

ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

Manual de procedimientos para análisis vibracional en equipos rotativos y planificación del mantenimiento con el sistema ExpertALERT™ de DLI Engineering Co., de acuerdo a las normas ISO 9001-2000 para la empresa Ivan Bohman C.A.

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO**

ORTEGA MONTAHUANO JORGE PATRICIO

DIRECTOR: CRNL (R) ING. JUAN DÍAZ

CODIRECTOR: ING. FERNANDO OLMEDO

Sangolquí, 2007-07-13

CERTIFICACIÓN DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO

El proyecto “Manual de procedimientos para análisis vibracional en equipos rotativos y planificación del mantenimiento con el sistema ExpertALERT™ de DLI Engineering Co., de acuerdo a las normas ISO 9001-2000 para la empresa Ivan Bohman C.A.” fue realizado en su totalidad por Jorge Patricio Ortega Montahuano, como requerimiento parcial para la obtención del título de Ingeniero Mecánico.

Ing. Juan Díaz

DIRECTOR

Ing. Fernando Omedo

CODIRECTOR

Sangolquí, 2007-07-13

LEGALIZACIÓN DEL PROYECTO

“Manual de procedimientos para análisis vibracional en equipos rotativos y planificación del mantenimiento con el sistema ExpertALERT™ de DLI Engineering Co., de acuerdo a las normas ISO 9001-2000 para la empresa Ivan Bohman C.A.”

ELABORADO POR:

ORTEGA MONTAHUANO JORGE PATRICIO

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

EL COORDINADOR

Sangolquí, 2007-07-13

DEDICATORIA

Dedico la realización de este proyecto a toda la juventud del Ecuador, fuerte e innovadora, que algún día llevará al Ecuador por el camino del progreso, desarrollo y justicia que todos anhelamos, creando un sentido de pertenencia único de nuestro País que ha sufrido durante mucho tiempo.

En especial dedico este proyecto a las nuevas generaciones... bastará llegar a uno sólo para sentirme realizado.

Tenemos las herramientas, el conocimiento, la capacidad y lo más importante, la honestidad y pureza para luchar por nuestro futuro y el de nuestras familias.

Que nunca perdamos la capacidad de asombro e inocencia. Que nunca nos falta una sonrisa y que al final del camino nos encontremos satisfechos de haber cumplido con la misión que Dios nos propuso cuando nacimos, sabiendo que en realidad existe la felicidad verdadera en los pequeños detalles de la vida.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco principalmente a Dios y a Jesucristo... aunque el ser humano es tan contradictorio y complejo recordé que es mejor agradecer que pedir. Gracias mi Grandes amigos.

Mi gratitud y amor eternos para mi familia. A mi madre por su apoyo incondicional, a pesar de las adversidades... siempre supe interpretar tus palabras. Aprendí que el contenido vale más que la manera. Todo lo resume en la vida decir que “obras son amores y no buenas razones”. Gracias madre, te amo y siempre seré tu pequeño hijo.

A mi padre... lograste ser un modelo, el que siempre quise ver desde niño. Cuando necesité un empujón más, entre enojos y discusiones supe que me amas y me ayudaste a conseguir mi meta más anhelada.

Hermana querida... nunca fuimos los mejores hermanos pero a pesar de todo supimos apoyarnos cuando más lo necesitamos... porque cuando vi a en mi partida una cara triste supe que también todo lo hago por ti.

A ti negra de mi vida... lograste sacar aquel hombre que algún día fui, con tu paciencia y amor incondicional a pesar de los embates de la inseguridad. Con palabras a veces dulces y a veces duras logramos entender que debemos amar con pasión y razón. Gracias negra... al fin lo logré...!!!!

Finalmente, una especial gratitud a César Ortiz, mi mentor, maestro y amigo... gracias por enseñarme la aventura y el reto del trabajo duro y sacrificado, que siempre al final tiene su recompensa: la experiencia y la satisfacción de un trabajo bien hecho.

CAPÍTULO 1

GENERALIDADES

1.1. ANTECEDENTES:

Un **Programa de Mantenimiento Predictivo PdM** involucra inversión cuyo único objetivo es predecir cuándo y cómo actuar en una acción correctora sobre el equipo, “justo” antes de que falle.

Los beneficios de un programa de mantenimiento predictivo son los siguientes:

1. **Detección temprana de defectos**, sin necesidad de detener y desmontar la máquina.
2. **Seguimiento de la evolución del defecto en el tiempo** hasta que presente una situación crítica, esto proporciona una información muy valiosa sobre el estado real de la máquina, permitiendo aumentar o disminuir según proceda, las frecuencias de revisión.
3. **Planificación del mantenimiento** correctivo en compra de repuestos, previsión de equipos auxiliares y de personal experimentado.
4. **Programar** las paradas para el **mantenimiento correctivo**.
5. **Reduce el tiempo de reparación**, al tener identificado la falla y los elementos que han fallado.
6. **Evita las fallas repetitivas**, identificando y corrigiendo su origen.
7. **Reducir los gastos de reparaciones**, ya que un paro programado permite tener a tiempo los repuestos y el personal calificado.
8. **Incrementa la confiabilidad y disponibilidad** de la planta, mediante el incremento del tiempo promedio entre falla y la reducción de los tiempos de restauración de las funciones del equipo o sistema.

La meta más importante de cualquier programa de mantenimiento es la eliminación o mitigación de las consecuencias de los fallos en la maquinaria. Muchas veces una avería grave causará daños serios periféricos a la máquina, incrementando los costos de reparación. Una eliminación completa no es posible en la práctica en ese momento, pero se le puede acercar con una

atención sistemática en el mantenimiento. El segundo propósito del mantenimiento es poder anticipar y planificar con precisión sus requerimientos. Eso quiere decir que se pueden reducir los inventarios de refacciones y que se puede eliminar la parte principal del trabajo en tiempo extra del personal. Las reparaciones a los sistemas mecánicos se pueden planificar de manera ideal durante los paros programados de la planta. El tercer propósito es de incrementar la disponibilidad para la producción de la planta, por medio de la reducción importante de la posibilidad de algún paro durante el funcionamiento de la planta, y de mantener la capacidad operacional del sistema por medio de la reducción del tiempo de inactividad de las máquinas críticas. Idealmente, las condiciones de operación de todas las máquinas se deberían conocer y documentar. El último propósito del mantenimiento es permitir al personal de mantenimiento el trabajar durante horas laborables predecibles y razonables.

En 1991 se hizo una medición internacional de las técnicas de mantenimiento en la mayoría de plantas industriales. Encontraron que las cuatro técnicas de mantenimiento mencionados anteriormente estaban en explotación en los porcentajes que mencionamos a continuación:

- Del 50% al 60% de horas de mantenimiento se usan en el modo reactivo, realizando reparaciones de emergencia con mantenimiento correctivo no programado.
- Del 30% al 20% de las horas se usan en mantenimiento preventivo.
- Del 10% al 15% de las horas se aplican el mantenimiento predictivo
- Del 10% al 5% del tiempo se usa en técnicas pro activas.

El incesante y constante cambio obliga a las empresas a estar siempre a la vanguardia, creando y generando ideas que contribuyan al beneficio y satisfacción tanto del ambiente interno como externo. Las compañías centran sus esfuerzos en idear procedimientos que reduzcan costos y disminuyan tiempos muertos, lo que deriva en la planificación del mantenimiento. En un principio, se realizaba el mantenimiento correctivo llamado también mantenimiento de crisis o mantenimiento “histórico”, en el que se intervenía el equipo únicamente cuando éste fallaba. Obviamente, las desventajas son fácilmente identificables:

- Tiempos muertos no planificados y horas extras de trabajo
- Daños secundarios a la maquinaria
- Las máquinas controlan el departamento de mantenimiento

Luego se evolucionó al mantenimiento preventivo también llamado mantenimiento histórico: se realizaban overhauls programados basados en el historial de falla y recomendaciones del fabricante de cada clase de máquina. Las desventajas son menores pero siguen existiendo:

- Las máquinas son intervenidas innecesariamente en unos casos y muy tarde en otros.
- El overhaul reduce la disponibilidad de la máquina según la curva de la bañera:

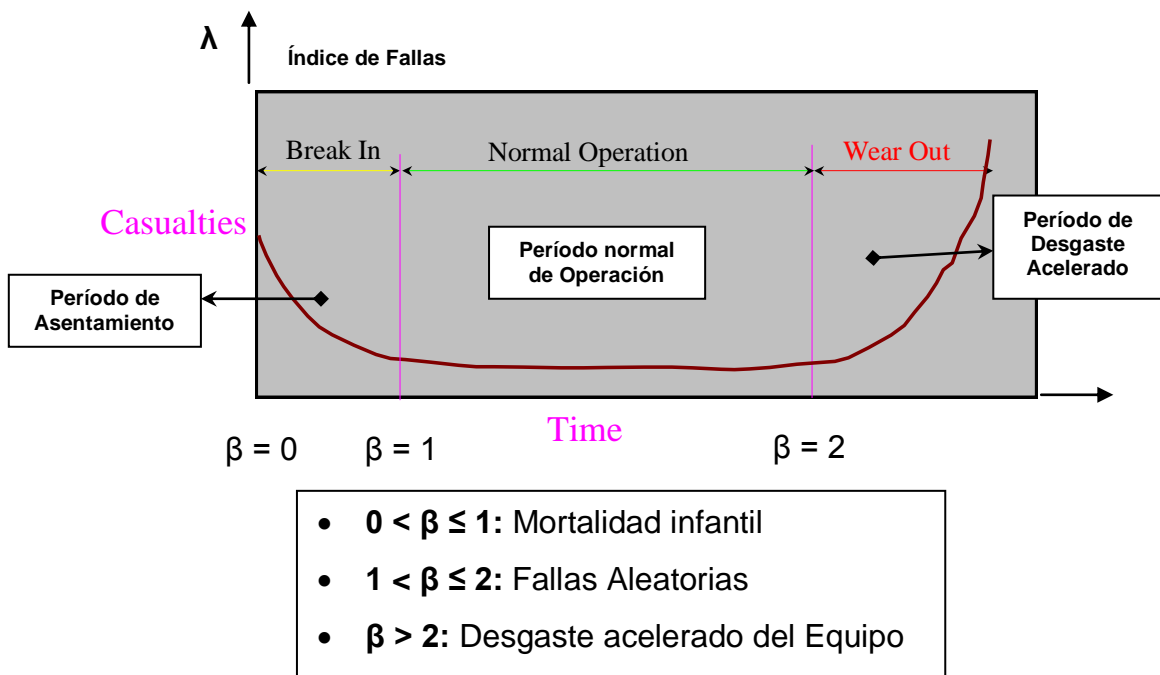


Figura 1.1. Curva de la Bañera

Actualmente, la tendencia se inclina hacia el mantenimiento predictivo basado en la medición y evaluación de la condición de los equipos que brinda las siguientes ventajas:

- Análisis periódico de pruebas no destructivas:
 - Análisis de vibraciones
 - Análisis de lubricantes y partículas de desgaste
 - Termografía infrarroja

- Determinar la condición del equipo mientras se encuentra en operación
- Diagnóstico e identificación de la causa específica del fallo
- Intervenciones planificadas para reducción de costos
- Mejor empleo del tiempo y optimización de recursos

Lo anterior deriva en el mantenimiento proactivo basado en las condiciones del equipo, compartiendo información entre todos los usuarios. El análisis proactivo de la causa raíz:

- Analiza los problemas fuera de la máquina
- Resuelve la causa del problema, no el síntoma

Con ello la planta se beneficia con:

- Incremento en la disponibilidad de la planta
- Reduce el excedente en stock de repuestos
- Eliminación de fallas catastróficas, lo que deriva en la mejora de la seguridad industrial
- El departamento de mantenimiento controla a las máquinas

COSTOS DE MANTENIMIENTO:

En la gráfica a continuación, se evidencia sustancialmente que el mantenimiento Preventivo es mucho más conveniente que otro tipo de mantenimientos utilizados anteriormente:

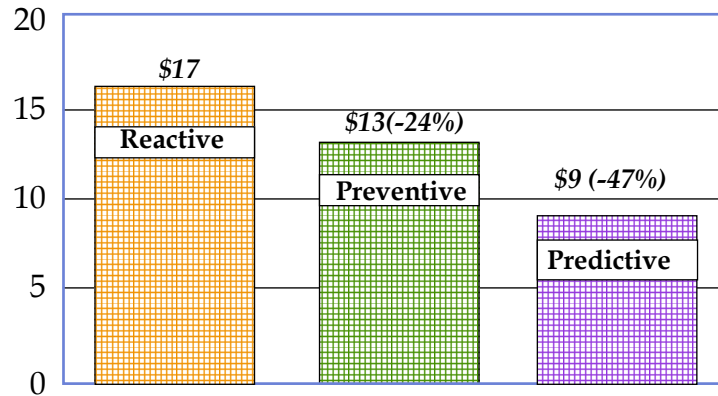


Figura 1.2. Costo de Mantenimiento (\$/HP/Año)¹

1.2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA:

La tendencia de globalización y las recientes negociaciones del TLC han producido un fenómeno incontenible en el mundo: las grandes empresas multinacionales, transnacionales e internacionales absorben a la pequeña industria. Claro ejemplo de ello en nuestro País es Cementos Selva Alegre que fue comprada por LAFARGE, la mayor cementera del mundo. Esto conlleva a la implementación de nuevos métodos de trabajo, elaboración de procedimientos y optimización de recursos, lo cual deriva en una certificación. Una empresa certificada es una empresa competitiva. Uno de los puntos clave en la industria es la correcta y acertada planificación, implementación y control del mantenimiento. Para ello, deben aplicarse los últimos sistemas desarrollados del mantenimiento, es decir, el mantenimiento predictivo – proactivo. Ivan Bohman C.A. tiene la certificación ISO 9001-2000 y se ha empeñado en un plan de capacitación a personal interno y clientes externos. El departamento de asesoría técnica en su división DLI de análisis de vibraciones está abriendo mercado a pasos agigantados debido a lo citado anteriormente. En pos de una mejora continua, es necesario elaborar un manual específico de entrenamiento en análisis de vibraciones, de acuerdo al procedimiento con el cual trabaja la empresa. Con ello, el servicio al cliente y el plan de

¹ Fuente: Electric Power Research Institute (EPRI)

entrenamiento interno alcanzarán los niveles de eficiencia y eficacia propuestos para este año como alcance.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. General:

Satisfacer la necesidad de IBCA y la industria ecuatoriana de mantenerse competitivos e innovadores en el mercado.

1.3.2. Específicos:

1.3.2.1. Desarrollar un método de planificación y preparación de un sistema de análisis de vibraciones que abarque las siguientes áreas: procedimiento para la determinación de MIDs, procedimiento para validar bases de bronce y MIDs, procedimiento para tomar lecturas y procedimiento para validar promedios para conformar el espectro de referencia.

1.3.2.2. Realizar un procedimiento estándar junto con sus formatos codificados para la implementación del análisis de vibraciones en el área de asistencia técnica de IBCA que contemple especificaciones de análisis de vibraciones para: motores eléctricos, moto reductores, acoples, poleas y bandas, bombas centrífugas, compresores de tornillo y ventiladores.

1.4. Alcance:

La realización de este proyecto tiene como alcance el satisfacer la necesidad de la Compañía IBCA de cumplir sus metas en lo que concierne a crecimiento en ventas y en la elaboración de procedimientos para todas sus áreas, logrando de esta manera mantenerse competitiva en el mercado. El área de mantenimiento predictivo es una de las de mayor crecimiento en este último tiempo puesto que las industrias ecuatorianas cada vez más se

introducen al fenómeno de la globalización, llevándolas a optimizar recursos y elaborar procedimientos y formatos de acuerdo a las normas.

1.5. Justificación e Importancia:

El presente proyecto tiene como justificación principal el satisfacer la necesidad de IBCA y la industria ecuatoriana en general de innovación y mantenerse competitivas en el mercado.

CAPÍTULO 2

DIAGNÓSTICO DE SITUACIÓN INDUSTRIAL ACTUAL

2.1. LA INDUSTRIA EN EL ECUADOR: ANÁLISIS SITUACIONAL

De acuerdo a los últimos informes presentados por el Banco Central del Ecuador hasta el período 2004 – 2005, la economía ecuatoriana ha mostrado una tasa de variación promedio anual del PIB de 5,12%, superior a la del PIB de tendencia que es alrededor del 3%. La tasa de crecimiento de este período respondió en gran medida al importante crecimiento registrado en el año 2004, por el impulso petrolero sobre todo de las empresas privadas, cuya participación en la producción total pasó del 44.2% en el 2001 al 63.4% en el 2005, fomentada en especial por la operación del Oleoducto de Crudos Pesados (OCP), a fines del 2003. El valor agregado petrolero⁴ presentó, en el año 2005, una tasa de (-3.4%) luego de dos años consecutivos de incrementos importantes de 6.7% y 35.4%, en los años 2003 y 2004, respectivamente. La reducción del año 2005 resulta del leve crecimiento del petróleo (0.9%) junto con la reducción de la refinación en 8.2%. Se debe mencionar que la fabricación de productos refinados de petróleo depende en gran medida de la importación de combustibles por lo cual el importante crecimiento registrado en las importaciones de refinados (31.6%) fomentó la reducción del valor agregado en el 2005, como se puede apreciar en la figura 2.1.

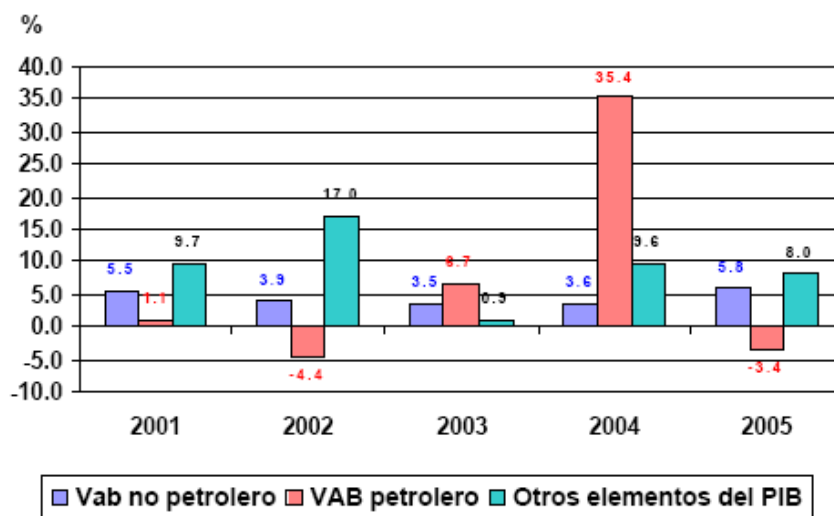


Fig.2.1. Valor agregado petrolero y no petrolero. Tasas de variación.

El valor agregado no petrolero del año 2005 fue el resultado del crecimiento del resto de industrias, por lo que mostró una tasa de variación de 5.8%. La industria manufacturera (excluye refinación de petróleo), en el 2005 presentó una tasa de variación de 9%, la mayor del período 2001-2005. Este crecimiento respondió a las industrias de elaboración y conservación de camarón (31.9%), pescado (10%), y fabricación de equipo de transporte (21.7%).

En el 2005 el crecimiento a nivel de industria presentó algunos valores récord comparados con los crecimientos promedios de la serie 2001-2005; tal es el caso de pesca (16.0%), industrias manufactureras (excluye refinación de petróleo), con 9.0%, transporte, almacenamiento y comunicaciones (8.2%), e intermediación financiera (17.2%).

En cuanto a la *Explotación de Minas y Canteras*, considerada como una de las industrias de mayor importancia en el país, ya que involucra a la extracción de petróleo crudo, presentó una tasa de crecimiento promedio de 7%, para el período 2001-2005.

A partir del año 2003 la producción nacional de crudo presentó importantes tasas de crecimiento. La caída experimentada en el 2002 respondió a la falta de crudo liviano (extraído por PetroEcuador), requerido para la mezcla de crudos; así como a la insuficiente inversión en renovación de equipos y maquinaria destinados a la extracción petrolera.

Los años subsiguientes presentaron un crecimiento debido al incremento de la producción de las empresas privadas y a la facilidad de transportarlo por el OCP, que empezó a operar a finales del 2003. Cabe señalar la continua reducción de la participación de la producción de Petroecuador en el total; es así que pasa de alrededor del 56% del total de barriles en 2001, a alrededor del 37% en el año 2005, como se detalla en la tabla 2.1.

Período	Producción <i>Por empresas</i>			
	total	Petroproducción t/t-1	Privadas	t/t-1
2000	146,209	85,047-5.02	61,162	30.83
2001	148,746	82,929-2.49	65,817	7.61
2002	143,759	80,775-2.60	62,984	-4.30
2003	153,518	74,514-7.75	79,004	25.43
2004	192,315	71,948-3.44	120,368	52.36
2005	194,172	70,972-1.36	123,200	2.35

Tabla 2.1. Producto nacional de crudo en campos (miles de barriles)

La Industria Manufacturera (excluye refinación de petróleo), presentó una tendencia positiva a partir de la dolarización, con una tasa de crecimiento promedio para el período 2001-2005 de 4.8%. Industrias como la elaboración de productos alimenticios y de bebidas; fabricación de productos químicos; del caucho y plástico; y fabricación de maquinaria y equipo; equipo de transporte e industrias manufactureras, presentaron resultados muy favorables, con tasas promedio de 6.6%, 4.9% y 4.7% respectivamente; mientras que las demás industrias experimentaron comportamientos más modestos, mostrados en la figura 2.2.

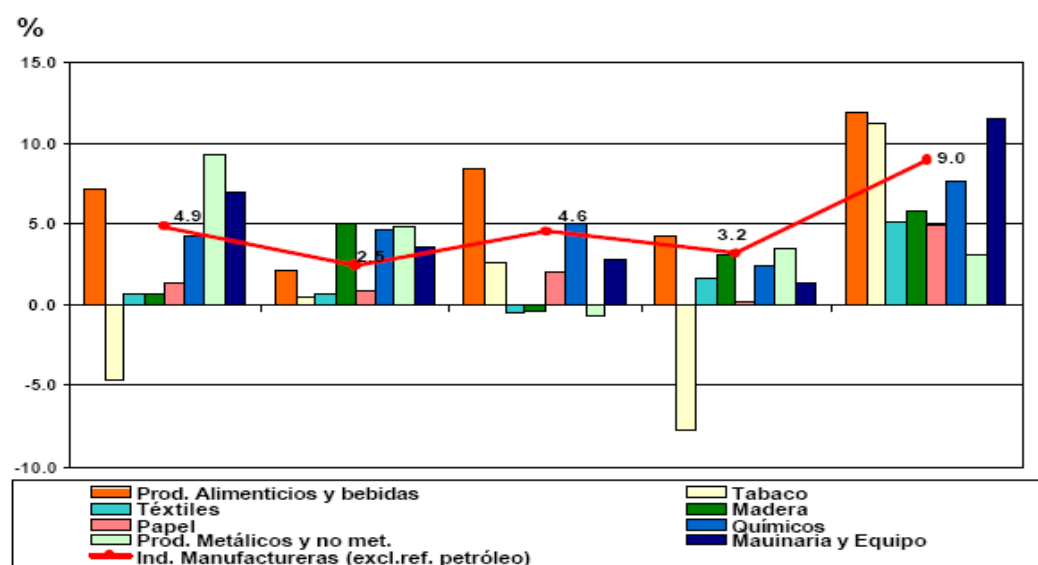


Fig.2.2. Tasas de variación industria no petrolera.

Dentro de la elaboración de productos alimenticios y de bebidas, una de las industrias más dinámicas es la elaboración y conservación de camarón (16.8% en promedio). En el 2005 presentó un crecimiento de 31.9% impulsado por el crecimiento de la cría de camarón y por la mejora en la demanda externa, es así que las exportaciones ecuatorianas se incrementaron en alrededor del 36% en el 2005. Estados Unidos continúa siendo el principal destino de este producto, aún cuando mantiene una demanda por dumping, que obliga a pagar un arancel de 3.58% por su ingreso. De igual forma, en el país se han desarrollado nuevos productos tales como camarón cocido, pelado, en forma de mariposa, camarón apanado, entre otros, lo que ha permitido ampliar mercados. La elaboración de aceites y grasas de origen animal y vegetal presentó una evolución promedio de 5.5%, en el período 2001-2005. Esta mejora se sustenta en la mayor producción de palma africana (otros agrícolas), así como en el crecimiento de la demanda interna y externa (cuyo crecimiento promedio en el período fue de 30%). La elaboración de productos lácteos experimentó un crecimiento promedio para el período de 3.5%, gracias al mejoramiento de la productividad debido a la inversión en tecnología, realizada en los años 2002 y 2003, lo que les permitió obtener sellos internacionales de calidad. Adicionalmente, el crecimiento respondió a la evolución positiva de la leche cruda. En el caso de la elaboración de azúcar, en el año 2005 su crecimiento (6.2%) fue el mayor de período 2001-2005 y se logró un record en la producción de azúcar (alrededor de 500 mil toneladas), gracias al mejor rendimiento de la caña de azúcar, en alrededor del 16% en la zafra 2004-2005. La elaboración de bebidas en cambio, presentó un decrecimiento promedio de 0.6%, para el período 2001-2005, que obedeció a la reducción experimentada en los años 2002 y 2003 (2.5% y 10.3% respectivamente), por el ingreso de bebidas gaseosas provenientes de Perú, a menores precios y a la transformación de varias empresas embotelladoras en distribuidoras. Sin embargo, en el año 2005 esta industria creció en 4% impulsada por la demanda interna. Por su parte la industria textil experimentó un crecimiento promedio de apenas 1.7% en el período analizado. En el año 2003 su valor agregado se redujo en 0.4%, explicado por el cierre de algunas líneas de producción (hilados y cuero) y al ingreso de productos importados (provenientes en su mayoría de Asia) a bajos precios. Sin embargo, en los

últimos dos años esta industria ha logrado crecer en tasas de 1.6% y 5.1% respectivamente; gracias a la mejora de la productividad obtenida por la adquisición de nueva maquinaria.

En cuanto a los servicios, se observa que el Suministro de electricidad y agua presentó una variación positiva durante el periodo, alcanzando el nivel más alto en 2002 con el 8.2% (figura 2.3.), debido al incremento de la energía total producida (hidráulica y térmica); así como por los montos de energía total facturada que aumentaron en 1.6%. Por otro lado, el nivel más bajo se presentó en los años 2004 y 2005, ambos con el -3.9% a causa de la falta de inversión, el incremento de las importaciones y el creciente uso de combustibles para la producción de energía termoeléctrica.

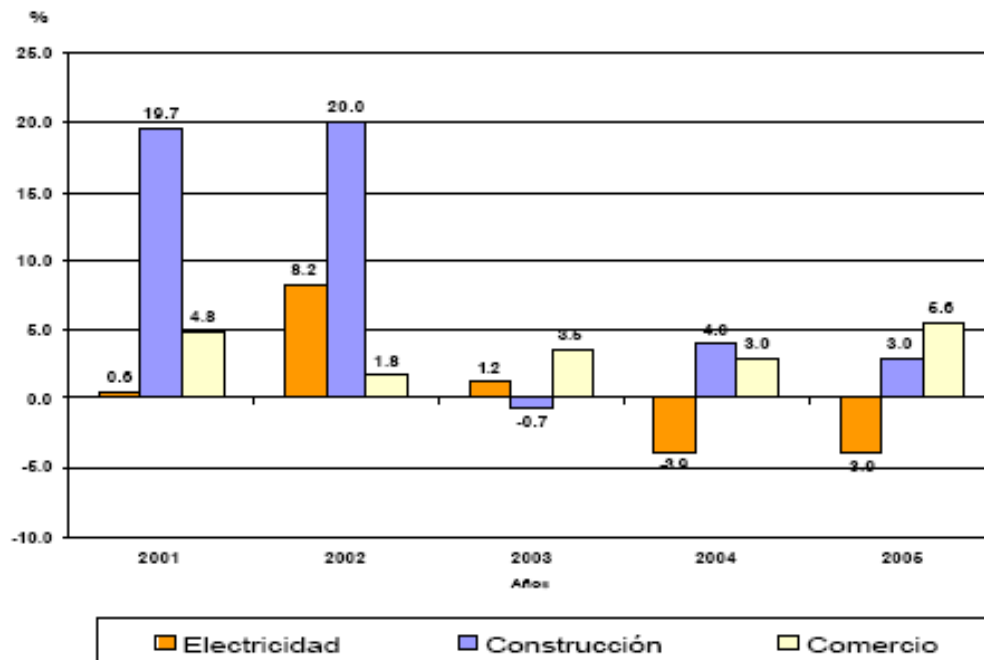


Fig.2.3. Tasas de Variación. Electricidad, construcción y comercio.

2.2. ANÁLISIS PROSPECTIVO

La situación del Ecuador a futuro en el sector industrial presenta proyectos gigantes especialmente en el sector petrolero con la construcción de la nueva refinería en Jambelí, la remodelación del puerto marítimo de Manta, los convenios con PDVESA, etc. Esto representa miles de plazas de trabajo y un crecimiento económico enorme para el País.

2.3. SISTEMAS DE MANTENIMIENTO Y SUS TENDENCIAS

2.3.1. INTRODUCCIÓN:

El mantenimiento tiene uno de los mayores costos operativos controlables en la industria intensiva en capital. Es a su vez, una función crítica del negocio que impacta sobre el riesgo comercial, volumen de producción, calidad de producción, costos operacionales, seguridad y riesgo medioambiental. Por ello, es visto, en organizaciones líder, no sólo como un costo que debe ser evitado sino, en conjunto con la Ingeniería de Confiabilidad, como una función impulsora de los negocios. Está considerado como un aporte valioso asociado al negocio, que contribuye a la productividad de los activos y al mejoramiento continuo del desempeño de los mismos. El dilema que la mayoría de empresas encaran; consiste en que son gestoras, que aisladamente debemos mejorar la confiabilidad, dentro de organizaciones que escasamente disponen de recursos suficientes para mantener las plantas en funcionamiento. En este caso, los escasos recursos de mantenimiento son racionados y las fallas los consumen. El mantenimiento preventivo se lesiona, resultando inevitablemente en una mayor frecuencia de fallas, generando un círculo vicioso (figura 2.4.). Adicionalmente a la pérdida de productividad debido a un mantenimiento no planificado, la mentalidad de reparar rápidamente promueve un “mantenimiento apaga incendios”, mantenimiento temporal o correctivo-histórico, que comúnmente agrava la situación. Las reparaciones temporales requieren trabajo adicional para su corrección definitiva, o en el peor de los casos, fallan antes de ser corregidas. A menudo en el esfuerzo de bajar costos, se recurre a reducciones de personal, con lo que declina la moral, el personal restante se deja consumir por la desesperación y tensión, conduciendo a una baja

de los estándares del trabajo. El círculo vicioso gradualmente se alimenta a si mismo llevando a las organizaciones a ser casi totalmente reactivas.



Fig.2.4. Círculo vicioso del mantenimiento

En ese tipo de organizaciones, pareciera que la disponibilidad de planta cae y se estabiliza al más bajo nivel; un nivel tal en el que ya no se producen nuevas fallas, porque la planta prácticamente no opera; en otras palabras, simplemente se encuentra en reparación. Para muchos, la solución más obvia es incrementar el personal. Sin embargo este enfoque no siempre es el mejor. En el escenario económico actual, la cultura empresarial está enfocada a la reducción de costos y aquellos gerentes empeñados en los aumentos de personal raramente tendrán éxito. Hoy en día, los Gerentes de Activos exitosos, son aquellos que rompen el círculo vicioso, logrando mejorar el proceso de mantenimiento e incrementando la productividad de los activos y del recurso humano. Mejorar los procesos de mantenimiento implica la reingeniería de los mismos y un incremento en la eficacia de los recursos, para ello se debe:

- Eliminar todas las tareas de mantenimiento sin propósito o que no sean costo-efectivas.
- Eliminar todos los esfuerzos duplicados en que diferentes grupos están ejecutando igual PM (Mantenimiento Preventivo) sobre el mismo equipo.
- Dirigir la filosofía de mantenimiento al mantenimiento basado en condición.

- Agregar tareas de mantenimiento orientadas a prevenir los modos de fallo que históricamente han derivado en fallas, con criterio y priorización económica.
- Distribuir la carga de trabajo hacia los operadores y toda la organización.

La visión a largo plazo deberá promover un proceso tal que, logre sus metas en forma sistemática y permanece como “programa dinámico”, generando un mejoramiento continuo alimentado por el aprendizaje de nuevas experiencias y avances tecnológicos.

2.3.2. EVOLUCIÓN DEL MANTENIMIENTO:

Históricamente el mantenimiento ha evolucionado a través del tiempo, Moubray (1997), explica en su texto que desde el punto de vista práctico del mantenimiento, se diferencian enfoques de mejores prácticas aplicadas cada una en épocas determinadas. Para una mejor comprensión de la evolución y desarrollo del mantenimiento desde sus inicios y hasta nuestros días, Moubray distingue tres generaciones a saber (figura 2.5.²):

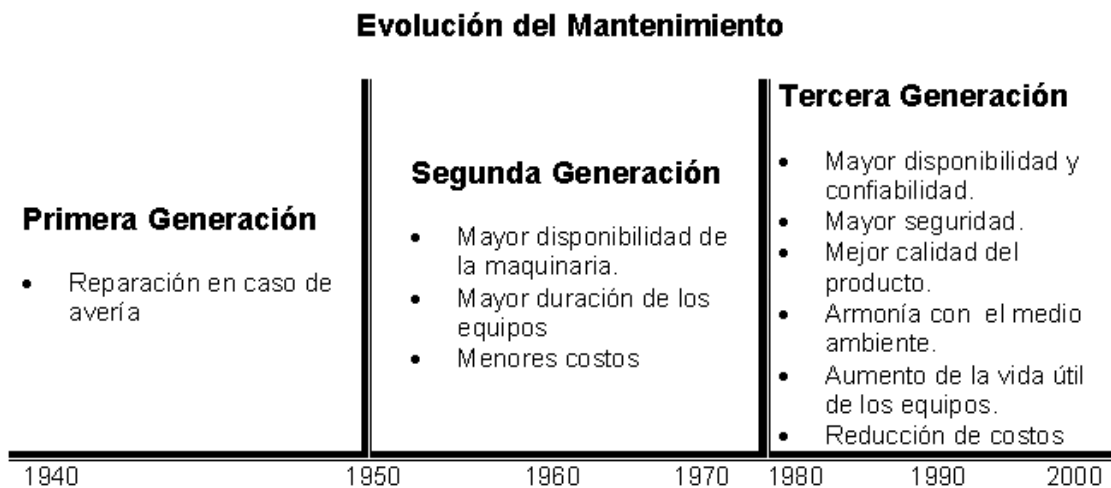


Fig. 2.5. Evolución del Mantenimiento

² Moubray, J., “Applying and Implementing Risk-based Inspection Programs. Maintenance & Reliability. Hydrocarbon processing”, 1997, p.43.

- **Primera generación:**

Cubre el período hasta el final de la II Guerra Mundial, en ésta época las industrias tenían pocas máquinas, eran muy simples, fáciles de reparar y normalmente sobredimensionadas. Los volúmenes de producción eran bajos, por lo que los tiempos de parada no eran importantes. La prevención de fallas en los equipos no era de alta prioridad gerencial, y solo se aplicaba el mantenimiento reactivo o de reparación.

- **Segunda generación:**

Nació como consecuencia de la guerra, se incorporaron maquinarias más complejas, y el tiempo improductivo comenzó a preocupar ya que se dejaban de percibir ganancias por efectos de demanda, de allí la idea de que los fallos de la maquinaria se podían y debían prevenir, idea que tomaría el nombre de mantenimiento preventivo. Además se comenzaron a implementar sistemas de control y planificación del mantenimiento, o sea las revisiones a intervalos fijos.

- **Tercera generación:**

Se inicia a mediados de la década de los setenta donde los cambios, a raíz del avance tecnológico y de nuevas investigaciones, se aceleran. Aumenta la mecanización y la automatización en la industria, se opera con volúmenes de producción más altos, se le da importancia a los tiempos de parada debido a los costos por pérdidas de producción, alcanzan mayor complejidad las maquinarias y aumenta nuestra dependencia de ellas, se exigen productos y servicios de calidad, considerando aspectos de seguridad y medio ambiente y se consolida el desarrollo de mantenimiento preventivo.

2.3.3. SISTEMAS DE MANTENIMIENTO:

Según el **estado activo**, el mantenimiento se clasifica en dos grandes grupos:

- **Mantenimiento Operacional:** Se define como la acción de mantenimiento aplicada a un equipo o sistema a fin de mantener su continuidad operacional, el mismo es ejecutado en la mayoría de los casos con el activo en servicio sin afectar su operación natural. La planificación y programación de este tipo de mantenimiento es completamente dinámica, la aplicación de los planes de mantenimiento rutinario se efectúa durante todo el año con programas diarios que dependen de las necesidades que presente un equipo sobre las condiciones particulares de operación, en este sentido el objetivo de la acción de mantenimiento es garantizar la operabilidad del equipo para las condiciones mínimas requeridas en cuanto a eficiencia, seguridad e integridad. El mantenimiento operacional en la industria petrolera es manejado por personal de dirección de la organización con un stock de materiales para consumo constante y los recursos de equipos, herramientas y personal artesanal para la ejecución de las tareas de campo son obtenidos de empresas de servicio.
- **Mantenimiento Mayor:** Es el mantenimiento aplicado a un equipo o instalación donde su alcance en cuanto a la cantidad de trabajos incluidos, el tiempo de ejecución, nivel de inversión o costo del mantenimiento y requerimientos de planificación y programación son de elevada magnitud, dado que la razón de este tipo de mantenimiento reside en la restitución general de las condiciones de servicio del activo, bien desde el punto de vista de diseño o para satisfacer un periodo de tiempo considerable con la mínima probabilidad de falla o interrupción del servicio y dentro de los niveles de desempeño o eficiencia requeridos.

La diferencia entre ambos tipos de mantenimiento se basa en los tiempos de ejecución, los requerimientos de inversión, la magnitud y alcance de los trabajos, ya que el mantenimiento operacional se realiza durante la operación normal de los activos, y el mantenimiento mayor se aplica con el activo fuera de servicio. Por otra parte, la frecuencia con que se aplica el mismo es sumamente alta con respecto a la frecuencia de las actividades del mantenimiento operacional, la misma oscila entre cuatro y quince años dependiendo del grado de severidad del ambiente en que está expuesto el componente, la complejidad del proceso operacional, disponibilidad corporativa de las instalaciones, estrategias de mercado, nivel tecnológico de componentes y materiales, políticas de inversiones y disponibilidad presupuestaria.

Según las actividades realizadas, el mantenimiento se clasifica en:

- **Mantenimiento Correctivo:** También denominado mantenimiento reactivo, es aquel trabajo que involucra una cantidad determinada de tareas de reparación no programadas con el objetivo de restaurar la función de un activo una vez producido un paro imprevisto. Las causas que pueden originar un paro imprevisto se deben a desperfectos no detectados durante las inspecciones predictivas, a errores operacionales, a la ausencia tareas de mantenimiento y, a requerimientos de producción que generan políticas como la de “repara cuando falle”. Existen desventajas cuando dejamos trabajar una máquina hasta esta condición, ya que generalmente los costos por impacto total son mayores que si se hubiera inspeccionado y realizado las tareas de mantenimiento adecuadas que mitigaran o eliminaran las fallas.
- **Mantenimiento Preventivo:** El aquel que consiste en un grupo de tareas planificadas que se ejecutan periódicamente, con el objetivo de garantizar que los activos cumplan con las funciones requeridas durante su ciclo de vida útil dentro del contexto operacional donde su ubican, alargar sus ciclos de vida y mejorar la eficiencia de los

procesos. En la medida en que optimizamos las frecuencias de realización de las actividades de mantenimiento logramos aumentar las mejoras operacionales de los procesos.

- **Mantenimiento Predictivo:** Es un mantenimiento planificado y programado que se fundamenta en el análisis técnico, programas de inspección y reparación de equipos, el cual se adelanta al suceso de las fallas, es decir, es un mantenimiento que detecta las fallas potenciales con el sistema en funcionamiento. Con los avances tecnológicos se hace más fácil detectar las fallas, ya que se cuenta con sistemas de vibraciones mecánicas, análisis de aceite, análisis de termografía infrarrojo, análisis de ultrasonido, monitoreos de condición, entre otras.
- **Mantenimiento Proactivo:** Es aquel que engloba un conjunto de tareas de mantenimiento preventivo y predictivo que tienen por objeto lograr que los activos cumplan con las funciones requeridas dentro del contexto operacional donde se ubican, disminuir las acciones de mantenimiento correctivo, alargar sus ciclos de funcionamiento, obtener mejoras operacionales y aumentar la eficiencia de los procesos. En capítulo 5 se profundizará más en este sistema de mantenimiento.

2.3.4. TENDENCIAS ACTUALES DE MANTENIMIENTO:

La gestión de mantenimiento implica al personal que labora en el área, no únicamente conocer las técnicas y aprenderlas, sino también aprender a decidir cuáles son útiles en consideración las necesidades específicas de la empresa y a sus características particulares. La elección adecuada permitirá mejoras en la práctica del mantenimiento y la optimización de costos. Por el contrario, si la elección de la técnica no corresponde a las necesidades y problemas determinados, se contribuirá a agudizar las dificultades y al aumento de los costos, y en última instancia, afectará la producción del bien o la prestación del servicio.

