

**METODOLOGIA PARA EL MANTENIMIENTO BASADO EN CONDICIÓN EN  
COMPRESORES RECIPROCANTES DE GAS**

**EDWIN RIOS RENGIFO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE CIENCIAS FISICOQUIMICAS  
ESCUELA DE INGENIERIA DE PETROLEOS  
ESPECIALIZACION EN INGENIERIA DEL GAS  
BUCARAMANGA**

**2010**

**METODOLOGIA PARA EL MANTENIMIENTO BASADO EN CONDICIÓN EN  
COMPRESORES RECIPROCANTES DE GAS**

**ING. EDWIN RIOS RENGIFO**

**Monografía Presentada Para Optar El Título De Especialista En Ingeniería Del  
Gas**

**DIRECTOR**

**ING. ISNARDO GONZALEZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE CIENCIAS FISICOQUIMICAS  
ESCUELA DE INGENIERIA DE PETROLEOS  
ESPECIALIZACION EN INGENIERIA DEL GAS  
BUCARAMANGA**

**2010**

## TABLA DE CONTENIDO

	<b>PÁG.</b>
INTRODUCCION	12
1. MARCO TEORICO DE LAS ESTRATEGIAS DE MANTENIMIENTO DE EQUIPOS DINÁMICOS.	14
1.1 GENERALIDADES.	14
1.2 DESCRIPCIÓN DE LAS ESTRATEGIAS DE MANTENIMIENTO	16
1.2.1 Mantenimiento Correctivo (MC):	16
1.2.2 Mantenimiento Preventivo (PM)	17
1.2.3 Mantenimiento Productivo Total (TPM)	17
1.2.3.1 Pérdidas en las máquinas.	17
1.2.3.2 Pérdidas en mano de obra:	17
1.2.3.3 Pérdidas en métodos	18
1.2.3.4 Pérdidas en materia prima	18
1.2.3.5 Pérdidas de energía	18
1.2.3.6 Pérdidas en medio ambiente:	18
1.2.4 Mantenimiento Centrado en Confiabilidad. (RCM)	19
1.2.5 Mantenimiento Basado en Condición (CBM)	21
2. DESCRIPCION DE LAS TECNICAS DE MONITOREO UTILIZADAS PARA EQUIPO RECIPROCANTE	23
2.1 GENERALIDADES	23
2.2 VIBRACIONES MECÁNICAS:	25
2.3 ANÁLISIS DE ACEITE - TRIBOLOGÍA:	33
2.3.1 Historia y antecedentes	33
2.3.2 Lubricación	35
2.3.3 Objetivos y campos de aplicación	36

2.3.4 Superficies Concordantes	37
2.3.5 Superficies no Concordantes	38
2.3.6 Tipos de lubricación, Lubricación Hidrodinámica	39
2.3.7 Lubricación Elastohidrodinámica (EHL)	40
2.3.8 Lubricación Marginal	41
2.3.9 Lubricación Mixta	44
2.4 ANÁLISIS DE DESEMPEÑO DINÁMICO PARA MOTORES Y COMPRESORES RECIPROCANTES.	46
2.4.1 Donde se colecta información en motores?	46
2.4.2 Dónde se colecta información en un compresor recíprocante?.	47
3. METODOLOGIA PARA LA CREACION DE UNA ESTRATEGIA DE MANTENIMIENTO BASADO EN CONDICION.	52
3.1 GENERALIDADES:	52
3.2 Paso a paso para la creación de la estrategia.	53
3.2.1 Definición de equipos críticos de la planta compresora de gas recíprocante.	53
3.2.1.1 Criticidad.	53
3.2.2 Lista de tecnologías de monitoreo	54
3.2.2.1 Maquinaria Recíprocante:	54
3.2.2.2 Equipos de propósito general.	55
3.2.2.3 Válvulas	55
3.2.2.4 Equipo Eléctrico.	56
3.2.3 Asociación de cada equipo crítico con la tecnología de monitoreo recomendada.	56
3.2.4 Determinación de las frecuencias de cada tecnología.	57
3.2.5 Ejecución del Programa.	58
3.2.6 Indicadores para el seguimiento de la estrategia y programa de monitoreo.	59
3.2.6.1 Cumplimiento de monitoreos:	59

3.2.6.2 Porcentaje de Acertividad:	60
3.2.6.3 Salud de la planta	60
3.2.7 Cálculo de los beneficios del programa o estrategia de mantenimiento basado en condición.	60
3.2.7.1 Mantenimientos correctivos planeados vs Mantenimientos correctivos:	61
3.2.7.2 Disminución de mantenimientos preventivos	62
3.2.8 Ajuste anual de la estrategia de mantenimiento basado en condición.	63
3.2.8.1 Beneficios económicos del programa	63
3.2.8.2 Impacto en la confiabilidad y disponibilidad de las unidades	63
3.2.8.3 Evaluación de los indicadores propios del programa.	63
4. CONCLUSIONES	65
BIBLIOGRAFIA	66

## LISTA DE FIGURAS

	<b>PÁG</b>
Figura 1. Evolución de las estrategias de mantenimiento.	16
Figura 2. Que es la estrategia de las 5'S?	19
Figura 3. Norma SAE JA 1011	20
Figura 4. Curva P-F	24
Figura 5. Ejes de vibración.	27
Figura 6. Sensores humanos.	28
Figura 7. Spike energy.	29
Figura 8. Onda de vibración.	29
Figura 9. Frecuencia y Período.	30
Figura 10. Amplitud	30
Figura 11. Cascada.	31
Figura 12. Espectro.	32
Figura 13. Ordenes de vibración.	32
Figura 14. Chumacera y manguito	37
Figura 15 Representación de superficies no concordantes	38
Figura 16. Lubricación hidrodinámica	40
Figura 17. Condiciones de película que se requieren para la lubricación	42
Figura 18. Diagrama de barras que muestra los coeficientes de fricción para varias condiciones de lubricación	43
Figura 19 Rapidez del desgaste para varios regimenes de lubricación	44
Figura 20. Puntos medición motor reciprocante.	47
Figura 21. Puntos medición compresor reciprocante.	48
Figura 22. Secuencia de eventos compresor reciprocante.	49
Figura 23. Fallas motores reciprocantes.	50
Figura 24. Fallas compresores reciprocantes.	51
Figura 25. Diagrama paso a paso metodología CBM.	52

## LISTA DE TABLAS

	<b>PÁG</b>
Tabla 1. Rangos de Criticidad.	53
Tabla 2. Ejemplo 1 Matriz CBM parcial.	54
Tabla 3. Tecnologías predictivas recíprocantes.	54
Tabla 4. Tecnologías predictivas equipos generales.	55
Tabla 5. Tecnologías predictivas válvulas.	55
Tabla 6. Tecnologías predictivas equipo eléctrico.	56
Tabla 7. Ejemplo 2 Matriz CBM.	57
Tabla 8. Ejemplo 3 Matriz CBM	57
Tabla 9. Ejemplo programación de monitoreo.	58
Tabla 10. Comparativo Costos Correctivo – Correctivo planeado	61

## RESUMEN

**TITULO:** METODOLOGIA PARA EL MANTENIMIENTO BASADO EN CONDICIÓN EN COMPRESORES RECIPROCANTES DE GAS\*.

**AUTOR:** EDWIN RIOS RENGIFO\*\*.

**PALABRAS CLAVES:** Metodología; Mantenimiento; Condición; Reciprocantes; Compresores de Gas; Técnicas predictivas; Desempeño.

**CONTENIDO:** Los equipos compresores reciprocantes de gas son ampliamente utilizados en el mundo moderno en diferentes escenarios. Mantener la integridad y condición idónea de estos es importante para lograr los objetivos económicos y sociales que brindan en cada tipo de aplicación. El uso de estrategias de mantenimiento modernas permite alcanzar estos objetivos. La gestión de activos como concepto integrador de las filosofías modernas infiere que de los aspectos más importantes que se deben tener en cuenta durante la vida de un activo son la condición y el riesgo. Una de las estrategias que exige el uso de tecnologías modernas es el mantenimiento basado en condición. Las principales tecnologías de mantenimiento predictivo que aplican para plantas compresoras reciprocantes son el análisis de vibración, análisis de aceite y el análisis de desempeño dinámico. Un uso adecuado de estas tecnologías, con las frecuencias óptimas y con el personal capacitado determina el éxito en un programa de mantenimiento basado en condición. El resultado que un gerente de una de estas plantas obtiene al aplicar este tipo de estrategias y tecnologías, se refleja en el sentido económico y de seguridad industrial. En el sentido económico al lograr disminuir los costos de mantenimiento a través de trabajos enfocados e inteligentes sobre las unidades y por lo mismo lograr un mayor ciclo de vida. En el sentido de seguridad, se logra disminuir los riesgos asociados en una planta de gas por conocer de manera muy precisa la condición de las máquinas y poder generar planes de contingencia y mitigación ante los posibles riesgos.

---

\* Monografía

\*\* Facultad de Ingenierías físicoquímicas, Escuela de Petróleos, Director. Isnardo Gonzalez

## ABSTRACT

**TITLE:** CONDITION BASED MAINTENANCE METODOLOGY FOR GAS RECIPROCATING COMPRESSORS\*.

**AUTHOR:** EDWIN RIOS RENGIFO\*\*.

**KEY WORDS:** Methodology; Maintenance; Condition; Reciprocating; Gas Compressors; Predictive techniques; Performance.

### CONTENT:

The reciprocating gas compressors are abroad used in the actual word in different sceneries. Maintain the integrity and good condition of these equipments it is very important to reach the economical and social objectives, of each one application. Using modern maintenance strategies is the key to reach these objectives. The asset management like a integrator concept in the today management philosophies indicate once of the most important subject to take in account are the condition and risk of the assets. One of the maintenance strategies that require the use of modern techniques is the Condition Based Maintenance. The main predictive maintenance technologies that apply for reciprocating gas compressors are mechanical vibrations, oil analysis and dynamic performance analysis. The managers in charge of a reciprocating gas compressors plant that use a condition based maintenance strategy can expect a good results since economical and safety point of view. Since economical point of view, he can expect significant maintenance costs reductions through a smart jobs on the compressors units, and by the way to reach big life cycle period. Since safety point of view, it is possible to diminish the associate risks that came with the operation of this kind of plants, through risk mitigations control plans due to the knowledge the exact condition of each unit of the plant.

---

\* Monograph

\*\* Physical Chemistry Engineering Faculty, Petroleum Engineering Department, Director. Isnardo Gonzalez

## INTRODUCCION

Desde la aparición de los primeros sistemas mecánicos en la humanidad, se hizo necesario crear formas o métodos para mantener estos sistemas y sus componentes. Durante la mayor parte de la historia no habían existido equipos mecánicos complejos y por ende no se exigía tampoco un cuidado muy especializado. No fue sino hasta la revolución industrial cuando se empezaron a hacer presentes equipos mecánicos de mayor complejidad empezando por las máquinas de combustión interna o reciprocantes. Al crecer el uso de estos tipos de unidades y de otros elementos que fueron evolucionando, las plantas de trabajo industrial fueron requiriendo una organización administrativa para realizar el mantenimiento de todos los equipos. Así fue que se paso de una simple estrategia de mantenimiento correctivo, de arreglar las cosas solo cuando se dañen, hasta ya crear planes de mantenimiento preventivo, luego proactivos y hoy en día estrategias integrales dentro de conceptos avanzados de gestión de activos.

Ya específicamente hablando sobre el desarrollo de la ingeniería y uso del gas, y más precisamente del gas natural, se utilizan equipos para su compresión y transporte a lo largo de regiones y países. En los equipos de transporte y compresión se utilizan ampliamente los compresores reciprocantes de gas por su versatilidad y flexibilidad de montaje y transporte, entre otras ventajas.

Por el uso ampliado y generalizado de estos compresores reciprocantes de gas se resalta la importancia de diseñar y crear estrategias de mantenimiento adecuadas a las necesidades de operación y disponibilidad que exige el mundo moderno y de atención oportuna de suministro a la población, comercio e industria.

Una de las estrategias de mayor practicidad y aplicabilidad, es la estrategia de mantenimiento basado en condición. Esta estrategia hace uso extensivo de las tecnologías llamadas de inspección o predictivas de diagnóstico para establecer lo más claramente posible la condición de los equipos y así realizar trabajos de mantenimiento focalizados y precisos sobre las unidades.

Ilustramos en esta monografía una metodología para la creación de esta estrategia, mantenimiento basado en condición, para una planta compresora de gas con unidades reciprocantes. Esta metodología guía de manera secuencial a un líder o encargado de mantenimiento en la creación de la estrategia de tal manera que obtengan los mejores resultados en la gestión de mantenimiento y así ayudar a conseguir los objetivos que se plantean en el desarrollo de esta actividad de importancia económica y social.

# 1. MARCO TEORICO DE LAS ESTRATEGIAS DE MANTENIMIENTO DE EQUIPOS DINÁMICOS.

## 1.1 GENERALIDADES.

Desde el principio de la humanidad, siempre se ha tenido la necesidad del mantenimiento de sus equipos y utensilios, aún las mas rudimentarias herramientas. La mayoría de las fallas experimentadas habrían sido el resultado del abuso, y aún hoy en día pasa. Siendo así, se hacía mantenimiento solo cuando ya no era posible seguir utilizando la herramienta o equipo. Esto fue llamado “**Mantenimiento correctivo o a la falla**”.

