

**MANTENIMIENTO PREDICTIVO DE MOTORES DIESEL MARINOS MEDIANTE  
CORRELACION DE IMÁGENES TERMOGRAFICAS Y ANALISIS DE  
VIBRACIONES**

**DAVID ALEJANDRO GONZALEZ GONZALEZ**

**JAIME LUIS PIZARRO MARTINEZ**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR  
FACULTAD DE INGENIERÍA MECANICA  
MINOR EN MANTENIMIENTO INDUSTRIAL  
CARTAGENA DE INDIAS D.T Y C**

**2005**

**MANTENIMIENTO PREDICTIVO DE MOTORES DIESEL MARINOS MEDIANTE  
CORRELACION DE IMÁGENES TERMOGRAFICAS Y ANALISIS DE  
VIBRACIONES.**

**DAVID ALEJANDRO GONZALEZ GONZALEZ**

**JAIME LUIS PIZARRO MARTINEZ**

**Monografía presentada para optar al título de  
Ingeniero Mecánico**

**Asesor**

**JUAN FAJARDO**

**Ingeniero Mecánico**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR  
FACULTAD DE INGENIERÍA MECANICA  
MINOR EN MANTENIMIENTO INDUSTRIAL  
CARTAGENA DE INDIAS D.T Y C  
2005**

**NOTA DE ACEPTACIÓN**

---

---

---

---

---

---

---

Firma del presidente del jurado

---

Firma del jurado

---

Firma del Jurado

Cartagena de Indias, Noviembre de 2005

## **AGRADECIMIENTOS**

Le agradecemos a Dios, por haberme dado voluntad y fortaleza para lograr este objetivo, a la Universidad Tecnológica de Bolívar por habernos brindado herramientas y enseñanzas en el transcurso del proyecto, a los profesores Benjamín Arango, Alfonso Núñez y Julio Burbano por darnos todos los conocimientos necesarios y enfocarnos en el camino de profesionalismo y ética y por último deseamos darle un gran agradecimiento a nuestros padres por habernos enfocado y ayudado a llegar donde hoy estamos.

**Cartagena de Indias D.T y C Noviembre 18 de 2005**

Ingeniero

Justo Ramos

Decano facultad de ingeniería Mecánica.

Universidad Tecnológica de Bolívar

L.C

Cordial Saludo.

Nos permitimos presentar a usted nuestra monografía titulada: mantenimiento predictivo de motores diesel marinos mediante correlación de imágenes termograficas y análisis de vibraciones.

Monografía que es el resultado del interés de aplicar los conceptos aprendidos en el Minor de Mantenimiento Industrial, en una empresa del estado para protección y seguridad marítima y terrestre.

Atentamente,

David Alejandro González González

C.C 9.296.709 de Turbaco

Jaime Luís Pizarro Martínez

C.C 73.195.967 de Cartagena

**Cartagena de Indias D.T y C Noviembre 18 de 2005**

Srs.

Universidad Tecnológica de Bolívar

Atn:

Decano facultad de ingeniería Mecánica.

L.C.

Cordial Saludo.

Me permito presentarle la monografía titulada: mantenimiento predictivo de motores diesel marinos mediante correlación de imágenes termograficas y análisis de vibraciones. Realizada por David Alejandro González González y Jaime Luís Pizarro Martínez.

Atentamente,

ING. Juan Fajardo.

Asesor

## RESUMEN

El presente trabajo permite de una forma rápida y eficaz la implementación de un programa de monitoreo por condición (correlación de imágenes termograficas y análisis de vibraciones) en los motores propulsores de las fragatas de la Armada Nacional de Colombia, las cuales deben estar prestas a cumplir la misión institucional de salvaguardar la soberanía nacional.

Para la elaboración de esta metodología se utilizaron conceptos a partir de las mejores técnicas de mantenimiento como lo es el RCM (mantenimiento centrado en la confiabilidad). Esta metodología no solo va a ayudar a predecir futuros daños en la maquinaria los cuales se podrán evitar de una forma rápida sin poner en riesgo la misión de la unidad, sino también reducirá costos en mantenimiento por compra inapropiada de repuestos.

Por otra parte estas técnicas no son suficientes si no se construyen metodologías que brinden la posibilidad de involucrar a todo el personal que en el diario vivir esta a cargo de la operación y el mantenimiento de maquinarias y equipos y son los que en muchos casos poseen la información valiosa que en conjunto con la información recolectada por los equipos de vibraciones y de termografía, son piezas fundamentales para aumentar la disponibilidad, mantenibilidad y confiabilidad de la maquinaria y equipos.

## CONTENIDO

	<b>PAG</b>
<b>1. MANTENIMIENTO PREDICTIVO.</b>	16
<b>1.1 EL PROGRAMA DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO.</b>	19
<b>1.2. VENTAJAS DEL MANTENIMIENTO PREDICTIVO.</b>	20
<b>2. MONITOREO POR CONDICIÓN.</b>	21
<b>2.1 BENEFICIOS DEL MONITOREO POR CONDICIÓN</b>	22
<b>3. APLICACIÓN EN SISTEMAS EXPERTOS</b>	24
<b>4. LAS VIBRACIONES.</b>	25
<b>5. VIBRACIONES EN MAQUINAS.</b>	26
<b>6. CONCEPTOS BÁSICOS DE VIBRACIÓN</b>	28
<b>6.1 VIBRACIÓN SIMPLE.</b>	28
<b>6.2 VIBRACIÓN COMPUESTA.</b>	29
<b>6.3 VIBRACION ALEATORIA Y GOLPETEOS INTERMITENTES.</b>	30
<b>7. INTRODUCCIÓN A LAS VIBRACIONES EN MAQUINAS ROTATIVAS</b>	32
<b>7.1 MONITOREO DE VIBRACIONES PARA UN BUEN MANTENIMIENTO.</b>	32
<b>7.2 CAUSAS MAS FRECUENTES DE VIBRACIONES EN MAQUINAS DE COMBUSTION.</b>	33



<b>8. DIAGNOSTICO DE LA MAQUINARIA POR PROBLEMAS DE VIBRACION.</b>	37
<b>8.1 DESBALANCEO</b>	38
<b>8.1.1 Gravedad de Desbalanceo.</b>	40
<b>8.2 DESALINEACIÓN.</b>	41
<b>8.2.1 Tipos De Desalineación.</b>	41
<b>8.3 VIBRACION DEBIDA A EXCENTRICIDAD.</b>	44
<b>8.4 VIBRACIONES EN ENGRANAJES.</b>	45
<b>8.5 SOLTURA ESTRUCTURAL.</b>	46
<b>8.6 HOLGURA MECANICA EJE-AGUJERO</b>	47
<b>8.7 ELEMENTOS RODANTES DEFECTUOSOS</b>	48
<b>8.7.1 Falla de Rodamientos.</b>	48
<b>9. TERMOGRAFIA.</b>	52
<b>9.1 DEFINICION DE TERMOGRAFIA</b>	53
<b>9.2 CONSIDERACIONES TEORICAS.</b>	56
<b>9.3 ESQUEMA PARA MEDIR TEMPERATURA CON EL SISTEMA IR.</b>	58
<b>9.3.1 elementos que componen el esquema de medición de temperatura.</b>	58
<b>9.4 FACTORES QUE AFECTAN MEDIR TEMPERATURA CON SISTEMAS IR.</b>	61
<b>10. CONSIDERACIONES PREVIAS.</b>	63

<b>11. APLICACIONES DE TERMOGRAFÍA INFRARROJA EN EL MANTENIMIENTO INDUSTRIAL</b>	<b>65</b>
<b>12. APLICACIÓN DE LA TERMOGRAFIA EN EL DIAGNOSTICO DE FALLOS EN MOTORES DIESEL</b>	<b>67</b>
<b>12.1 DESCRIPCION DEL MOTOR.</b>	<b>67</b>
<b>13. PASOS DE LA IMPLEMENTACION DEL PROGRAMA DE MONITOREO POR CONDICION (VIBRACIONES Y TERMOGRAFIA).</b>	<b>76</b>
<b>13.1 PASO 1: (CLASIFICACIÓN DE PIEZAS BASADO EN ANÁLISIS DE RIESGO).</b>	<b>77</b>
<b>13.2 PASO 2: (ESPECIFICACIONES BÁSICAS DE LOS EQUIPOS Y PUNTOS DE MEDICION).</b>	<b>78</b>
<b>13.2.1 Identificación de los Puntos de Medición</b>	<b>78</b>
<b>13.2.1.1 Vibraciones.</b>	<b>78</b>
<b>13.2.1.2 Termografía</b>	<b>80</b>
<b>13.3 PASO 3: (ASIGNACIÓN DE FRECUENCIAS DE MEDICIÓN)</b>	<b>81</b>
<b>13.4 INTERVALOS DE MEDICIÓN</b>	<b>83</b>
<b>14. NORMAS QUE APLICAN LA TOMA DE VIBRACIONES E IMAGENES TERMOGRAFICAS.</b>	<b>84</b>
<b>RECOMENDACIONES</b>	<b>85</b>
<b>CONCLUSIONES.</b>	<b>86</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.</b>	<b>87</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>88</b>

## LISTADO DE GRÁFICOS

	<b>PAG.</b>
Figura 1. Grafica de tendencia.	19
Figura 2. Sistemas expertos	26
Figura 3. Diagrama de amplitud de onda	27
Figura 4. Espectro de onda de una maquina.	28
Figura 5. Simulación de onda en vibración simple	31
Figura 6. Vibración compuesta.	32
Figura 7. Vibración aleatoria.	33
Figura 8. Golpeteos intermitentes.	33
Figura 9. Técnicas vibratorias utilizadas	38
Figura 10. Fallas por vibraciones en motores diesel marinos	39
Figura 11. Maquina con problemas de balanceo	40
Figura 12. Desvalanceo estático.	41
Figura 13. Desbalanceo dinámico.	42
Figura 14. Desalineación angular.	44
Figura15. Desalineación paralela	45
Figura 16. Desalineación entre chumaceras.	45
Figura 17. Excentricidad	47
Figura 18. Vibración en engranajes.	47

Figura 19. Soltura estructural.	48
Figura 20. Holgura eje-agujero	49
Figura 21. Falla pista interna de un rodamiento.	51
Figura 22. Falla pista externa de un rodamiento.	52
Figura 23. Falla contacto metal-metal en un rodamiento	53
Figura 24. Deterioro de jaula de un rodamiento.	55
Figura 25. Termografía.	56
Figura 26. Análisis termográfico.	59
Figura 27. Toma de IR.	60
Figura 28. Esquema para medir Temperatura	62
Figura 29. Esquema de funcionamiento de una cámara de i. R.	66
Figura 30. Imagen termográfica de un motor.	70
Figura 31. Descripción del motor	72
Figura 32. Imagen termográfica del colector del motor diesel marino.	72
Figura 33. Imagen termográfica del inyector	76
Figura 34. Imagen termográfica de la culata	76
Figura 35. Identificación de puntos de medición de vibraciones.	81
Figura 36. Identificación de puntos de medición de IR.	82
Figura 37. Diagrama de falla	84

## LISTA DE ANEXOS

	<b>PAG.</b>
<b>ANEXO 1:</b> NIVELES DE VIBRACION.	89
<b>ANEXO 2:</b> RESUMEN DE LAS ÁREAS DE APLICACIÓN DE LA TERMOGRAFÍA	90
<b>ANEXO 3:</b> LISTADO DE PARTES CRÍTICAS Y SEMI CRÍTICAS.	92
<b>ANEXO 4:</b> ESPECIFICACION N.E.T.A.	93
<b>ANEXO 5:</b> NORMA ISO 2372-10816.	94
<b>ANEXO 6:</b> SUSTENTO VISUAL.	95

## INTRODUCCIÓN

Hoy en día es importante considerar en las grandes y medianas industrias la implementación de una estrategia de mantenimiento predictivo para aumentar la vida de componentes de las máquinas, aumentando así su disponibilidad y aumentando la productividad de la Planta. En este trabajo se describen brevemente los alcances que se pueden tener con el uso de técnicas modernas de análisis en la búsqueda de detección temprana de fallas en máquinas críticas (“acción predictiva”), así como su utilidad en la búsqueda de las posibles causas que las pueden originar (“acción proactiva”).

En la última década, las estrictas normas de calidad certificada que se deben cumplir, así como la intensa presión competitiva entre industrias del mismo rubro para mantenerse en el mercado nacional e internacional, ha estado forzando a los responsables del mantenimiento en las plantas industriales a implementar los cambios que se requieren para pasar de ser un departamento que realiza reparaciones y cambia piezas y/o máquinas completas, a una unidad de alto nivel que contribuye de gran manera en asegurar los niveles de producción. Es por tanto necesario hacer notar que la actividad de “mantener”, si es llevada a cabo de la mejor manera, puede generar un mejor producto lo que significa producción de mejor calidad, en mayor cantidad y con costos más bajos.

Sin embargo estas técnicas no son suficientes si no se construyen metodologías que brinden la posibilidad de involucrar a todo el personal que en el diario vivir esta a cargo de la operación y el mantenimiento de maquinarias y equipos y son los que en muchos casos poseen la información valiosa que en conjunto con la información recolectada por los equipos de vibraciones es pieza fundamental para aumentar la disponibilidad, mantenibilidad y confiabilidad de la maquinaria y equipos.

Numerosas empresas están revisando sus organizaciones y procesos, lo que generalmente implica rediseñar las estructuras tradicionales en busca de mayor productividad y definitivamente la reducción de costos por mantenimiento. Para esto se hace necesario elaborar un conjunto de procedimientos operativos que aseguren la oportuna y eficaz realización de las tareas predictivas (vibraciones) y proactivas generando una base de conocimientos para el sostenimiento de la calidad y el mejoramiento continuo del mantenimiento y los procesos productivos.

## 1. MANTENIMIENTO PREDICTIVO

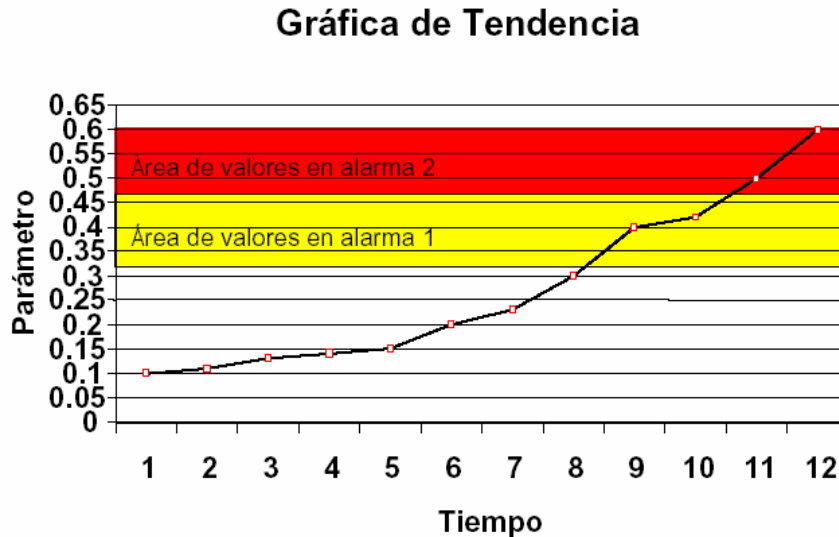
Predicción es el efecto de predecir o anteponerse a un evento que no presenta síntoma aparente.

El Mantenimiento Predictivo verifica muy de cerca la operación de cada máquina operando en su entorno real. Sus beneficios son difíciles de cuantificar ya que no se dispone de métodos tipo para el cálculo de los beneficios o del valor derivado de su aplicación. Por ello, muchas empresas usan sistemas informales basados en los costos evitados, indicándose que por cada dólar gastado en su empleo, se economizan 10 dólares en costos de mantenimiento.

Tradicionalmente, los programas de mantenimiento de diagnóstico, mejor conocidos como mantenimiento predictivo consisten en recopilar datos que indican la condición de equipos y sistemas. El concepto de mantenimiento predictivo se fundamenta en la recopilación de datos o parámetros operacionales, los cuales nos permiten la creación de gráficas de tendencias.



Figura 1. Grafica de tendencia



**Fuente: Primer Congreso mexicano de confiabilidad y mantenimiento**

El Mantenimiento Predictivo depende de una serie Técnica (Herramientas, Equipos, Conocimientos, métodos, procedimientos y filosofías) que aplicados en armonía logran con efectividad su objetivo, El cuál es Predecir eventos en Maquinarias y Sistemas que puedan interferir con el proceso productivo y tomar acciones para evitarlos. Una de las características más importantes de este tipo de mantenimiento es que no debe alterar el funcionamiento normal de la planta mientras se está aplicando.

La inspección de los parámetros se puede realizar de forma periódica o de forma continua, dependiendo de diversos factores como son: el tipo de planta, los tipos de fallos a diagnosticar y la inversión que se quiera realizar.

La implementación de los sistemas de información para la gestión de activos es una nueva herramienta que contribuye con la optimización de las tareas de mantenimiento en plantas industriales y que ha sido hoy en día, una de las razones para que las empresas realicen investigaciones en el mejoramiento continuo de sus instalaciones, y garantizar así la continuidad operativa de los procesos buscando el coste beneficio de la inversión.

En la actualidad uno de los grandes retos que están afrontando las organizaciones, independientemente del tamaño, es la reducción en el coste del mantenimiento. Sin embargo se presentan oportunidades de negocio como esta donde se analiza la posibilidad de instalar un sistema de mantenimiento basado en condición, que a la larga le va a traer beneficios y se podrá reintegrar la inversión realizada.