Es importante determinar que las nuevas tendencias en mantenimiento implican un cambio radical de la dirección de las empresas y del personal responsable del mantenimiento. Por tal razón, los caminos, estrategias, herramientas y métodos para cambiar y dejar esas “viejas prácticas” o el “old fashion” son numerosos, diversos y a veces contradictorios; y este hecho incide en que se asuman actitudes divergentes en el personal de mantenimiento: Muchos insisten que lo mejor es usar “de todo un poco” y otros que es mejor usar pocas opciones, pero rigurosas, exigentes y responsables.

- **Mantenimiento de Clase Mundial (MCM):**

La figura 2.6³ muestra la cuesta para llegar a un mantenimiento de clase mundial, esto a partir de prácticas que llevan a la excelencia.

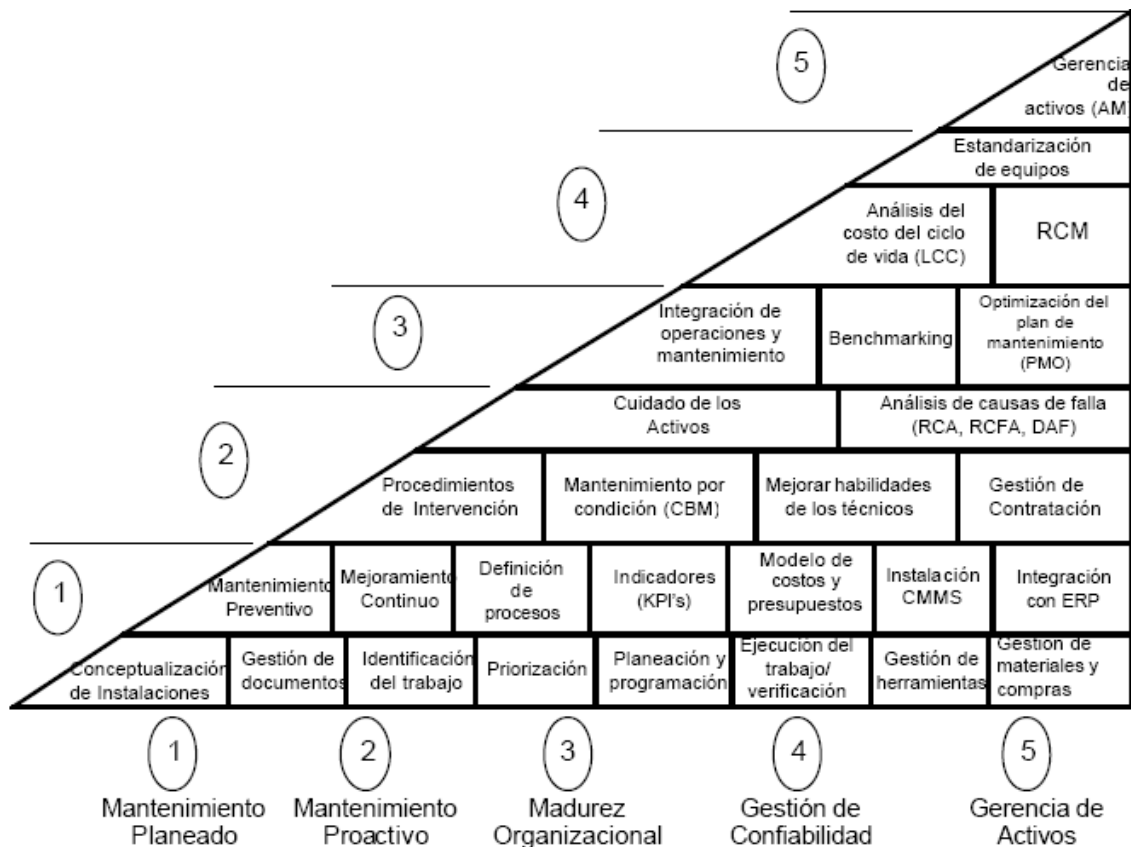


Fig.2.6. Evolución del mantenimiento de clase mundial.

³ Pérez, C., “Evolución del mantenimiento”, Soporte y Cia. Ltda., 2003

El Centro Internacional de Educación y Desarrollo (CIED), filial de PDVSA, define esta filosofía como “el conjunto de las mejores prácticas operacionales y de mantenimiento, que reúne elementos de distintos enfoques organizacionales con visión de negocio, para crear un todo armónico de alto valor práctico, las cuales aplicadas en forma coherente generan ahorros sustanciales a las empresas”. La categoría Clase Mundial, exige la focalización de los siguientes aspectos:

- Excelencia en los procesos medulares.
- Calidad y rentabilidad de los productos.
- Motivación y satisfacción personal y de los clientes.
- Máxima confiabilidad.
- Logro de la producción requerida.
- Máxima seguridad personal.
- Máxima protección ambiental.

Diez mejores prácticas que sustentan el Mantenimiento Clase Mundial:

- 1. Organización centrada en equipos de trabajo:** Se refiere al análisis de procesos y resolución de problemas a través de equipos de trabajo multidisciplinarios y a organizaciones que evalúan y reconocen formalmente esta manera de trabajar.
- 2. Contratistas orientados a la productividad:** Se debe considerar al contratista como un socio estratégico, donde se establecen pagos vinculados con el aumento de los niveles de producción, con mejoras en la productividad y con la implantación de programas de optimización de costos. Todos los trabajos contratados deben ser formalmente planificados, con alcances bien definidos y presupuestados, que conlleven a no incentivar el incremento en las horas - hombres utilizadas.
- 3. Integración con proveedores de materiales y servicios:** Considera que los inventarios de materiales sean gerenciados por los proveedores, asegurando las cantidades requeridas en el momento apropiado y a un costo total óptimo. Por otro lado, debe

existir una base consolidada de proveedores confiables e integrados con los procesos para los cuales se requieren tales materiales.

- 4. Apoyo y visión de la gerencia:** Involucramiento activo y visible de la alta Gerencia en equipos de trabajo para el mejoramiento continuo, adiestramiento, programa de incentivos y reconocimiento, evaluación del empleado, procesos definidos de selección y empleo y programas de desarrollo de carrera.
- 5. Planificación y Programación Proactiva:** La planificación y programación son bases fundamentales en el proceso de gestión de mantenimiento orientada a la confiabilidad operacional. El objetivo es maximizar efectividad / eficacia de la capacidad instalada, incrementando el tiempo de permanencia en operación de los equipos e instalaciones, el ciclo de vida útil y los niveles de calidad que permitan operar al más bajo costo por unidad producida. El proceso de gestión de mantenimiento y confiabilidad debe ser metódico y sistemático, de ciclo cerrado con retroalimentación. Se deben planificar las actividades a corto, mediano y largo plazo tratando de maximizar la productividad y confiabilidad de las instalaciones con el involucramiento de todos los actores de las diferentes organizaciones bajo procesos y procedimientos de gerencia documentados.
- 6. Procesos orientados al mejoramiento continuo:** Consiste en buscar continuamente la manera de mejorar las actividades y procesos, siendo estas mejoras promovidas, seguidas y reconocidas públicamente por las gerencias. Esta filosofía de trabajo es parte de la cultura de todos en la organización.
- 7. Gestión disciplinada de procura de materiales:** Procedimiento de procura de materiales homologado y unificado en toda la corporación, que garantice el servicio de los mejores proveedores, balanceando costos y calidad, en función de convenios y tiempos de entrega oportunos y utilizando modernas tecnologías de suministro.

- 8. Integración de sistemas:** Se refiere al uso de sistemas estándares en la organización, alineados con los procesos a los que apoyan y que faciliten la captura y el registro de datos para análisis.
- 9. Gerencia disciplinada de paradas de plantas:** Paradas de plantas con visión de Gerencia de Proyectos con una gestión rígida y disciplinada, liderizada por profesionales. Se debe realizar adiestramiento intensivo en Paradas tanto a los custodios como a los contratistas y proveedores, y la planificación de las Paradas de Planta deben realizarse con 12 a 18 meses de anticipación al inicio de la ejecución física involucrando a todas los actores bajo procedimientos y practicas de trabajo documentadas y practicadas.
- 10. Producción basada en confiabilidad:** Grupos formales de mantenimiento predictivo / confiabilidad (ingeniería de mantenimiento) deben aplicar sistemáticamente las más avanzadas tecnologías /metodologías existentes del mantenimiento predictivo como: vibración, análisis de aceite, ultrasonido, alineación, balanceo y otras. Este grupo debe tener la habilidad de predecir el comportamiento de los equipos con 12 meses de anticipación y coordinar la realización de procesos formales de “análisis causa-raíz” y otras herramientas de confiabilidad (MCC, IBR, AC, MCC-R, O.C.R., etc.).

- **Mantenimiento Productivo Total TPM (Total Productive Maintenance):**

Actualmente, los dos sistemas que están dando resultados más eficaces para el logro de un rápido proceso de optimización industrial son el **TPM** (Mantenimiento Productivo Total), que busca el mejoramiento continuo de la productividad industrial con la participación de todos y el **RCM** (Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad), que optimiza la implementación del mantenimiento preventivo, basado en la determinación de la confiabilidad de los equipos.

El TPM es un moderno sistema gerencial de desarrollo de la industria que permite tener equipos de producción siempre listos. Su

metodología, soportada en un buen número de técnicas de gestión, establece estrategias adecuadas para el aumento continuo de la productividad, con miras a afrontar con éxito y competitividad el proceso de Globalización y apertura de la economía.

- **La Prodúctica en el mantenimiento:**

Un aporte significativo al desarrollo empresarial es la implementación de la Prodúctica en el aparato productivo de cualquier País. El concepto básico de la Prodúctica se muestra en la figura 2.7.⁴, el cual tiene como objetivo fundamental incrementar la competitividad de las empresas a través de aumentos considerables en su productividad, mediante la utilización y aprovechamiento de las herramientas de la Prodúctica, mostradas en la figura 2.8.

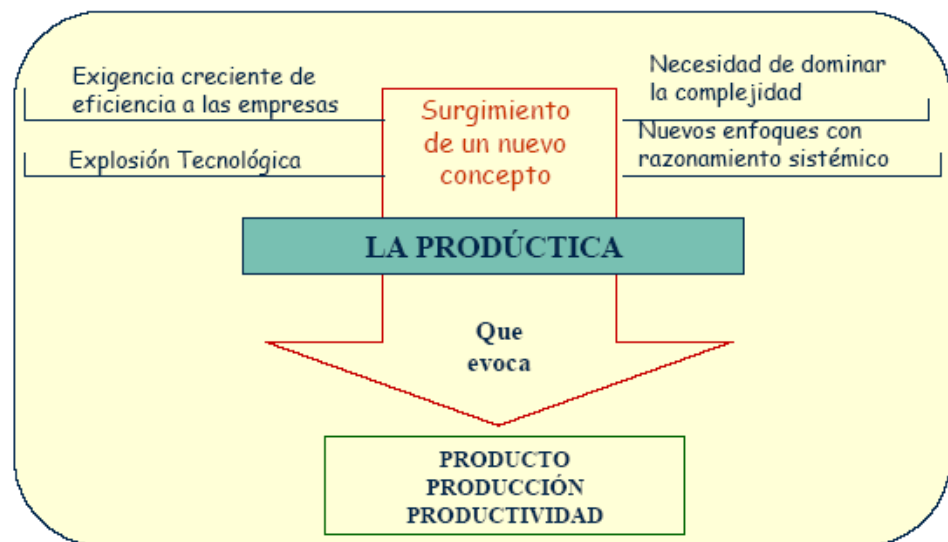


Fig.2.7. Concepto de la Prodúctica

La productividad se define como la relación entre el logro obtenido por un sistema de producción o de servicios y los recursos utilizados, es decir, el cociente entre el producto y el insumo. Incrementar la productividad significa obtener el más alto volumen de producción optimizando al máximo los recursos y materia prima, con la mayor eficacia y eficiencia posible.

⁴ Sánchez, B., "La paradoja de las nuevas tecnologías", Revista Escuela Colombiana de Ingeniería. Año 1. Nº3. Vol. I, 1991.

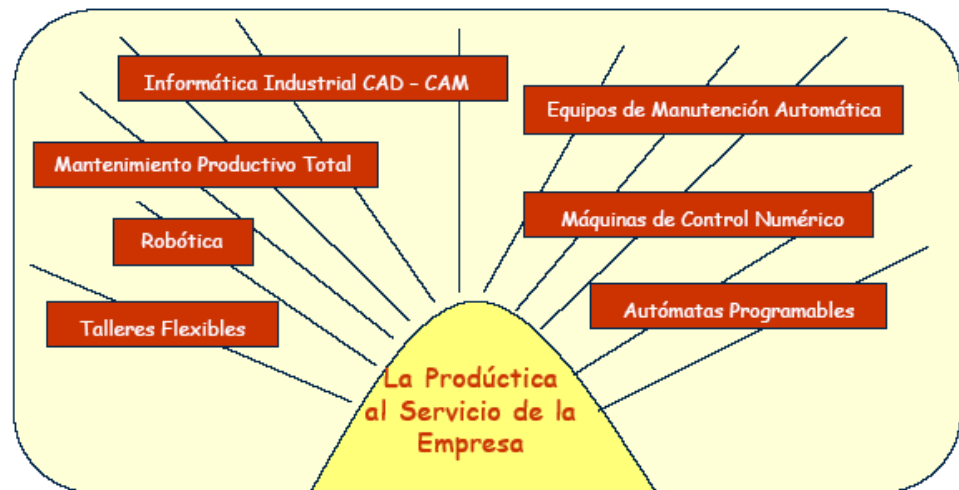


Fig.2.8. Herramientas de la Productiva.

La filosofía del TPM hace parte del enfoque gerencial hacia la calidad total, pasando del énfasis en la simple reparación a la prevención y predicción de las averías y del mantenimiento de la maquinaria. Según Nakajima, considerado el padre del TPM, los elementos básicos de este sistema de mantenimiento son cuatro:

1. **TPM-AM** Mantenimiento Autónomo.
2. **TPM-PM** Mantenimiento Preventivo-Predictivo.
3. **TPM-EM** Administración del Equipo.
4. **TPM-TEI** Participación Total de los Empleados.

Adicionalmente, para lograr una buena aplicación del TPM, deben incluirse cinco elementos básicos:

- Optimizar la efectividad y disponibilidad de los equipos.
- Programar mantenimiento preventivo-predictivo para toda su vida útil.
- Implementarse multidisciplinariamente en todos los departamentos interesados.
- Incluir a todos los miembros de la organización.
- Fundamentarse en la actividad integrada por pequeños grupos.

La palabra "total" tiene tres significados en el TPM:

- **Eficacia total:** Implica la búsqueda de eficacia, economía, productividad o rentabilidad.

- **Mantenimiento preventivo-predictivo total:** Incluye la prevención y la mejora en el mantenimiento correctivo, preventivo y predictivo.
- **Participación total:** Fundamentada en el mantenimiento autónomo, por la actividad de operadores o pequeños grupos en cada departamento y a en cada nivel.
- **Estructura moderna del TPM.**

La estructura moderna del TPM se basa en siete pilares (figura 2.9.⁵), fundamentales dentro de su nueva filosofía de optimización de la productividad de la organización con acciones puramente prácticas:



Fig.2.9. Estructura moderna del TPM

- **Principios de la administración Japonesa (5 Eses):**
 - **Seiri:** (Clasificar) Eliminar todo lo innecesario dentro de la organización.
 - **Seiton:** (Ordenar) Un lugar para cada cosa y cada cosa en su lugar. Todo lo que se utiliza en alguna labor, debe volver luego a su sitio.

⁵ Fuente: www.tpmonline.com

- **Seiso:** (Limpiar) Limpieza completa del sitio de trabajo y la maquinaria de producción. Debe hacerse al final de la jornada y durante tiempo laboral.
- **Seiketsu:** (Estandarizar) Mantener altos niveles de organización y limpieza. Labor constante.
- **Shitsuke:** (Autocontrolar) Capacitar al personal para que de manera autónoma pueda realizar con disciplina tareas.
- **Educación, capacitación y entrenamiento**
- **Mantenimiento autónomo por operadores:** Característica innovadora del TPM, basada en la filosofía “yo soy responsable de mi propio equipo”.
- **Mantenimiento centrado en la confiabilidad RCM:** Para una correcta implementación del TPM, deben aplicarse técnicas de RCM para definir de manera específica y precisa las estrategias de mantenimiento, cuya metodología lógica derivada de múltiples investigaciones se resume en seis pasos:
 - Identificar los principales sistemas de la planta y definir sus funciones.
 - Identificar los modos de fallo producto de un fallo funcional.
 - Jerarquizar las necesidades funcionales de los equipos utilizando análisis de criticidad.
 - Determinar la criticidad de los efectos de los fallos funcionales.
 - Emplear el diagrama de árbol lógico para establecer las estrategias de mantenimiento.
 - Seleccionar las actividades preventivas u otras funciones que conserven la funcionalidad del sistema.
- **Proyectos de mantenimiento de la calidad:** La eficacia es la medida del valor añadido a la productividad a través de un equipo. El objetivo del TPM es aumentar la eficacia de los

equipos, personas y máquinas, para funcionar en condiciones de cero averías.

- **Mantenimiento Planeado Proactivo:** Debe incluir toda la planificación y programación eficaz de las actividades de mantenimiento para toda la vida útil de los equipos y debe funcionar al unísono con el mantenimiento autónomo.
- **Mantenimiento preventivo y predictivo:** El objetivo del mantenimiento preventivo es aumentar al máximo la disponibilidad y la confiabilidad de los equipos a través de un programa de mantenimiento eficaz y puede estar basado en las condiciones reales o en datos históricos de fallos del equipo; el primer caso se conoce como CBM o mantenimiento basado en la condición o predictivo y el segundo caso ha dado origen a una nueva tendencia de mantenimiento denominada PMO, siglas en inglés cuyo significado es Optimización del Mantenimiento Preventivo. La figura 2.10⁶ muestra la estructura del mantenimiento preventivo actual.

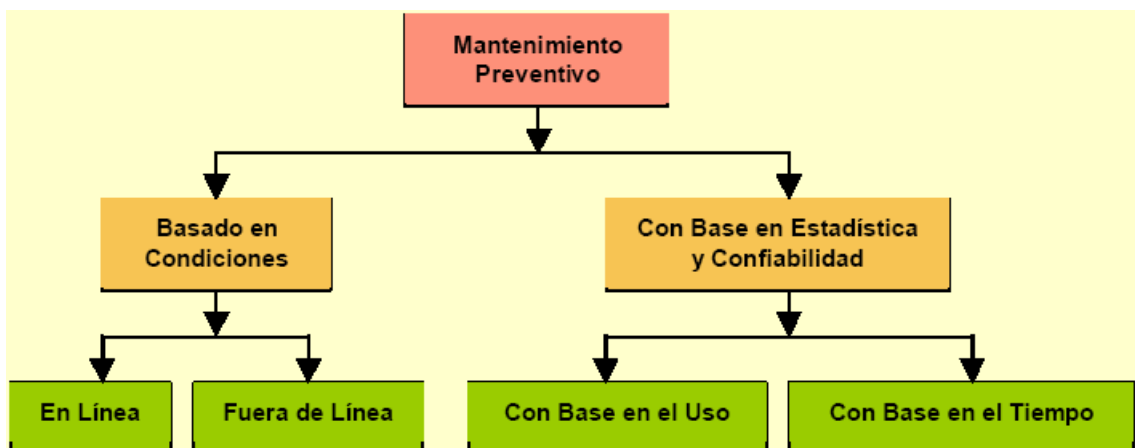


Fig.2.10. Estructura del Mantenimiento Preventivo Actual.

⁶ Referencia: Duffuaa, S., Campbell, J., "Sistemas de mantenimiento, planeación y control", Limusa Wiley, 2002.

- **Metas del TPM:**

El TPM incluye seis metas:

- Crear una misión corporativa para mejorar la eficacia de los equipos.
- Usar un enfoque centrado en la productividad y el mantenimiento autónomo de los operadores.
- Involucrar a todos los departamentos y talento humano de la organización en la implementación del TPM.
- Planeación óptima del mantenimiento, administrado por el departamento de mantenimiento.
- Implementar actividades de pequeños grupos basadas en capacitación y adiestramiento.
- Programa inicial de gestión de equipos para prevenir problemas que puedan surgir durante la puesta en marcha de una nueva planta o un nuevo equipo.

- **Alcance del TPM:**

Sintetizando los aportes del TPM a un sistema de mantenimiento óptimo, puede decirse que el TPM:

- Mejora la eficiencia y eficacia del mantenimiento.
- Trabaja para llevar al equipo a su condición de diseño.
- Busca la gestión del equipo y la prevención de averías y pérdidas.
- Requiere que el mantenimiento se lleve a cabo en cooperación activa con el personal de producción.
- Necesita capacitación continua del personal.
- Utiliza efectivamente las técnicas de mantenimiento preventivo y predictivo.

- Mejora la moral del personal y crea un auténtico sentido de pertenencia.
- Extiende los ciclos de vida útil de la maquinaria y reduce los costos totales de operación.

El TPM ha evolucionado desde los setentas hasta convertirse en un modelo de innovación empresarial, como se muestra en la figura 2.11.

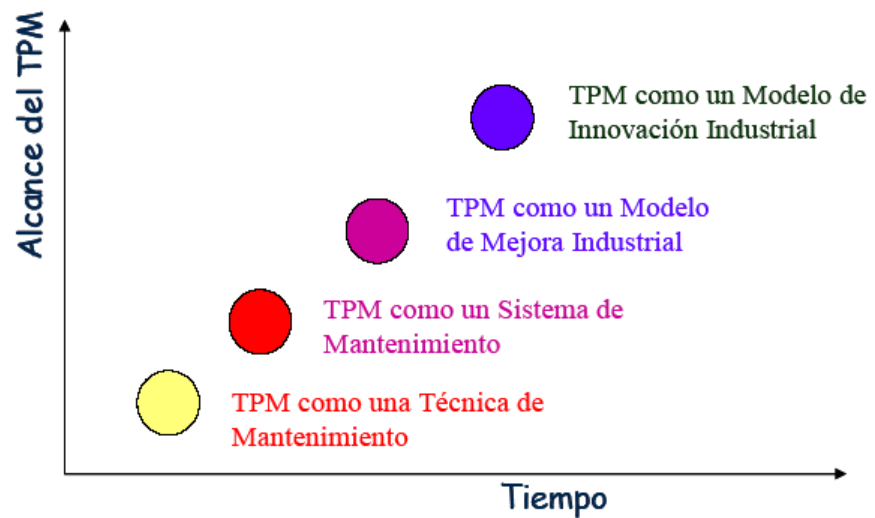


Fig.2.11. Evolución del alcance del TPM.

CAPÍTULO 3

PROCEDIMIENTOS INICIALES

3.1. PRESENTACIÓN DEL SERVICIO A CLIENTES

Inicialmente el procedimiento empieza con la presentación del servicio a un cliente potencial, mediante el contacto en el departamento de mantenimiento con el Jefe o Gerente, a través del vendedor de la zona o un contacto externo. Cada uno de los procesos a continuación se detalla en el procedimiento de IBCA para el Servicio de Análisis de Vibraciones P-AT-001⁷. La presentación se inicia con la entrega de un CD con información acerca de los servicios y productos que IBCA ofrece en las diferentes líneas, así como específicamente del área de asistencia técnica en análisis de vibraciones. Se evidencia la reunión de presentación y sus asistentes en el acta F-RG-014⁸. Si existe interés se pacta una cita para la realización de una prueba en una máquina, preferiblemente un equipo crítico, designado por el cliente. Se entrega el correspondiente reporte⁹, se procede a la explicación e interpretación del mismo y el uso que se le debe dar para planificar el mantenimiento. Se evidencia por escrito la entrega del reporte y su interpretación en los formatos F-AT-008 y F-AT-009¹⁰. De existir un rechazo de cualquier índole, se archiva el reporte de la visita y el plan de trabajo (formatos F-AT-002 y F-AT-004¹¹ respectivamente) para posterior seguimiento. Después de realizada la prueba y con la respectiva aceptación del cliente, se procede a realizar y entregar la cotización debidamente aprobada por Gerencia IBCA (formato de ventas F-VE-017¹²) dependiendo del número de máquinas y puntos a ser monitoreados. Con ello finaliza el proceso de presentación.

⁷ Ver modelo Anexo A

⁸ Ver Anexo B

⁹ Ver modelo de reporte Anexo C

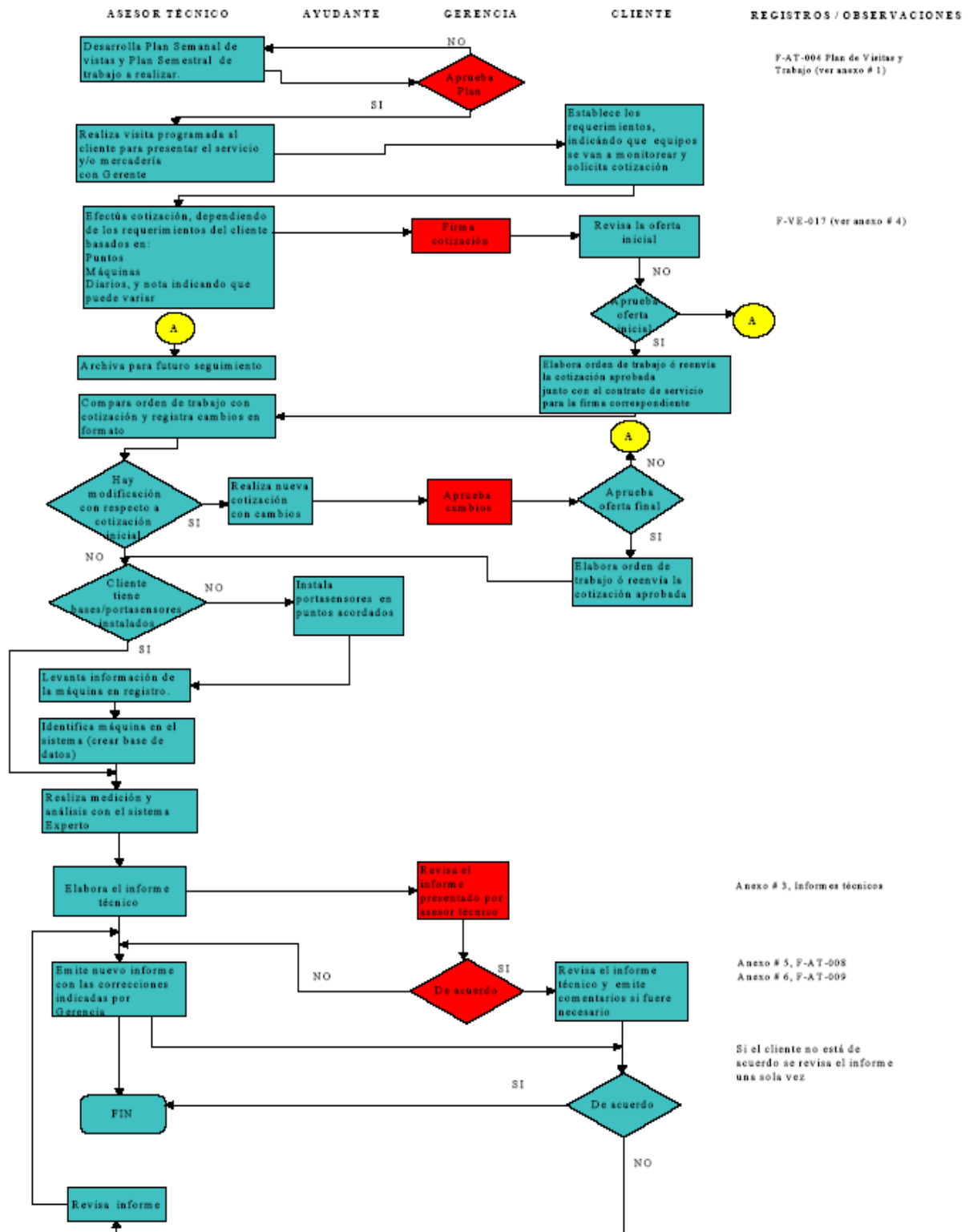
¹⁰ Ver modelos Anexo D

¹¹ Ver modelos Anexo E, F

¹² Ver Anexo G

3.2. DIAGRAMA DE FLUJO IBCA PARA EL ÁREA DE ASISTENCIA TÉCNICA EN ANÁLISIS DE VIBRACIONES.

De acuerdo al formato de procedimientos P-AT-001, las actividades que son realizadas por el área de asistencia técnica en análisis de vibraciones de IBCA se muestra en el siguiente diagrama de flujo:



3.3. PROCEDIMIENTO DE COLOCACIÓN Y ORIENTACIÓN DE PUNTOS DE MEDICIÓN.

3.3.1. Objetivo:

- Tener conocimiento general de las consideraciones y las actividades a realizarse para la correcta instalación y orientación de bases de bronce para acoplamiento.

3.3.2. Equipos de Protección Personal (EPP) y Seguridad:

- Casco
- Gafas
- Guantes
- Botas de Seguridad
- Mascarilla (de ser necesario en ambientes de polvo)

3.3.3. Elementos a Utilizar:

- Bases de Bronce para acoplamiento
- Activador Loctite 7075™
- Adhesivo Estructural Loctite 325™
- Lija. Lima o Taladro de Desbaste
- Equipo de Limpieza en sitio

3.3.4. Bases de bronce para acoplamiento del Sensor:

Las bases para acoplamiento (hechas de bronce o acero inoxidable) son colocadas en las máquinas en los puntos de medición requeridos. El acelerómetro triaxial se acopla a estas bases para la colección de datos de vibración. Las bases hechas de bronce silicón con la indicada en la Figura 3.1. son para propósito general recomendadas para la mayoría de aplicaciones. Las bases de acero inoxidable AISI 304 son altamente resistentes a la corrosión y son recomendadas para la industria nuclear.

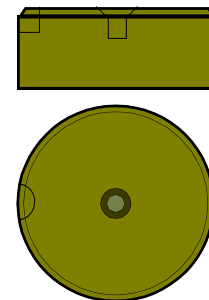


Fig. 3.1. Base de Bronce

Es importante verificar que la base esté correctamente orientada, que lo determina la ranura. Esta debe estar paralela o perpendicular a la línea de flujo de energía (eje) únicamente. Esto se explicará más adelante. Al no tomar en cuenta este requerimiento, se deriva en datos de vibración inconsistentes y un diagnóstico incorrecto de la condición de la máquina. Es muy recomendable que se mantenga registros detallados de la configuración de la máquina junto con el reporte de localizaciones y orientaciones de las bases.

3.3.5. Consideraciones Generales para Colocación de Bases

Las siguientes consideraciones generales deben tomarse en cuenta al momento de determinar cómo y dónde ubicar las bases en la maquinaria:

IMPORTANTE Antes de comenzar el procedimiento, deben leerse las recomendaciones y consideraciones propuestas en los anexos¹³.

1. Para Ventiladores y Bombas con acople directo a motor (Close-Coupled Machines):
 - Motor < 20 HP: Colocar una base en el lado conducido. (MDE¹⁴)
 - Motor \geq 20 HP: Colocar una segunda base en el lado libre del motor. (MFE¹⁵)
 - Como regla general, se la distancia entre el MDE y el MFE es < 30 pulg., use dos bases en el motor.
2. Para Motores con acople:
 - El sitio ideal para colocación es en el MFE.
 - Si el motor tiene ventiladores de enfriamiento, el siguiente sitio de colocación de preferencia sería en el MDE.
3. Para Bombas y Ventiladores en voladizo (cantilever):

¹³ Referencia Anexo H

¹⁴ Motor Drive End (Lado Conducido del Motor)

¹⁵ Motor Free End (Lado Libre del Motor)

- El sitio ideal de colocación es en la chumacera.
- Si el diseño refiere a un ventilador soportado por una cajera o dos chumaceras, los sitios ideales serían en el MFE y en cada chumacera.
- Si el diseño refiere a una bomba acoplada vertical, los sitios ideales de colocación serían en el MFE y el rodamiento de empuje de la bomba (PDE¹⁶).
- Si el diseño refiere a una bomba acoplada vertical de doble succión, coloque las bases en el MFE y en el alojamiento inferior de rodamiento (PFE¹⁷). **Nota:** *Si la capacidad de la bomba es > 3000 GPM, debe colocarse bases en los rodamientos superiores e inferiores.*

4. Para Bombas de doble succión acopladas:

- Si el diseño incluye una bomba horizontal acoplada de doble succión, deben colocarse las bases preferiblemente en el MFE y el PFE. **Nota:** *Si la capacidad de la bomba es > 2000 GPM, debe colocarse base en el PDE también.*

5. Para Maquinaria conducida por Bandas – Poleas:

- Los sitios de colocación preferidos serán en el MDE, cercano a la polea conductora y en el lado conducido, cercano a la polea conducida.

IMPORTANTE Nunca colocar bases en tapas de ventilador de enfriamiento, guardas de acoplamiento o bandas, estructuras poco sólidas, sitios lejanos a los apoyos e inaccesibles para acoplamiento del transductor.

¹⁶ Pump Driven End (Lado Conducido de la Bomba)

¹⁷ Pump Free End (Lado Libre de la Bomba)

3.3.6. Numeración e Identificación de las Locaciones

La ubicación de las bases es identificada con números en orden ascendente en la base de datos y en el registro para análisis de pruebas de vibración en maquinaria o VTAG (Vibration Test Analysis Guide). Esta identificación también incluye el tipo de componente correspondiente punto de toma (motor, compresor, bomba, ventilador, etc.) como se señala a continuación:

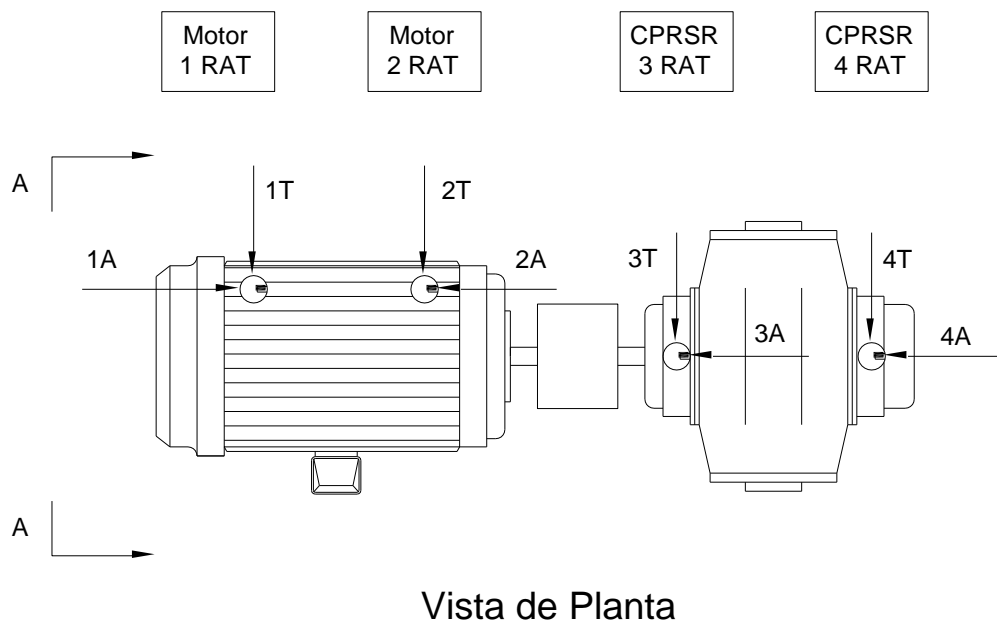


Fig. 3.2. Identificación de Locaciones

Los puntos de medición estarán identificados en el VTAG siempre de conductor a conducido. **Los números refieren a los rodamientos listados en dirección del flujo de la energía.** Los siguientes ejemplos detallan cómo aparecen estas locaciones en el VTAG:

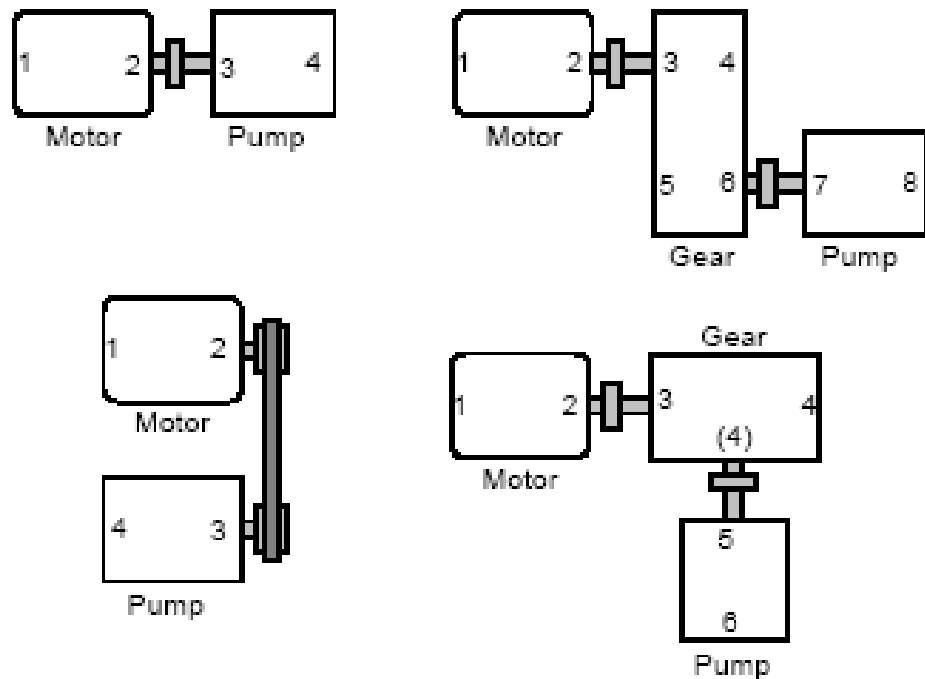


Fig. 3.3. Numeración de Locaciones

3.3.7. Procedimiento de Instalación de las bases de bronce

Existen tres aspectos importantes a considerar para elegir la localización de la base para acoplamiento:

- Vía de Transmisión de la Vibración:** Cuando el acelerómetro es conectado a la base para la colección de datos, se está midiendo la vibración de la base para acoplamiento que resulta de la vibración de la máquina. Cuando un componente en la máquina se está deteriorando su vibración cambiará en respuesta al desgaste a que está sometido. El resto de componentes y la máquina en general también sufrirán un cambio en las características de vibración en respuesta al fallo de este componente. El operador está monitoreando la variación de vibración de la base, que se da en respuesta a la variación de vibración de la máquina que a su vez es resultante de la variación de vibración del componente con problemas. Es imperativo que esta vía de transmisión sea lo más corta posible, de tal manera que las variaciones en vibración de la base imiten lo más preciso

posible a las variaciones del componente en sí. Entonces, es importante el colocar la base lo más cerca posible al componente que se intenta monitorear asegurándose que la vía de transmisión sea lo más sólida posible. No debe colocarse la base, por ejemplo, en la guarda de un acople o ventilador o en una lámina de acero.

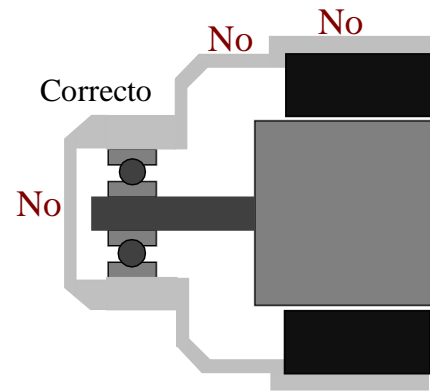


Fig. 3.2. Colocación de Base para Acelerómetro

- **Frecuencia de Respuesta:** Una vez que se ha colocado la base en la posición óptima para transmisión de datos, es también crítico que el contacto entre la base y la máquina sea lo más fuerte y sólido posible. Las superficies tanto de la base como de la máquina deben estar totalmente limpias y planas como se pueda. La frecuencia de respuesta también se verá afectada por la forma de conexión del transductor a la base. Debe verificarse que tanto la superficie del transductor como la de la base estén limpias y que el transductor haya sido empernado correctamente a la base.
- **Repetitividad:**
El éxito del análisis de vibración depende de la repetitividad de los datos colectados. Existen varias maneras para maximizar la repetitividad:

NOTA

Si la base es rotada 180° alrededor del eje radial, los datos en todos los canales no se verán afectados si no se está colectando datos de fase.

1. La ranura de alineación en la base asegura que el transductor sea conectado a la base siempre en la misma orientación. Sin embargo, si es necesario reemplazar una base dañada o faltante, es crítico el que la base reemplazante sea colocada en la misma orientación y posición. Obviamente, si la base es reemplazada con la ranura en una diferente dirección, los datos que previamente se almacenaron como datos Axiales, pueden ser ahora almacenados como Radiales y así con las otras orientaciones. Si la base reemplazante no se coloca en la misma posición, la firma de vibración será diferente (incluso si es en una pequeña proporción) y esto puede causar resultados erróneos de los diagnósticos.
2. La superficie de contacto entre el transductor y la base debe ser limpiada previa la colección de datos.
3. Aplique el mismo torque con la llave cuando acople el sensor.

