

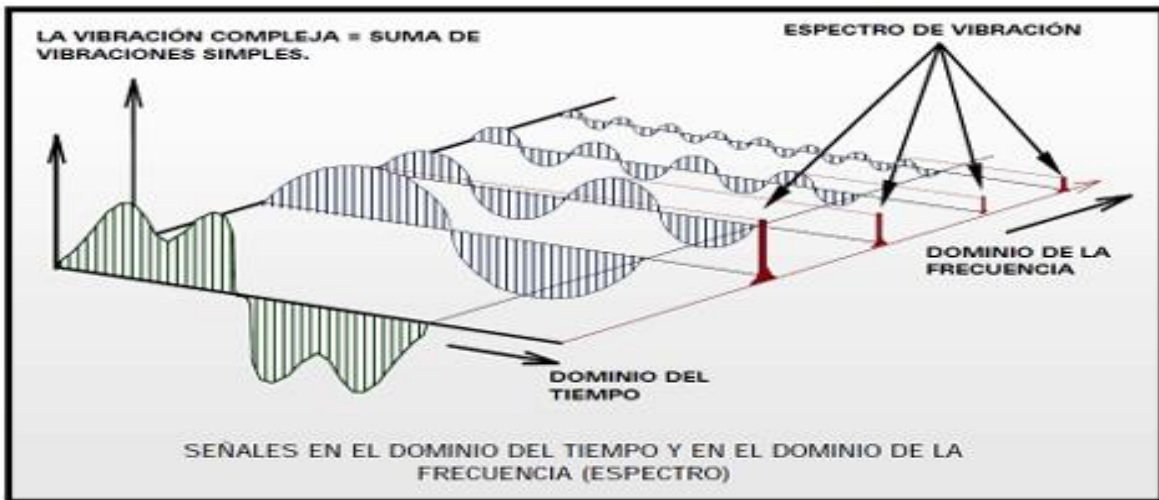


Figura 2.5 Transformada FFT [Fuente: Universidad tecnológica de Pereira, Colombia]

En la Figura 2.6, se muestra un espectro en velocidad, utilizando la herramienta de cascada.

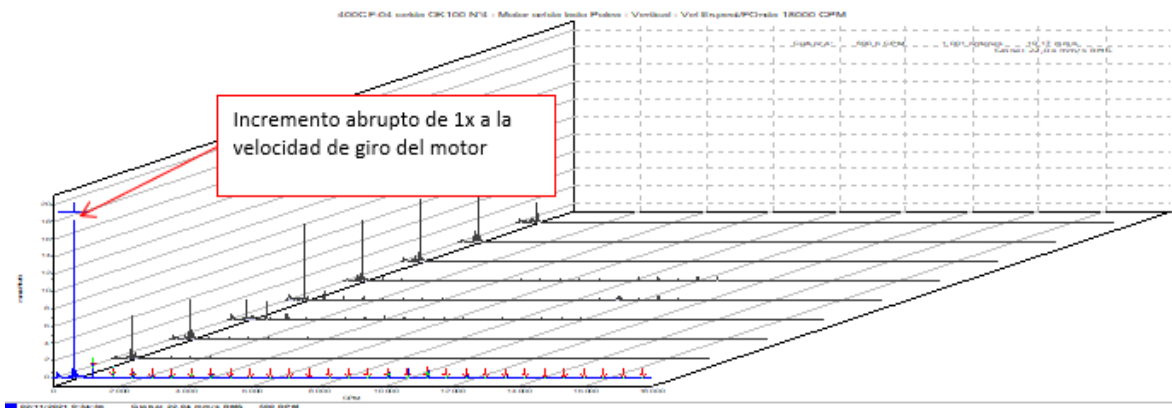


Figura 2.6 Espectro de frecuencias en cascada [Fuente: Mantenimiento Pucobre]

La conversión de una señal de vibración en un espectro de frecuencias requiere de un manejo matemático complicado, en las industrias modernas, cuentan con instrumentos especializados que miden las vibraciones entregando los espectros de frecuencia y la magnitud de sus parámetros. En la Figura 2.7, se muestra un instrumento analizador de vibraciones con el espectro de frecuencias de la vibración producida por una máquina [5].

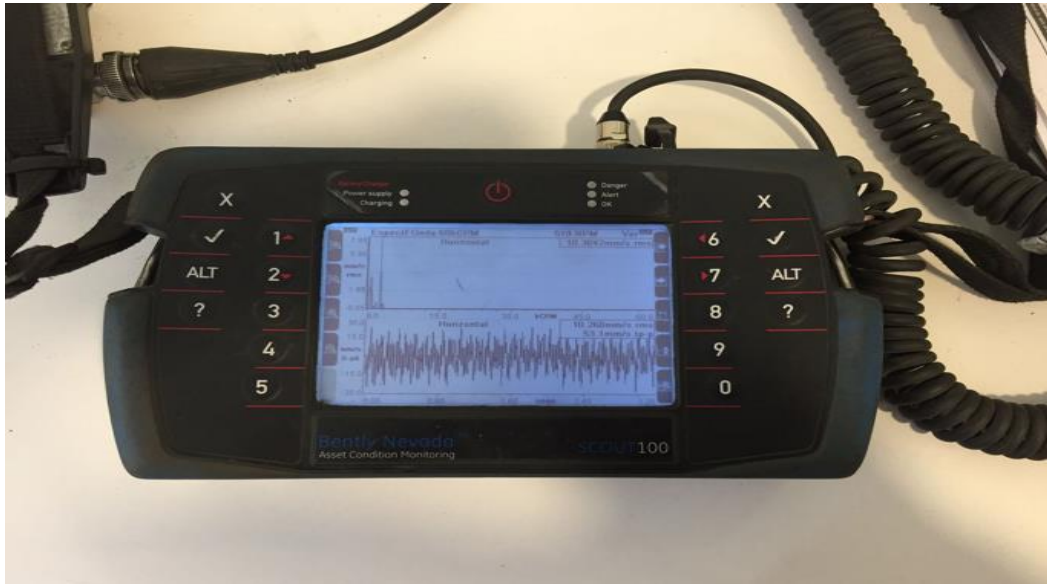


Figura 2.7 Analizador de vibraciones [Fuente: Mantenimiento Pucobre]

2.2.2 Puntos de Medición

Los instrumentos analizadores de vibración capturan las señales por medio de sensores. Estos sensores se colocan directamente sobre la máquina en aquellos puntos que son susceptibles a fallas. Por lo general, los ejes, son una de las piezas que se dañan con mayor frecuencia, por tal razón, un buen sitio para colocar los sensores está sobre los apoyos de los rodamientos, puesto que por éstos se transmiten las vibraciones. Un factor que influye en la calidad de las medidas es la conexión de los sensores de forma tal que haga un buen contacto con la estructura de la máquina, para que puedan tomar lecturas en las tres direcciones, dos radiales: vertical, horizontal y una axial.

Cuando el lugar en el que se debe colocar el sensor es de difícil acceso, se instalan sensores permanentes con conectores accesibles que permitan tomar las medidas fácilmente y sin peligro. La toma de medidas debe ejecutarse manteniendo iguales las condiciones de operación de la máquina, la ubicación de los sensores y el tiempo entre una medición y otra con el fin de que los datos obtenidos se puedan comparar entre sí [5].

2.2.3 Interpretación de Datos

Con los datos obtenidos de las mediciones, se realiza la interpretación usando técnicas de análisis que permitan conocer el estado de la máquina. Las técnicas básicas que más se utilizan son las de análisis de frecuencia. Este análisis se hace en base al espectro que se obtiene de la señal de vibración, el espectro está conformado por una gráfica cuyo eje horizontal (eje x), corresponde a la frecuencia y el eje vertical (eje y), a cualquiera de los siguientes parámetros: desplazamiento, velocidad o aceleración.

Aunque la gráfica de estos tres parámetros es equivalente entre sí, en alguna de ellas es más sencillo hacer su interpretación, en el caso de las máquinas rotatorias, la gráfica que más se utiliza es la de velocidad utilizando como unidad de medida mm/s. En este tipo de gráficas, la frecuencia es un indicativo de la causa que produce la vibración mientras que la amplitud indica la gravedad de la falla. Para llevarlo a cabo este estudio, se siguen los siguientes pasos: Se definen las bandas de frecuencia de aquellos puntos de medición que sean importantes. Luego, se aplican criterios de evaluación.

Se identifican las fallas que se están presentando, partiendo del conocimiento de sus vibraciones y su banda de frecuencia, además, se complementa con espectro de onda de tiempo, este análisis sirve para confirmar diagnósticos como: el desbalance, desalineamiento y holgura. También se utiliza cuando se presentan impactos, frecuencia de falla en rodamiento y holgura, además de las máquinas de baja velocidad. Es importante mencionar que los impactos pueden ser transmitidos desde el exterior, es decir, no son propios del equipo [5].

Además, existen dos espectros fundamentales para diagnosticar la lubricación deficiente y frecuencia de falla en rodamientos en etapa incipiente, se utiliza el filtro de alta frecuencia de aceleración.

En la Figura 2.8, se muestra un espectro en aceleración, que permite diagnosticar un exceso o deficiente lubricación.

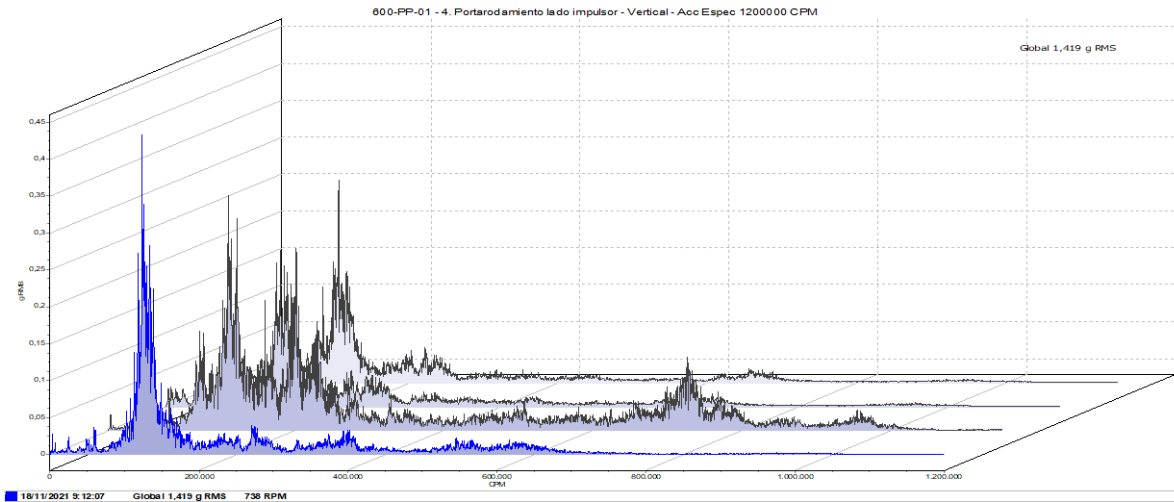


Figura 2.8 Espectro de altas frecuencias en aceleración [Fuente: Mantenimiento Pucobre]

En la Figura 2.9, se muestra un espectro en envolvente (demodulación), que permite diagnosticar frecuencia de falla en rodamiento.

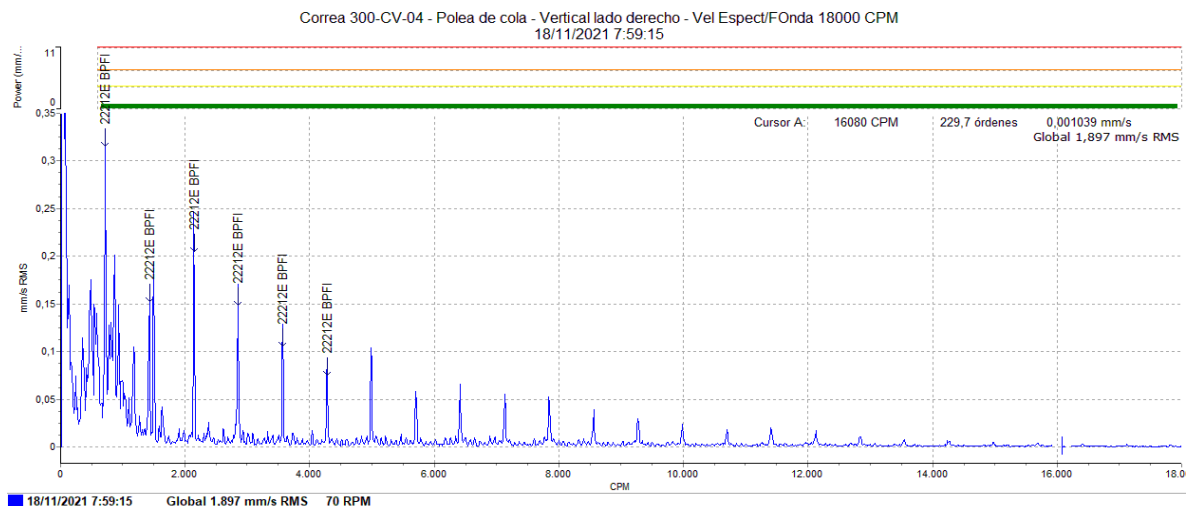


Figura 2.9 Espectro de frecuencias en velocidad [Fuente: Mantenimiento Pucobre]

2.2.4 Pendiente de Ski

La pendiente de ski trata de un componente de muy baja frecuencia, pero de gran valor en el espectro de velocidad generada por la integración digital del ruido electrónico de los acelerómetros. El ruido electrónico del acelerómetro genera en el espectro de la aceleración “pasto” a todas las frecuencias. Al integrar la aceleración a velocidad, el pasto existente a las muy bajas frecuencias, cercanas a cero, son de bajo valor y su amplitud crecerá significativamente, como se muestra en la Figura 2.10 [2].

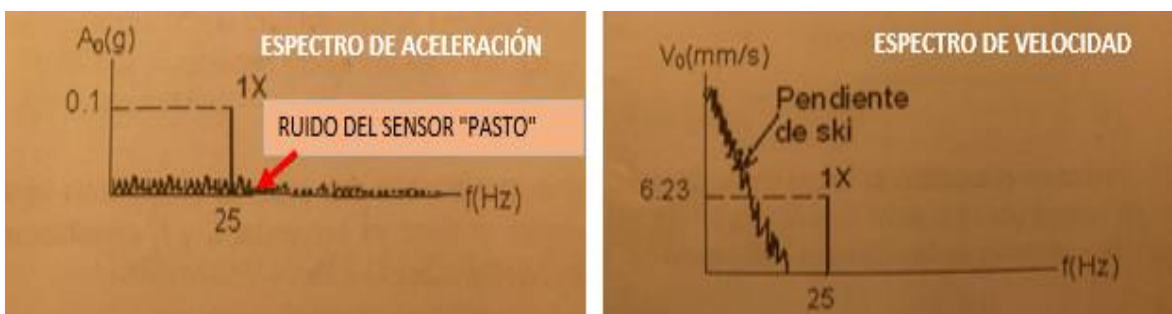


Figura 2.10 Espectro saturado en bajas frecuencias [Fuente: Dr. Ing. Pedro Saavedra, categoría I]

El problema de la pendiente ski, es que se trata de componentes vibratorios no reales (producto de la integración del ruido electrónico), las cuales hacen subir el valor global de las vibraciones, pudiendo con ello llegar a valores de peligro. Un buen analista no debe tener pendiente ski en sus espectros de velocidad [2].

2.3 Fallas Comunes en Equipos Rotatorios

Al diagnosticar o determinar el origen de las vibraciones en un equipo, se debe tener presente que las vibraciones pueden provenir de la misma o del exterior [2].

Las fallas que se pueden identificar en los equipos rotativos por medio de sus vibraciones son los siguientes: desbalanceo, des-alineamiento, falla en rodamientos, ejes flectados, defecto en engranes, problemas eléctricos, lubricación deficiente, soldadura mecánica, turbulencia, cavitación, resonancia etc.

2.3.1 Desbalanceo de Rotores

El desbalanceo es una de las causas más comunes de vibración en los equipos. Es una condición en la cual el centro de masa de un determinado objeto, no coincide con el centro de rotación de este o cuando los ejes de inercia no coinciden con los ejes de rotación. La razón para esto, es la no uniformidad en la distribución de masa de un cuerpo alrededor del centro de rotación. En otras palabras, genera una fuerza centrífuga rotatoria a la velocidad de rotación del rotor [2].

En el espectro es predominante la componente de frecuencia 1xRPM y su forma de onda es sinusoidal. La forma de onda se calcula con la diferencia de tiempo (seg) en un periodo y este corresponde a la misma velocidad de rotación [2]. Por ejemplo: En la Figura 2.11 el espectro de frecuencias presenta una componente predominante a 1x a la velocidad de rotación (450 cpm), entonces, la onda temporal presenta una onda sinusoidal con periodos separados a 0.133 segundos. Para hacer la conversión de unidad de tiempo (seg) a unidad de frecuencias (rpm, hertz, etc), se puede utilizar la siguiente fórmula: $F(\text{Hertz})=1/T(\text{seg})$, reemplazando:

$$F = 1/0.133 = 7.5 \text{ Hz o } 450 \text{ cpm}$$

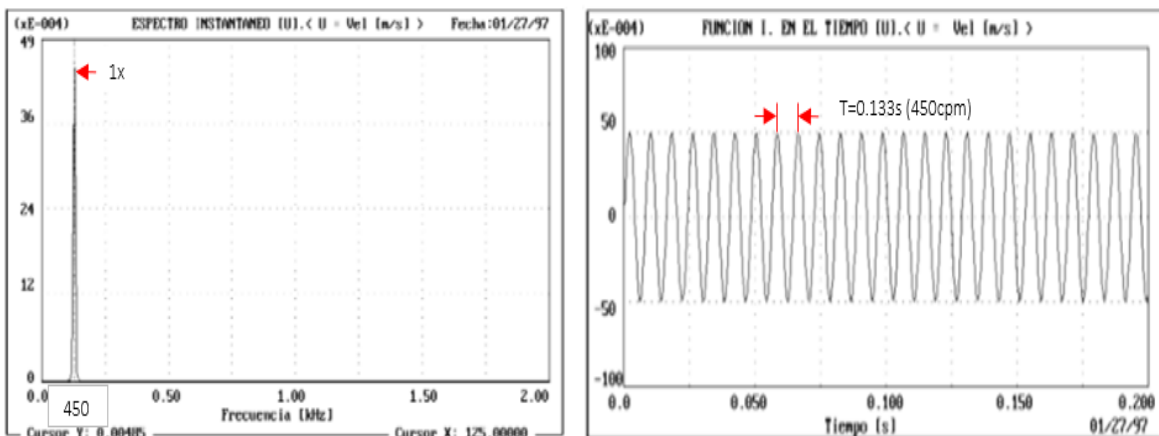


Figura 2.11 Forma de onda [Fuente: Dr. Ing. Pedro Saavedra, categoría I]

2.3.2 Desalineamiento

El desalineamiento de acoplamientos es una condición de funcionamiento donde los ejes del equipo conductora y conducida, no están en una misma línea (no son colineales) cuando están funcionando. Se definen dos tipos de desalineamiento: paralelo y angular. [2]

Desalineamiento paralelo: Ocurre cuando el eje de un equipo está desplazada paralelamente respecto al eje del otro equipo acoplado [2]. La Figura 2.12, muestra un desalineamiento paralelo.