La empresa naval y en especial la Armada Nacional de Colombia siempre ha buscado reducir costos en mantenimiento y reparación de equipos para poder invertir en otros activos de mayor importancia para cumplir su misión institucional, pero solo se lleva a cabo un mantenimiento preventivo o basado en tiempo donde a determinado tiempo se efectúa el cambio de una pieza sin importar si esta en buen estado o no. Con la técnica aquí propuesta se busca reducir el costo de mantenimiento y aumentar el TMEF.

## 1.1 EL PROGRAMA DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO

El objetivo de un programa de mantenimiento predictivo, es conocer la condición de la maquinaria, de tal manera que se pueda determinar su operación de manera segura, eficiente y con economía. Las técnicas de monitoreo están dirigidas a la medición de variables físicas que son indicadores de la condición de la máquina y mediante un análisis, efectuar la comparación con valores normales, para determinar si está en buen estado o en condiciones de deterioro. Esta estrategia asume que hay características medibles y observables que son indicadores de la condición de la maquinaria. Podemos clasificar los beneficios del PMP en:

- Detectar condiciones que pueden ser causa de falla
- Detectar problemas en la maquinaria
- Evitar fallos catastróficos
- Diagnóstico de la causa de la falla
- Pronóstico de utilidad

## **1.2.VENTAJAS DEL MANTENIMIENTO PREDICTIVO**

- Reduce el tiempo de parada al conocerse exactamente que órgano es el que falla.
- Permite seguir la evolución de un defecto en el tiempo.
- Optimiza la gestión del personal de mantenimiento.
- Requiere una plantilla de mantenimiento más reducida.
- La verificación del estado de la maquinaria, tanto realizada de forma periódica como de forma accidental, permite confeccionar un archivo histórico del comportamiento mecánico y operacional muy útil en estos casos.
- Permite conocer con exactitud el tiempo límite de actuación que no implique el desarrollo de un fallo imprevisto.
- Permite la toma de decisiones sobre la parada de una línea de máquinas en momentos críticos.
- Por ultimo garantiza la confección de formas internas de funcionamientos o compras de nuevos equipos.

## 2. MONITOREO POR CONDICIÓN

El monitoreo de condición estudia la evolución de los parámetros seleccionados en función del tiempo y establece una tendencia que indica la existencia de un fallo, su gravedad y el tiempo en que el equipo puede fallar. La toma de decisiones a tiempo permite evitar que el fallo se presente (proactivo) o eliminar la posibilidad de un fallo catastrófico (predictivo). La ventaja de esta estrategia, es que puede ser efectuado mientras el equipo está funcionando. De esta manera, las acciones de mantenimiento o corrección de los parámetros de funcionamiento cuando las mediciones así lo indiquen, evitando acciones intrusivas a la maquinaria que son generadoras de defectos. Los objetivos del monitoreo por condición es indicar cuándo existe un problema, para diagnosticar entre condiciones buena y mala; y si es mala indicar cuán mala es, evitando fallos catastróficos, diagnosticar fallos con problemas específicos, pronosticar la vida útil y cuánto tiempo más podría funcionar el equipo sin riesgo de fallo. Esta técnica permite el análisis paramétrico de funcionamiento cuya evaluación permite detectar un fallo antes de que tenga consecuencias más graves.

En general, consiste en estudiar la evolución temporal de ciertos parámetros y asociarlos a la evolución de fallos, para así determinar en que período de tiempo ese fallo va a tomar una relevancia importante, para así poder planificar todas las intervenciones con tiempo suficiente para que ese fallo nunca tenga consecuencias graves.

Una de las características más importantes es que no debe alterar el funcionamiento normal de los procesos, la inspección de los parámetros se pueden realizar de forma periódica o de forma continua, dependiendo de diversos factores como son: el tipo de planta, tipos de fallos a diagnosticar y la inversión que se quiere realizar.

## **2.1 BENEFICIOS DEL MONITOREO POR CONDICIÓN**

Una forma en la que se podría intentar evaluar los ahorros que se obtendrían al implementar una estrategia de mantenimiento de monitoreo por condición es confeccionando una lista de las detenciones producidos en los últimos años en conjunto con sus causas.

Con esto se podría determinar:

Cuáles intervenciones podrían haber resultado más económicas si se hubiera detectado, el fallo en una etapa más incipiente, evitando que la máquina funcionara hasta la rotura.

Qué averías podrían haber sido reparadas más rápidamente si se hubiese conocido bien, antes de abrir la máquina, cuál era el elemento defectuoso.

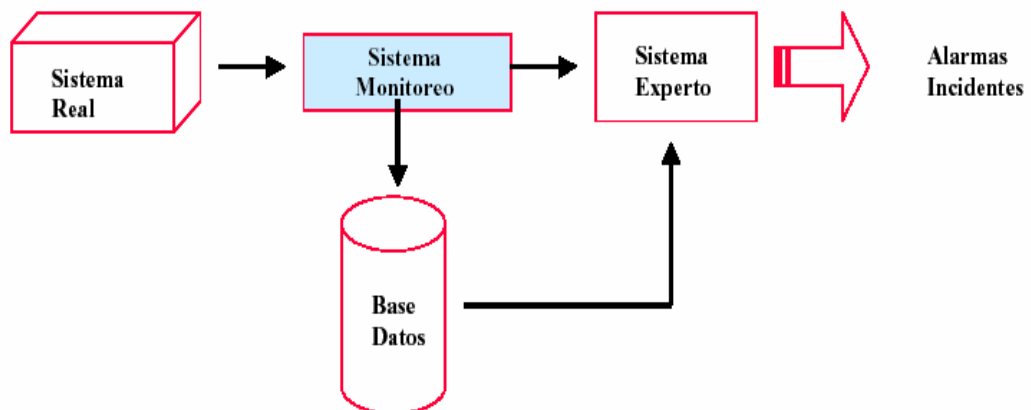
Cuáles serían los ahorros si después de efectuado un mantenimiento se controla la calidad del mantenimiento realizado. Para esto se evalúa la condición mecánica en que quedó la máquina a través del análisis de las mediciones realizadas inmediatamente después de la reparación. Las técnicas actuales del mantenimiento permiten verificar si un elemento reemplazado quedó disminuido debido a un procedimiento de montaje inadecuado (por ejemplo, un rodamiento con sus pistas de rodadura desgastadas). Evalúe así las economías que se obtendrían por ese concepto si los elementos reemplazables de las máquinas de su planta duraran lo especificado en las normas bajo las cuáles fueron compradas las máquinas. El coste del mantenimiento debe considerar: Costos directos (repuestos, materiales, mano de obra, etc.), costos de movilización de repuestos, costes de lucro cesante o pérdidas por no producción, costes por falta de calidad del producto.

La finalidad del monitoreo según condición (Condition monitoring) es obtener una indicación de la condición (mecánica) o estado de salud de la máquina, de manera que pueda ser operada y mantenida con seguridad y economía.

### 3. APLICACIÓN EN SISTEMAS EXPERTOS

En el campo del monitoreo por condición los sistemas expertos se utilizan fundamentalmente como herramientas de diagnóstico. Se trata de que el programa pueda determinar en cada momento el estado de funcionamiento de sistemas complejos, anticipándose a los posibles incidentes que pudieran acontecer. Así, usando un modelo computacional del razonamiento de un experto humano, proporciona los mismos resultados que alcanzaría dicho experto.

Figura 2. Sistemas expertos



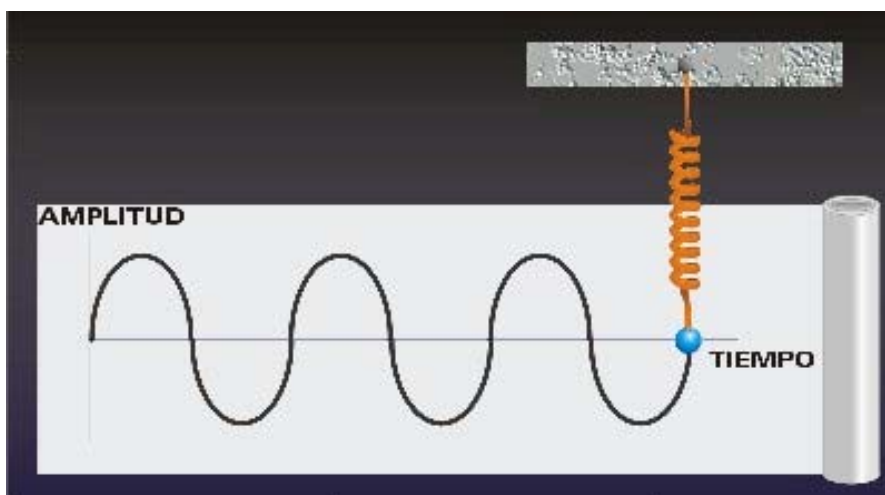
**Fuente: Tesis Avance e implementación de nuevas técnicas**



## 4. LAS VIBRACIONES

Las vibraciones se definen como el movimiento oscilante que hace una partícula alrededor de un punto fijo. Este movimiento, puede ser regular en dirección, frecuencia y/o intensidad, o bien aleatorio, que es lo más corriente.

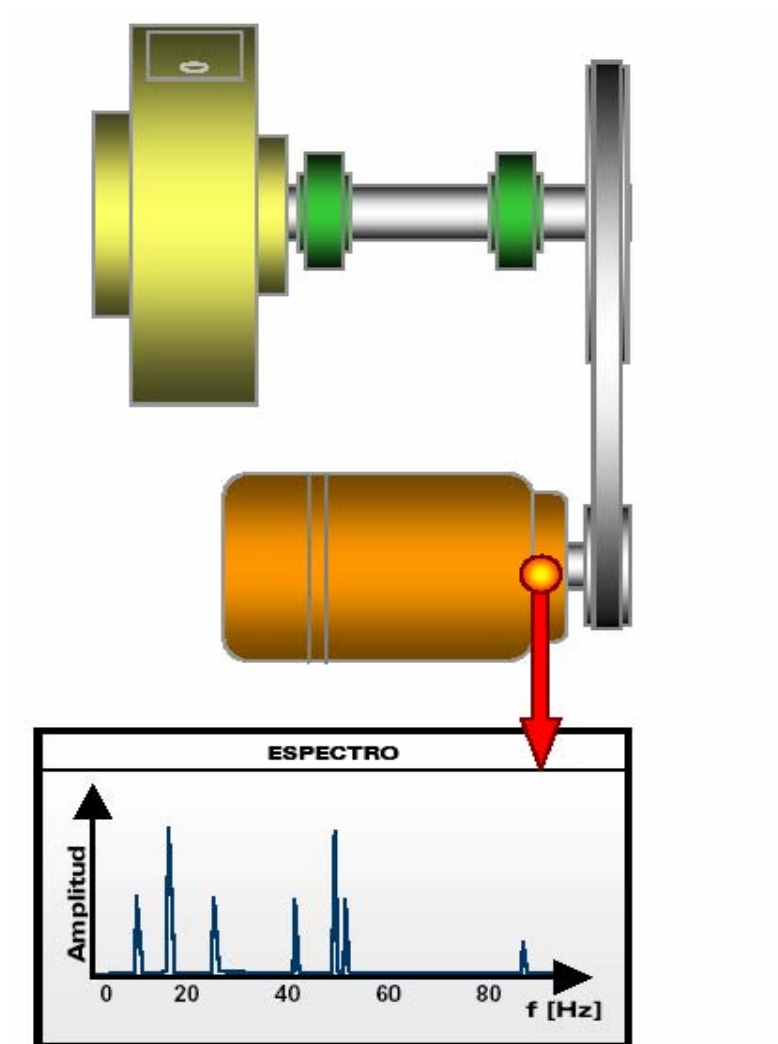
Figura 3. Diagrama de amplitud de onda.



Fuente: Análisis y vibraciones de maquinas rotatorias.

## 5. VIBRACIONES EN MAQUINAS

Figura 4. Espectro de onda de una maquina.



Fuente: Análisis y vibraciones de maquinas rotatorias.

A través de los años ya sea por contacto directo o con el empleo de algún dispositivo de naturaleza subjetiva, los operadores de máquina han empleado técnicas de verificación auditiva «también subjetivas» para comprobar si el comportamiento de "su máquina" es NORMAL o no. De aquí que, tradicionalmente y quizás en forma inconsciente, las vibraciones hayan sido utilizadas como un indicador del estado técnico de las máquinas y hasta hoy día, continúen siendo el fenómeno más representativo del estado técnico de éstas, pudiéndose a través de la medición de vibraciones, detectar e identificar fallos ya desarrollados o en período de desarrollo prematuro.

## **6. CONCEPTOS BÁSICOS DE VIBRACIÓN.**

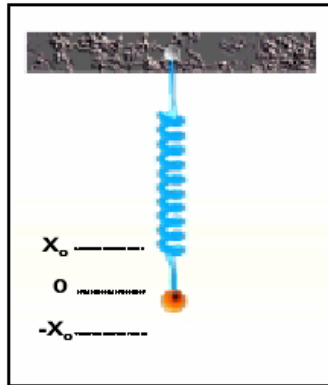
En términos muy simples una vibración es un movimiento oscilatorio de pequeña amplitud.

Todos los cuerpos presentan una señal de vibración en la cual plasman cada una de sus características. De acuerdo a esto, las máquinas presentan su propia señal de vibración y en ella se encuentra la información de cada uno de sus componentes. Por tanto, una señal de vibración capturada de una máquina significa la suma vectorial de la vibración de cada uno de sus componentes.

### **6.1 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. Sus características principales son que poseen una amplitud, periodo constante.

Figura 5. Simulación de onda en vibración simple.

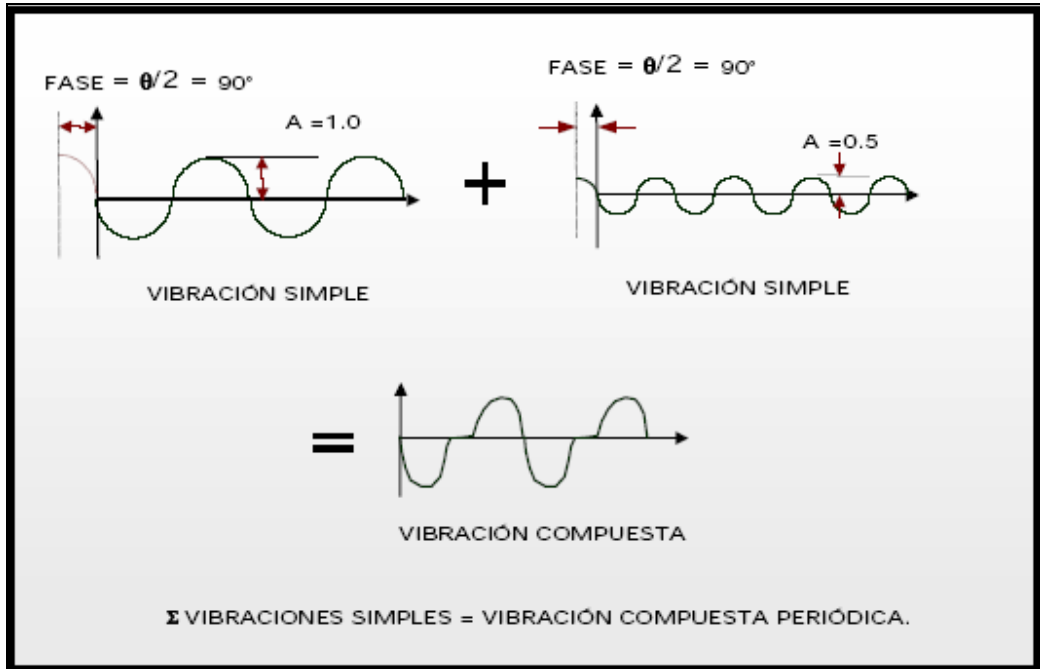


Fuente: Análisis y vibraciones de maquinas rotatorias.

## 6.2 VIBRACIÓN COMPUESTA:

Una señal compuesta es una sumatoria de varias señales sinusoidales (simples) que comprenden cada uno de los componentes que se encuentran en la máquina.

Figura 6. Vibración compuesta

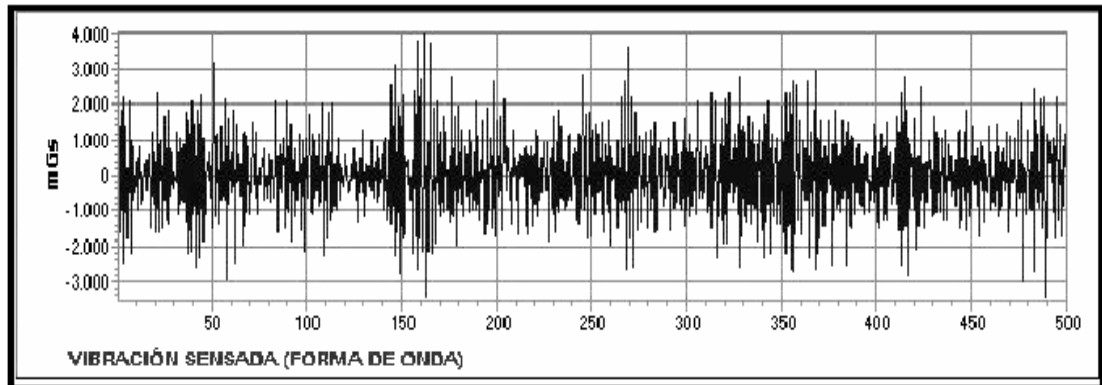


Fuente: Tesis Avance e implementación de nuevas técnicas

### 6.3 VIBRACION ALEATORIA Y GOLPETEOS INTERMITENTES

Además de las vibraciones simples, también existen otros tipos de vibraciones como son la vibración aleatoria y los golpeteos intermitentes. La vibración aleatoria no cumple con patrones especiales que se repiten constantemente o es demasiado difícil detectar donde comienza un ciclo y donde termina. Estas vibraciones están asociadas generalmente turbulencia en blowers y bombas, a problemas de lubricación y contacto metal-metal en elementos rodantes o a cavitación en bombas.