A continuación se detallan los pasos requeridos para colocar una nueva base o reemplazar una faltante:

PASO 1 Ubicar la localización para medición

Si se está colocando una nueva base, debe encontrarse la locación apropiada en la máquina asegurándose que los criterios antes expuestos sean llevados a cabo de la mejor manera.

Si se esta reemplazando una base, hay que asegurarse que se la coloque en la misma posición y orientación que la anterior para asegurar la repetitividad de los datos:

- Verifique si existen señales visuales que indiquen donde estuvo colocada la base anterior. ¿Puede mirar señales de pegamento? ¿Superficies rectificadas?

- Si no existen signos visuales o si no se está totalmente seguro, revise la descripción de localización en la base de datos. Esta descripción debe indicar dónde debe posicionarse la base, por ejemplo, "Motor, Lado Libre" o "Posición 1".

PASO 2 Determinar Orientación

Si se está colocando una nueva base, elija una orientación conveniente. Si está reemplazando una base es crítico que la nueva base sea colocada en la misma orientación para asegurar la repetitividad de los datos. Se explicará más adelante las posiciones y orientaciones más convenientes para las aplicaciones más comunes.

PASO 3 Preparar la superficie de la máquina

Es muy importante que la superficie de la máquina donde se colocará la base este tan limpia y plana como sea posible. Utilice lija para remover la pintura. Asegúrese que el área limpia de contacto sea mayor a la superficie de la base. Limpie limallas y suciedad producto de la limpieza.

PASO 4 Preparar la base para acoplamiento

Una vez que la superficie de la máquina está lista, asegúrese que la de la base esté limpia también. Lije suavemente la superficie para asegurar que el adhesivo se fije correctamente.

PASO 5

Aplicar el Activador Loctite 7075™⁽¹⁸⁾

ADVERTENCIA

No permita que el activador entre en contacto con la piel.

Aplique el activador tanto en la superficie de la base como en la superficie preparada de la máquina. Deje secar por 20 segundos aproximadamente.

¹⁸ Ver Hoja Técnica y MSDS en Anexo I

PASO 6 Aplicar el Adhesivo Estructural Loctite 325™ (19)

Aplicar una pequeña cantidad (similar el tamaño de una chispa de chocolate) de adhesivo en la superficie de contacto de la base.

PASO 7 Colocar la base para acoplamiento

Presione la base firmemente con el pulgar contra la superficie de la máquina hasta sentir contacto metal con metal. El adhesivo requiere de 5 minutos para su secado, está listo para toma de datos en una hora y está completamente curado en 24 horas.

PASO 8

Verificar Orientación

NOTA

Si por alguna razón no es posible reemplazar la base y colocarla en la misma orientación, debe editar y cambiar la orientación en la base de datos.

Verifique que la base ha sido montada con la correcta orientación. De no estarlo, remueva la base y realice el procedimiento nuevamente.

PASO 9 Anote y mantenga una bitácora de los cambios hechos

Si ha reemplazado una base, asegúrese de anotar los cambios hechos. La información para su bitácora debe incluir:

- Nombre de la Máquina
- Nombre de la Locación
- Número de Código de Barras (de existir)
- Orientación

Adicionalmente es recomendable que se ingrese esta información como nota en la base de datos de planta.

¹⁹ Ver Hoja Técnica y MSDS en Anexo J

3.3.8. Orientación del Transductor:

La orientación indica al colector de datos qué canal está midiendo qué eje. Existen tres posibles combinaciones de orientaciones:



donde: A = AXIAL
R = RADIAL
T = TANGENCIAL

Nota: Los colectores como el DCA-50 y los modelos recientes de DCX soportan orientaciones VHA (Vertical, Horizontal y Axial) y XYZ para orientaciones x, y, z.

Los datos son tomados hacia el colector desde el canal uno hasta el canal tres del acelerómetro. El programa receptor (host) y el sensor procesan los datos en el mismo orden (recuerde que el eje de canales está marcado en el transductor).

Para máquinas horizontales, 'R' es considerada como vertical, 'T' es considerada como transversal y 'A' como paralela al eje:

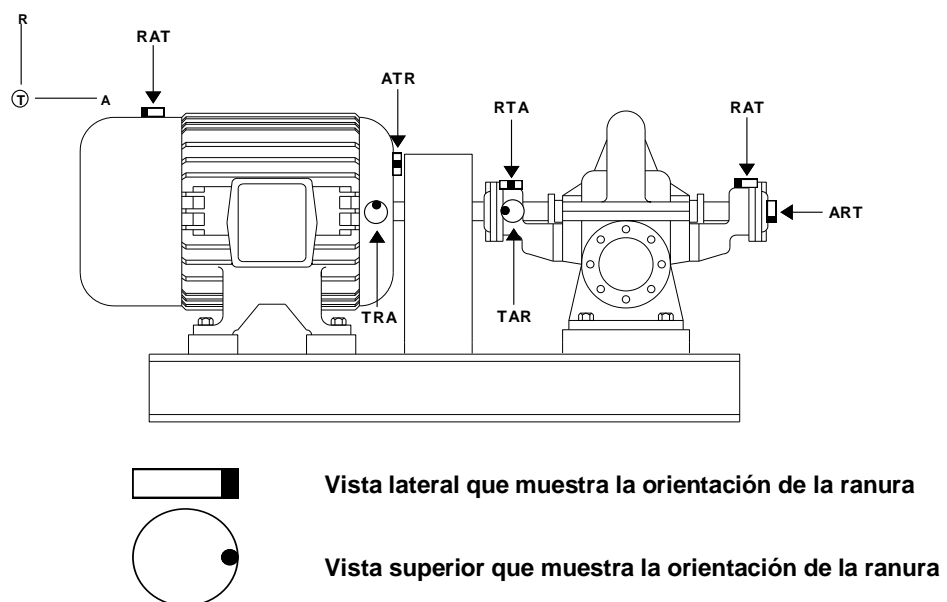


Fig. 3.4. Orientaciones en máquinas horizontales

Para máquinas verticales, 'R' es Radial, 'T' es Tangencial y 'A' es vertical:

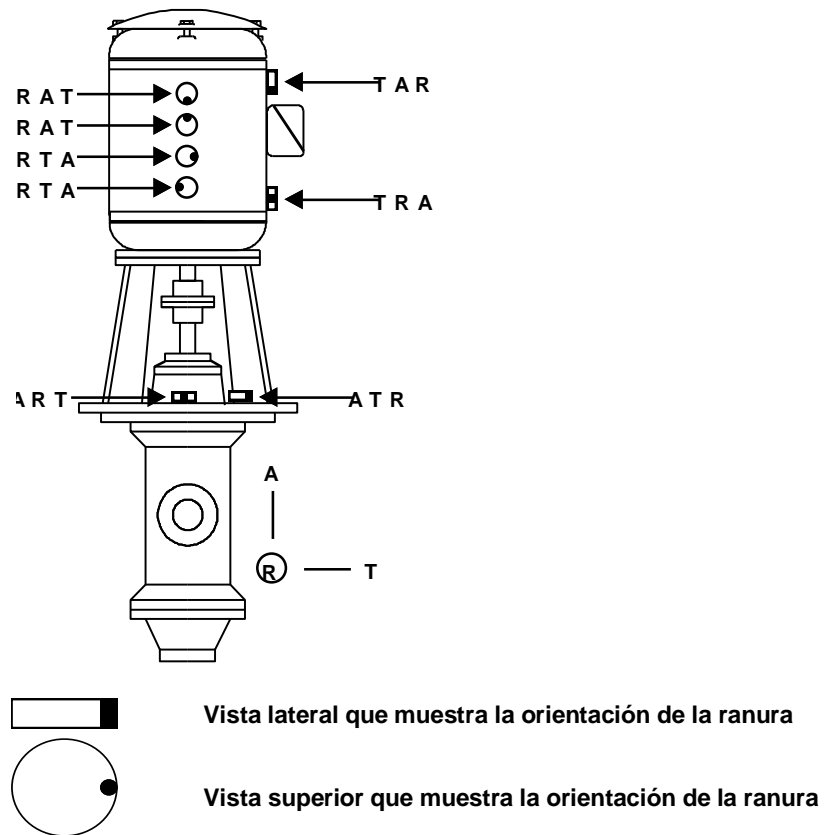


Fig. 3.5. Orientaciones en máquinas verticales

Entonces, por ejemplo, "RAT" en una máquina horizontal indica que el Canal 1 del acelerómetro está orientado en la dirección vertical, el Canal 2 está orientado paralelo al eje y el Canal 3 está orientado en la dirección transversal, como se muestra:

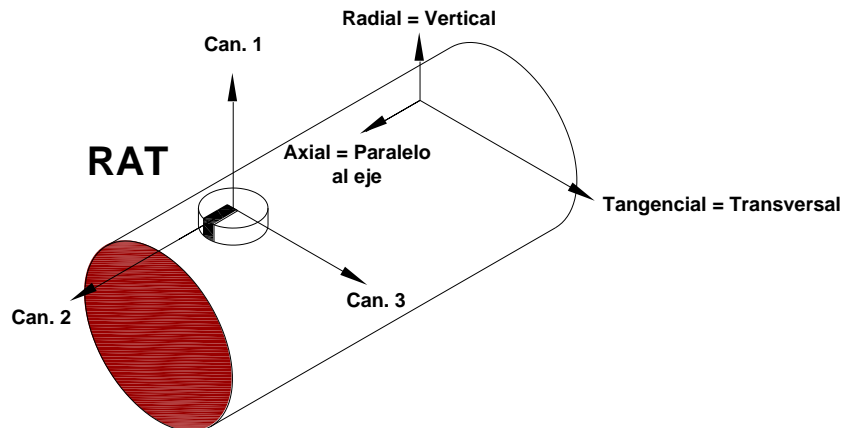


Fig. 3.6. Ejes Ortogonales RAT en máquina horizontal

3.4. LEVANTAMIENTO DE DATOS TÉCNICOS

3.4.1. Introducción:

Al finalizar y validar la colocación de las bases de acoplamiento de bronce, el siguiente procedimiento es el levantamiento de datos técnicos de la maquinaria para su posterior ingreso en el sistema **ExpertALERT™**. Para ello, IBCA utiliza el formato **F-AT-010²⁰**. Este formato contiene toda la información requerida por el VTAG. Este procedimiento requiere de investigación y consulta en manuales de fabricante de cada uno de los componentes y es fundamental que se recopile la mayor cantidad de información técnica, ya que de esto dependerá el incremento en la precisión e identificación de los picos característicos en el espectros de vibración lo cual nos mostrará los modos de fallos correspondientes.

3.4.2. Objetivo:

- Tener conocimiento general del las actividades a realizarse en el procedimiento de levantamiento datos técnicos de los equipos a ser monitoreados.

3.4.3. Equipos de Protección Personal (EPP) y Seguridad:

En caso de ingreso a planta para recopilación de datos:

- Casco
- Gafas
- Guantes
- Botas de Seguridad
- Mascarilla (de ser necesario en ambientes de polvo)

3.4.4. Elementos a Utilizar:

- Cuaderno o libreta de apuntes.
- Formato F-AT-010 (como referencia)

²⁰ Ver Anexo K

3.4.5. Procedimiento para Levantamiento de Datos Técnicos:

PASO 1 Recopilación de Información

Todo manual, catálogo y hoja técnica deberán ser reunidos y clasificados por equipo. En caso de no existir este tipo de apoyo técnico, la investigación se realizará en campo.

PASO 2 Ingreso de Datos en el Registro VTAG

El formato F-AT-010 será utilizado como registro VTAG para cada equipo. No es necesario llenar toda la información puesto que en muchos casos es muy difícil conseguir ciertos datos. La información faltante deberá ser llenada con datos de inspección visual del espectro y al realizar inspecciones de campo cuando se esté interviniendo el equipo para overhaul. Los datos necesarios son:

Conductores	Motor Eléctrico		Turbina		MCI	
	RPM Nominales		RPM Nominales		RPM Nominales	
	Potencia		Potencia		Potencia	
	Nº Álabes Vent. de Enfriamiento (de ser TEFC ²¹)		Nº de Etapas ²²		Nº de Cilindros	
	Tipo de Apoyo		Tipo de Apoyo		Tipo	
	Rodamientos		Rodamientos		2 Tiempos	
	Cojinetes		Cojinetes		4 Tiempos	
					Rodamientos	
					Cojinetes	

Elementos Intermedios	Acople Flexible	Poleas y Bandas	Caja de Engranajes
	Marca	Ø Polea Conductora	Relación de Transmisión
	Nº de Elementos	Ø Polea Conducida	Nº de Dientes c/engranaje
		Distancia entre Centros	Nº de Etapas
	Nº de Bandas		

Conducidos	Bombas Centrífugas		Ventiladores		Compresores de Tornillo	
	RPM de Operación		Vent. en Cantilever? SI / NO		Potencia	
	Potencia		Nº de Álabes		Nº de Hileras c/tornillo	
	Nº de Álabes del Impeler		Tipo de Apoyo		Tipo de Apoyo	
	Impulsor en Cantilever? SI / NO		Rodamientos		Rodamientos	
	Tipo de Apoyo		Cojinetes		Cojinetes	
	Rodamientos					
	Cojinetes					

Tabla 3.1. Principales Datos a recopilar en un equipo

²¹ Totalmente Cerrado con Ventilador de Enfriamiento (Totally Enclosed Fan Cooled)

²² Los datos en rojo serán recopilados más tarde (intervenciones, overhauls)

3.5. CREACIÓN Y VALIDACIÓN DE MIDS: PROGRAMACIÓN DE LOS EQUIPOS EN EL SISTEMA EXPERTAALERT™.

3.5.1. Introducción:

Al tener una base de datos técnicos de los equipos, el siguiente paso es el ingreso de los mismos al sistema ExpertALERT™, que nos servirá como un “servidor” que recopilará toda la información de los equipos monitoreados. Para cada equipo se creará su correspondiente “Cédula de Identidad”, es decir, la configuración del mismo, las locaciones para medición, el nombre y datos técnicos adicionales en lo que se lo conoce como **MID (Machine Identification Data)**. El ingreso de estos datos y la programación de la planta deben ser validados por un especialista en el manejo del sistema mencionado.

El sistema ExpertALERT™ tiene una jerarquización determinada para programación y visualización de una planta y sus equipos, como se indica en la Figura 3.7.:

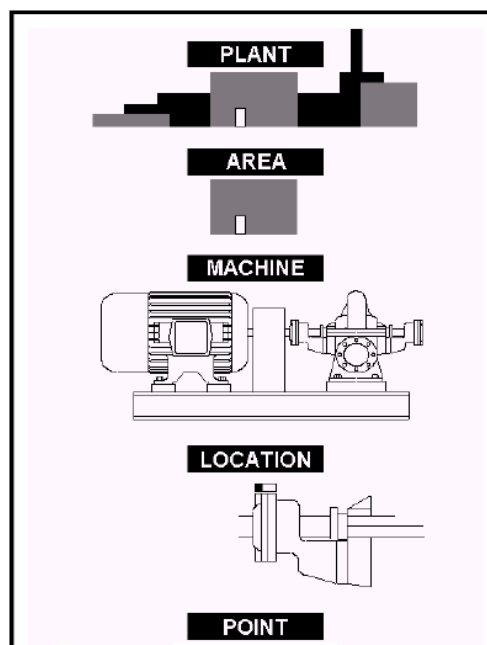


Fig. 3.7. Jerarquización de la Base de Datos de Planta²³

²³ Fuente: Tranter, Jason, “Book II: Creation. Alert Analysis Systems”, DLI Engineering Corporation, v.3.0., 2005.

Cada uno de los componentes de la base de datos se describe brevemente a continuación, de acuerdo a conceptos de programación:

- **Información de Soporte:** Nivel Cero de Programación. Antes de la creación de plantas, áreas, máquinas y locaciones, deben programarse las siguientes configuraciones:
 - **MID:** Datos de Identificación de la Máquina. Se ingresarán todo dato técnico y de configuración a través de la programación con el *MID Wizard*, cuyo manejo se explicará más adelante.
 - **Setups:** Configuraciones que indican al colector cómo debe realizar las mediciones. Los rangos de frecuencia a utilizarse lo determina cada locación.
- **Planta:** Primer nivel de programación. Espacio físico en el cual una compañía realiza ciertas operaciones. Se puede ingresar el nombre de la misma hasta con 50 caracteres, información adicional e inclusive una imagen.
- **Área:** Segundo nivel de programación. Espacio físico dentro de la planta donde un grupo determinado de máquinas realizan un proceso específico. Se utiliza para agrupar las máquinas en un proceso específico a ser monitoreadas.
- **Máquina:** Tercer nivel de programación. Agrupa todas las locaciones y puntos de medición, así como los datos técnicos para creación de MIDs. Se considera tratar la máquina como un conjunto de componentes en una *cadena de máquina*.
- **Locación:** Cuarto nivel de programación. Punto de medición en la máquina. Todas las mediciones de vibración están agrupadas en la locación. El *Machine Wizard*, el cual se explicará más adelante, simplifica la creación de máquinas y sus locaciones.

El MID es la clave de la programación de equipos en el ExpertALERT™. En él se detalla la siguiente información:

- Velocidad de operación del equipo y los cambios de la misma vía poleas y bandas, reductores y otro tipo de transmisiones.

- El número de componentes, su orden y naturaleza (p.e. motor, acople flexible, ventilador, etc.)
- Características específicas de cada componente (p.e. tipo de bomba: centrífuga, cavidad progresiva, reciprocante, etc.; tipo de apoyos: cojinetes o rodamiento, etc.)
- Detalles de los elementos rotativos (p.e. número de álabes de ventilador, número de lóbulos en tornillo de compresor, etc.)
- El número de locaciones y puntos de toma de datos.

IMPORTANTE El sistema experto está diseñado para operar como un analista humano: esto quiere decir que necesita de la mayor cantidad de información acerca de la máquina para poder arrojar diagnósticos y resultados precisos.

3.5.2. Objetivo:

- Tener conocimiento acerca del correcto ingreso de datos técnicos en el sistema ExpertALERT™ y la validación correspondiente a estas actividades.

3.5.3. Procedimiento para Programación de Equipos:

Inicialmente, se debe ingresar al *Database Design Wizard* el cual es un asistente para la creación de los componentes de la base de datos para equipos a monitorear; aquí se detalla paso a paso el proceso de creación de cada uno de los elementos:

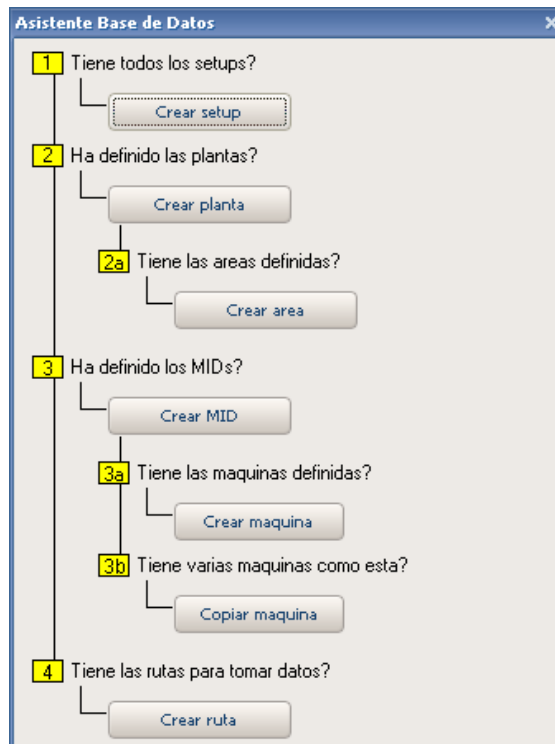


Fig. 3.8. Asistente de Base de Datos

PASO 1 Creación de Setups

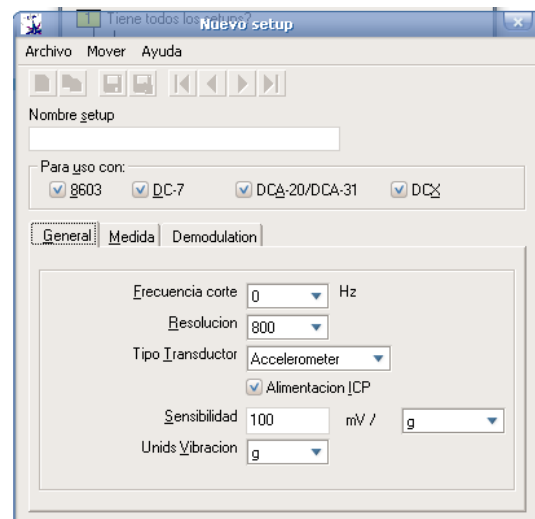
El asistente nos guiará a través de la programación. Para crear un Setup tenemos la siguiente ventana con tres pestañas por defecto:

- **General:**

En esta pestaña podemos seleccionar las siguientes configuraciones:

- **Frecuencia de Corte:**

Límite inferior de un rango de frecuencia. Cualquier valor menor será filtrado por el colector. Se usa para reducción de ruido externo.



- **Resolución:** Número de líneas resultantes en el espectro después del filtrado. Para mejores resultados se elige 800 líneas (2046 muestras en onda temporal). En ciertos casos, dependiendo de las RPM del motor eléctrico, es necesario aumentar la resolución para

distinguir picos cercanos como el de 120 Hz (Frecuencia de Red = 60 Hz) o el de 100 Hz (Frecuencia de Red = 50 Hz). Por ejemplo, se quiere saber cuál es la resolución mínima necesaria para monitorear un motor de 100 HP a 1790 RPM, entonces:

$$R_{(Hz)} = \frac{Rf}{L}; \quad (e.3.1.); \text{ Donde: } R_{(Hz)}: \text{ Resolución en Hz}$$

Rf: Rango de Frecuencia

L: Número de Líneas

El rango de frecuencia se determina en rango bajo (hasta 10 veces la velocidad de giro del motor) y alto (hasta 100 veces la velocidad de giro del motor) para el espectro de vibración:

$$Rf_{10X} = \frac{RPM \cdot 10}{60}; \quad \text{Rango Bajo} \quad (e.3.2.1)$$

$$Rf_{100X} = \frac{RPM \cdot 100}{60}; \quad \text{Rango Alto} \quad (e.3.2.2)$$

Entonces,

$$Rf_{10X} = 298,33Hz$$

$$Rf_{100X} = 2983,33Hz$$

La velocidad real del motor en Hz es:

$$\omega r_{(Hz)} = \frac{RPM}{Fr}; \quad (e.3.3.); \text{ Donde: } \omega r_{(Hz)}: \text{ Velocidad real en Hz}$$

RPM: Rev. por min.

$$\omega r_{(Hz)} = \frac{1790}{60} = 29,83Hz \quad \text{Fr: Frecuencia de la Red}$$

y su velocidad síncrona $\omega s_{(Hz)}$ es: $\omega s_{(Hz)} = \frac{1800}{60} = 30Hz$; entonces el

pico de 120 Hz estará cercano a 4X. Con ello se calcula el espacio mínimo (resolución) que debe haber entre el 4X y el pico de 120 Hz a 1790 RPM, es decir a 119,32 Hz:

$$R_{(Hz)} = 120 - 119,32 = 0,68Hz$$

$$L = \frac{298,33}{0,68} = 438,72 \approx 440 \text{ Líneas}$$

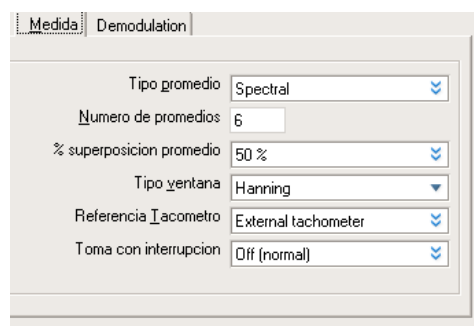
Es decir que 800 Líneas de resolución es más que suficiente para distinguir el pico de 120 Hz.

- **Tipo de Transductor:** Seleccione el tipo de sensor con el que está trabajando. Como estándar, DLI trabaja con un acelerómetro triaxial.
- **Alimentación ICP:** Seleccione si el transductor es ICP (Integrated Circuit Piezoelectric), es decir, con circuito integrado piezoeléctrico. El acelerómetro de DLI es ICP.
- **Unidades Vibración:** Seleccione entre los distintos tipo de unidades de acuerdo a su preferencia. Por defecto, el sistema ExpertALERT™ trabaja con VdB, es decir, decibéles de velocidad.

- **Medida:**

- **Tipo y número de Promedios:**

Dependiendo del colector, puede elegirse entre promedio Espectral o Time Synchronous. El número de promedios depende del ambiente y del



tiempo de toma que se requiera. Es recomendable usar 6 promedios para ambientes normales. Mientras mayor sea el número de promedios, mayor será la reducción de ruido y vibraciones parásitas pero la toma llevará más tiempo.

- **% Superposición Promedio (Overlap):** Para mantener la calidad de reducción de ruido y aumentar la velocidad de monitoreo, se puede superponer los espectros mientras se promedia. Por ejemplo, si se usa 50% de overlap, el colector tomará la mitad de los datos de la nueva onda temporal, los añadirá al 50% siguiente de datos de la anterior onda, los convierte en espectro y lo envía a promedio.
- **Tipo de Ventana:** El ventaneo reduce el efecto de fuga (leakage). Para la mayoría de aplicaciones debe usarse la ventana Hanning.
- **Referencia de Tacómetro:** Los colectores de DLI tienen la capacidad única de soportar entradas de 4 canales. Este canal

adicional puede ser usado para conexión de un tacómetro en mediciones de fase, velocidad y time synchronous. Normalmente se usa la opción *External Tachometer*.

- **Toma con interrupción:** En varios casos existe el problema que el equipo no esta trabajando continuamente. Por ejemplo un elevador que puede trabajar 10 segundos y el monitoreo de la locación toma 20 segundos. Para ello DLI implementa esta solución: la toma se realiza con un interruptor que se activará cuando la máquina deje de trabajar pausando la toma hasta nuevo arranque. El interruptor no viene integrado y debe ser adquirido como accesorio.

- **Demodulación:**

En Demodulación podemos elegir el tipo de filtro pasa-bandas para los diferentes tipos de colector. La siguiente tabla muestra los rangos para diferentes colectores.

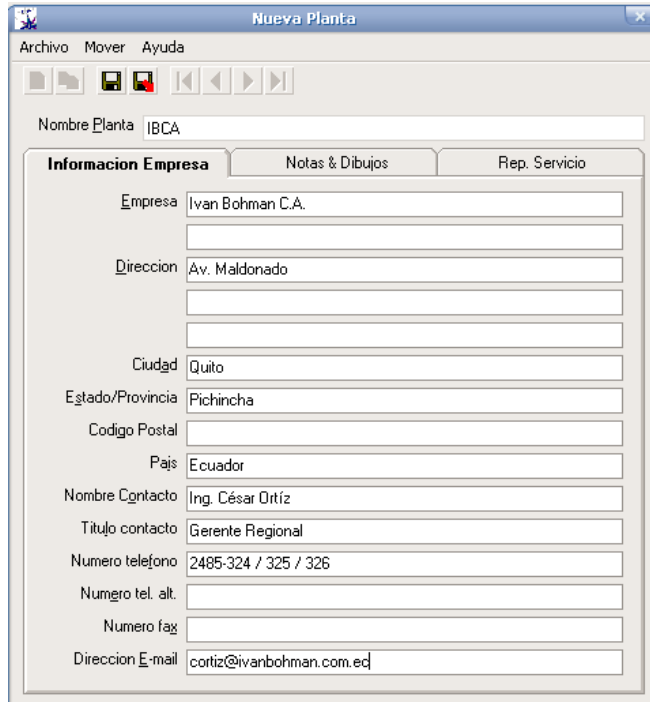
8603	DCA-20/DCA-31	DCA-50	DCX
1250 – 2500	600 – 1250	1250 – 2500	1250 – 2500
2500 – 5000	1250 – 2500	1250 – 5000	1250 – 5000
5000 – 10000	2500 – 5000	1250 – 10000	1250 – 10000
10000 – 20000	5000 – 10000	2500 – 5000	2500 – 5000
	10000 – 20000	3400 – 4400	3400 – 4400
		5000 – 10000	5000 – 10000

Tabla 3.2. Filtros para diferentes colectores

Nota: El valor por defecto para cada colector es de 5000-10000 Hz

PASO 2 Creación de Plantas

Al pulsar **Crear Planta** aparecerá la siguiente ventana:



En ella se ingresarán todos los datos posibles para registro y un nombre que contenga hasta 50 caracteres. En la pestaña **Notas y Dibujos** podemos adicionar una imagen datos adicionales. En la viñeta **Rep. Servicio** se ingresarán los datos del encargado del análisis de la base de datos y

emisión de reportes. Estos datos aparecerán en la carátula de los reportes Expertos de los cuales se hablará más adelante.




Botón Guardar

Al finalizar el ingreso de datos, pulse el botón **Guardar** o el de **Guardar y Salir**.

PASO 2 Creación de Plantas

Al pulsar **Crear Área** en el Asistente, aparecerá la siguiente ventana:



Aquí se ingresará el nombre del Área, se elegirá la planta en la que se encuentra la misma y se adicionarán datos adicionales y una imagen de ser necesario.

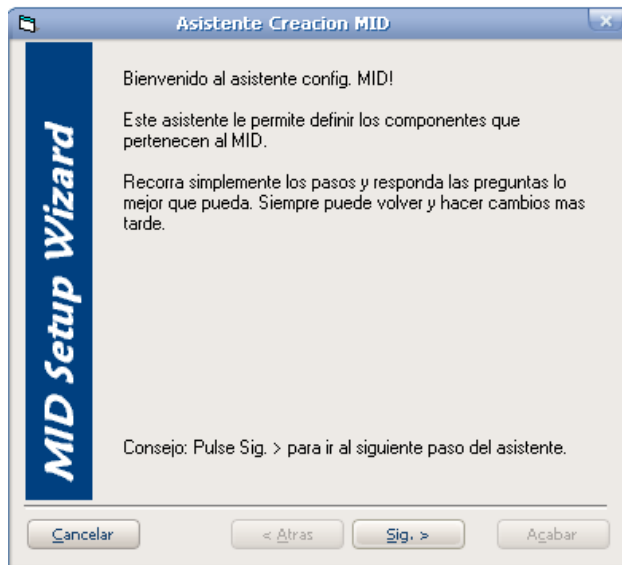


Botón Guardar

Al finalizar el ingreso de datos, pulse el botón **Guardar** o el de **Guardar y Salir**.

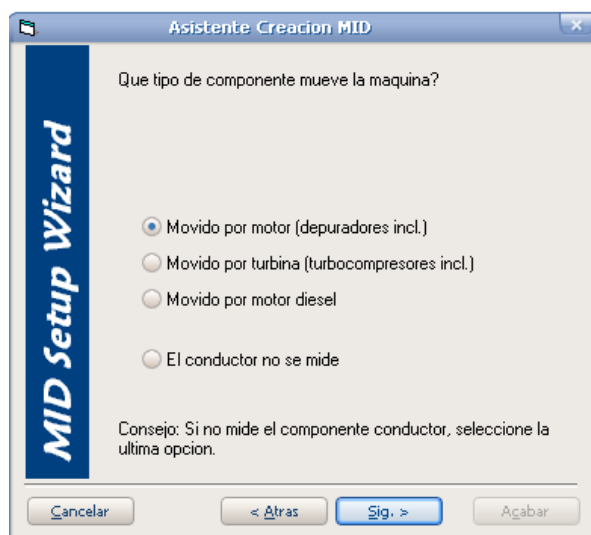
PASO 3 Creación de MIDs

Al pulsar **Crear MID** en el Asistente, aparecerá la siguiente ventana:



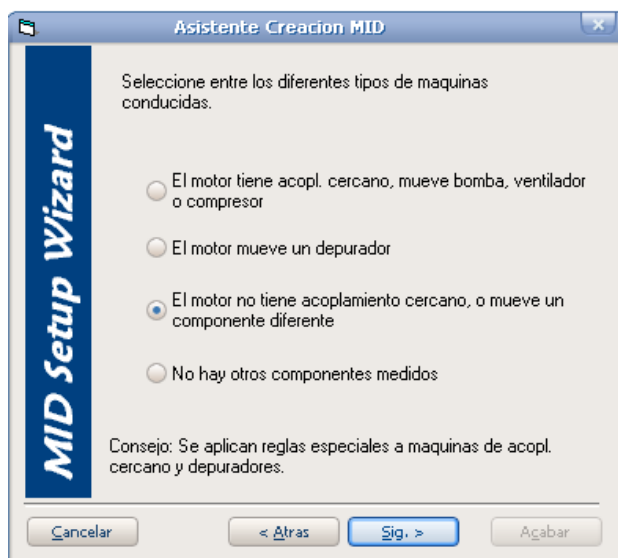
Este es el asistente de creación de MID o *MID Wizard* del cual se habló previamente. Para ilustrar los pasos y las opciones que ofrece este asistente, se creará una bomba centrífuga horizontal con un motor de 20 HP y 3600 RPM con el impeler en voladizo. Se usarán poleas y bandas para la transmisión de potencia. A continuación se detallan los pasos de selección, ingreso de datos y creación del MID:

a) Selección del Conductor:



Al pulsar **Siguiente**, el asistente nos presenta en pantalla cuatro opciones para selección del conductor dependiendo de la máquina, para nuestro ejemplo es la primera. Pulse siguiente al finalizar su selección.

b) Selección del tipo de máquina conducida:



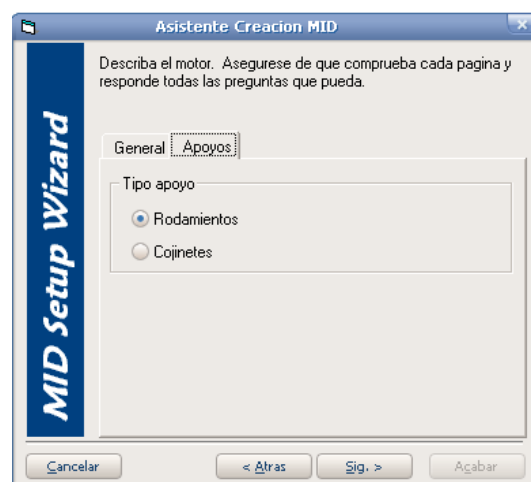
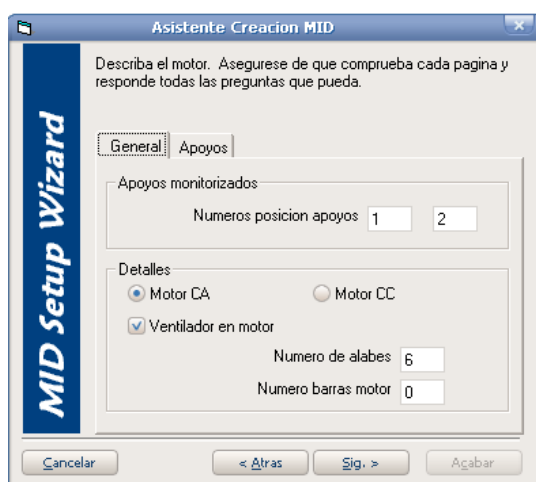
Para equipos en los cuales se monitorea el conducido (aplicación típica), seleccione la tercera opción. Para máquinas con acople directo (close coupled machines) sin opción para monitoreo de conducido seleccione la primera opción.

c) Descripción e Ingreso de Datos del Conductor:

Ingrese los datos donde corresponde de acuerdo a la siguiente consideración:

		Nº de Locaciones según Registro VTAG			
		1 P/U ²⁴		2 P/U	
Apoyos Monitorizados	Número Posición Apoyos	1	0	1	2

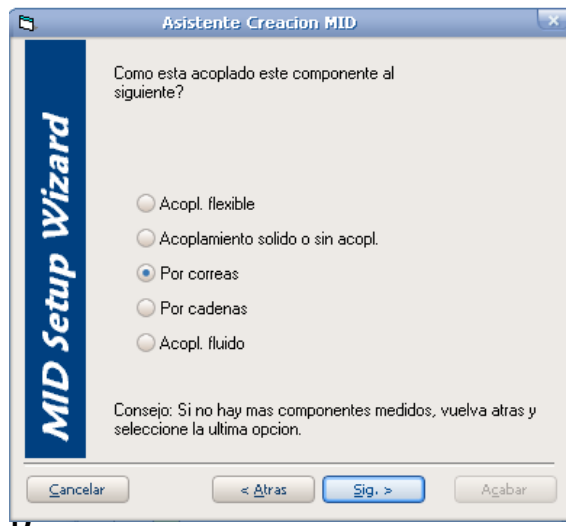
Para el ejemplo la selección sería de esta manera:



²⁴ Abreviación para Pick Ups (locaciones o punto de toma)

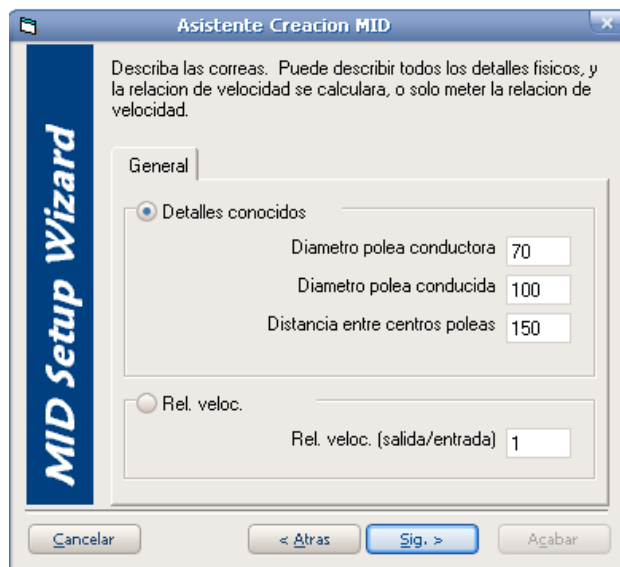
La información faltante será llenada automáticamente al identificar los picos en los espectros o manualmente de conseguirlas posteriormente mediante investigación y visualización en campo.

d) Tipo de transmisión de potencia:



Seleccionar entre los diferentes tipos de transmisión. Para el ejemplo, se escogerá la tercera opción.

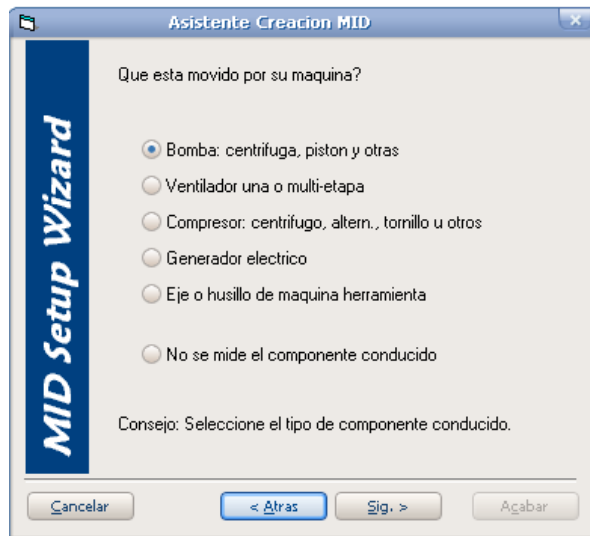
e) Detalles de los elementos de transmisión de potencia:



Para el caso de transmisión por correas (poleas y bandas), por cadenas y acople fluido, el sistema pedirá los detalles de estos elementos. En los casos restantes, se procederá con la selección del

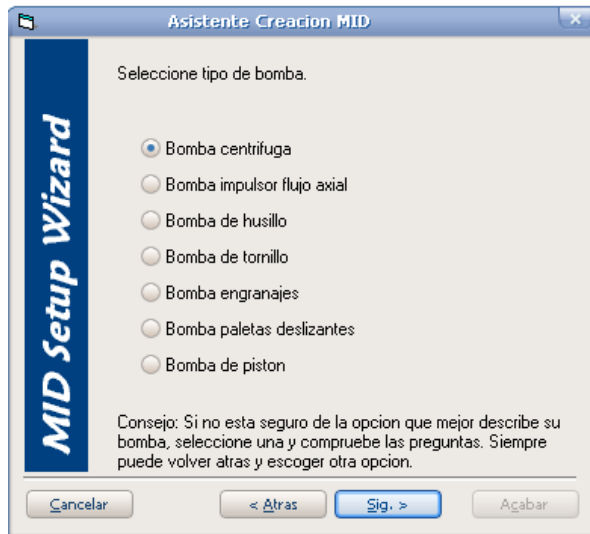
conducido. Para el ejemplo, se ingresarán los datos de las poleas y distancia entre centros en centímetros, de acuerdo al Registro VTAG. Pueden ingresarse los datos en pulgadas. No se deben mezclarse unidades.

f) Selección del Conducido:



Seleccione el tipo de componente conducido en su máquina. En caso de no monitorearlo, seleccione la última opción. Para el ejemplo, se escogerá la primera.

g) Selección del tipo de equipo conducido:



Al seleccionar el componente conducido, el sistema le pedirá el tipo de máquina. Cada clasificación dentro de la máquina tiene sus propias características y especificaciones técnicas solicitadas por el sistema. Para nuestro

caso, se elegirá Bomba Centrífuga como muestra la figura arriba.

h) Descripción del Conducido:

Según el tipo de componente conducido, el sistema pedirá el ingreso de datos técnicos específicos para cada uno. Se tomará en cuenta la siguiente consideración:

	Nº de Locaciones según Registro VTAG	1 P/U			
Apoyos Monitorizados	Número Posición Apoyos	3 ó ID. Siguiete	0		
		2 P/U			
		3 ó ID. Siguiete	4 ó ID. Siguiete		
		3 P/U			
		3 ó ID. Siguiete	4 ó ID. Siguiete	5 ó ID. Siguiete	
		4 P/U			
		3 ó ID. Siguiete	4 ó ID. Siguiete	5 ó ID. Siguiete	6 ó ID. Siguiete

Debido a que existe la posibilidad de que anterior a este conducido exista un elemento adicional monitoreado (acople fluido, caja de engranajes), se ingresará la identificación numérica siguiente en las casillas de apoyos monitorizados.