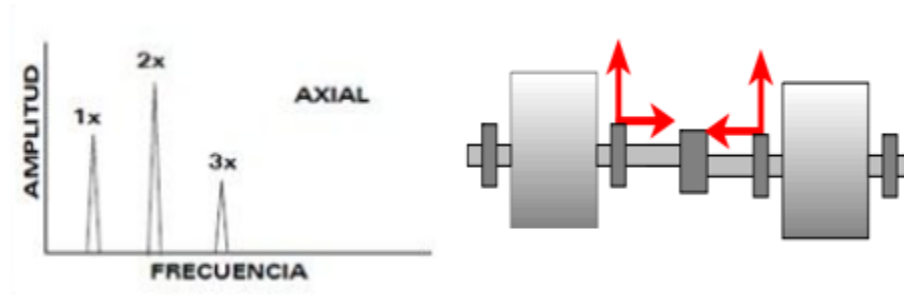


Figura 2.12 Desalineamiento paralelo [Fuente: Dr. Ing. Pedro Saavedra, categoría I]

Desalineamiento angular: Ocurre cuando los ejes de los equipos acopladas forman un ángulo en el acoplamiento [2]. La Figura 2.13, muestra un desalineamiento angular.

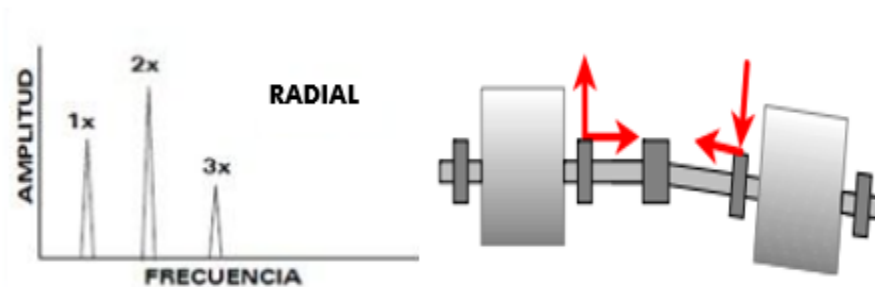


Figura 2.13 Desalineamiento angular [Fuente: Dr. Ing. Pedro Saavedra, categoría I]

En el espectro vibratorio presenta la 1x a la velocidad de rotación con los primeros tres armónicos y su forma de onda es no sinusoidal.

En la práctica, sin embargo, lo más común es encontrar el desalineamiento combinado, esto a causa de problema de montaje o problemas durante su operación. El principal efecto es el gran aumento de las fuerzas radiales sobre los rodamientos, tanto en el equipo conductor como en el conducido, disminuyendo drásticamente su vida útil [2].

2.3.3 Solturas Mecánicas

Se refiere a cualquier elemento suelto en el equipo que influya en sus vibraciones, ya sea, interna del equipo como rodamientos o externo como pernos sueltos de la base. Algunos ejemplos: pernos de sujeción de la máquina a la base sueltos, juego radial excesivo de los descansos hidrodinámicos o rodamientos, grietas (estructuras de la máquina, pedestal o en otra parte) etc.

En el espectro se observa gran cantidad de componentes a frecuencias múltiplos de los RPM o múltiplos de una fracción de los RPM (múltiplos de la $\frac{1}{2}$ RPM). A mayor grado de soltura, mayor cantidad de armónicos. Cuando la soltura es severa con impacto, se genera además en el espectro pasto. Su forma de onda es variable en cada giro del eje, lo que lo diferencia del desalineamiento y la distorsión de carcasa, las cuales tiene una forma de onda repetitiva a cada vuelta del eje [2]. La Figura 2.14, muestra soltura mecánica.

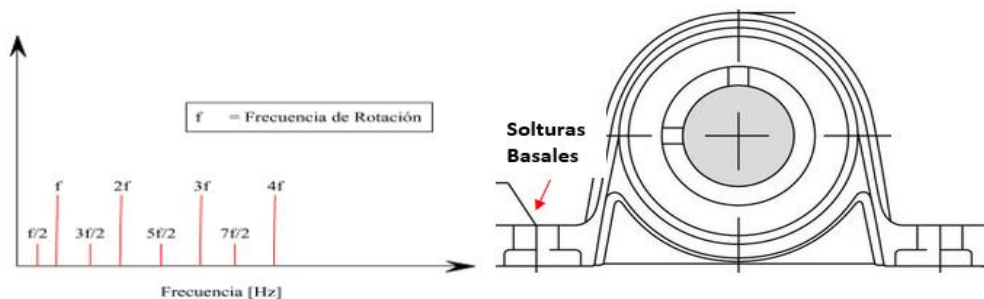


Figura 2.14 Soltura [Fuente: Dr. Ing. Pedro Saavedra, categoría I]

2.3.4 Vibraciones Generadas en Bombas

Existen 3 tipos de vibraciones típicas generadas en las bombas, las vibraciones inherentes, cavitación y flujo turbulento.

La vibración inherente en este tipo de equipos es la frecuencia de paso de alabes (fp). La frecuencia de paso de alabes es igual al número de aspas (Z) por la frecuencia (fp= Z x RPM) [2]. La Figura 2.15, muestra un espectro de frecuencia de paso de alabes.

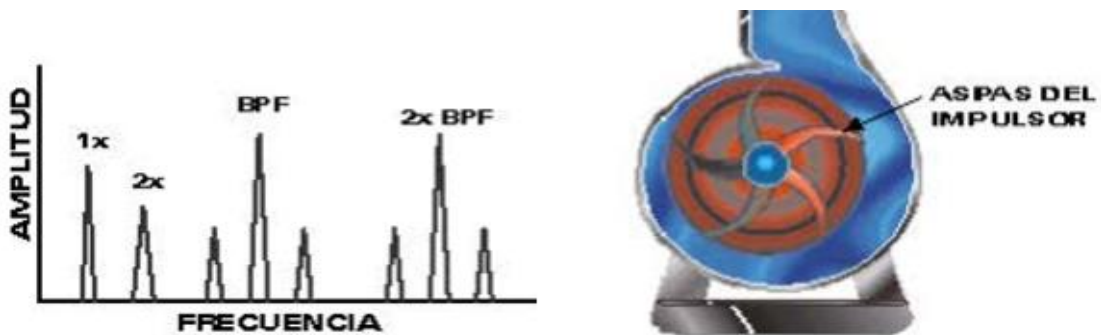


Figura 2.15 Frecuencia de paso de alabes [Fuente: A-MAQ, Colombia]

La cavitación es la entrada de aire o vaporización de un fluido dentro de la bomba, ocurre cuando la presión del fluido es menor que la presión de vapor, produciendo burbujas en el líquido, las que al llegar a puntos de presión colapsan bruscamente, produciendo estallidos aleatorios que generan ruido y vibraciones (aleatorio y espectro de pasto), además, una reducción de rendimiento [2]. La Figura 2.16, muestra un espectro de cavitación.



Figura 2.16 Cavitación [Fuente: A-MAQ, Colombia]

El flujo turbulento fundamentalmente es causado por diseños inadecuados de ductos y cañerías, o por trabajar lejos del caudal nominal de la unidad. Se produce cuando el fluido es forzado a realizar cambios de dirección abruptos.

En el espectro es de una vibración aleatoria con un espectro de pasto. Los peaks más dominantes ocurren a frecuencias bajo la 1xRPM [2]. La Figura 2.17, muestra un espectro de turbulencia.

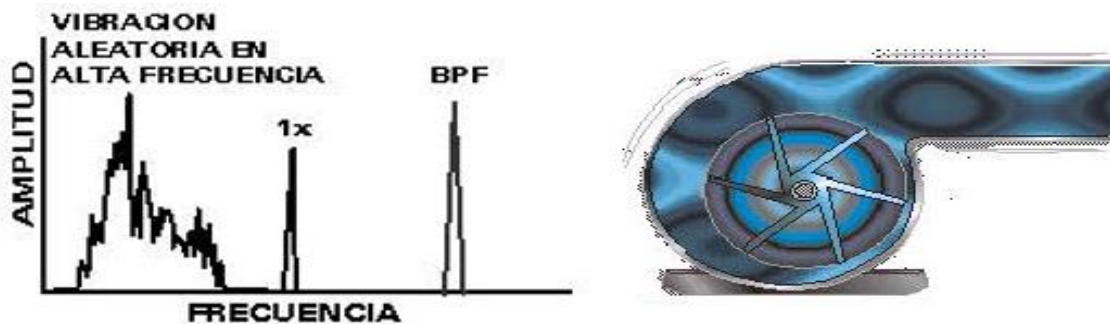


Figura 2.17 Turbulencia [Fuente: A-MAQ, Colombia]

2.3.5 Excentricidad Estática o Desiguales Entre-Hierro

Ocurre cuando los ejes del rotor y estator no son colineales. Esto trae como consecuencia que el valor del entrehierro (rotor y estator) no es igual en todas las direcciones radiales. Es llamado como “excentricidad estática” debido a que, aunque el valor del entrehierro en cualquier dirección radial es diferente, estos valores no varían cuando el rotor gira, es decir, estos valores se mantienen constantes o estáticos [2].

Se debe tener presente que cuando se realiza un análisis de vibraciones relacionado a problemas eléctricos, es recomendable, una vez detectado, realizar un seguimiento en la tendencia, para posteriormente evaluar si existe un incremento o bien se mantiene la condición, ya que, puede ser normal del equipo o por algún problema mecánico.

En el espectro se observa dos veces la frecuencia de línea $2xf_l$ (6.000cpm). La frecuencia de línea corresponde según los Hz del motor, por ejemplo, un motor de 50hz, su frecuencia de línea son 3000cpm ($50\text{hz} \times 60 = 3000\text{cpm}$). La Figura 2.18, muestra un espectro de excentricidad estática.

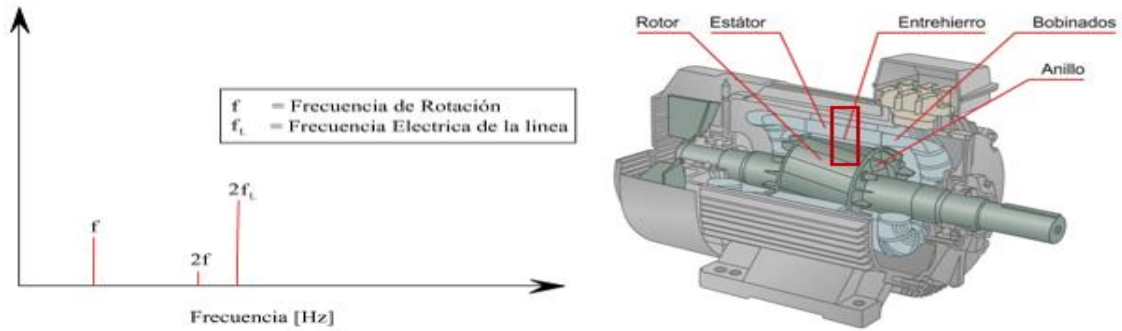


Figura 2.18 Excentricidad estática [Fuente: Dr. Ing. Pedro Saavedra, categoría I]

2.4 Charla de Medición y Análisis de Vibraciones



1



4



2



5



3



6

Mantenimiento Predictivo

En esta estrategia, se evalúa la condición mecánica del equipo, como esta condición va evolucionando en el tiempo:

- **Ventajas:** Solo se detiene el equipo cuando sea estrictamente necesario, aumento de disponibilidad del equipo, se evitan imprevistos, evita reparaciones de alto costo etc.
- **Desventajas:** Costo en inversiones de equipos y entrenamiento, la operación del equipo y la interpretación de los resultados requiere de personal capacitado.

"El Mantenimiento Predictivo es similar a la medición actual en las personas, se requiere determinar su condición mecánica (o salud) del equipo?"

7

Conceptos Básicos de Vibraciones Mecánicas

➤ **Vibración Compuesta:** Una señal compuesta es una sumatoria de varias señales sinusoidales que comprenden cada uno de los componentes que se encuentran en el equipo, mas todos los golpesos y vibraciones aleatorias.

10

Metas y Objetivos

Las metas y objetivos que se espera conseguir con la implementación de una estrategia de mantenimiento predictivo, son las siguientes:

- Monitoreo de Condición de la Máquina.
- Diagnóstico de Fallas.
- Pronóstico de Esperanza de Vida.

8

Conceptos Básicos de Vibraciones Mecánicas

- Frecuencia.
- Período.
- Desplazamiento de la Vibración.
- Vibración Aleatoria.

11

Conceptos Básicos de Vibraciones Mecánicas

En términos muy simples, una vibración, es un movimiento oscilatorio de pequeña amplitud.

➤ **Vibración Simple:** La base principal de las señales de vibración en el dominio del tiempo, son las ondas sinusoidales, estas son las más simples y son la representación de las oscilaciones puras.

9

RECOLECTORES DE DATOS

Es importante antes de realizar un análisis de vibraciones, conocer el equipo, para distinguir de donde proviene la falla.

12

Transformada Rápida de Fourier (FFT)

La transformada rápida de Fourier (FFT) captura la señal en el tiempo, la transforma en una serie de señales sinusoidales y finalmente las conduce al dominio de la frecuencia.



13

Puntos de Medición

- Los instrumentos analizadores de vibración, capturan las señales a través de sensores.
- La instalación del sensor, debe ser en puntos que son susceptibles a fallas.
- Los sensores se instalan en 3 direcciones: horizontal, vertical y axial.



16

Equipo de Vibraciones SCOUT100

- La conversión de una señal de vibración en un espectro de frecuencias requiere de un manejo matemático complicado, en las industrias modernas, cuentan con instrumentos especializados que miden las vibraciones, entregando los aspectos de frecuencia y magnitud de sus parámetros.



14

Puntos de Medición

- Cuando el lugar en el que se debe poner el sensor es de difícil acceso, es recomendable proponer la instalación de sensores permanentes, si es que el equipo lo amerita.
- No olvidar que si la medición es insegura, se deben buscar otras alternativas que aseguren la integridad de las personas o bien, no efectuar la medición en aquellos puntos que podrían ocasionar un accidente.
- La toma de medidas debe ejecutarse manteniendo iguales las condiciones de operación del equipo.

17

Puntos de Medición

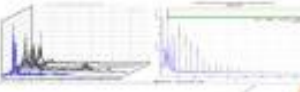
- Para realizar medición de vibraciones, se deben tener las siguientes componentes:
Equipo de vibraciones (Scout 100-Vibexpert).
Transductor o sensor (100mV/g).
Cable

El transductor o sensor, es un dispositivo electrónico que capta una magnitud física (vibración) y la convierte en una señal eléctrica (voltaje), que es proporcional a la magnitud medida.

15

Interpretación de datos

- Con los datos obtenidos de las mediciones, se realiza la interpretación de datos, usando técnicas de análisis, que permitan conocer el estado del equipo.
- El espectro está conformado por una gráfica cuyo eje horizontal corresponde a la frecuencia y vertical a cualquier de las siguientes parámetros: velocidad y aceleración.
- La gráfica que más se utiliza, es la velocidad (mm/s).
- Las distintas gráficas, se complementan entre sí y se analiza para confirmar diagnósticos como: lubricación deficiente, frecuencia de falla en rodamiento, etc.



18

Pendiente de Ski

- Trata de una componente de muy baja frecuencia, pero de gran valor en el espectro de velocidad.
- El problema de la pendiente de ski, es que se trata de componentes vibratorios no reales (producto de la integración del ruido eléctrico).



19

Fallas Comunes en los Equipos Rotatorios

- Desalineamiento Paralelo.



- Desalineamiento Angular.



22

Pendiente de Ski

- El ruido electrónico del acelerómetro genera en el espectro de la aceleración el así llamado "paso" a todas las frecuencias, esta condición se puede presentar cuando:
 - Se efectuó una mala instalación del sensor.
 - Cuando el sensor es golpeado con el equipo.
 - El cable de medición está dañado.
- Las velocidades de los equipos rotatorios son demasiado bajas.

20

Fallas Comunes en los Equipos Rotatorios

- Solapas Mecánicas.



Ejemplo: Manguito dañado en polea conducida.



23

Fallas Comunes en los Equipos Rotatorios

- Desbalanceo.

$$T = 60 / 135 = 7.5 \text{ Hz} \text{ o } 450 \text{ rpm}$$


Ejemplo: Acoplamiento soldado.



21

Fallas Comunes en los Equipos Rotatorios

- Vibraciones generadas en bombas.

Existen tres tipos de vibraciones típicas generadas en bombas, estas son: Vibraciones inherentes, cavitación y turbulencia.

La vibración inherente, en este tipo de equipos, es la frecuencia de paso de alabes.

La frecuencia de paso de alabes es igual al número de alabes por la frecuencia.



24

Fallas Comunes en los Equipos Rotatorios

- Vibraciones generadas en bombas.

Es importante mencionar que la frecuencia de paso de álabes, dep. de ser inherente cuando sus valores globales sobrepasan su comportamiento normal. Ejemplo: Si la velocidad de giro es de 840v, podríamos estar en presencia de un desgaste en el impulsor.

Ejemplo: Si la velocidad de giro es de 960rpm y tiene 4 álabes, entonces, la frecuencia de paso de álabes es la multiplicación de ambos, $840 \times 4 = 3.360 \text{cpm}$.



25

Fallas Comunes en los Equipos Rotatorios

- Excentricidad estática o desigualdades entre hérr.

Ocurre cuando los ejes del rotor y estator no son co-axiales. Esto trae como consecuencia, que el valor entre-hérr, no es igual en todas las direcciones radiales.