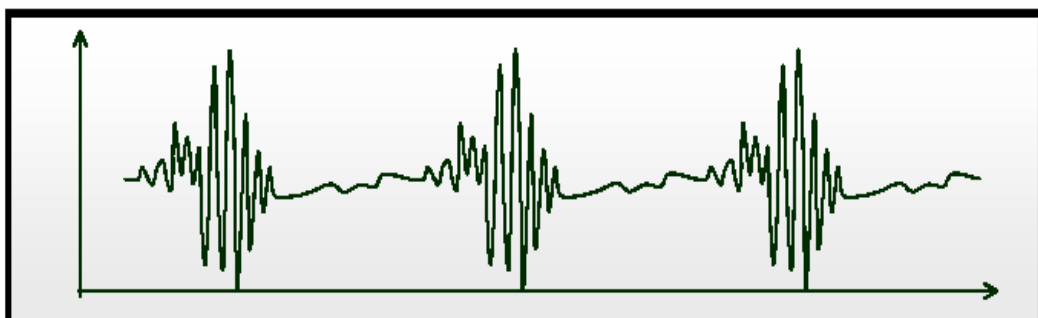
Figura 7. Vibración aleatoria.



**Fuente: Análisis de vibraciones –Universidad de Concepción**

Los golpeteos intermitentes están asociados a golpes continuos que crean una señal repetitiva. Estas se encuentran mas comúnmente en los engranajes, en el paso de las aspas de un impulsor o ventilador, etc. Este tipo de señales tiende a morir debido a la amortiguación del medio.

Figura 8. Golpeteos intermitentes.



**Fuente: Estudio y ensayos de componentes estructurales**

## **7. INTRODUCCIÓN A LAS VIBRACIONES EN MAQUINAS ROTATIVAS.**

La razón principal para analizar y diagnosticar el estado de una maquina es determinar las medidas necesarias para corregir la condición de vibración, reducir el nivel de las fuerzas vibratorias no deseadas y no necesarias. De manera que, al estudiar los datos, el interés principal deberá ser la identificación de las amplitudes predominantes de la vibración, la determinación de las causas, y la corrección del problema que ellas representan.

### **7.1 MONITOREO DE VIBRACIONES PARA UN BUEN MANTENIMIENTO**

Tradicionalmente, en la industria se ha desarrollado la actividad del mantenimiento sobre la base de dos estrategias fundamentales. Por una parte, la maquinaria es operada en forma continua de acuerdo con el régimen de trabajo de la industria en cuestión, efectuándose la intervención de mantenimiento cuando se presente alguna avería en la máquina, todo lo cual se conoce como estrategia de Mantenimiento Correctivo.



Por otro lado, en otros tipos de máquinas el mantenimiento se aplica cada ciertos intervalos de tiempo que pueden ser definidos en base a recomendaciones del fabricante, frecuencia de fallos, métodos fiabilísticos, etc., lo que evidencia una estrategia de Mantenimiento Preventivo Planificado.

Sin embargo, desde hace más de cuarenta años el mundo desarrollado ha venido implementando y perfeccionando las Tecnologías Predictivas, cuya base conceptual radica en la intervención de la máquina cuando lo justifique la presencia de síntomas objetivos del deterioro de su condición mecánica.

Las Tecnologías Predictivas se sustentan en la interpretación de los resultados de las mediciones de diferentes magnitudes, que caracterizan el comportamiento mecánico de la maquinaria industrial, todo lo cual permite la conformación de un diagnóstico eficaz del estado técnico de la máquina y de sus propios elementos.

## **7.2 CAUSAS MAS FRECUENTES DE VIBRACIONES EN MAQUINAS DE COMBUSTION.**

El diagnóstico de maquinaria a partir del análisis de vibraciones se torna complejo ya que son muchos los factores de los que es función la señal de vibración recibida. Esta es dependiente de la posición del sensor con el que se están tomando las vibraciones, de las características de los componentes mecánicos de

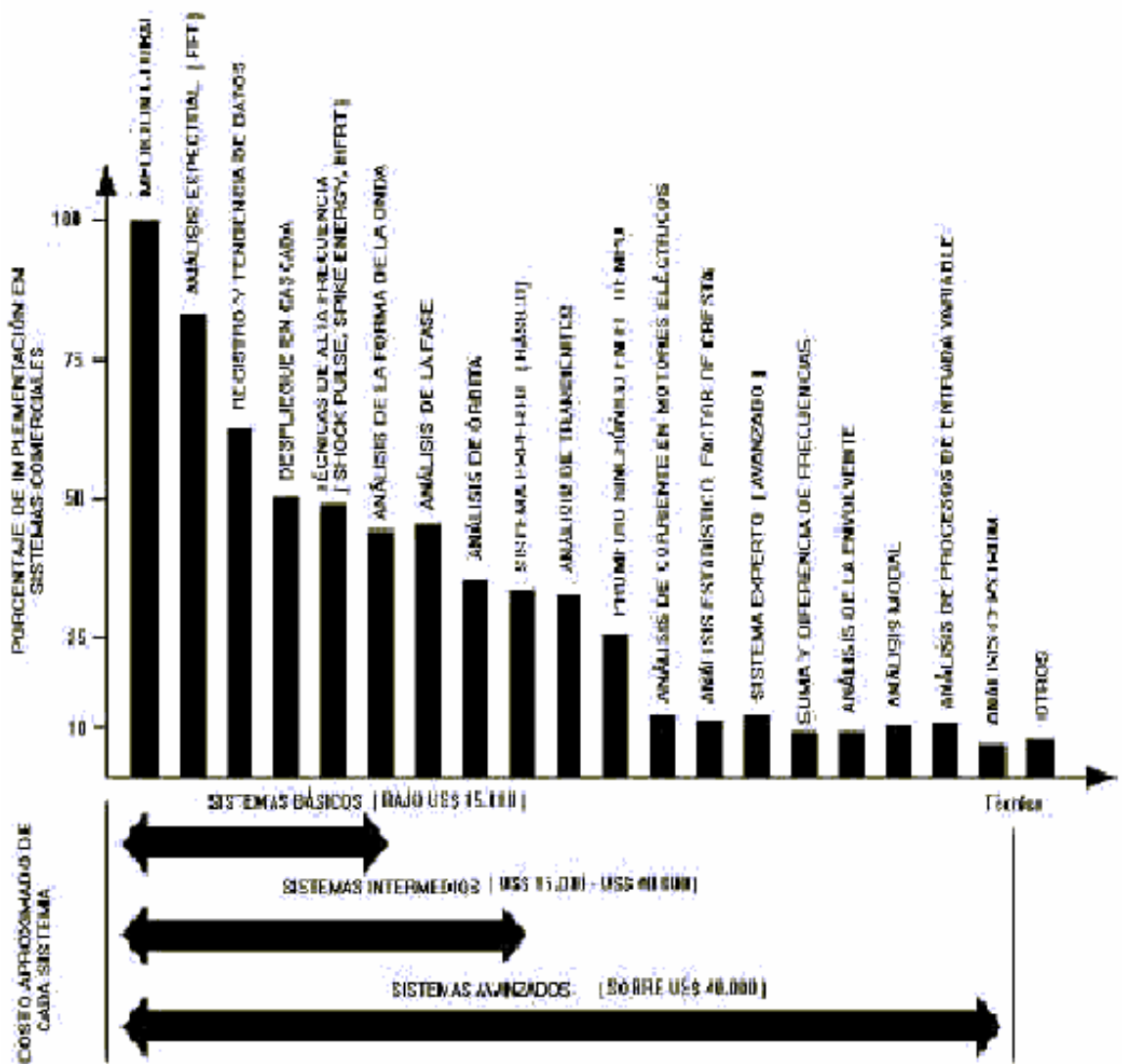
la máquina en cuestión, de la magnitud de las señales aleatorias que siempre están presentes y distorsionan la señal de vibración, de la complejidad del patrón de vibraciones que genera algún fallo específico a detectar, etc. A esto se añade el hecho de que la señal de vibración tomada a través de acelerómetros se encuentra cambiando constantemente, por lo que una muestra simple y aislada no proporciona información suficiente. Para obtener un indicador de la condición de la máquina se necesita procesar una cantidad alta de muestras de la señal de vibración para después extraer características invariantes en el tiempo. Estos elementos han hecho que se profundice en la temática de las técnicas de análisis de señal, persiguiendo efectuar un diagnóstico lo más preciso posible.

En el espectro de vibración se planteó que la frecuencia indica ¿qué anda mal en la máquina? y la amplitud ¿cuán severo es el problema?. Esto se traduce en dos etapas de trabajo, una denominada DETECCIÓN del problema, para lo cual es necesario haber definido el llamado ESPECTRO DE REFERENCIA, que obviamente es un espectro correspondiente a las vibraciones registradas en el mismo punto donde habitualmente se mide en la máquina, pero que fue obtenido cuando se estimó que dicha máquina exhibía una condición mecánica normal. Contra este espectro se compararán las mediciones sucesivas, pudiéndose detectar si alguna de las componentes de frecuencia ha incrementado su amplitud hasta niveles no permisibles, lo cual a su vez indica que se está desarrollando un fallo en la máquina.

La otra etapa contempla la IDENTIFICACIÓN del problema, para lo cual se toma como base los resultados anteriores y se inicia una investigación para identificar dónde está localizado y cuál es el problema que ha provocado un exceso en los niveles de vibraciones registrados.

En general, el espectro en frecuencia no engaña sino que puede ser analizada erróneamente, medida de forma inapropiada o interpretada incorrectamente. Sin embargo, las amplitudes pueden ser sobrestimadas o subestimadas. Si durante el monitoreo de la condición vibracional de la máquina se lleva a cabo un diagnóstico de fallos, entonces se podrán detectar problemas potenciales antes de que se produzca la rotura catastrófica.

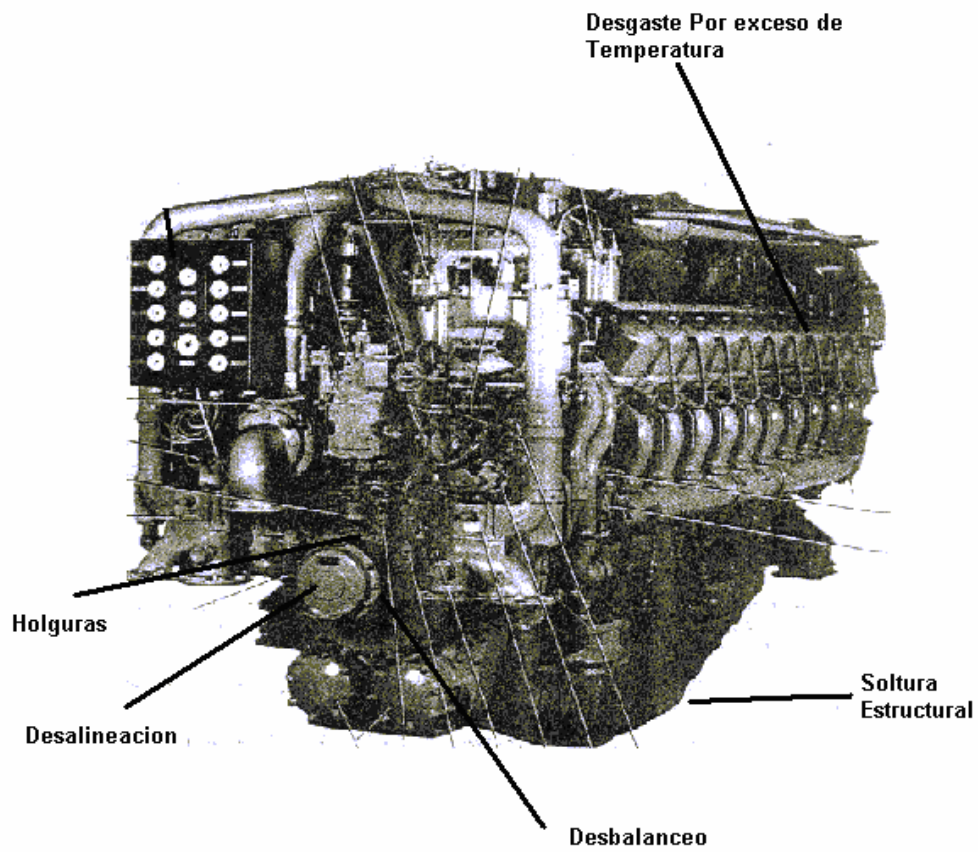
Figura 9. Técnicas vibratorias utilizadas



Fuente: Nuevas técnicas en análisis y mantenimiento predictivo

## 8. DIAGNOSTICO DE LA MAQUINARIA POR PROBLEMAS DE VIBRACION

Figura 10. Fallas por vibraciones en motores diesel marinos.



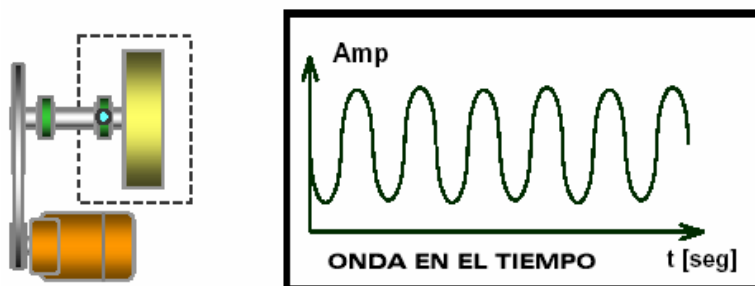
Fuente: Armada Nacional

## 8.1 DESBALANCEO.

El desbalance de la maquinaria es una de las causas más comunes de la vibración. En muchos casos, los datos arrojados por un estado de desbalance indican:

1. La frecuencia de vibración se manifiesta a 1x las rpm de la pieza desbalanceada.
2. La amplitud es proporcional a la cantidad de desbalance.
3. La amplitud de la vibración es normalmente mayor en el sentido de medición radial, horizontal o vertical (en las maquinas con ejes horizontales).
4. El análisis de fase indica lecturas de fase estables.
5. La fase se desplazará  $90^\circ$  si se desliza el captador  $90^\circ$ .

Figura 11. Maquina con problemas de balanceo

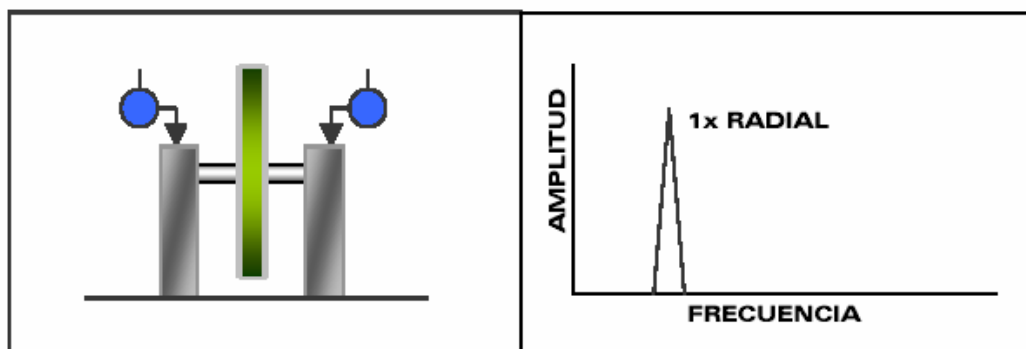


**Fuente: Análisis y vibraciones de maquinas rotatorias.**

Los dos tipos básicos de falta de balanceo en la maquinaria son: estático y dinámico.

**ESTÁTICO:** Producido generalmente por desgaste radial superficial no uniforme en motores en los cuales su largo es despreciable en comparación con su diámetro. El espectro presenta vibración dominante con una frecuencia igual a 1 X RPS del motor. Se recomienda para corregir la falla balancear el motor en un sólo plano (en el centro de gravedad del motor) con la masa adecuada y en la posición angular calculada con un equipo de balanceo. La presencia del desbalanceo como único problema en la máquina se refleja en los espectros de las vibraciones medidas en los cojinetes de apoyo del motor, como una componente definida claramente a la frecuencia de rotación del elemento desbalanceado.

Figura 12. Desbalanceo estático

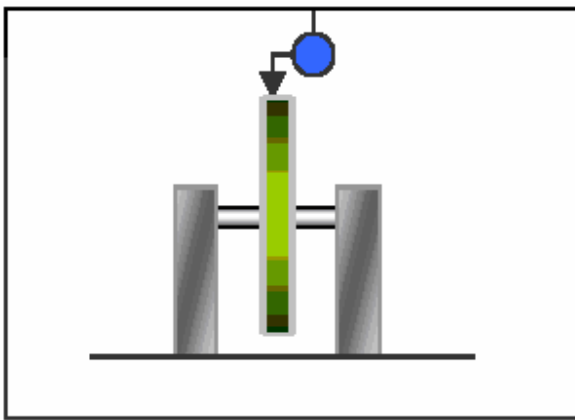


**Fuente: Análisis y vibraciones de maquinas rotativas.**

**DINÁMICO:** El desbalanceo dinámico ocurre en motores medianos y largos. Es debido principalmente a desgastes radiales y axiales simultáneos en la superficie

del motor. El espectro presenta vibración dominante y vaivén simultáneo a frecuencia igual a 1 X RPS del motor. Se recomienda para corregir la falla balancear el motor en DOS PLANOS con las masas adecuadas y en las posiciones angulares calculadas con un equipo de balanceo dinámico.