A través del desarrollo de la historia de la humanidad y en modo específico y del de la manufactura y uso de herramientas, no se presentaron mayores avances sino hasta que llego la era industrial o revolución industrial. Mas sin embargo durante finales del siglo XIX y comienzos del XX, las labores de mantenimiento seguían orientadas al mantenimiento correctivo. Hechos como la primera y segunda guerras mundiales, el avance tecnológico y de la producción generaron un incremento exponencial del parque industrial, equipos y personal dedicado a las labores de reparación de los equipos y se empezó a notar cada vez más el impacto de las paradas de producción por causas de daños de los equipos productivos. Es por tanto que ante estos hechos cada vez más crecientes y notables que después de la segunda guerra mundial, se desarrolla lo que habría de llamarse el **Mantenimiento Preventivo**, tanto a nivel del desarrollo aeronáutico y del de manufactura de bienes de consumo.

El mantenimiento preventivo, PM, hacia los años 1950, después de la segunda guerra mundial, tomo gran importancia y se empezaron a desarrollar listas de

chequeo preventivos y basados en horas de funcionamiento, siendo estas listas generadas por los constructores de los equipos de producción, manufactura y aeronáutico. Los líderes en esta estrategia serían países como Japón y los Estados Unidos.

Ya una vez se dio inicio y atención a la necesidad de organizar el mantenimiento después de los años 1960 de los equipos y plantas productivas. Las que jalónaron la evolución de las estrategias de mantenimiento, fueron, por su naturaleza histórica, la industria aeronáutica en los Estados Unidos y la manufacturera en el Japón. Nacieron estrategias en el Japón con nombres característicos como el “Mantenimiento Productivo” que mas tarde se llamaría **TPM (Mantenimiento Productivo Total)**.

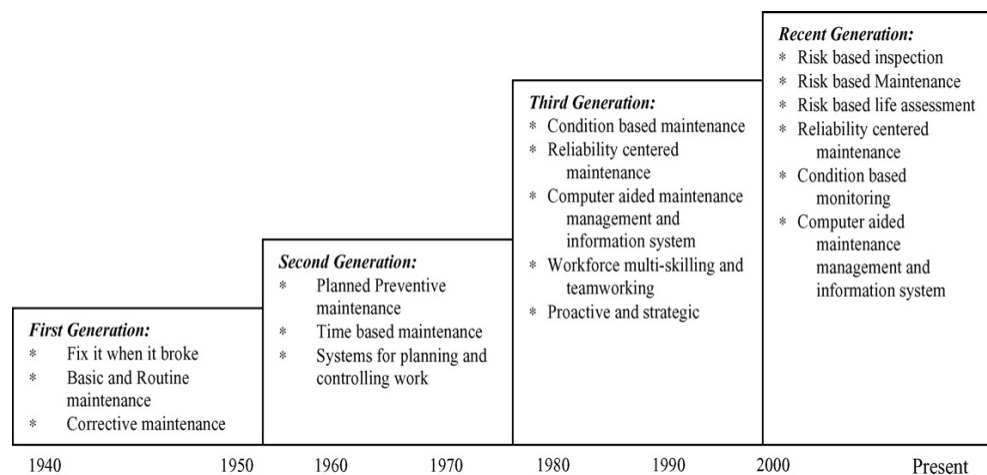
Por otra parte, desde la industria aeronáutica, se empezó a gestar una filosofía enmarcada en términos de confiabilidad, pues centrar el mantenimiento en este término con llevaba a utilizar además de estrategias nuevas para el mantenimiento, incitaba a la utilización de la tecnología también para inspeccionar el estado de los equipos. A partir de entonces hace la aparición de instrumentos y equipos para el monitoreo e inspección de los equipos. Se dio entonces el nacimiento de lo que se llamaría **Mantenimiento Centrado en Confiabilidad-RCM**. La naciente industria petrolera y petroquímica adoptó en su desarrollo esta filosofía, el RCM hacia la década del 70.

El perfeccionamiento de el **TPM** y el **RCM** desde 1980 al año 2000, creó corrientes y herramientas estratégicas para la mejora continua de la gestión del mantenimiento, utilizando herramientas complementarias como el **Mantenimiento Basado en Condición-CBM**, estrategia que se utiliza como aliada de los patrones mayores (TPM y RCM ) y que basa su fuerte en la tecnología de monitoreo y que permite establecer la condición de los equipos dinámicos en funcionamiento.

Con los crecientes avances de la industria mundial y de la industria energética con el aumento de eventos y accidentes de grandes magnitudes, especialmente de la industria petrolera, que afectan notablemente la seguridad en las personas y el medio ambiente, asuntos que han influido en las filosofías de mantenimiento y que las han orientado a lo que se ha llamado **Mantenimiento Basado en el Riesgo RBM**.

En la figura 1. Se muestra la evolución del mantenimiento y de las diferentes corrientes y estrategias utilizadas hasta la fecha.

**Figura 1. Evolución de las estrategias de mantenimiento.**



## 1.2 DESCRIPCIÓN DE LAS ESTRATEGIAS DE MANTENIMIENTO

### 1.2.1 Mantenimiento Correctivo (MC):

Es la más simple y costosa de las estrategias cuando se utiliza sola. Se trata de la corrección de fallas cuando estas se presentan y no tiene ninguna planificación. Es de aclarar que a pesar de los altos costos que pudiera alcanzar utilizar esta estrategia, no significa que no se deba utilizar, siempre y cuando mediante una

metodología que indique que por situaciones de conveniencia o costo beneficio, ya sea por el valor del equipo o circunstancias de inaccesibilidad es válido utilizarla.

### **1.2.2 Mantenimiento Preventivo (PM)**

Esta estrategia se refiere a las inspecciones y cambio de partes de equipos basadas en rutinas periódicas establecidas generalmente por los fabricantes de los equipos o por grupos de expertos dedicados a establecer estas rutinas. Siendo el más utilizado desde los orígenes de las gestiones de mantenimiento dedicadas después de los años 50. Por ser de concepción basada en la prevención y en la planificación, tiene mejores efectos en el manejo de los costos por fallas imprevistas, al evitarlas por inspección. Tiene algunos efectos el uso extendido de esta estrategia y tiene que ver con el cambio de partes que aún no se han deteriorado o que aún tienen vida útil remanente, causando gastos por recambio innecesarios. Igual que el mantenimiento correctivo, si se utiliza de manera coordinada y bajo una metodología correcta es de gran utilidad bajo conceptos de costo beneficio y de conveniencia situacional.

### **1.2.3 Mantenimiento Productivo Total (TPM)**

El gran avance en esta filosofía o estrategia de mantenimiento es integrar al personal de producción y mantenimiento para conservar los equipos de una planta y no dejando solo al personal de mantenimiento en esta tarea. Es estrategia fue originada en el Japón después de la segunda guerra mundial y se trabajo en centrarse en la reducción de fallas mediante enfoques grupales de la compañía y dirigidos a trabajar en aspectos como:

#### **1.2.3.1 Pérdidas en las máquinas.**

#### **1.2.3.2 Pérdidas en mano de obra: ausencias y accidentes.**

**1.2.3.3 Pérdidas en métodos:** en gestión de la empresa, pérdidas por movimientos, organización de la línea, transporte, ajustes y medidas.

**1.2.3.4 Pérdidas en materia prima:** pérdida de materiales, rechazos, herramientas y moldes.

**1.2.3.5 Pérdidas de energía:** electricidad y gas

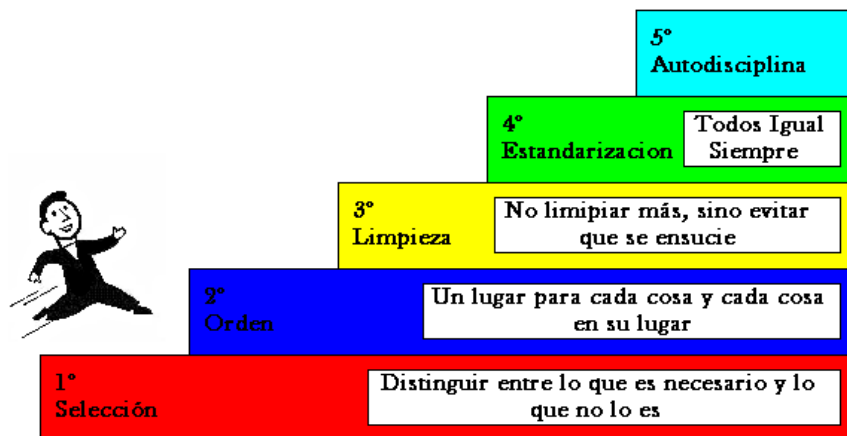
**1.2.3.6 Pérdidas en medio ambiente:** emisiones y vertidos.

Este enfoque en reducir las pérdidas en los aspectos anteriormente descritos se soportan en la filosofía japonesa del mejoramiento continuo

O gamba kaizen, creada por W.E. Deming y que se enmarca dentro de la filosofía de las 5 s. Y que se llama así por que utiliza 5 palabras que empiezan por S y determinan un lugar digno para trabajar:

- Clasificar. (Seiri).
- Orden. (Seiton)
- Limpieza. (Seiso).
- Limpieza Estandarizada. (Seiketsu).
- Disciplina. (Shitsuke).

**Figura 2. Que es la estrategia de las 5'S?**  
**¿QUÉ ES LA ESTRATEGIA DE LAS 5'S?**



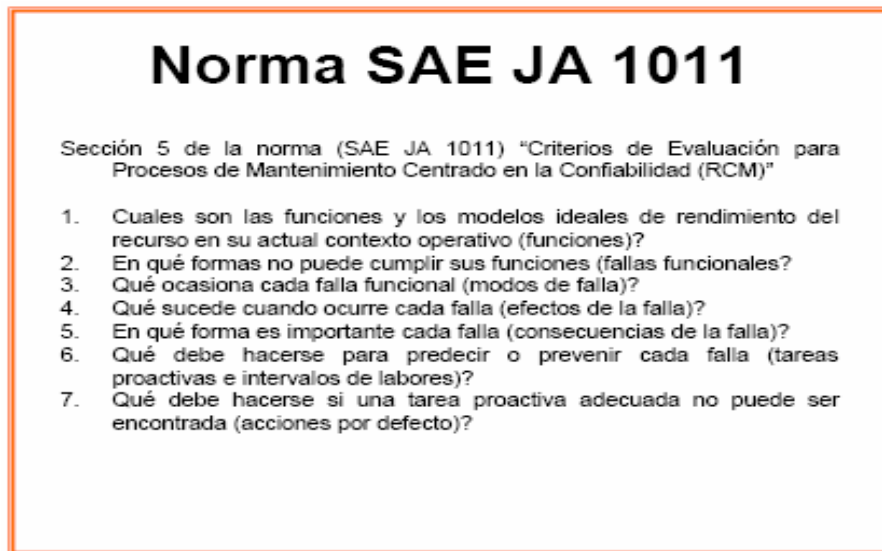
#### **1.2.4 Mantenimiento Centrado en Confiabilidad. (RCM)**

La estrategia RCM nació de la industria aeronáutica hacia los años 60, y se enfocaba por una parte en preservar la función de los equipos, más que mantener en si el equipo, y por otra en determinar las consecuencias de las fallas y así mismo crear acciones para mitigarlas o controlarlas. Como podemos observar el contexto operativo se convierte en el centro de las acciones de mantenimiento más que considerar los equipos aislados, muy paralelo este concepto con el del TPM , en el sentido de que se globalizan las acciones de mantenimiento para hacerlas participes del proceso productivo u operativo. Esta metodología se derivó posteriormente hacia la industria petrolera y petroquímica quienes tomaron ventajas de sus beneficios. Para desarrollar las tareas de mantenimiento basadas en el RCM se establecieron 7 pasos que mediante la resolución de sus interrogantes desarrollan la estrategia a seguir:

- Cuáles son las funciones y los modelos ideales de rendimiento del recurso en su actual contexto operativo (Funciones).?
- En que formas no puede cumplir sus funciones (Fallas funcionales)?
- Que ocasiona cada falla funcional (Modos de falla).?
- Que sucede cuando ocurre cada falla (Efectos de la falla).?
- En qué forma es importante cada falla (Consecuencias de la falla).?
- Que debe hacerse para predecir o prevenir cada falla (tareas proactivas e intervalos de labores).?
- Qué debe hacerse si una tarea proactiva adecuada no puede ser encontrada (acciones por defecto)?

Los anteriores criterios de evaluación se han descrito y definido en la norma SAE JA 1011 que estandariza el uso de la estrategia RCM.

**Figura 3. Norma SAE JA 1011**



El criterio de evaluación número 6, es decir Qué debe hacerse para predecir o prevenir cada falla (tareas proactivas e intervalos de labores)?, ha permitido desarrollar estrategias y herramientas que permiten dar cumplimiento a este

punto. Dentro de las herramientas más útiles se encuentra el análisis de causa raíz de fallas **RCFA** (por sus siglas en inglés Root Cause Failure Analysis). Esta herramienta metodológica trata de prevenir la repetición de fallas mediante un análisis concienzudo por expertos en el área y estandarizar sus soluciones. Otra herramienta poderosa es crear una estrategia de monitoreo, que se le dio el nombre de **Mantenimiento Basado en Condición CBM** (por sus siglas en Inglés Condition Based Maintenance). La describimos a continuación.

### **1.2.5 Mantenimiento Basado en Condición (CBM)**

Como indicábamos anteriormente, esta estrategia resulta complementaria a las necesidades del **RCM** y trata de generar tareas predictivas o de inspección rutinarias para los equipos críticos de una planta. Para el desarrollo de estas tareas predictivas o de inspección se hace uso de técnicas y tecnologías de avanzada para lograr establecer la condición de estos equipos objeto. Es de anotar que esta estrategia de mantenimiento, por su formato se puede iniciar sin necesidad de haber establecido un **RCM**, dando resultados en el corto plazo mientras se logra o se desarrolla completamente la estrategia **RCM**. Siendo así, el **CBM** aporta un avance significativo en establecer la salud de una planta, evitando fallas catastróficas y permite tomar planes de acción para prevenir salidas intempestivas de los equipos críticos.