Los molinos en su mayoría, son de 50Hz, pero como se mencionó anteriormente, los aspectos, se evalúan en CPM, entonces, $50 \times 60 = 3.000 \text{cpm}$.



28

Fallas Comunes en los Equipos Rotatorios

- Vibraciones generadas en bombas.

La cavitación, es la entrada del aire o vaporización de un fluido dentro de la bomba, ocurre cuando la presión del fluido es menor a la presión de vapor, produciendo burbujas en el líquido.

VERBOSAS ANOMALÍAS EN ALTA FRECUENCIA.



26

Fallas Comunes en los Equipos Rotatorios

- Frecuencia de falla en rodamiento.

Falla en pista interna.
Falla en pista externa.
Falla en elementos rodantes.
Deterioro de jaula.



29

Fallas Comunes en los Equipos Rotatorios

- Vibraciones generadas en bombas.

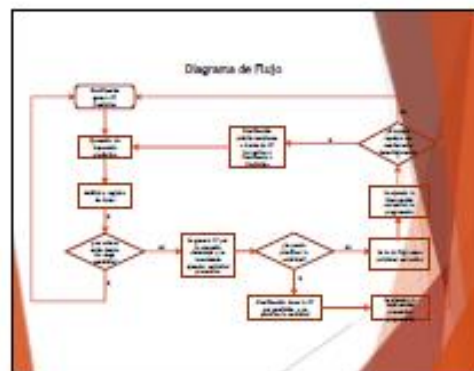
Turbulencia, es ocasionado por diseños inadecuados de ductos y cañerías, o por trabajar lejos del caudal nominal de la unidad.

Se produce cuando el fluido es forzado a realizar cambios de dirección abruptos.

VERBOSAS ANOMALÍAS EN ALTA FRECUENCIA.



27



30



31



32

Capítulo 3 Medición y Análisis de Termografías

3.1 Importancia de la Medición Termográfica

La termografía es una técnica de ensayo no destructivo que se emplea para comprobar la temperatura de un objeto o lugar. Para realizar dicha medición existe un instrumento llamado cámara infrarroja o térmica. Hoy en día las cámaras térmicas para uso industrial son pequeñas, livianas y sencillas de utilizar. Esto no siempre ha sido así, en sus inicios el equipo térmico infrarrojo era sumamente costoso, con un manejo complicado y su uso reservado para expertos con mucho conocimiento y experiencia sobre el tema. Afortunadamente, las necesidades de productividad y reducción de costos en la industria, permite impulsar la investigación y desarrollo de nuevas tecnologías en materiales de detección y en la electrónica del procesamiento de las señales que captura, haciendo de las cámaras actuales, dispositivos al alcance de muchos. Sin embargo, es importante el entrenamiento apropiado para llevar a cabo las inspecciones térmicas, y así evitar diagnósticos erróneos y, por consiguiente, la toma de malas decisiones, afectando la producción y costos [5].

Actualmente, la tecnología termográfica es una de las herramientas de diagnóstico fundamentales para el mantenimiento predictivo. Con esta técnica se pueden detectar anomalías que son invisibles para el ser humano, tiene la ventaja de visualizar en tiempo real la distribución de temperatura de todas las superficies que sean necesarias, con el fin de anticiparse a fallas catastróficas para la compañía. La Figura 3.1, muestra los tipos de cámara infrarroja.



Figura 3.1 Cámaras infrarrojas [Fuente: Marca Fluke y Flir]

3.2 Descubrimiento de Radiación Infrarroja

William Herschel logra pasar luz solar a través de un prisma de cristal para generar un espectro: el arco iris, el cual se forma cuando la luz se divide en los colores que la componen. Luego, mide la temperatura de cada color. Para ello Herschel utiliza tres termómetros con bulbos ennegrecidos para absorber mejor el calor. Coloca un bulbo en cada color, mientras que otros dos son colocados fuera del espectro, como muestras de control. Al medir las temperaturas de la luz violeta, azul, verde, amarilla, naranja y roja, nota que cada color tiene una temperatura mayor que los termómetros de control, y que la temperatura de los colores del espectro aumenta al ir del violeta al rojo. Después de realizar ese experimento, Herschel decide medir la temperatura en una zona ubicada un poco más allá de la luz roja del espectro, al parecer desprovista de luz. Para su sorpresa, descubre que esta región concentra la temperatura más alta de todas.

Herschel realiza otros experimentos con los que denomina “rayos caloríficos”, que existen más allá de la región roja del espectro. Encuentra que son reflejados, refractados, absorbidos y transmitidos igual que la luz visible. Con esto, ha descubierto una forma de luz o radiación ubicada más allá de la luz roja. Estos rayos caloríficos, son posteriormente denominados rayos o radiación infrarrojos. El experimento de Herschel es importante no sólo porque conduce al descubrimiento de los rayos infrarrojos, sino también porque es la primera vez que se demuestra que hay formas de luz imposibles de percibir con nuestros propios ojos [6]. La Figura 3.2, muestra el experimento de Herschel.

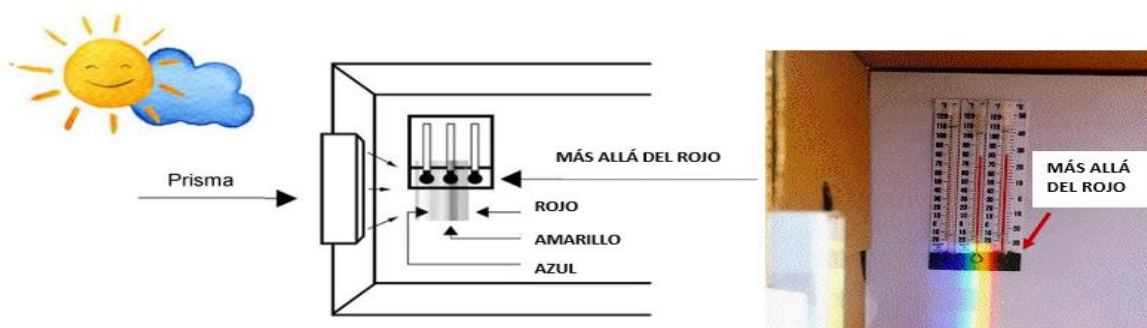


Figura 3.2 Experimento Herschel [Fuente: www.esperimentanda.com]

3.3 Principio de Operación de Cámaras Térmicas

Existen malas interpretaciones sobre cómo operan los equipos de detección de infrarrojos, tanto de cámaras como termómetros de punto. Algunos mitos se desarrollan alrededor de este aspecto, tales como que la cámara puede ver a través de las paredes, o que la medición se realiza mediante la irradiación que el dispositivo de medición hace sobre el objeto.

El objeto debe considerarse como un sistema termodinámico cuyas relaciones entre calor y temperatura son de interés para el inspector. Toda escena, está compuesta por objetos que emiten calor en forma de radiación electromagnética. Ciertos materiales emiten mucho calor, mientras que otros, estando a la misma temperatura emiten poco calor, dependiendo de sus propiedades térmicas. El calor que emiten debe propagarse a través de un medio (por lo general el aire) cuyas propiedades de transmisión le permiten al calor, viajar con poca atenuación hasta el dispositivo de detección de infrarrojos. La cámara térmica, recolecta esa radiación, con su lente, la enfoca hacia el detector, y la respuesta eléctrica de éste, la cual es proporcional a la intensidad del calor, permite procesar señales eléctricas y generar una compleja imagen de la distribución del calor en el objeto [5]. La Figura 3.3, muestra el proceso de la radiación infrarroja detectada por la cámara termográfica.



Figura 3.3 Proceso IR [Fuente: Ignacio Mártel, Universidad Complutense]

3.4 Conceptos Básicos

El calor y la temperatura son dos conceptos totalmente distintos, que inclusive se miden en unidades físicas distintas, existen ciertas sutilezas que hace que una persona pueda fácilmente confundirse [5].

Calor: Es energía térmica en movimiento de un lugar a otro. En el mismo concepto del calor, está incluida intrínsecamente la transferencia de energía térmica entre regiones del espacio. Ya que es energía, se mide en Joules (en el SI) y en BTU (en el sistema inglés). La energía térmica, es una forma de energía asociada a la cantidad de movimiento de las partículas que conforman un material. En los sólidos, la energía térmica también se le llama energía interna. Entre mayor sea el movimiento interatómico y molecular de un objeto, mayor es su energía interna, y por lo tanto mayor su potencial para transferir calor [5].

Temperatura: El movimiento de las partículas de la materia es producto de su energía térmica (que no es sino energía cinética). La temperatura, es una medida de la energía cinética media de las partículas en una muestra de la materia. Es decir, la temperatura es una medida de actividad y de la frecuencia de colisiones de moléculas. A mayor velocidad de las partículas, mayor es la temperatura del material y ha mayor temperatura un cuerpo tiene, una mayor cantidad de energía térmica, y por lo tanto un mayor potencial para transferir calor [5]. La Figura 3.4, muestra el esquema de calor y temperatura.

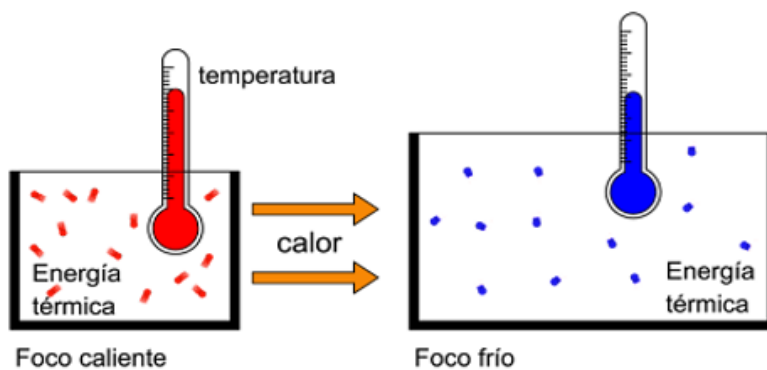


Figura 3.4 Esquema calor y temperatura [Fuente: www.slidetodoc.cl]

Espectro electromagnético: Se denomina a la distribución energética del conjunto de las ondas electromagnéticas. Se extiende desde la radiación de menor longitud de onda, como los rayos gamma y los rayos X, pasando por la radiación ultravioleta, la luz visible y la radiación infrarroja, hasta las ondas electromagnéticas de mayor longitud de onda, como son las ondas de radio, como se muestra en la siguiente Figura 3.5 [9].

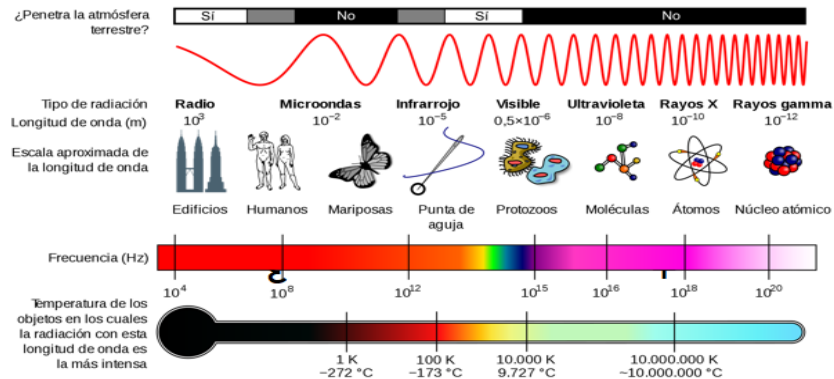


Figura 3.5 Diagrama del espectro electromagnético [Fuente: es.wikipedia.org]

Radiación Infrarroja: Es radiación electromagnética de calor. Cada objeto con una temperatura superior al cero absoluto ($0 \text{ Kelvin} = -273.15 \text{ °C}$) emite radiación infrarroja. La radiación infrarroja comprende los rangos de longitud de onda de $0.75 \text{ }\mu\text{m}$ hasta cerca de $1,000 \text{ }\mu\text{m}$ ($= 1 \text{ mm}$) y por tanto bordea el rango de longitud de onda de la luz ($0.38 \text{ a } 0.75 \text{ }\mu\text{m}$), como se muestra en la siguiente Figura 3.6 [7].



Figura 3.6 Radiación infrarroja [Fuente: es.wikipedia.org]

3.4.1 Mecanismos de Transferencia de Calor

El calor tiende a moverse desde una región de alta temperatura a una región de baja temperatura. Esta transferencia térmica puede ocurrir mediante mecanismos de conducción y radiación. El término convección, se utiliza para describir los efectos combinados de la conducción y del flujo de fluido. En el pasado, la convección es considerada como el tercer mecanismo de transferencia de calor, pero en un sentido estricto, no lo es. A pesar de esta precisión teórica, es muy común que en termografía infrarroja se hable de los tres mecanismos de transferencia de calor: conducción, convección y radiación [5].

La conducción, es el transporte de calor a través de una sustancia y tiene lugar cuando se ponen en contacto dos objetos a diferentes temperaturas. El calor fluye desde el objeto que está a mayor temperatura hasta el que la tiene menor. Esta condición, continúa hasta que los dos objetos alcanzan a la misma temperatura (equilibrio térmico). La convección, tiene lugar cuando áreas de fluido caliente (de menor densidad) ascienden hacia las regiones de fluido frío. Este ciclo da lugar a una continua circulación (corrientes convectivas) del calor hacia las regiones frías. Por último, la radiación es un método de transferencia de calor que no precisa de contacto entre la fuente de calor y el receptor. No se produce ningún intercambio de masa y no se necesita ningún medio material para que se transmita. La Figura 3.7, se muestra los tres mecanismos de transferencia de calor [5].

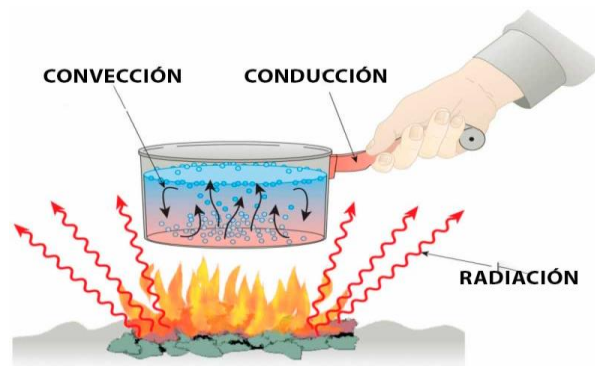


Figura 3.7 Esquema de transferencia de calor [Fuente: es.wikipedia.org]

3.5 Medición Infrarroja

Según lo mencionado anteriormente, la visión humana solo puede ver un pequeño rango de longitudes de onda (desde 0,4 a 0,75 μm), en cambio las cámaras termográficas pueden detectar la energía infrarroja imperceptible para el ser humano. El rango normal de temperaturas que las cámaras pueden registrar va desde -20 hasta 500 °C, y puede extenderse hasta -40 °C por debajo y hasta 2.000 °C por arriba. La cámara transforma la energía infrarroja, en una imagen con un mapa de colores que nos muestra la temperatura del objeto en cada punto. Esto la hace muy versátil y con infinitud de aplicaciones [8].

La radiación registrada por la cámara termográfica consiste en la radiación de onda larga emitida, reflejada y transmitida que surge de los objetos presentes en el campo de visión de la cámara [7].

3.5.1 Emisividad (ϵ)

Uno de los parámetros más importantes a la hora de realizar una medición de temperatura con una cámara termográfica es la emisividad. La emisividad indica la capacidad que tiene un objeto de emitir radiación infrarroja. Esta capacidad se puede medir y sus valores van desde 0 para los materiales que no emiten nada, hasta 1 para el cuerpo negro (emisividad máxima $\epsilon = 1$). Existen numerosas variables que afectan a la emisividad de un objeto, como la longitud de onda, el campo de visión, la forma geométrica y la temperatura. Para valores de emisividad de materiales comunes, se pueden consultar en la tabla siguiente [8].

Material	Cuerpo negro	Papel	Plástico (HDPE)	Goma	Madera	Cobre (oxidado)	Acero fundido	Acero Inoxidable	Cobre (pulido)	Aluminio
Emisividad	1	0.95	0.95	0.95	0.95	0.68	0.95	0.1	0.02	0.05

Tabla 3.1 Emisividad de un objeto [Fuente: interempresas.net]

3.5.2 Reflexión (ρ)

La reflexión es la medida de la capacidad de un objeto de reflejar la radiación infrarroja. Esta depende de las propiedades de la superficie, la temperatura y el tipo de material, por lo general las superficies lisas y pulidas reflejan mucho más que las irregulares y sin pulir del mismo material. La temperatura de la radiación reflejada se puede configurar manualmente en la cámara termográfica [7].

3.5.3 Transmisión (τ)

La transmisión es la medida de la capacidad de un material de transmitir (permitir el paso) de la radiación infrarroja. La transmisión depende del tipo y grosor del material. Es importante mencionar que no todos los materiales son transmisivos, es decir, son impermeables a la radiación infrarroja de onda larga [7].

3.5.4 Ley de Radiación de Kirchhoffs

La radiación infrarroja registrada por la cámara termográfica consiste en, la radiación emitida por el objeto medido, la reflexión de la radiación ambiente y la transmisión de la radiación del objeto medido. El resultado de la suma de estos factores es siempre 1 ($\epsilon + \rho + \tau = 1$), dado que en la práctica la transmisión juega un papel importante, la variable “ τ ” se omite en la forma, quedando como:

$$\epsilon + \rho = 1$$

En termografía esto quiere decir, a menor emisividad, mayor proporción de radiación infrarroja reflejada, mayor dificultad en la toma de mediciones precisas de temperatura y mayor importancia adquiere la configuración correcta de la compensación de la temperatura reflejada. En caso contrario, a mayor emisividad, bajo nivel de reflexión y fáciles de medir con la cámara termográfica [7].

Entonces, es fundamental configurar la cámara termográfica o el software de análisis, si se requiere una elevada precisión en la medición de la temperatura de un objeto, como: agregar el valor de la emisividad de dicho objeto (información en tabla de emisividad, Figura 3.8 y ajustar la compensación de la temperatura reflejada (temperatura ambiente) de forma correcta, puesto que ambas son un factor de vital importancia para el cálculo real de la temperatura [8].

3.6 Conceptos de Termografía Práctica

En la práctica, se deben tener en cuenta varios factores que pueden contribuir con errores en la medición, tales como: configuración de la cámara, superficie del objeto a medir, contaminación y condiciones climáticas [7].