Figura 13. Desbalanceo dinámico



**Fuente: Análisis y vibraciones de maquinas rotatorias.**

**8.1.1 Gravedad de Desbalanceo.** La gravedad del desbalanceo depende del tipo y del tamaño de la máquina y del nivel de vibración. Para estimar la gravedad del desbalanceo habrá que usar niveles 1x promedios de las máquinas sanas del mismo tipo como punto de comparación. Si el pico de segundo orden es del mismo tamaño que el de primera orden, se puede sospechar desbalanceo.

Los niveles siguientes son guías para uso general en el diagnóstico del desbalanceo para máquinas que giran de 1800 a 3600 RPM. Máquinas de muy alta velocidad tienen niveles de tolerancia más bajos (Ver Anexo 1).



El análisis de fase indica lecturas de fase estables. La fase se desplazará  $90^\circ$  si se desplaza el captador  $90^\circ$ .

## **8.2 DESALINEACIÓN.**

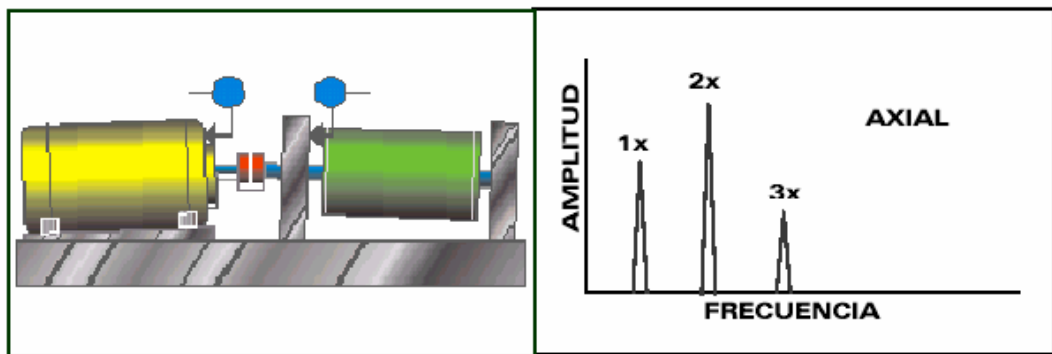
La desalineación es una condición en la que las líneas centrales de flechas acopladas no coinciden. Si las líneas centrales de las flechas desalineadas están paralelas pero no coinciden, entonces se dice que la desalineación es una desalineación paralela. Si las flechas desalineadas se juntan pero no son paralelas, entonces la desalineación se llama desalineación angular. Casi todas las desalineaciones que se observen en la práctica son una combinación de los dos tipos de base.

El desalineamiento es la fuente de vibraciones que más se puede controlar e incluso eliminar con un trabajo serio del mecánico de taller, coincidiendo muchos especialistas que el desalineamiento constituye la razón de aproximadamente, el 50 % de los problemas de vibraciones que se presentan en la industria.

**8.2.1 Tipos De Desalineación.** Los tres tipos básicos de falta de alineamiento en el acoplamiento son: angular, en paralelo y entre chumaceras

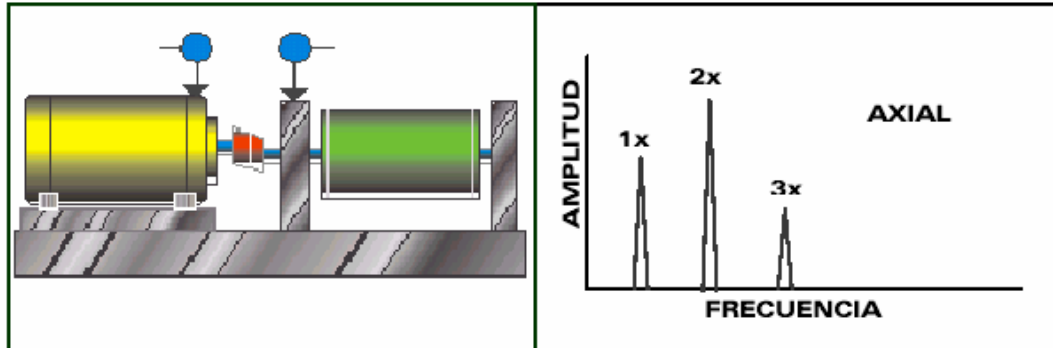
ANGULAR: Ocurre cuando el eje del motor y el eje conducido unidos en el acople, no son paralelos. Caracterizado por altas vibraciones axiales. 1X RPS y 2X RPS son las más comunes con 1X RPS predominante, con desfase de 180 grados a través del acople. También se presenta 3X RPS. Estos síntomas también indican problemas en el acople. Para corregirlo, el conjunto motor-rotor deben alinearse. Debe emplearse un equipo de alineación adecuado.

Figura 14. Desalineación angular



PARALELA: Los ejes del motor y del rotor conducido están paralelos, pero no son colineales. Se pueden detectar altas vibraciones radiales a 2X RPS, predominante, y a 1X RPS, con desfase de 180 grados a través del acople. Cuando aumenta la severidad, genera picos en armónicos superiores (4X , 8X). Se debe alinear el conjunto para corregir el daño. Debe emplearse un equipo de alineación adecuado.

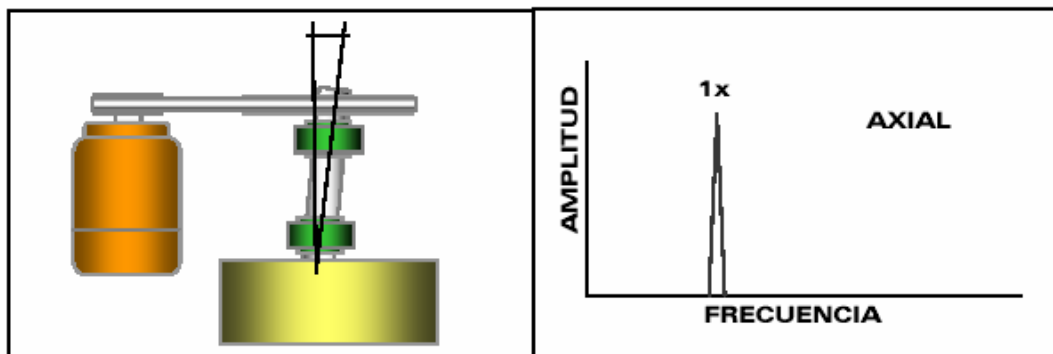
Figura15. Desalineación paralela.



**Fuente: Análisis y vibraciones de maquinas rotatorias.**

ENTRE CHUMACERAS: En una máquina con transmisión de poleas, la mala posición de las chumaceras puede evitar que el eje se acomode correctamente, lo cual genera vibraciones anormales en sentido axial y radial. Excitación del pico representativo de la velocidad (1X RPS), especialmente en sentido axial. Es necesario hacer una verificación de que las chumaceras queden completamente paralelas entre si.

Figura 16. Desalineacion entre chumaceras



**Fuente: Análisis y vibraciones de maquinas rotatorias.**

### **8.3 VIBRACION DEBIDA A EXCENTRICIDAD**

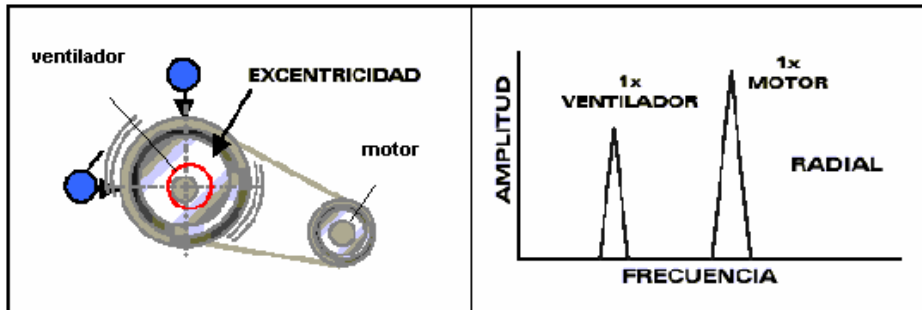
La excentricidad es otra de las causas comunes de vibración en la maquinaria rotativa. Excentricidad en este caso no significa “ovalización”, sino que la línea central del eje no es la misma que la línea central del rotor. El centro de rotación verdadero difiere de la línea central geométrica.

La excentricidad es en realidad una fuente común de desbalances, y se debe a un mayor peso de un lado del centro de rotación que del otro.

Una manera de diferenciar entre desbalance y excentricidad en este tipo de motor es medir la vibración con filtro afuera mientras el motor está funcionando bajo corriente. Luego, se desconecta el motor, observando el cambio de la amplitud de vibración. Si la amplitud se reduce gradualmente mientras el motor sigue girando por inercia, es muy probable que el problema sea debido a desbalance; Si, en cambio, la amplitud de vibración desaparece en el momento mismo en que el motor es desconectado, el problema es seguramente de naturaleza eléctrica, y es muy posible que se deba a excentricidad del inducido.

La excentricidad en rodetes o rotores de ventiladores, sopladores, bombas y compresores puede también crear fuerzas vibratorias. En esos casos las fuerzas son el resultado de fuerzas aerodinámicas e hidráulicas desiguales que actúan contra el rotor.

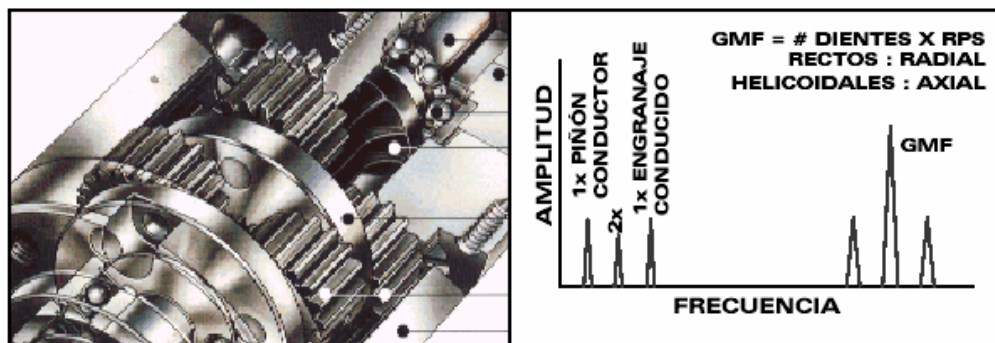
Figura 17. Excentricidad



Fuente: Análisis de vibraciones de maquinas rotativas

#### 8.4 VIBRACIONES EN ENGRANAJES

Figura 18. Vibración en engranajes



Fuente: Medición análisis y vibraciones

Las transmisiones por engranajes también son susceptibles de ser diagnosticadas en cuanto a su estado técnico se refiere, estudiando e interpretando correctamente sus registros vibroacústicos. Midiendo vibraciones en la transmisión, se pueden identificar problemas tales como, una inapropiada relación entre los números de dientes, excentricidad o errores de cilindricidad, montaje en árboles deformados, soldaduras del engranaje respecto a su árbol, desalineamiento, oscilaciones torsionales y la fractura o deterioro de los dientes.

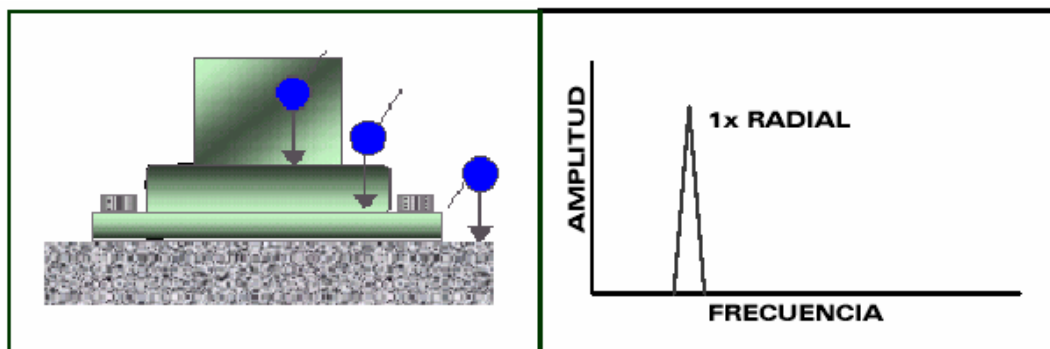
La llamada frecuencia de engranaje (GMF) se determina multiplicando el número de dientes Z de una rueda por su velocidad de operación.

$$GMF = Z \times f$$

## 8.5 SOLTURA ESTRUCTURAL

SOLTURA ESTRUCTURAL: Ablandamiento o desplazamiento del pié de la máquina, por holgura en los pernos de la base o por deterioro de los componentes de la sujeción. El espectro presenta vibración a 1X RPS en la base de la máquina con desfase a 180 grados entre los elementos sujetos en el anclaje. Altamente direccional en la dirección de la sujeción. Se recomienda primero revisar el estado de fatiga del pié de máquina (rajaduras, corrosión). Luego debe verificarse el estado de los sujetadores y por último el estado de la cimentación.

Figura 19. Soltura estructural

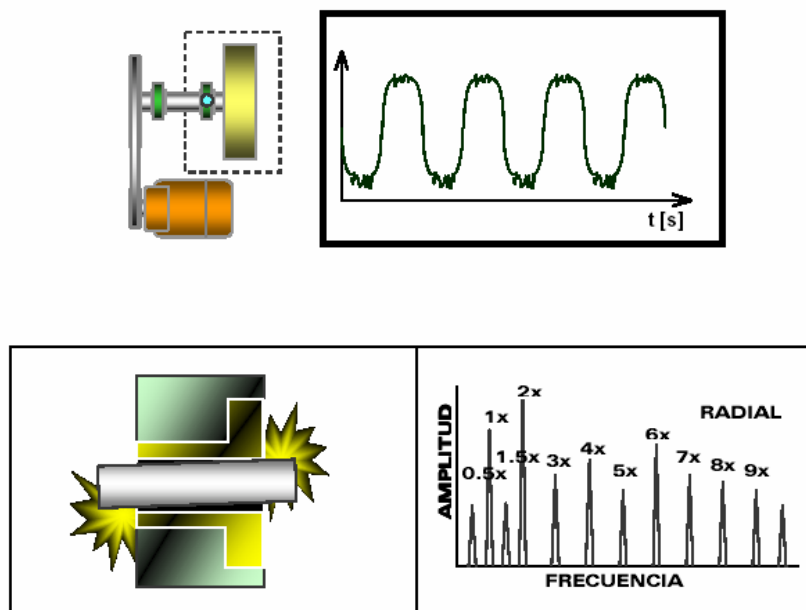


Fuente: Análisis y vibraciones de maquinas rotatorias.

## 8.6 HOLGURA MECANICA EJE-AGUJERO

HOLGURA EJE-AGUJERO: Aflojamiento de manguitos, tolerancias de Manufactura inadecuadas (con juego), y holgura entre el impulsor y su eje en bombas. Causa un truncamiento en la forma de onda en el dominio del tiempo. La falla genera múltiples armónicos y subarmónicos de 1X RPS, destacándose los armónicos fraccionarios 1/2 X, 1/3 X, 1.5 X, 2.5 X, ... Frecuentemente la fase es inestable y el nivel máximo tiende a una dirección notable realizando lecturas radiales espaciadas 30 grados entre si. Se recomienda verificar la colocación de los manguitos y los juegos eje-agujero cercanos al punto de medición. Igualmente, los ajustes de rotor-eje.

Figura 19. Holgura eje-agujero



Fuente: Medición Análisis y vibraciones.

## 8.7 ELEMENTOS RODANTES DEFECTUOSOS

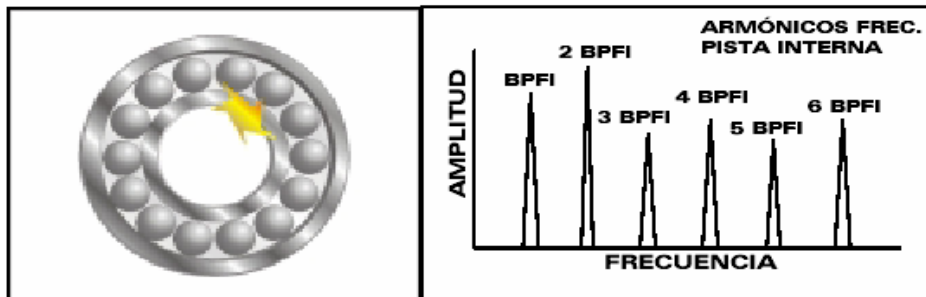
Defectos en las pistas, en las bolas o en los rodillos de rodamientos de elementos rodantes ocasionan vibración de alta frecuencia; y, lo que es mas, la frecuencia no es necesariamente un múltiplo integral de la velocidad de rotación del eje. La amplitud de la vibración dependerá de la gravedad de la falla del rodamiento. La vibración generada por el rodamiento normalmente no es transmitida a otros puntos de la máquina. Por lo tanto, el rodamiento defectuoso es generalmente el que se encuentra más cerca del punto donde ocurre el mayor nivel de vibración de este tipo.