Para el objetivo del **CBM**, se han desarrollado tecnologías de inspección que hoy en día son de uso imprescindibles en las plantas modernas. Las más utilizadas son:

- Detectores de vibraciones mecánicas.
- Detectores de calor infrarrojo – Termografía.
- Análisis de aceite.
- Determinación de la eficiencia y desempeño mecánico de equipos reciprocantes.

- Evaluación de motores eléctricos.
- Inspección visual remota.
- Tendencia a parámetros operacionales.

El uso combinado eficientemente, dependiendo de los equipos de la planta, de las anteriores técnicas y tecnologías ofrecerá los mejores resultados costo beneficio.

## **2. DESCRIPCION DE LAS TECNICAS DE MONITOREO UTILIZADAS PARA EQUIPO RECIPROCANTE**

### **2.1 GENERALIDADES**

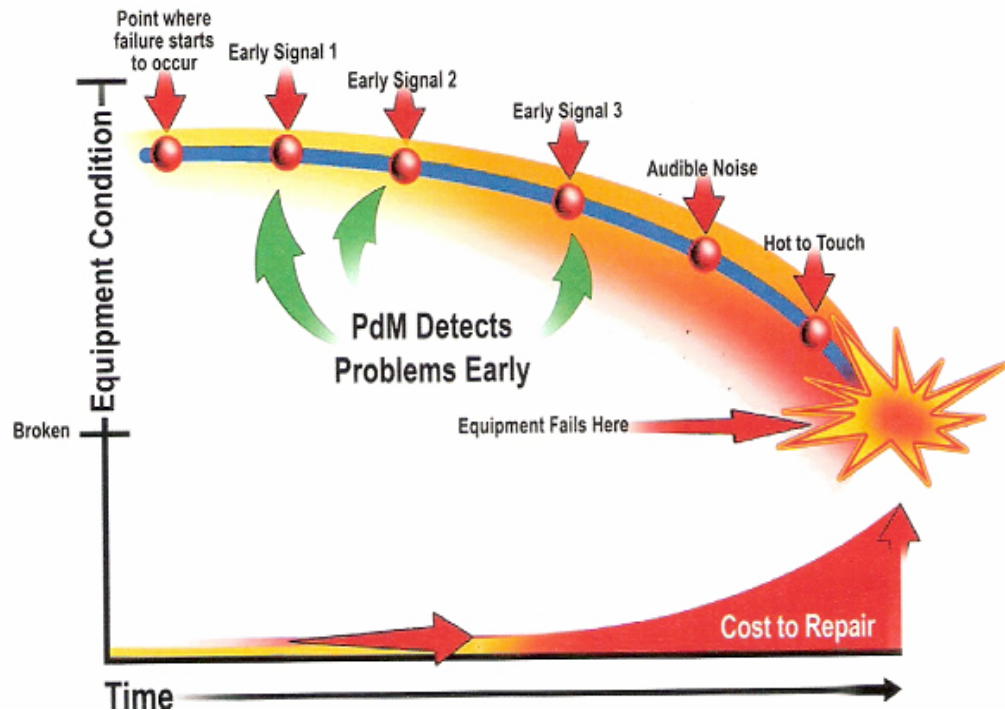
Los últimos 70 años el desarrollo de las técnicas para monitorear equipos tanto estáticos como dinámicos ha avanzado dramáticamente, más aún en los últimos 25 años, el cambio ha sido exponencial en conjunto con el crecimiento de la electrónica y las computadoras.

En los equipos dinámicos, como motores de combustión interna, bombas, motores eléctricos etc. técnicas de monitoreo para el análisis de condición han sido progresivamente desarrolladas. Entre las cuales las vibraciones mecánicas, el análisis fisicoquímico del aceite lubricante, el ultrasonido, la evaluación de motores eléctricos y la termografía son las técnicas más utilizadas y desarrolladas.

Es importante definir los conceptos de falla potencial y falla funcional. Una falla potencial es un indicativo que en un equipo se presenta un inicio de una falla pero que aun no suspende o inhabilita la funcionalidad del elemento o equipo que la presenta. Una falla funcional se da cuando la falla llego al punto en que impide que el equipo o elemento puedan seguir prestando el uso para lo que se tiene en un contexto operativo. Es de estos dos conceptos que al diferenciarse en su definición, se crea un espacio de tiempo entre la falla potencial y la falla funcional y es allí donde entran a jugar un papel muy valioso las técnicas de monitoreo, pues al poder visualizar con cierta precisión el desenlace desde la falla potencial a la falla funcional se pueden tomar acciones que le permitirán a los encargados de los equipos prever y controlar los riesgos inherentes en esta situación, como por ejemplo impedir una falla catastrófica o planear una parada para corregir los

problemas. A esta ventana de control se le puede representar mediante una curva llamada P-F (Ver figura 4).

**Figura 4. Curva P-F**



La aplicación entonces de diferentes técnicas de monitoreo lograrán generar ahorros o evitar pérdidas antes que ocurra la falla funcional. Según un estudio realizado por un investigador de gestión de activos norteamericano Keity Mobley se pueden llegar a tener los siguientes beneficios por el uso de estas técnicas:

- En Costos de mantenimiento – Reducción hasta el 50%.
- En Fallas inesperadas – Reducción Hasta el 55%
- En Tiempos de reparación – Reducción hasta el 60%
- En Inventario de Repuestos – Reducción hasta el 30%.
- En Incremento del MTBF hasta el 30%.
- En Incremento de Disponibilidad hasta el 30%.

Describiremos a continuación las técnicas de monitoreo más representativas.

## **2.2 VIBRACIONES MECÁNICAS:**

Desde que aparecieron los primeros instrumentos musicales especiales los de cuerda, la gente ya mostraba un interés por el estudio del fenómeno de las vibraciones, por ejemplo, Galileo encontró la relación existente entre la longitud de cuerda de un pendulo y su frecuencia de oscilación, además encontró la relación entre la tensión, longitud y frecuencia de vibración de las cuerdas.

Estos estudios y otros posteriores ya indicaban la relación que existe entre el sonido y las vibraciones mecánicas.

A través de la historia, grandes matemáticos elaboraron importantes aportaciones que hicieron del fenómeno de las vibraciones toda una ciencia, tan así que hoy en día se ha convertido en una de las mas estudiadas y aplicadas en la industria.

Podemos mencionar entre otros, Taylor, Bernoulli, D' Alembert, LaGrange, Fourier, etc. La ley de Hooke en 1676 sobre la elasticidad, Coulomb dedujo la teoría y la experimentación de oscilaciones torsionales, Rayleigh con su método de energías, etc. Fueron grandes físicos que estructuraron las bases de las vibraciones como ciencia.

En la actualidad, las vibraciones mecánicas es el fenómeno en el cual la gente está en continuo contacto y cuyos efectos difieren.

El buen funcionamiento de los amortiguadores de un automóvil. El mal aislamiento de maquinaria que pueda dañar la infraestructura de la misma y zona aledaña, ruido causada por maquinaria. Son ejemplos de algunos ejemplos.

Un fenómeno de la cual las maquinas temen es la llamada resonancia, cuyas consecuencias pueden ser serias.

Por otro lado el buen funcionamiento de la maquinaria industrial es un fenómeno que requiere de una constante inspección, es decir, el mantenimiento predictivo; este juega un papel importante en el crecimiento económico de una empresa, ya que predecir una falla es sinónimo de programación de eventos que permite a la empresa decidir el momento adecuado para detener la maquina y darle el mantenimiento.

El análisis de vibración juega un papel importante en el mantenimiento predictivo, este consiste en tomar medida de vibración en diferentes partes de la maquina y analizar su comportamiento.

El estudio de las vibraciones mecánicas también llamado, mecánica de las vibraciones, es una rama de la mecánica, o más generalmente de la ciencia, estudia los movimientos oscilatorios de los cuerpos o sistemas y de las fuerzas asociadas con ella.

**Definición:** Vibración mecánica es el movimiento de vaivén que ejercen las partículas de un cuerpo debido a una excitación.

Existe una relación entre el estudio de las vibraciones mecánicas del sonido, si un cuerpo sonoro vibra el sonido escuchado está estrechamente relacionado con la vibración mecánica, por ejemplo una cuerda de guitarra vibra produciendo el tono correspondiente al # de ciclos por segundo de vibración.

Para que un cuerpo o sistema pueda vibrar debe poseer características potenciales y cinéticas. Nótese que se habla de cuerpo y sistema si un cuerpo no tiene la capacidad de vibrar se puede unir a otro y formar un sistema que vibre;

por ejemplo, una masa y resorte donde la masa posee características energéticas cinéticas, y el resorte, características energéticas potenciales.

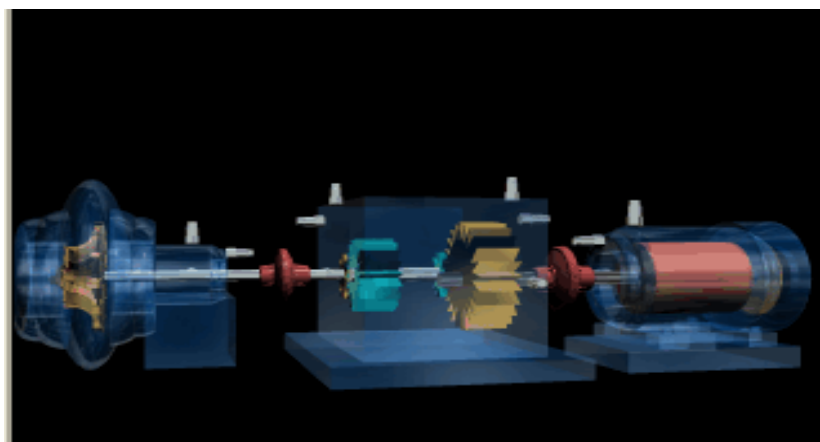
Otro ejemplo de un sistema vibratorio es una masa y una cuerda empotrada de un extremo donde la masa nuevamente forma la parte cinética y el cambio de posición la parte potencial.

Ya para el caso específico de máquinas industriales como bombas, motores, equipos reciprocantes que son soportados por rodamientos o chumaceras se puede definir la vibración como aquellas fuerzas que están vinculadas con todos los elementos rotativos: El eje, las bolas del rodamiento, las palas del ventilador, mas las fuerzas provenientes de maquinas de los alrededores.

Si el conductor del movimiento (por ejemplo, un motor) esta desalineado, lo verás en la vibración. Incluso si la maquina esta mal atornillada, traqueteará y se notará en la vibración.

Por lo tanto, es razonable pensar, que si mides la vibración y la analizas con la experiencia necesaria, puedes determinar si existe algún problema de la maquina.

**Figura 5. Ejes de vibración.**



La gente lleva midiendo vibración durante años y años. Todavía hoy la gente suele escuchar a la maquina y tener una idea de su estado. Como ayuda usaban un destornillador que ponían entre la oreja y la superficie de la máquina, para escuchar a los cojinetes y rodamientos.

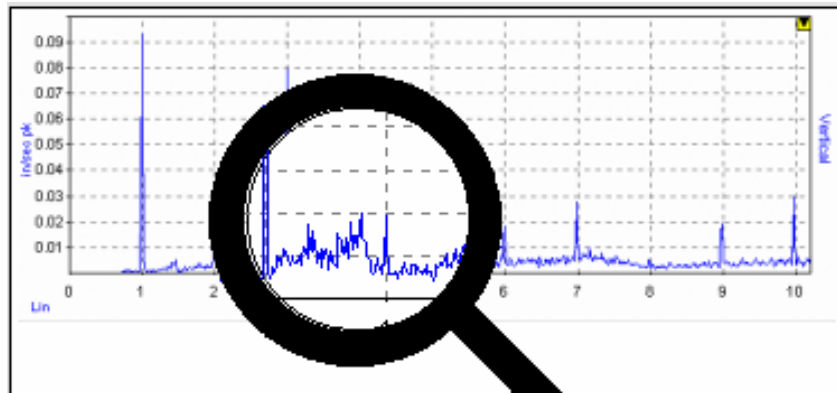
Pero entonces llego el medidor de vibraciones. Daba una indicación global del nivel de vibración. Era más sensible que el oído, pero realmente no podía distinguir entre los diferentes tipos de fallas

**Figura 6. Sensores humanos.**



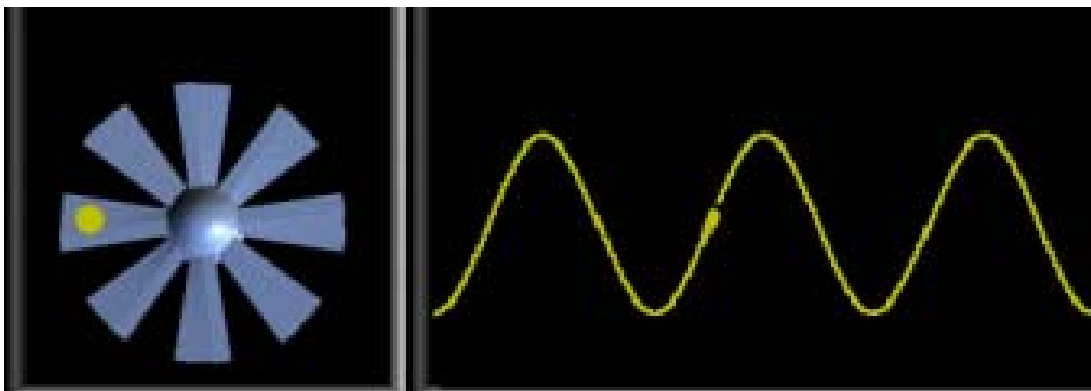
Una vez que la gente comprendió la naturaleza de la vibración, se desarrollaron nuevos medidores de vibración que se centraron en ciertas frecuencias (generalmente altas), para dar una indicación sobre los posibles problemas en los rodamientos. Algunos de ellos todavía se usan hoy en día, habrán oído hablar de “shock pulse”, “Spike energy”, “HFD”, y otros.