Emisividad: La superficie de cada material tiene una emisividad específica (Figura 3.8 a partir de la cual se deriva la cantidad de radiación infrarroja emitida desde el material que se refleja y emite [7].

Superficie del objeto a medir: La emisividad varía según su estructura, recubrimiento o su pulcritud [7].

Suciedad y partículas en la superficie: la cámara termográfica siempre mide la temperatura de la superficie, es decir, la contaminación y no la temperatura exacta de la superficie del objeto que hay debajo [7].

Sol: Los objetos almacenan calor como resultado de la absorción de los rayos del sol, lo que afecta sobremanera a la temperatura de sus superficies, en algunos casos durante horas tras la exposición al sol [7].

Luz: La luz o iluminación no afectan a la medición con una cámara termográfica. Se puede medir en la oscuridad, ya que, la cámara mide la radiación

infrarroja de onda larga. Aun así, algunas fuentes de luz caliente emiten radiación infrarroja que pueden afectar a la temperatura de los objetos cercanos [7].

Es importante mencionar que la radiación infrarroja emitida depende de la temperatura y no del color de la superficie del objeto a medir. Un radiador pintado en negro emite exactamente la misma cantidad de radiación infrarroja de onda larga que un radiador blanco a la misma temperatura [7].

Las Figuras 3.8, 3.9 y 3.10, muestra cómo afectan las condiciones del entorno (reflejo, sol, y suciedad), en la captura con una cámara infrarroja. Es importante siempre observar y evaluar, para lograr una imagen termográfica correcta.

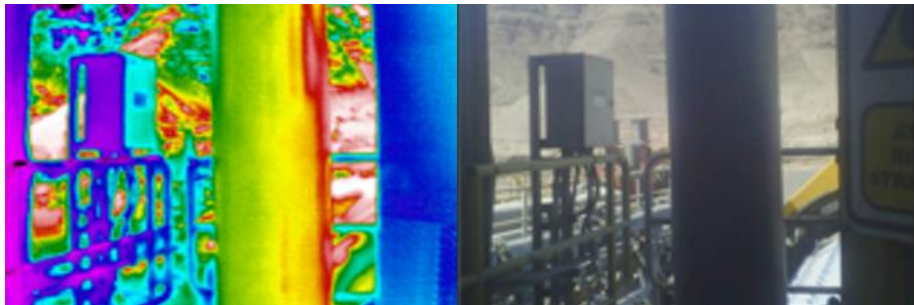


Figura 3.8 Reflejo [Fuente: Mantenimiento Pucobre]

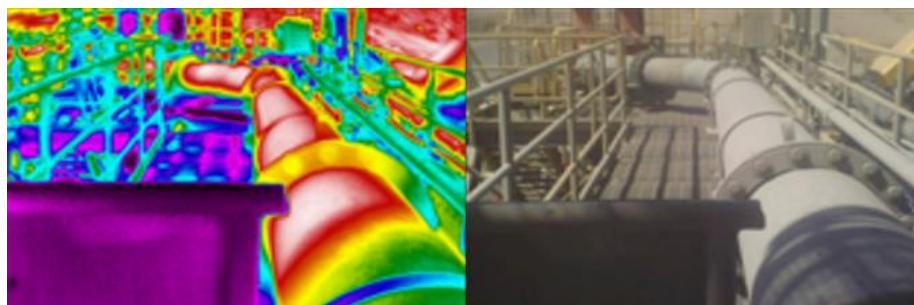


Figura 3.9 Sol [Fuente: Mantenimiento Pucobre]

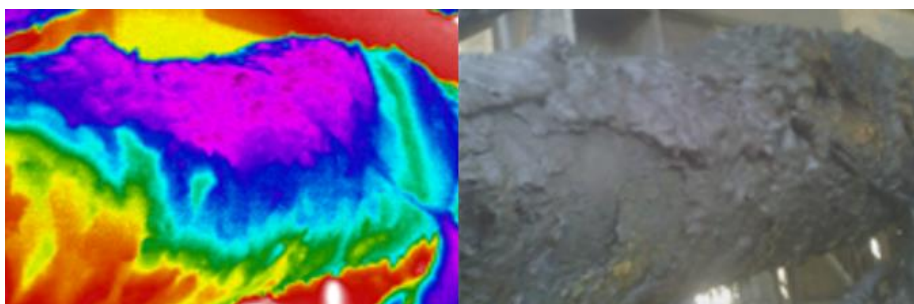


Figura 3.10 Suciedad y partículas [Fuente: Mantenimiento Pucobre]

3.6.1 Determinación Práctica de la Emisividad

Como primera alternativa, se recomienda consultar en la tabla de emisividades de los objetos, sin embargo, los valores son solo representativos, ya que, la emisividad de una superficie del objeto que se está midiendo puede ser diferente al de la tabla. Es por esta razón, es necesario entender y aplicar las distintas formas de determinar la emisividad de un objeto sin contar con la tabla de emisividades. Se pueden determinar de dos técnicas distintas, estas son:

Mediante un termómetro de contacto: Primero medir la temperatura de la superficie del objeto con un termómetro de contacto. A continuación, medir la temperatura de la superficie con la cámara termográfica con un ajuste de emisividad igual a 1 (emisividad máxima). La diferencia entre ambos valores es el resultado de la emisividad configurada demasiado alta, posteriormente ajustar gradualmente la emisividad hasta que ambos valores coincidan. Cuando esto se cumpla, el ajuste de emisividad corresponde a la emisividad de la superficie del objeto medido. [7]

Mediante una cámara termográfica: Primero enganchar un trozo de cinta adhesiva de emisividad al objeto a medir. Después de un momento, medir el área de la cinta con su emisividad respectiva, la temperatura medida es el valor de referencia. A continuación, se debe ajustar la emisividad hasta que la cámara mida la misma temperatura en cualquier zona sin la cinta, que el valor de referencia. El valor de emisividad ajustado corresponde a la emisividad de la superficie del objeto medido.

Tener en cuenta que, al momento de recubrir con cinta adhesiva, esta debe adaptarse a la temperatura del objeto antes de poder efectuar una medición correcta [7].

3.6.2 Recomendaciones para Evitar Errores en Medición por Infrarrojo

- Se recomienda configurar la emisividad según el objeto a medir. En la mayoría de las mediciones en la industria minera se recomienda mantener una emisividad estándar de 0.95, ya que, resulta muy bien para los diferentes equipos de la planta [7].
- Si se requiere mayor exactitud para determinar la temperatura del objeto, se debe configurar la temperatura ambiente (existen diversos equipos que pueden medir las condiciones climáticas) [7].
- Tener siempre en cuenta el efecto de la radiación infrarroja emitida por la persona que realiza la medición [7].
- Varíe la posición durante la medición para identificar cualquier reflexión. La reflexión se mueve, mientras que las características térmicas del objeto son inmóviles, incluso si cambia la perspectiva [7].
- Medir las superficies lisas desde diferentes ángulos y direcciones, para determinar qué irregularidades en la distribución de temperatura son atribuibles a la reflexión y cuales al objeto en el que se mide [7].
- Evitar la luz directa del sol. Es recomendable mediciones durante la mañana, especialmente en días nublados o en la noche si es posible para algunos casos [7].
- Evitar mediciones cuando se tenga presencia de superficies húmedas, ya que la temperatura de la superficie del objeto se enfría a medida que se evapora el agua, por consecuencia la temperatura captada es errónea [7].
- Evitar medir sobre suciedad, como la polución, grasa, concentrado y aceite. Si se presenta alguna de estas condiciones, es recomendable realizar limpieza de los objetos antes de la medición [7].
- Evitar mediciones con niebla espesa, ya que, el rocío presente en el canal de transmisión bloquea parte de la radiación infrarroja [7].
- En lo posible, realizar mediciones a la menor distancia entre la cámara termográfica y el objeto [7].

- Evitar alguna fuente de luz caliente, ya que, emiten radiación infrarroja que pueden afectar a la temperatura de los objetos cercanos [7].
- Asegurar enfocar la cámara en el momento de tomar la imagen, ya que, la nitidez no se puede modificar con posterioridad [7].
- Utilizar una cámara termográfica con cámara digital integrada para utilizar imágenes reales y analizarlas junto a las imágenes térmicas [7].

3.6.3 Condiciones Óptimas para Medición por Infrarrojo

Se debe tener presente que, en la práctica, es imposible que se den todas las condiciones óptimas para realizar la medición infrarroja, por lo tanto, se deben aplicar distintas técnicas que contribuyan a una termografía exitosa [7].

En un caso ideal para realizar las mediciones, se deben presentar las siguientes condiciones ambientales:

- Condición ambiental estable como el cielo nublado antes y durante la medición.
- Sin luz solar directa antes y durante la medición, en algunos casos es ideal la medición durante la noche.
- Sin precipitaciones.
- Superficie del objeto de medición seca y libre de otras influencias térmicas.
- Sin vientos y corrientes de aire.
- Tener conocimiento de la emisividad del objeto a medir.
- La superficie del objeto de medición tenga una emisividad elevada.
- Objetos libres de contaminación y suciedad.
- Sin interferencias en el entorno de medición.

3.6.4 Imágenes Térmicas Perfectas

Para tomar una imagen térmica perfecta, no solo se necesita que las condiciones externas se encuentran óptimas, sino que también, utilizar correctamente las herramientas que proporciona la cámara o el software, tales como: la elección de paletas, ajuste de escala y el enfoque.

- La Figura 3.11, muestra la elección de paletas de colores apropiadas al trabajo [7]. Estas son: isoterma, azul-rojo, arcoíris, y metal caliente.

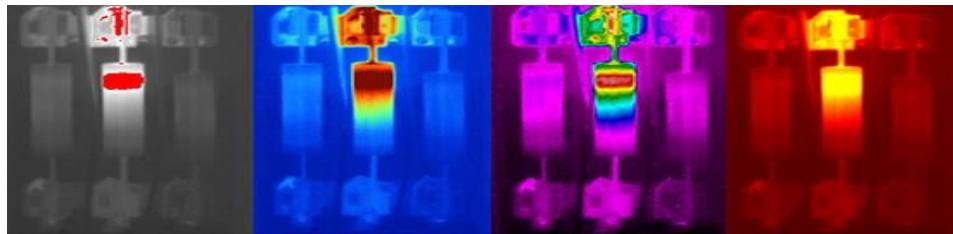


Figura 3.11 Paleta de colores [Fuente: Mantenimiento Pucobre]

- La Figura 3.12, muestra la herramienta de ajuste de la escala de temperatura (rango). Así se mejora la gradación de temperatura [7].

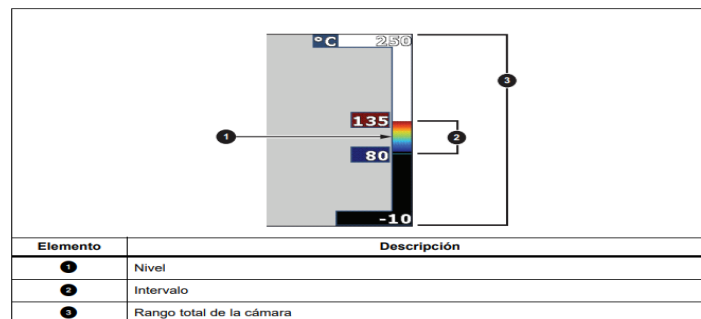


Figura 3.12 Escala de temperatura [Fuente: Manual de uso Fluke]

- La Figura 3.13, muestra la importancia del enfoque correcto de imagen.

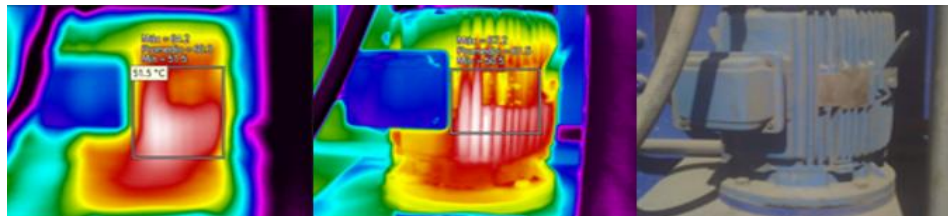


Figura 3.13 Enfoque de imagen [Fuente: Mantenimiento Pucobre]

3.7 Manejo Básico de Cámara Termográfica Fluke

Encendido y apagado de la cámara: Para ambas acciones mantener pulsado el botón durante 2 segundos. Al encender la cámara termográfica automáticamente entra en modo térmico. Para maximizar la vida útil de la batería, utilizar las funciones de ahorro de energía y apagado automático [10].

Enfoque manual: Con un enfoque correcto, se garantiza que la energía infrarroja se dirija correctamente a los píxeles del detector. En caso contrario, la imagen térmica puede verse borrosa y los datos radiométricos pueden ser inexactos. Con frecuencia, las imágenes de infrarrojos desenfocadas son inservibles o de escaso valor. Para enfocar con el sistema manual avanzado, girar el control de enfoque manual hasta que el objeto en cuestión esté enfocado correctamente. Existe la opción de enfoque automático, es un puntero láser o buscador de distancia de la cámara, sirve de ayuda visual y además forma parte del sistema LaserSharp Auto Focus LaserSharp Auto Focus [10].

Captura de imagen: Como se menciona anteriormente, como prioridad se debe enfocar correctamente el objeto de destino, posteriormente, pulsar y soltar el disparador principal [10].

Almacenamiento de imágenes: Después de capturar la imagen, queda en el búfer de la memoria y se puede guardar o editar. Para guardar la imagen presionar la opción F1 [10].

Menús: Presionar pantalla o F2, para mover hacia la opción requerida utilizar botones de subir y bajar, luego F1 para definir la opción [10].

Pantalla táctil: En la pantalla táctil se puede acceder a los ajustes más utilizados. Para cambiar parámetros o seleccionar funciones y opciones, realizar un ajuste de la pantalla [10].

Panel de control: Con el panel de control se pueden cambiar parámetros o seleccionar funciones y opciones [10].

Disparador primario (principal): Es el disparador más grande de color verde, su función es capturar la imagen deseada. Para videos presionar disparador principal para iniciar o detener la grabación de un vídeo, además, cuenta con un disparador secundario, es el disparador más pequeño y de color negro, su función es activar el sistema de enfoque automático LaserSharp [10].

Combinación de cámara termográfica y digital: El operador puede combinar imágenes de la cámara digital y la cámara termográfica. La imagen combinada muestra un recuadro sobre la foto digital con una sección de la termografía que se puede desplazar y cambiar de tamaño. Esto permite al operador localizar mejor los problemas [11].

Comentarios de voz: Permite grabar comentarios de voz durante la medición, lo que puede reducir a cero el tiempo empleado en escribir notas durante las inspecciones térmicas [11].

La Figura 3.14, muestra las distintas funciones de una cámara infrarroja.



Figura 3.14 Funciones cámara infrarroja [Fuente: Manual de uso Fluke]

3.8 Termografía Infrarroja en la Minería

El monitoreo de condiciones en la minería con la técnica de termografía infrarroja, se puede utilizar en diversos componentes, como: equipos, ductos, salas eléctricas y subestaciones. A continuación, se muestran algunos ejemplos de cada situación según su interpretación.

A. En los equipos como: motores, reductores, rodamientos, descansos, caja porta-rodamientos, etc., se detecta la alta temperatura, por diferentes causas, desalineación, problemas de fricción, obstrucciones del flujo, problemas con la transferencia de calor, lubricación deficiente, nivel de aceite inadecuado, tensión inadecuada, contaminación, etc. [5].

La Figura 3.15, muestra un motor con alta temperatura en bobina y rodamiento lado polea. Se recomienda chequeo de pata coja.

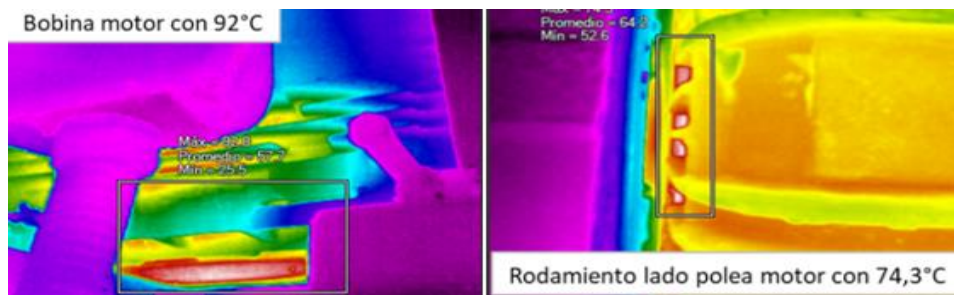


Figura 3.15 Alta temperatura en motor [Fuente: Mantenimiento Pucobre]

La Figura 3.16, muestra un rodamiento de polea lado izquierdo con alta temperatura, con un máximo de 64,7°C. Se recomienda cambio de rodamiento.

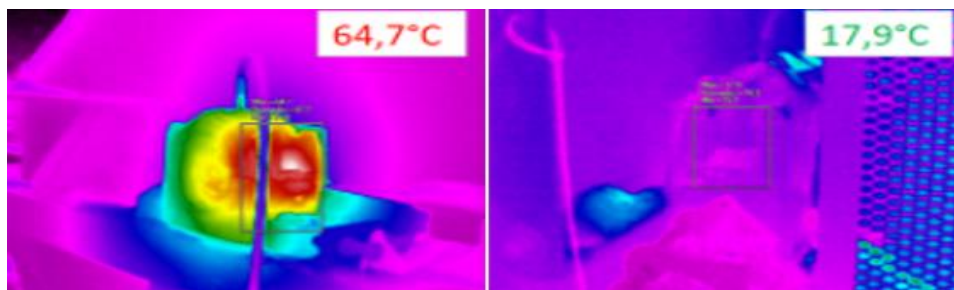


Figura 3.16 Alta temperatura en rodamiento [Fuente: Mantenimiento Pucobre]

La Figura 3.17, muestra las unidades vibratorias de un harnero. En rodamiento lado cardán presenta alta temperatura, con un máximo de 95,4°C. Se recomienda cambio de unidad vibratoria.