**8.7.1 Falla de Rodamientos.** Los rodamientos no fallan prematuramente a menos que alguna otra fuerza actúe sobre ellos; y tales fuerzas son generalmente las mismas que ocasionan vibración.

- Falla en pista interna: Agrietamiento o desastillamiento del material en la pista interna, producido por errores de ensamble, esfuerzos anormales, corrosión, partículas externas o lubricación deficiente. Se produce una serie de armónicos siendo los picos predominantes 1X y 2X RPS, la frecuencia de falla de la pista interna, en dirección radial. Además el contacto metal - metal entre los elementos rodantes y las pistas producen pulsos en el dominio del tiempo del orden de 1-10 KHz. El rodamiento debe ser reemplazado, debido a que la falla seguirá incrementándose. Antes revise el estado de lubricación del rodamiento. Generalmente la medida mas confiable es en dirección de la carga.



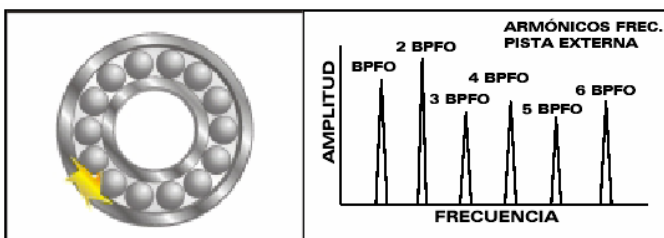
Figura 21. Falla pista interna de un rodamiento



**Fuente: Determinación de protocolo de inspección no intrusiva.**

- **FALLA EN PISTA EXTERNA:** Agrietamiento o desastillamiento del material en la pista externa, producido por errores de ensamble, esfuerzos anormales, corrosión, partículas externas o lubricación deficiente. Se produce una serie de armónicos siendo los picos predominantes 1X y 2X RPS la frecuencia de falla de la pista externa, en dirección radial. Además el contacto metal - metal entre los elementos rodantes y las pistas producen pulsos en el dominio del tiempo del orden de 1-10 KHz El rodamiento debe ser reemplazado, debido a que la falla seguirá incrementándose. Antes revise el estado de lubricación del rodamiento. Generalmente la medida mas confiable es en dirección de la carga.

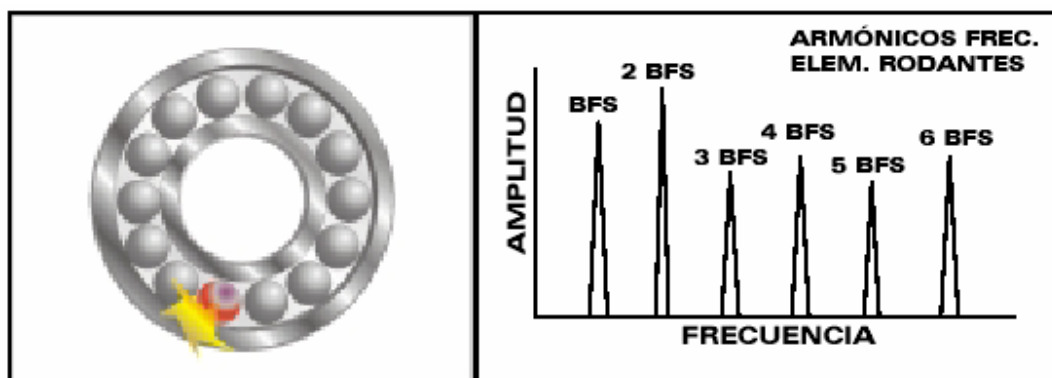
Figura 22. Falla pista externa de un rodamiento



**Fuente: Determinación de protocolo de inspección no intrusiva.**

- **FALLA EN ELEMENTOS RODANTES:** Agrietamiento o desastillamiento del material en los elementos rodantes, producido por errores de ensamble, esfuerzos anormales, corrosión, partículas externas o lubricación deficiente. Se produce una serie de armónicos siendo los picos predominantes 1X y 2X RPS la frecuencia de falla de los elementos rodantes, en dirección radial. Además el contacto metal – metal entre los elementos rodantes y las pistas producen pulsos en el dominio del tiempo del orden de 1-10 KHz El rodamiento debe ser reemplazado, debido a que la falla seguirá incrementándose. Antes revise el estado de lubricación del rodamiento. Generalmente la medida mas confiable es en dirección de la carga.

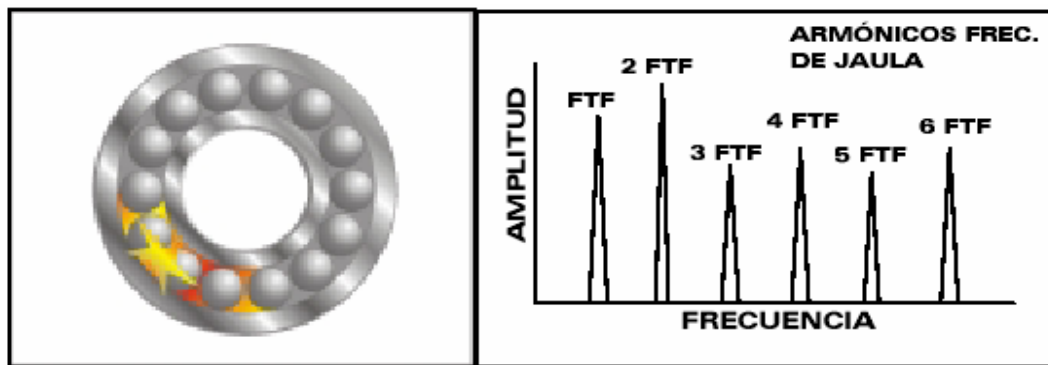
Figura 23. Falla contacto metal-metal en un rodamiento



**Fuente: Determinación de protocolo de inspección no intrusiva.**

DETERIORO DE JAULA: Deformación de la jaula, caja o cubierta que mantiene en su posición a los elementos rodantes. Se produce una serie de armónicos de la frecuencia de la jaula siendo los picos predominantes 1X y 2X RPS de la frecuencia de falla en jaula, en dirección radial o axial. El rodamiento debe ser reemplazado, debido a que la falla seguirá incrementándose. Revise la posible causa que está dando origen a la falla.

Figura 24. Deterioro de jaula de un rodamiento



Fuente: Determinación de protocolo de inspección no intrusiva.

## 9. TERMOGRAFIA

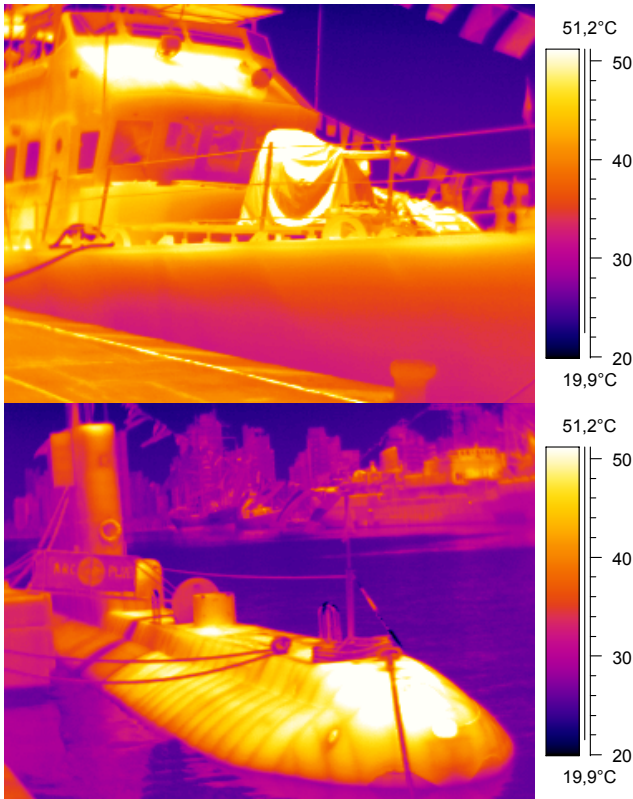
La temperatura y el comportamiento térmico de la maquinaria es un factor crítico en el mantenimiento industrial.

La medición de temperatura por no contacto usando sensores infrarrojos ha llegado a ser una alternativa creciente sobre otros métodos convencionales. La Termografía o imágenes térmicas infrarrojas se utilizan como un método eficaz de ensayo no destructivo y forma parte del mantenimiento predictivo.

El mantenimiento predictivo y control térmico por imágenes es posible con la ayuda de sofisticadas cámaras de detección de infrarrojos, de la computadora y la utilización de innovados software y hardware.

Al utilizar razonablemente esta tecnología de punta su costo es recuperado en corto plazo, puesto que facilita a los Gerentes de Mantenimiento tomar las decisiones más adecuadas, reduciendo considerablemente los altos costos del mantenimiento correctivo y garantizando alta confiabilidad a las instalaciones.

Figura 25. Termografía



Fuente: ITC

## 9.1 DEFINICION DE TERMOGRAFIA

Esta técnica, basada en el análisis del espectro infrarrojo, permite determinar puntos calientes y zonas que indican la presencia de anomalías en equipos eléctricos y electrónicos, desalineamiento de engranajes y fugas de calor en equipos de proceso.

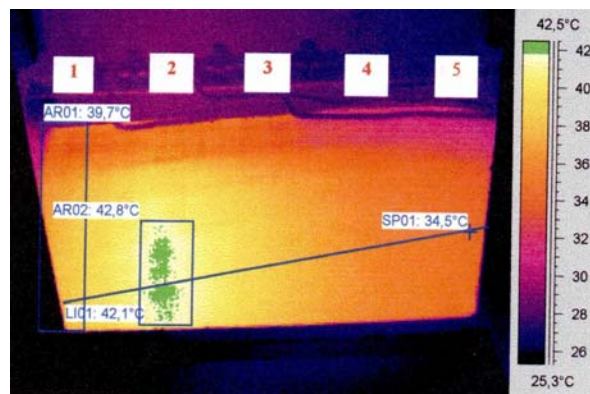
Figura 26. Análisis termografico



*Análisis termográfico del  
alineamiento de un engranaje.*

*Foto con luz visible.*

*Análisis termográfico del  
alineamiento de un engranaje.  
Imagen termográfica.*



**Fuente: ITC**

La investigación desempeña un rol muy importante en el análisis de cualquier estructura. La determinación de las propiedades mecánicas de un material dado es evaluada fundamentalmente a través de un método mecánico, que es lo más directo. Por ejemplo, para determinar la resistencia de una roca, se necesita aplicar una tensión hasta que esta colapse. Aunque, por este método la resistencia de la roca es evaluada, esta no puede ser utilizada en el futuro.

Un método alternativo es el Ensayo No Destructivo, este método tiene la ventaja de evaluar propiedades dependientes del tiempo para cualquier material sin que este se vea físicamente afectado.

Conviene definir ahora que no es el Ensayo No Destructivo, el Ensayo No Destructivo pregunta “Hay alguna falla en este material”. Varias pruebas de desempeño en cambio preguntan ¿Trabaja este componente?. Por esta razón no se considera cuando un inspector prueba un circuito haciendo circular corriente eléctrica a través de este.

La termografía comprende todos aquellos métodos en los cuales dispositivos sensores de calor son usados para medir las variaciones de temperatura en componentes, estructuras, sistemas o procesos físicos.

Esta técnica históricamente ha sido considerada innovadora, es objeto de interés debido a su alta productividad y relativo bajo costo.

Las fallas en equipos pueden dividirse según su localización, en externas e internas. En general, las fallas externas son simples y las internas son complejas. Por lo tanto, las fallas externas son fácilmente distinguibles y las internas son difíciles de discernir. Para encontrar fallas internas por medio de la termografía infrarroja, se debe conocer las características de estas en relación con las características de la termografía.

La interpretación de imágenes ha demostrado ser la parte más difícil de muchas aplicaciones de inspección térmica. Fuertes indicios con grandes diferencias de temperatura son los más fáciles de interpretar. Estos proveerán usualmente una imagen más verdadera de la anomalía que indicios débiles. Una anomalía cercana a la superficie del material producirá un indicio más fuerte que una anomalía idéntica lejana a la superficie, y el indicio resultante reflejará con mayor precisión el tamaño y forma de la fuente.

## 9.2 CONSIDERACIONES TEORICAS

La radiación térmica consiste en la transmisión de energía en forma de onda electromagnética, que es capaz en mayor o menor grado, de atravesar e interactuar con los medios físicos según las características del medio y de su propia longitud de onda. Aunque las diferencias de longitud de onda hacen que sus efectos sean sustancialmente diferentes, toda radiación emitida se encuentra gobernada por las mismas leyes físicas, pudiendo concluirse que la radiación total de un cuerpo real es:

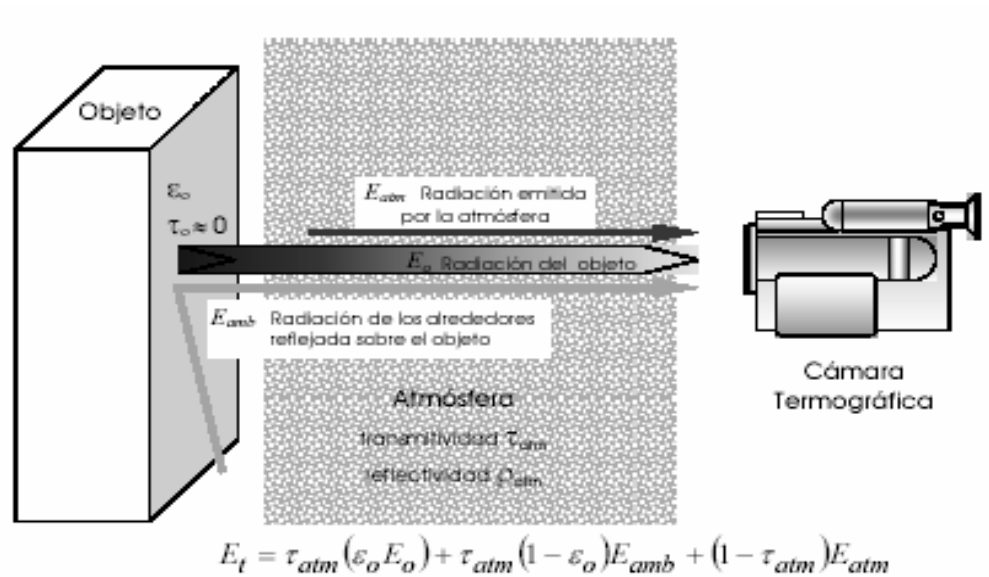
$$E^{\circ} = \sigma \varepsilon T^4$$

Expresión denominada *Ley de Stefan-Boltzmann*, la cual establece que la energía radiante de un cuerpo real aumenta proporcionalmente a la cuarta potencia de la temperatura absoluta de la superficie. Como factor de relación se tiene a la



emisividad, cuya determinación generalmente no es fácil ya que superficial que posea el objeto radiante.

Figura 27. Toma de IR



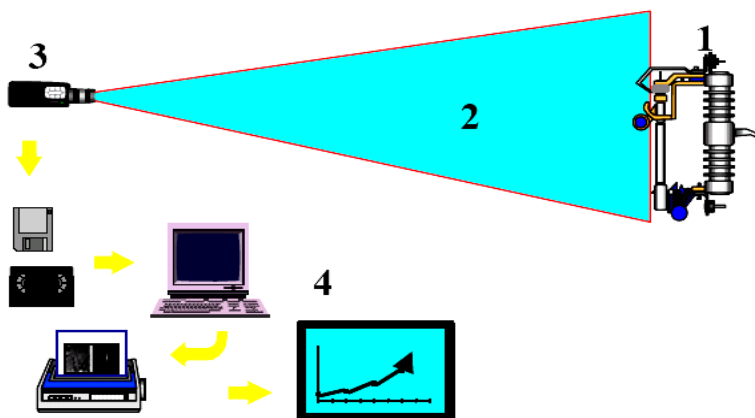
**Fuente: Centro de investigaciones científicas ENAP**

No obstante, la radiación que alcanza al sensor no solo está afectada por la temperatura del cuerpo a medir y su emisividad, sino también por la influencia de las radiaciones procedentes de los alrededores del objeto, la atmósfera (temperatura y humedad), la distancia de medida y la propia aportación térmica de la óptica y elementos internos. Las condiciones del entorno se corrigen por algoritmos que afectan la radiación total detectada por el sensor infrarrojo, según muestra la Figura el primer término corresponde a la emisión propia del objeto afectada por la transmitividad atmosférica; el segundo término representa la

reflexión de la radiación ambiente sobre la superficie y el tercer término es la radiación generada por la atmósfera (suponiéndola sin reflectividad). Los factores internos, corresponden a la radiación emitida por el propio sistema termográfico, tanto de la óptica como de los elementos internos, los cuales son compensados de forma automática y continua para no incidir sobre la lectura.

### 9.3 ESQUEMA PARA MEDIR TEMPERATURA CON EL SISTEMA IR

Figura 28. Esquema para medir Temperatura



Fuente: centro de investigaciones científicas.