**Figura 7. Spike energy.**



**Onda de Vibración:** La onda sinusoidal, es una representación de cómo la vibración cambia instantáneamente con el tiempo. La onda temporal es parte integral del monitoreo y análisis de vibraciones.

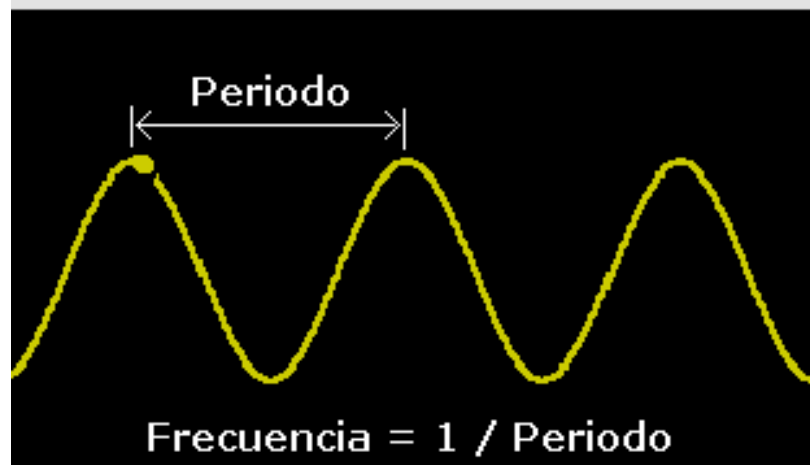
**Figura 8. Onda de vibración.**



Si se fuese a medir el tiempo entre dos picos, se estaría obteniendo el periodo de la onda. La frecuencia es la inversa del periodo.

Generalmente se habla de la frecuencia en términos de ciclos por minuto “CPM”. Aunque las unidades de ciclo por segundo son mas fáciles de comprender, utilizamos el termino Hertzio, Hz.

**Figura 9. Frecuencia y Período.**

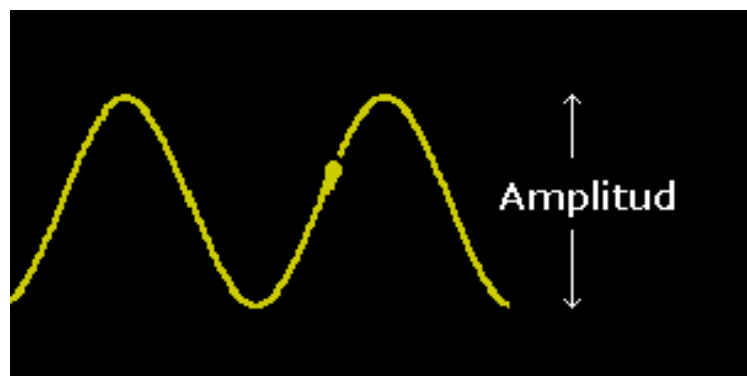


La amplitud nos indica la severidad de la vibración, y es igual a la “altura” de los ciclos.

Cuando consideramos la amplitud en el mundo de las vibraciones, introducimos una serie de términos nuevos. La amplitud pico a pico es la cantidad medida entre el “fondo” del valle” y el máximo valor que alcanza el pico.

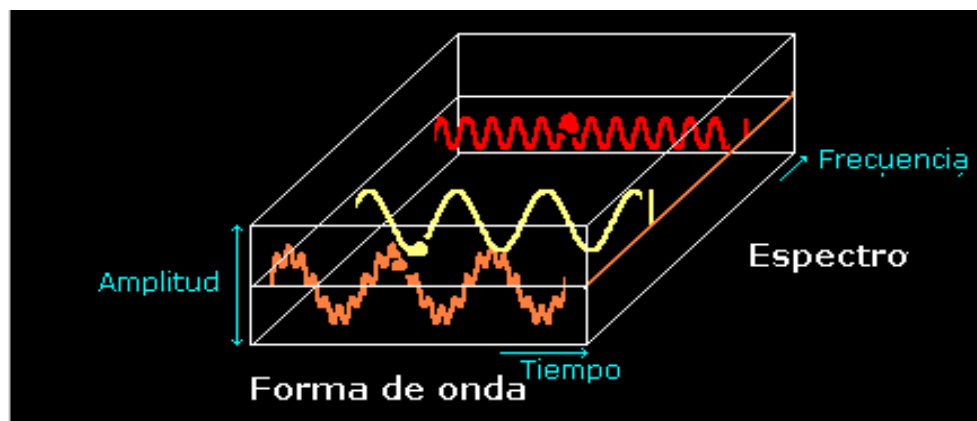
La amplitud de pico, es la cantidad medida entre el cero y el máximo valor del pico.

**Figura 10. Amplitud**



**Espectro de vibración:** El concepto de espectro consiste en que cualquier onda temporal, no importa su complejidad, esta constituida de muchas ondas sinusoidales de diferentes frecuencias y amplitudes. Se puede decir que la FFT es simplemente descomponer la onda en ondas individuales, y después representarlas en un espectro.

**Figura 11. Cascada.**

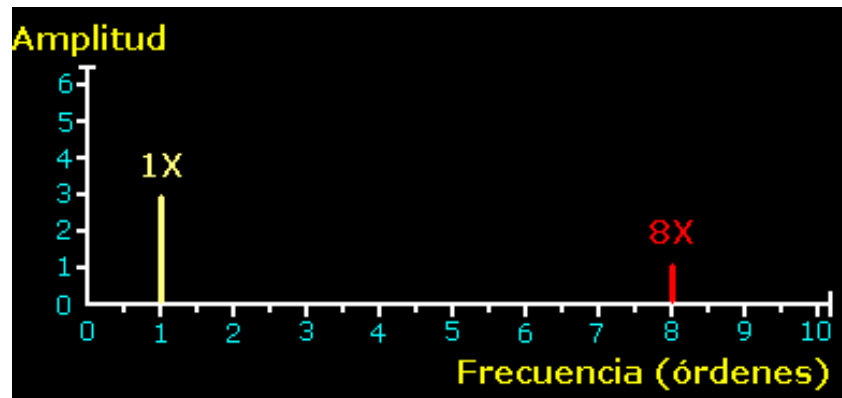


Cada línea en el espectro representa una señal individual. La altura de la línea representa la amplitud, y la posición a lo largo del eje “x” es la frecuencia.

La frecuencia puede ser representada por un valor absoluto, generalmente Hertzios (ciclos por segundo) o CPM.

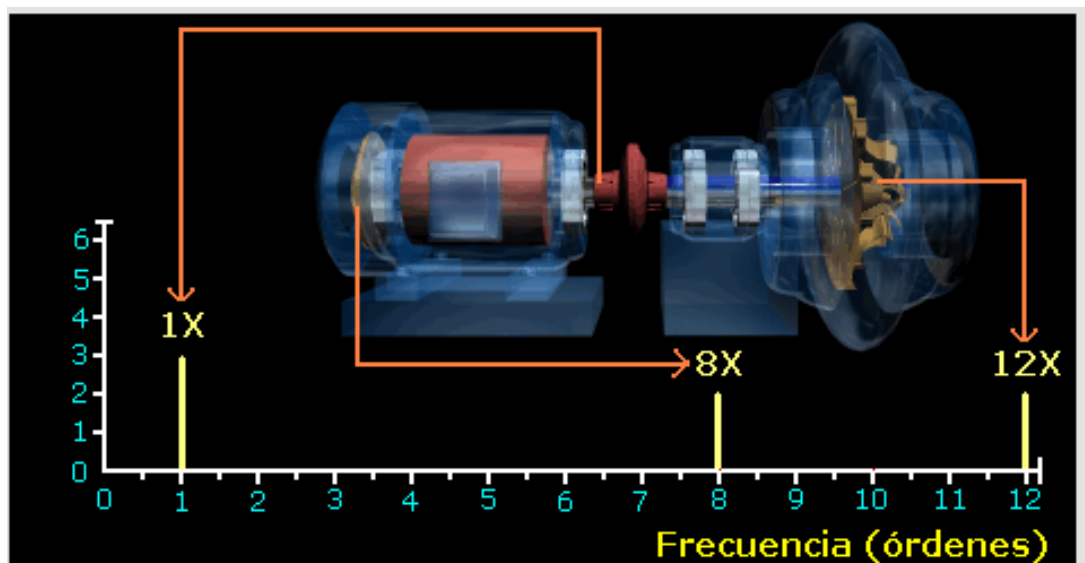
Mas allá de representar la frecuencia en CPM en el espectro, podemos dividir todas las frecuencias por la velocidad de la maquina, entonces las unidades se mostraran en ordenes. Por lo tanto, la línea del espectro a la velocidad de máquina corresponderá a 1X.

Figura 12. Espectro.



Las frecuencias de fallo son usadas para ayudarnos a diagnosticar fallas en maquinaria rotativa. Estos cálculos nos permiten saber donde aparecerán los picos en el espectro, es decir, a que frecuencia son generadas.

Figura 13. Ordenes de vibración.



## **2.3 ANÁLISIS DE ACEITE - TRIBOLOGÍA:**

### **2.3.1 Historia y antecedentes**

La Tribología podría parecer algo nuevo, pero es solo la percepción, solamente el término como tal lo es, ya que el interés en temas relacionados con la disciplina existe desde antes de que la historia se escribiera. Como un ejemplo, se sabe que las “brocas” realizadas durante el periodo Paleolítico para perforar agujeros o para producir fuego, eran “fijados” con rodamientos hechos de cornamentas o huesos.

Los documentos históricos muestran el uso de la rueda desde el 3500 A.C., lo cual ilustra el interés de nuestros antepasados por reducir la fricción en movimientos de traslación. Los egipcios tenían el conocimiento de la fricción y los lubricantes, esto se ve en el transporte de grandes bloques de piedra para la construcción de monumentos y pirámides. Para realizar esta tarea utilizaban agua o grasa animal como lubricante.

El artista científico renacentista Leonardo Da Vinci fue el primero que postuló un acercamiento a la fricción. Da Vinci dedujo la leyes que gobernaban el movimiento de un bloque rectangular deslizándose sobre una superficie plana, también, fue el primero en introducir el concepto del coeficiente de fricción. Desafortunadamente sus escritos no fueron publicados hasta cientos de años después de sus descubrimientos. Fue en 1699 que el físico francés Guillaume Amontons redescubrió las leyes de la fricción al estudiar el deslizamiento entre dos superficies planas.

Muchos otros descubrimientos ocurrieron a lo largo de la historia referentes al tema, científicos como Charles Augustin Coulomb, Robert Hooke, Isaac Newton, entre otros, aportaron conocimientos importantes para el desarrollo de esta ciencia.

Al surgir la Revolución Industrial el desarrollo tecnológico de la maquinaria para producción avanzó rápidamente. El uso de la potencia del vapor permitió nuevas técnicas de manufactura. En los inicios del siglo veinte, desde el enorme crecimiento industrial hasta la demanda de una mejor tribología, el conocimiento de todas las áreas de la tribología se expandió rápidamente

La tribología es la ciencia y tecnología que estudia la **lubricación, la fricción y el desgaste** de partes móviles o estacionarias. La lubricación, la fricción y el desgaste tienen una función fundamental en la vida de los elementos de maquinas.

El termino tribología viene del término griego **tribos**, que significa frotamiento o rozamiento y **logía** que viene a ser ciencia, por tanto la traducción literal será “**la ciencia del frotamiento**”.

La mayoría de las consecuencias de la fricción y el desgaste se consideran negativas, tales como el consumo de energía y la causa de las fallas mecánicas, sin embargo existen beneficios fundamentales de la fricción y el desgaste. La interacción neumático y el piso por ejemplo o el zapato y el suelo, sin los cuales trasladarse sería imposible.

La fricción sirve como el mecanismo de conexión inherente en los nudos, los clavos y el conjunto tuerca tornillo.

El esfuerzo de diseño no solo debe ser menor que el esfuerzo permisible y la deformación no debe exceder ningún valor máximo, sino que la lubricación, la fricción y el desgaste (consideraciones tribológicas) también deben ser apropiadamente comprendidas para que los elementos de maquinas se diseñen con éxito.

Es reconocida como fuente de gran potencial para economizar recursos financieros además de la preservación de activos físicos, materias primas y recursos energéticos. También como una ineludible forma de hacer Mantenimiento Proactivo en equipos y maquinarias.

Como en la resistencia de materiales, la tribología es la base para cada diseño de ingeniería de elementos de maquinas. Casi ningún elemento de maquina no depende de consideraciones tribológicas.

Dentro de los tres grupos inherentes que comprende trataremos inicialmente de la lubricación que es el que justamente nos interesa mas, en otras palabras como tratar los efectos que produce la fricción, el desgaste y en consecuencia el remedio es una visión proactiva hacia una lubricación racional y efectiva.

### **2.3.2 Lubricación**

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

El lubricante en la mayoría de los casos es aceite mineral. En algunos casos se utiliza agua, aire o lubricantes sintéticos cuando hay condiciones especiales de temperatura, velocidad, etc.