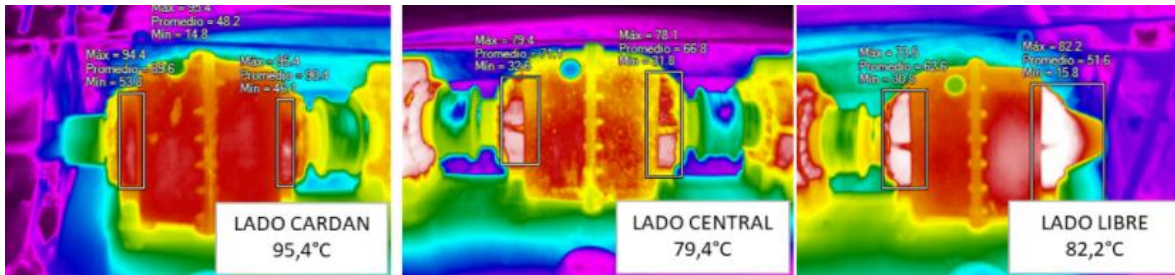


Figura 3.17 Alta temperatura en unidad vibratoria [Fuente: Mantenimiento Pucobre]

B. También permite detectar puntos de desgaste a través de un delta de temperatura evaluado con anterioridad. Se aplica principalmente en casco de molinos, ductos de acero, ductos de HDPE, carcasa de bombas.

La Figura 3.18, muestra puntos con anomalías térmicas en casco del molino, característica de pérdida de revestimiento. Se recomienda chequeo del casco.

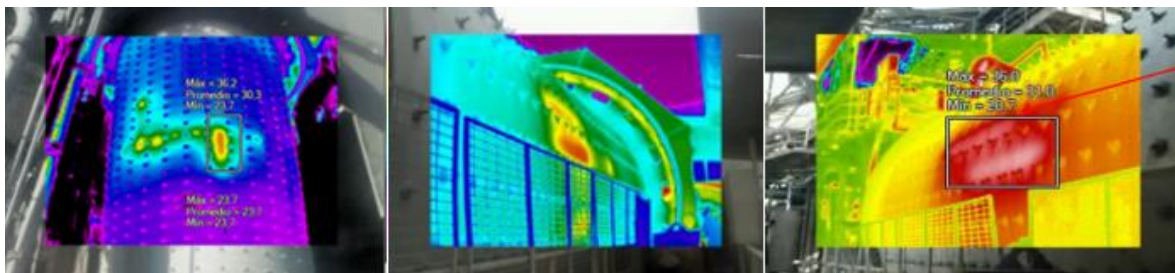


Figura 3.18 Desgaste en casco del molino [Fuente: Mantenimiento Pucobre]

La Figura 3.19, muestra la verificación de diagnóstico de la figura 3.18, como se puede apreciar, casco interno del molino presenta un desgaste severo.



Figura 3.19 Condición interna del casco [Fuente: Mantenimiento Pucobre]

Las Figura 3.20, muestra puntos con anomalías térmicas en carcasa de bomba. Se recomienda cambio de carcasa de bomba.

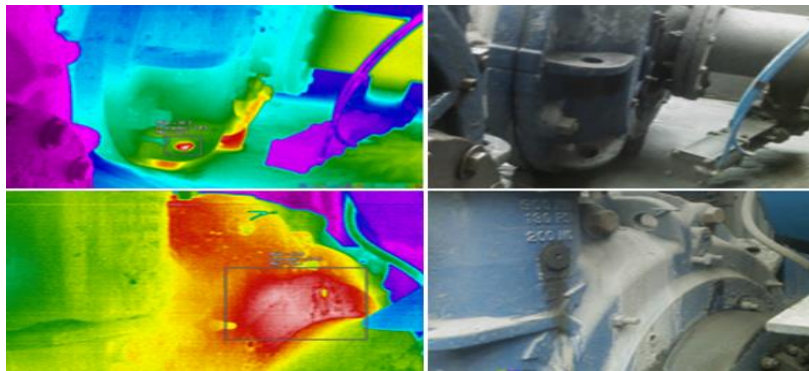


Figura 3.20 Desgaste en carcasa de bomba [Fuente: Mantenimiento Pucobre]

Las Figura 3.21, muestra puntos con anomalías térmicas en ductos, además, se identifican para su posterior intervención provisoria (empaste), revisión y cambio. Se recomienda cambio de ductos.

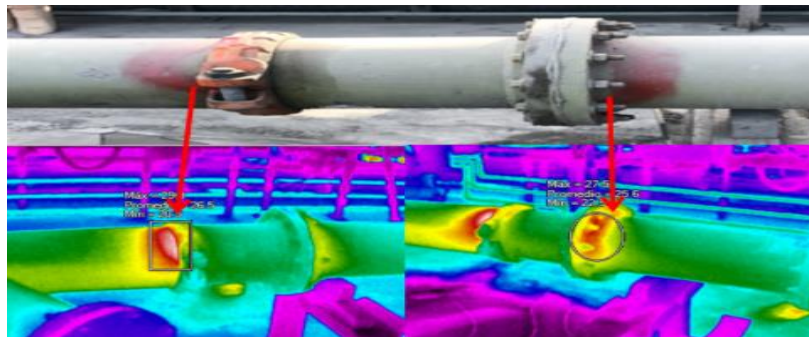


Figura 3.21 Desgaste en ductos [Fuente: Mantenimiento Pucobre]

Las Figura 3.22, muestra la verificación de diagnóstico del ducto mencionado anteriormente (Figura 3.21).



Figura 3.22 Condición interna de ductos [Fuente: Mantenimiento Pucobre]

C. Finalmente, la termografía infrarroja se da como uso fundamental en las salas eléctricas y subestaciones. Se analiza calculando los deltas de temperatura entre las tres fases (mínimos y máximos) y su criticidad con la recomendación dependen estrictamente de la norma designada (ANSI/NETA MTS). La Figura 3.2, muestra la norma utilizada en la compañía minera Pucobre.

Valores de Diferencia de t° en referencia a t° de componente similar bajo igual condición de carga	Valores de Diferencia de t° en referencia a t° normal (ambiente)	Plan acción	Descripción y Nivel de riesgo
1 °C - 3 °C	1 °C - 10 °C	Iniciar plan de mantención y verificación	Posible deficiencia o defecto Riesgo Tolerable
4 °C - 15 °C	11 °C - 20 °C	Reparación necesaria dentro de plazos acordados	Probable Deficiencia o defecto Riesgo Importante
-----	21 °C - 40 °C	Monitorear hasta que se realicen las medidas correctivas	Deficiencia o defecto mayor Riesgo Crítico
>15 °C	>40 °C	Reparación inmediata Peligro constante	Deficiencia o defecto mayor Riesgo Crítico

Tabla 3.2 Referencia estándar ANSI/NETA [Fuente: www.emb.cl]

La Figura 3.23, muestra una anomalía térmica en bushing de fase “T”, con un delta de temperatura de 84,3°C. Se recomienda reparación inmediata.



Figura 3.23 Delta de temperatura entre fases [Fuente: Mantenimiento Pucobre]

La Figura 3.24, muestra la verificación de diagnóstico del bushing de fase “T”, mencionado anteriormente (Figura 3.23). Se observa un mal montaje de prensa.



Figura 3.24 Mal montaje de prensa [Fuente: Mantenimiento Pucobre]

La Figura 3.25, muestra una anomalía térmica en el automático, con un delta de temperatura de 9.8°C (riesgo importante).

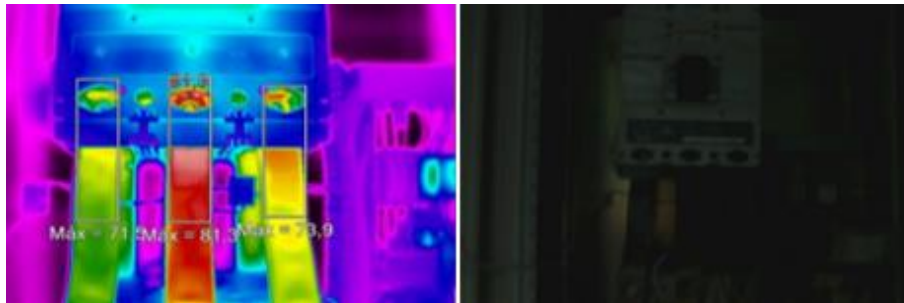


Figura 3.25 Riesgo importante [Fuente: Mantenimiento Pucobre]

La Figura 3.26, muestra una anomalía térmica en el automático, con un delta de temperatura de 14.7°C (riesgo importante). Se recomienda reapriete de conexiones y revisar el estado del automático.

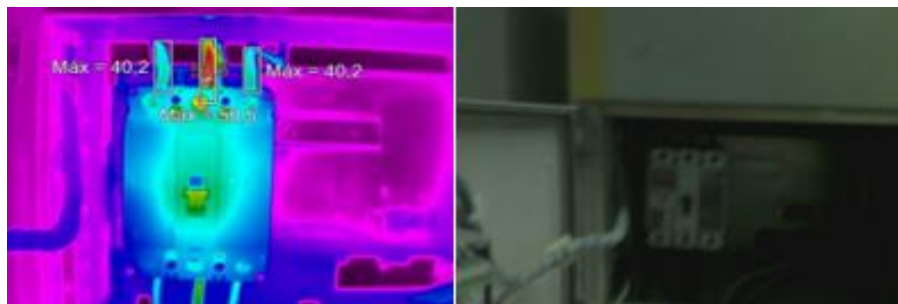


Figura 3.26 Riesgo importante [Fuente: Mantenimiento Pucobre]

La Figura 3.27, muestra una anomalía térmica en el automático, con un delta de temperatura de 41.9°C (riesgo crítico). Se recomienda reparación inmediata.

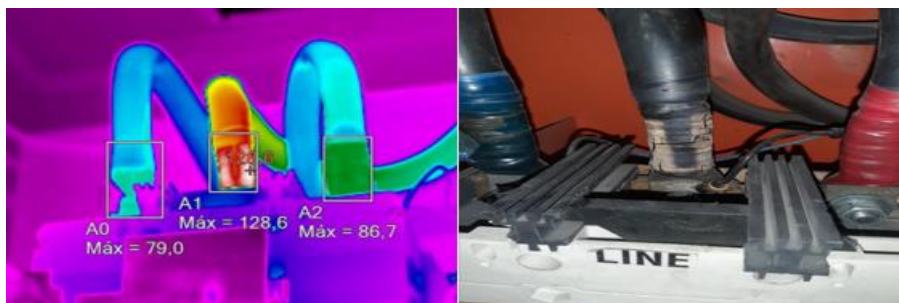


Figura 3.27 Riesgo crítico [Fuente: Mantenimiento Pucobre]

3.9 Charla de Medición y Análisis de Termografías



1



4



2



5



3



6

Principio de Operación de Cámaras Térmicas

La cámara térmica, recolecta la radiación infrarroja con su lente, la enfoca hacia el detector y la respuesta eléctrica de este, la cual es proporcional a la intensidad del calor, permite procesar señales eléctricas y generar una compleja imagen de la distribución del calor en el objeto.

7

Conceptos Básicos

Espectro electromagnético
 Se describe a la distribución energética del conjunto de las ondas electromagnéticas. Se extiende desde la radiación de menor longitud de onda a mayor longitud.
 Longitud de onda de mayor a menor.
 Frecuencia de menor a mayor.
 Energía de un fotón de menor a mayor.

10

Conceptos Básicos

El calor y la temperatura son conceptos distintos.

- Calor: Es energía térmica en movimiento de un lugar a otro. Unidad de Medida Joules. Entre mayor sea el movimiento interatómico y molecular de un objeto, mayor es su energía interna, y por lo tanto, mayor su potencial para transferir calor.
- Temperatura: La temperatura, es una medida de la energía cinética medida de las partículas en una muestra de la materia. Es decir, la temperatura es una medida de actividad y de la frecuencia de colisiones de moléculas.

8

Conceptos Básicos

Radiación Infrarroja
 Es la radiación electromagnética de calor. Cada objeto, con una temperatura superior al cero absoluto, emite radiación infrarroja.

11

Conceptos Básicos

"A mayor velocidad de las partículas, mayor es la temperatura del material y ha mayor temperatura un cuerpo tiene una mayor cantidad de energía térmica y por lo tanto, un mayor potencial de transferir calor".

9

Mecanismos de Transferencia de Calor

Existen tres mecanismos de transferencia de calor:

- Conducción.
- Convección.
- Radiación.

12

Medición Infrarroja


- La cámara termográfica transforma la energía infrarroja en una imagen, con un mapa de colores, que nos muestra la temperatura del objeto en cada punto.
- Emisividad**
Uno de los parámetros más importantes a la hora de realizar una medición termográfica.


Materia	Cuerpo negro	Hielo	Aluminio pulido	Hielo	Madera	Edificio (interior)	Acero	Acero (interior)	Aluminio	Aluminio	Aluminio
Emisividad	1	0,95	0,02	0,02	0,85	0,90	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10


13

Conceptos de Termografía Práctica

- Algunos ejemplos:

Reflejo: 

Sol: 

Contaminación: 

16

Medición Infrarroja

- Reflexión.**
Es la medida de la capacidad de un objeto de reflejar la radiación infrarroja.
- Transmisión.**
Es la medida de la capacidad de un material de transmitir (permitir el paso) de la radiación infrarroja.

$\epsilon + \rho = 1$



14

Determinación Práctica de la Emisividad

- Como primera alternativa, se recomienda consultar con la tabla de emisividades.
- Como segunda opción, enganchar un trozo de cinta adhesiva al objeto a medir; posteriormente, realizar medición del objeto en la cinta adhesiva, la temperatura medida es el valor referencia. A continuación, ajustar la emisividad, hasta que la cámara mida la misma temperatura en cualquier zona sin la cinta.

17

Conceptos de Termografía Práctica

- Se debe tener en cuenta los distintos factores que pueden contribuir con errores en la medición, tales como:

Configuración de la cámara (Emisividad).

Superficie del objeto a medir (Emisividad varía según su estructura).

Contaminación (cámara termográfica medirá la temperatura del material y no del objeto deseado).

Condiciones climáticas (sol y luz).

15

Recomendaciones para Evitar Errores en la Medición

- Emisividad.
- Configurar la temperatura ambiente.
- Tener en cuenta el efecto de la radiación infrarroja emitida por la persona.
- Cambiar posición durante la medición para identificar cualquier reflexión.
- Evitar la luz directa del sol.
- Evitar mediciones cuando existe presencia de contaminación.
- Evitar mediciones en superficies húmedas.
- No alejarse demasiado del objeto a medir.
- Evitar fuente de luz caliente.
- En lo posible, utilizar cámara infrarroja y digital para evitar un análisis termográfico erróneo.

18

Condiciones Optimas para Medición por infrarrojo

- Condición ambiental estable (vulbado).
- Mediciones durante la noche.
- Superficie del objeto limpio.
- Tener conocimiento de la emisividad del objeto.
- Objeto a medir tenga una emisividad elevada.
- Cercano al objeto a medir.
- Disponer de una cámara infrarroja y digital.

19

Termografías Infrarrojas en la Minería

- Algunos equipos que se realiza medición de termografías, son los siguientes:

Motor:
 Reductor:
 Rotamiento:
 Caja porte-rotamiento.
 Etc.


- Se detecta alta temperatura, por:

Desalineamiento.
 Fricción.
 Obstrucción de flujo (aumenta amperaje de motor).
 Lubricación deficiente.
 Etc.

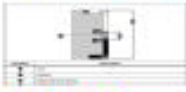
22

Imágenes Térmicas Perfectas

- Dirección de paletas apropiadas para el objeto a medir.



- Ajustar la escala para visualizar el objeto de interés.



- Enfoque correcto.



20

Termografías Infrarrojas en la Minería

- Alta temperatura en bobina y rodamiento lado polea de motor, 92°C.

Se recomienda chequeo de pata coja.

- Rodamiento bobinado de polea con alta temperatura, 64,7°C.

Se recomienda cambio.

- Rodamiento lado carlin con alta temperatura, 92°C.

Se recomienda cambio.



23

Manejo Básico de la Cámara Termográfica FLUKE



Labels include: Pantalla táctil, Cámara térmica, Botón de encendido, Botón de apagado, Botón de zoom, Botón de menú, Botón de configuración, Botón de ayuda, Botón de inicio, Botón de apagado, Botón de encendido, Botón de zoom, Botón de menú, Botón de configuración, Botón de ayuda, Botón de inicio.

21

Termografías Infrarrojas en la Minería

- También, permite detectar puntos con desgaste a través de un delta de temperatura evaluado con acorsonidad.
- Ejemplo 1: Carrova de bomba.

Anomalia térmica.
 Imagen digital.



24

Termografías Infrarrojas en la Minería

- Ejemplo 2: Cárcel de motor.
- Anomalia térmica.
- Verificación de diagnóstico.



25

Termografías Infrarrojas en la Minería

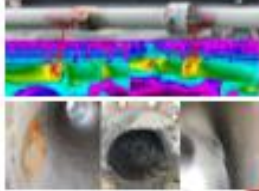
- Ejemplo 1: Anomalia térmica en el automático.
- Delta de temperatura, 14,7°C.
- Imagen digital.
- Riesgo importante.



28

Termografías Infrarrojas en la Minería

- Ejemplo 3: Ductos.
- Anomalia térmica.
- Verificación de diagnóstico.



26

Termografías Infrarrojas en la Minería

- Ejemplo 2: Anomalia térmica en el automático.
- Delta de temperatura, 9,8°C.
- Imagen digital.
- Riesgo importante.



29

Termografías Infrarrojas en la Minería

- Finalmente, la termografía infrarroja, se da como uso fundamental en salas eléctricas y subestaciones.
- Se calcula el delta de las tres fases (mínimo y máximo).
- Si existe un delta de temperatura, se evalúa según norma del grado.

Intervalo de Temperatura (°C)	Delta de Temperatura (°C)	Acción	Recomendación
10-20	1-3	Medida de rutina	Normal
20-30	3-5	Revisión de rutina	Atención
30-40	5-10	Revisión de rutina	Alta Atención
40-50	10-15	Revisión de rutina	Alta Atención

27

Termografías Infrarrojas en la Minería

- Ejemplo 3: Anomalia térmica en el automático.
- Delta de temperatura, 41,9°C.
- Reparación inmediata.



30

Termografías Infrarrojas en la Minería

Ejemplo 4: Anomalia térmica en bushing fase T.
Delta de temperatura, 84,3°C.
Reparación inmediata.
Verificación de diagnóstico.



31

Conclusiones

32

Muchas gracias por su atención



33

Capítulo 4 MEDICIÓN DE ULTRASONIDO

4.1 Historia de la Detección de Discontinuidades

Se le conoce inicialmente como ensayo de percusión, y es considerado el más antiguo método de E.N.D. (ensayos no destructivos), para detectar discontinuidades en piezas, utilizando ondas acústicas. Este método, utilizado en la evaluación grosera de piezas forjadas y fundidas, se realiza con un martillo y comparando la intensidad sonora de la pieza sin discontinuidades o también llamado patrón, contra la pieza de producción idéntica [12].