#### 9.3.1 elementos que componen el esquema de medición de temperatura.

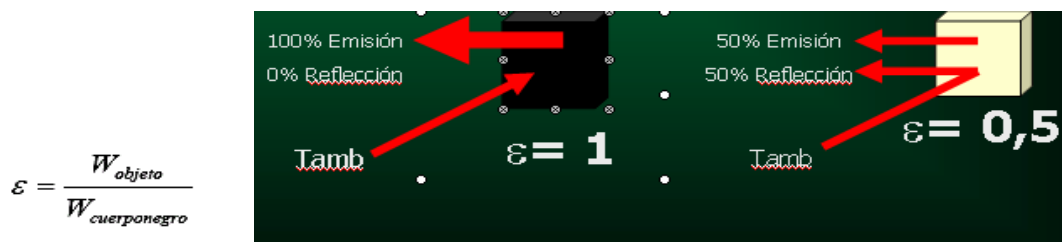
##### (1-2.) OBJETO A MEDIR Y MEDIO AMBIENTE

Objetivo al cual se le pretende medir la temperatura, atmósfera y cuerpos que rodean al objetivo.

Todos los cuerpos con temperatura por encima del cero absoluto ( $-273,16^{\circ}\text{K}$ ), emiten radiación electromagnética, si la emisividad del objeto a medir es inferior a uno (emisor no perfecto) él va a reflejar la energía del ambiente que este cerca.

Este fenómeno debe ser considerado especialmente si la emisividad del objeto es menor a 0,9.

*Emisividad* - La emisividad es la relación entre la cantidad de radiación emitida ( $W$ ) por el objeto a medir y la que sería emitida por un cuerpo negro a la misma temperatura y  $\lambda$ .



La emisividad tiene siempre un valor entre 0 y 1, ya que el cuerpo negro es el emisor perfecto y por lo tanto el que emite la mayor cantidad de energía posible para una temperatura y  $\lambda$  dadas.

Los cuerpos se clasifican de acuerdo a la manera en que su emisividad varía con la longitud de onda:

- Cuerpo Negro,  $\varepsilon = 1$
- Cuerpo Gris,  $\varepsilon < 1$ , constante con  $\lambda$
- Radiador Selectivo (objeto a medir),  $\varepsilon < 1$ , varía con  $\lambda$

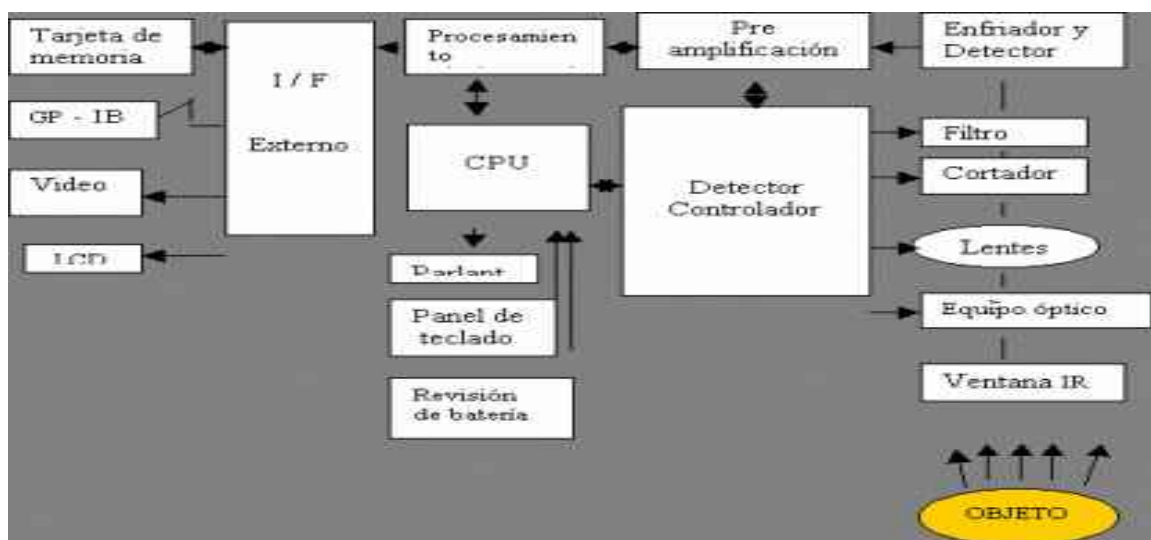
Teniendo en cuenta la emisividad, la ley de Stefan-Boltzmann queda:

$$W = \varepsilon \sigma T^4$$

### (3.) CÁMARA IR

El sistema ojos – cerebro no es sensible a la radiación infrarroja emitida por un objeto, pero una cámara termografía es capaz de sensor la energía con sensores infrarrojos que pueden ver estas invisibles longitudes de onda. Esto nos permite medir la energía radiante auto emitida por objetos y por lo tanto determinar la temperatura de la superficie remotamente y sin contacto. La radiación infrarroja es la señal de entrada que la cámara termográfica necesita para generar una imagen de un espectro de colores correspondiente a la temperatura.

Figura 29. Esquema de funcionamiento de una cámara de i. R.



**Fuente: Centro de investigaciones científicas ENAP**

### (4.) UNIDAD DE VIDEO

Compuesto de un procesador de señal, monitor de video y los controles de selección y ajuste de imagen. La función básica del monitor de video es la presentación de la información térmica detectada por la cámara.

*Sistemas Complementarios* - Son aquellos que me permiten interactuar con la cámara IR y generar información a partir de ella. Van desde el almacenamiento de imágenes y grabación de videos hasta el manejo de software para análisis de imágenes, generación de reportes, análisis de tendencias y cronogramas de mantenimiento con archivos.

#### **9.4 FACTORES QUE AFECTAN MEDIR TEMPERATURA CON SISTEMAS IR**

- Reflejos solares, .puede causar una falsa medida de temperatura. Se corrigen con filtros ó cambiando la posición de la cámara hasta que desaparezcan.
- Atenuación atmosférica, ya que la atmósfera no es totalmente transparente a la radiación infrarroja, parte de esta es absorbida y reflejada en el trayecto del objeto al receptor óptico de la cámara. Esta influencia es usualmente despreciada para distancias menores a 20m. Las regiones del espectro IR que menos se ven afectadas por este fenómeno son aquellas en que los detectores IR (FPA) se desempeñan, precisamente diseñados para ello. Los equipos modernos de IR hace una corrección automática introduciendo los valores de temperatura ambiental, humedad relativa y distancia al objeto.

- Cuerpos transparentes, la medición de temperatura a través de ellos debe tomarse con precaución, ya que son buenos transmisores de radiación infrarroja solo para ciertas longitudes de onda. Se corrige con filtros.
- Influencia de la velocidad del viento, La disipación de calor por convección se ve afectada en gran medida por la velocidad del viento, lo que provoca una refrigeración del objeto a medir. Se corrige con fórmula para velocidades del viento que no excedan un límite permitido.
- Influencia de la corriente en sistemas eléctricos, La potencia disipada por un componente es directamente proporcional al cuadrado de la corriente, originándose un aumento considerable de temperatura al aumentar esta. Se corrige aplicando el factor de corrección de carga, para cargas que no estén por debajo de un límite permitido.

## 10. CONSIDERACIONES PREVIAS

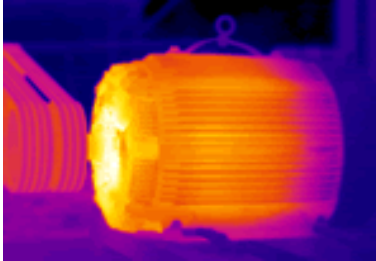
De acuerdo al primer principio de la termodinámica donde se aplica que la energía correspondiente al poder calorífico debe abandonar el motor en una u otra forma, se aplicara que los porcentajes de energía a desalojar son:

1. Energía suministrada por el motor como trabajo mecánico (Potencia efectiva) 25%.
2. La cantidad de calor transmitida al agua de refrigeración 19%.
3. Cantidad contenida en los gases de escape 44%.
4. Cantidad de calor transmitido por el motor al ambiente (radiación–conducción) 12%.

Son muchos los trabajos de investigación llevados a cabo recientemente, donde se utiliza la Termografía Infrarroja como medida termométrica.

- La radiación emitida es elevada, por lo que es difícil detectar incrementos pequeños de radiación, debido a que los puntos de medida son afectados por la radiación de las zonas adyacentes. Por tanto, debe tenerse especial cuidado con los factores que corrigen la radiación reflejada.

Figura 30. Imagen termográfica de un motor



**Fuente: ITC**

- Los termogramas muestran gran diferencia de temperaturas entre áreas contiguas, que imposibilitan el establecimiento de límites operacionales. Debido a esto se elige el área de menor inercia térmica (más sensible y rápida a los cambios térmicos) como criterio para la determinación de las áreas de análisis.



## **11. APLICACIONES DE TERMOGRAFÍA INFRARROJA EN EL MANTENIMIENTO INDUSTRIAL**

En el ámbito industrial la aplicación de la termografía en el área de mantenimiento es una de las más difundidas, especialmente en el mantenimiento llamado Predictivo o también en el mantenimiento Proactivo. (Ambos en base monitoreo de condición)

La Termografía Infrarroja en el área de mantenimiento presenta ventajas comparativas inigualables. Quizá sea el ensayo más divulgado y exitoso. Se complementa eficientemente como los otros ensayos del mantenimiento, así como son el análisis de lubricantes, el análisis de vibraciones, el ultrasonido pasivo y el análisis predictivo de motores eléctricos. También, por supuesto, con los ensayos no destructivos clásicos como lo son el ensayo radiográfico, el ultrasonido activo, tintas penetrantes, partículas magnéticas y corrientes inducidas.

A su vez, de todas las tecnologías relacionadas al mantenimiento, la Termografía Infrarroja sería la que está más vinculada a la seguridad de una instalación. Cuando nos referimos a seguridad queremos decir seguridad tanto de las personas como edificación. Toda falla electromecánica antes de producirse se manifiesta generando calor. (También se puede detectar pérdidas de frío) Este calor o elevación de temperatura puede ser una elevación súbita, pero por lo

general, dependiendo del objeto, la temperatura comienza a manifestarse lentamente. Ahí es donde la termografía se transforma en una herramienta irremplazable. El objetivo es poder detectar a priori fallas que pueden producir una parada de planta y/o una emergencia.

Esto se traduce o significa reducir costos ocultos por lucro cesante, reducir las pólizas de seguro de la planta en si y los seguros del personal en el área de accidentes del trabajo. Los otros costos que se reducen sensiblemente son los del sector de mantenimiento propiamente dicho. Área que puede organizar mejor sus tareas pensando a futuro y tratando de disminuir al mínimo posible las reparaciones diarias, las cuales son siempre muy costosas. También reduce los costos por disminución de stock de repuestos y por mejor control de los proveedores a los cuales pueden reclamar en caso que la disipación de calor no este conforme a las normas o a sus expectativas.

Cada planta e instalación tiene su historia de como fue concebida inicialmente y como se fueron sucediendo sus ampliaciones. La calidad de la ingeniería y el montaje inicial son fundamentales para los resultados futuros. La implementación de la termografía en el área de mantenimiento tiene un beneficio también indirecto sobre el área de producción y la calidad: menos paradas no programadas, lo cuál significa mayor productividad y también uniformidad en el producto.

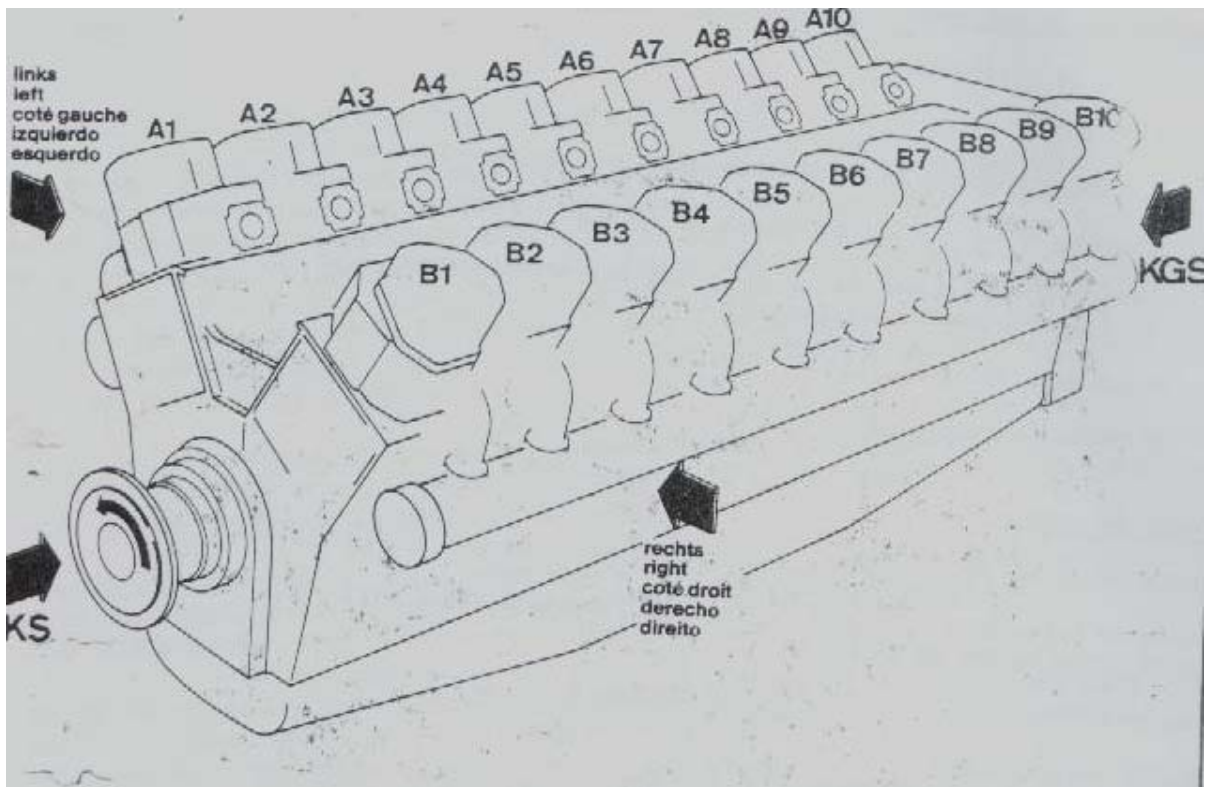
## **12. APLICACIÓN DE LA TERMOGRAFIA EN EL DIAGNOSTICO DE FALLOS EN MOTORES DIESEL.**

### **12.1 DESCRIPCION DEL MOTOR.**

Los motores propulsores que se encuentran a bordo de las fragatas de la Armada Nacional son motores diesel MTU 20 V 1163 TB 82. A continuación se explicara la designación de modelo del motor:

- 20 = Numero de cilindros.
- V = Motor en V.
- 1163 = Cilindrada de un cilindro multiplicada por cien, en litros.
- T = Turbosobrealimentacion por gases de escape.
- B = Refrigeración externa del aire de sobrealimentación por agua, con refrigeración de los pistones.
- 8 = Motor para la navegación.
- 2 = Cifra de construcción.

Figura 31. Descripción del motor



**Fuente: Armada Nacional**

Este motor tiene una potencia continua de 5304 CV a 1160 RPM y una potencia de sobre carga durante 5 horas de 5834 CV a 1200 RPM. EL estado de referencia esta enmarcado con una temperatura del aire aspirado de 45 °C, temperatura del agua externa de 32 ° C y presión barométrica de 1000 mbar.

Entendiendo como fallo todo descenso del nivel de prestaciones por debajo de un límite mínimo aceptable, es posible establecer el criterio de fallo por medio de una “Firma de Comparación” aplicable a cada tipo de síntoma y para cada máquina en particular. De esta manera el comportamiento del motor puede ser evaluado en

estado “Normal” y “Anormal”, y siempre que se pueda encontrar el origen del fallo y su severidad por medio de una manifestación sensible, se dispondrá de una herramienta útil del diagnóstico de este fallo.

Las ventajas de la Termografía Infrarroja como sistema termométrico básicamente son, la adquisición inmediata de resultados y el carácter no intrusivo de la medida, que hacen de ésta, una técnica adecuada para el Mantenimiento Predictivo. Pero al igual que otras técnicas, presenta similares dificultades respecto al procedimiento de la predicción de fallos, es decir:

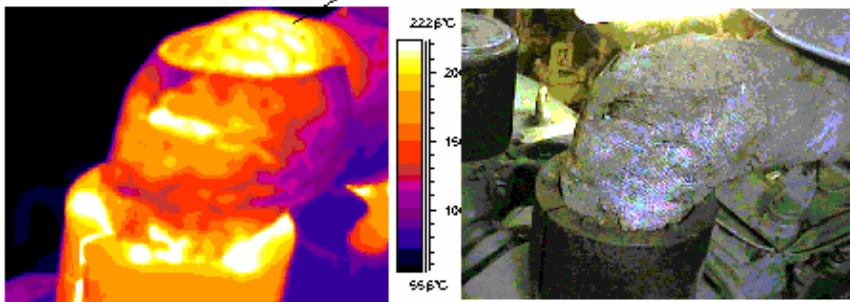
- La elección adecuada de el/los componente/s a monitorear.
- El establecer una relación entre la variable de control y las anomalías funcionales.
- El determinar los límites operacionales del síntoma para la anomalía específica.

Sin embargo, esta técnica proporciona amplias posibilidades y puede ser utilizada en la detección de anomalías, tales como:

- Identificación de puntos calientes, producidos por fricción, abrasión, lubricación deficiente o concentración de esfuerzos, permitiendo un control sobre los mismos.
- Medida de temperatura en lugares de difícil acceso o, donde no es posible determinar temperaturas por contacto.
- Determinación de la distribución de temperaturas por medio de curvas isotérmicas.