Históricamente es interesante señalar que únicamente con la mejora de los procesos de fabricación de elementos metálicos (a partir de la revolución industrial) y el aumento de las velocidades de giro de ejes y elementos rodantes

se ha podido obtener los valores de disponibilidad que actualmente tenemos con ellos.

### **2.3.3 Objetivos y campos de aplicación**

El objetivo de la lubricación es reducir el rozamiento, el desgaste y el calentamiento de las superficies en contacto de piezas con movimiento relativo.

La aplicación típica en ingeniería mecánica es el cojinete, constituido por muñón o eje, manguito o cojinete.

Campos de aplicación:

- Cojinetes del cigüeñal y bielas de un motor (vida de miles de Km.).
- Cojinetes de turbinas de centrales (Confiabilidad del 100%).

Los factores a considerar en diseño son técnicos y económicos:

- Cargas aplicadas y condiciones de servicio.
- Condiciones de instalación y posibilidad de mantenimiento.
- Tolerancias de fabricación y funcionamiento; vida exigida y vida útil.
- Costos de instalación y mantenimiento.

**La lubricación por película fluida** ocurre cuando dos superficies opuestas se separan completamente por una película lubricante y ninguna aspereza está en contacto. La presión generada dentro el fluido soporta la carga aplicada, y la resistencia por fricción al movimiento se origina completamente del cortante del fluido viscoso.

El espesor de la película lubricante depende en gran parte de la viscosidad del lubricante tanto en el extremo alto como bajo de la temperatura.

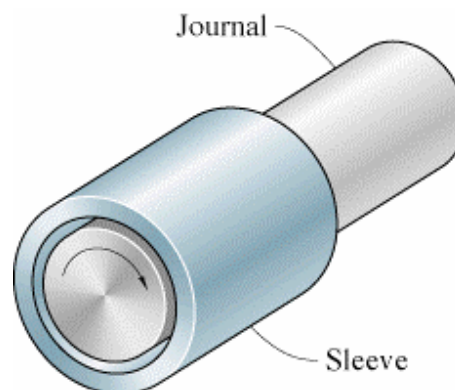
### 2.3.4 Superficies Concordantes

Las superficies concordantes se ajustan bastante bien una con otra con un alto grado de conformidad geométrica, de manera que la carga se transfiere a un área relativamente grande.

Por ejemplo el área de lubricación para una chumacera será de  $2\pi$  por el radio por la longitud.

El área de la superficie que soporta una carga permanente generalmente constante mientras la carga se incrementa.

**Figura 14. Chumacera y manguito**



La chumacera con lubricación de película fluida representada en la figura 14 y los cojinetes deslizantes tienen superficies concordantes. En las chumaceras la holgura radial entre el cojinete y el manguito es por lo general la milésima parte del diámetro del cojinete; en los cojinetes deslizantes la inclinación de la superficie de estos respecto al rodillo de rodadura suele ser muy rara. Un ejemplo de superficie concordante es la junta de la cadera del ser humano.

### 2.3.5 Superficies no Concordantes

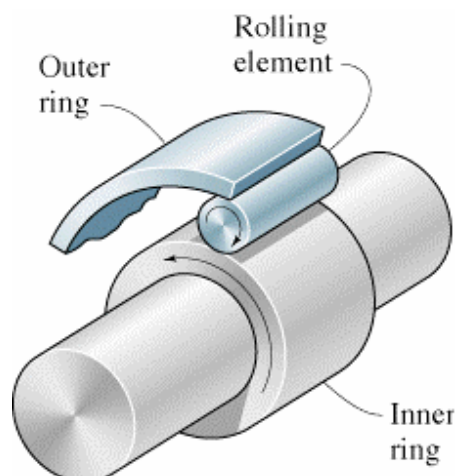
Muchos elementos de maquinas lubricados por una película fluida tienen superficies que no concuerdan entre sí. Entonces un área pequeña de lubricación debe soportar todo el peso de la carga.

Por lo general el área de lubricación de una conjunción no concordante es 3 veces menor que la magnitud que la de una superficie concordante.

El área de lubricación entre superficies no concordantes se agranda bastante con el incremento de carga; pero aun así es más pequeña que el área de la lubricación entre las superficies concordantes.

Ejemplos de superficies no concordantes son el acoplamiento de los dientes de un engranaje, el contacto entre levas y seguidores, y también los cojinetes de elementos rodantes.

**Figura 15 Representación de superficies no concordantes**



### 2.3.6 Tipos de lubricación, Lubricación Hidrodinámica

Tenemos cuatro tipos básicos de lubricación y estos se desarrollan a continuación. La lubricación hidrodinámica se caracteriza en superficies concordantes con una lubricación por película fluida. En este tipo de lubricación las películas son gruesas de manera que se previene que las superficies sólidas opuestas entren en contacto. Con frecuencia se la llama *la forma ideal de lubricación*, porque proporciona baja fricción y alta resistencia al desgaste.

La lubricación de las superficies sólidas se rige por las propiedades físicas del volumen del lubricante, especialmente de la viscosidad; por otra parte, las características de fricción se originan puramente del cortante del lubricante viscoso.

Una presión positiva se desarrolla en una chumacera o en un cojinete de empuje lubricados ambos hidrodinámicamente, porque las superficies del cojinete convergen, y su movimiento relativo y la viscosidad del fluido separan las superficies. La existencia de una presión positiva implica que se soporta la aplicación de una carga normal.

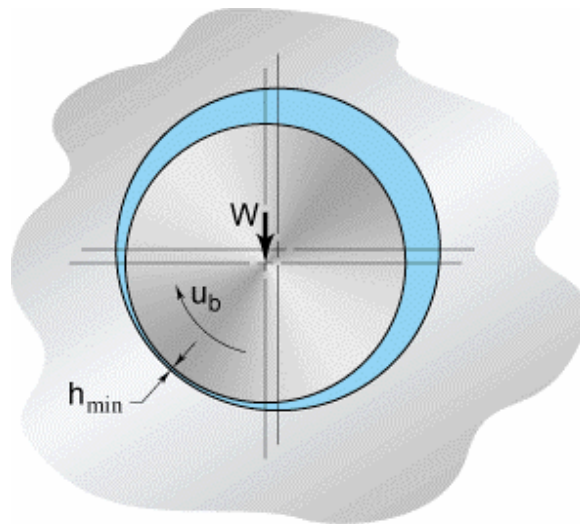
Generalmente la magnitud de la presión que se desarrolla es menor que 5 Mpa y no es lo suficientemente grande para causar una deformación elástica significativa en las superficies.

En un cojinete lubricado hidrodinámicamente el espesor mínimo de la película es función de la carga normal que se aplica  $W$ , de la velocidad  $u_b$ , de la viscosidad absoluta del lubricante  $\eta_0$  y de la geometría ( $R_x$  y  $R_y$ ). En la figura 3 se representa características de la lubricación hidrodinámica. El espesor mínimo de película  $h_{min}$  como una función  $u_b$  y  $W$  para el movimiento deslizante se obtiene mediante la ecuación 1:

Donde el espesor mínimo de la película normalmente excede 1  $\mu\text{m}$ .

**Figura 16. Lubricación hidrodinámica**

$$(h_{\min}) \approx (u_b / W)^{1/2} \text{ Ec. 1}$$



Conformal surfaces

$$p_{\max} \approx 5 \text{ MPa}$$

$$h_{\min} = f(W, u_b, \eta_0, R_x, R_y) > 1 \mu\text{m}$$

No elastic effect

### 2.3.7 Lubricación Elastohidrodinámica (EHL)

Este es un tipo de lubricación que desde su descubrimiento por los profesores británicos Dowson Duncan y Higginson Gordon en la década de los años 50's marcó el verdadero comienzo a la solución de los problemas de desgaste en mecanismos que funcionaban sometidos a condiciones de altas cargas y bajas velocidades y que hasta entonces se manejaban como mecanismos lubricados por película límite ó fluida. La lubricación EHL se presenta en mecanismos en los cuales las rugosidades de las superficies de fricción trabajan siempre entrelazadas y nunca llegan a separarse. En este caso las crestas permanentemente se están deformando elásticamente y el control del desgaste y el consumo de energía depende de la película adherida a las rugosidades. Se podría denominar esta

película como límite pero de unas características de soporte de carga y de resistencia al desgaste mucho más elevadas que las que forma la película límite propiamente dicha. En la lubricación EHL la lubricación límite es permanente, ó sea que no hay mucha diferencia entre las condiciones de lubricación en el momento de la puesta en marcha del mecanismo y una vez que este alcanza la velocidad nominal de operación.

La definición de la lubricación Elastohidrodinámica se puede explicar así: **Elasto:** elasticidad, ó sea que la cresta de la irregularidad en el momento de la interacción con la cresta de la otra superficie se deforma elásticamente sin llegar al punto de fluencia del material; **Hidrodinámica**, ya que una vez que ocurre la deformación elástica la película de aceite que queda atrapada entre las rugosidades forma una película hidrodinámica de un tamaño microscópico mucho menor que el que forma una película hidrodinámica propiamente dicha. En la lubricación hidrodinámica el espesor de la película lubricante puede ser del orden de 5  $\mu\text{m}$  en adelante, mientras que en la EHL de 1  $\mu\text{m}$  ó menos. Normalmente esta lubricación esta asociada con superficies no concordantes y con la lubricación por película fluida.

### **2.3.8 Lubricación Marginal**

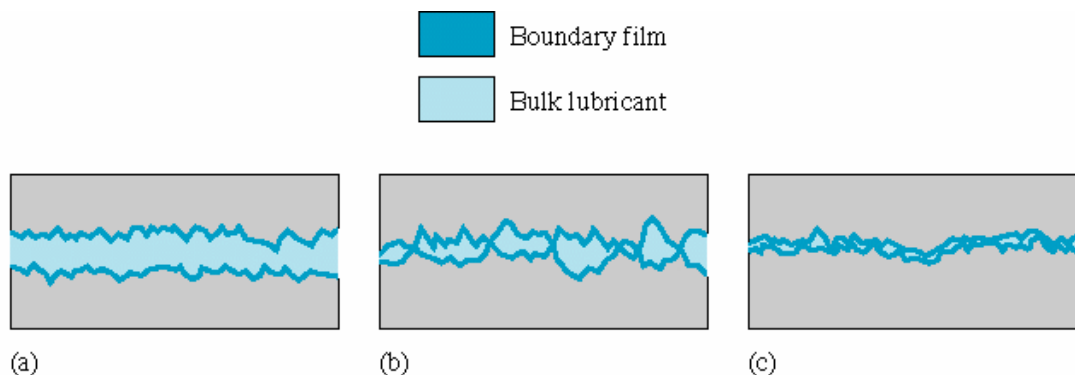
En la lubricación marginal los sólidos no están separados por el lubricante, los efectos de la película fluida son insignificantes y existe un contacto de las asperezas importante. El mecanismo de lubricación por contacto se rige por las propiedades físicas y químicas de las películas delgadas de superficie de proporciones moleculares. Las propiedades volumétricas del lubricante tienen menor importancia y el coeficiente de fricción es esencialmente independiente de la viscosidad del fluido. Las propiedades de los sólidos y la película del lubricante en las interfaces comunes determinan las características de la fricción.

El espesor de las películas de superficie varía entre 1 y 10 nm, dependiendo del tamaño molecular.

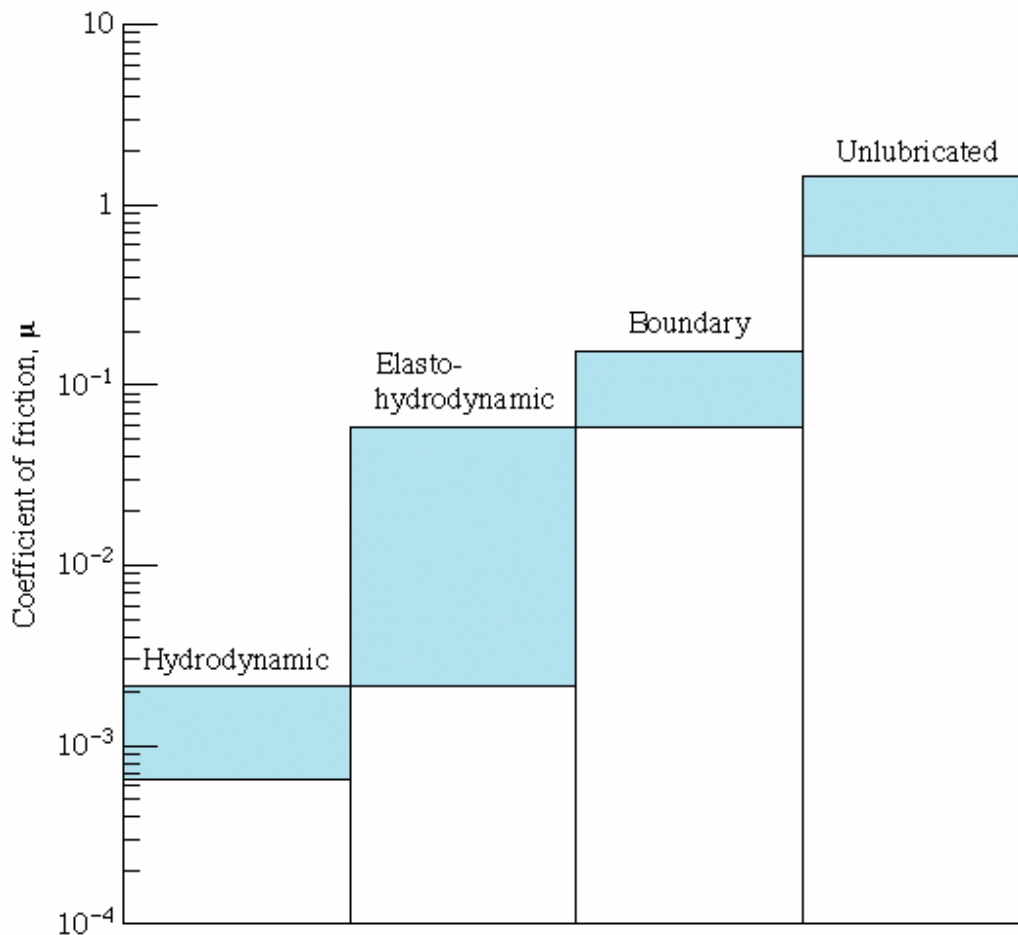
La Figura 17 ilustra las condiciones de película fluida en la lubricación marginal. Las pendientes de la superficie y los espesores de la película se encuentran magnificados por fines didácticos.