Para el ejemplo, la selección se muestra a continuación:

Asistente Creacion MID

Describa la bomba centrífuga. Asegurese de que compruebe cada pagina y responde todas las preguntas que pueda.

General Apoyos

Apoyos monitorizados

Numeros posicion apoyos 3 0

Detalles bomba

Rotor en voladizo

Numero de paletas 8 (1a etapa)

0 (2a etapa)

Cancelar < Atras Sig. > Acabar

Asistente Creacion MID

Describa la bomba centrífuga. Asegurese de que compruebe cada pagina y responde todas las preguntas que pueda.

General Apoyos

Tipo apoyo principal

Rodamientos

Cojinetes

Tipo cojinete empuje

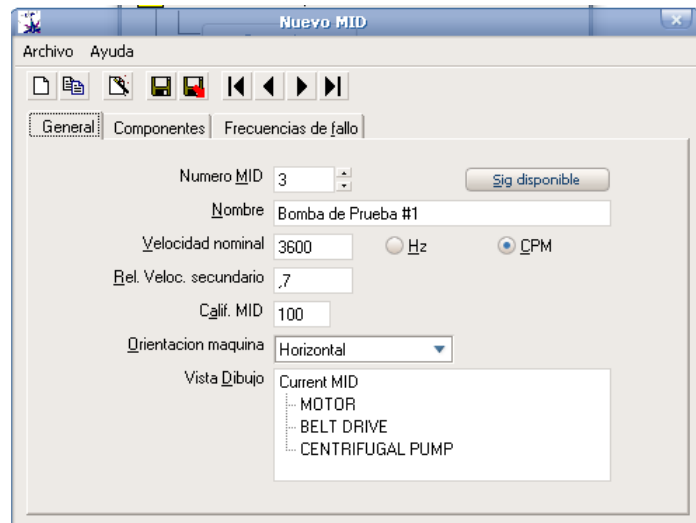
Rodamiento

De aceite

Sin cojinete empuje

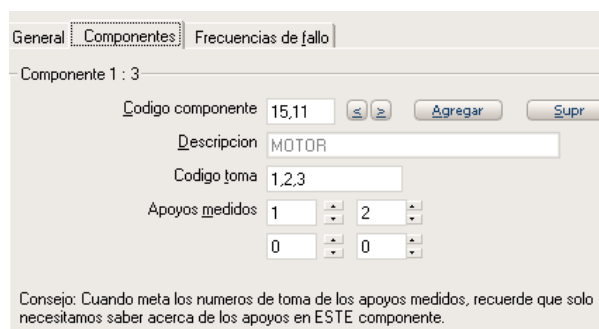
Cancelar < Atras Sig. > Acabar

Con ello ha finalizado el Asistente. Pulse **Acabar**. A continuación, se desplegará la ventana **Nuevo MID**. En la pestaña **General**, se ingresará el nombre del MID (equipo), la velocidad nominal (para nuestro caso, 3600 RPM o CPM) y la orientación de la máquina.



Adicionalmente

podemos ver la relación del secundario (en caso de transmisión por correas, cadenas o caja de engranajes), el número de MID asignado y la configuración en árbol del equipo en orden ascendente por componente programado. En la pestaña **Componentes**, se



visualizan los componentes que conforman el MID. El sistema asigna un código específico para cada componente de acuerdo a su

configuración, tipo y número de puntos de medición. En esta sección puede crearse un MID directamente si se tiene conocimiento de los códigos. Es recomendable que no se manipulen estos datos a menos que sea un experto. En ciertos casos, será necesaria la creación de máquinas directamente desde esta sección.

En la pestaña **Frecuencia de Fallo**, se visualizará la tabla de frecuencias de fallo para el equipo en cuestión.

Dependiendo de la información ingresada, el sistema construye esta tabla, identificando las

Cod	Nombre	En secundario	Elementos	Rel. final
BR	BELT ROTATION	No	0,3868	0,3868
1XP	1 X PUMP SHAFT	Yes	1	0,7
1XM	1 X MOTOR SHAFT	No	1	1
2XP	2 X PUMP SHAFT	Yes	2	1,4
2XM	2 X MOTOR SHAFT	No	2	2
3XP	3 X PUMP SHAFT	Yes	3	2,1
3XM	3 X MOTOR SHAFT	No	3	3
4XM	4 X MOTOR SHAFT	No	4	4
PV	PUMP ROTOR VANES	Yes	8	5,6
MFB	MOTOR FAN BLADES	No	6	6

frecuencias por componente. Cada uno de estos datos tiene un código de identificación que se representará luego de la medición en el espectro en ciertos picos específicos, asignados de acuerdo al número de elementos. En el ejemplo mostrado, la frecuencia de fallo de los álabes del impeler de la bomba es:

$$PV = NA * BR = 8 \cdot 0.3868 = 5.6X$$

Donde: PV: Frecuencia de Fallo de los Álabes del Impeler
 NA: Número de Álabes del Impeler de la Bomba
 BR: Relación de Transmisión por Correas

En el capítulo siguiente se profundizará más en este tema.

PASO 4 Validación del MID: Creación de la Máquina

Una vez creado el MID, la única manera de comprobar si el ingreso de datos y la selección de componentes están correctos es la asignación y creación de la máquina a ese MID. El sistema recoge toda la información del MID previamente creado para programar la máquina con sus locaciones para toma de datos. Si el MID ha sido correctamente creado, el número de locaciones desplegadas en el árbol de base de datos será igual al número de P/U o Pick Ups (puntos de medición) del Registro VTAG correspondiente a ese equipo. Para crear la máquina se

De un nombre a la maquina y asigne el MID y el area.

Nombre Maquina:
Bomba de Prueba #1

Numero MID:
[3] Bomba de Prueba #1

Nombre Planta:
IBCA

Nombre Area:
Prueba

Consejo: Asegurese que tiene un nombre unico en el area. Las localiz. de vibracion se configuraran de acuerdo con el MID

selecciona la opción **Crear Máquina** en el Asistente de Base de Datos. Se desplegará el *Machine Wizard* o *Asistente Creación Máquina* que nos indicará paso a paso cómo crear el equipo. En la figura a la izquierda podemos visualizar el ingreso de datos para el

equipo de ejemplo: se ingresa el nombre del equipo, el cual se visualizará en el árbol; se selecciona el MID correspondiente y la planta y área en la cual está ubicado. Al terminar pulse siguiente y se desplegará el cuadro para ingreso de información respecto a las locaciones para toma de datos, que se muestra en figura de la derecha. En este cuadro ingresaremos las orientaciones de las bases

Seleccione la caja para tomar vibraciones. Describa la informacion esencial relacionada con las localizaciones.

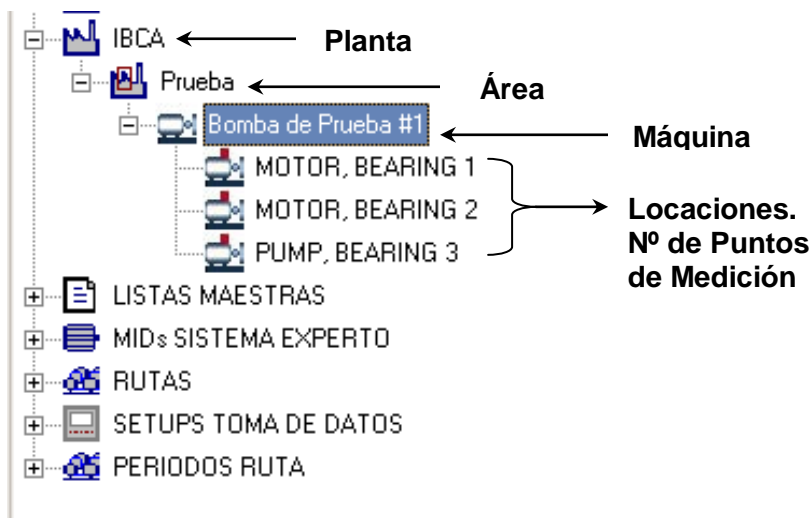
Incluir localiz. de vibracion en la maquina

nombre localizacion	POSICION	Cod. Bar.	Orientacion
MOTOR, BEARING 1	1	1	RAT
MOTOR, BEARING 2	2	2	RAT
PUMP, BEARING 3	3	3	RAT
*			

Consejo: Ahora solo se requiere el nombre, posicion del apoyo y codigo de barras. El resto de la informacion se configurara usando sus preferencias por defecto.

de bronce de acuerdo al Registro VTAG correspondiente. En este punto validamos la creación del MID: para el ejemplo tenemos una bomba

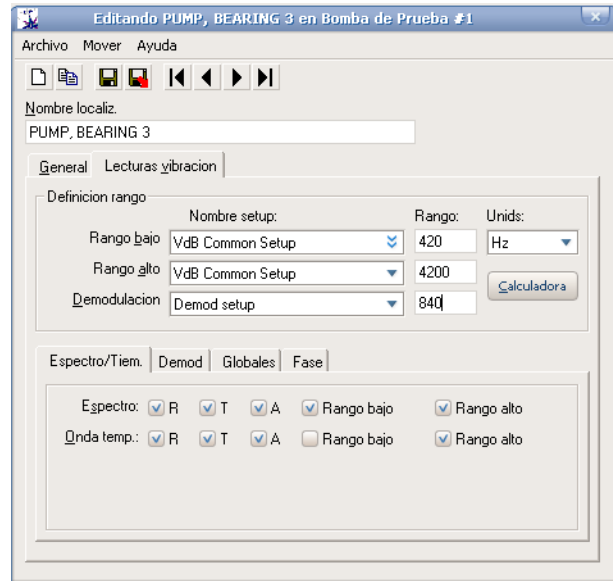
centrífuga con tres puntos de medición, 2 en el motor y 1 en la bomba. Idénticamente debemos comprobar que estos puntos se encuentren en el cuadro de selección de orientaciones. Caso contrario, el ingreso de datos al MID está incorrecto. Al finalizar esta creación – validación pulse **Siguiente** y **Finalizar**. El último paso para validar la creación del MID es verificar en el árbol si existe la máquina y los puntos de medición de acuerdo al Registro VTAG. En la parte superior izquierda de la pantalla del ExpertALERT™ se encontrará el árbol esquematizado de acuerdo a la jerarquización mostrada anteriormente en la Figura 3.7. Como se puede observar a continuación, la bomba ha sido creada correctamente:



IMPORTANTE Al editar la máquina para cambio, ingreso de datos o aumento de puntos de medición, hay que recordar que se debe editar de la misma manera al MID. Al no cumplir con este requisito, obtendremos datos erróneos de medición, así como diagnósticos irreales de la máquina en cuestión. De igual manera, es altamente recomendable el uso de un MID por máquina incluso si estas son de características idénticas. El propósito de esto es personalizar su máquina ya que jamás se tendrán condiciones de operación idénticas en las máquinas puesto que existen varios factores como la cimentación, ubicación y el medio ambiente que afectan de diferente manera a cada equipo.

PASO 5 Configuración de los puntos de toma

Por defecto, el sistema configura todas las locaciones para un rango de frecuencia acuerdo al motor. Obviamente, si se tiene reducciones o incrementos de velocidad debido a elementos de transmisión de potencia, el rango de frecuencia variará. Si se usa el mismo rango,



los espectros mostrarán picos superpuestos (reducción) en los cuales no puede hacerse ningún análisis o por el contrario pueda que no los muestre (incremento). Para corregir esto, se debe configurar los puntos de acuerdo a la velocidad del eje donde se ubica la locación, utilizando la opción **Edición** al ubicarse en la locación deseada en el árbol. Seleccione la pestaña **Lecturas de Vibración** y encontrará los datos a ser editados. Para el ejemplo, se calcula el rango de frecuencia para el punto 3 de la bomba:

$RPM_{P3} = RPM_{motor} \cdot I = 3600 \cdot 0,7 = 2520$; el valor de **I** es la relación de transmisión: $I = \frac{RPM_{salida}}{RPM_{entrada}}$. Ahora, el rango de frecuencia se lo calcula

de acuerdo a las ecuaciones 3.2.1. y 3.2.2.,

$$Rf_{10X} = 420 \text{ Hz}; \quad \text{Rango Bajo}$$

$$Rf_{100X} = 4200 \text{ Hz}; \quad \text{Rango Alto}$$

El rango de demodulación será usualmente el doble del rango bajo,

$$\begin{aligned} R_{De\ mod} &= 2 \cdot Rf_{10X}; & (\text{e.3.4.}) \\ R_{De\ mod} &= 2 \cdot 420 = 840 \text{ Hz} \end{aligned}$$

Adicionalmente, se debe activar todas las casillas en las pestañas de *Espectro/Tiemp.*, *Demod* y activar R, T y A en *Globales* en cada punto de la máquina. Esto nos dará una serie de datos completos para análisis.

3.6. VALIDACIÓN PARA LA TOMA DE DATOS.

3.6.1. Introducción:

Al finalizar la creación y programación de la base de datos de equipos a ser monitoreados, hay que concentrarse en la toma de datos de vibración. Este procedimiento es tan importante como el anterior puesto que de esto depende la calidad de los espectros, así como la validez de los datos a ser analizados. Una toma errónea deriva en un análisis impreciso y diagnósticos erróneos del estado de la máquina.

Antes de adentrarse en el procedimiento de monitoreo, se explicará brevemente el funcionamiento de un equipo para análisis de vibraciones que funciona en base a lo que se conoce como analizador TRF (Transformada Rápida de Fourier). El análisis de espectros se define como la transformación de una señal representada en el dominio del tiempo hacia la representación en dominio de la frecuencia. A continuación se detallan los pasos para la conversión de una señal de vibración en un espectro:

1. **Conversión Análogo – Digital:** El acelerómetro capta la señal y la envía a un analizador PCMCIA (tarjeta para procesamiento de datos). El muestreo se realiza como se muestra en la figura a continuación:

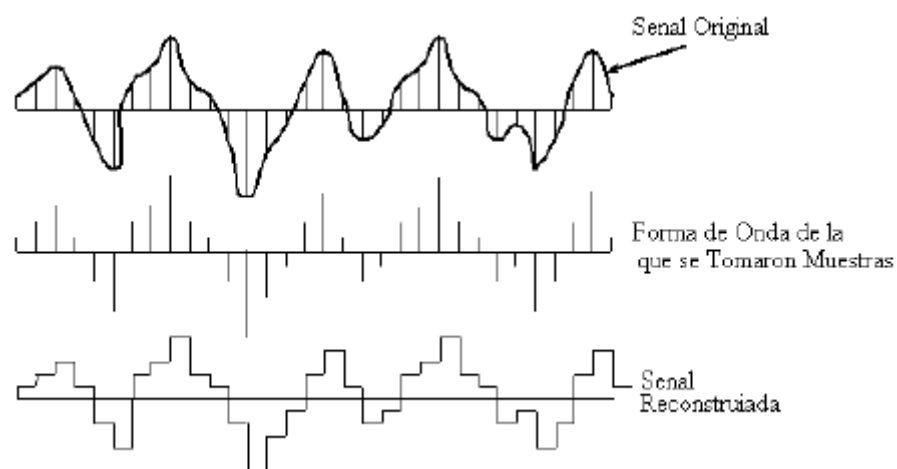


Fig.3.9. Procedimiento de muestreo

Los niveles de voltaje son enviados al convertidor análogo – digital (CAD).

- 2. Filtrado pasa-bajas o Anti-Aliasing:** El efecto aliasing se presenta cuando la frecuencia de muestreo es menor a la frecuencia de onda, como se muestra en la figura 3.10. El filtro anti-aliasing interno está configurado para cada rango de frecuencias del analizador. Se debe tomar muestras por lo menos dos veces tan rápido que la frecuencia más alta que se va analizar.

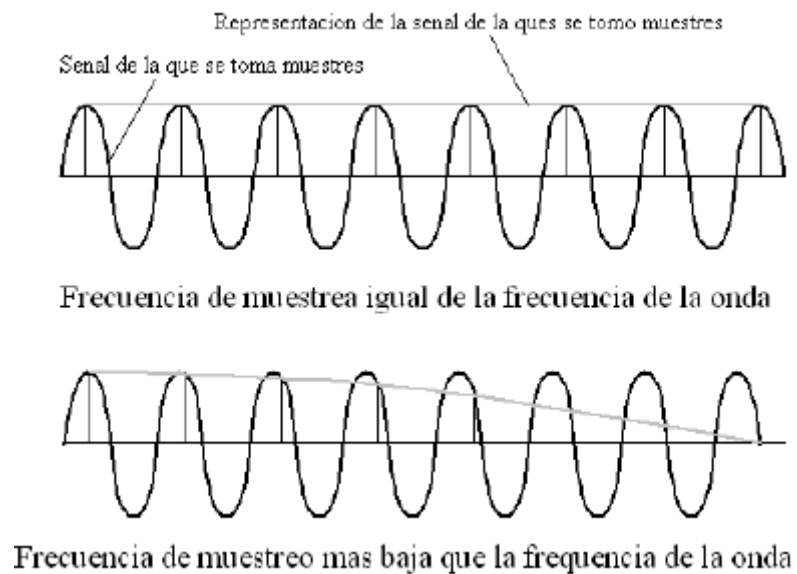


Fig.3.10. Efecto Aliasing

- 3. Ventaneo (Windowing):** A continuación, se realiza el ventaneo de acuerdo al tipo de señal. Para señales continuas, se utiliza la ventana Haning. En caso de tener señales intermitentes (impacto) se utiliza la ventana rectangular.
- 4. Aplicación de la TRF:** Cada componente en una máquina produce una señal sinusoidal a una frecuencia diferente. La suma de estas señales en dominio del tiempo produce una señal compleja que es captada por el acelerómetro. La transformada rápida de Fourier se encarga de descomponer esta señal en sus componentes y las expresa en valor de frecuencia. La figura 3.11. muestra cómo se realiza este proceso.

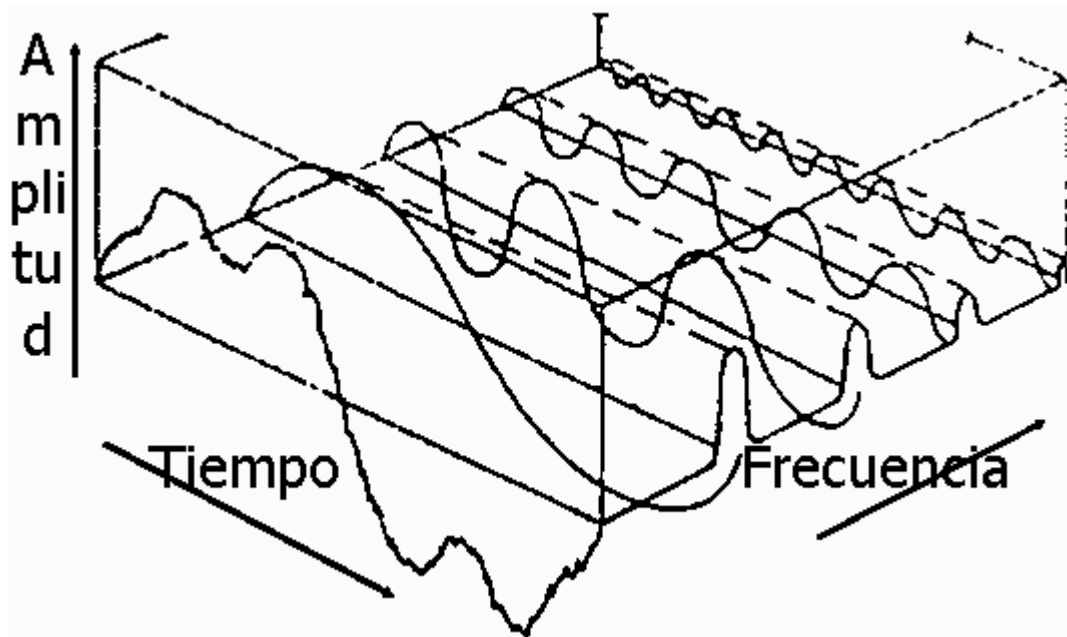


Fig.3.11. La Transformada Rápida de Fourier TRF

5. **Proceso de Traslape y promediado:** Anteriormente se explicó acerca de la superposición u overlap. Este proceso puede realizarse solamente si el tiempo necesario para calcular la TRF es más corto que la duración de la grabación en tiempo.
6. **Presentación del Espectro:** Finalmente, se presenta el espectro de vibración con la identificación de picos importantes de acuerdo a la información ingresada en el MID.

3.6.2. Objetivos:

- Capacitar al operador en el procedimiento y validación de toma de datos de vibración con los diferentes colectores.

3.6.3. Equipos de Protección Personal (EPP) y Seguridad:

- Casco
- Gafas
- Guantes
- Botas de Seguridad
- Mascarilla (de ser necesario en ambientes de polvo)

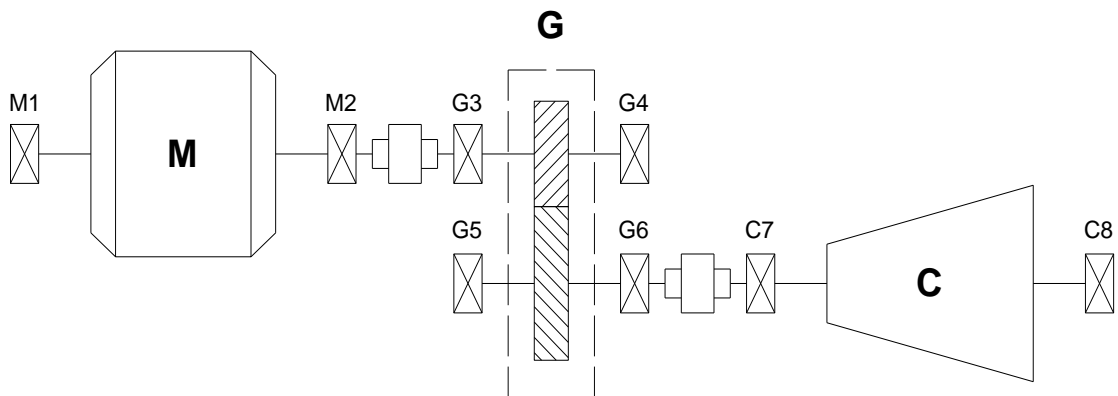
3.6.4. Equipos a Utilizar²⁵:

- Colector de Datos en tiempo real DCA-50.
- Colector-Analizador de datos en tiempo real DCX.

3.6.5. Procedimiento de toma de datos:

PASO 1 Selección del tiempo de toma de datos

Anteriormente se explicó cómo el sistema utiliza una serie de promedios (serie de datos) para obtener la información de vibración final, es decir, espectros, ondas temporales, niveles globales, demodulaciones, etc. para su posterior análisis. Dependiendo de este número de promedios, la velocidad de la máquina en la locación y la frecuencia de respuesta del colector, la toma de datos por punto de medición oscila entre 30 segundos hasta 4 minutos. Teniendo en cuenta el caso más crítico en el cual tendremos ocho locaciones en una sola máquina con la siguiente configuración:



⊗	Apoyo. Locación	RPM Real de M:	3540
— —	Elemento de transmisión de potencia	Rel. de Transmisión G:	6:1
M	Componente Motriz (Conductor)	RPM de C:	590
G	Caja de Engranajes (Gearbox)		
C	Componente Conducido		

Fig. 3.9. Configuración Crítica de Equipo para número de locaciones

²⁵ Ver especificaciones técnicas de los equipos en Anexo L

y considerando velocidades de motriz y conducido reales, se puede calcular el tiempo aproximado de toma de datos. Como se vio anteriormente, la superposición (overlap) y el número de promedios también inciden en el tiempo de toma. Para ello tenemos el siguiente cálculo, si se conoce que el tiempo de toma de datos por locación es el inverso de la resolución $R_{(Hz)}$ que se vio en la sección anterior, entonces:

$$\begin{aligned}
 Rf_{1_{10X}} &= 590Hz; & \text{Rango Bajo M1, M2, G3 y G4} \\
 Rf_{2_{10X}} &= 98,33Hz; & \text{Rango Bajo G5, G6, C7 y C8} \\
 Rf_{1_{100X}} &= 5900Hz; & \text{Rango Bajo M1, M2, G3 y G4} \\
 Rf_{2_{100X}} &= 983,33Hz; & \text{Rango Bajo G5, G6, C7 y C8} \\
 R_{1_{De\ mod}} &= 1180Hz; & \text{Rango Demod. M1, M2, G3 y G4} \\
 R_{2_{De\ mod}} &= 196,67Hz; & \text{Rango Demod. G5, G6, C7 y C8}
 \end{aligned}$$

Si el número de líneas es 800, entonces:

$$T = \frac{1}{R_{(Hz)}} = \frac{L}{Rf}; \quad (\text{e.3.5.1.})$$

$$T_{P/U} = Av \cdot Ol \cdot (T_{10X} + T_{100X} + T_{De\ mod}) \quad (\text{e.3.5.2.})$$

Donde, $T_{P/U}$: Tiempo de toma de datos por locación en Segundos

T_{Total} : Tiempo Total

Av : Número de Promedios

Ol : Porcentaje de Superposición (Overlap)

Considerando que existen dos ejes a diferentes velocidades, se agrupan las locaciones que se encuentran en el mismo eje de rotación y, por consiguiente, monitorean la misma velocidad. Entonces, para el eje M-G el tiempo para cada punto es:

$$T1_{P/U} = 6 \cdot 0,5 \cdot \left(\frac{800}{590} + \frac{800}{5900} + \frac{800}{1180} \right) = 6,508\text{seg.}$$

con un total de locaciones $Pu_1 = 4$, siendo M1, M2, G3 y G4.

Para el eje G-C:

$$T2_{P/U} = 6 \cdot 0,5 \cdot \left(\frac{800}{98,33} + \frac{800}{983,33} + \frac{800}{196,67} \right) = 39,05\text{seg.}$$

con un total de locaciones $Pu_2 = 4$, siendo G5, G6, C7 y C8

Ahora, el tiempo total de monitoreo del equipo es:

$$T_T = \sum_{i=1}^n Pu_n \cdot Tn_{P/U}; \quad (e3.5.3.)$$

$$T_T = 4 \cdot 6,058 + 4 \cdot 39,05 = 180,432 \text{seg} \approx 3 \text{min}$$

A este tiempo se lo llamará **Tiempo de Monitoreo Total del Sistema**. Existe una variable adicional crítica que influye en la toma de datos: la capacidad de procesamiento de datos y el tiempo de respuesta del colector. Al ser similares a una laptop, el equipo colector tiene un procesador determinado y, obviamente, mientras más rápido sea este, el tiempo de respuesta y procesamiento será menor. Este factor t_r puede ser medido con pruebas de campo. Creamos un equipo de prueba de un punto de medición en el sistema ExpertALERT™, p.e. un motor eléctrico, lo monitoreamos y cronometramos el tiempo real T_R que lleva el monitoreo de este equipo y se lo relaciona con el tiempo $T_{P/U}$ en la ecuación:

$$t_r = \frac{T_R}{T_{P/U}}; \quad (e.3.6.)$$

Con ello, tenemos el factor de multiplicación adicional para el tiempo total calculado, obteniendo el **Tiempo de Monitoreo en Campo** T_{MC} que se expresa de la siguiente manera:

$$T_{MC} = t_r \cdot T_T + C \text{ [min]}; \quad (e.3.7.)$$

Este tiempo es de vital importancia para la programación del trabajo de implementación de un sistema en planta. Debe recordarse adicionar los tiempos muertos entre toma C , es decir, el tiempo para el cambio de locación y colocación del sensor, así como el traslado entre máquinas. Esto dependerá de la configuración del equipo y la distribución en planta.

Al tener este tiempo, se ingresa a la ventana de **Edición de Máquina** haciendo clic derecho en el equipo deseado en el árbol. Se selecciona la pestaña **Misc** e ingresamos el **Tiempo Medida (mins)** en el recuadro de **Definición tiempo medida**. Este valor indica que todo dato ingresado

durante este tiempo será almacenado como una sola medición del equipo. Se recomienda como valor general, 15 minutos por máquina. El sistema adopta como rango mínimo entre monitoreo de un mismo equipo, el valor de 24 horas.

PASO 2 Colocación del Transductor

El acelerómetro triaxial proporcionado por DLI para la toma de datos que se indica a la derecha. La ranura de alineación asegura que el transductor esté correctamente orientado. La base para acoplamiento asegura una buena transmisión de datos de vibración hacia el transductor y asegura que el sensor siempre estará en la misma posición. El

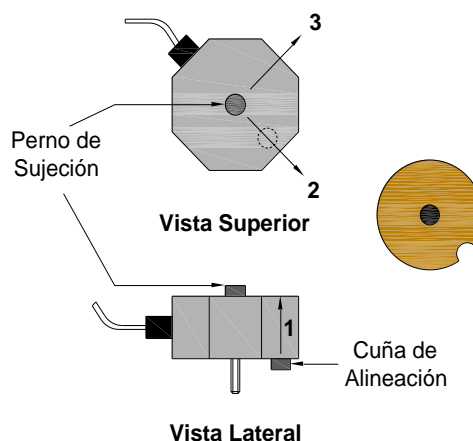



Fig. 3.10. Transductor Triaxial

transductor debe estar firmemente atornillado para evitar contaminación en la transmisión de datos. El torque recomendado para el tornillo 10-32 es de 18 lb-pulg²⁶.

PASO 3 Toma de Datos en Campo

Antes de ingresar a la planta deben recordarse las normas de seguridad y uso del EPP. Para ingresar al modo de colección de datos, debe hacer clic en el botón  en el caso del DCX o escoger la opción **Data Collection** en el menú principal del DCA-50. Aparecerá la ventana con las opciones detalladas a continuación:

²⁶ Fuente: Cullen, Terence, "DCA-50 Manual User's Manual", DLI Engineering Corporation, v.1.0., 2005.

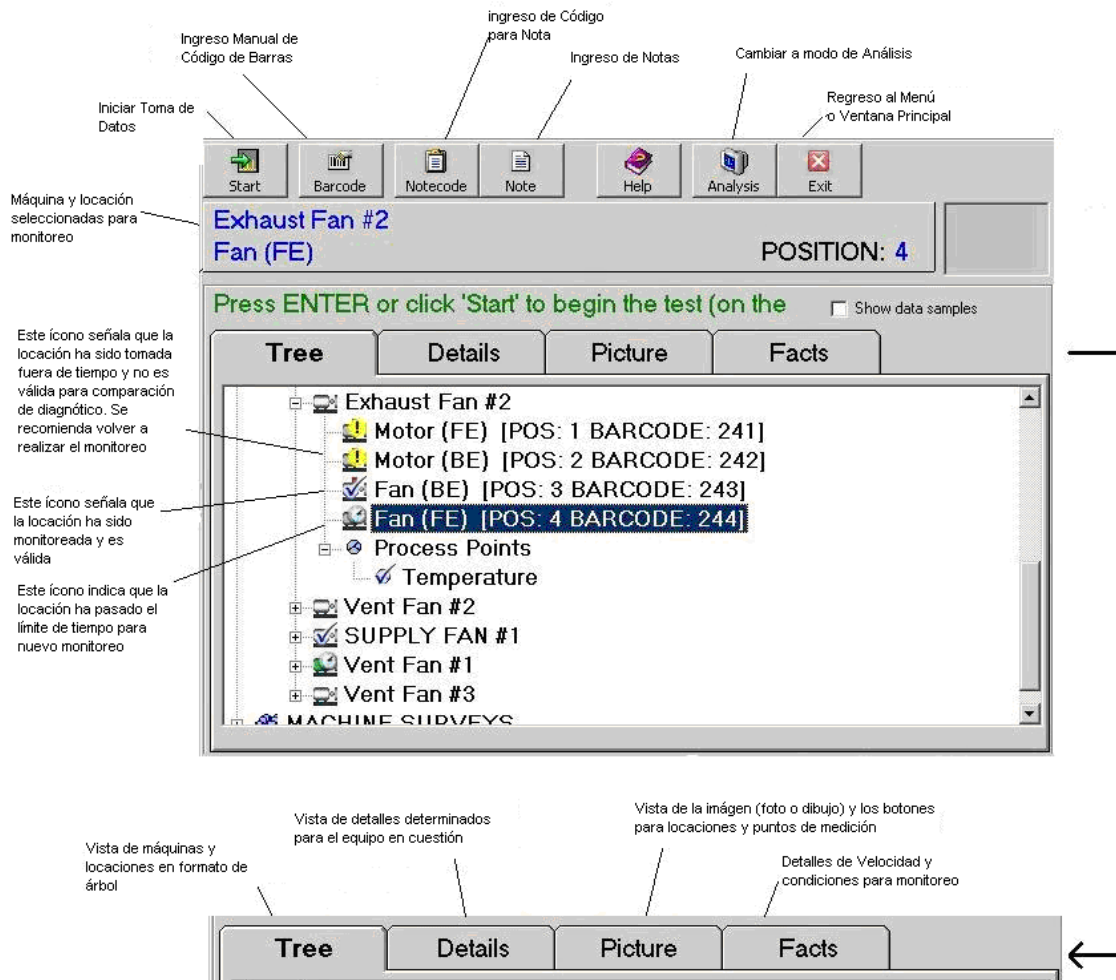
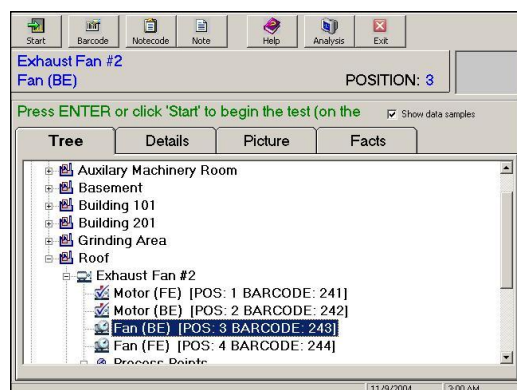


Fig. 3.11. Ventana Modo de Colección de Datos

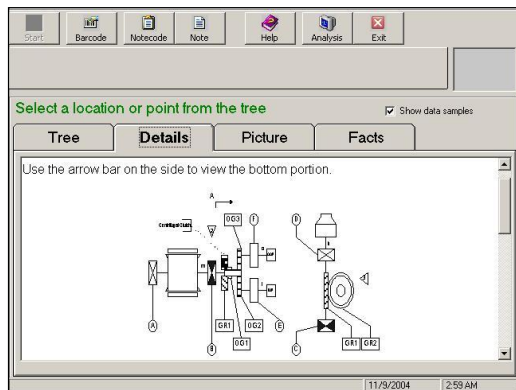
En el DCX se observará una pestaña adicional de **STATUS** en la cual se indica el estado del equipo, diagnósticos y recomendaciones después de la corrida automática del sistema ExpertALERT™.

A continuación se detalla el uso de las pestañas:

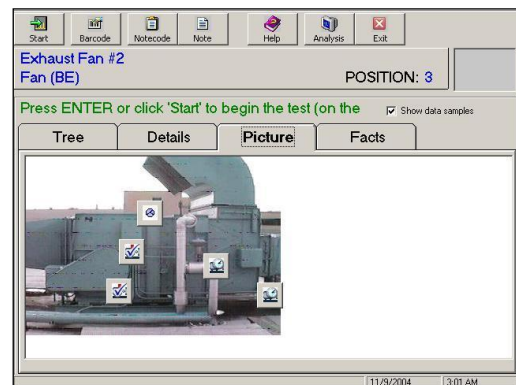
- **Pestaña Tree:** Muestra la selección de máquina y locaciones en formato de árbol. Para comenzar la toma de datos inicie desde la posición 1 en orden ascendente haciendo clic en la locación.



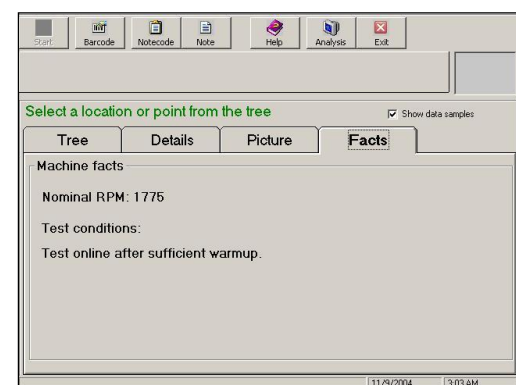
- **Pestaña Details:** Se muestra la misma información ingresada en la vista de detalle en la ventana principal del EA/DCA-50. Toda información útil acerca de la máquina puede ingresarse en este espacio.



- **Pestaña Picture:** Se muestra la imagen (foto o dibujo) de la máquina, así como los botones que indican la posición de las bases de bronce. Para ubicar los botones, haga clic derecho en el botón de acuerdo a la posición a la que corresponda y arrástrelo hasta la ubicación determinada en la imagen. Haga clic en los botones para comenzar el monitoreo automático de la locación deseada.



- **Pestaña Facts:** Muestra la velocidad normal de operación de la máquina, así como la información de condiciones para monitoreo. Esta información es útil en campo para asegurar la repetitividad de los datos.






Adicionalmente se detallan las funciones y uso de los íconos:

- **Start:** Inicia la toma de datos para la locación seleccionada. Si se realiza una toma adicional del mismo equipo dentro de las 24 horas, se desplegará el cuadro de diálogo para selección entre nueva toma o repetición de la toma anterior.

- **Barcode:** Ingreso manual del código de barras de la locación, de existir.
- **Notecode:** Mientras se realiza monitoreo en campo, pueden observarse ciertas anomalías en el proceso o funcionamiento del equipo. Los códigos de notas servirán para registrar ciertos eventos como fuga de aceite, recalentamiento de rodamientos, etc.
- **Note:** Si necesita registrar otro tipo de evento que no está codificado en la lista Notecode puede hacerlo aquí.

3.6.6. Validación de toma de datos:

Para certificar que la toma de datos ha sido correctamente realizada, se deben verificar lo siguiente:

- Al finalizar el monitoreo de cada locación, debe visualizarse el mensaje *The Test was succesfull. Enter Next Location*. Con ello se certifica que los datos han sido correctamente almacenados y procesados por el sistema para esa locación.
- Al finalizar el monitoreo del equipo, verificar en el árbol que todas las locaciones presentan el siguiente formato:  , lo cual certifica que la máquina ha sido monitoreada correctamente. Caso contrario, al aparecer los íconos  o  , debe realizarse nuevamente el monitoreo.

3.7. ANÁLISIS DE POTENCIALES EFECTOS DE IMPACTO AMBIENTAL.

3.7.1. Análisis de los productos y químicos utilizados:

El manejo, almacenamiento y uso del adhesivo estructural Loctite™ 325 y el Activador Loctite™ 7075 se encuentran especificados en las hojas técnicas y MSDS en los Anexos I y J. Claramente se especifica que ninguno de los dos productos son dañinos para el medio ambiente.

3.7.2. Análisis de los efectos producidos por el uso de los equipos:

Como en cualquier procedimiento industrial, debe analizarse los potenciales efectos de impacto ambiental. El uso de los colectores de datos DCA-50 y DCX no emite ninguna radiación u onda que pueda afectar al usuario o al medio ambiente. Cada colector viene totalmente sellado con protección IP-67 (contra golpes, polvo y agua) y baterías de litio recargables anti-leaking.