Figura 32. Imagen termográfica del colector del motor diesel marino

**Exceso de temperatura por fallo en aislamiento**



**Fuente: ITC**

En el caso de los motores de combustión interna los colectores de gases de escape pueden ser utilizados para el mantenimiento, esto debido a que reflejan las variaciones en la temperatura de los gases de la combustión, y a pesar que la transmisión de calor atenúa los pulsos de temperatura, la Temperatura Media y la Temperatura Transitoria mostrarán las variaciones producidas por cambios en las condiciones de funcionamiento del motor.

La temperatura de los colectores de escape se constituye en un método importante de diagnóstico por su relación con el proceso de combustión, en el que las principales variaciones en la temperatura de los gases de escape son producidas por mal funcionamiento en los sistemas de renovación de la carga, sistemas de inyección y el mecanismo de compresión. Puede entonces, bajo el monitorizado de éste componente, establecerse Firmas Térmicas del proceso de transformación en la cámara de combustión.

En la detección de fallos se debe hacer un estudio sistemático de los fallos y averías a través de los síntomas de mal funcionamiento que ha presentado el motor durante su tiempo de funcionamiento.

Aunque la gran diversidad de tamaños, estructuras, sistemas de funcionamiento y detalles constructivos y la propia complejidad del motor diesel, dificultan el establecimiento de un diagnóstico de fallos y averías único y seguro, gracias a la semejanza de los motores puede hacerse una aproximación a la resolución de este problema mediante la utilización de una lista de síntomas de mal funcionamiento y su relación con los fallos o averías causantes de tales síntomas.

Para la aplicación de la termografía se requiere determinar los fallos o averías que generan un síntoma de variación de temperatura presentadas en los diferentes tipos de motores diesel de las unidades navales.

A continuación se agrupan las principales fallas relacionadas con la temperatura de funcionamiento.

#### SISTEMA DE REFRIGERACIÓN:

Una cámara de agua demasiado fría impide conseguir el calor necesario para que el aire comprimido alcance la temperatura del encendido del diesel, en cuyo caso una parte del combustible saldría sin quemar del tubo de escape, en forma de humo.

La temperatura de enfriamiento del motor debe estar comprendida entre 77° - 85° C. La temperatura de funcionamiento raramente se alcanza cuando el motor gira a marcha a lenta. De ello se deduce que si un motor va a un reducido número de vueltas durante periodos prolongados, se tendrá una mala combustión, una pésima lubricación, un atascamiento de los anillos y un taponamiento de los agujeros de los inyectores.

Se podría suponer que mantener a baja temperatura el agua de refrigeración es un modo fácil de tener aire frío en los cilindros, pero no es así.

El cilindro que recibe aire frío del colector recibe más aire; pero ya dentro del cilindro, este aire debe calentarse por la compresión hasta la temperatura de combustión.

Un enfriamiento excesivo impide este calentamiento cuando el aire, en contacto con las paredes del cilindro, está a una temperatura demasiado baja. Este aire no será calentado suficientemente para inflamar el carburante inyectado en los cilindros.

El carburante no quemado pasará, sea por el tubo de escape en forma de hollín, o al carter del motor, y echará a perder el lubricante.

Por consiguiente, una temperatura demasiado baja del agua de refrigeración es doblemente perjudicial. No enfría el aire en el colector antes de introducirse en el cilindro, sino al contrario, retarda su calentamiento después de su entrada al cilindro.

En efecto el motor, se enfría por la circulación del agua y del aceite, y para realizarla es preciso que el motor gire. No puede disiparse el calor por los cojinetes, los pistones y las camisas.



## AVANCE DE LA INYECCIÓN

¿Por qué es necesario el avance de la inyección?

Se precisa cierto tiempo para que:

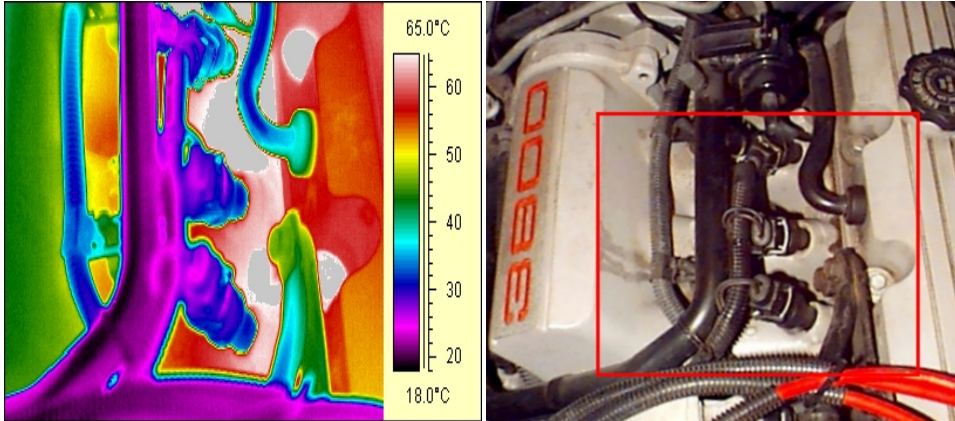
- 1.- El diesel suministrado por la bomba llegue a los inyectores y levante la aguja del inyector.
- 2.- El combustible salga vaporizándose y se inflame en el aire comprimido caliente.

Por tanto, el combustible debe salir de la bomba antes que el pistón motor haya alcanzado su punto muerto superior, fin de la compresión.

Un retraso de la inyección produce residuos importantes de combustión, falta de potencia y calentamiento excesivo del canal de la cámara de combustión. Un avance en exceso produce los mismos efectos que un retraso.

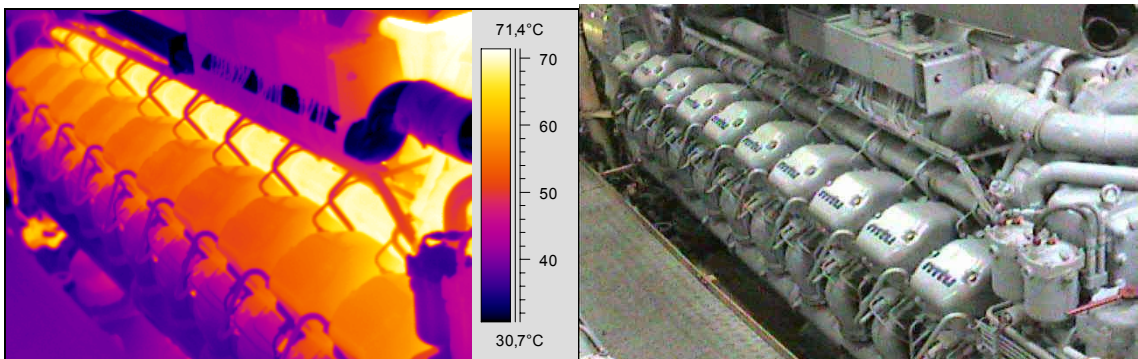
Las anomalías más frecuentes en el sistema de inyección han sido estudiadas realizando modelos de diagnóstico mediante curvas de presión en la línea. Estas curvas características resumen los fallos más frecuentes en: la variación en el avance de la inyección, variación en la presión de apertura del inyector, falta de presión en la línea de inyección, fugas por goteo y obstrucciones en el inyector. La cadena cinemática tiene características específicas condicionadas por el diseño y para cada tipo de motor, sin embargo es posible generalizar una anomalía común, que es la variación de la relación de compresión durante su funcionamiento

Figura 33. Imagen termográfica del inyector



**Fuente: ITC**

Figura 34. Imagen termográfica de la culata



**Fuente: Determinación de un protocolo de inspección no intrusiva**

## LUBRICACIÓN DE LOS MOTORES DIESEL.

El motor diesel trabaja en unas condiciones bastante extremas y parece ser que es más difícil de mantener la película del lubricante entre las superficies rozantes a causa de las elevadas temperaturas y presiones.

Las elevadas temperaturas de la cámara de combustión ocasionan que el aceite forme incrustaciones dentro de esta y sobre las paredes del carter. Los pistones

se recubren de un especie de barniz y los lodos se acumulan en el carter, perdiendo el aceite sus cualidades lubricantes. Lo anterior si no es cuidado ocasiona que se peguen los anillos del pistón y por ende se rayen las camisas del cilindro, lo que genera una perdida de potencia y aumento de vapores y gases de escape.

La dilución del aceite ocasionada por los residuos de combustible que llegan al carter por una mala combustión genera dificultades en la lubricación del motor, ya que al estar diluido se vuelve muy ligero disminuyendo la presión de la bomba de aceite, y por tanto los cojinetes no se hallan suficientemente sostenidos por la presión; aparece el rozamiento, aumenta el calor y el agarrotamiento de los cojinetes, generando fallos considerables en el motor.

#### RAJADURA DE CULATAS

Estas se rajan casi siempre entre las válvulas de aspiración y de escape. La causa reside frecuentemente en el recalentamiento o lo que es lo mismo por falta de enfriamiento.

Cuando un motor esta muy caliente y se le para bruscamente, sin dejarlo funcionar durante unos minutos en marcha acelerada en vacío, las culatas pueden rajarse.

Y pasa lo mismo cuando por un motivo cualquiera, se ha introducido aceite o petróleo sobre los pistones y estos permanecen sobre su culata. Cuando se vuelven a poner en marcha, siendo incompresibles los líquidos, la culata se raja al fin del tiempo de compresión.

### **13. PASOS DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL PROGRAMA DE MONITOREO POR CONDICIÓN (VIBRACIONES Y TERMOGRAFÍA)**

Al iniciar un programa de vibraciones se debe identificar inicialmente cuales son las piezas “malos actores” de un motor diesel basándose en los que posean menor MTBF y costos de mantenimiento mas bajos. Seguidamente examinar cada equipo de la planta y preguntarse, ¿Si esta máquina fallara en este momento que consecuencias me traería?

Las consecuencias pueden ser:

- a) Interrumpiría el proceso productivo y me llevaría a la perdida de producción y cese de obtención de utilidades.
- b) Su falla por algún tiempo no interrumpe la producción.
- c) No afecta el proceso productivo.

Cada una de estas consecuencias se agrupa en las siguientes categorías de criticidad de equipos:

- Crítico o equipo clase A: Equipo cuya parada interrumpe el proceso productivo llevando a la pérdida de producción y al cese de la obtención de utilidades.
- Semicrítico o equipo clase B: Equipo que participa del proceso productivo, pero su parada, por algún tiempo no interrumpe la producción.

- No crítico o equipo clase C: Equipo que no participa en el proceso productivo.

Dependiendo en que categoría se encuentre cada equipo (A, B, C) se realiza una clasificación del equipo si es: (crítico, semicrítico o no crítico).

Después de identificados los equipos, se trabajará con los equipos clase A y clase B, ya que son los más importantes desde el punto de vista de criticidad.

### **13.1 PASO 1: (CLASIFICACIÓN DE PIEZAS BASADO EN ANÁLISIS DE RIESGO)**

Teniendo en cuenta lo anterior, deberán ser analizados cada uno de las piezas clasificadas en clase A, clase B, en aspectos como: La función que tiene de cada uno dentro del proceso, amenazas que posee cada uno para no cumplir con su función (Patologías detectables por vibración y termografía), Exposición a riesgos físicos al realizar las mediciones y consecuencias para la empresa.

En los buques de guerra de la Armada Nacional se lleva a cabo un mantenimiento preventivo denominado MRS, donde se registra un historial de mantenimiento y en el cual se pueden verificar los puntos críticos de la maquinaria

## **13.2 PASO 2: (ESPECIFICACIONES BÁSICAS DE LOS EQUIPOS Y PUNTOS DE MEDICION)**

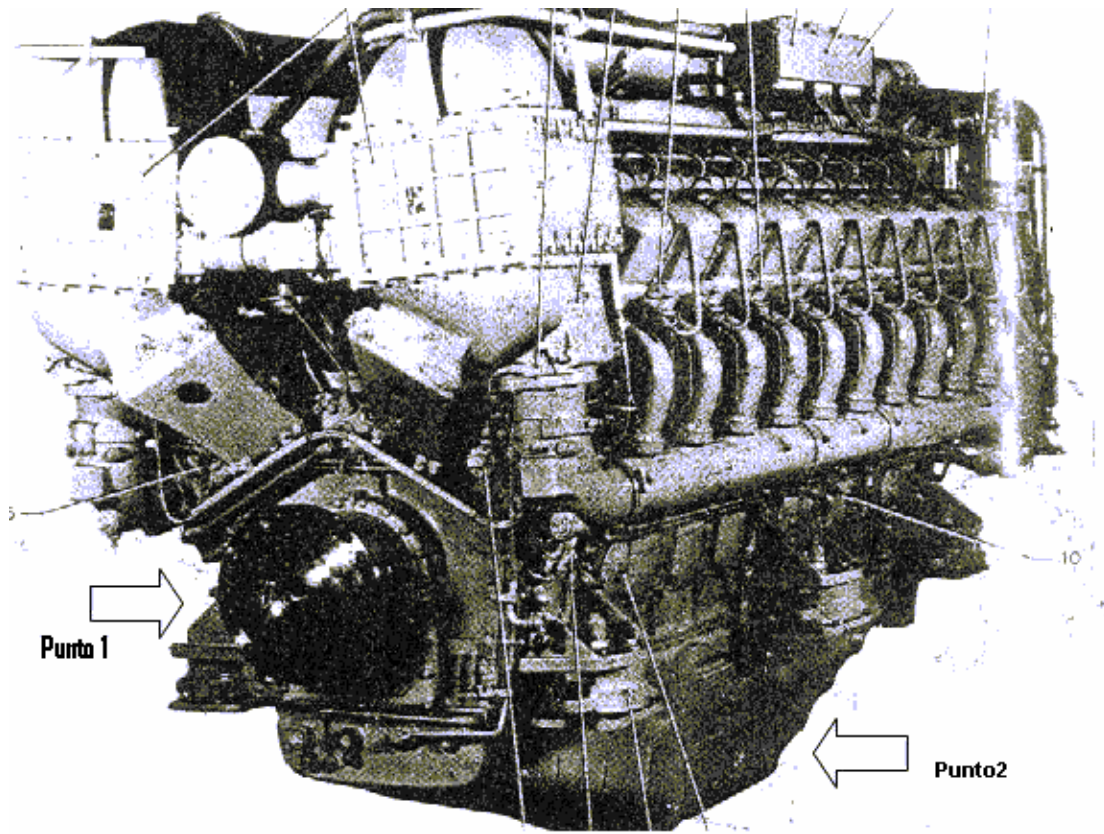
Es necesario conocer características básicas de los equipos, debido que gran porcentaje del nivel de acertividad de los diagnósticos de las patologías detectadas en los análisis de vibraciones y termografía depende del conocimiento de los datos de las máquinas como: Número de equipos que componen una máquina, Clase transmisión (correa, cadena, engranajes), Número de dientes, etc. También reconocer cuantos puntos de medición es necesario realizarle al equipo lo cuál impacta en el costo de la medición.

### **13.2.1 Identificación de los Puntos de Medición**

**13.2.1.1 Vibraciones.** Los puntos de medición se ubican generalmente en los apoyos de las maquina y se realizan en las tres direcciones de los ejes coordenados, algunas veces se agregan dependiendo las patologías que se quieran identificar.

A continuación se muestran ejemplos de la ubicación de los puntos de medición.

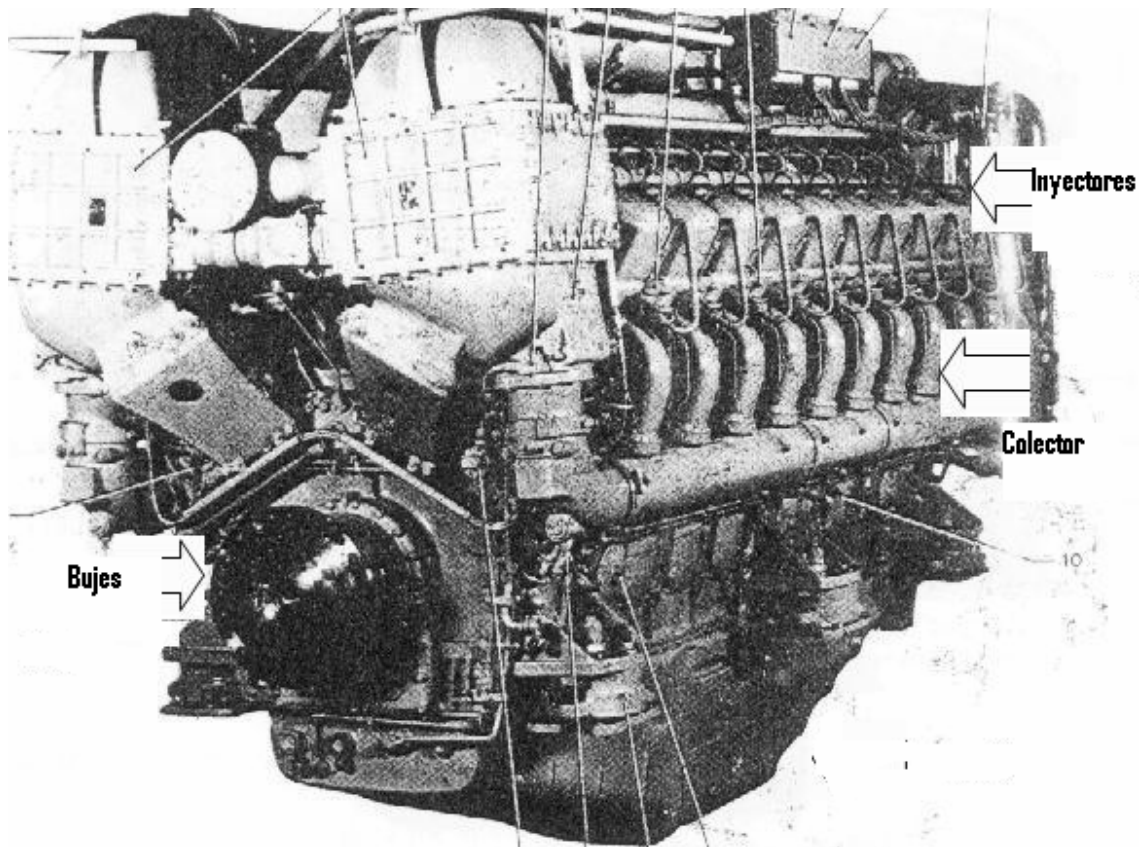
Figura 35. Identificación de puntos de medición de vibraciones



Fuente: Armada Nacional

### 13.2.1.2 Termografía

Figura 36. Identificación de puntos de medición de IR



Fuente: Armada Nacional

- Colector de escape: los colectores de gases de escape son utilizados para el mantenimiento, esto debido a que reflejan las variaciones en la temperatura de los gases de la combustión, y a pesar que la transmisión de calor atenúa los pulsos de temperatura, la Temperatura Media y la Temperatura Transitoria mostrarán las variaciones producidas por cambios en las condiciones de funcionamiento del motor. La temperatura de los colectores de escape se constituye en un método importante de diagnóstico



por su relación con el proceso de combustión, en el que las principales variaciones en la temperatura de los gases de escape son producidas por mal funcionamiento en los sistemas de renovación de la carga, sistemas de inyección y el mecanismo de compresión. Puede entonces, bajo el monitoreo de éste componente, establecerse Firmas Térmicas del proceso de transformación en la cámara de combustión.