En la Figura 18 se muestra el comportamiento del coeficiente de fricción en los diferentes regímenes de lubricación. El coeficiente de fricción medio se incrementa hasta un total de tres veces más al pasar del régimen hidrodinámico, al Elastohidrodinámica, al marginal y al sin lubricación.

**Figura 17. Condiciones de película que se requieren para la lubricación a) lubricación por película fluida: superficies separadas por la masa principal de la película lubricante; b) lubricación mixta; tanto la masa principal del lubricante como la película marginal tienen una función; c) lubricación marginal: el desempeño depende esencialmente de la película marginal.**



**Figura 18. Diagrama de barras que muestra los coeficientes de fricción para varias condiciones de lubricación**

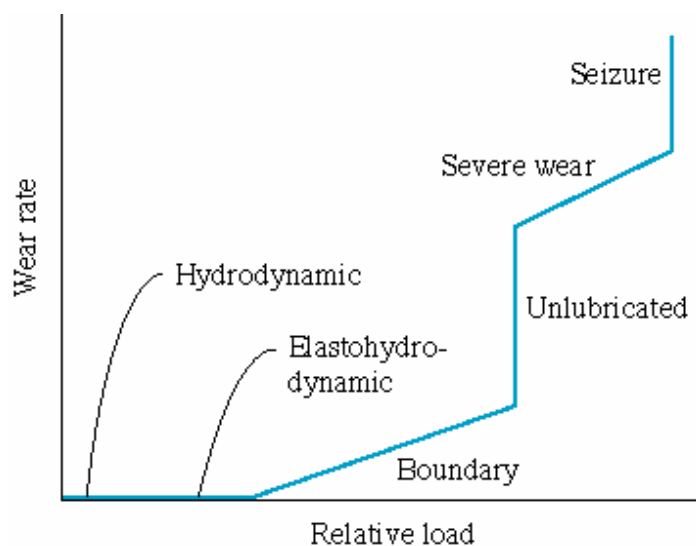


La Figura 19 muestra la tasa de desgaste en los varios regímenes de lubricación determinada por la carga de operación. En los regímenes hidrodinámicos y Elastohidrodinámica existe poco o ningún desgaste pues no hay contacto de asperezas. En el régimen de lubricación marginal, el grado de interacción de asperezas y la tasa de desgaste se incrementan a medida que la carga aumenta. La transición de lubricación marginal a una condición no lubricada se distingue por un cambio drástico en la tasa de desgaste.

A medida que se incrementa la carga relativa en el régimen no lubricado la tasa de desgaste se incrementa hasta que se presentan estrías o cuando ocurre el agarrotamiento y el elemento de maquina ya no opera adecuadamente. La mayoría de las maquinas no operan por mucho tiempo sin alguna lubricación con la consecuencia inmediata de una falla de los elementos involucrados.

La lubricación marginal se utiliza en los elementos de maquinas con cargas pesadas y bajas velocidades de operación, donde es difícil obtener una lubricación por película fluida. Como ejemplo clásico tenemos el funcionamiento de las bisagras de las puertas que utilizan esta lubricación.

**Figura 19 Rapidez del desgaste para varios regimenes de lubricación**



### 2.3.9 Lubricación Mixta

La grafica generada por un rugosímetro tal como lo muestra la Figura 19 una línea media de referencia. Este sistema se basa en la selección de la línea media como centroide del perfil. De esta forma las áreas por encima y debajo de esta línea son iguales, de manera que el promedio zi es cero. Es una condición intermedia entre las películas límite e hidrodinámica, en la cual un buen porcentaje de las crestas

de las dos superficies interactúan presentándose la película límite y otras ya están separadas en las cuales la película límite no desempeña ninguna labor. En lubricación mixta el desgaste y el consumo de energía dependen tanto de las características de la película límite como de la resistencia a la cizalladura de la película fluida y de su estabilidad (IV).

Si las presiones en los elementos de maquinas lubricados resultan ser demasiado altas (alta carga) o las velocidades de operación son demasiado bajas, la película del lubricante se dispersa; existe algún contacto entre asperezas y entonces ocurre este tipo de lubricación. El comportamiento de la conjunción en un régimen de este tipo se rige por una combinación de efectos marginales y de película fluida. La interacción parcial ocurre entre una o más capas moleculares de películas de lubricación marginal. La acción parcial de la lubricación de película fluida se desarrolla en el volumen del espacio entre los sólidos. El espesor promedio de la película en una conjunción de este tipo es menor a una micra pero mayor a 0.01 micras.

Es importante reconocer que la transición de la lubricación hidrodinámica a la mixta no ocurre instantáneamente a medida que la severidad de la carga se incrementa, sino que las presiones dentro del fluido que llena el espacio entre los sólidos opuestos soportan una proporción decreciente de la carga. A medida que ésta se incrementa, la mayor parte la soporta la presión de contacto entre las asperezas de los sólidos. Además el régimen de lubricación para superficies concordantes va directamente de la lubricación hidrodinámica a la mixta.

## **2.4 ANÁLISIS DE DESEMPEÑO DINÁMICO PARA MOTORES Y COMPRESORES RECIPROCANTES.**

Los motores y compresores reciprocantes por su construcción y composición mecánica tienen muchos modos de falla, pero a su vez la mayoría de estos modos de fallas son predecibles utilizando herramientas modernas de monitoreo, que siendo corregidos se evita que impacten significativamente en la disponibilidad y desempeño de estas máquinas.

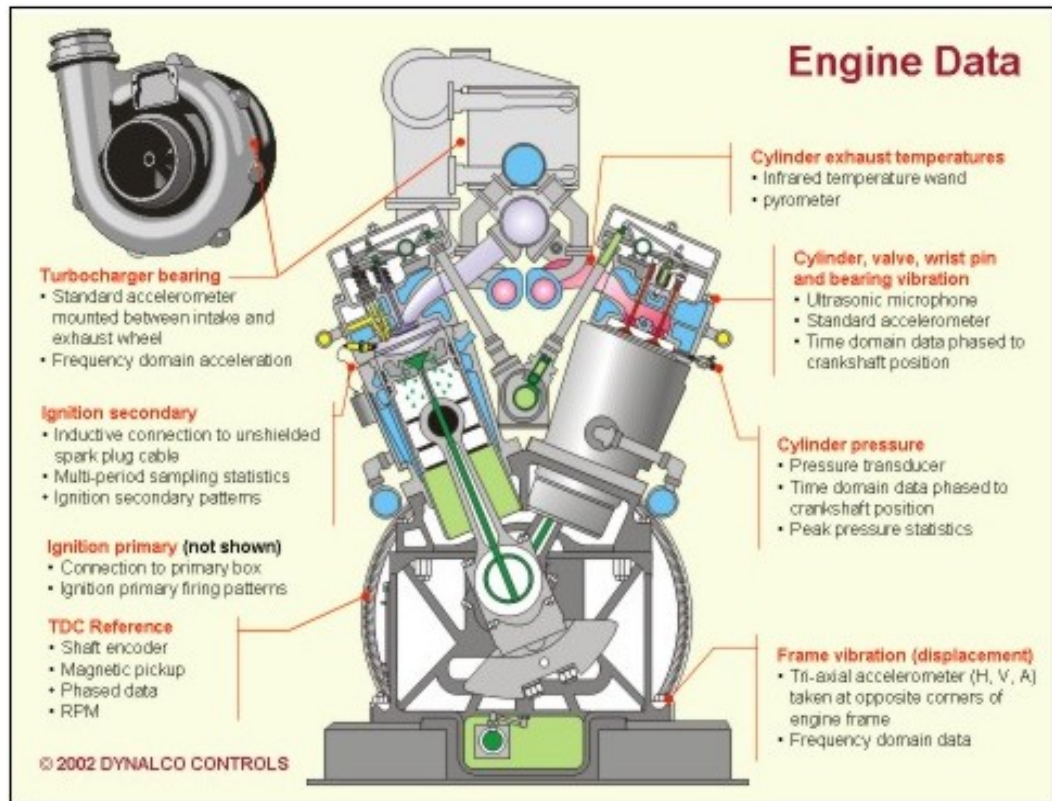
Existe un instrumento o equipo de monitoreo especializado que permite analizar las variables para predecir las fallas en estos equipos reciprocantes. Las variables que se analizan son:

- Vibraciones mecánicas.
- Medición de presión.
- Medición de ultrasonido.
- Medición de voltaje.
- Medición de temperatura.

### **2.4.1 Donde se colecta información en motores?**

En la Figura 20 siguiente se indica donde se obtiene la información para establecer la condición de los elementos de un motor reciprocante, ya sea de 2 ó 4 tiempos.

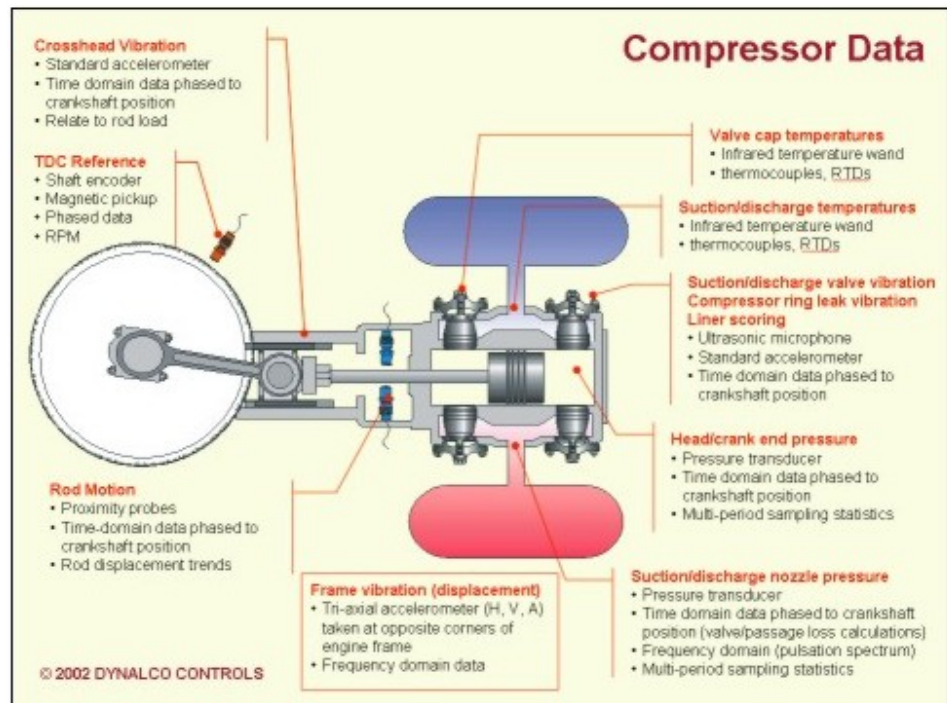
Figura 20. Puntos medición motor recíprocante.



#### 2.4.2 Dónde se colecta información en un compresor recíprocante?

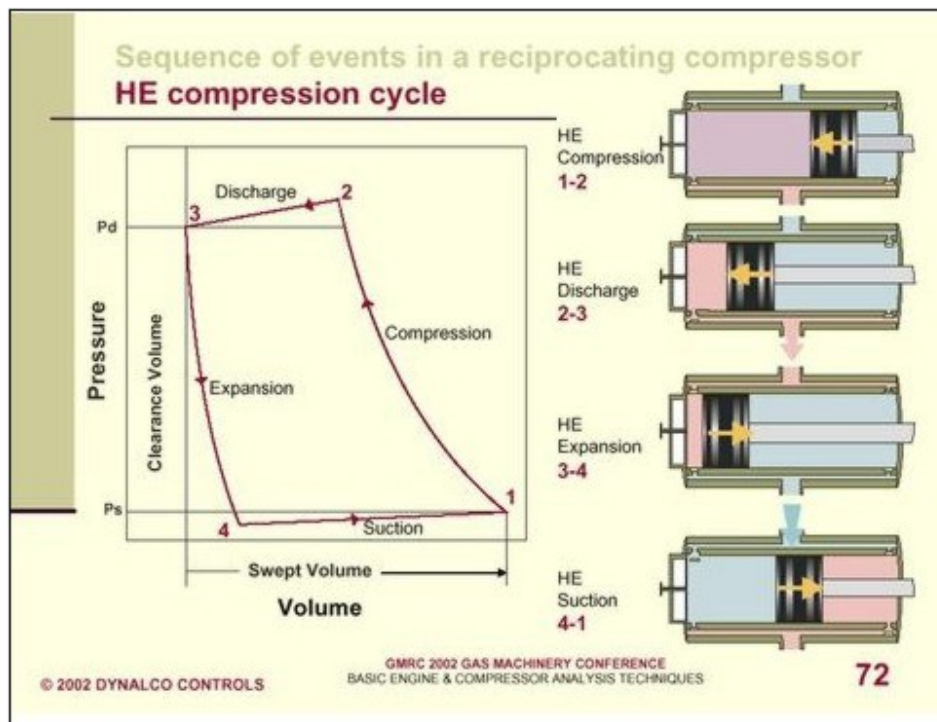
En la Figura 21 se indican los puntos y lugares donde se recolecta la información para su análisis.