Por los años 1929, Sokolov de la Unión Soviética y Mulhauser de Alemania, realizan las primeras experiencias, utilizando la anergia ultrasónica, que posibilita su uso en ensayos de materiales. La energía ultrasónica es transmitida a un lado de la cara de la pieza y recibida al otro lado (ésta es la técnica de transparencia) [12].

Por otro lado, el principio de tren de ondas en pulsos es desarrollado por Firestone, por los años 1942, con la fabricación de transductores y equipos de ultrasonido, utilizado para ubicar submarinos (este instrumento es conocido más adelante con el nombre de sonar) [12].

Ya, a partir del año 1945 en adelante, existe un gran desarrollo constituyéndose este tipo de ensayo, en una gran y poderosa herramienta para controlar la calidad de los materiales o componentes, transformándose con el tiempo, en uno de los más versátiles ensayos en el área no destructiva, permitiendo con esto su utilización en el campo de la odontología, medicina, industria aeronáutica, naval, de alimentos, minería, celulosa, metalmecánico, etc. [12].

4.2 Clasificación de las Pruebas No Destructivas

La clasificación de las pruebas no destructivas se basa en la posición donde se ubican las discontinuidades que pueden ser detectadas, por lo que se clasifican en: pruebas no destructivas superficiales, pruebas no destructivas volumétricas y pruebas no destructivas de hermeticidad [12].

Las pruebas no destructivas superficiales, proporcionan información acerca de la sanidad superficial de los materiales inspeccionados. Los métodos de pruebas no destructivas son: Inspección visual, líquidos penetrantes, partículas magnéticas y electromagnetismo [12].

La inspección visual y los líquidos penetrantes, tienen el alcance de detectar solamente discontinuidades superficiales (abiertas a la superficie), por otro lado, con las partículas magnéticas y el electromagnetismo se detectan tanto discontinuidades superficiales, como subsuperficiales (debajo de la superficie, pero muy cercana a ella) [12]. La Figura 4.1, muestra pruebas no destructivas superficiales realizadas con partículas magnéticas.



Figura 4.1 Pruebas no destructivas superficiales [Fuente: Mantenimiento Pucobre]

Las pruebas no destructivas volumétricas proporcionan información acerca de la sanidad interna de los materiales inspeccionados. Los métodos de pruebas no destructivas son: radiografía industrial, ultrasonido industrial y emisión acústica [12].

Estos métodos permiten la detección de discontinuidades internas y subsuperficiales, así como bajo ciertas condiciones, la detección de discontinuidades superficiales [12]. La Figura 4.1, muestra pruebas no destructivas volumétricas.



Figura 4.2 Pruebas no destructivas volumétricas [Fuente: Mantenimiento Pucobre]

Por último, las pruebas no destructivas de hermeticidad, proporcionan información del grado en que pueden ser contenidos los flujos en recipientes, sin que escapen a la atmósfera o queden fuera de control. Los métodos son: fuga, pruebas por cambio de presión (neumática o hidrostática), pruebas de burbuja, pruebas por espectrómetro de masas y pruebas de fuga con rastreadores de halógenos [12].

4.3 Ensayos No Destructivos

Las pruebas no destructivas son herramientas fundamentales y esenciales para el control de calidad de materiales de ingeniería, procesos de manufactura,

confiabilidad de productos en servicio y mantenimiento de sistemas cuya falla prematura puede ser costosa o desastrosa [12].

Se identifican con las siglas: P.N.D (pruebas no destructivas), y se consideran sinónimos: ensayos no destructivos (E.N.D en español y NDT en inglés), inspecciones no destructivas y exámenes no destructivos [12].

Los productos o materiales que necesitan pruebas o evaluación cuidadosa, son aquellos utilizados para aplicaciones en las cuales deben soportar cargas, bajo estas condiciones la falla puede involucrar: sacar de operación, desechar el producto, reparaciones costosas, dañar otros productos y la pérdida humana [12].

La Figura 4.3, muestra las partes de un eje de polea.

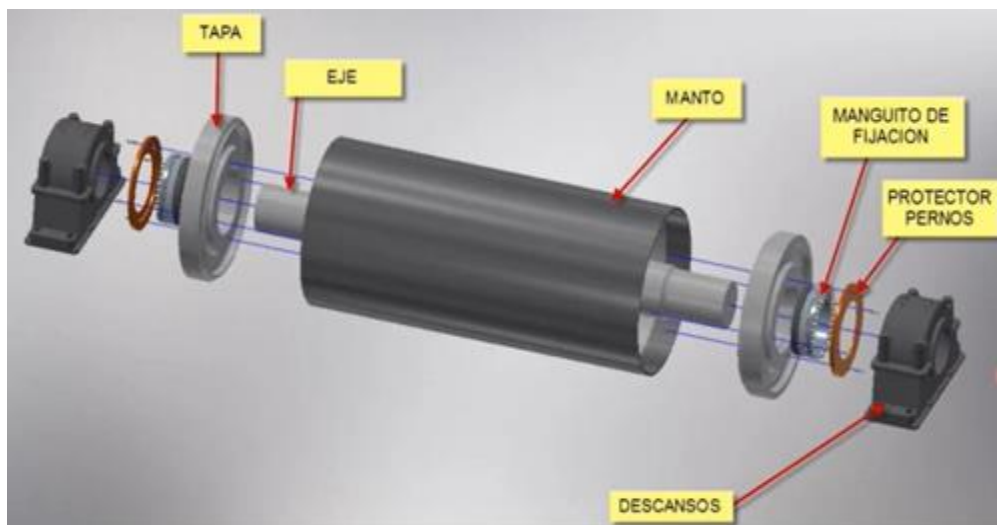


Figura 4.3 Soporte de carga, ejes de poleas [Fuente: Poleas Revesol]

Para prevenir la falla por medio del uso de pruebas no destructivas, estas deben ser seleccionadas, aplicadas e interpretadas con cuidado y basándose en el conocimiento válido de los mecanismos de falla y sus causas. El propósito del diseño y aplicación de las pruebas, debe ser el control efectivo de los materiales y productos, con el fin de satisfacer un servicio sin que presente la falla prematura o un daño [12].

El conocimiento de materiales y sus propiedades es muy importante para cualquier persona involucrada con las pruebas no destructivas [12].

La fuente de falla puede ser: discontinuidad, material químicamente incorrecto o un material tratado de tal forma que sus propiedades no son adecuados [12].

La tabla siguiente muestra la velocidad de propagación de una onda en diferentes medios materiales, sin embargo, los valores de la tabla corresponden a valores ideales. Es importante remarcar que el valor de velocidad de propagación del sonido no es absoluto y que para cada material mencionado pueden existir variables para dicha velocidad [13].

Material	Velocidad de propagación	
	Metros / Segundo	Pulgada / miliseq.
Acero	5900	232.2
Acero de fundición	4500	177.1
Acero inoxidable 302	5660	222.0
Acero inoxidable 304	5752	222.5
Acero inoxidable 347	5790	227.8
Acero p / herramientas	5870	231.0
Agua	1498	59.00
Aluminio	6300	248.0
Berilio	12900	507.8
Bronce	3500	137.7
Bronce Fosforoso	3530	138.0
Cadmio	2800	110.2
Hierro de fundición	4600	181.0
Caucho (Vulc)	2300	90.55
Caucho RTV	0948	37.30
Cinc	4200	165.3
Cobre	4700	185.0
Diamante	17500	688.9
Fenolico	1400	55.11
Laton (naval)	4430	174.0
Laton (Amarillo 70Cu 30Zn)	4700	185.0
Magnesio	5800	228.3
Manganeso	4700	185.0
Molibdeno	6300	248.0
Neopreno	1600	62.99
Niquel	5600	220.4
Nylon	2600	102.3
Oro	3200	125.9
Plata	3600	141.7
Platino	4000	157.4
Plexiglás	2700	106.2
Plomo	2200	86.61
Poliestileno	2400	94.48
Poliétileno	1900	74.80
Poliuretano	1900	74.80
Porcelana	5600	220.4
PVC	2395	94.00
Estaño	3320	130.7
Titanio	5900	232.2
Tungsteno	5400	212.5
Uranio	3370	133.0
Vidrio	4250	167.3
Zilcaloy 2	4700	185.0

Tabla 4.1 – Velocidad de propagación de materiales [Fuente: Docplayer]

4.4 Ultrasonido Industrial

El sonido es la propagación de energía mecánica a través de sólidos, líquidos y gases. El principio en el que se basa la inspección por ultrasonido es el hecho que materiales diferentes presentan diferentes impedancias acústicas.

Con frecuencias mayores al rango audible (16 a 20.000 ciclos/segundo) se conoce con el nombre de ultrasonido, el cual se propaga a través de medios sólidos y líquidos, considerados como medios elásticos. A frecuencias mayores a 100.000 ciclos/segundo y gracias a su energía, el sonido forma un haz similar a la luz, por lo que es utilizado para rastrear el volumen de materiales [12]. La Figura 4.4, muestra un esquema de frecuencias, estas son: infrasonido, voz y ultrasonido.



Figura 4.4 Esquema de frecuencias [Fuente: Ensayos ultrasónicos]

La Figura 4.5, muestra la inspección por ultrasonido, se realiza básicamente por el método en el cual, la onda ultrasónica se transmite y se propaga dentro de una pieza hasta que es reflejada, y regresa al transmisor proporcionando información de su recorrido [12].

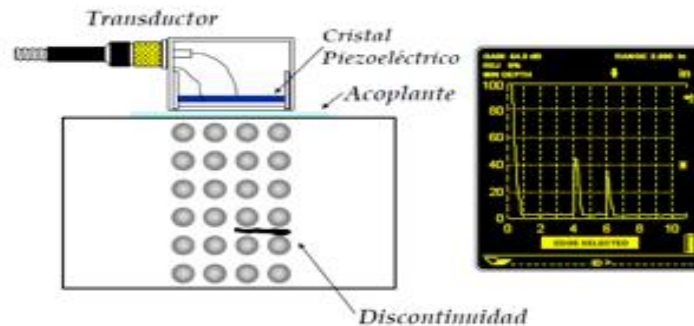


Figura 4.5 Recorrido de onda ultrasónica [Fuente: elearning.itecpro.cl]

Cuando se lleva a cabo una inspección por el método de ultrasonido industrial, se requiere del uso de un sistema de inspección ultrasónica [12]. La Figura 4.6, muestra los componentes básicos de una inspección ultrasónica.

Está constituido por los siguientes componentes básicos:

1. Generador de la señal eléctrica, instrumento ultrasónico.
2. Conductor de la señal eléctrica, cable coaxial.
3. Elemento transmisor – receptor, transductor.
4. Medio para transferir la energía acústica a la pieza y viceversa, acoplante acústico.
5. Pieza inspeccionada.
6. Superficie que refleje la energía ultrasónica, interfase acústica (Discontinuidad o Pared Posterior)

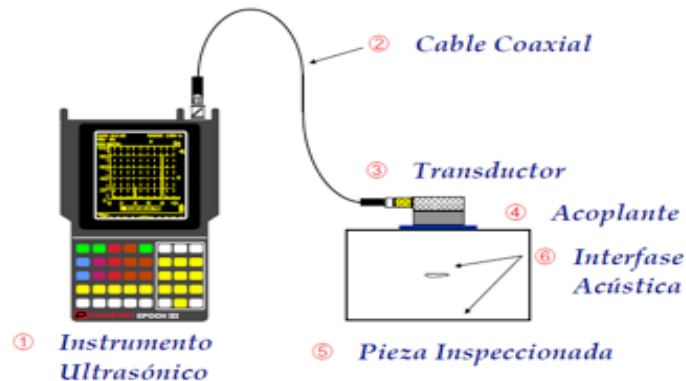


Figura 4.6 Componentes básicos [Fuente: elearning.itecpro.cl]

Las principales aplicaciones consisten en la detección y caracterización de discontinuidades y medición de espesores [12].

4.4.1 Ventajas y Desventajas de Inspección por Ultrasonido

Las principales ventajas y desventajas del método de inspección por ultrasonido son:

Ventajas:

- Proporciona gran poder de penetración, lo que permite la inspección de grandes espesores.
- Se tiene gran sensibilidad, ya que se pueden detectar discontinuidades extremadamente pequeñas.
- Gran exactitud para determinar la posición, estimar el tamaño, orientación y forma de discontinuidades.
- Se necesita una sola superficie de acceso.
- La interpretación de los resultados es inmediata.
- No existe peligro o riesgo en su aplicación.
- Los equipos son portátiles.
- Los equipos actuales tienen la capacidad de almacenar información en sus memorias.

Desventajas:

- Requiere de personal técnico con mucha experiencia para la interpretación y evaluación de resultados.
- Las piezas que son rugosas, de forma irregular, muy pequeñas o delgadas, son difíciles de examinar.
- Se requiere el empleo de bloques estandarizados para la calibración del sistema y caracterización de discontinuidades.
- Durante la inspección es necesario el uso de un material acoplante.
- Discontinuidades sub-superficiales pueden no ser detectadas.

4.5 Naturaleza de las Ondas

Por su naturaleza, las ondas se clasifican en mecánicas y electromagnéticas. Las ondas mecánicas, son aquellas originadas por la deformación de una región del medio elástico y que para su prolongación necesita un medio material. Por esto, es por lo que las ondas mecánicas no se propagan en el vacío, por ejemplo, la cuerda y la piedra que caen al estanque [12].

Si se arroja una piedra en un lago, se pueden observar los frentes de ondas de forma circular que nacen en el lugar del impacto. Estos frentes de ondas no arrastran agua sobre la superficie del lago, sino que producen una deformación (oscilación) sobre la superficie, la que vuelve a su forma original después de pasar la onda. Es decir, la onda se propaga a través de oscilaciones [14].

Con respecto a la cuerda, cuando se trata de una perturbación que se propaga sin que haya transporte de materia, se habla de pulso, a diferencia de lo que se produce cuando se agita regularmente la mano, en que se le llama de tren de ondas, onda periódica o simplemente onda, es decir, una sucesión de pulsos [14].

La Figura 4.7, muestra las ondas mecánicas mencionadas anteriormente.



Figura 4.7 Ondas mecánicas [Fuente: <https://slideplayer.es>]

Las ondas sonoras, son ondas de naturaleza mecánica, que son producidas por oscilaciones mecánicas (Figura 4.7, en un medio elástico. Cuando son transmitidas al sentido de audición, son captadas por éste como una impresión fisiológica llamada sonido [12].

Por lo anterior, el sonido es el fenómeno acústico que consiste en la propagación de ondas sonoras, producidas por un cuerpo que vibra en un medio material elástico. Estas ondas a su vez se propagan en los sólidos, líquidos y gases. Ellos son fundamentales para el estudio del ensayo por ultrasonido.

Las ondas electromagnéticas son originadas por cargas eléctricas oscilantes. Estas ondas se propagan en el vacío y en los medios materiales. Ejemplos de las ondas electromagnéticas son: luz, ondas de radio, microondas, rayos x, etc.

4.6 Conceptos Básicos

El sonido es cuando las ondas sonoras tienen frecuencias comprendidas entre 20Hz y 20.000Hz, éstas pueden ser percibidas por el oído humano, esto significa que son audibles.

El infrasonido es cuando las ondas sonoras tienen frecuencias inferiores a 20 Hz, son inaudibles.

El ultrasonido es cuando las ondas sonoras tienen frecuencias superiores a 20.000Hz, son también inaudibles.

Para la aplicación en ensayos de materiales por ultrasonido, se utiliza frecuentemente una banda de frecuencia entre 0,5MHz y 15MHz.

El periodo o ciclo es la repetición completa del movimiento de la onda. Puede definirse también como la repetición completa del movimiento de las partículas.

Longitud de onda se puede definir como la distancia requerida para completar un ciclo o la distancia, desde un punto dado en un ciclo al mismo punto en el siguiente ciclo.

La frecuencia se define como el número total de periodos o ciclos completos que pasan por un punto por unidad de tiempo, normalmente un segundo. El ultrasonido se maneja en unidades de Hertz (Hz), que tiene la siguiente equivalencia: 1 Hz = 1 ciclo/ segundo.

La amplitud es el desplazamiento máximo en el eje Y, de una onda.

La Figura 4.8, muestra las partes de una onda (longitud, amplitud y nodos).

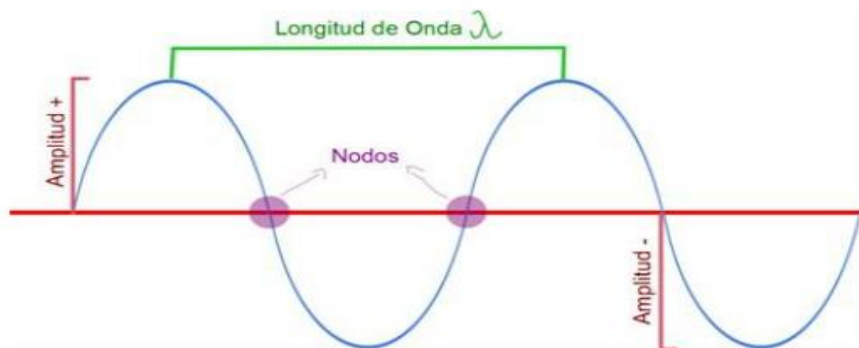


Figura 4.8 Partes de una onda [Fuente: <https://slideplayer.es>]

La velocidad acústica en ultrasonido se define como la distancia total de viaje por unidad de tiempo. Sus unidades de medida son: metros/segundo, centímetros/segundo, milímetros/segundo o pulgadas/segundo. La unidad más utilizada es milímetros/segundo (mm/s). Está determinada normalmente por: el módulo de elasticidad del material y su densidad. Esta puede ser afectada en segunda instancia, por la temperatura del material y el modo de onda.

En la inspección por ultrasonido, la velocidad acústica es de gran importancia, puesto que los instrumentos ultrasónicos deben calibrarse considerando el valor de ésta para el material que debe ser inspeccionado, esto se debe a que una sola calibración con un valor de velocidad no puede ser utilizado para la inspección de una variedad de materiales diferentes, ya que, es una constante del material [12].