CAPÍTULO 4

PROCEDIMIENTOS PARA DIAGNÓSTICO DE MÁQUINAS

4.1. PROCEDIMIENTOS IBCA DE ANÁLISIS E INSPECCIÓN VISUAL DE ESPECTROS DE VIBRACIÓN

4.1.1. PROCEDIMIENTO DE NORMALIZACIÓN DE LOS ESPECTROS

El primer paso antes del análisis e inspección visual de los espectros es su normalización por ordenadas. Usualmente, los espectros son expresados en Hertzios o en RPM. Para facilitar su análisis, se utilizan las ordenadas o múltiplos de la velocidad de giro de la máquina; 1X es la primera ordenada, 2X la segunda, etc. En un espectro normalizado, todos los armónicos de 1X están en la misma ubicación sin importar la velocidad. Con ello puede compararse espectros de la misma máquina tomados en instantes diferentes donde ha existido una pequeña variación de RPM. Al observar el espectro **no normalizado por orden** en la figura 4.1., podemos notar que algunos picos están ubicados a la misma distancia pero se hace difícil identificar el armónico de la flecha cerca de 20000 RPM o, como lo expresa el sistema, CPM (ciclos por minuto):

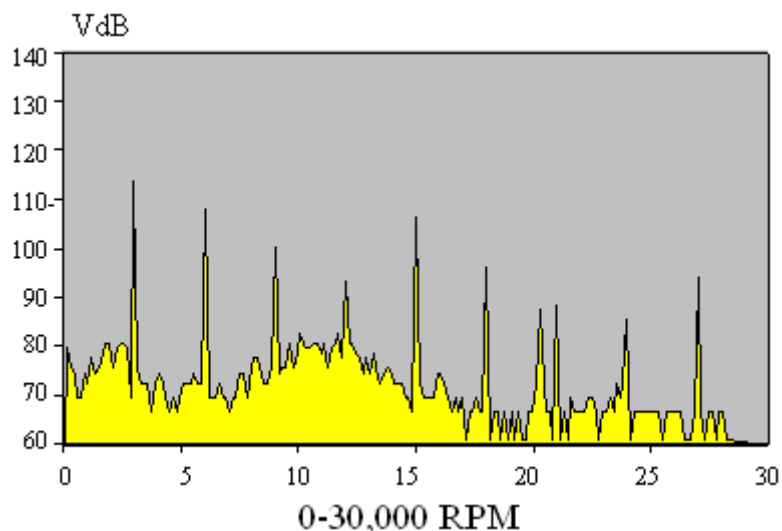


Fig. 4.1. Espectro no normalizado por orden

En la figura 4.2. se observa el espectro anterior normalizado por orden, donde se identifican claramente los armónicos. Los picos notorios restantes son conocidos como **no sincrónicos**:

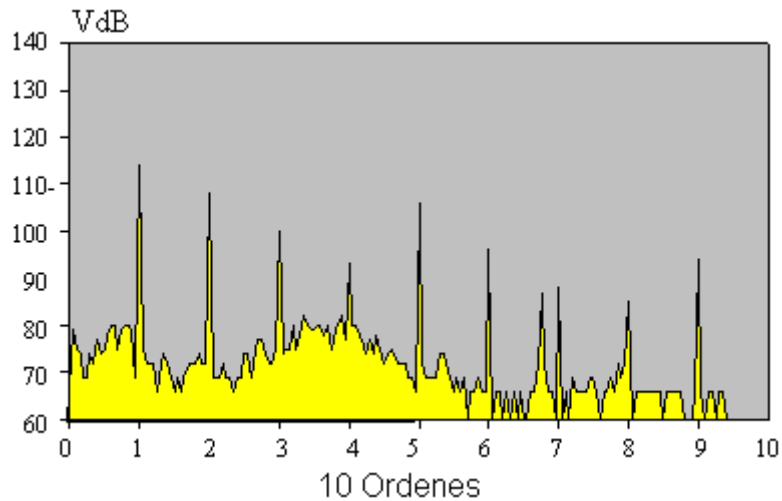


Fig. 4.2. Espectro normalizado por orden

La normalización de espectros por orden tiene las siguientes ventajas:

- La velocidad de rotación fundamental se puede reconocer al instante en el orden 1.00X
- Los armónicos de la velocidad de rotación serán enteros.
- Una segunda flecha en una máquina activada por engranes tendrá un orden igual a la relación de transmisión (salida / entrada) de los engranes.
- Las frecuencias de excitación tales como relación de transmisión de engranajes y paso de álabes en bomba se pueden ser reconocidas fácilmente, puesto que su orden es igual al número de elementos.
- Los tonos de rodamientos serán no enteros, muchas veces serán los componentes principales no síncronos.
- Las bandas laterales alrededor de los tonos de rodamiento se podrán reconocer fácilmente porque estarán en el orden de tono ± 1 , ± 2 etc. dependiendo de la velocidad de la flecha en ese punto.
- Puesto que un equipo casi nunca estará a exactamente la misma velocidad de la máquina entre tomas, el 1X no estará a la misma frecuencia y por consiguiente, los datos no pueden ser añadidos a la base de datos promedio. Al normalizar el espectro, se cumple con uno de los requerimiento para selección de datos para promediado.

Para normalizar un espectro en el EA, primero se debe reconocer el 1X por inspección visual. En la figura 4.3. se muestra el espectro no normalizado de un equipo con 1215 RPM de velocidad nominal. Automáticamente, el sistema reconoce a esta velocidad como el 1,00X:

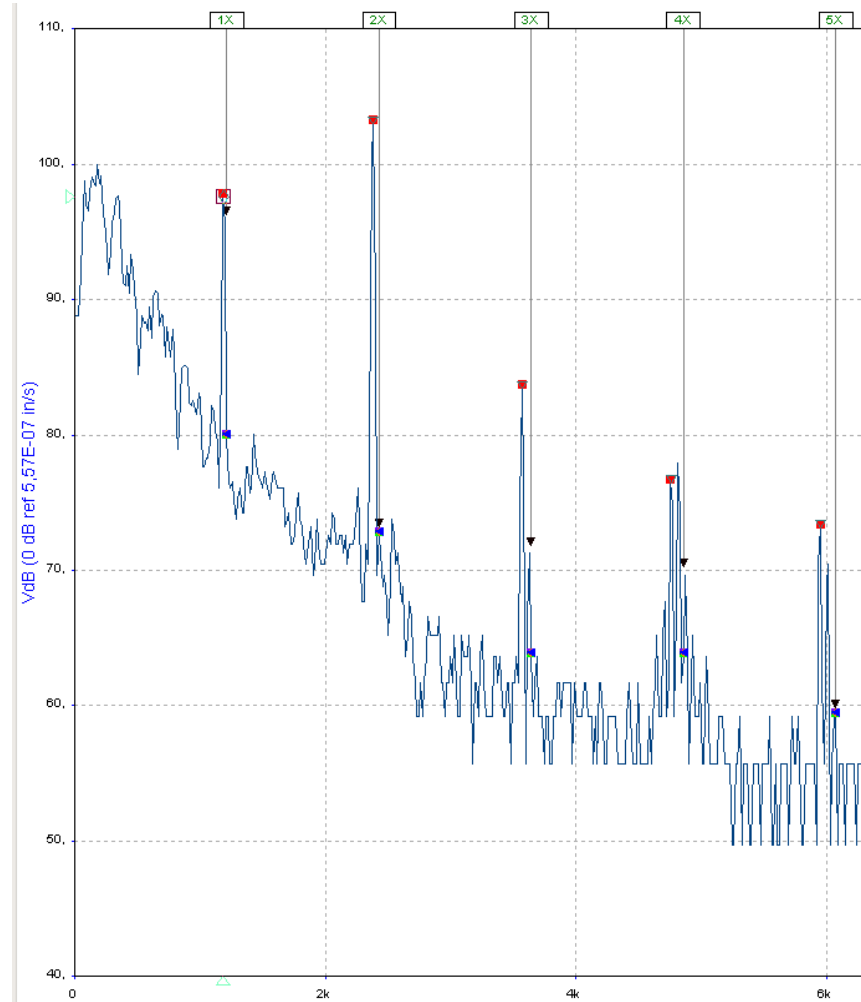


Fig. 4.3. Espectro no normalizado a 1215 RPM nominales

Los cuadros azules muestran los armónicos de la velocidad nominal, ingresada en el MID. Visualmente se puede identificar la velocidad de giro real de este equipo en el momento de la toma, que para este caso es 1189,9 RPM a 0,98X y cuyos armónicos se muestran en rojo.



Botón Definiir Velocidad

Al ubicarse sobre el pico cuya velocidad será normalizada, haga clic en el “ojo de toro” o presione **F3** y **Aceptar**. Con ello quedará normalizado el espectro como se muestra en la figura 4.4.

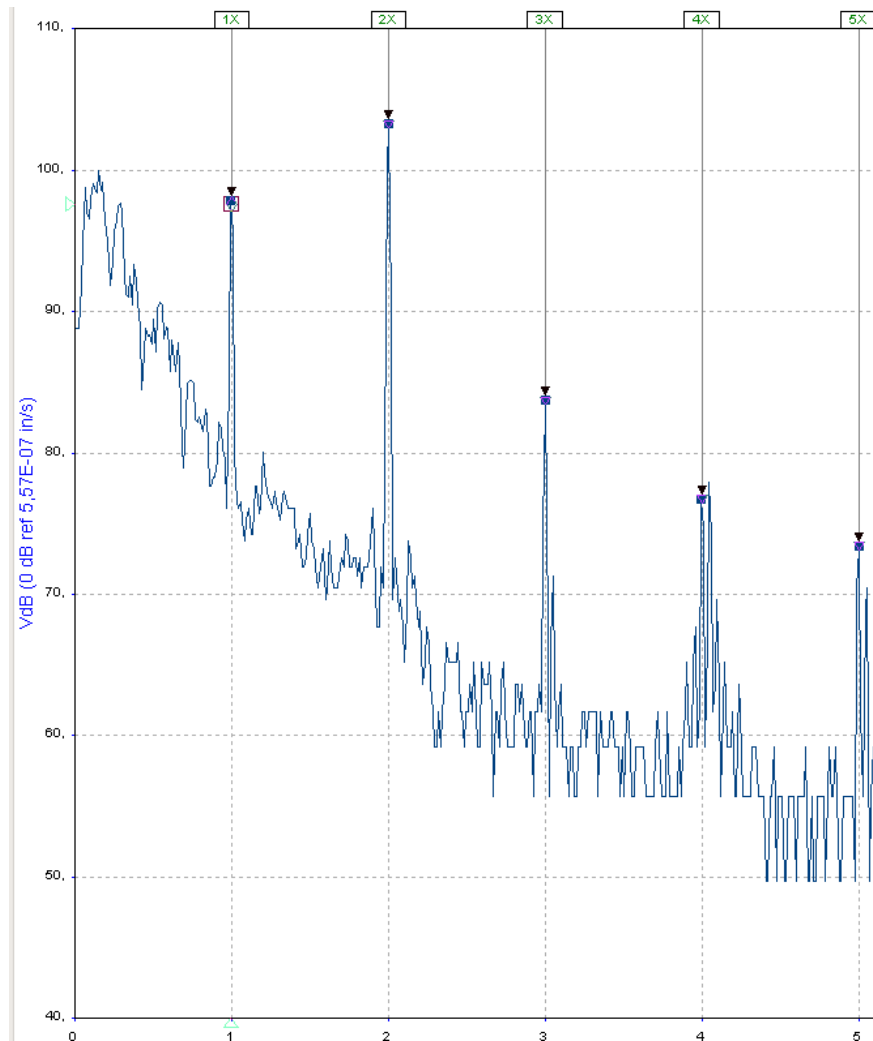


Fig. 4.3. Espectro normalizado a 1189,9 RPM de velocidad real

Las identificaciones de los armónicos del 1,00X han sido recorridas. El sistema nos muestra en la parte superior la velocidad, la ordenada, el nivel de vibración, la fecha en la que fue realizado el monitoreo y el eje correspondiente como se muestra a continuación:

PLANTA: Bainbridge Water Authority
 MAQUINA: Sludge Transfer Pump #1
 1189,9 CPM, 1,00X, 97,6 VdB, 13/01/2004 16:52 Radial

Con ello, se comprueba que el espectro ha sido correctamente normalizado a la velocidad de giro real.

4.1.2. MÁQUINAS CON MÚLTIPLES FLECHAS:

De acuerdo a la información ingresada al VTAG, debe identificarse el pico de 1XM (1X del motriz), con una variación de hasta un 4% de la velocidad nominal ingresada en el MID. De existir elementos de transmisión de potencia como poleas y bandas, cajas de engranajes, cadenas y

catalinas, que son usados para reducción o incremento de la velocidad inicial del motriz, es lógico encontrar componentes no síncronos o subsíncronos que corresponderán a la frecuencia de giro de componentes conducidos. Si se ha ingresado correctamente los datos de relación de transmisión en el MID, el ExpertALERT automáticamente identifica las frecuencias de giro de las flechas adicionales. Caso contrario, se puede realizar el cálculo para encontrar la frecuencia de giro de los ejes conducidos; p.e. una máquina con la siguiente configuración: Motor (1750 RPM) – Reductor (i=3,5:1) – Bomba. Para encontrar la frecuencia de giro del eje de la bomba, realizamos lo siguiente:


$$1XP(RPM) = \frac{1XM}{i} = \frac{1750}{3,5} = 500RPM$$

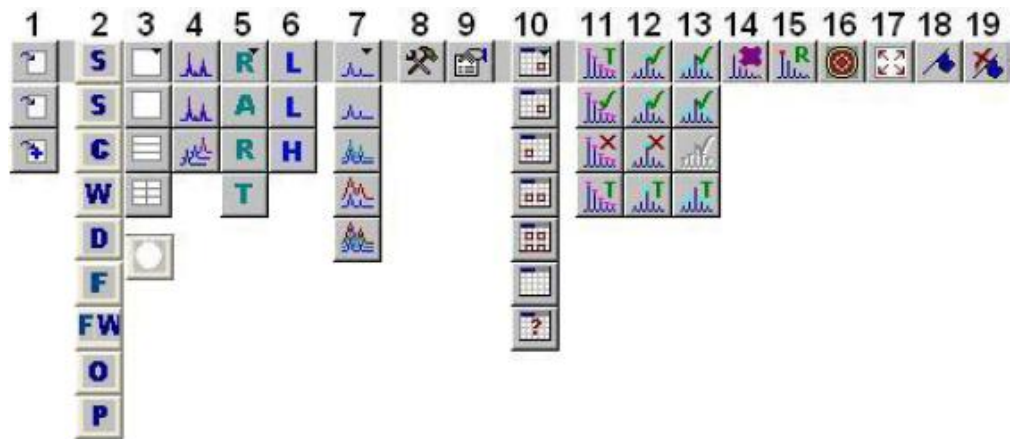
$$1XP(ordena) = \frac{1XP}{1XM} = \frac{500}{1750} = 0,29X$$

Con ello identificamos el pico 1XP que será un componente subsíncrono a 0,29X de la velocidad de giro del motor.

4.1.3. HERRAMIENTAS PARA EL ANÁLISIS VISUAL:

Para el análisis de vibración de la maquinaria el EA nos provee de múltiples herramientas para comparación, resumen, visualización e ingreso de datos adicionales. A continuación se citan las más importantes:

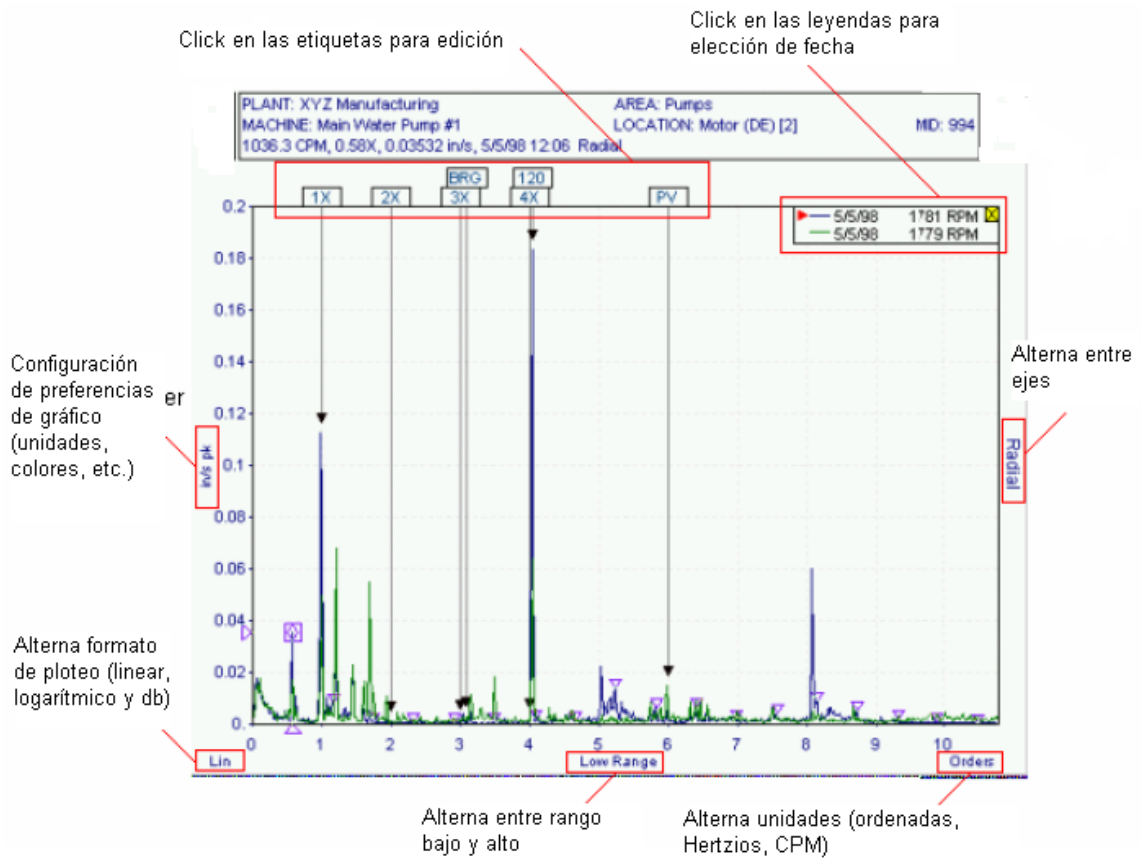
- **Base de Datos de Rodamientos:** A pesar de que el EA es perfectamente capaz de realizar análisis de fallos en rodamientos sin saber las características físicas de los mismos, es deseable saber las frecuencias forzadas exactas para cada tipo de rodamiento. Para acceder a esta base, elija **Base de Datos de Rodamientos** en el menú **Herramientas**. Esta base contiene 9500 rodamientos. Adicionalmente pueden ingresarse rodamientos adicionales por el usuario.
- **Herramientas de gráfico:** Para realizar un análisis visual de los espectros debe elegir la opción  en la barra de herramientas principal. Ahora se encuentra en el modo gráfico con las siguientes opciones para el análisis:




1. **Modo Añadir o Reemplazar:** En el modo añadir, los datos seleccionados serán añadidos a los datos existentes (sobre posición de datos de diferentes fechas), mientras que el modo reemplazar, todos los datos serán reseteados antes de graficar el seleccionado.
2. **Tipo de gráfico:** Elija **S** Espectro, **C** Cepstrum, **W** Onda Temporal, Espectro de **D** Demodulación, **F** Espectro Total, **FW** Onda de espectro total, **O** datos globales, **P** datos de fase.
3. **Formato de Gráfico:** Escoja entre formato único (un eje a la vez), triaxial (tres ejes a la vez) doble triaxial (tres ejes a la vez en rango alto y bajo).
4. **Superponer / Cascada:** Alterne entre ploteado superpuesto o en cascada.
5. **Cambiar ejes:** Se activa únicamente en formato de gráfico único para alternar ejes (**R**adial, **A**xial y **T**angencial).
6. **Cambiar rango:** Alterne entre rango alto y bajo.
7. **Superponer promedio:** Elija entre mostrar promedio, mostrar datos una sigma y mostrar promedio y una sigma (dos sets de datos).
8. **Caja de herramientas de gráfico:** Puede configurar los cursores para armónicos y bandas laterales, velocidades de la máquina y del espectro, y modificar las frecuencias forzadas.

- 9. Propiedades de gráfico:** Configure colores, unidades, límites de gráfica, y otras preferencias (las opciones dependen del tipo de gráfico).
- 10. Selección por fecha:** Seleccione última medida, medida anterior, anterior + última, todos los datos y la opción para selección entre las fechas disponibles. Las fechas de medición estarán listadas. Una última opción, "sólo `promedios" removerá todos los datos dejando únicamente los datos promedio.
- 11. Marcador de armónicos:** Alterne entre los modos **off** (cruz), **on** (visto) y **rastreo** (T).
- 12. Marcador de frecuencia central:** Alterne entre los modos **off** (cruz), **on** (visto) y **rastreo** (T).
- 13. Marcador de bandas laterales:** Alterne entre los modos **on** (visto) y **rastreo** (T).
- 14. Eliminar picos seleccionados:** Esta función removerá los picos que tienen armónicos o bandas laterales marcadas. Los picos no son removidos permanentemente, únicamente para visualización. Esta opción es muy útil durante el análisis para suprimir los picos ya sometidos a inspección.
- 15. Cursor de referencia:** Ubique el cursor de referencia en la locación de su preferencia en el espectro. Opción para comparación de niveles.
- 16. Definir Velocidad:** Este botón permite la normalización del espectro de acuerdo a la locación seleccionada en el espectro.
- 17. Restaurar configuración gráfica original:** Opción usada para restaurar la escala gráfica original. Se usa particularmente cuando se ha empleado el zoom de ventana.
- 18. Marcar picos:** Esta opción deja pequeñas marcas en cada armónico o banda lateral seleccionada. Muy útil para la identificación y descarte de cualquier pico en el espectro.
- 19. Quitar marcas:** Remueve cualquiera de las marcas mencionadas anteriormente.

- **Atajos en gráfico:** Existen algunos puntos dentro de gráfico que pueden ser presionados como atajo para evitar usar algunos botones en la barra de herramientas:



- **Hoja de filtrado:** Para acceder a la hoja de filtrado debe accederse a la vista de histórico . La hoja de filtrado presenta un resumen en matriz de niveles de vibración en las frecuencias de fallo representativas, así como las excedencias para cada punto de la máquina en las tres direcciones. Esta hoja de filtrado se actualiza cada vez que se corre el EA. Es una herramienta poderosa para el análisis de vibraciones especialmente si se está iniciando en el tema ya que para un principiante puede ser confuso observar y dar algún diagnóstico en el espectro en sí. Gran parte de las reglas para el análisis experto están en base a excedencias. Adicionalmente encontramos los niveles de ruido de piso, muy importantes para el análisis de fallo en rodamientos. Para el procedimiento IBCA de análisis visual, listaremos las reglas de diagnóstico e identificación de modos de fallo, valiéndonos de las

herramientas en modo gráfico y con uso de los datos en la hoja de filtrado.

4.1.4. ANÁLISIS DE FRECUENCIA Y UNIDADES DE AMPLITUD DE VIBRACIÓN:

La razón principal para realizar un análisis de frecuencia es la fácil identificación de los componentes de una máquina, información difícil de extraer de la forma de onda. Adicionalmente, el espectro en frecuencia es un resumen del comportamiento vibratorio de un equipo, componente por componente.

El espectro de vibración puede ser analizado tanto en escala lineal como en logarítmica. En la escala lineal, obtenemos una representación en magnitud real del nivel de vibración de la maquinaria, que acentúa los componentes principales como puede ser la frecuencia de giro del eje o el paso de álabes de una bomba. La escala logarítmica se usa para acentuar componentes pequeños que pasan desapercibidos en la escala lineal, como el paso de la pista interna de un rodamiento. Las unidades de amplitud más utilizadas en análisis de vibración dependen de las frecuencias analizar, como se muestra en la figura 4.4.:

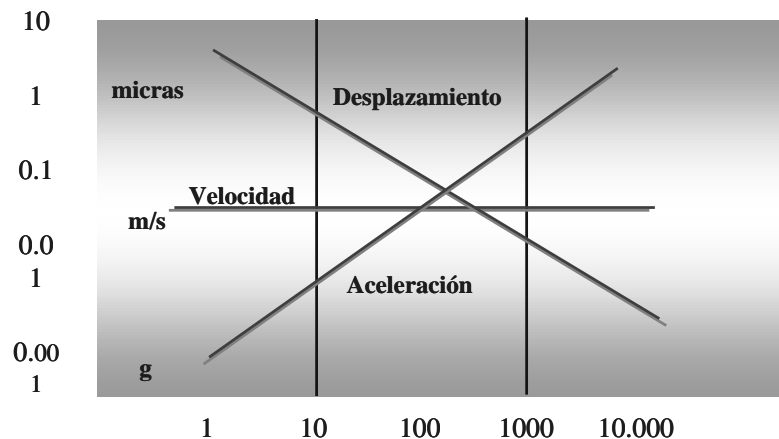


Fig. 4.4. Variación de unidades de amplitud de acuerdo a la frecuencia en Hz

- **Desplazamiento:** mm, mils, inch, μm . Acentúan las bajas frecuencias.
- **Velocidad:** mm/s, in/s. Acentúan las frecuencias medias.
- **Aceleración:** mm/s², g, mg. Acentúan las frecuencias altas.

4.1.5. EL DECIBEL:

El decibel es muy útil en análisis de vibración y medición acústica. Es una unidad logarítmica que se representa como:

$$L_{dB} = 20 \log_{10} \frac{L_1}{L_{ref}}$$

, donde: **L_{db}**: Nivel de la señal en dB

L1= Nivel de Vibración en aceleración, velocidad o desplazamiento.

Lref = Nivel de referencia, equivalente a

0 dB = 1E-5 mm/s RMS = 3,85E-7 g RMS = 7,51 mm pk-pk

Esta unidad permite la realización fácil de mediciones relativas. Un incremento de nivel de 6dB representa una duplicación de la amplitud sin tomar en cuenta el nivel inicial, como se muestra en la tabla 4.1.

Cambio en dB	Proporción de nivel lineal	Cambio en dB	Proporción de nivel lineal
0	1	30	31
3	1.4	36	60
6	2	40	100
10	3.1	50	310
12	4	60	1000
18	8	70	3100
20	10	80	10,000
24	16	100	100,000

Tabla 4.1. Relación decibel vs. escala lineal.

De la misma manera, un incremento de 20dB representa un cambio en el nivel con un factor de diez. De esta manera, una proporción constante de niveles se ve como cierta distancia en la escala, sin tomar en cuenta los niveles absolutos de las mediciones. Esto hace muy fácil la evaluación de tendencias de los datos espectrales de vibración.

4.1.6. RODAMIENTOS Y CHUMACERAS:

En base a más de 10 años de experiencia, DLI ha encontrado que, en la práctica, **menos del 10%** de los rodamientos funcionarán durante su tiempo de vida esperado (de acuerdo al fabricante), **alrededor del 40%** de los fallos en rodamientos ocurren debido a una lubricación inadecuada, un **30%** de estos fallos se deben a mal montaje, es decir, rodamiento desalineado y el restante **30%** se debe a sobrecarga y fallo en la manufactura.

Los problemas en rodamientos con elementos rodantes son los más comunes en un análisis de vibración. Un rodamiento defectuoso produce componentes **no síncronos** debido a su configuración como se muestra en la figura 4.5.

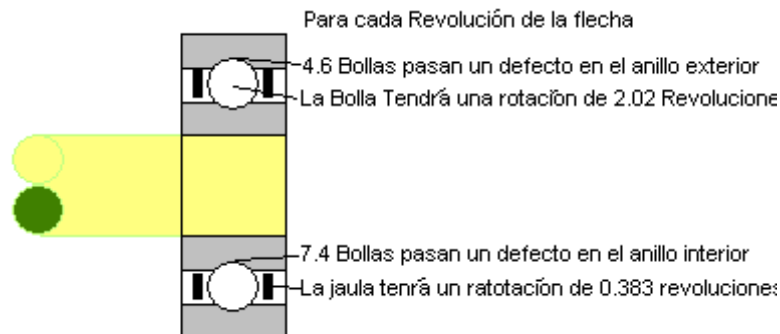


Fig. 4.5. Frecuencias de vibración de un rodamiento de bolas

Dependiendo de la pista en la que se realiza el ajuste fuerte (pista estacionaria), la amplitud de onda varía o se mantiene constante, p.e. si el ajuste fuerte es a la pista externa, la amplitud de onda fluctuará en la pista interna del rodamiento defectuoso mientras que en la externa se mantendrá constante.

A continuación se presentan fórmulas para el cálculo de las frecuencias de fallo o tonos en un rodamiento de bolas. Es importante recalcar que tienen un porcentaje de imprecisión debido a que la carga axial y el deslizamiento afectan al rodamiento de una manera impredecible:

- **Ajuste fuerte a la pista externa:**

$$BPFI = \frac{n}{2} \cdot \left(1 + \frac{B_d}{P_d} \cdot \cos \theta \right) \cdot RPM; \quad (e.4.1.1.)$$

$$BPFO = \frac{n}{2} \cdot \left(1 - \frac{B_d}{P_d} \cdot \cos \theta \right) \cdot RPM; \quad (e.4.1.2.)$$

$$BSF = \frac{P_d}{2 \cdot B_d} \cdot \left[1 - \left(\frac{B_d}{P_d} \right)^2 \cdot \cos^2 \theta \right] \cdot RPM; \quad (e.4.1.3.)$$

$$FTF = \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \frac{B_d}{P_d} \cdot \cos \theta \right) \cdot RPM; \quad (e.4.1.4.)$$

- **Ajuste fuerte a la pista interna:**

$$BPFI = \frac{n}{2} \cdot \left(1 - \frac{B_d}{P_d} \cdot \cos \theta \right) \cdot RPM; \quad (e.4.2.1.)$$

$$BPFO = \frac{n}{2} \cdot \left(1 + \frac{B_d}{P_d} \cdot \cos \theta \right) \cdot RPM; \quad (e.4.2.2.)$$

$$BSF = \frac{P_d}{2 \cdot B_d} \cdot \left(1 - \left(\frac{B_d}{P_d} \right)^2 \cdot \cos^2 \theta \right) \cdot RPM; \quad (e.4.2.3.)$$

$$FTF = \frac{1}{2} \cdot \left(1 + \frac{B_d}{P_d} \cdot \cos \theta \right) \cdot RPM; \quad (e.4.2.4.)$$

Donde: **BPFI:** Frecuencia de paso de bolas, pista interior.
BPFO: Frecuencia de paso de bolas, pista exterior.
BSF: Frecuencia de rotación de la bola.
FTF: Frecuencia fundamental del tren o canastilla.
B_d: Diámetro de la bola.
P_d: Módulo del rodamiento.
n: Número de elementos rodantes.
θ: Ángulo de contacto
RPM: Velocidad de giro del eje.

Existen algunas aproximaciones para el cálculo de tonos en rodamientos comunes:

$$BPFO = 0,4 \cdot n \cdot RPM; \quad (e.4.3.1.)$$

$$BPFI = 0,6 \cdot n \cdot RPM; \quad (e.4.3.2.)$$

$$FTF = 0,4 \cdot RPM; \quad (e.4.3.3.)$$

Normalmente, el número de elementos rodantes en un rodamiento está entre 8 y 12. Para rodamientos de aplicación en papeleras, este número puede ser mayor debido al tamaño.

4.1.6.1. Guía para el análisis de fallos en rodamientos:

- Como norma de análisis, un tono de rodamiento arriba de 80 Vdb y un ruido de piso mayor a 70 Vdb deben considerarse como indicio de desgaste.
- Localice armónicos del tono de rodamiento a la frecuencia de giro del eje de alojamiento.
- Un rodamiento defectuoso produce modulación de amplitud lo cual deriva en bandas laterales. Como regla general, las bandas se producen a la frecuencia de giro del eje de alojamiento lo cual indica desgaste en la pista donde se aplica el ajuste fuerte. En otro caso, pueden producirse a 0,4X lo cual indicaría problemas con la canastilla o picadura en las bolas.

Revise el espectro de demodulación. Es aquí donde se detecta en primera instancia las picaduras en rodamientos. Confirme con el espectro de vibración los tonos encontrados.

4.1.6.2. Tipos de fallo en Rodamientos con elementos rodantes:

- **Rodamiento desalineado:** Este fallo se produce debido al mal montaje del rodamiento.

Como se muestra en la figura 4.6. el desalineamiento afecta al eje axialmente. En el



espectro se observarán componentes 1X mayores

Fig. 4.6. Rodamiento desalineado

a 80 Vdb en la dirección axial y algo en 2X. En algunos casos pueden producirse en la dirección radial.

- **Reglas para el análisis EA:**

1X Axial > 1X Radial y Tangencial > 80Vdb

- **Holgura:** Se produce cuando existe juego excesivo entre el rodamiento y sus alojamientos. Cuando es excesivo, pueden producirse semi – órdenes.

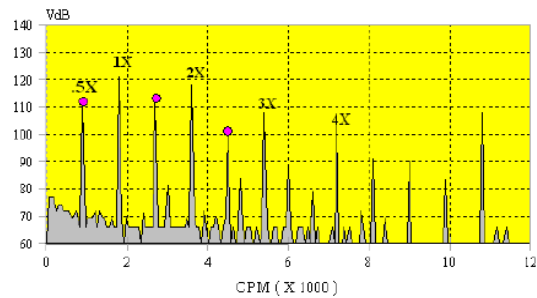


Fig. 4.7. Rodamiento desalineado

- **Reglas para el análisis EA:**

Armónicos desde 4X hasta 17X > 85Vdb en cualquier dirección

Hoja de Filtrado: Σ Excedencias Impares > 24Vdb

Σ Excedencias Pares > 18Vdb

- **Arremolinamiento y latigazo de aceite:** El arremolinamiento es causa del juego excesivo y una carga radial ligera, lo que resulta en una acumulación de la película de aceite que choca en el rodamiento a menos de la mitad de las RPM, como se muestra en la figura 4.8. El latigazo de

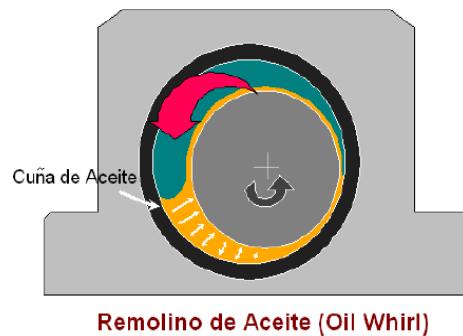


Fig. 4.8. Arremolinamiento de aceite

aceite ocurre cuando el componente de excitación por remolino de aceite llega a una frecuencia igual a la frecuencia natural de la flecha. La resonancia está excitada y el resultado son niveles de vibración muy altos. El latigazo de aceite a veces ocurre al arrancar, en máquinas con flechas largas.

- **Reglas para el análisis EA:**

Se produce a 0,5X de la frecuencia de giro del eje > 80 Vdb

- **Picaduras:** Resultados del desgaste del elementos por motivos de suciedad, mala lubricación, sobrecarga, etc. Se presentan en la pista interna, externa y los elementos rodantes.
 - **Reglas para el análisis EA:**
Pico asíncrono con armónicos. Si existen bandas laterales a la frecuencia de giro del eje de alojamiento, se evidencia desgaste en pista de ajuste fuerte (usualmente, la interna).

Hoja de Filtrado: Ruido de Piso > 70 Vdb

4.1.6.3. Progreso en Fallo de Rodamientos:

- **Etapa 1:** Presencia de tonos de rodamiento significativos; nivel mayor a 80 Vdb.

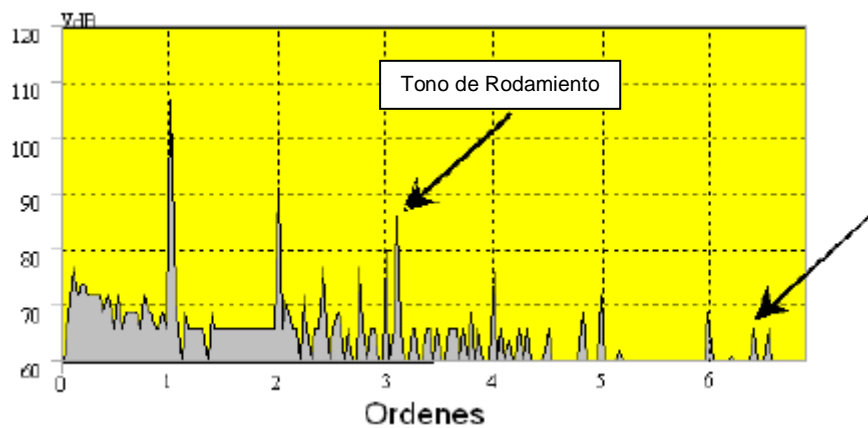


Fig. 4.9. Identificación de Tonos de Rodamiento

- **Etapa 2:** Aparición de armónicos identificables del tono de rodamiento.

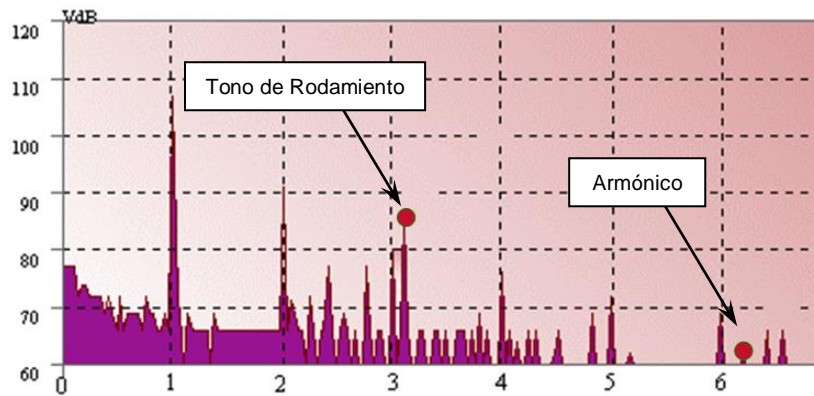


Fig. 4.10. Presencia de armónicos del tono de rodamiento

- **Etapa 3:** Incremento en nivel de vibración de las frecuencias de giro del eje, es decir, 1,00X y sus armónicos.

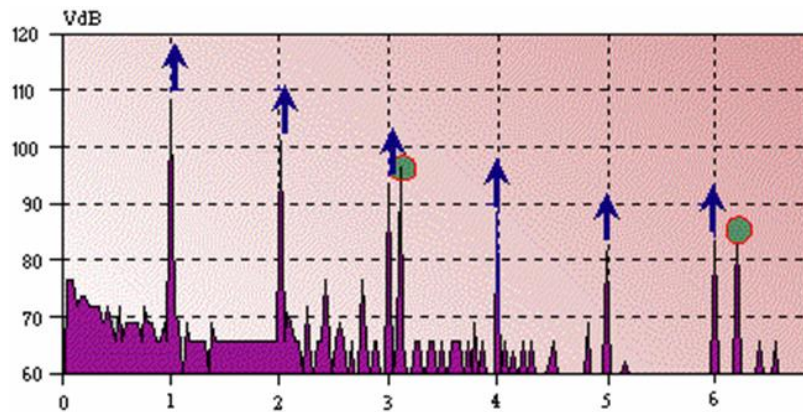


Fig. 4.10. Incremento de nivel de vibración en frecuencias síncronas

- **Etapa 4:** Aparición de bandas laterales alrededor del tono de rodamiento.

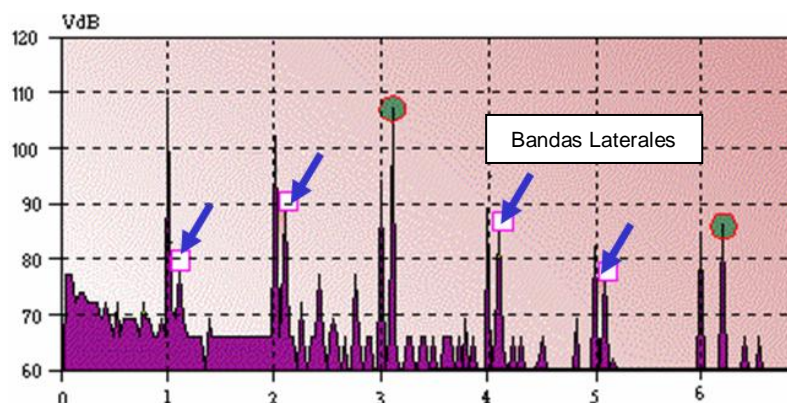


Fig. 4.12. Presencia de Bandas Laterales

- **Etapa 5:** Se agrava el fallo con la presencia de “jorobas de camello” alrededor del tono de rodamiento.

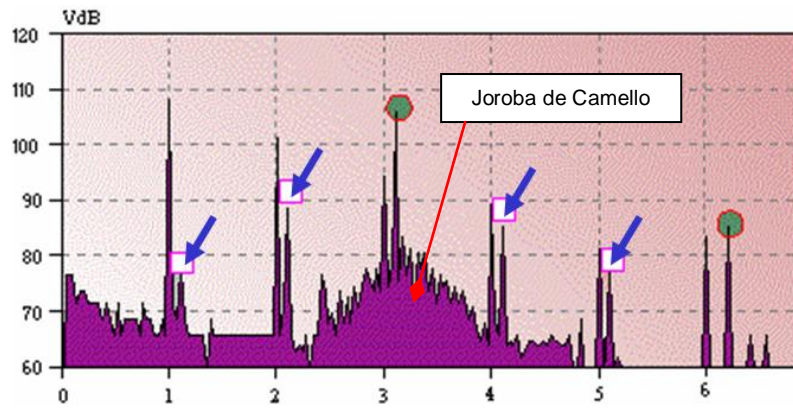


Fig. 4.13. Aparición de “Jorobas de Camello”

- **Etap 6:** Aumento de nivel de ruido de piso, sobrepasando 70Vdb.