**Figura 21. Puntos medición compresor recíprocante.**



**Secuencia de eventos.** Es importante entender la secuencia de eventos que se suceden en los ciclos de los motores y compresores recíprocantes para poder realizar unos análisis completos de las fallas potenciales. Es importante entender cómo se relaciona la presión con el ángulo del cigüeñal, la presión con el volumen y como se comporta la vibración en cada uno de estos eventos. Como ejemplo, en la Figura 22 se muestra la relación de la presión con el volumen en un compresor recíprocante.

**Figura 22. Secuencia de eventos compresor recíprocante.**



### **Análisis de fallas en motores recíprocantes.**

En motores recíprocantes de gas natural se presentan algunas fallas patrones y comunes y las cuales pueden ser diagnosticadas con bastante precisión. Entre las fallas más representativas se encuentran:

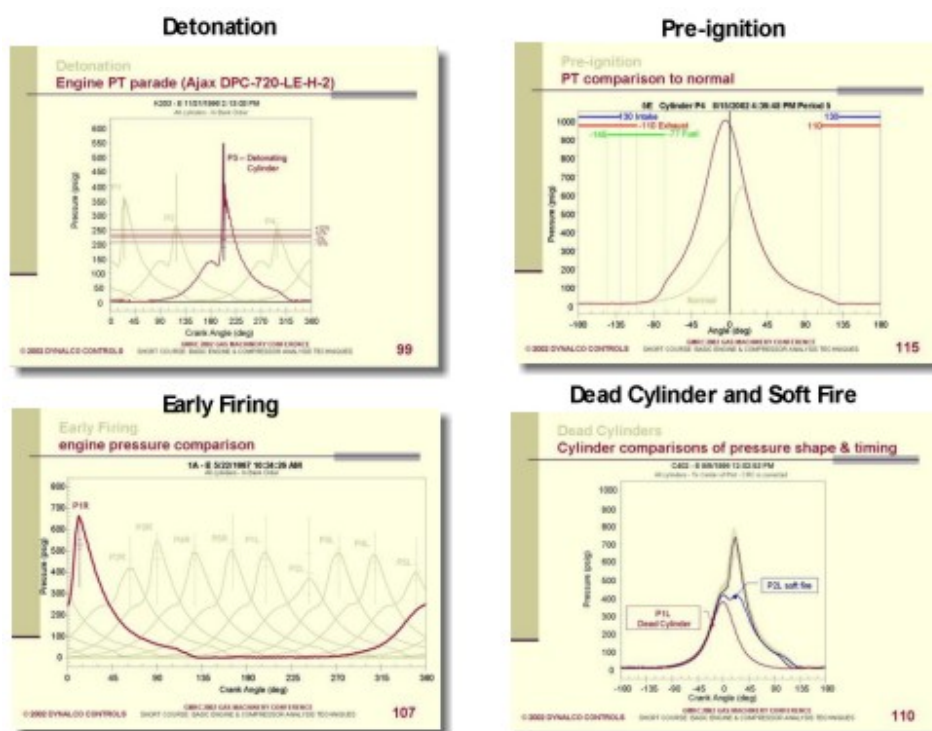
#### **Fallas de Combustión**

- Detonación
- Baja Ignición
- Ingición temprana
- Preignición
- Cilindros Muertos

#### **Condición Mecánica**

- Problemas con válvulas
- Cilindros
- Biela y pin de biela
- Anillos
- Sistema de Ignición.

**Figura 23. Fallas motores reciprocantes.**



**Analizando fallas en compresores de gas natural.**

Igual que en los motores a gas natural, los compresores reciprocantes indican algunas mal funciones que podemos detectar, predecir y controlar para mantener la integridad y los mejores niveles de disponibilidad. Tales fallas se resumen así:

**Condición de las válvulas**

- Fugas en las válvulas de succión y descarga.
- Golpes de válvulas
- Levantamiento excesivo
- Vibración en válvulas
- Resortes rotos

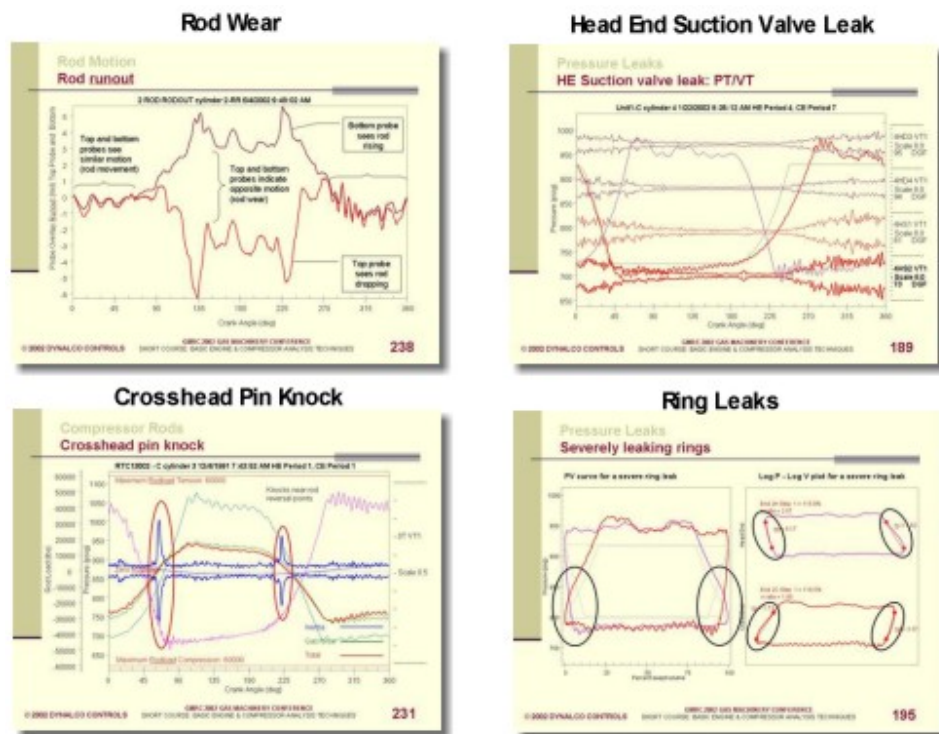
**Condición de los cilindros y vástago**

## Monitoreo del desempeño del compresor.

- Capacidad.
- Potencia (horsepower).

- Fuga en anillos
- Desgaste de pistón y cilindros.
- Desgaste del sello.
- Golpes en la cruceta
- Cilindros rayados
- Rodamientos principales
- Carga excesiva en el vástago
- Desbalance en la carga del vástago

Figura 24. Fallas compresores recíprocentes.



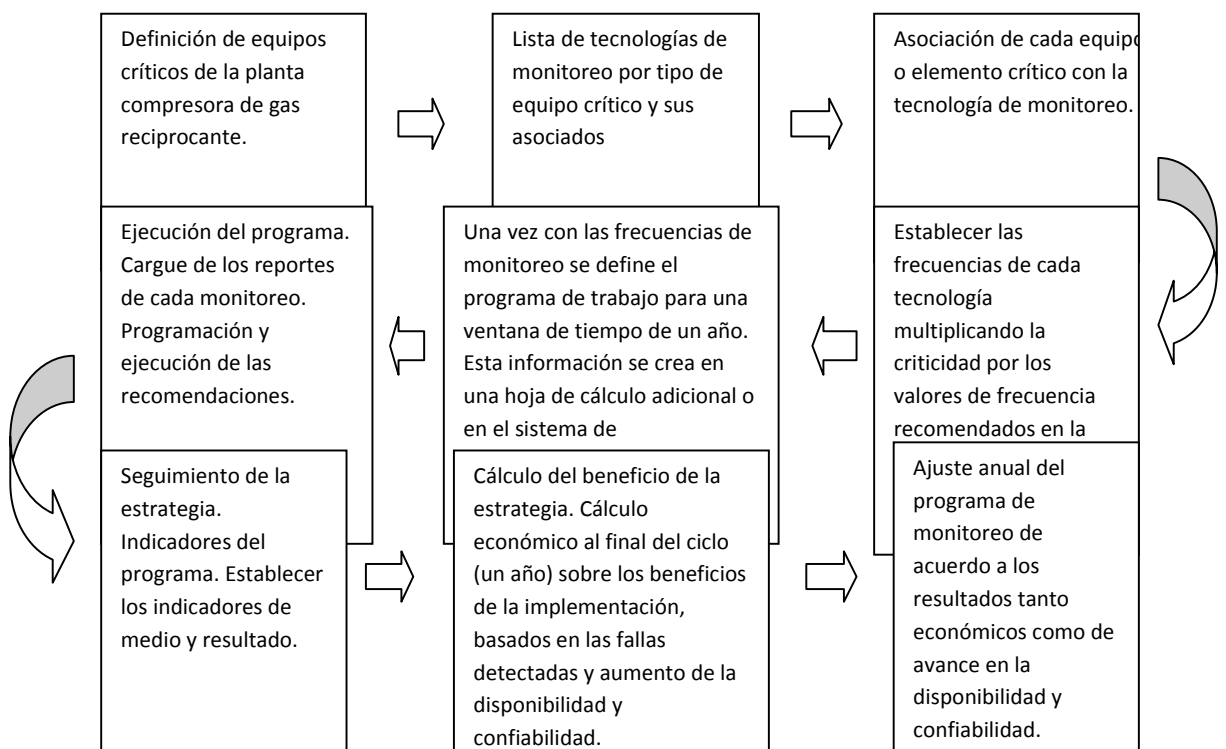
### 3. METODOLOGIA PARA LA CREACION DE UNA ESTRATEGIA DE MANTENIMIENTO BASADO EN CONDICION.

#### 3.1 GENERALIDADES:

Una vez tomada la decisión para crear una estrategia de mantenimiento basada en condición, se deben seguir unos pasos que aquí vamos a describir como guía lógica y que van a ser de gran utilidad para los ingenieros líderes encargados de esta área.

Diagrama de ruta para la creación de la estrategia:

**Figura 25. Diagrama paso a paso metodología CBM.**



### 3.2 Paso a paso para la creación de la estrategia.

#### 3.2.1 Definición de equipos críticos de la planta compresora de gas reciprocante.

Esta fase de gran importancia pues depura los equipos principales y auxiliares que merecen la atención en la estrategia de monitoreo. La definición de equipo crítico, como el rango de criticidad se establece bajo el criterio operacional de cada empresa. En caso que no se tenga una filosofía presente una guía para su determinación.

**3.2.1.1 Criticidad.** Se usa en muchas industrias que la criticidad depende de las consecuencias y probabilidad de las fallas y su impacto en la pérdida en la producción. Estableciéndose según lo anteriormente mencionado los siguientes rangos:

**Tabla 1. Rangos de Criticidad.**

<b>Criticidad 1</b>	Una falla de este equipo puede causar una pérdida inmediata de <b><i>toda la producción</i></b> por un período largo o corto de tiempo.
<b>Criticidad 2</b>	Una falla en este equipo puede causar una pérdida inmediata de <b><i>parte de la producción</i></b> por un período largo o corto de tiempo.
<b>Criticidad 3</b>	Una falla en este equipo puede causar <b><i>pérdida de producción después de un período de tiempo.</i></b>
<b>Criticidad 4</b>	Una falla en este equipo con <b><i>no obvia potencial pérdida de producción.</i></b>

Una vez establecida la criticidad de los equipos de interés en la planta de gas, estos valores de criticidad se relacionarán en la matriz de CBM al frente de cada uno. Así por ejemplo.

**Tabla 2. Ejemplo 1 Matriz CBM parcial.**

<b>Equipo</b>	<b>Tag del Equipo</b>	<b>Criticidad</b>
Motor Recip	M-1A	1
Motor Bomba	BA-1A	2

### 3.2.2 Lista de tecnologías de monitoreo

Por tipo de equipo crítico y sus asociados: Según la naturaleza de cada equipo, existen unas tecnologías predictivas que se consideran las más recomendadas para la inspección de su condición. Para el conocimiento de estas tecnologías y las frecuencias estándar más recomendadas, se realiza a continuación unas tablas resumen por cada tipo de máquina:

#### 3.2.2.1 Maquinaria Reciprocante:

**Tabla 3. Tecnologías predictivas recíprocantes.**

<b>Tecnología Predictiva</b>	<b>Frecuencia</b>
Análisis de Aceite Lubricante	Mensual
Consumo de aceite	Semanal
Análisis de agua de enfriamiento	Mensual
Monitoreo de gas combustible	Diaria
Monitoreo de parámetros operacionales.	Diaria
Análisis de desempeño dinámico - evaluación de la condición mecánica y de desempeño de los cilindros de potencia y comprensión.	Bimestral (Uso continuo) ó Trimestral (Uso no continuo)
Análisis de vibración – Frecuencia espectral y forma de onda	Bimestral (Uso continuo) ó Trimestral (Uso no continuo)
Análisis de gases de exhosto.	Bimestral

### 3.2.2.2 Equipos de propósito general.

**Tabla 4. Tecnologías predictivas equipos generales.**

<b><i>Tecnología Predictiva</i></b>	<b><i>Frecuencia</i></b>
Análisis de vibraciones – Análisis Espectral – Tendencia de parámetros.	6 Semanas
Condición y lubricación de rodamientos.	6 Semanas Diario. Mensual.
Monitoreo de parámetros operacionales.	
Análisis de aceite lubricante.	