La siguiente expresión matemática representa la relación entre las características mencionadas de la onda ultrasónica:

$$\text{Longitud de onda} = \text{Velocidad} / \text{Frecuencia}$$

4.7 Modo de Ondas Ultrasónicas

Como se menciona anteriormente, la energía ultrasónica se propaga en un material por medio de la vibración de sus partículas, se transmite de un átomo a otro. La dirección en la que vibren las partículas con respecto a la dirección en la que se propaga la onda ultrasónica, hace posible la existencia de varios tipos de ondas. Los modos de vibración o de onda son: Ondas longitudinales o de compresión, ondas de corte o transversales y ondas superficiales o de Rayleigh.

En la inspección por ultrasonido, los modos de onda más frecuentemente utilizados son las ondas longitudinales y de corte.

Las ondas longitudinales o de compresión, su característica principal de estas ondas es que provocan que las partículas vibren en dirección paralela con respecto a la velocidad de propagación de la onda ultrasónica. También son llamada, onda de compresión, puesto que existen zonas donde los planos de las partículas se encuentran extremadamente cercanos entre sí, y existen zonas dilatadas donde los planos de las partículas están muy separados. Es el único modo de onda que puede propagarse a través de sólidos, líquidos y gases. Cuando se utiliza este modo de vibración en la inspección por ultrasonido, se identifica comúnmente con el termino de haz recto [12]. La Figura 4.9, muestra la dirección de propagación de las ondas longitudinales.

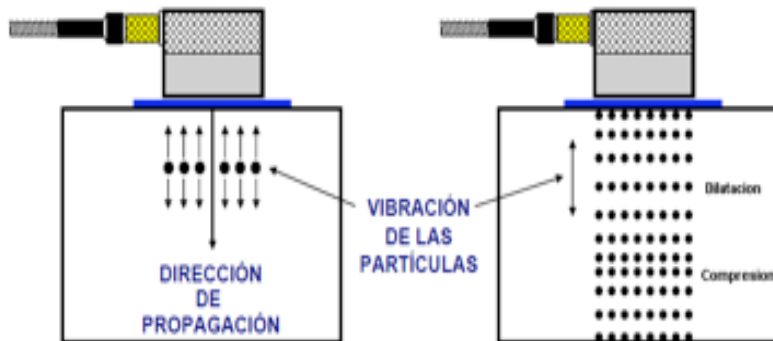


Figura 4.9 Ondas longitudinales [Fuente: elearning.itecpro.cl]

Las ondas de corte o transversales están caracterizadas porque las partículas vibran en dirección perpendicular con respecto a la velocidad de propagación de la onda ultrasónica. Esta forma de onda se propaga solamente a través de sólidos. Su velocidad es de aproximadamente la mitad de la velocidad de las ondas longitudinales. Son introducidas en la pieza utilizando un transductor de haz angular. El transductor de haz angular consiste en un accesorio transductor montado sobre una cuña o zapata de plástico, para que la onda ultrasónica entre en la pieza a un cierto ángulo. En la inspección por ultrasonido, se identifica comúnmente con el término de haz angular [12]. La Figura 4.10, muestra la dirección de propagación de las ondas transversales.

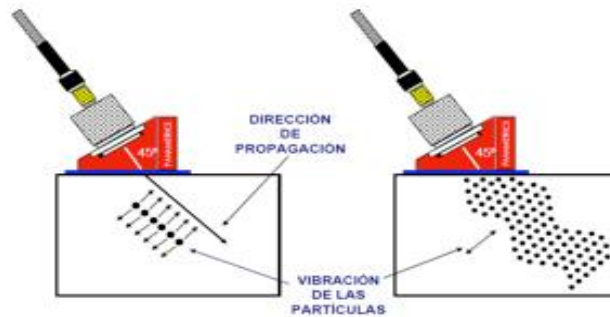


Figura 4.10 Ondas transversales [Fuente: elearning.itecpro.cl]

Ondas superficiales o de Rayleigh originan que las partículas de la superficie o cercanas a ella vibren en forma elíptica. Su velocidad es de aproximadamente el 90% de la velocidad de las ondas de corte y se propagan únicamente a través del borde o superficie de sólidos. Las ondas de superficie son adecuadas para detectar fallas superficiales como las grietas. También pueden ser utilizadas para detectar discontinuidades ligeramente por debajo de la superficie [12]. La Figura 4.11, muestra la dirección de propagación de las ondas.

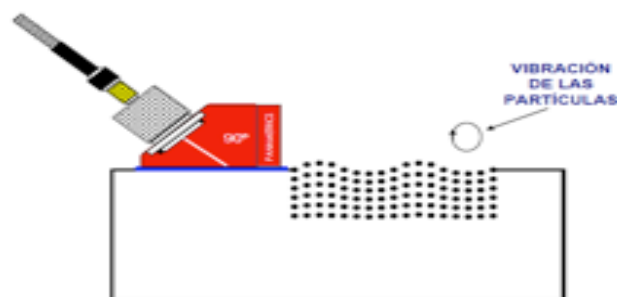


Figura 4.11 Ondas superficiales [Fuente: elearning.itecpro.cl]

4.8 Generación de Vibraciones

Las vibraciones mecánicas utilizadas para realizar mediciones, análisis o inspecciones, son generadas por transductores electromecánicos. En general, un transductor es cualquier accesorio que transforme energía de una forma a otra.

El accesorio adaptado a la inspección ultrasónica es conocido como: transductor, palpador, unidad de rastreo, cristal o sonda [12]. La Figura 4.12, muestra las partes de un transductor.

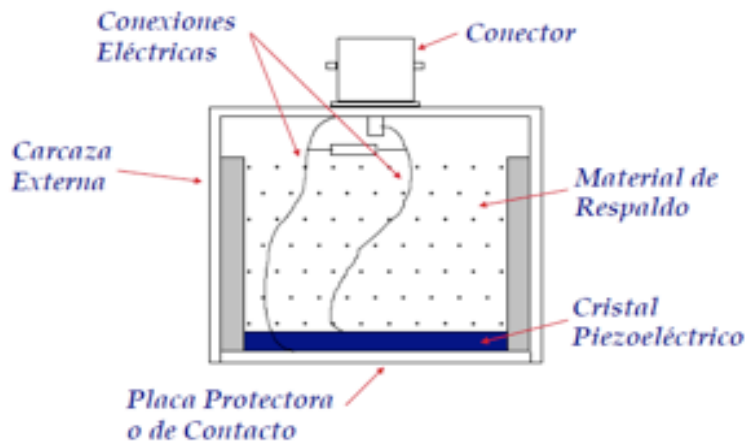


Figura 4.12 Partes de un transductor [Fuente: Ilog]

El diseño y construcción de un transductor, depende de factores y variables involucradas en cada inspección, tales como: El material del elemento activo (piezoeléctrico, como se muestra en la figura 4.12), El espesor del elemento activo, la placa frontal (superficie de contacto), la forma del transductor y el grado de amortiguamiento.

Existen 4 tipos de transductores ultrasónicos:

1. Haz recto de contacto
2. Haz angular de contacto
3. Doble cristal de contacto
4. De inmersión

Sin embargo, el transductor de haz recto y doble cristal son los utilizados con mayor frecuencia. La Figura 4.13, muestra los tipos de transductores: haz recto de contacto, doble cristal de contacto y haz angular de contacto.

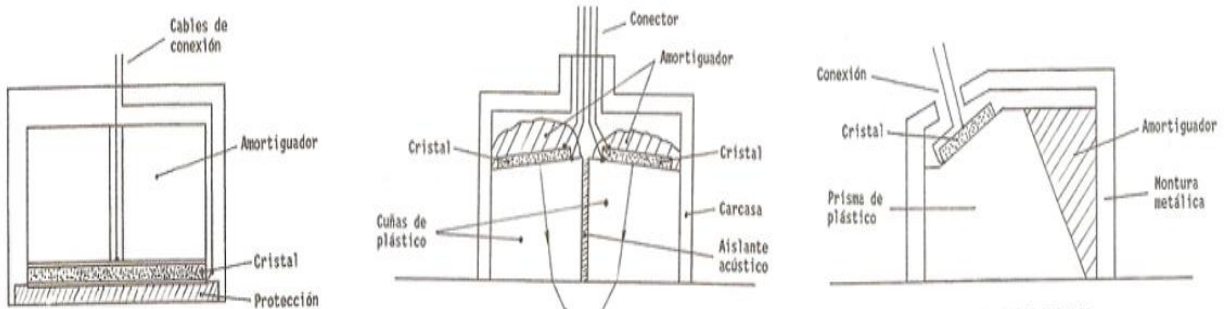


Figura 4.13 Tipos de transductores [Fuente: raquelserrano.com]

Para la inspección ultrasónica realizada con frecuencias arriba de 100KHz, son utilizados elementos piezoeléctricos.

El efecto piezoeléctrico, es la propiedad que tienen algunos materiales para transformar energía eléctrica en mecánica y viceversa. Existen dos efectos: Inverso (Piezoeléctrico) o Directo (Lippman). A continuación, se explican ambos efectos.

Efecto inverso, propiedad de ciertos materiales, por la que se expanden o contraen, bajo la influencia de campos eléctricos variables (transformar un pulso eléctrico a un pulso mecánico) [12]. La figura 4.14, muestra el efecto inverso.

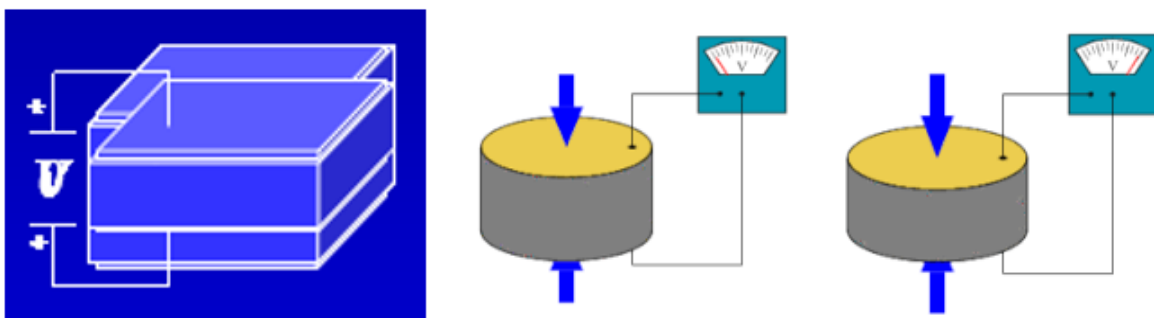


Figura 4.14 Efecto inverso [Fuente: es.wikipedia.org]

El pulso eléctrico viene desde el pulsador del instrumento, y provoca que el cristal vibre y finalmente el ultrasonido viaja a través del material.

El efecto directo o de Lippman, el componente piezoeléctrico transforma la deformación mecánica que percibe de las vibraciones y las transforma en pulsos eléctricos que son digitalizados [12]. La Figura 4.15, muestra el efecto directo.

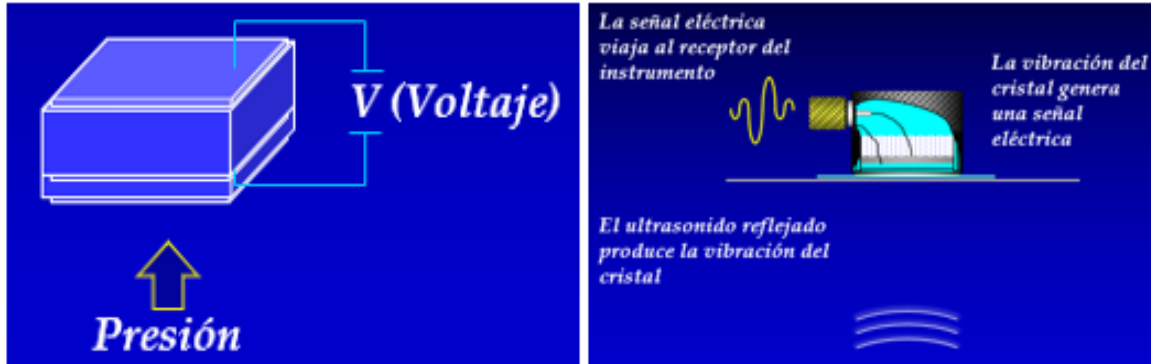


Figura 4.15 Efecto directo [Fuente: Ilog]

El ultrasonido reflejado produce la vibración del cristal, luego la vibración del cristal genera una señal eléctrica y finalmente la señal eléctrica viaja al receptor del instrumento [12].

4.8.1 Materiales Piezoeléctricos

Los materiales piezoeléctricos para transductores ultrasónicos son:

1. Cuarzo (Cristal piezoeléctrico natural)
2. Sulfato de litio
3. Cerámicas polarizadas
4. Metaniobato de plomo
5. Titanato zirconato de plomo.

Entre la frecuencia de los transductores y el tamaño del cristal, existe una relación inversa. Cuando la frecuencia es alta, el cristal es delgado y cuando la frecuencia es baja, el cristal es grueso [12].

4.8.2 Material de Respaldo

El material de respaldo, que soporta el elemento activo, tiene una gran influencia sobre la funcionalidad del transductor ultrasónico. Las variaciones en la construcción o en el material de respaldo, pueden hacer un transductor ideal para una aplicación y muy malo para otra [12].

El material de respaldo tiene dos funciones:

1. Debe amortiguar las oscilaciones de inercia del elemento activo. Al realizar esta función, controla el ancho de banda del transductor.
2. Debe absorber las vibraciones hacia el interior del transductor, para que no interaccionen con la carcasa. El material de respaldo es fabricado de fibras plásticas o polvos de metal (por ejemplo, tungsteno), combinados con varios materiales plásticos.

4.8.3 Placa Frontal

Las funciones principales de la placa frontal son proteger el elemento activo de las condiciones presentes durante la inspección y en transductores de contacto, debe ser de material durable y resistente a la corrosión [12].

4.9 Clasificación de Transductores

Como se menciona anteriormente, existen 4 tipos de transductores ultrasónicos. Los que se utilizan con mayor frecuencia son: transductores de haz recto de contacto y transductores de doble cristal [12].

A continuación se explican las características de ambos transductores y sus respectivas aplicaciones.

Los transductores de haz recto contienen un solo elemento activo que generan ondas longitudinales. Es el transductor frecuentemente utilizado por considerarse el más versátil en la detección de fallas, debido a que es utilizado en contacto directo con la pieza, su superficie de contacto, en general, es de un material altamente resistente al desgaste [12].

Sus aplicaciones son las siguientes:

- Detección de fallas con haz recto.
- Medición de espesores.
- Detección y dimensionamiento de laminaciones.
- Caracterización de materiales y medición de la velocidad del sonido.
- Inspección de materiales metálicos y compuestos no metálicos.

La Figura 4.16, muestra una fotografía de un transductor de haz recto.



Figura 4.16 Transductor de haz recto [Fuente: Ilog]

Los transductores de doble cristal (duales) de contacto cuentan con dos elementos activos en una misma carcasa, montados sobre líneas de retardo y ligeramente inclinados, y se encuentran separados por una barrera acústica. Un elemento actúa como transmisor de ondas longitudinales y otro como receptor [12].

Sus principales ventajas y aplicaciones son:

Ventajas:

- Se elimina el disparo principal, mejorando la resolución cercana.
- El diseño de haz inclinado proporciona un pseudo-foco que los hace más sensibles a ecos de reflectores de forma irregular, tales como corrosión o picaduras.
- No se requiere el uso de línea de retardo extras para aplicaciones en altas temperaturas.
- Buen acoplamiento sobre superficies curvas o rugosas.
- Reduce el ruido de grano grueso o de gran dispersión.
- Ideal para aplicaciones de baja temperatura.

Aplicaciones:

- Medición de espesores remanente de pared.
- Monitoreo de corrosión o erosión.
- Inspección de discontinuidades, inclusive en espesores delgados.

La Figura 4.16, muestra una fotografía de doble cristal.

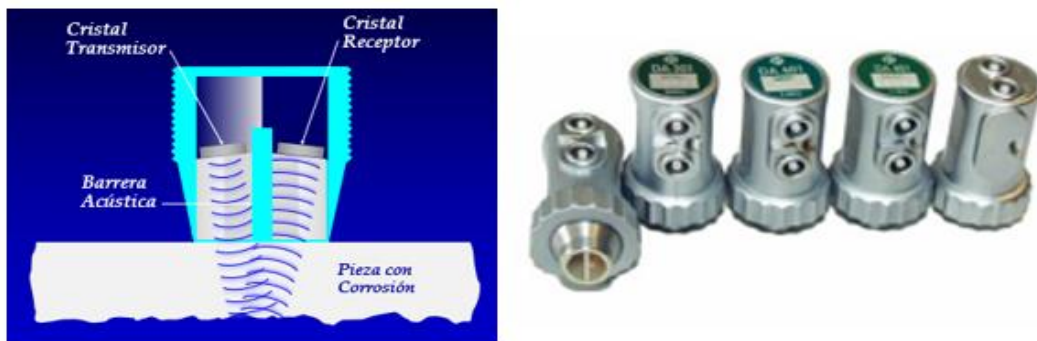


Figura 4.17 Transductor de doble cristal [Fuente: Ilog]

4.9.1 Operación de un Transductor

Los cinco términos que describen la operación de un transductor son:

1. Factor de calidad: Medición de la funcionalidad de un transductor, basada en la selectividad de su frecuencia.

2. Sensibilidad: Habilidad del transductor de detectar ecos de discontinuidades pequeñas, es proporcional al producto de la eficiencia como transmisor y receptor.
3. Impedancia acústica: Producto de la densidad del elemento y la velocidad del ultrasonido en él.
4. Poder de resolución: Habilidad del transductor para separar ecos de dos o más reflectores cercanos, es determinado por el material de respaldo.
5. Ancho de bandas: El transductor produce una banda de energía ultrasónica que cubre un rango de frecuencias, expresado como, ancho de banda. El material de respaldo y el grado de amortiguamiento sobre el elemento activo determina en ancho de banda de un transductor: Transductor de banda ancha y transductor de banda angosta.

4.9.2 Transductor de Banda Ancha y Angosta

En el transductor de banda ancha, el elemento activo se encuentra fuertemente amortiguado y son producidos pulsos cortos, que cuentan con las siguientes características: Reducción del campo muerto, se producen pulsos de cortas duración (que contienen uno o dos ciclos), gran poder de resolución, menos sensibilidad, menor poder de penetración y mejor relación señal – ruido [12]. La Figura 4.18, muestra un transductor de banda ancha.