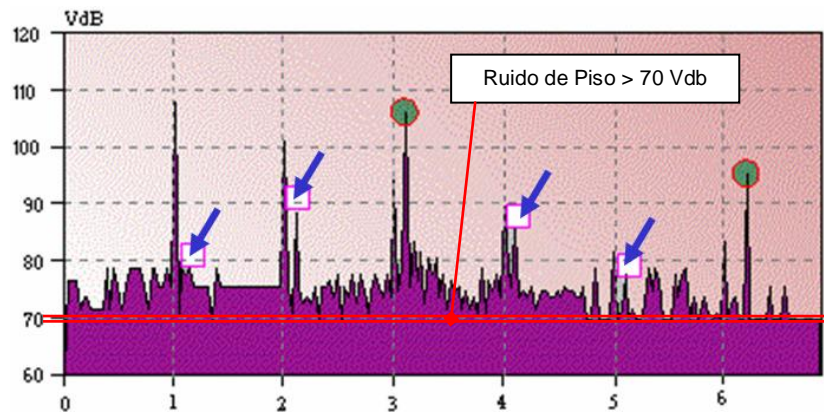


Fig. 4.14. Aumento de Ruido de Piso

- **Etap 7:** Fallo catastrófico del rodamiento. Daño al eje y destrucción del componente.

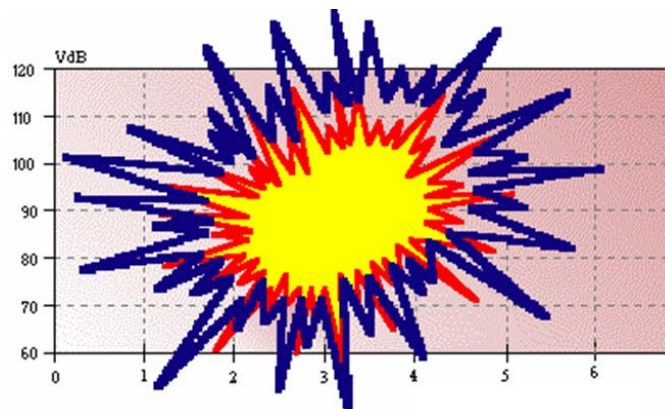


Fig. 4.15. Fallo catastrófico del rodamiento

4.1.7. DESBALANCEO:

El desbalanceo se produce con mucha frecuencia en todo tipo de maquinaria. La fuerza de desbalanceo se expresa como:

$$F = I_m \cdot r \cdot \omega^2 \quad (\text{e.4.4.})$$

, donde: **F**: Fuerza de desbalanceo

Im: Masa

r: Radio de giro.

ω : Velocidad angular de rotación

Es necesario identificar las fuentes del desbalanceo:

- Aglomeración de polvo en los rotores.
- Falta de homogeneidad en partes coladas, como burbujas, agujeros de soplado, y partes porosas.
- Excentricidad del rotor.
- Flexión de rodillos, especialmente en máquinas de papel.
- Falla en proceso.
- Distribución desigual en las barras de rotor de motores eléctricos o en el enrollado.
- Erosión y corrosión desigual de los impulsores en bombas.
- Pesos de balanceo faltantes.
- Flecha con flexión.

Existen varias condiciones de desbalanceo, de las cuales las más importantes son el desbalanceo estático y el desbalanceo de par. Si estos ocurren al mismo tiempo, este efecto se conoce como desbalanceo dinámico que es el más común en

las máquinas. El desbalanceo estático (figura 4.16) es una condición en la cual el centro de rotación de un rotor no corresponde

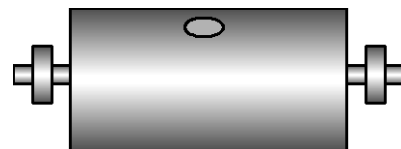
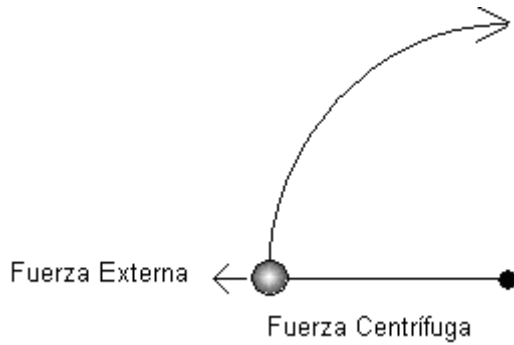


Fig. 4.16. Desbalanceo Estático

a su centro de masa, es decir, su centro de gravedad no se encuentra en el eje de rotación. Esto resulta en una fuerza centrífuga aplicada al rodamiento en la frecuencia de rotación 1X, siendo análoga a la fuerza que se aprecia cuando se gira una piedra amarrada por una cuerda.



IMPORTANTE: Esta fuerza en 1X es proporcional a la magnitud de desbalanceo multiplicada por el cuadrado de la velocidad del rotor. Con ello concluimos que las máquinas de alta velocidad necesitan un balanceo más preciso que las de baja velocidad.

El desbalanceo de par (figura 4.17.) se presenta en un rotor con dos puntos pesados a lados opuestos de la rotación. Un rotor puede parecer perfectamente balanceado

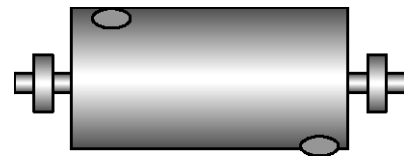


Fig. 4.17. Desbalanceo de par

estáticamente pero al ser sometido a rotación, los pesos antes mencionados producirán fuerzas centrífugas a 1X en los apoyos que estarán opuestas en fase, es decir, la flecha tiende a oscilar.

La severidad del desbalanceo depende del peso del rotor así como de las dimensiones del mismo. La siguiente tabla indica los valores de severidad para maquinaria que opera entre 1800 RPM y 3600 RPM:

1X Nivel de Vibración (in/s pk)	VdB Nivel	mm/s rms	Severidad	Necesidad de Balanceo
< 0,14	< 108	< 2,51	Desbalanceo ligero	No
0,14---0,28	109---114	2,82---5,02	Desbalanceo moderado	Deseable
0,29---0,88	115---124	5,63---15,9	Desbalanceo severo	Importante
> 0,89	> 124	> 15,9	Desbalanceo extremo	Obligatorio

Tabla 4.2.²⁷ Tabla de Niveles de Referencia y severidad de desbalanceo en máquinas de 1800 a 3600 RPM

²⁷ Fuente: Predict-DLI, "Operating the Multiplane Balance Program", DLI Engineering Corporation, 1999.

4.1.7.1. Guía para análisis de desbalanceo:

- Identifique la configuración de la máquina. Existen dos tipos de análisis de desbalanceo: para rotores en cantilever (voladizo) y para rotores en eje soportado.
- Verifique los niveles de vibración en 1X en los tres ejes en el punto más cercano al rotor o a ambos lados del rotor dependiendo de la configuración de la máquina.

4.1.7.2. Desbalanceo para rotor en cantilever:

Este modo de fallo es muy común en ventiladores, tiros inducidos o forzados y bombas centrífugas.

○ **Reglas para el análisis EA:**

Pico 1X Axial > 107 Vdb > 1X Radial o 1X Tangencial en el punto más cercano al rotor.

4.1.7.3. Desbalanceo en rotor en eje soportado:

Modo de fallo común en motores con rotor desbalanceado, rodillos, bombas centrífugas y ventiladores grandes en eje soportado.

○ **Reglas para el análisis EA:**

Pico 1X Radial y 1X Tangencial > 107 Vdb en ambos lados del eje.

4.1.8. 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 existe desalineación paralela (figura

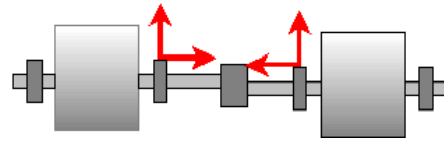


Fig. 4.18. Desalineación Paralela

4.18). Si las flechas desalineadas se juntan pero no son paralelas, se produce una desalineación angular (figura 4.19). Casi todas las desalineaciones que se observan en la práctica son una combinación de estos dos tipos.

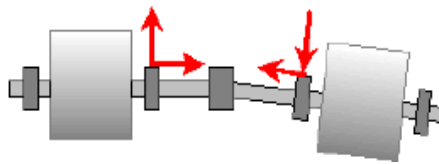


Fig. 4.18. Desalineación Angular

○ Reglas para el análisis EA:

Desalineación paralela:

$2X \text{ Radial} > 1X \text{ Radial}$ o $2X \text{ Tangencial} > 1X \text{ Tangencial}$ en cualquier lado del acople, incluyendo excedencias.

Desalineación angular:

$1X \text{ Axial} > 1X \text{ Radial}$ o $1X \text{ Tangencial}$ en ambos lados del acople, incluyendo excedencias.

4.1.9. PATA FLOJA Y FLEXIBILIDAD TRANSVERSAL:

Estos dos modos de fallo son muy comunes en maquinaria debido a defectos en anclajes y en la cimentación. Las frecuencias predominantes se encontrarán en las direcciones radial y tangencial.

○ Reglas para el análisis EA:

Pata Floja: $1X \text{ Radial} > \text{por } 6 \text{ Vdb a } 1X \text{ Tangencial}$

Flexibilidad Transversal:

$1X \text{ Radial y } 1X \text{ Tangencial} > 107 \text{ Vdb}$ y

$1X \text{ Tangencial} > \text{por } 8 \text{ Vdb a } 1X \text{ Radial}$

4.1.10. CONDUCTORES: MOTORES ELÉCTRICOS.

En general, existen dos tipos de motores eléctricos de acuerdo al tipo de corriente que emplean: de corriente alterna CA (AC) y de corriente continua CC (DC). A continuación, se detalla el análisis para detección de fallos en cada uno de este tipo de motores:

4.1.10.1. MOTORES DE CORRIENTE ALTERNA CA.

Existen dos tipos de motores eléctricos de corriente alterna: síncrono y a inducción. Cada uno de estos tipos puede usar corriente monofásica o trifásica. En aplicaciones industriales, los motores trifásicos son los

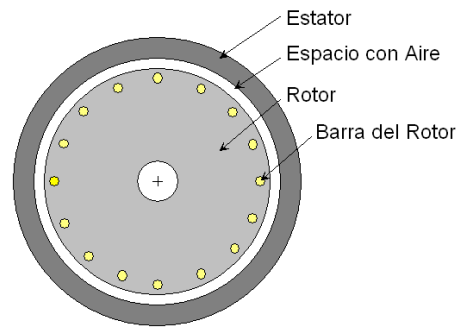


Fig. 4.18. Motor CA a Inducción

más comunes, debido a su mayor eficiencia respecto a los monofásicos. El motor a inducción es el de uso más común cuyos

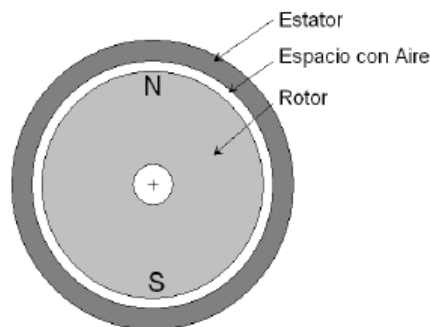


Fig. 4.19. Motor CA Síncrono

componentes se muestran en la figura 4.18. El motor síncrono que se muestra en la figura 4.19 se emplea en aplicaciones especiales, que requieren una velocidad absolutamente constante o una corrección del factor de potencia. Los motores a

inducción y los motores síncronos son similares en muchos aspectos a excepción de algunos detalles particulares. El presente trabajo se enfocará únicamente en el análisis de vibraciones en motores a inducción.

4.1.10.1.1. Guía general para el análisis de fallos en motores CA a inducción:

- Identificar en el espectro el pico correspondiente al doble de la frecuencia de línea, comúnmente el de 120 Hz. Dependiendo de la velocidad del motor, este puede encontrarse cerca del

2X (3600 RPM o 60Hz) o del 4X (1800 RPM o 30Hz). Con ello se rastrea modos de fallo por deslaminación y desbalanceo de fases.

- Identificar el pico correspondiente a las barras del rotor. Es un componente síncrono. Este pico servirá para el análisis de fallo por agrietamiento, calentamiento o rotura de las barras del rotor.
- Identifique fallos en rodamientos, de acuerdo a las reglas expuestas en el punto 4.1.6.
- Realice el análisis de los espectros de acuerdo a las reglas para los modos de fallo listados en el siguiente punto

4.1.10.1.2. Tipos de Fallo en Motores CA a inducción:

- **Desbalanceo de fases y deslaminación:** El rotor y el estator de los motores CA están hechos de láminas delgadas aisladas unas de otras. Esto impide que las corrientes inducidas magnéticamente circulen en el hierro y provoquen calentamiento. Si se produce un deslaminamiento esto deriva en un cortocircuito el cual, en algunos lugares, se producirá un calentamiento local que deriva en una distorsión termal. Si existe problemas en alguna de las fases, esto produce una descompensación de corriente que deriva en un desbalanceo. En ambos casos, la frecuencia a analizar se encuentra a 120 Hz.

- **Reglas para el análisis EA:**

Desbalanceo de Fases:

Pico 120 Hz > 80Vdb en cualquier dirección

Deslaminación:

Pico 120 Hz > 80Vdb con armónicos en cualquier dirección

- **Problemas en Barras del Rotor:** Uno de los principales problemas en motores eléctricos de gran tamaño es el agrietamiento, calentamiento y rotura de barras de rotor. La

condición de arranque somete a la tensión más alta a las barras del rotor, puesto que el rotor corre a una velocidad mucho mas baja que la velocidad síncrona. Las corrientes altas producen el calentamiento y la expansión de las barras con relación al rotor y, debido a las diferencias en la resistencia eléctrica de las barras individuales, el calentamiento y la expansión no serán uniformes, lo que deriva en un agrietamiento de las juntas, donde las barras están soldadas al anillo de cortocircuito. Al presentarse una grieta, se incrementará la resistencia de la barra, el calor y el fallo se agravará. Al mismo tiempo, las barras del rotor vecinas recibirán un incremento de corriente para compensar la corriente reducida en la barra rota. En los espectros de vibración se identifica el pico de barras de motor como un componente síncrono elevado en rango alto en la dirección Radial con bandas laterales a 120 Hz.

- **Reglas para el análisis EA:**

Pico de barras de motor > 80 Vdb con armónicos y presencia de familias conformadas por bandas laterales

- **Eje pandeado:** Se produce debido a un calentamiento desigual del rotor, debido a una distribución de corriente desigual por una barra del rotor desalineada. La flexión del rotor resulta en una condición de desbalanceo en eje soportado. Para comprobar si existe este tipo de fallo debe realizarse una prueba cuando el motor está frío. Si desaparece el fallo, entonces se tiene problemas de eje pandeado.

- **Reglas para el análisis EA:**

Regla EA para desbalanceo en eje soportado (4.1.7.3) + 2X Axial prominente

- **Desbalanceo del rotor:** Se produce cuando existen problemas de excentricidad o desgaste de resina. Es un modo de fallo muy

común en motores sometidos a trabajo intermitente y a alta carga, y se analiza con reglas para rotores en eje soportado.

- **Reglas para el análisis EA:**

Regla EA para desbalanceo en eje soportado (4.1.7.3)

4.1.10.2. MOTORES DE CORRIENTE CONTINUA CC:

El problema más común en motores CC es causa de malformaciones o picaduras en los segmentos de los conmutadores o un contacto incorrecto entre los cepillos con el conmutador. La frecuencia de fallo estará a la frecuencia de paso de segmentos, lo que equivale al número de segmentos del conmutador multiplicado por las RPM. Los sistemas de control de velocidad electrónicos para motores CC grandes por lo general usan controles rectificadores de silicón, SCR (Silicone Control Rectifier) para convertir la corriente trifásica en corriente directa. La interferencia eléctrica que producen estos elementos se evidencia en armónicos más altos que la frecuencia de línea de CA, especialmente a 360 Hz correspondiente a 6 veces la frecuencia de línea de 60 Hz. Cuando estos componentes se introducen en los enrollados del motor, causarán vibraciones a esas frecuencias. Si el pico en 360 Hz en el espectro de vibración se incrementa de manera significativa, las causas más probables son enrollamientos con circuitos abiertos, holgura en conexiones eléctricas o el SCR funcionando de manera incorrecta.

- **Reglas para el análisis EA:**

Pico de 360 Hz > 80 Vdb con armónicos

4.1.11. ELEMENTOS DE UNIÓN:

4.1.11.1. ACOPLES:

El acople posee elementos internos sometidos a esfuerzos y, por consiguiente, a desgaste. El número de elementos en un acople oscila entre 3 y 6. Es importante ingresar este tipo de información en el VTAG para rastreo e identificación de la frecuencia de fallo del acople. Si las caras de las bridas no son paralelas, se produce una

vibración similar a la desalineación angular. Los acoplamientos de motor de tres mordazas contienen espaciadores. Al no tener la longitud correcta, estos elementos causarán fuertes componentes axiales a 3 veces la velocidad de giro del eje de acoplamiento.

- **Reglas para el análisis EA:**

$3X > 2X > 1X$ en cualquier dirección

3X Axial alto

4.1.11.2. POLEAS Y BANDAS:

La transmisión de potencia por medio de poleas y bandas es de bajo costo pero está sometida a varios problemas si no se realiza un montaje preciso y correcto. Actualmente se utilizan tecnologías láser para la alineación de poleas y tensionadores osciloscópicos de bandas que garantizan el montaje y la correcta operación de estos elementos. La frecuencia fundamental de la banda BR (belt rotation) es un componente subsíncrono. Los modos de fallo para estos elementos se listan a continuación:

- **Tensión incorrecta de la banda:** Existen dos posibles fallos por mal tensionamiento: baja tensión, que acelera el desgaste en la banda y produce latigazo y sobretensión, que produce cargas excesivas en los rodamientos. En ambos casos, la frecuencia BR se obtiene de:

$$BR(RPM) = \frac{\pi \cdot D_p \cdot RPM}{B_L} \quad (e.4.5.)$$

, donde:

- BR:** Frecuencia de rotación de banda (RPM)
- D_p:** Diámetro de la polea
- RPM:** Velocidad de giro de la polea
- B_L:** Longitud de Banda

- **Reglas para el análisis EA:**

BR a partir del tercer armónico alta > 80 Vdb

- **Excentricidad en poleas:** Las poleas excéntricas generarán fuertes componentes radiales 1x, especialmente en la dirección paralela a las bandas. Esta situación es muy común y simula un desbalanceo. Una vibración 1x de una polea excéntrica o de una polea con movimiento excéntrico generalmente se manifestará en la otra polea.

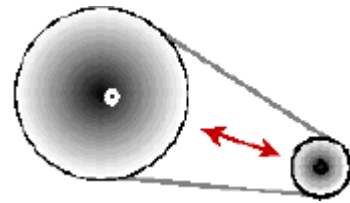


Fig. 4.22. Polea Excéntrica

- **Reglas para el análisis EA:**

Picos > 107 Vdb del conducido reflejados en el motriz y viceversa, especialmente en la dirección paralela a la de la banda.

- **Desalineación en poleas:** La desalineación de poleas (figura 4.23.) generará fuertes componentes axiales 1x y armónicos axiales de la frecuencia fundamental de la banda.

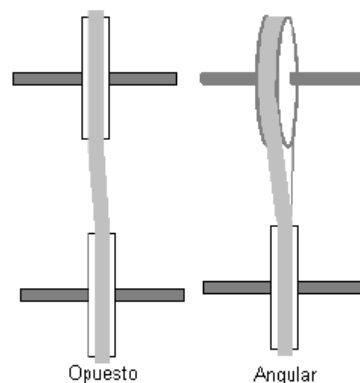


Fig. 4.23. Poleas desalineadas

- **Reglas para el análisis EA:**

Desbalanceo en Cantilever (4.1.7.2) + BR Axial alta

4.1.12. CONDUCIDOS:

4.1.12.1. CAJAS DE ENGRANAJES:

Las cajas de engranajes nuevas presentan niveles de vibración altos e incluso frecuencias “fantasmas” producidas por defectos de fabricación de los engranes. A medida que se produce el asentamiento del equipo, el nivel disminuirá. De aquí en adelante, cualquier incremento en las frecuencias de engranaje será indicio de desgaste. La frecuencia de engranaje corresponde al número de dientes, p.e. si sabemos que una caja de una etapa tiene un piñón de 21 dientes, entonces la frecuencia de engranaje G1 se encuentra en 21X. El tipo de diente influye en el nivel de vibración. Los engranes rectos son los más ruidosos, seguidos por engranes cónicos, engranes hipoides, engranes helicoidales, engranes doble helicoides, y engranes helicoidales sin fin en orden descendiente de nivel de vibración.

El desgaste en los dientes de resultará en componentes de frecuencia elevada del engranaje y esto será modulado por las RPM del engrane. La modulación causa bandas laterales a distancia de 1x (figura 4.24.) alrededor del engranaje en caso de que el daño se encuentre en el piñón de entrada o bandas laterales a la frecuencia de giro del eje de salida en caso de que el daño sea en la rueda, así como la presencia de armónicos del engranaje. En el caso de tener cajas de múltiples etapas, cada par de engranajes producirá una frecuencia de engranaje diferente (G1, G2, G3,... etc.).

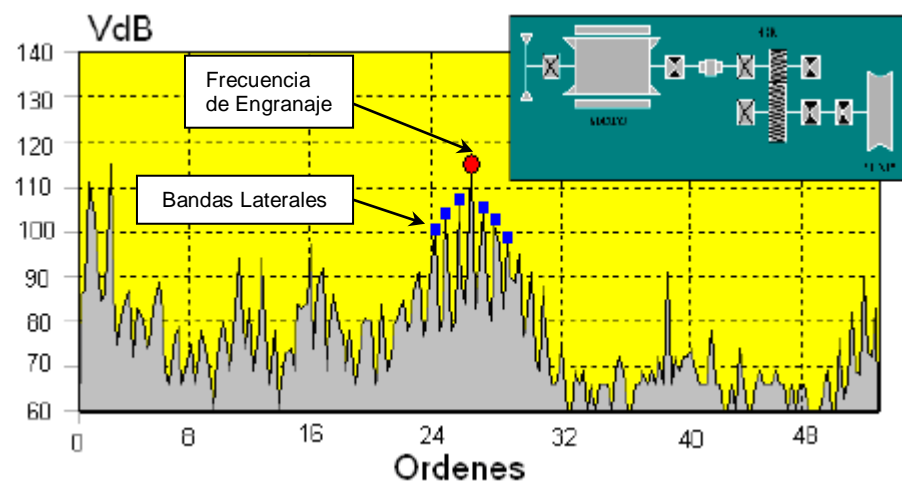


Fig. 4.24. Bandas laterales alrededor de la frecuencia de engrane

Otro modo de fallo para estos componentes es los engranajes excéntricos. En este caso también se producirá una modulación de amplitud pero únicamente con una banda lateral a cada lado de la frecuencia de engranaje, a diferencia del caso anterior en el que se producían múltiples bandas laterales.

Las cajas de engranajes utilizan rodamientos. El procedimiento de análisis será el mismo explicado anteriormente.

4.1.12.1.1. Guía general para el análisis en cajas de engranajes:

- Ubique la frecuencia de engranaje de acuerdo a los datos ingresados en el VTAG y en el MID.
- En caso de cajas con múltiples etapas, ubique la frecuencia de engrane de cada etapa utilizando el engranaje motriz como base.
- Verifique la existencia de bandas laterales. Dependiendo de la distancia de las bandas, puede existir un problema con el piñón o la rueda.
- Realice el análisis correspondiente para modos de fallo en rodamientos de acuerdo al procedimiento del punto 4.1.6.

○ **Reglas para el análisis EA:**

Desgaste en dientes:

Pico de Frecuencia de Engranajes > 80 Vdb con **bandas laterales múltiples** a la frecuencia de giro del eje de acoplamiento.

Engranajes excéntricos:

Pico de Frecuencia de Engranajes > 80 Vdb con **una banda lateral** a cada lado de la frecuencia de engranaje.

4.1.12.2. BOMBAS CENTRÍFUGAS:

Existen varios tipos de bombas y para cada tipo existe una firma de vibración diferente. Cuando se está monitoreando la vibración en bombas, es importante que las condiciones de operación sean idénticas de una operación a la siguiente, para asegurar la repetitividad de los datos. La presión de succión, la presión de descarga y especialmente la inducción de aire y la cavitación afectarán la firma de vibración.

Las bombas centrífugas presentan un componente de vibración importante en la frecuencia de paso de álabes PV (Pump Vanes). Este es un componente síncrono igual al número de álabes del impeler. Un incremento en la amplitud puede significar daño en álabes, desbalanceo o presencia de suciedad. Otro problema muy común en bombas centrífugas es la cavitación, que puede ser identificada en el espectro en los puntos de la bomba con la forma de una “joroba de camello” (figura 4.25.). Al igual que en anteriores componentes, el análisis en rodamientos se hará de acuerdo al procedimientos explicado anteriormente. Existen dos tipos de bombas centrífugas: impeler en cantilever e impeler en eje soportado. Las reglas de desbalanceo en este caso son exactamente las mismas que las expuestas en el punto 4.1.7.

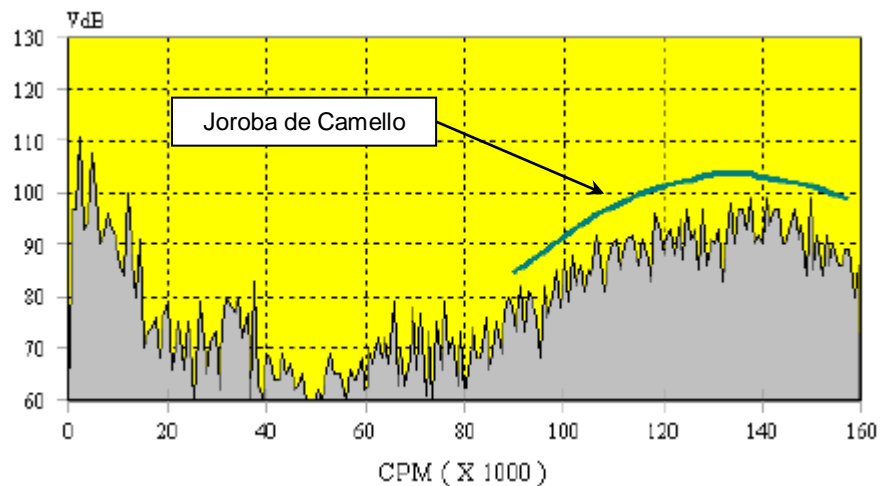


Fig. 4.25. Cavitación en bombas centrífugas.

○ **Reglas para el análisis EA:**

Desbalanceo en impeler:

Reglas EA 4.1.7.2 para impeler en cantilever y 4.1.7.3 para impeler en eje soportado.

Paso de álabes:

Frecuencia de paso de álabes PV > 107 Vdb con bandas laterales a frecuencia de giro.

Cavitación:

Presencia de “jorobas de camello” en puntos de medición de la bomba.

4.1.12.3. COMPRESORES DE TORNILLO:

Los compresores de tornillo presentan varios modos de fallo significativos. Al igual que en las bombas, es importante que las condiciones de operación sean idénticas entre monitoreos. Siempre es recomendable tomar el compresor en carga. En algunos compresores existen engranajes de distribución antes de los tornillos, p.e. en los modelos Ingersol Rand. Puede identificarse este modo de fallo como frecuencia de engranaje de distribución TG (Timing Gear Mesh)

Los principales modos de fallo en un compresor de tornillo son:

- **Desgaste en lóbulos:** Las sobrecargas y fallas en los procesos afectan directamente a los lóbulos de los tornillos, cuya frecuencia de fallo corresponde al número de lóbulos del tornillo multiplicado por la frecuencia de giro del eje 1XC (1X del compresor). En el EA, esta frecuencia es conocida como paso de lóbulos del compresor CT (compressor threads rate). Al igual que en un sistema de engranajes, el desgaste de los lóbulos produce modulación de amplitud, resultante en bandas laterales.

- **Reglas para el análisis EA:**
Pico CT > 80 Vdb en los puntos del compresor con bandas laterales a la frecuencia de giro del eje de acoplamiento del compresor.
- **Holguras internas del compresor:** El excesivo desgaste de los lóbulos produce holguras entre los tornillos que se transmite directamente a los apoyos.
 - **Reglas para el análisis EA:**
Reglas para holgura EA 4.1.6.2. en frecuencia de giro del compresor.
- **Problemas en engranajes de distribución:** Al igual que en una caja de engranes, este sistema presenta fallos por desgaste de dientes y excentricidad de engranes en la frecuencia de engranaje de distribución, TG.
 - **Reglas para el análisis EA:**
Reglas de análisis en engranajes EA 4.1.12.1 en frecuencia TG
- **Desgaste en rodamientos:**
 - **Reglas para el análisis EA:**
Reglas de análisis para rodamientos EA 4.1.6.

4.1.12.4. VENTILADORES:

El análisis de vibraciones en ventiladores se simplifica en tres puntos fundamentales:

- **Paso de Álabes:** Corresponde al número de álabes multiplicado por la frecuencia de giro del eje de acoplamiento del ventilador. La frecuencia de paso de álabes del ventilador se identifica en el EA como FB (Fan Blades). Un incremento en el nivel de vibración significa un posible roce de los álabes del ventilador con la carcasa o presencia de suciedad en el interior.

- **Reglas para el análisis EA:**

Frecuencia de paso de álabes $FB > 107 Vdb$ con bandas laterales a frecuencia de giro.

- **Desbalanceo del rotor:** Modo de fallo muy común en ventiladores.

- **Reglas para el análisis EA:**

Reglas EA 4.1.7.2 para rotor en cantilever y **4.1.7.3** para rotor en eje soportado a frecuencia de giro del eje de acoplamiento del ventilador.

- **Problemas en chumaceras:** El desbalanceo prolongado es causante de holguras en las chumaceras del eje de acoplamiento del rotor, así como desgaste en rodamientos.

- **Reglas para el análisis EA:**

Reglas de análisis para rodamientos EA 4.1.6.

4.2. TABLAS DE RESÚMENES DE DIAGNÓSTICO:

Las siguientes tablas exponen un resumen general para el análisis e inspección visual de espectros de vibración de acuerdo a los modos de fallo expuestos anteriormente.

Nº	Modo de Fallo	Regla de Análisis EA	Plano predominante	Comentarios
----	---------------	----------------------	--------------------	-------------

Rodamientos y Chumaceras

1	Rodamiento desalineado	1X Axial > 1X Radial y Tangencial > 80Vdb	Axial	Producido por el mal montaje de los rodamientos.
2	Holgura	Armónicos desde 4X hasta 17X > 85Vdb en cualquier dirección	Todos	Causa de desbalanceos prolongados.
3	Arremolinamiento y latigazo de aceite	Se produce a 0,5X de la frecuencia de giro del eje > 80 Vdb	Radial	Producto de la holgura.
4	Picaduras	Pico asíncrono con armónicos. Si existen bandas laterales a la frecuencia de giro del eje de alojamiento, se evidencia desgaste en pista de ajuste fuerte.	Radial	El pico asíncrono debe identificarse en el espectro como BRG (Rolling Element).

Desbalanceo

5	Rotor en cantilever	Pico 1X Axial > 107 Vdb > 1X Radial o 1X Tangencial	Axial	Se analiza a frecuencia de giro del eje de acoplamiento del rotor en el punto más cercano a este.
6	Rotor en eje soportado	Pico 1X Radial y 1X Tangencial > 107 Vdb en ambos lados del eje	Radial y Tangencial	Siempre comprobar cumplimiento de regla en ambos lados del eje.

Desalineación

7	Angular	1X Axial > 1X Radial o 1X Tangencial	Axial	Comprobar los dos lados del acople.
8	Paralela	2X Radial > 1X Radial o 2X Tangencial > 1X Tangencial, incluyendo excendencias	Radial y Tangencial	Puede producirse en cualquier lado del acople.

Cimentación y Anclajes

9	Pata Floja	1X Radial > por 6 Vdb a 1X Tangencial	Radial	Causa de desgaste o torque incorrecto en pernos de anclaje.
10	Flexibilidad Transversal	1X Radial y 1X Tangencial > 107 Vdb y 1X Tangencial > por 8 Vdb a 1X Radial	Tangencial	Causa de mala cimentación.

Motores de Corriente Alterna CA

11	Desbalanceo de Fases	Pico 120 Hz > 80Vdb en cualquier dirección	Todos	Descompensación de corriente debido a distorsión termal.
12	Deslaminación	Pico 120 Hz > 80Vdb con armónicos en cualquier dirección	Todos	Desprendimiento de láminas que produce cortocircuitos.
13	Problemas en barras de rotor	Pico de barras de motor > 80 Vdb con armónicos y presencia de familias conformadas por bandas laterales	Radial	Producto del agrietamiento, calentamiento y rotura de barras.
14	Eje pandeado	Regla EA 6 + 2X Axial Prominente	Todos	Producto del calentamiento desigual del rotor.
15	Desbalanceo del rotor	Regla EA 6	Radial y Tangencial	Fallo común en motores sometidos a altas cargas y arranques fuertes.

Motores de Corriente Continua CC

16	Problemas con el SCR	Pico de 360 Hz > 80 Vdb con armónicos	Todos	El SCR produce grandes interferencias eléctricas.
----	-----------------------------	---------------------------------------	-------	---

Acoples

17	Acople desalineado	Regla EA 7	Axial	Se produce cuando las caras de las bridas no están paralelas.
18	Desgaste en elementos del acople	3X alto > 2X >1X en cualquier dirección	Todos	La frecuencia de fallo depende del número de elementos.

Poleas y Bandas

19	Tensión incorrecta de la banda	BR a partir del tercer armónico alta > 80 Vdb	Radial	La falta de tensión acelera el desgaste de la banda mientras que la sobretensión afecta a los rodamientos.
20	Excentricidad en poleas	Picos > 107 Vdb del conducido reflejados en el motriz y viceversa	Radial	Simula una condición de desbalanceo.
21	Desalineación en poleas	Regla EA 5 + BR Axial Alta	Axial	Identificable a simple vista como "cabeceo" u oscilación de las poleas.

Cajas de Engranajes

22	Desgaste en dientes	Pico de Frecuencia de Engranajes > 80 Vdb con bandas laterales múltiples a la frecuencia de giro del eje de acoplamiento	Radial y Axial	Dependiendo de la distancia de las bandas laterales, el problema puede ser en el piñón o en la rueda.
23	Engranajes excéntricos	Pico de Frecuencia de Engranajes > 80 Vdb con una banda lateral a cada lado de la frecuencia de engranaje.	Radial	Producido por defectos de maquinado.

Bombas Centrífugas

24	Desbalanceo en Impeler	Reglas EA 5 y 6, dependiendo de la configuración de la bomba	Todos	Fallo común en bombas centrífugas.
----	-------------------------------	--	-------	------------------------------------

25	Paso de álabes	Frecuencia de paso de álabes PV > 107 Vdb con bandas laterales a frecuencia de giro.	Radial	El rozamiento de los álabes en la carcasa o en elementos extraños produce modulación de amplitud.
26	Cavitación	Presencia de "Jorobas de camello"	Radial	Produce amplitud fluctuante.

Compresores de Tornillo

27	Desgaste en lóbulos	Pico CT > 80 Vdb en los puntos del compresor con bandas laterales a la frecuencia de giro	Radial	Producto de sobrecargas y fallas de proceso.
28	Holguras internas	Regla EA 2 a frecuencia de giro del eje del compresor	Todos	Producto del desgaste excesivo de los lóbulos.
29	Problemas en engranajes de distribución	Reglas EA 22 y 23 en frecuencia TG	Radial y Axial	

Ventiladores

25	Paso de álabes	Frecuencia de paso de álabes FB > 107 Vdb con bandas laterales a frecuencia de giro.	Radial	El rozamiento de los álabes en la carcasa o en elementos extraños produce modulación de amplitud.
26	Desbalanceo del rotor	Reglas EA 5 y 6, dependiendo de la configuración del ventilador	Todos	Fallo común en ventiladores.

4.3. ESTIMACIÓN DE NIVELES DE SEVERIDAD DE LA CONDICIÓN DE LA MAQUINARIA:

4.3.1. NORMAS Y ESTÁNDARES DE VIBRACIÓN:

Ya identificados los posibles modos de fallos existentes en un equipo en particular, se debe determinar la severidad de fallo para con ello programar el mantenimiento, reduciéndolo todo a la pregunta clave del mantenimiento: ¿Se interviene el equipo o no se lo interviene?

Para ello, hay que valerse de normas y estándares para más adelante crear espectros de referencia que conformarán nuestra línea base a partir de la cual se derivarán los distintos niveles de severidad. Hay una infinidad de normas para evaluación de la severidad vibratoria; a continuación las más usadas:

- **Norma ISO 2372: Mechanical vibration for machines with operating speeds from 10 to 200 rev/s. Basis for specifying evaluation standards²⁸.**

En este estándar las máquinas se clasifican según la potencia, el tipo de montaje y su uso en un rango de operación de 10 a 200 rev/s, en un rango de vibración de 10 a 1000 Hz:

- **Clase I:** Máquinas pequeñas con potencia < 15 KW.
- **Clase II:** Máquinas medianas $15 \text{ KW} < P \leq 75 \text{ KW}$, o máquinas con montaje rígido hasta 300 KW.
- **Clase III:** Máquinas grandes $P > 300 \text{ KW}$ montadas en soportes rígidos.
- **Clase IV:** Máquinas grandes $P > 300 \text{ KW}$ montadas en soportes flexibles.
- **Clase V:** Máquinas y sistemas conductores con fuerzas de inercia desbalanceadas (debido al movimiento recíproco de alguno de sus elementos), montadas en fundaciones relativamente rígidas en la dirección de la medición de la vibración.

²⁸ Fuente: Saavedra, P., Estupiñán E., "Evaluación de la severidad vibratoria", Universidad de Concepción, Laboratorio de Vibraciones mecánicas, 2002.

- **Clase VI:** Máquinas con fuerzas de inercia desbalanceadas, montadas en fundaciones relativamente elásticas en la dirección de la medición de la vibración, tales como harneros vibratorios, máquinas centrífugas, molinos, etc.

La tabla 4.3 es apropiada para máquinas de clase I a IV en la mayoría de aplicaciones de acuerdo a la experiencia. Las máquinas clase V y VI son difíciles de clasificar debido a su constante variación de la condición vibratoria.

Rango de Velocidad Efectiva (mm/s RMS)	Tipo de Máquina			
	Clase I	Clase II	Clase III	Clase IV
0,18 - 0,28	A	A	A	A
0,28 - 0,45				
0,45 - 0,71				
0,71 - 1,12	B	B	B	B
1,12 - 1,8				
1,8 - 2,8	C	C	C	C
2,8 - 4,5				
4,5 - 7,1	D	D	D	D
7,1 - 11,2				
11,2 - 18				
18 - 28				

Tabla 4.3. Rangos de severidad vibratoria para máquinas normales.

- **Norma MIL-STD-167-1 y MIL-STD-167-2²⁹:**

Estas normas que datan de 1974 son un intento de proporcionar un nivel de vibración límite, como función de la frecuencia para pruebas de aceptación de maquinaria rotativa. La MIL-STD-167-1 (figura 4.26.) cubre la vibración excitada internamente en toda clase de maquinaria rotativa con la excepción de maquinaria recíproca y la MIL-STD-167-2 cubre la maquinaria recíproca, sistemas de propulsión y flechas. Se han usado por muchos años y se consideran como pasadas. Se basan en un espectro de

²⁹ <http://www.dliengineering.com/vibman-spanish/milstd1671ymilstd1672.htm>

desplazamiento (mils pk) que es equivalente a una velocidad constante de 0,125 inch/s (107 VdB) arriba de 1200 RPM. Esas normas siguen siendo usadas como una referencia aproximada para niveles aceptables de vibración para máquinas sencillas, de tamaño medio, como motores de bombas eléctricas, pero no se deben usar como una norma absoluta.

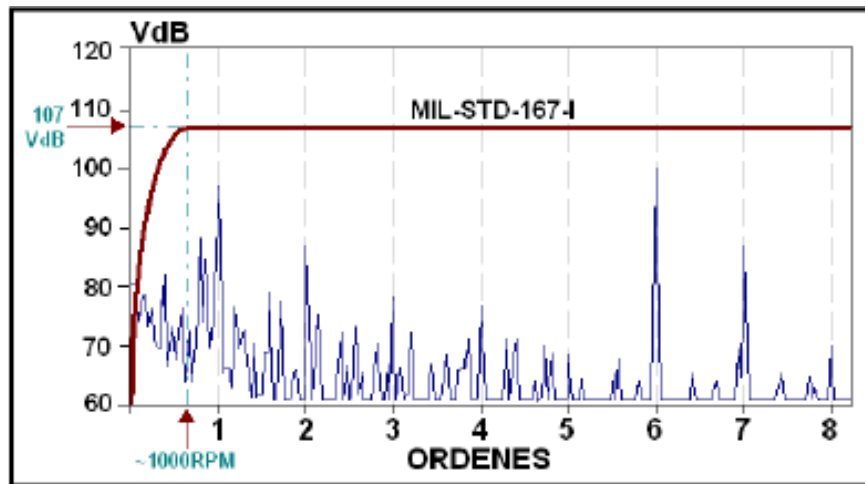


Fig.4.26. Norma MIL-STD-167-1

- **Normas comerciales: Tabla DLI de gravedad de vibración en maquinaria³⁰.**

La tabla 4.4 e aplicable a un gran número de máquinas rotativas con una confianza razonable. Es producto de una destilación de datos de un rango importante de maquinaria industrial y se considera que está más al día y más útil que las normas mencionadas anteriormente. En los anexos³¹ se detalla más profundamente esta norma en la cual se basa DLI para clasificar las máquinas por nivel de severidad.