### 3.2.2.3 Válvulas

**Tabla 5. Tecnologías predictivas válvulas.**

<b><i>Tecnología Predictiva</i></b>	<b><i>Frecuencia</i></b>
Medición de Ultrasonido Acústico	Trimestral/Por comprobación.

### 3.2.2.4 Equipo Eléctrico.

**Tabla 6. Tecnologías predictivas equipo eléctrico.**

<b><i>Tecnología Predictiva</i></b>	<b><i>Frecuencia</i></b>
Prueba del nivel de aislamiento Prueba de impulso Análisis Infrarrojo (Termografía) Análisis de aceite dieléctrico Cromatografía aceite transformador	12 Semanas.
Análisis de corriente de Motores (MCSA)	2 Años.
Resistencia de aislamiento. Impedancia del banco de baterías.	

### 3.2.3 Asociación de cada equipo crítico con la tecnología de monitoreo recomendada.

Para continuar desarrollando la matriz CBM, llegamos al paso de la asociación de los tipos de equipos que van a ser objeto de monitoreo con la tecnología o tecnologías predictivas recomendadas. Por tanto una vez con la lista de equipos críticos en la hoja de cálculo, insertamos la tecnología para cada uno. Por ejemplo:

**Tabla 7. Ejemplo 2 Matriz CBM.**

Equipo	Tag del Equipo	Critici dad	Tecnologías predictivas			
			Técnica	Frecue ncia (seman as)	Técnica	Frecue ncia (seman as)
Motor Reciproca nte	M-1A	1	Análisis de desempeñ o dinámico		Análisis de Aceite	
Motor- Bom ba	BA-1A	2	Análisis de Vibracione s		Análisis eléctrico motor	

**3.2.4 Determinación de las frecuencias de cada tecnología.**

Basados en la tabla resumen del punto 3.2.2 escogemos las frecuencias (en semanas) recomendadas y las multiplicamos por la criticidad del equipo y obtenemos el valor para incluirlo en la hoja de cálculo. Siguiendo con nuestro ejemplo:

**Tabla 8. Ejemplo 3 Matriz CBM**

Equipo	Tag del Equipo	Critici dad	Tecnologías predictivas			
			Técnica	Frecue ncia (seman as)	Técnica	Frecue ncia (seman as)
Motor Reciproca nte (uso continuo)	M-1A	1	Análisis de desempeñ o dinámico	8	Análisis de Aceite	4
Motor Bom ba	BA-1A	2	Análisis de Vibracione s	12	Análisis eléctrico motor	24

### 3.2.5 Ejecución del Programa.

Ya establecidas las frecuencias de monitoreo y las técnicas podemos ahora crear las rutinas de trabajo a ser llevadas a cabo durante el año. Esta información la podemos tratar de varias maneras. Una de ellas, la más simple, es escoger los mismos equipos de la matriz de cbm, realizar una nueva hoja de cálculo llamada programación de monitoreos y proyectar cada monitoreo en el año así:

**Tabla 9. Ejemplo programación de monitoreo.**

Equipo	Tag	Técnica	Semana No													
			1	4	6	8	10	12	14	16	22	24	30	32	48	
Motor Reciprocante (uso continuo)	M-1A	Análisis de desempeño dinámico														
		Análisis de aceite														
Motor Bomba	BA-1A	Análisis de vibraciones														
		Análisis eléctrico														

De esta manera proyectamos todas las actividades de monitoreo para cada equipo. Se programan semanalmente con el grupo ejecutor o contratista y se lleva un control del avance.

Otra forma más avanzada es si la planta cuenta con un sistema de administración del mantenimiento computarizado (CMMS), en el cual a cada equipo en el sistema se le cargan las rutas de monitoreo y las fechas en las que se deben disparar las ordenes de trabajo en el año.

Ya el trabajo de monitoreo en vivo y en desarrollo, viene la etapa de generación de reportes, con las recomendaciones pertinentes. Estas recomendaciones son el resultado y beneficio final de esta estrategia por lo que la aceptación y ejecución de las mismas es de vital importancia para la estrategia de monitoreo.

### **3.2.6 Indicadores para el seguimiento de la estrategia y programa de monitoreo.**

Los indicadores que planteemos para el seguimiento del programa son claves para vigilar su avance, éxito y establecer las desviaciones de manera oportuna y realizar las correcciones del caso. Entre los muchos indicadores que pudiéramos llevar existen tres que son claves. Los describimos a continuación:

**3.2.6.1 Cumplimiento de monitoreos:** Trata de controlar la ejecución efectiva del programa y se establece mediante la relación entre los monitoreos programados versus los realizados. El porcentaje de cumplimiento debería estar por encima del 95%.

Cumplimiento de monitoreos =  $\frac{[\text{Monitoreos Programados}]}{[\text{Monitoreos Realizados}]}$ .

**3.2.6.2 Porcentaje de Acertividad:** Trata de medir la precisión y conocimiento que el personal que ejecuta el programa de monitoreo tiene tanto sobre la técnica que maneja como de los equipos que monitorea. Esto se verifica mediante las recomendaciones de los diagnósticos que se hacen sobre un equipo y se comprueba al intervenir el equipo. El porcentaje para tener una asertividad aceptable debe estar mayor a un 90%.

Porcentaje de acertividad:  $[\text{Diagnósticos Acertados}] / [\text{Diagnósticos Totales}]$ .

**3.2.6.3 Salud de la planta:** Mediante este indicador podemos establecer la salud de la planta, pues al monitorear los equipos se establece su condición general, bajo el concepto de los colores del semáforo, indicamos cada equipo como se encuentra así: Bueno (verde), Alerta (amarillo) y Falla (rojo). Teniendo como base el 100% de los equipos, se puede establecer que una planta tiene una salud aceptable si se tienen: 80% de los equipos en condición declarada como bueno. 15% en condición en alerta y 5 % en condición de falla.

### **3.2.7 Cálculo de los beneficios del programa o estrategia de mantenimiento basado en condición.**

Es desde luego uno de los puntos más importantes de el uso de esta estrategia, pues dentro de los pilares de la gestión de activos entre los cuales están, mantener la mejor condición y mejor desempeño de los equipos, como la de controlar los riesgos y fallas de los mismos, se encuentra un aspecto preponderante y es referida al aspecto económico. Así es que obtener la mejor condición, mitigar el riesgo de falla al menor costo posible es en definitiva el objetivo de una estrategia de mantenimiento.

Para calcular los beneficios en términos económicos debemos enfocarnos en que específicamente obtenemos al tener un programa de este tipo. Y existen dos claros beneficios:

**3.2.7.1 Mantenimientos correctivos planeados vs Mantenimientos correctivos:** Al tener un tendencia y establecer la condición de un equipo de una manera consistente con el tiempo con una estrategia de CBM, se puede detectar fallas en progreso y es basado en este conocimiento que se percibe el beneficio del programa, pues al comparar el escenario de una falla catastrófica, al no atender una falla en progreso, contra atender un equipo a tiempo antes que se desarrolle la falla catastrófica es que se puede calcular el beneficio económico. Una guía para este cálculo se presenta a continuación:

**Tabla 10. Comparativo Costos Correctivo – Correctivo planeado**

<b>COSTOS CORRECTIVO.</b> (Falla potencial catastrófica)	<b>COSTOS CORRECTIVO PLANEADO</b> (Estrategia CBM)
<p><b>Descripción de las consecuencias de la falla</b> Aquí se describe el escenario de la falla potencial y sus consecuencias. Las consecuencias pueden ser establecidas por un experto del área (p. ej supervisor mecánico) os según un evento histórico o pasado que haya presentado los mismos síntomas. Ejemplo: <i>Falla en impulsadores de un motor recíprocante a gas que conduce un compresor a de gas natural de transporte.</i> Consecuencias de la falla: <i>Fogeo en válvulas, daño en asiento y válvula, cambio de culata, cambio de kit de empaquetaduras de culata,</i></p>	<p><b>Consecuencias de la intervención por recomendación de CBM</b> Aquí describimos las actividades que se verían involucradas en la recomendación de corregir la falla incipiente. Ejemplo: <i>Detección temprana de falla en impulsadores.</i> Consecuencias del cambio: <i>cambio de impulsadores. Parada de la maquina por 3 horas.</i></p>

<i>cambio de impulsadores. Parada de la maquina por 8 horas.</i>	
<b>Cálculo del costo de la falla potencial</b> 1. Costo de mano de obra= Número de personas * costo por hora/por trabajador * # horas de trabajo. 2. Costo de repuestos = # repuestos reemplazados * costo de cada repuesto. 3. Costo pérdida producción= # horas de parada * costo de producción por hora.	<b>Cálculo del costo del cambio específico.</b> 1. Costo de mano de obra= Número de personas * costo por hora/por trabajador * # horas de trabajo. (en este caso es menor que en la falla potencial). 2. Costo de repuestos = # de repuestos específicos a cambiar por la recomendación * por costo de cada repuesto. 3. Costo pérdida producción= # horas de parada * costo de producción por hora.
<b>TOTAL COSTO FALLA POTENCIAL =</b> $C1 + C2 + C3 = CTFP$	<b>TOTAL COSTO RECOMENDACIÓN CBM=</b> $C1 + C2 + C3 = CTCBM$
	<b>CALCULO COSTO BENEFICIO=</b> $CCB = CTFP / CTCBM$ <b>COSTO BENEFICIO = CCB : 1</b>

**3.2.7.2 Disminución de mantenimientos preventivos.** Otra de las ventajas de una estrategia de mantenimiento basada en condición que tiene impacto económico es que a través del conocimiento del estado de un equipo crítico por medio de CBM, se pueden ampliar las frecuencias de mantenimiento preventivo, lo cual implica, disminuir costos tanto en mano de obra, repuestos y producción en un ciclo de trabajo, como por ejemplo de un año. El cálculo lo podemos enfocar de esta manera:

A. Costo Actual de Mantenimientos Preventivos Tipo A – Equipo 1 = Número total de mantenimientos preventivos por año \* Costo de cada mantenimiento preventivo.

B. Costo monitoreo CBM Equipo 1 = Número de monitoreos al Equipo 1 al año \* Costo de cada monitoreo.

C. Ahorro por disminución de mantenimientos preventivos (DMPv):

**Ahorro DMPv** = (# de MPv menos al año \* Costo de MPv) - (# Monitoreos CBM al año \* Costo de cada monitoreo).

De estas dos maneras calculamos los beneficios económicos del programa, con los cuales podemos justificar su implementación.

### **3.2.8 Ajuste anual de la estrategia de mantenimiento basado en condición.**

Al final de cada período usualmente al año, se deben cuantificar los beneficios de la estrategia de mantenimiento basado en condición. El propósito de esta evaluación es determinar los efectos totales que está impactando esta estrategia en la estrategia total del mantenimiento. La evaluación debería ir encaminada en los siguientes aspectos:

**3.2.8.1 Beneficios económicos del programa:** Como lo describimos en la sección anterior debemos realizar la sumatoria total de los impactos económicos de la estrategia CBM.

**3.2.8.2 Impacto en la confiabilidad y disponibilidad de las unidades.** Evaluar el aumento de la confiabilidad y la disponibilidad de los equipos críticos con respecto al año anterior.

**3.2.8.3 Evaluación de los indicadores propios del programa.** Evaluar los indicadores presentados en la sección 3.2.6 y realizar el análisis y las mejoras a la que haya lugar.

Con esto damos por terminada el paso a paso de la metodología. Esta ha sido implementada por el autor de esta monografía en diferentes plantas del país, corroborando su eficacia y éxito.

#### 4. CONCLUSIONES

- La evolución de las estrategias de mantenimiento a través del siglo XX y en lo que se lleva del siglo XXI ha demostrado que es inherente e indispensable utilizar las tecnologías modernas para hacer más eficaz la gestión de mantenimiento. Desde el uso simplemente de los sentidos humanos de forma directa, como el oído o tacto para detectar anomalías en los equipos, hasta avanzadas tecnologías que nos permiten establecer la condición de estos equipos de una forma más precisa y exacta.
- El poder discernir de entre la gran cantidad de propuestas, tanto desde el punto de vista filosófico como el del tecnológico, es una de las tareas más importantes y delicadas de los ingenieros o gerentes de mantenimiento de las plantas que manejan o transportan gas. Pues conocer el trasfondo de cada filosofía de mantenimiento, ya sea TPM, RCM y demás, le van a permitir usar con sentido las que debe aplicar según su contexto operativo y necesidades productivas.
- El tener una guía o metodología para crear una estrategia de mantenimiento basado en condición que le de la orientación a los ingenieros líderes de mantenimiento de una planta compresora de gas que maneja equipos reciprocantes, tanto como equipos de potencia (motores reciprocantes) como los mismos compresores de gas (compresores reciprocantes), les permite obtener resultados concretos y prácticos en la gestión de estos activos, desde el enfoque económico y de integridad de la planta.

## BIBLIOGRAFIA

- N.S. Arunraj, J. Maiti., Risk-based maintenance—Techniques and applications, Journal of Hazard Materials, June 2006
- VENEGAS Sosa, Rolando Alfredo., Manual de las 5's, Administración y gerencia, Noviembre 2005.
- MITCHELL, Jhon S., From vibration measurements to Condition Based Maintenance, Sound and Vibration Magazine, January 2007
- Grupo CBM RMS, Estrategia de Mantenimiento basada en condición para equipo recíprocante mayor, Campo Provincia, Diciembre 2004.
- REVISTA ASSET MANAGEMENT Editions No 001 a 004
- RMS S.A.: soporte técnico y consulta. [www.rms.com.co](http://www.rms.com.co)
- Director Monografía. Ing. Isnardo Gonzalez.