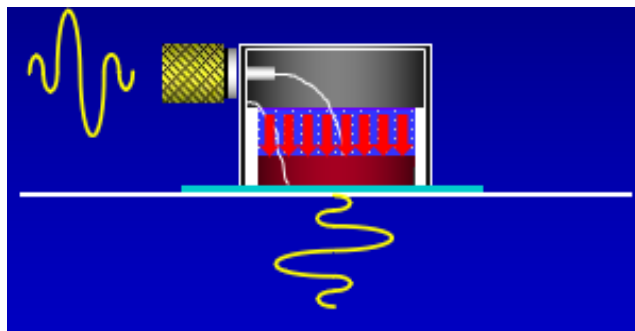


Figura 4.18 Transductor de banda ancha [Fuente: Ilog]

El transductor de banda angosta: El elemento activo se encuentra ligeramente amortiguado y son producidos pulsos largos, que cuentan con las siguientes características: Incremento del campo muerto, se producen pulsos de larga duración, mayor sensibilidad y mayor poder de penetración [12]. La Figura 4.19, muestra un transductor de banda angosta.

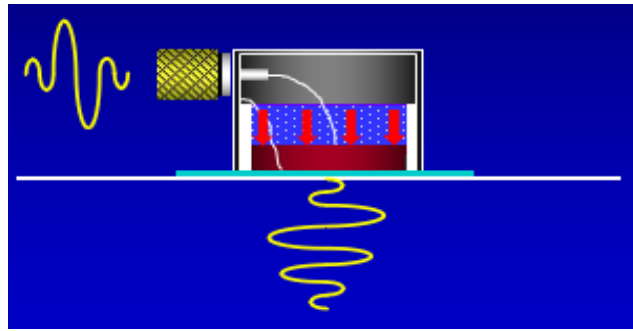


Figura 4.19 Transductor de banda angosta [Fuente: Ilog]

Los transductores más utilizados son: 5MHz y 2.25MHz. La Figura 4.20, muestra una comparación según transductor de banda ancha o angosta y frecuencia del transductor (MHz) [12].

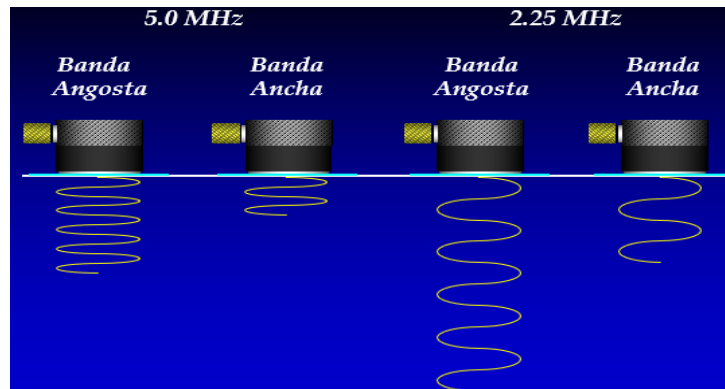


Figura 4.20 Comparación de transductores [Fuente: Ilog]

4.10 Características del Haz Ultrasonico

En su propagación un haz ultrasonico no se comporta como pistón, es decir, no tiene una proyección con lados rectos e intensidad uniforme desde la cara del transductor [12].

En la inspección de haz recto por contacto, existe un espacio frente a la cara del transductor, en el cual, no se puede observar reflexión de una discontinuidad cercana a la superficie, ya que el pulso inicial en la pantalla es demasiado grande, y se debe a que la energía reflejada regresa al transductor mientras todavía está transmitiendo, a esto se le llama campo muerto o zona muerta.

El campo cercano o zona de Fresnel: Desde la cara del transductor existe un área que se caracteriza por variaciones en la intensidad del haz ultrasónico, debido a que la distribución de presiones varía constantemente.

Campo lejano o zona de Fraunhofer: Zona donde la intensidad de haz ultrasónico y la distribución de presiones acústicas, decae proporcionalmente con el aumento de la distancia desde el transductor. En esta zona comienza la divergencia del haz ultrasónico.

Divergencia del Haz: En el campo cercano el haz ultrasónico se propaga en línea recta, desde la cara del transductor, en el campo lejano el sonido se esparce hacia fuera (presenta divergencia). A una frecuencia dada, entre mayor sea el diámetro del transductor, el haz es más recto, con transductores de menor diámetro el haz tiene una mayor divergencia.

La Figura 4.21, muestra las características de un haz ultrasónico.

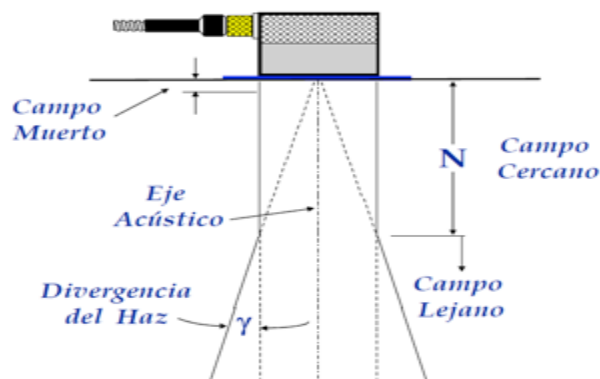
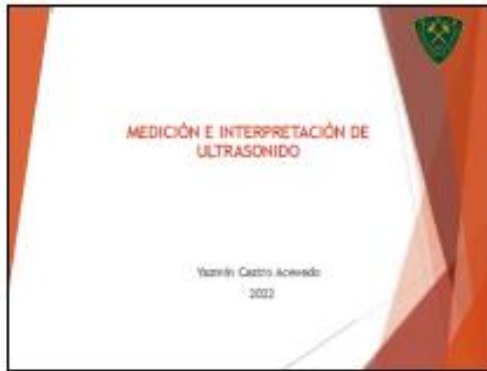


Figura 4.21 Haz ultrasónico [Fuente: elearning.itecpro.cl]

4.11 Charla de Medición e Interpretación de Ultrasonido



1



4



2



5



3



6

Ensayos no Destructivos

El conocimiento de materiales y sus propiedades es muy importante para cualquier persona involucrada en las pruebas no destructivas.

Fuente de falla:

- > Discontinuidad.
- > Material químicamente incorrecto.
- > Material tratado de tal forma que sus propiedades no son adecuadas.

7

Ultrasonido Industrial

-> La onda ultrasónica, se transmite y se propaga dentro de una pieza hasta que es reflejada, y regresa al transductor proporcionando información de su recorrido.

10

Ensayos no Destructivos

-> Velocidad de propagación de una onda, en diferentes medios materiales.

Material	Velocidad de propagación (m/s)
Aluminio	5000
Acero	5900
Cobre	3500
Hierro	5100
Níquel	4700
Plata	3400
Plomo	1200
Latón	4000
Aluminio 6061	5000
Aluminio 7075	5000
Aluminio 2024	5000
Aluminio 5052	5000
Aluminio 6063	5000
Aluminio 6082	5000
Aluminio 7050	5000
Aluminio 7075	5000
Aluminio 7075-T6	5000
Aluminio 7075-T651	5000
Aluminio 7075-T6511	5000
Aluminio 7075-T6512	5000
Aluminio 7075-T6513	5000
Aluminio 7075-T6514	5000
Aluminio 7075-T6515	5000
Aluminio 7075-T6516	5000
Aluminio 7075-T6517	5000
Aluminio 7075-T6518	5000
Aluminio 7075-T6519	5000
Aluminio 7075-T65110	5000
Aluminio 7075-T65111	5000
Aluminio 7075-T65112	5000
Aluminio 7075-T65113	5000
Aluminio 7075-T65114	5000
Aluminio 7075-T65115	5000
Aluminio 7075-T65116	5000
Aluminio 7075-T65117	5000
Aluminio 7075-T65118	5000
Aluminio 7075-T65119	5000
Aluminio 7075-T65120	5000
Aluminio 7075-T65121	5000
Aluminio 7075-T65122	5000
Aluminio 7075-T65123	5000
Aluminio 7075-T65124	5000
Aluminio 7075-T65125	5000
Aluminio 7075-T65126	5000
Aluminio 7075-T65127	5000
Aluminio 7075-T65128	5000
Aluminio 7075-T65129	5000
Aluminio 7075-T65130	5000
Aluminio 7075-T65131	5000
Aluminio 7075-T65132	5000
Aluminio 7075-T65133	5000
Aluminio 7075-T65134	5000
Aluminio 7075-T65135	5000
Aluminio 7075-T65136	5000
Aluminio 7075-T65137	5000
Aluminio 7075-T65138	5000
Aluminio 7075-T65139	5000
Aluminio 7075-T65140	5000
Aluminio 7075-T65141	5000
Aluminio 7075-T65142	5000
Aluminio 7075-T65143	5000
Aluminio 7075-T65144	5000
Aluminio 7075-T65145	5000
Aluminio 7075-T65146	5000
Aluminio 7075-T65147	5000
Aluminio 7075-T65148	5000
Aluminio 7075-T65149	5000
Aluminio 7075-T65150	5000
Aluminio 7075-T65151	5000
Aluminio 7075-T65152	5000
Aluminio 7075-T65153	5000
Aluminio 7075-T65154	5000
Aluminio 7075-T65155	5000
Aluminio 7075-T65156	5000
Aluminio 7075-T65157	5000
Aluminio 7075-T65158	5000
Aluminio 7075-T65159	5000
Aluminio 7075-T65160	5000
Aluminio 7075-T65161	5000
Aluminio 7075-T65162	5000
Aluminio 7075-T65163	5000
Aluminio 7075-T65164	5000
Aluminio 7075-T65165	5000
Aluminio 7075-T65166	5000
Aluminio 7075-T65167	5000
Aluminio 7075-T65168	5000
Aluminio 7075-T65169	5000
Aluminio 7075-T65170	5000
Aluminio 7075-T65171	5000
Aluminio 7075-T65172	5000
Aluminio 7075-T65173	5000
Aluminio 7075-T65174	5000
Aluminio 7075-T65175	5000
Aluminio 7075-T65176	5000
Aluminio 7075-T65177	5000
Aluminio 7075-T65178	5000
Aluminio 7075-T65179	5000
Aluminio 7075-T65180	5000
Aluminio 7075-T65181	5000
Aluminio 7075-T65182	5000
Aluminio 7075-T65183	5000
Aluminio 7075-T65184	5000
Aluminio 7075-T65185	5000
Aluminio 7075-T65186	5000
Aluminio 7075-T65187	5000
Aluminio 7075-T65188	5000
Aluminio 7075-T65189	5000
Aluminio 7075-T65190	5000
Aluminio 7075-T65191	5000
Aluminio 7075-T65192	5000
Aluminio 7075-T65193	5000
Aluminio 7075-T65194	5000
Aluminio 7075-T65195	5000
Aluminio 7075-T65196	5000
Aluminio 7075-T65197	5000
Aluminio 7075-T65198	5000
Aluminio 7075-T65199	5000
Aluminio 7075-T65200	5000

8

Ultrasonido Industrial

-> Propagación de la onda ultrasónica.

11

Ultrasonido Industrial

- > Infrasonido
- > Voz
- > Ultrasonido (se propaga a través de sólidos y líquidos)

9

Ultrasonido Industrial

-> Componentes básicos de una inspección ultrasónica.

12

Ventajas de Inspección por Ultrasonido

- Proporciona gran poder de penetración.
- Gran sensibilidad.
- Gran exactitud.
- Se necesita una sola superficie de acceso.
- Resultados inmediatos.
- No existe peligro o riesgo.
- Equipos portátiles.
- Capacidad de almacenar información en su memoria.

13

Conceptos Básicos

- Infrasonido
- Sonido
- Ultrasonido
- Período o Ciclo
- Longitud de Onda
- Frecuencia
- Amplitud
- Velocidad Acústica

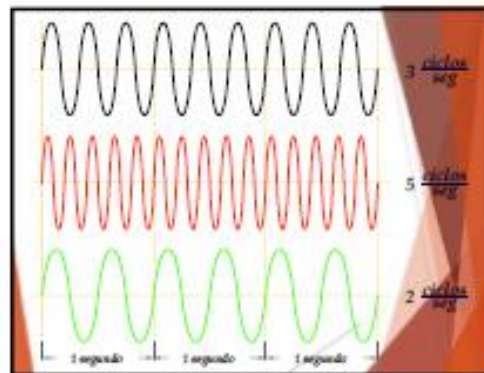


16

Desventajas de Inspección por Ultrasonido

- Requiere de personal técnico.
- Piezas rugosas, irregulares, pequeñas o delgadas son difíciles de inspeccionar.
- Se requiere de bloques estandarizados para la calibración.
- Necesario de material acoplante.
- Discontinuidades sub-superficiales pueden no ser detectadas.

14



17

Naturaleza de Ondas

Se clasifican como:

- Mecánicas
- Electromecánicas



15

Modo de Ondas Ultrasonicas

Existencia 3 tipos de ondas.

- Longitudinales o de compresión.



18

Modo de Ondas Ultrasonóicas

➤ Ondas de corte o Transversales.

19

Generación de Vibraciones

Existen 4 tipos de transductores ultrasonóicos, estos son:

- Haz recto de contacto
- Doble cristal de contacto
- Haz angular de contacto
- De inserción

22

Modo de Ondas Ultrasonóicas

➤ Ondas superficiales o de Rayleigh.

20

Generación de Vibraciones

El efecto piezoeléctrico, es la propiedad que tiene algunos materiales para transformar energía eléctrica en mecánica y viceversa.

23

Generación de Vibraciones

➤ Transductor transforma energía de una forma a otra.

21

Generación de Vibraciones

Los materiales piezoeléctricos para transductores ultrasonóicos son:

- Cuarzo
- Sulfato de Litio
- Cerámicas Polarizadas
- Metanobato de Plomo
- Titanato Zirconato de Plomo

"Cuando la frecuencia de los transductores es alta, el cristal es delgado y cuando la frecuencia es baja, el cristal es grueso".

24

Generación de Vibraciones

- Transductor de banda ancha.
- Fuente de onda amortiguada
- Pulsos cortos
- Reducción del campo muerto.
- Pulsos de corta duración
- Gran poder de resolución
- Mayor sensibilidad
- Menor penetración

25

Generación de Vibraciones

- Atenación: La distancia o pérdida gradual de la intensidad o energía de una onda ultrasónica al propagarse a través de un medio.

28

Generación de Vibraciones

- Transductor de banda estrecha.
- Ligeramente amortiguado
- Pulsos largos
- Incremento del campo muerto.
- Mayor sensibilidad
- Mayor poder de penetración

26

Características del Haz Ultrasonico

- Campo Muerto o Zona Muerta
- Campo Cercano o Zona Fresnel
- Campo Lejano o Zona de Fraunhofer
- Divergencia del haz.

29

Generación de Vibraciones

- Los transductores más utilizados.

27

Campo Muerto

30

Instrumento de Medición

- 1. Paso amplificación Gradual.
- 2. Tecla de selección.
- 3. Selección un grupo de funciones.
- 4. Congelar.
- 5. F1 a F4 se utilizan como navegación.
- 6. Tecla Inicio.
- 7. Encender/Apagar.



31

Muchas gracias por su atención



34

Detección de Discontinuidades



32

Conclusiones

33

Capítulo 5 CONCLUSIÓN

5.1 Medición y Análisis de Vibraciones

La disponibilidad de los equipos en la minería aumentara en la medida que las fallas en los equipos disminuyan de una forma sustentable en el tiempo. Para lograr lo anterior, resulta indispensable contar con la estrategia de mantenimiento adecuada, una de ellas, el mantenimiento predictivo.

La estrategia de mantenimiento predictivo cuenta con varias técnicas, una de las mas utilizadas y que nos proporciona una mayor información y exactitud de su condición, es la medición de vibraciones, donde se puede detectar y diagnosticar el tipo de fallas en etapa incipiente, con la oportunidad de evaluar el tiempo de vida y planificación del equipo.

5.2 Medición y Análisis de Termografías

La medición por cámara infrarroja, es un complemento importante para el análisis de vibraciones y espesores, ya que, adiciona más información para evaluar con una mayor exactitud el diagnóstico de una posible falla, sin embargo, también tiene una tarea fundamental para mantener una continuidad operacional, la detección de fallas en el área eléctrica, tales como: salas eléctricas y subestaciones. Estas pueden detectar a tiempo alguna soltura o suciedad existente en las fases, sin la necesidad de acercarse al equipo, lo que hace más llamativo para incorporar e implementar dicha función, ya que, la posibilidad de accidentabilidad es muy baja.

5.3 Medición de Ultrasonido

La medición por ultrasonido, es una técnica utilizada en menor frecuencia que las mencionadas con anterioridad, sin embargo, es indispensable para la detección de fallas, este puede darnos información sobre la longitud de un material, lo que nos permite distinguir una discontinuidad, deformación o espesor del objeto deseado. Antes de comenzar la medición, se debe mantener informado sobre varios puntos, para un análisis correcto, como; tipo de material y sus características técnicas.

CONCLUSIÓN

La medición por ultrasonido son ensayos no destructivos que aportan considerablemente en producción, reducción de costos y, principalmente, evitando fallas catastróficas o daño a personas.

Bibliografía

- [1] Valuekeep.com/es, Estrategias de mantenimiento más utilizadas, España.
- [2] Dr.-Ing. Pedro Saavedra, Análisis de vibraciones de máquinas, categoría I. Universidad de concepción, Chile.
- [3] Fernando Anselmo Sanhueza Lozano y Ricardo Alfonso Durán Rivas, 2014. Diagnostico estado mecánico de equipos rotatorios utilizando análisis de vibraciones, Universidad del Bío Bío, Chile.
- [4] Álvaro diaz 2020. Aplicación de la teoría de las vibraciones, SlidePlayer.es
- [5] Alejandro Jiménez fuentes. Manual de termografías infrarrojas, nivel I, PDM
- [6] www.etsist.upm.es, Herschel, William
- [7] Daniel Auer, septiembre 2008. Termografías, guía de bolsillo, Testo AG
- [8] www.interempresas.net. Canales Sectoriales.
- [9] es.wikipedia.org. Espectro Electromagnético
- [10] Professional Series Thermal Imagers, noviembre 2017. Manual de uso Fluke.
- [11] Guía sobre termografía para aplicaciones en edificios y energía renovable, Flir.
- [12] Mauricio Reyes M, Ensayos ultrasónicos básicos, nivel I. Profan capacitación Ltda, Chile.
- [13] www.docplayer.es. Mega- test. Medidor de espesores por ultrasonido. Modelo DL – 110. Manual de operaciones.
- [14] Mónica Vera, <https://slideplayer.es>. Las ondas.