³⁰ <http://www.dliengineering.com/vibman-spanish/normascomercialestablalidegravedaddevibracinenmaquinaria.htm>

³¹ Ver Anexo M.

Nivel de Vibración	< 30 Hz	30 Hz ~ 1000 Hz	> 1000 Hz
Extremo	10 mils p-p	125 VdB rms	11,2 G rms
Excesivo	4,2 mils p-p	117 VdB rms	4,46 G rms
Tolerable	1,5 mils p-p	108 VdB rms	1,58 G rms
Aceptable	0,6 mils p-p	100 VdB rms	0,630 G rms

Tabla 4.4. Tabla DLI de gravedad de vibración en maquinaria.

La figura 4.27 representa gráficamente los valores de la tabla 4.4:

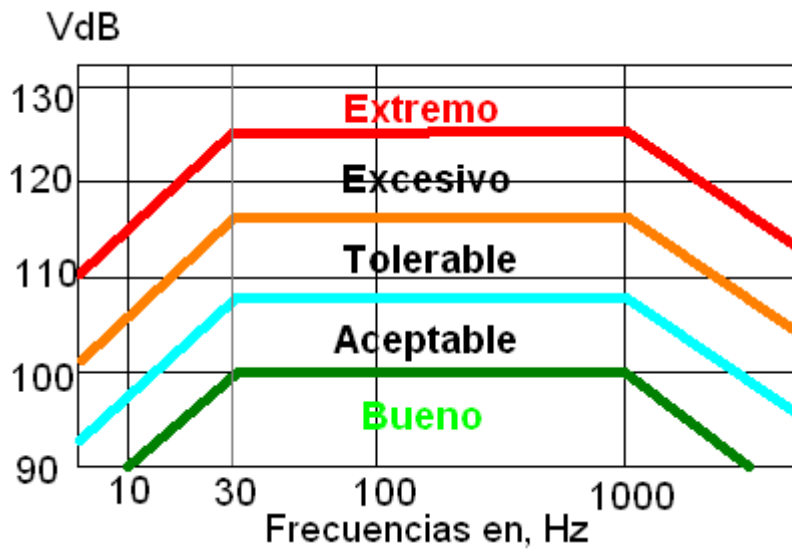


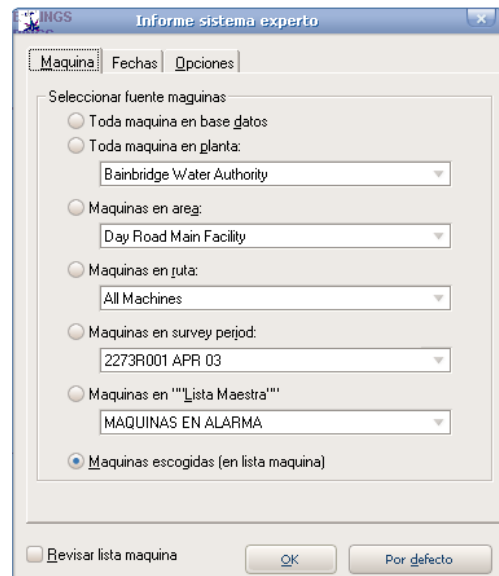
Fig. 4.27. Gráfica DLI de gravedad de vibración en maquinaria.

4.4. CORRIDA DEL SISTEMA ExpertALERT™ Y GENERACIÓN DE REPORTE.

Culminado el proceso de análisis e inspección visual, los espectros están validados para ser analizados a través del sistema experto.

4.4.1. CORRIDA AUTOMÁTICA DEL SISTEMA ExpertALERT™

En el menú de selección se selecciona **Experto – Ejecutar Experto** o simplemente se presiona la tecla CTRL + E. Se desplegará el cuadro de diálogo que se muestra a la derecha en el cual podemos realizar la selección de las plantas, áreas, grupos de máquinas o un equipo escogido a ser analizadas por el sistema experto. Adicionalmente tenemos opciones para selección entre fechas y opciones para normalización. Se recomienda que en



esta última pestaña se seleccione la opción *Usar velocidades mostradas en gráficas* que indicará al sistema que los datos serán procesados de acuerdo a la velocidad (1,00X) seleccionada en los espectros.

El sistema EA presenta cuatro plataformas principales para el análisis y visualización de los elementos de la base de datos de la planta:



Vista Detalle

Detalles Generales que incluyen condiciones y rangos de operación, información del fabricante.



Vista Lista

Vista rápida del estado de las máquinas con opción para orden por fecha, condición y nombre.



Vista Histórico

Visualización del reporte experto con notas y resultados del análisis.



Vista Gráfico

Vista de espectros, ondas temporales, demodulaciones, etc. en varios formatos.

4.4.2. GENERACIÓN DE REPORTES EXPERTOS.

4.4.2.1. El Reporte Experto (EA).

El siguiente es un ejemplo de reporte experto, cuyos elementos serán explicados a continuación:

Rodamientos BPI: Molino de esmaltes 1

Informe generado en: 30/10/01 03:11 p.m.

Adquirido: 04/07/00 09:40 a.m. 1xM = 890 RPM 1xN = 164 RPM Promedios: 1

Numero de Merito = 380.

Nivel maximo: 112 (+11) VdB en 30,7xM en 3A en alto rango

RECOMENDACIONES:

IMPORTANTE: CAMBIAR RODAMIENTO LADO CONDUCTOR

DESEABLE: VIGILAR RODAMIENTO MOTOR LADO LIBRE POR AUMENTO DE VIBRACION

DIAGNOSTICOS:

SERIO DESGASTE RODAMIENTO HUSILLO LADO ENTRADA

112 (+11) VdB en 167xN en 3A en alto rango
99 (+5) VdB en 167xN en 3R en alto rango
97 (+2) VdB en 83.5xN en 3T en alto rango
94 (+4) VdB en 88.9xN en 3T en alto rango
99 (+12) VdB en 41.4xN en 3R en bajo rango
88 (+19) VdB en 46.9xN en 3R en bajo rango
105 (+15) VdB en 25.2xN en 3T en bajo rango
105 (+14) VdB en 41.4xN en 3T en bajo rango
77 (+1) VdB ruido fondo en 3A en alto rango
69 (+2) VdB ruido fondo en 3R en alto rango
71 (+3) VdB ruido fondo en 3T en alto rango

MODERADO DESGASTE RODAMIENTO HUSILLO LADO SALIDA

96 (+4) VdB en 89xN en 4T en alto rango
109 (+17) VdB en 41.4xN en 4A en bajo rango
98 (+12) VdB en 41.4xN en 4R en bajo rango
107 (+10) VdB en 41.4xN en 4T en bajo rango
68 (+2) VdB ruido fondo en 4T en alto rango

MODERADO DESGASTE RODAMIENTO MOTOR LADO LIBRE

95 (+27) VdB en 7.63xM en 1A en bajo rango
96 (+26) VdB en 7.63xM en 1R en bajo rango
95 (+3) VdB en 2.91xM en 1T en bajo rango
92 (+7) VdB en 2.81xM en 1T en bajo rango
85 (+23) VdB en 23xM en 1R en alto rango

LIGERO DESGASTE RODAMIENTO MOTOR LADO CONDUCTIVO

96 (+29) VdB en 7.62xM en 2A en bajo rango
88 (+30) VdB en 7.62xM en 2R en bajo rango

- **Número de Mérito:** Representación a escala de la condición de la maquinaria en comparación con tomas anteriores o con datos de maquinas idénticas. No existe una directa correlación entre esta escala y la escala de severidad.
- **Nivel Máximo:** El valor en amplitud máximo de vibración encontrado al evaluar cada punto en todas las direcciones.

- **Recomendaciones:** Acciones recomendadas para reparación e intervención de la maquinaria en base a los fallos encontrados y su nivel de severidad.
- **Diagnósticos:** Resumen de fallos encontrados a través del sistema experto de diagnóstico automático EADS (Expert Automated Diagnostic System) y su severidad.

Para cada equipo y para cada fecha de toma de datos se generará un reporte experto. A partir de los datos mostrados en este informe y después de realizado un análisis e inspección visual, se procede con la validación de espectros para conformación de la línea base.

4.4.2.2. Generación de Reportes Profesionales.

El EA emplea un generador de reportes profesionales llamado *Cristal Reports*. DLI ha creado una serie de reportes que pueden ser utilizados de inmediato o modificados de acuerdo a las necesidades del usuario. A continuación se describen una serie de reportes previamente creados, cuyo contenido varía de acuerdo al usuario ya que puede elegir un reporte de toda la planta, área o un equipo en particular.

Los reportes han sido divididos en dos grupos: **Informes de Base de Datos** e **Informes de Condición de Maquinaria**. En cualquier caso, la selección de máquinas y fechas es la misma.

- **Sumario de informes de base de datos.**
 - **Reporte de código de barras (Barcode Report):** En caso de haber colocado códigos de barras en los puntos de toma de las máquinas, este reporte detalla el nombre de la máquina, del punto de toma y su orientación; el número y gráfica del código de barras y el número de posición de toma. Su mejor aplicación es la creación de un libro de

código de barras a ser usado en campo para identificación de equipos y puntos de toma.

- **Listado de fechas de toma de datos por locación (Location Date List):** Este reporte detalla las máquinas con sus locaciones y las fechas en las que han sido medidas.
- **Resumen de locaciones (Location Summary Report):** Este reporte es similar al de código de barras excepto que no contiene el número y gráfica del código de barras. Se utiliza para realizar la validación de colocación de puntos de medición en el proceso de inspección en campo.
- **Listado de maquinaria por fecha (Machine Date List):** Similar al Location Date List con la diferencia que únicamente se presentan las máquinas y las fechas en las que fueron medidas.
- **Listado de Máquinas (Machine List Report):** Se presenta un listado de máquinas, el MID correspondiente, la velocidad nominal y es estado de la misma por nivel de severidad. Se sugiere imprimir este reporte mensualmente para mantener un registro del estado general de la planta.
- **Reporte de MIDs (MID Machines Report):** Este reporte clasifica a la maquinaria por MID. Presenta la calidad y número de identificación del MID, la velocidad nominal y el número de promedios.
- **Listado de códigos de notas (Notecodes List):** Este reporte es un simple listado de las notas codificadas en el EA.

- **Reporte de punto de medición (Pick up Location Report):** Es un reporte muy útil que puede ser usado como checklist para validación de los setups de la base de datos. Presenta un listado completo de los puntos de medición y de proceso, el número de posición, MID, código de barras, promedios, la fecha de la última toma e información útil del setup para cada punto.
- **Sumario de informes de condición de maquinaria.**
 - **Resumen de condición de maquinaria (Machine Condition Summary):** Este reporte presenta un resumen de la condición de cada máquina, detallando diagnósticos, recomendaciones y la última fecha de toma de datos.
 - **Diagnósticos de fallo en maquinaria (Machine Fault Diagnosis):** Presenta únicamente el listado de diagnósticos por modo de fallo para cada máquina.
 - **Recomendaciones de reparación de maquinaria (Machine Repair Recommendation):** Presenta un listado de recomendaciones para acciones de mantenimiento en cada máquina.
 - **Reporte de auditoria de la integridad mecánica (Mechanical Integrity Audit Report):** Un reporte muy útil para mantener un registro del estado de la maquinaria en el tiempo. Despliega las recomendaciones y diagnósticos, así como el período de toma de datos asignado en un rango de fechas asignado por el usuario.
 - **Datos Globales (Overall):** Provee un listado de los datos globales de vibración por máquina y por punto de medición en los tres ejes.

- **Hojas de filtrado (Screening Sheets):** Permite generar la hoja de filtrado de máquinas seleccionadas. Es muy útil para analistas expertos.

4.4.2.3. El Reporte Customizado. Reporte modelo IBCA.

El informe customizado permite al usuario incluir la información que desee en una plantilla prediseñada. En el anexo C se encontrará un modelo de reporte customizado IBCA.

4.5. VALIDACIÓN DE ESPECTROS: PROCEDIMIENTO IBCA PARA LA SELECCIÓN DE ESPECTROS PARA LÍNEA BASE.

4.5.1. INTRODUCCIÓN.

Antes de iniciar con la selección de espectros, debe conocerse cómo el sistema ExpertALERT™ analiza los espectros de vibración para luego arrojar como resultado diagnósticos precisos del estado de una máquina. Para conocer el estado de un equipo rotativo, requiere de tres tipos de información:

1. Cuál es la fuente de vibración del equipo.
2. Cómo se presenta la firma de vibración *normal* del equipo (vibración a condiciones de operación y funcionamiento en buen estado de la máquina)
3. Cómo influyen en la firma de vibración ciertos modos de fallo de la máquina.

El EA usa tres bases de datos que corresponden a estos tipos de información:

1. Base de conocimiento de maquinaria (machine knowledge base).
2. Base de datos de promedios (average database)
3. Base de reglas para análisis espectral (spectral analysis rulebase)

Al crear la base de datos de maquinaria, la base de conocimiento se genera a partir de la completa descripción de los equipos a monitorear (creación y validación de MIDs) y la base de datos de promedios es creada a partir de mediciones de máquinas “sanas” o en perfecto estado

de operación para usarlas como base para comparación con futuras tomas. La base de reglas para análisis espectral es un programa basado en reglas lógicas que es aplicado a las mediciones con el afán de generar diagnósticos. A esta base se la conoce como *Base Experta*.

Adicionalmente, el sistema cuenta con un grupo de componentes a ser analizados:

- Máquinas con acople directo (Close – Coupled Machines).
- Ventiladores
- Turbinas
- Compresores centrífugos, reciprocantes y de tornillo
- Motores
- Transmisión por bandas o cadenas
- Transmisión por acople fluido
- Bombas centrífugas, reciprocantes, de cavidad progresiva, de gusano, de paletas deslizantes y reciprocantes.
- Purificadores
- Acoples
- Reductores de Velocidad
- Motores de Combustión Interna a Diesel
- Turbo – cargadores
- Sopladores
- Ejes o husillos

Para el caso de acoples y transmisión de potencia por cadenas o bandas, los datos de ambos lados del componente son examinados. Para reductores y acoples fluidos, los datos analizados corresponden a una, dos o más locaciones de la unidad y a las locaciones de los componentes a ambos lados de la misma.

En resumen, el procedimiento que realiza el sistema EA para arrojar resultados es el siguiente:

1. Al correr el sistema experto, el EA extrae las mediciones requeridas de la base de datos de la máquina o equipo seleccionado y la envía al sistema experto.

2. El sistema experto normaliza los espectros de acuerdo a la velocidad nominal de la máquina definida.
3. Cuando han sido normalizados, cada espectro es comparado con el espectro promedio de referencia. Cada MID tiene un espectro de referencia para cada locación, eje y rango.
4. En este punto, el sistema experto genera una tabla con todos los niveles de vibración en las frecuencias clave, llamada *tabla de proyección* (screening table). Aquí se tabulan los 10 picos identificados como *frecuencias forzadas* y los cinco picos no identificados más altos en cada espectro. La variación con tomas anteriores y el espectro de variación respecto al promedio más una desviación estándar son también tabulados.
5. Las características de esta tabla son transferidas a las *matrices de datos para componentes específicos* (Component Specific Data Matrices) CSDM para cada componente de la máquina. Estas matrices contienen columnas para cada frecuencia forzada posible con un tipo de componente específico de las cuales un subgrupo se aplicará al componente analizado en particular. Los datos de las columnas vacías serán removidos del espectro original. Una vez culminada esta transferencia, la *base de reglas de diagnóstico* es aplicada. Esta base contiene la lógica que identifica los fallos a partir de las características extraídas del espectro e identifica el grado de severidad de cada fallo.
6. Una vez que se han identificado los fallos, se aplica la *base de reglas de recomendación* para determinar qué recomendaciones para reparación son apropiadas.
7. Finalmente, el reporte es generado y se presenta en la *Vista de Histórico* donde puede realizarse otro tipo de análisis.

En cada uno de estos procesos existe una parte de lo que se conoce como “análisis manual”, es decir, la inspección visual y análisis por parte del especialista. Esto se lo verá más a fondo en el sub-capítulo 4.5.3.

4.5.2. SELECCIÓN DE ESPECTROS PROMEDIO PARA LÍNEA BASE

La base de datos promedio es de vital importancia para éxito del sistema experto y se la conoce como *línea base*. Se considera que esta base proveerá de resultados precisos al estar conformada por cinco grupos de datos. La precisión del sistema experto seguirá incrementando hasta obtener una base constituida por alrededor de 24 grupos de datos hasta alcanzar una confiabilidad del 96% comprobado en más de 30000 máquinas con una madurez de más de 30 años de estudios por parte de DLI, como se muestra en la tabla 4.5.

Nº de Promedios ingresados a la Base	Tipo de Línea Base
Cero Promedios	Comparación Estándar con 107Vdb
Un Promedios	Datos Reales
Dos Promedios	$X + \sigma$
Cinco Promedios	Mejor línea base
24 Promedios	Línea base madura

Tabla 4.5. Precisión del sistema experto de acuerdo al número de promedios

La selección de espectros promedio para conformación de la línea base es la herramienta más poderosa del sistema ExpertALERT™ que ningún sistema en el mundo lo tiene. El uso de promedios significa sensibilizar los diagnósticos en base a un criterio personalizado de operación de la maquinaria en condiciones de operación buenas, sin fallos.

Al igual que un analista humano, el sistema compara los datos con la línea base y determina los cambios que se presentan en los datos. Si los valores en las frecuencias clave sobrepasan a los de la línea base de una manera significativa, se procederá a la aplicación de las reglas para análisis de vibración. Si se incluyen datos de la máquina que presenten fallos, p.e. desbalanceo, el sistema experto tolerará niveles más altos de vibración a las frecuencias que representen ese fallo y, consecuentemente, haciéndolo menos sensible a este tipo de fallo. Entonces, la meta para la selección de datos para conformación de la línea base es proporcionar datos de la máquina cuando se encuentra en

perfecto estado de funcionamiento a condiciones y rangos normales de operación, es decir datos confiables. La pregunta es, ¿cuáles son datos confiables? Existen tres características que califican a los datos para hacerlos confiables:

- Datos “buenos”, es decir, correctamente colectados de acuerdo al procedimiento y validación en el punto 3.6.
- No presentan fallos significantes en los espectros, de acuerdo a la inspección y análisis visual de espectros³².
- Grupo de datos correctamente normalizados.

Si los datos colectados no cumplen alguna de estas tres condiciones, entonces no se deben incluir en la base promedio, a no ser que no se tenga otra opción mejor de donde escoger.

Existen varias técnicas para selección de espectros para conformación de la línea base. El emplear una determinada técnica dependerá de la experiencia, confianza y habilidad del analista para evaluar los espectros, así como del tiempo disponible para hacerlo. El único método preciso consiste en revisar todos los datos, identificar los fallos y descartar datos no confiables. El procedimiento IBCA para selección y evolución de espectros de vibración contempla un resumen de las técnicas más usadas y recomendadas en este ámbito. A continuación se detallan paso a paso estas actividades:

PASO 1 **Análisis e inspección visual de los espectros de vibración**

Utilizando el procedimiento IBCA para análisis e inspección visual de espectros, dependerá exclusivamente del analista, por lo menos en un principio, de la elección apropiada de los espectros promedio, valiéndose de las herramientas de análisis dentro del sistema, así como de las reglas para diagnóstico por modo de fallo expuestas anteriormente para interpretación y análisis de los gráficos y la hoja de filtrado.

³² Véase punto 4.1.

PASO 2

Selección inicial de espectros de acuerdo al reporte Experto

Como procedimiento inicial de implementación del sistema, IBCA realiza un monitoreo de cinco espectros en cinco días diferentes para tener una base de datos para selección de los mejores espectros de vibración para cada máquina. El reporte experto nos provee de dos valiosos datos para la selección de espectros de vibración: el número de mérito y el nivel máximo. Adicionalmente, este reporte nos proporciona información de validación de la toma de datos. Para la elección de un espectro de vibración debe realizarse el siguiente procedimiento:

- Comprobar que el set de datos esté completo, es decir, espectros de vibración en rango alto y bajo para cada punto de medición en los tres ejes.
- Verificar que todos los datos han sido tomados para generar el reporte experto. En ocasiones, cuando no se ha configurado bien el tiempo de toma, ciertos datos son excluidos del reporte generándose un mensaje instantáneo que lista las posiciones excluidas:

Motor azul Prueba

Informe generado en: 30/10/01 03:06 p.m.

Adquirido: 08/07/00 11:22 a.m. 1xM = 1791 RPM Promedios: 1

No hay datos disponibles de posicion(es) de medida #1,#2,#3.

Numero de Merito = 427.

Nivel maximo: 115 (+14) VdB en 3xM en 4R en bajo rango

Adicionalmente, el número de mérito crecerá. Si no aparece el mensaje, significa que la toma ha sido validada y todos los datos han sido incluidos y la toma correspondiente a esta fecha es apta para selección.

- Las tomas que no presentan diagnósticos ni recomendaciones son ideales para selección. El sistema EA trabaja con cinco niveles de severidad que serán analizados en el siguiente capítulo: **Extremo**, **Serio**, **Moderado**, **Ligero**, **Sin fallo**. Aunque inicialmente es muy difícil encontrar equipos sin fallos, debe escogerse tomas que contengan diagnósticos hasta un nivel

de severidad Ligero. En algunos casos particulares, puede hacerse una excepción pero debe ser avalada por un experto.

- Después de validar las condiciones anteriores, las tomas están listas para la selección. De acuerdo a los valores de número de mérito y nivel máximo, se elegirán fechas de generación de reporte, correspondientes a las fechas de toma de datos, bajo el siguiente criterio: **menor número de mérito** y **menor nivel de vibración**.

PASO 3 Ingreso de espectros a base promedio

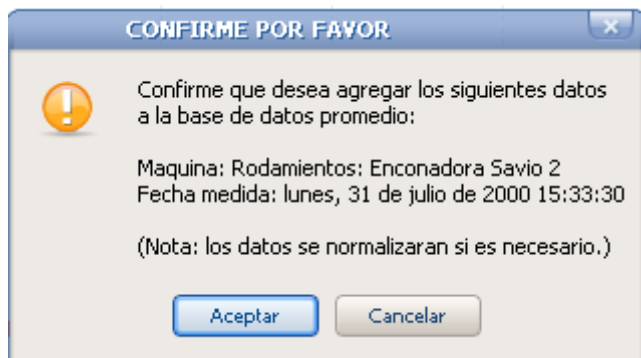
Después de haber seleccionado cuidadosamente los espectros de acuerdo a lo expuesto en el paso 2, nos ubicamos en la *Vista de Gráfico*



Utilizando el botón de selección de fechas, nos ubicamos en la(s) fecha(s) correspondiente(s) a la(s) toma(s) seleccionada(s). Se presiona F5 o se accede a

Promediar Datos Actuales en el menú **Experto**.

Aparecerá un cuadro de diálogo similar al de la derecha, donde se detalla la máquina y la fecha



correspondiente a la toma seleccionada. Pulse **Aceptar** para ingresar los datos a la base promedio.

PASO 4 Verificación y validación del ingreso de datos en base promedio

Para verificar si se han ingresado correctamente los datos de vibración, accedemos a **Informe de Datos promedio** en el menú **Experto**. Se desplegará un listado de los espectros ingresados detallando la planta, área, máquina, punto de medición, ejes, rango y velocidad nominal. Verifique que todos los espectros estén ingresados para cada punto en todos los ejes y en rango alto y bajo en cada máquina.

PASO 5 Nueva corrida del sistema EA

El ingreso de datos a la base promedio significa que los datos existentes deben ser comparados con la línea base, ya que anteriormente estaban siendo analizados en base al estándar MIL-STD-167-1, expuesto anteriormente; por ello, es lógico que los diagnósticos y recomendaciones cambien en nivel de criticidad así como el número de mérito.

CAPÍTULO 5

PROCEDIMIENTOS PARA PLANIFICACIÓN DEL MANTENIMIENTO

5.1. PLANIFICACIÓN DEL MANTENIMIENTO: EL MANTENIMIENTO PROACTIVO.

El mantenimiento proactivo esta entre las últimas tendencias en sistemas de mantenimiento en la actualidad. Esta estrategia de mantenimiento pretende maximizar la vida útil operativa de las máquinas y sus componentes, identificando y corrigiendo las causas que corrientemente originan las fallas, lo que se conoce como análisis de causa raíz o RCA (Root Cause Analysis). Por ejemplo, asegurando que las máquinas funcionan bajo las condiciones de carga y velocidad establecida por su condición de diseño y que además sus componentes (rodamientos, sellos, acoples, etc) son instalados correctamente y que su condición de lubricación es adecuada ya se puede asegurar una vida útil operativa más extendida y con menos paradas intermedias que el promedio de las máquinas del mismo tipo. Esto deriva en una certificación y verificación del estado de la maquinaria en tiempo real. El mantenimiento predictivo – proactivo requiere no sólo del análisis de vibraciones sino de varias técnicas de análisis como la termografía, el análisis por ultrasonido, el análisis de lubricantes y partículas de desgaste, etc. Si bien las estrategias de mantenimiento predictivo – proactivo han derivado en una reducción de costos e incremento de la productividad y disponibilidad de la planta, a través de la prolongación de la vida operativa de la maquinaria, existen experiencias de varias empresas en las cuales no se ha tenido los resultados esperados debido a la falta de personal capacitado y dedicado al tema. Para que estos programas de mantenimiento sean efectivos, debe conocerse en cualquier momento la condición mecánica real de la maquinaria en estudio, lo cual evidentemente se logra a través de ensayos no destructivos consistentes

en análisis de las señales que esta maquinaria emite al exterior. Si bien el análisis de vibraciones mecánicas de la maquinaria es una de las técnicas más poderosas, los avances de ingeniería actual han proporcionado de otras herramientas y técnicas complementarias e indispensables en algunos casos para la evaluación y el análisis de la causa raíz. La filosofía del Mantenimiento Proactivo, a pesar de utilizar las mismas herramientas que un Programa de Monitoreo de Condición, se enfoca a las causas y no a los efectos de las mismas, a diferencia del Mantenimiento Predictivo. Al igual, que para el caso del Monitoreo de Condición debe enfocarse a las máquinas críticas, efectuar un análisis de modos de falla, consecuencias, síntomas y efectos (FMECA), y determinar los objetivos de control para cada una de ellas, los tipos de análisis que se efectuarán, y las medidas que deben tomarse para regresar a los valores establecidos.

La curva P – F (Potencial Failure) de fallo potencial es una pesadilla y a la vez una meta que todo departamento de mantenimiento tiene. El período P-F, tal como se puede apreciar en la figura 5.1., es el período de tiempo entre el punto donde es detectada la falla potencial y el punto donde se convierte en una falla funcional. El punto P, primer momento en que la causa de falla es detectable por la técnica utilizada y F es el punto de falla es decir el momento en que el equipo llega al límite inferior del rango normal de desempeño.

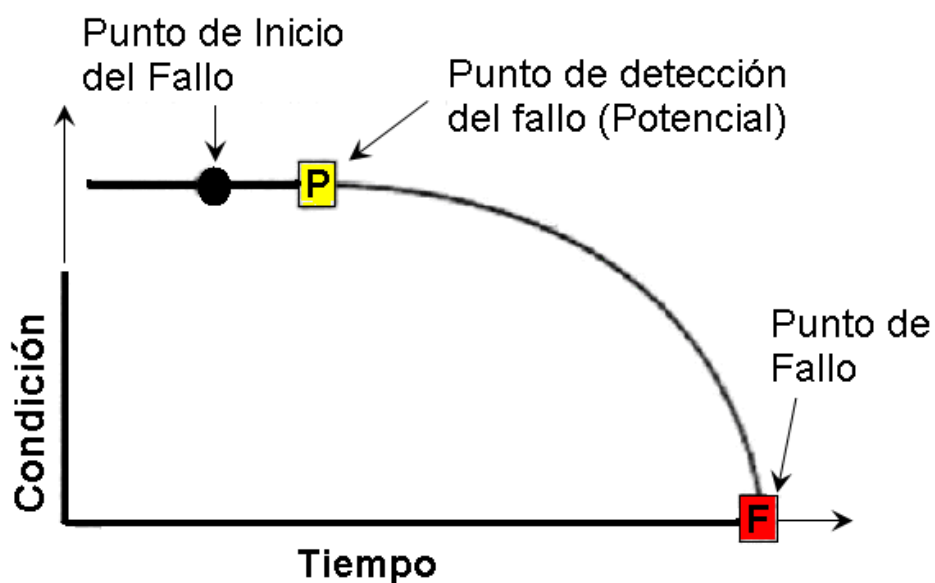


Fig. 5.1. Curva de período P – F.

Esta curva debe ser graficada por máquina, por componente y por modo de fallo. Realmente es un trabajo de muchos años y de un monitoreo riguroso de la planta. De esta curva se deriva el criterio para la frecuencia de toma de datos:

$$\boxed{Fa \geq \frac{P - F}{2}} \quad (\text{e.5.1.})$$

, donde: **Fa:** Frecuencia de análisis

P-F: Rango P-F

Un criterio válido para monitoreo de vibraciones en rodamientos de operación 24 horas al día, 7 días a la semana propone un rango P-F = 2 ~ 3 meses, es decir una frecuencia de análisis cada mes. IBCA ofrece a sus clientes el servicio de monitoreo mensual de la planta de acuerdo a este criterio. Obviamente, este rango podrá ser extendido o reducido dependiendo del estado de la máquina, de las horas de operación y del tipo de operación y carga a la que esta cometida. Este rango debe ser cuidadosamente escogido puesto que pueden darse fallos durante el período de transición entre tomas si no es bien calculado. Normalmente se utiliza la frecuencia mensual.

5.2. EMISIÓN DE ORDENES DE TRABAJO (OT) Y EL SISTEMA EXPERTALERT™.

5.2.1. INTRODUCCIÓN:

El sistema EA con sus múltiples ventajas y herramientas ha proporcionado al usuario información valiosa para determinar la condición de la maquinaria en planta. La pregunta que cabe es: ¿cómo utilizar esta información para planificar el mantenimiento de la maquinaria? La respuesta a esta pregunta es muy sencilla: recomendaciones del analista de acuerdo al nivel de severidad del fallo.

5.2.2. RECOMENDACIONES DEL ANALISTA. USO DEL EDITOR DE INFORMES EXPERTOS.

Ya que es importante revisar los resultados del sistema experto antes de tomar decisiones para intervención del equipo, se ha incluido un editor de reportes con el fin de que el analista pueda realizar cambios y recomendaciones que considere necesarias, incluyendo su firma de aceptación y responsabilidad. El editor de reportes puede ser accedido en la **Vista de Histórico**.

Las recomendaciones del analista consisten en una programación sugerida de mantenimiento. Obviamente, este reporte será previamente revisado por el jefe del departamento de mantenimiento quien deberá estar propiamente capacitado y será quién tomará las decisiones finales de intervención o no intervención de la maquinaria, de acuerdo un cronograma de mantenimiento. No debe olvidarse que el departamento de mantenimiento debe estar estrechamente unido con el de producción en una planta, puesto que el uno depende directamente del otro para el cumplimiento de metas.

De acuerdo al nivel de severidad de la maquinaria, expuesto en el reporte o modificado de acuerdo al analista, la programación del mantenimiento se realiza de acuerdo a los criterios expuestos en la siguiente tabla:

Nivel de Severidad	Rango de Vibración	Frecuencia de toma de datos	Criterio de programación de mantenimiento.
Ligero	$Vib < X + \sigma$	Continuar con frecuencia de toma de datos normal	Continua con el monitoreo normal.
Moderado	$X + \sigma < Vib \leq X + 2\sigma$	Aumentar la frecuencia de toma de datos. Reducir a la mitad.	Fallo en semanas o meses. La intervención puede ser planeada y anticipada dependiendo del avance del fallo. Requisición de repuestos.
Serio	$X + 2\sigma < Vib \leq X + 3\sigma$	Monitoreo Semanal. Aumento de frecuencia.	Fallo en días o semanas. Programar intervención dentro del rango de 2 a 6 meses.
Extremo	$X + 3\sigma < Vib$	Monitoreo Diario.	Fallo en días u horas. Programar intervención inmediata.

Tabla 5.1. Criterios de programación de mantenimiento de acuerdo a la severidad del fallo.

5.2.3. EMISIÓN DE ÓRDENES DE TRABAJO (OT):

Existen una infinidad de combinaciones de modos de fallo que pueden derivar en igual número de recomendaciones para intervención de la maquinaria. A continuación se detallan algunos escenarios comunes en la industria, y las órdenes de trabajo correspondientes en cada caso.

Configuración de Equipo	Combinación de modos de fallo	Descripción del escenario	Orden de trabajo
Motor - Ventilador acople directo (Close-Coupled Machine)	Desbalanceo del rotor del motor / ventilador	Es un escenario muy común cuando se utiliza únicamente un punto de medición en el equipo. El desbalanceo del ventilador se confunde con un desbalanceo en el rotor del motor.	Realizar un monitoreo en ambos lados del motor para verificar desbalanceo, preferiblemente en vacío.
Motor - Poleas - Ventilador / Bomba	Desbalanceo del rotor del motor / problema en poleas / desbalanceo de ventilador o impeler	La excentricidad y ovalamiento de las poleas simula un desbalanceo.	<ul style="list-style-type: none"> • Desmontar poleas y verificar en torno por ovalamiento y excentricidad. • Rectificar de ser necesario. • Monitorear el motor en vacío para verificar desbalanceo del rotor. • Balancear de ser necesario. • Alinear las poleas y dar correcta tensión a las bandas, preferiblemente con tecnología láser y osciloscópica respectivamente. • Monitorear unidad para verificar resultados de las acciones correctivas.
Motor - Acople Flexible - ventilador / bomba	Desgaste u Holgura en rodamientos / desgaste en el acople / desalineación / desbalanceo de ventilador o impeler	La desalineación produce esfuerzos axiales en los rodamientos produciendo desgaste de los mismos y del acople. El desbalanceo prolongado produce holguras.	<p>Suponiendo que la severidad de cada modo de fallo está sobre moderado:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Desacoplar unidad. • Chequear acople. Cambiar de ser necesario. Cambiar rodamientos. • Balancear Ventilador o Impeler.

Motor - Caja de Engranajes - Acople flexible - Compresor de tornillo	Desgaste en dientes del reductor, desalineación entre caja y compresor	La desalineación entre ejes produce un contacto erróneo entre los dientes del reductor.	<ul style="list-style-type: none"> • Alinear unidad preferiblemente con tecnología láser. • Inspeccionar caja por posible desgaste en dientes. • Monitorear unidad para verificar resultados de las acciones correctivas.
Motor	Desbalanceo del rotor	Existen dos posibilidades: el rotor está realmente desbalanceado o existe pandeo de eje.	<ul style="list-style-type: none"> • Monitorear el motor en frío para verificar posible pandeo de eje. • Requerimiento de cotización para reparación del motor.
Motor	Desbalanceo de fases / deslaminación	Produce fuertes componentes a 120 Hz con armónicos.	<p>Programar la siguiente acción de monitoreo:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Monitorear el motor y seguir el rastro al pico de 120 Hz. • Desconectar la fuente de alimentación de corriente al motor. Si desaparece en componente, existe deslaminación.

Existen muchas otras combinaciones en el campo industrial dependiendo de las aplicaciones. Dependiendo de la experiencia del analista, la capacitación que tenga en el tema y el conocimiento de la planta, las órdenes de trabajo serán cada vez más precisas y procesadas con mayor rapidez. De acuerdo a nuestra experiencia, el jefe de mantenimiento procesa de 10 a 15 órdenes de trabajo en base a los informes del analista. Inicialmente, la adaptación a una programación de mantenimiento en base a técnicas predictivas demandará de un gran esfuerzo por parte del departamento de mantenimiento puesto que la implementación de sistemas de mantenimiento más efectivos y confiables requiere de recolección de grandes cantidades de datos, elaboración de tendencias y personal de experiencia altamente capacitado. El éxito dependerá exclusivamente de la constancia y explotación correcta de las herramientas y técnicas de mantenimiento.

5.3. OTRAS TÉCNICAS DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO: LA TERMOGRAFÍA Y EL ANÁLISIS DE LUBRICANTES.

5.3.1. LA TERMOGRAFÍA³³.

La Termografía Infrarroja es una técnica que permite, a distancia y sin ningún contacto, medir y visualizar temperaturas de superficie con precisión. El ojo humano no es sensible a la radiación infrarroja emitida por un objeto, pero las cámaras termográficas, o de termovisión, son capaces de medir la energía con sensores infrarrojos, capacitados para "ver" en estas longitudes de onda. Esto permite medir la energía radiante emitida por objetos y, por consiguiente, determinar la temperatura de la superficie a distancia, en tiempo real y sin contacto.

³³ Fuente: Irene, F., "Mantenimiento Predictivo", Universidad Gran Mariscal de Ayacucho, Escuela de mantenimiento industrial, 2004.

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

El análisis mediante termografía infrarroja es el complemento de otras técnicas y sistemas de ensayo conocidos, como pueden ser el análisis de aceites lubricantes, el análisis de vibraciones, los ultrasonidos pasivos y el análisis predictivo en motores eléctricos. Pueden añadirse los ensayos no destructivos clásicos: ensayos, radiográfico, el ultrasonido activo, partículas magnéticas, etc.

El análisis mediante cámaras termográficas infrarrojas tiene sus principales aplicaciones en:

- **Instalaciones y líneas eléctricas de alta y baja tensión:**

Detección de malas conexiones, integridad de aislamientos, funcionamiento de sistemas de alto voltaje. A continuación se detallan algunos ejemplos:

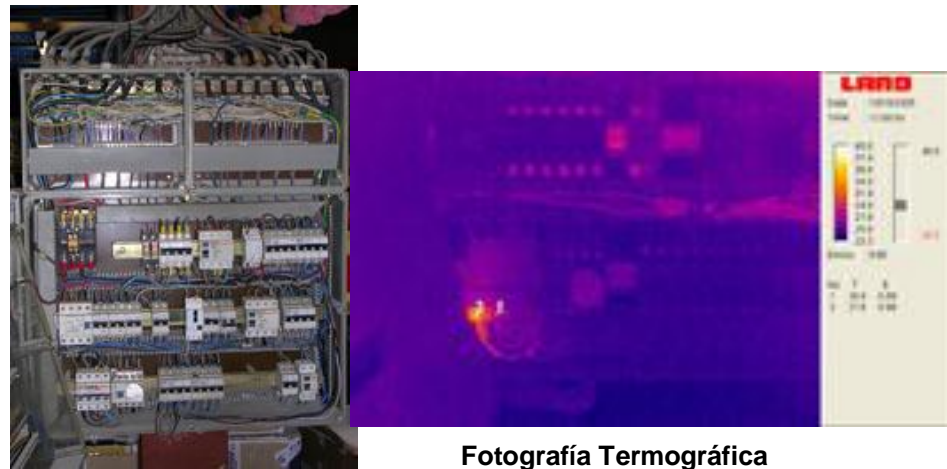
- **Detección de malas conexiones:**

Problema detectado:

Se observa que los conductores de una de las fases se encuentran a una temperatura superior respecto las demás fases. Claro desequilibrio entre fases. (Figura 5.2.).

Solución propuesta:

Atornillar bien la conexión correspondiente a los conductores afectados y realizar termografía para confirmar la desaparición de la anomalía. Si el punto crítico persiste determinar mediante otros procedimientos si el problema recae en el interruptor (en ese caso sustituir el interruptor).



Vista Normal del panel

Fotografía Termográfica

Fig.5.2. Detección de malas conexiones.

- **Aplicación en transformadores:**

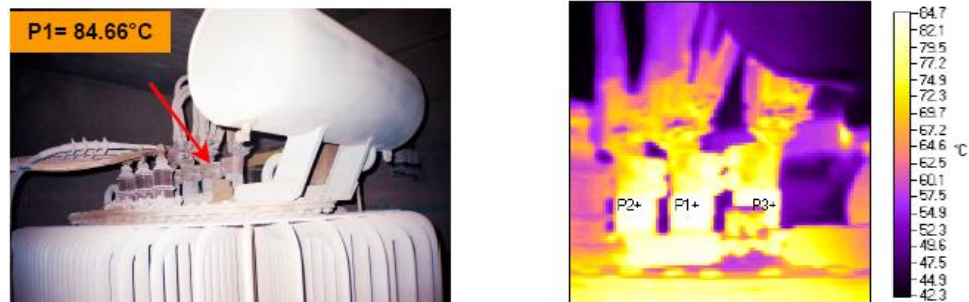


Fig.5.3. Termografía en transformadores.