- Inyectores: esta es una parte fundamental del motor, y por consiguiente debe ser monitoreada. El mal funcionamiento de un inyector puede ocasionar problemas de combustión, llevando consigo a una falla menor o a la pérdida del rendimiento del motor.

Entonces en este paso se procede a realizar la recolección de las especificaciones de los equipos y la identificación de los puntos de medición que han sido clasificados.

### **13.3 PASO 3: (ASIGNACIÓN DE FRECUENCIAS DE MEDICIÓN)**

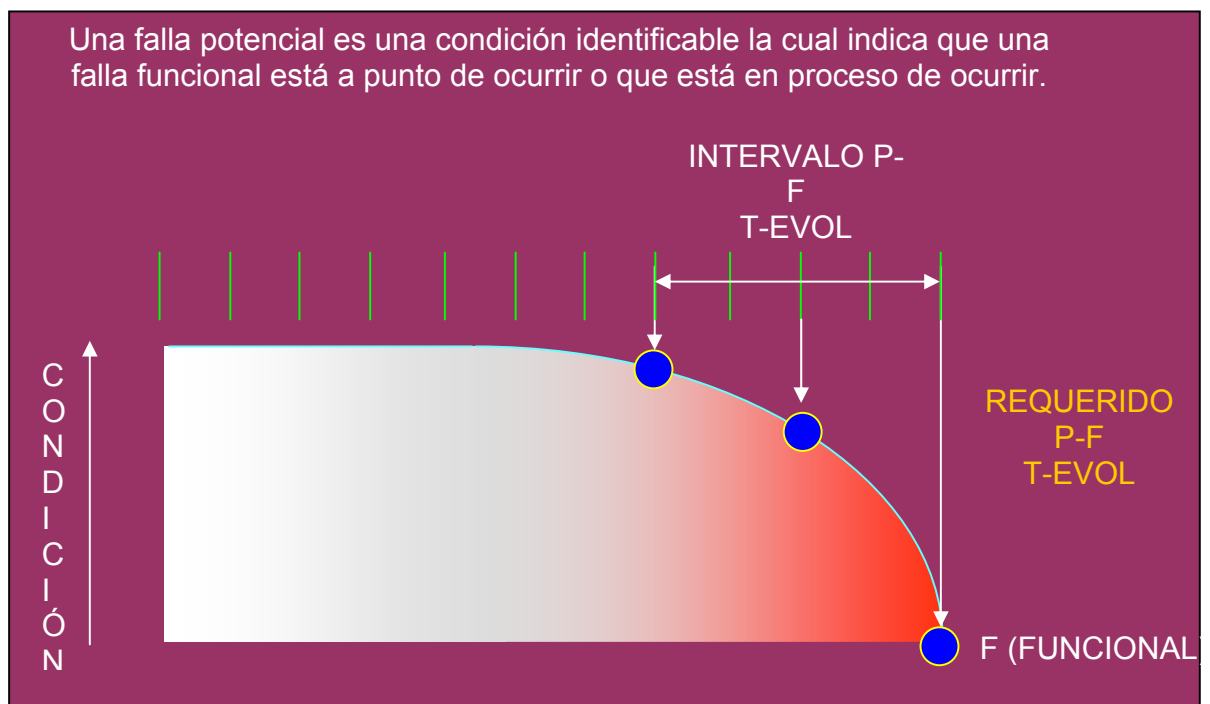
Cuando una falla es detectada entre los puntos P y F, podría ser posible tomar alguna acción para prevenir las consecuencias de una falla funcional. Dependiendo de cuán rápido la falla ocurra.

La curva P-F

Además de identificar, el punto de falla potencial se necesita considerar la cantidad de tiempo que pasa entre el punto de falla potencial y la falla total, en otras palabras, el punto donde la falla es detectable y el punto donde se da la falla funcional.

Este intervalo está conocido como el intervalo de P-F y se muestra en la siguiente figura.

Figura 37. Diagrama de falla



**Fuente: Metodología para implementación de un programa de mantenimiento.**

En la práctica es normalmente suficiente seleccionar la frecuencia de monitoreo con una equivalencia a la mitad el intervalo de P-F.

Esto asegura que la inspección descubrirá el fracaso potencial antes de que el fracaso funcional ocurra, mientras proporciona (en la mayoría de los casos) una cantidad razonable de tiempo para planear y programar actividades sobre él. Por esta razón de acuerdo al desempeño observado en el funcionamiento del equipo así como en el análisis de fallas ocurridas y su historial se determina que cuál es la frecuencia de medición adecuada para anticiparse a las fallas y mejorar la confiabilidad operativa del equipo.

Concretando todo lo explicado anteriormente, la frecuencia con la cuál se debe medir cada máquina depende directamente de la probabilidad de aparición de fallas detectables. Cabe destacar que este plan no maneja fallas son evidentes y de peligrosidad para los operarios, puesto que este tipo de fallas deberán ser atendidas inmediatamente, El plan solo contempla fallas cuando son moderadas y cuya detección oportuna repercuten en los costos de mantenimiento, operación y confiabilidad del equipo.

#### **13.4 INTERVALOS DE MEDICIÓN.**

En esta parte se agruparan las partes del motor en base la frecuencia de medición asignada (mensual, bimestral, trimestral, etc.). (ver anexo 3). Estos intervalos podrán ser modificados a medida que se implemente el plan y se realice una retroalimentación de los resultados obtenidos.

## **14. NORMAS QUE APLICAN LA TOMA DE VIBRACIONES E IMÁGENES TERMOGRAFICAS.**

Existen organismos o entes especializados en analisis termograficos y software analizadores de imagines, Este organismo ha diseñado una tabla para indicar que probabilidad tiene el equipo de falla en base a cambios de temperatura de la imagen tomada con relación a su firma térmica, esta tabla esta especificada en la N.E.T.A. (Ver anexo 4 ).

Para toma de vibraciones existe una norma que establece parámetros para asegurar los limites de vibración y datos permisibles para diferentes de motores y a diferentes potencias. La norma establece rango de datos en diferentes tablas. (ver anexo 5).

## RECOMENDACIONES

Puesto que este plan de mantenimiento utiliza equipos de termografía y vibraciones, son equipos supremamente costosos donde la adquisición de los mismos eleva el costo de implementación de mantenimiento. Recomendamos que este tipo de inspecciones sean realizados por outsourcing.

En las ejecuciones de mantenimiento observamos que los mantenedores no utilizaban algunos dispositivos de seguridad como lo son: señales de precaución, cinta para separar áreas de trabajo, mascara y casco de seguridad.

La captura de los datos se puede hacer por monitoreo en línea haciendo curvas de tendencias y verificando a que fecha posible va a fallar el equipo.

Los costos de mantenimiento implementando los dos equipos y realizados por outsourcing arrojan una inversión anual de \$20.000.000.00 de pesos realizando el control acuerdo el plan de mantenimiento y la frecuencia asignada.

## **CONCLUSIONES**

Con la culminación del proyecto, determinamos que la aplicación de este tipo de tecnologías en el desarrollo de un plan de mantenimiento en motores diesel tiene un gran impacto en el aumento de la confiabilidad, disponibilidad y de la vida útil del equipo.

El cumplimiento de todos los objetivos planteados se realizó gracias a la buena selección de metodologías de análisis de vibraciones y termografía, que dio como resultado el aumento en el desempeño, la disminución de los índices de fallos y la optimización de los procedimientos de operación de la maquinaria.

Este trabajo deja abierta la posibilidad de retroalimentación del plan de mantenimiento, Además la metodología desarrollada puede ser aplicada a los motores Diesel en general, aunque su uso estará condicionado por las características constructivas de cada motor en particular.

## BIBLIOGRAFIA

- **MOUBRAY John. RCM ii Reability-** Centered Maintenance. Second edition
- **WOWK Victor. Machinery Vibración** Measurement and Análisis. Mc Graw Hill. 1995
- **PALOMINO MARIN EVELIO. La Medición y el Análisis de Vibraciones en el Diagnostico de Maquinas Rotatorias.** División de INGENIERIA DE LAS VIBRACIONES Y DIAGNOSTICO. Cuba, 1997.
- **[http://: www.a-predictor.com](http://www.a-predictor.com)** (Tutorial).
- **[http://:Mantenimientomundial.com](http://Mantenimientomundial.com).** (Notas de Interés).
- **Minor de Mantenimiento industrial . modulo de mantenimiento insustrial.** Universidad Tecnológica de Bolívar.
- **[http://:www.infraredtrainingcenter.com](http://www.infraredtrainingcenter.com)**
- **Newport, R.** - "Analizing Mechanical systems using Infrared Thermography". International Maintenance Congress EFNMS. Swenden - 2000.

# **ANEXOS**



**ANEXO 1**  
**NIVELES DE VIBRACION**

<b>1X Vibration Level, VdB</b>	<b>Diagnóstico</b>	<b>Prioridad de Reparación</b>
Menos que 108 VdB	Ligero desbalanceo	Ninguna recomendación
108 VdB – 114 VdB	Desbalanceo moderato	Desable
115 VdB – 124 VdB	Desbalanceo grave	Importante
Mas que 125 VdB	Desbalanceo extremo	Obligatorio

**ANEXO 2**

**RESUMEN GENERAL DE LAS ÁREAS DE APLICACIÓN DE LA**

**TERMOGRAFÍA EN EL MANTENIMIENTO INDUSTRIAL**

• Instalaciones Eléctricas en general
• Indentado de cables
• Conexiones
• Cables-Empalme de cables
• Conductos de barras
• Líneas de baja, media y Alta tensión
• Transformadores de potencia
• Transformadores de corriente
• Transformadores de tensión
• Fusibles
• Seccionadores
• Interruptores
• Excitatrices de generadores y motores – Escobillas
• Instalaciones Mecánicas – Reductores
• Análisis de múltiples de escape en motores de combustión interna
• Pérdidas en Condensadores
• Aislaciones y Refractarios
• Hornos y Calderas
• Instalaciones Frigoríficas-Perdidas de frío
• Máquinas rotativas
• Líneas de vapor
• Reactores
• Rodamientos
• Motores eléctricos.

• Capacitores
• Hornos de Cemento
• Bombas de agua
• Intercambiadores de calor
• Torres de enfriamiento
• Pérdidas en válvulas líquidos-vapor
• Pérdidas en trampas de vapor
• Verificación de niveles de líquidos en recipientes

### ANEXO 3

#### LISTADO DE PARTES CRÍTICAS Y SEMI CRÍTICAS

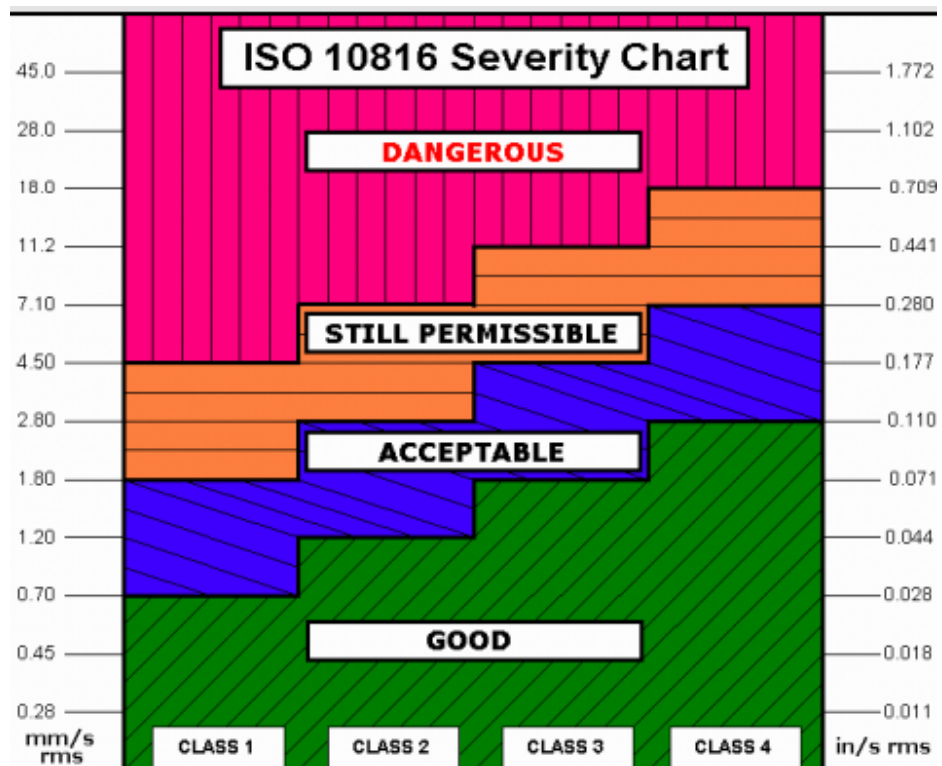
Descripción	Ubicación Física	Criticidad	Tipos de Análisis	Riesgo en la realización de mediciones	Frecuencia de medición	Punto de medición
Inyectores	MOTOR DIESEL	SEMICRÍTICO	TERMOGRAFIA	NINGUNO	MENSUAL	COLECTOR INYECTOR
Bujes	MOTOR DIESEL	SEMICRÍTICO	TERMOGRAFIA VIBRACION	NINGUNO	MENSUAL	COJINETES
Colectores	MOTOR DIESEL	SEMICRÍTICO	TERMOGRAFIA	NINGUNO	MENSUAL	COLECTOR
Cilindros	MOTOR DIESEL	CRÍTICO	TERMOGRAFIA VIBRACION	NINGUNO	MENSUAL	COLECTOR
Válvulas	MOTOR DIESEL	CRÍTICO	TERMOGRAFIA VIBRACION	NINGUNO	MENSUAL	INYECTOR
Línea de Refrigeración	MOTOR DIESEL	CRITICO	TERMOGRAFIA	NINGUNO	TRIMESTRAL	COLECTOR INYECTOR
Bloque	MOTOR DIESEL	CRITICO	TERMOGRAFIA	NINGUNO	SEMESTRAL	COLECTOR
Bomba aceite lubricante	MOTOR DIESEL	CRITICO	TERMOGRAFIA VIBRACION	MEDIO	MENSUAL	COJINETE

**ANEXO 4**  
**ESPECIFICACION N.E.T.A.**

<b>1°C - 10°C O/A</b>  <b>1 °C - 3°C O/S</b>	<b>POSIBLE DEFICIENCIA</b>
<b>11°C - 20°C O/A</b>  <b>4 °C - 15 °C O/S</b>	<b>PROBABLE DEFICIENCIA</b>
<b>21 °C - 40 °C O/A</b>  <b>&gt;15 °C O/S</b>	<b>DEFICIENCIA</b>
<b>&gt;40 °C O/A</b>  <b>&gt;15 °C O/S</b>	<b>DEFICIENCIA MAYOR</b>

**ANEXO 5**  
**NORMA ISO 2372-10816**

in/sec pk	mm/sec rms	Nivel en VdB	Menos de 15 kW (<20 HP)	15 – 75 kW 20 to 100 HP	>75 kW (100 HP)
1.0	18.0	125	Inadmisible	Inadmisible	Inadmisible
0.63	11.2	121	Inadmisible	Inadmisible	Justo tolerable
0.4	7.10	117	Inadmisible	Justo tolerable	Justo tolerable
0.25	4.50	113	Justo tolerable	Justo tolerable	Aceptable
0.16	2.80	109	Justo tolerable	Aceptable	Aceptable
0.1	1.80	105	Aceptable	Aceptable	Aceptable
0.06	1.20	101	Aceptable	Bueno	Bueno
0.04	0.70	97	Bueno	Bueno	Bueno



**ANEXO 6**  
**SUSTENTO VISUAL.**