- **Aplicaciones en sistemas mecánicos:** La temperatura en los sistemas mecánicos es de vital importancia, y viene definida por todos los fabricantes de maquinas y herramienta. Rozamientos, fricciones, malos alineamientos, etc... pueden producir elevadas temperaturas que acorten la vida útil de las maquinas y sistemas de transmisión, o incluso problemas mas serios como gripajes o deformación de materiales. Gracias a la termografía podemos reducir los costes de mantenimiento y alargar la vida de las maquinas. Ya que esta técnica permite estudiar las temperaturas de las diferentes partes de un sistema mecánico sin tener que detener el proceso, es decir con el todos los sistemas en

movimiento y a plena carga. Las principales aplicaciones de la termografía en sistemas mecánicos son:

- Estudio de motores y generadores.

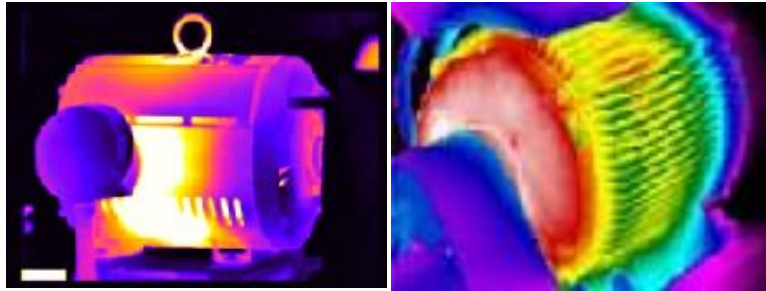


Fig.5.4. Fotografías termográfica de un motor.

- Estudio de rodamientos y poleas.

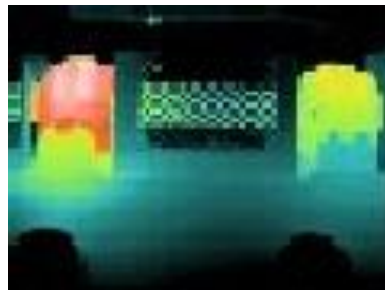


Fig.5.5. Fotografía termográfica de chumaceras.

- Estado de cojinetes.
- Sistemas de transmisión y cajas de cambios.
- Desalineamientos y desgaste en acoples.

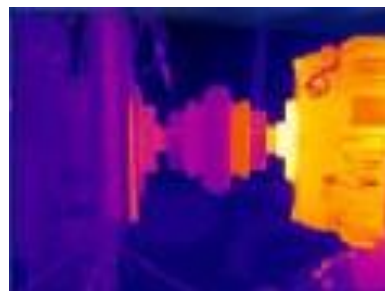


Fig.5.6. Estado termográfico de acoplamiento.

- Estado de los lubricantes.
- Inspección de soldaduras.

- **Aplicaciones en procesos:** Los equipos de termografía funcionan recogiendo la energía infrarroja emitida por la superficie de los objetos. La condición “normal” de un objeto será aquella que muestre un patrón de temperatura apropiado para el objeto en cuestión. Cambios en las propiedades físicas como son la corrosión, grietas, erosiones, estrechamientos, fugas, bloqueos, etc. causan variaciones detectables en los patrones de energía infrarroja. Se puede aplicar la termografía para detectar anomalías en procesos industriales donde pueden darse algunas de las mencionadas anteriormente. Algunos casos típicos para los que se aplica la termografía son:
 - Estado y estudio de válvulas.



Fig.5.7. Termografía en válvulas.

- Detección de tuberías subterráneas.

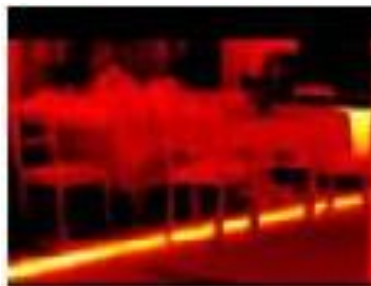


Fig.5.8. Termografía en detección de tuberías subterráneas.

- Nivel de líquido de tanques.

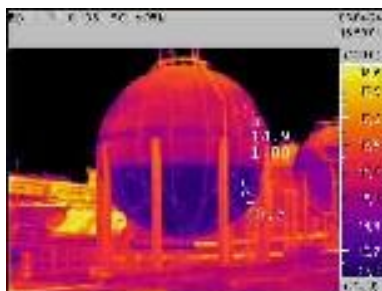


Fig.5.9. Termografía en tanques.

- Estudio de refractarios.

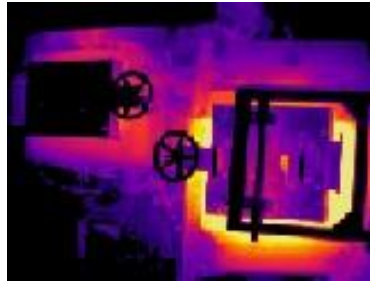


Fig.5.10. Aplicación termográfica en refractarios

- Estudio de pérdidas térmicas.
- Fugas de vapor.
- Perdidas de vacío.

Las ventajas que ofrece el mantenimiento preventivo por termovisión son:

- **Evitan interrupciones en procesos productivos:** Disminuyen las interrupciones en los procesos productivos y se controla la integridad del sistema que los alimenta y protege. El ahorro final depende del intervalo de tiempo en que se realice el mantenimiento predictivo.
- **Localizan con exactitud y antelación los potenciales problemas:** Localización exacta y con suficiente antelación de los potenciales problemas mediante el incremento de temperatura. Inmediatamente después de realizar el mantenimiento predictivo ya se puede organizar la solución a los problemas detectados.
- **Disminuyen las actuaciones de mantenimiento y reducen el tiempo de reparación:** Disminución de las actuaciones de mantenimiento tradicional: las anomalías se predicen con suficiente antelación para que sean reparadas y no se llegue a producir una avería que supondría un considerable tiempo de reparación.
- **Alargan la vida de los equipos:** Mediante ensayos no destructivos se realiza un seguimiento del funcionamiento de los equipos, corrigiendo las anomalías detectadas en el menor tiempo posible para alargar su vida útil.
- **Permiten un uso más eficiente de la energía:** Se consigue una disminución del consumo de los equipos de

calefacción/refrigeración actuando sobre las causas que originan pérdidas de frío o de calor. Se consigue, por tanto, un ahorro económico y un menor impacto sobre el medio ambiente.

- **Le proporcionan descuentos en la póliza del seguro:** Cada vez son más las compañías aseguradoras o consultorías de riesgos y seguros que valoran el uso de la termografía aplicada al mantenimiento predictivo y al diagnóstico de instalaciones, mediante primas a la póliza del seguro.

5.3.2. EL ANÁLISIS DE LUBRICANTES³⁴:

Las estadísticas prueban que aproximadamente el 10% de las causas generan el 90% de las fallas, por ello resulta fundamental no continuar gastando en las consecuencias de las mismas fallas. La maquinaria pesada está conformada por diversas máquinas rotativas, tales como motores diesel, cajas de engranajes, bombas hidráulicas, compresores de aire, entre otros. Las máquinas rotativas tienen asociada una probabilidad de falla que se incrementa a medida que aumenta el nivel de desgaste del sistema. La maquinaria pesada es dependiente de sistemas fluidos, tales como los lubricantes, aceites hidráulicos, refrigerantes, combustibles y aire, los cuáles llevan contaminantes dentro del sistema y los transportan. La presencia de contaminación anormal, en un sistema puede describirse como falla incipiente. Esto significa que aunque la máquina no está experimentando una pérdida en su desempeño o degradación de sus componentes, las condiciones que llevan a la falla y reducen la vida del componente están presentes, en consecuencia el análisis de lubricantes es la herramienta fundamental de una estrategia proactiva para el caso de maquinaria pesada.

Las funciones de los lubricantes son:

- Controlar la fricción
- Controlar el desgaste
- Controlar la corrosión
- Controlar la temperatura

³⁴ Fuente: Altmann, C., "El análisis de aceite como herramienta de Mantenimiento Proactivo en flotas de maquinaria pesada", Consorcio Ambiental de la Plata, 2005.

- Controlar la contaminación
- Transmitir potencia, en el caso de circuitos hidráulicos

El aceite transporta y contiene toda la información acerca de los contaminantes y partículas de desgaste. El análisis de aceite es una técnica simple, que realizando medidas de algunas propiedades físicas y químicas proporciona información con respecto a:

- La salud del lubricante
- Contaminación del lubricante
- Desgaste de la maquinaria

El análisis de aceite no sólo va a permitir monitorear el estado de desgaste de los equipos, detectar fallas incipientes, sino también establecer un Programa de Lubricación basado en Condición. Los fabricantes de equipos recomiendan Planes de Mantenimiento que incluyen cambios de lubricantes a intervalos fijos, llevando a un costoso sobre mantenimiento, pues sustituye lubricantes todavía aptos para el uso. Todo esto deriva en el establecimiento y elaboración de una Estrategia Proactiva. Para llevarla a cabo es fundamental establecer dos tipos de alarmas:

- **Alarmas Absolutas:** Límites condenatorios que se aplican al estado de contaminación del lubricante, y se pueden tomar las recomendaciones del fabricante del equipo, en el caso que las hubiera o en su defecto las recomendaciones del Laboratorio de Análisis de Lubricantes.
- **Alarmas Estadísticas:** Basadas en los propios valores registrados en el equipo. El análisis de la tendencia estadística permite identificar fallas incipientes. No se debe olvidar la variabilidad inherente a la propia exactitud de las pruebas que se realizan.

Resulta muy importante para poder identificar las causas de falla tener en cuenta las condiciones operativas y ambientales. Tal como es sabido, aún dos máquinas idénticas condiciones operativas y ambientales disímiles no requerirán las mismas intervenciones de mantenimiento, ni presentarán la

misma clase de fallas. Pero para el caso de equipos idénticos en condiciones operativas similares, se pueden utilizar las mismas alarmas estadísticas. Así mismo, es fundamental conocer la metalurgia de las partes móviles que tienen contacto con el lubricante, para eventualmente identificar el origen de los metales de desgaste.

Para llevar adelante una Estrategia Proactiva el primer paso es seleccionar los equipos a incluir dentro del Programa, y definir los objetivos de limpieza, y luego tomar acciones para llevarlos a cabo. Para seleccionar los puntos de lubricación a monitorear mediante análisis de aceite, tal como ya se mencionó anteriormente, debe tenerse en cuenta la criticidad del componente y en cómo afecta éste a la confiabilidad y disponibilidad de la máquina. Incluso debe incluirse en el programa un reductor de 2 litros de capacidad, si éste afecta la confiabilidad y seguridad de la máquina. Para ésta caso no se esperan beneficios extendiendo la vida del aceite, sino desde el punto de vista del Mantenimiento Predictivo. El control de contaminación de los aceites, es el pilar básico de la Estrategia Proactiva, enfocándose al control de la principal causa de desgaste y falla de los equipos, debiéndose evitar que los contaminantes ingresen al sistema. El objetivo de limpieza afecta desde la recepción, almacenaje y manipulación de los lubricantes nuevos, la limpieza de los respiraderos, la correcta selección y frecuencia de cambio de filtros. En la tabla 5.2 se detallan las principales consecuencias sobre la superficie metálica, según el tipo de contaminante:

Tipo de Contaminante	Efectos sobre la superficie de la maquinaria
Partículas	Desgaste superficial por abrasión y fatiga.
Agua	Herrumbre, rayado.
Combustible	Incremento del desgaste por pérdida de resistencia de la película lubricante.
Anticongelante	Herrumbre, corrosión, incremento del desgaste por pérdida de resistencia de la película lubricante.
Aire	Cavitación
Calor	Formación de baniz. Incremento del desgaste por pérdida de resistencia de la película lubricante.

Tabla 5.2. Efectos de los contaminantes en la maquinaria.

Los aceites sufren un mecanismo de envejecimiento natural que va alterando sus propiedades físicas: la densidad, la viscosidad, y las propiedades químicas, que disminuye su vida útil, a través los siguientes mecanismos:

- Oxidación
- Polimerización
- Ruptura
- Evaporación

Al disminuir la contaminación con agua, con aire, con partículas, con calor, no sólo se estará disminuyendo el desgaste de la maquinaria, sino también extendiendo la vida útil del aceite.

5.3.2.1. Casos particulares: Motores diesel.

Las pruebas que comúnmente se realizan a aceites para motores diesel son:

- Espectroscopia de Metales: Hierro, Cobre, Plomo, Aluminio, Cromo, Estaño, y Sodio
- Espectroscopia de Silicio
- Medida de Viscosidad cinemática
- Contenido de Agua
- Medición del TBN
- Dilución por combustible
- Dilución por Glicol

Si se grafican los contenidos de los metales, se pueden comparar los contenidos de metales de desgaste en relación los límites de advertencia, así como también analizar las tendencias. En la figura 5.2 está graficado en forma conjunta, para el caso de un motor diesel, el contenido de Hierro y Silicio en la escala del eje primario, y el contenido de hollín según la escala del eje de la derecha. En la misma se puede observar que la mayoría de los máximos de hollín están alineados con los de hierro, lo que demuestra que el mayor contenido de hollín en el aceite, provoca un mayor aumento del desgaste del motor, por efecto de la abrasión.

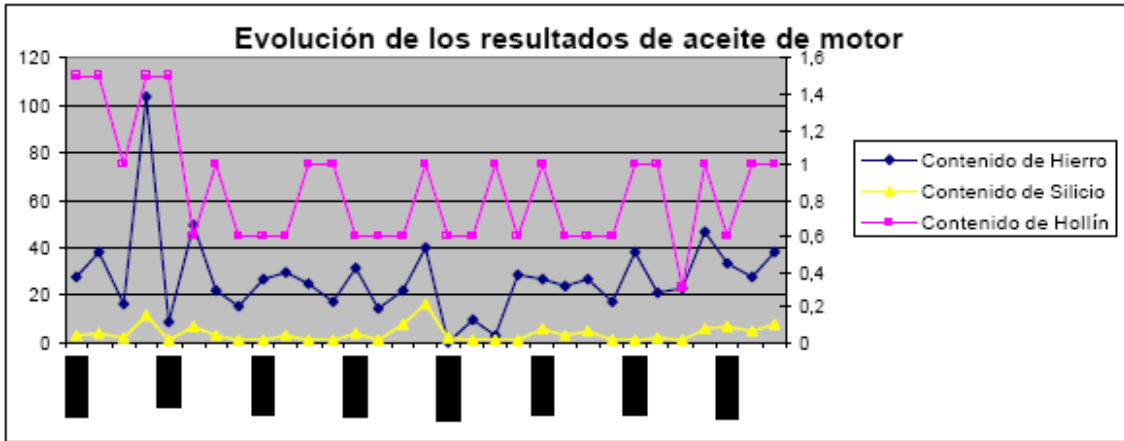


Fig.5.11. Evolución de la concentración de Hierro, Sílice y Hollín.

En la figura 5.3 está graficado para el mismo motor e igual período, los contenidos de aluminio, cromo y plomo, según la escala del eje primario, y el contenido de cobre, según la escala del eje de la derecha.

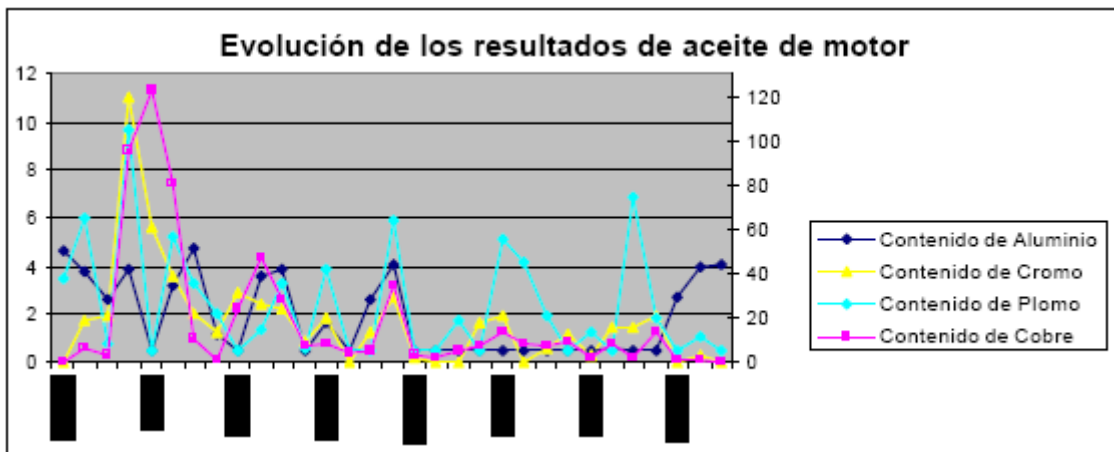


Fig.5.12. Evolución de la concentración de metales en igual período.

Los puntos más altos presentan un contenido de hierro y cobre por arriba de los límites de advertencia, indicando desgaste proveniente de los metales de biela y bancada del cigüeñal, y del cigüeñal mismo. Tal como se puede apreciarse no hubo ingreso de contaminantes, ni contaminación del lubricante. El motivo del incremento de los metales de desgaste estuvo en el agotamiento del paquete de aditivos. El caso aquí presentado corresponde a un motor diesel con un consumo de combustible en el entorno de los 55 litros / hora.

CAPÍTULO 6

ANÁLISIS ECONÓMICO – FINANCIERO

6.1. CÁLCULO DE COSTOS DE IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA EN PLANTA.

6.1.1. INTRODUCCIÓN:

Ivan Bohman C.A. a través de su departamento de asistencia y asesoría técnica a implementado un servicio inigualable pos venta que ninguna empresa en el País ofrece. Antiguamente, el programa de negocios en el área de mantenimiento predictivo se centraba únicamente en la venta de equipos y servicio de análisis de vibración, balanceo dinámico en sitio y alineación de ejes. De nuestra experiencia, el 90% de las empresas que adquirieron nuestros equipos hasta el año 2005 no los han explotado a su máxima capacidad y, en el 100% de los casos, no lo usan como herramienta de planificación de mantenimiento. Actualmente IBCA está cambiando su imagen corporativa comenzando con un servicio pos venta que se centra en los siguientes puntos:

- Visita en planta para promoción y presentación de las líneas de mantenimiento predictivo: DLI Engineering Co. (monitoreo) y PredicTECH Inc. (sensores y sistemas de protección).
- Presentación de cotización y seguimiento. Existen tres posibilidades:
 - **Venta de equipos:** DCX-RT / XRT, DCA-50, etc. para monitoreo en sitio y Sprite Max para monitoreo continuo en tiempo real. Para este último se necesita realizar un estudio de ingeniería con la asistencia de DLI.
 - **Servicio de análisis de vibraciones:** Monitoreo mensual o con la frecuencia acordada de equipos críticos con entrega de informe correspondiente.

- **Contrato de Usufructo de la Licencia:** Se instala un computador con la licencia del ExpertALERT™ con usufructo para IBCA en la planta cliente. Se cotizan un número de puntos determinado dependiendo de planta.
- Capacitación del personal a través del Curso de Análisis de Vibraciones, Nivel I organizado alrededor de 4 veces por año desde el 2006.
- Revisión de trabajo de implementación centrado en validación de colocación de puntos de medición, de toma de datos y creación de MIDs, realizado por el Ing. César Ortiz V. Gerente Regional de IBCA.
- Auditoria bimensual de la base de datos de la planta junto al Ing. César Ortiz.
- Plan de capacitación a clientes externos al que acceden automáticamente con la compra de cualquier equipo, servicio o insumo de IBCA, con más de 80 charlas en temas diferentes de industria, mantenimiento y operación.
- Asistencia telefónica permanente.

En el presente capítulo se detallan los costos de implementación del sistema de acuerdo al tipo de servicio requerido.



6.1.2. COSTO DE VENTA DE EQUIPOS E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA EXPERTALERT EN PLANTA:




Ivan Bohman C.A. como representante exclusivo de DLI Engineering Co. en Ecuador en venta de equipos y asistencia técnica presenta un amplia gama de productos para el monitoreo de vibraciones en maquinaria rotativa. El DCA-50 es uno de los equipos más vendidos el último año por su versatilidad y capacidad de almacenamiento de datos. El DCX es un equipo mucho más completo que cuenta con el sistema ExpertALERT™ para diagnósticos en campo, muy promocionados en petroleras. A continuación los costos de implementación usando las dos posibilidades:

6.1.2.1. Costo de implementación del sistema EA con venta de DCA-50:

A continuación se presenta una propuesta IBCA que incluye el DCA-50 y accesorios para balanceo en sitio, lámpara estraboscópica y pinza amperimétrica para realizar análisis de corriente. La propuesta contempla cuatro puntos:

1. Costo Colector de Vibraciones en campo DCA-50 y Accesorios.

QTF	ITEM	Product Name	Description	Unit Price	Price
1	2743	DLI Watchman® DCA-50, Portable Vibration Data Collector/Field Analyzer 	The DCA-50 offers four simultaneous input channels for measuring a wide range of vibration and process data. This portable unit offers not only route data collection but also a wide variety of analysis features such as real-time data acquisition, envelope demodulation, time synchronous averaging, Bode plots, waterfall displays and frequency resolution up to 25,600 lines. Standard accessories include: (a) Triaxial Accelerometer with 6ft (2m) integral armored cable (b) Ball driver for mounting triaxial accelerometer (c) Battery Pack (4 ea) & Power Adapter/Battery Charger (d) USB Communications Cable to Host PC (e) Protective Cover with Shoulder Strap & Access Pouch (f) Transit Case for instrument/accessory storage (g) User Manual (Hardcopy format)	\$ 27.550,71	\$ 27.550,71
	1110	ExpertALERT™ Machine Condition Assessment Software, 1st User License 	Intelligent machinery condition assessment software featuring automated data screening and machine fault diagnostics using a single layer, intuitive user interface. Software also offers database management, trending, data analysis and report generation. Includes Sybase SQL dB. The primary benefits of this software are: (a) Automated data screen an fault diagnostics to reduce labor associated with manual data review (b) Actionable report output with specific machine fault(s), fault severity, specific repair recommendation(s) and repair priority (c) The report output can be edited by the end user to customize the findings and/or modify the automated results produced by ExpertALERT		

1	8800	DLI Multi-plane Balance Kit 	Multi-plane and multi-speed balancing kit for DCX or DCA-50. Capable of performing single, two or four-plane field balancing. Kit Includes: <ul style="list-style-type: none"> • Infrared Tachometer with DCA-50 Power Supply, Item 4401 DCA50 • DCA50 Multi-plane Balancing Software, Item 8820 • Electronic Scale, Item 8578 and Reflective Tape, 24 in (9.5 cm) long. • Carrying Case, Item 8583 • Balancing User Manual (CD format) 	\$ 4.435,71	\$ 4.435,71
1	4602 (115 V)	Palm Stroboscope/Tachometer Deluxe Kit, 100-12,500 FPM. 	Use for any type of motion study or direct speed measurement requiring high intensity Xenon lamp. Kit includes PR115/230V re-charger, spare lamp, spare battery, holster, NIST traceable calibration certificate, 1/4" - 20 UNC bushing for tripod mounting and carrying case. Order Item 5617 to connect to DCA-50	\$ 1.219,82	\$ 1.219,82
1	5617	Pulse Output Cable	Direct connection to DCA-50. Length: 6 feet (1.82 m) - 1/6" Mono Plug to BNC male connector	\$ 88,71	\$ 88,71
1	8525-DCA50	AC Motor Current Sensor 	Use with DCA-50 for motor current signature analysis to detect motor bar problems in AC induction motors and monitor distribution power line waveforms for harmonic analysis. Requires cable assembly, Item 8857, to connect to DCA-50.	\$ 517,50	\$ 517,50

1	8857	DCA-50 Sensor and Tachometer Cable Assembly, Fischer to 4 BNC's	Note: Includes four female BNC pass through connectors, Item 8514.	\$ 480,54	\$ 480,54
Subtotal 1:				\$ 34.293,00	\$ 34.293,00

2. **Curso de Operación del sistema ExpertALERT y el Equipo DCA-50.** Este curso tendrá una duración de 2 días donde se impartirán enseñanzas teórico prácticas sobre el manejo de las funciones del ExpertALERT y el sistema operativo del DCA – 50.

Costo: Gratuito.

3. **Implementación de la base de datos con registro de los espectros de referencia.** se implementarán con la ayuda del usuario la base de datos de hasta 100 locaciones de los equipos de PLANTA XYZ que designe el usuario. Se registrarán 5 espectros en días sucesivos de todos los puntos, se determinarán con el usuario cuáles espectros servirán para integrar el espectro de referencia de cada equipo. Se establecerá la rutina de lectura con el usuario. El Ingeniero de IVAN BOHMAN C.A. indicará al personal de PLANTA XYZ dónde y cómo deben ser colocadas las bases de bronce en los equipos.

Costo: \$4000,00 + IVA

4. **Dos cupos gratuitos para el Curso de Análisis de Vibraciones Nivel I** (4 días, 30 horas de enseñanza teórico – práctica), a realizarse próximamente en la ciudad de Quito.

Costo Total del Proyecto en PLANTA XYZ:

Nº	Descripción	Precio
1	Costo Colector de Vibraciones en campo DCA-50 y Accesorios.	USD \$34.293,00
2	Curso de Operación del sistema ExpertALERT y el Equipo DCA-50.	Gratuito
3	Implementación de la base de datos con registro de los espectros de referencia.	USD \$4.000,00
4	Dos cupos gratuitos para el Curso de Análisis de Vibraciones Nivel I	Gratuito
	SUBTOTAL:	USD \$38.293,00
	12 % IVA:	USD \$4.595,16
	TOTAL:	USD \$ 42.888,16

Forma de Pago:

40% del valor total con la orden de compra y 60% con la entrega del equipo.

Componentes:



- Lugar y fecha de entrega: Local, de 7 a 8 semanas a partir de la recepción de orden de compra y la firma del documento End-User Statement³⁵, que exige el gobierno de los Estados Unidos previo a la exportación de este equipo, donde se aclara por parte del usuario final, que la función a la que se destinará el DCA-50 no es para uso militar ni nuclear.
- Garantía: Un año contra daños derivados de piezas defectuosas.
- Asistencia técnica: Telefónica Permanente sin costo alguno.



³⁵ Ver Anexo N

6.1.2.2. Costo de implementación del sistema EA con venta de DCX-XRT:

A continuación se presenta una propuesta IBCA que incluye el DCA-50 y accesorios para balanceo en sitio, lámpara estraboscópica y pinza amperimétrica para realizar análisis de corriente. La propuesta contempla cuatro puntos:

5. Costo Colector de Vibraciones en campo DCX-XRT y Accesorios.

QTF	ITEM	Product Name	Description	Unit Price	Price
1	2706XRT	<p>DLI Watchman® DCX™, with 2nd copy of ExpertALERT™ (Network License), Replication & Balance Kit</p>  	<p>The DCX-XRT is a portable, multi-channel vibration data collector and machine diagnostic analyzer utilizing DLI's proven ExpertALERT condition assessment software. The DCX-XRT features an extremely rugged Hammerhead tablet PC, manufactured to MIL-STD-810F standards and offers an IP-66 rating (totally protected against dust and protected from strong jets of water). With the included balancing kit multi-plane (1, 2 or 4 plane) field balancing can be performed. Standard features include:</p> <ul style="list-style-type: none"> (a) Embedded ExpertALERT™ software, Item 1110 (b) Database Setup Wizards (c) Multi-plane Balancing Kit, Item 8800 (d) Integrate other condition based technologies using our unique document linking. (e) Real-time analysis and waterfall displays for transient studies (f) Envelop Demodulation for rolling element bearing data (g) Bode Plots for run-up / coast down measurements (h) Orbit Plots for sleeve bearing analysis 	\$ 35.054,46	\$ 35.054,46

1	4601 (115 V)	<p>Palm Stroboscope/Tachometer Deluxe Kit, 100-12,500 FPM.</p> 	<p>Use for any type of motion study or direct speed measurement requiring high intensity Xenon lamp. Kit includes PR115/230V re-charger, spare lamp, spare battery, holster, NIST traceable calibration certificate, 1/4" - 20 UNC bushing for tripod mounting and carrying case. Order Item 5617 to connect to DCX-XRT</p>	\$ 1.219,82	\$ 1.219,82
1	5617	Pulse Output Cable	<p>Direct connection to DCA-50. Length: 6 feet (1.82 m) - 1/6" Mono Plug to BNC male connector</p>	\$ 88,71	\$ 88,71
1	8525-DCXHH	<p>AC Motor Current Sensor</p> 	<p>Use with DCX-XRT for motor current signature analysis to detect motor bar problems in AC induction motors and monitor distribution power line waveforms for harmonic analysis. Requires cable assembly, Item 8857, to connect to DCX-XRT.</p>	\$ 517,50	\$ 517,50
1	8857	DCX-RT/XRT Sensor and Tachometer Cable Assembly, Fischer to 4 BNC's	<p>Note: Includes four female BNC pass through connectors, Item 8514.</p>	\$ 480,54	\$ 480,54
Subtotal 1:				\$ 37.361,04	\$ 37.361,04

6. **Curso de Operación del sistema ExpertALERT y el Equipo DCX-XRT.** Este curso tendrá una duración de 2 días donde se impartirán enseñanzas teórico prácticas sobre el manejo de las funciones del ExpertALERT y el sistema operativo del DCA – 50. Utilización del formato IBCA P-RG-002³⁶ para registro de entrenamiento a clientes.

Costo: Gratuito.

7. **Implementación de la base de datos con registro de los espectros de referencia.** se implementarán con la ayuda del usuario la base de datos de hasta 100 locaciones de los equipos de PLANTA XYZ que designe el usuario. Se registrarán 5 espectros en días sucesivos de todos los puntos, se determinarán con el usuario cuáles espectros servirán para integrar el espectro de referencia de cada equipo. Se establecerá la rutina de lectura con el usuario. El Ingeniero de IVAN BOHMAN C.A. indicará al personal de PLANTA XYZ dónde y cómo deben ser colocadas las bases de bronce en los equipos.

Costo: \$4000,00 + IVA

8. **Dos cupos gratuitos para el Curso de Análisis de Vibraciones Nivel I** (4 días, 30 horas de enseñanza teórico – práctica), a realizarse próximamente en la ciudad de Quito.

³⁶ Ver modelo Anexo O.

Costo Total del Proyecto en PLANTA XYZ:

Nº	Descripción	Precio
1	Costo Colector de Vibraciones en campo DCX-XRT y Accesorios.	USD \$37.361,00
2	Curso de Operación del sistema ExpertALERT y el Equipo DCX-XRT.	Gratuito
3	Implementación de la base de datos con registro de los espectros de referencia.	USD \$4.000,00
4	Dos cupos gratuitos para el Curso de Análisis de Vibraciones Nivel I	Gratuito
	SUBTOTAL:	USD \$41.361,00
	12 % IVA:	USD \$4.963,32
	TOTAL:	USD \$ 46.324,32

Forma de Pago:

40% del valor total con la orden de compra y 60% con la entrega del equipo.

Componentes:

- Lugar y fecha de entrega: Local, de 7 a 8 semanas a partir de la recepción de orden de compra y la firma del documento End-User Statement, que exige el gobierno de los Estados Unidos previo a la exportación de este equipo, donde se aclara por parte del usuario final, que la función a la que se destinará el DCX-XRT no es para uso militar ni nuclear.
- Garantía: Un año contra daños derivados de piezas defectuosas.
- Asistencia técnica: Telefónica Permanente sin costo alguno.

6.1.3. COSTO DEL SERVICIO IBCA DE ANÁLISIS DE VIBRACIONES.

Para presentar una cotización del servicio de análisis de vibraciones a un cliente potencial, el asesor técnico de IBCA debe realizar una visita en planta con el propósito de determinar los equipos a monitorear y el número de puntos de medición. A continuación se detalla una propuesta de costos general.

El servicio de análisis de vibraciones que IBCA ofrece a sus clientes contempla las siguientes actividades:

- Instalación y colocación de 100 bases de bronce con asistencia del personal de planta.
- Levantamiento de datos técnicos de los equipos, los cuales deben ser proporcionados por el personal de planta a cargo.
- Programación de la planta en el equipo colector de espectros de vibración.
- Toma de datos (5 espectros para creación de línea base).
- Emisión de reporte con comentarios, sugerencias y diagnósticos.
- Monitoreo mensual o según disponibilidad con emisión del correspondiente informe.

Los costos de este análisis son los siguientes:

ITEM	COSTO UNITARIO USD \$ (c/ punto de medición)
Pegado de bases de bronce	USD \$4,00
Lectura de espectros	USD \$4,00

El reporte y análisis correspondiente están dentro del costo.

Nota: Estos precios no incluyen el 12% del IVA.

6.1.4. COSTO DEL CONTRATO DE USUFRUCTO DE LA LICENCIA DEL ExpertALERT™.

Esta modalidad de servicio es única en el País y es una solución para implementación inicial de un sistema de mantenimiento predictivo. A través de este servicio el cliente se convierte en un potencial comprador de equipos.

La propuesta oferta contempla tres partes: Descripción y valor del usufructo del Software ExpertALERT™, implementación de la base de datos con registro de los espectros de referencia y lecturas de vibraciones.

1. Descripción y valor del usufructo del Software ExpertALERT™:

IVAN BOHMAN C.A. instalará un computador de su propiedad, con una licencia de ExpertALERT™, asignada a Ivan Bohman C.A. por DLI Engineering Co. Este software cuenta con más de 5.700 reglas de análisis, 960 diagnósticos diferentes, cuatro niveles de severidad y una madurez de más de 30 años. El sistema emite un reporte automáticamente que señala el Diagnóstico de falla del equipo, las Recomendaciones a seguirse en idioma castellano y mantiene un cuadro de progreso de cada modo de falla del equipo analizado. El costo de este usufructo es de **USD \$5.000,00 + IVA**, por el tiempo que PLANTA XYZ utilice nuestros servicios de análisis de vibraciones, con un mínimo de doce lecturas por año o en las fechas a acordarse, según el funcionamiento de la planta.

2. Programación del Sistema ExpertALERT (Implementación de la base de datos con registro de los espectros de referencia).

Se implementará con la ayuda del usuario, la base de datos de cuatrocientas locaciones de los equipos de PLANTA XYZ que el usuario designe. El ingeniero de Ivan Bohman C.A. indicará al personal de PLANTA XYZ en qué lugares deben pegarse las bases de bronce, para

que el personal de proceda con esta operación. Se realizará el registro de todas las frecuencias de falla de los equipos a inspeccionarse con análisis de vibraciones con 5 lecturas de espectros en rango bajo y alto, demodulación y valores de vibración global, todo en las tres direcciones axial, radial y tangencial. Estas 5 lecturas de espectros con 800 líneas de resolución servirán para establecer el espectro de referencia de cada equipo. Se procederá al entrenamiento de dos personas de su planta en la utilización y explotación del sistema ExpertALERT™ durante 3 días.

3. Lectura de Vibraciones.

Un técnico de Ivan Bohman C.A. realizará no menos de doce lecturas (dos jornadas de ocho horas cada una) por año de todos los equipos de la PLANTA XYZ que se descargarán en el computador de Ivan Bohman C.A. que estará en la planta, con la corrida del sistema ExpertALERT™.

En el caso de existir un Contrato de Suministro de Rodamientos, PLANTA XYZ reconocerá honorarios de **USD \$50,00 + IVA / día** a Ivan Bohman C.A. por cada día que el técnico invierta en el proceso de lectura y análisis de vibraciones. En el caso de no existir contrato de suministro de rodamientos, PLANTA XYZ reconocerá honorarios de **USD \$100,00 + IVA / día** por cada día que el técnico de IVAN BOHMAN C.A. invierta en el proceso de lectura y análisis de Vibraciones.

4. Obligaciones de la PLANTA XYZ:

En el caso de de que se realice el contrato de servicio de Análisis de Vibraciones con Usufructo de la Licencia ExpertALERT™, PLANTA XYZ se verá en la obligación de:

- Proporcionar la información necesaria de los equipos para la programación de MIDs. (Es el levantamiento de datos técnicos de los equipos a ser monitoreados como por ejemplo: tipo de equipo conductor (Motor Eléctrico (C.A. – CC), Motor de Combustión Interna, Turbina), tipo de acople (sólido, flexible, acople directo),

elemento conducido (Bomba, compresor, generador eléctrico), los mismos que nos será de mucha utilidad para determinar las frecuencias de fallas de los equipos.

- Adquirir en el mercado local las bases de bronce y el adhesivo Loctite 325 con su correspondiente activador, necesario para la instalación de las bases de bronce.
- Designar personal de la planta para pegar las bases de bronce que deberán colocarse en los puntos de lectura de vibraciones que designe el técnico de Ivan Bohman C.A.
- Autorizar a los técnicos de Ivan Bohman C.A. a ingresar a la PLANTA XYZ con el propósito de levantar la información de los equipos y realizar las lecturas de vibraciones.

CAPÍTULO 7

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. CONCLUSIONES:

- Las tendencias del mantenimiento así como la tecnología avanzan con la rapidez de la vida cotidiana en un mundo globalizado. Nuestro País ingresa poco a poco al sistema de globalización y es necesario contar con un personal capacitado y confiable que establecerá la base del desarrollo de la industria. El presente proyecto constituye un aporte a nuestro País en una rama poco explorada y explotada en la industria Ecuatoriana. La implementación de un sistema de mantenimiento predictivo-proactivo requiere no únicamente de la poderosa herramienta del análisis de vibraciones sino del apoyo y sustentación en evaluación de condición de maquinaria y personal y un planteamiento de metas que involucren a todo el personal de la empresa.
- El sistema ExpertALERT™ es una poderosa herramienta que, al ser aprovechada de buena manera, se convierte en un pilar fundamental en la planificación del mantenimiento por su versatilidad en los diagnósticos y recomendaciones así como en la presentación de tendencias por modo de fallo.
- Debido a la complejidad del tema, el presente manual se ha centrado en el análisis de los equipos más comunes en la industria. Cabe recalcar que cada planta tiene aplicaciones diferentes que merecen un estudio a fondo de inspección, recopilación de datos y elaboración de tendencias.
- Este proyecto constituye una aplicación teórico-práctica que debe tener un seguimiento constante para su mayor entendimiento. Es una guía inicial que servirá como procedimiento en las industrias que pretendan implementar un sistema de análisis de vibraciones.
- Si bien es cierto, la inversión inicial en tecnología y capacitación del personal representan un gasto fuerte para una empresa, el beneficio a largo plazo justifica de sobremanera dicha inversión.

- Los centros de educación superior que promuevan carreras técnicas en las ramas industriales y mecánicas deben enfocarse en la enseñanza de este tipo de temas, con el fin de proveer a sus alumnos de herramientas para su mejor desempeño en el campo laboral.
- El conocimiento

7.2. RECOMENDACIONES:

- Es imperativo que toda empresa centre su inversión en capacitación y adiestramiento de su personal, así como en programas de liderazgo y trabajo en equipo que creen un verdadero sentido de pertenencia en cada miembro de una organización.
- Es fundamental utilizar los formatos y guías presentados en este proyecto para el estudio y análisis de la maquinaria en un proceso introductorio a la implementación del un sistema de análisis de vibraciones.
- La selección e ingreso de espectros para conformación de la línea base constituyen el 90% del poder del sistema ExpertALERT™. Por ello, es imperativo que este procedimiento sea realizado por personal capacitado y experimentado. Adicionalmente, debe realizarse un mantenimiento de esta base de datos promedio a fin de actualizarla a medida que las condiciones mecánicas de los equipos varíen.
- Es imperativo investigar constantemente y realizar pruebas en campo continuamente ya que esta rama se basa en un 80% en la experiencia. Los procedimientos aquí expuestos pueden ser fácilmente adaptados a cualquier industria y aplicación en general.
- Las empresas ecuatorianas deben comenzar a pensar de manera futurista con filosofías de compromiso y desarrollo. Es altamente recomendable generar gerentes New Age con filosofía: “saber mandar es saberlo hacer primero”.
- La malla curricular debe ser analizada y re-estructurada totalmente. Existen ciertas materias que, sin dejar de ser importantes, pueden ser agrupadas y otras que pueden extender su plan de estudios.

REFERENCIAS

Bibliográficas:

- Moubray, J., “Applying and Implementing Risk-based Inspection Programs. Maintenance & Reliability. Hydrocarbon processing”, 1997, p.43.
- Pérez, C., “Evolución del mantenimiento”, Soporte y Cia. Ltda., 2003.
- Duffuaa, S., Campbell, J., “Sistemas de mantenimiento, planeación y control”, Limusa Wiley, 2002.
- Tranter, Jason, “Book II: Creation. Alert Analysis Systems”, DLI Engineering Corporation, v.3.0., 2005.
- Cullen, Terence, “DCA-50 Manual User’s Manual”, DLI Engineering Corporation, v.1.0., 2005.
- Predict-DLI, “Operating the Multiplane Balance Program”, DLI Engineering Corporation, 1999.
- Saavedra, P., Estupiñán E., “Evaluación de la severidad vibratoria”, Universidad de Concepción, Laboratorio de Vibraciones mecánicas, 2002.
- Irene, F., “Mantenimiento Predictivo”, Universidad Gran Mariscal de Ayacucho, Escuela de mantenimiento industrial, 2004.
- Altmann, C., “El análisis de aceite como herramienta de Mantenimiento Proactivo en flotas de maquinaria pesada”, Consorcio Ambiental de la Plata, 2005.

Páginas de internet:

- www.tpmonline.com
- www.online.dliengineering.com/rep
- www.solotermografia.com
- www.ellmansueiro.com.ar
- www.solomantenimiento.com

A N E X O S