

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA**

ESCUELA DE ESTUDIOS DE POSTGRADO

MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE MANTENIMIENTO



ESTUDIO ESPECIAL DE GRADUACIÓN

**PRIMERA ETAPA DE SELECCIÓN Y MONTAJE PARA UN
SISTEMA DE MONITOREO EN LÍNEA A REDUCTORES
VERTICALES FLENDER KMP PARA MOLINOS
VERTICALES DE RODILLOS EN EL PROCESO DE
FABRICACIÓN DE CEMENTO.**

**INGENIERO MECÁNICO
JULIO RENATO BUEZO PÉREZ**

Guatemala, mayo de 2007

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA**



ESCUELA DE ESTUDIOS DE POSTGRADO

ESTUDIO ESPECIAL DE GRADUACIÓN

**PRIMERA ETAPA DE SELECCIÓN Y MONTAJE PARA UN
SISTEMA DE MONITOREO EN LÍNEA A REDUCTORES
VERTICALES FLENDER KMP PARA MOLINOS
VERTICALES DE RODILLOS EN EL PROCESO DE
FABRICACIÓN DE CEMENTO.**

POR

**INGENIERO MECÁNICO
JULIO RENATO BUEZO PÉREZ**

**AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
MAESTRO EN ARTES EN INGENIERÍA DE MANTENIMIENTO**

Guatemala, mayo de 2007

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Inga. Glenda Patricia García Soria
VOCAL II	Inga. Alba Maritza Guerrero de López
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. Kenneth Issur Estrada Ruiz
VOCAL V	Br. Elisa Yazminda Vides Leiva
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez
EXAMINADOR	Ing. José Arturo Estrada Martínez
EXAMINADOR	Ing. Otto Fernando Andrino González
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi estudio especial de graduación titulado:

PRIMERA ETAPA DE SELECCIÓN Y MONTAJE PARA UN SISTEMA DE MONITOREO EN LÍNEA A REDUCTORES VERTICALES FLENDER KMP PARA MOLINOS VERTICALES DE RODILLOS EN EL PROCESO DE FABRICACIÓN DE CEMENTO.

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería, el 17 de febrero de 2007.

Ingeniero Julio Renato Buezo Pérez

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



Primera etapa de selección y montaje para un sistema de monitoreo en línea a reductores verticales FLENDER KMP para molinos verticales de rodillos en el proceso de fabricación de cemento

Estudio Especial de Graduación

Presentado a la junta directiva
De la facultad de ingeniería
Por

Julio Renato Buezo Pérez

Guatemala, Marzo 2007

RESUMEN

En algunas fabricas de cemento alrededor del mundo, cierto número de reductores FLENDER KMP (engranaje cónico-planetario) para molinos verticales, está en operación. En algunas de ellas se han experimentado problemas mecánicos de similar tipo. La falla de más incidencia ha ocurrido en el cojinete del engranaje sol, en el cojinete radial para guía de la estación de los planetarios y en el acople de manguito. Este último se encuentra entre el engranaje cónico y la estación de planetarios. Es, también, lo que más preocupa, pues su reparación toma varias semanas, más la perdida de producción. Estos puntos son suficientes para catalogar a esta situación como crítica, añadiendo el tiempo de fabricación y entrega de las piezas, pues en algunos casos es de varias semanas.

Hace algunos años en América, los FLENDER KMP eran utilizados en dos plantas: una en América del Sur y la otra en Guatemala. Esto es un indicativo del bajo nivel de experiencia que se tiene sobre estas máquinas. También lo es para que el cojinete del engranaje sol y el acople de manguito se tomen como partes criticas. La probabilidad del daño en el acople (eje dentado y manguito) puede atribuirse a una operación fuerte y deficiencias en la lubricación.

En un molino de este tipo —equipo tan complejo, y con tantos equipos periféricos — todas sus variables están siendo controladas en operación. Sin embargo los niveles de vibración en los distintos puntos de apoyo (cojinetes) de los mecanismos del reductor, quedan de cierta manera a la deriva, puesto que la barrera de control es la medida de la vibración global en la base del molino. Esto impide determinar las verdaderas condiciones de operación del reductor. Para contrarrestar el impacto al que estas deficiencias conlleva, es necesario eliminarlas o controlarlas. En el caso de la lubricación en el acople, se recomienda una modificación al diseño original. Para los efectos de una operación violenta, un sistema de control que operado e interpretado por un

analista en vibraciones, se sume a los ya existentes; que los resultados de los análisis orienten al grupo de operación respecto de aquellas practicas que sobrepasen los limites de una operación segura.

El control de vibraciones específicas, y el seguimiento a sus tendencias, es una herramienta poderosa para lograr los efectos esperados. Por supuesto que el control de las condiciones de operación no se limita al monitoreo de las vibraciones, otras técnicas son esenciales para una interpretación certera, las cuales son mencionadas como referencia o recomendación.

El enfoque principal de este texto es el monitoreo de las vibraciones, y aunque la recomendación principal es el método en línea, se limita a la recolección de datos con un colector para ser analizados de forma periódica en un laboratorio, puesto que el enfoque es sobre la primera parte del proyecto.

INDICE GENERAL

RESUMEN	2
ÍNDICE	4
1. ASPECTOS GENERALES	5
1.1. Generalidades	5
1.2. Planteamiento del problema	5
1.3. Objetivo del trabajo	8
1.4. Justificación del trabajo	9
1.5. Alcance del trabajo	10
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	11
2.1. Causa raíz	11
2.2. Fallas	11
2.3. Plan de acción	12
2.4. Impacto de las fallas	12
2.5. Perfil de riesgo	13
2.6. Vibración	13
2.7. Espectros de vibración	14
2.8. Variable crítica de calidad	14
2.9. Justificación económica	15
2.10. Plan de mantenimiento preventivo	15
2.11. Plan de mantenimiento predictivo	15
3. TRABAJO PROPUESTO	17
3.1. Información disponible	17
3.2. Metodología	17
3.2.1 Preparar la información	18
3.2.2 Analizar la información	23
3.2.3 Ubicar la lógica de lo ocurrido	27
3.2.4 Plan de acción	28
3.2.5 Justificación económica	29
CONCLUSIONES	34
RECOMENDACIONES	36
BIBLIOGRAFÍA	37

1. ASPECTOS GENERALES

1.1 Generalidades

Reductores KMP

Reductores de tipo planetario con engranajes cónicos y triple derivación de potencia, para el accionamiento de molinos verticales.

Carcaza

En algunos casos es de fundición de grafito esferoidal y en otros es de acero.

Engranajes

El juego de engranajes cónicos es cementado. El piñón central y las ruedas planetarias están fresadas, cementadas y los flancos de los dientes pulidos. El engranaje interior del acople (eje dentado) es de acero bonificado altamente aleado, los flancos de los dientes están fresados en el procedimiento envolvente. La compensación de carga se realiza por el engranaje sol auto ajustable, que está unido con el eje del engranaje cónico mediante un acoplamiento de articulación doble.

Cojinetes

Todos los ejes están montados sobre cojinetes. Para las elevadas cargas axiales que proceden de los engranajes cónicos se emplean grupos de cojinetes de rodillos cónicos. En los otros puntos de apoyo también se emplean cojinetes de rodillos. El soporte de la estación de planetarios está unido con la brida de salida y se guía mediante un cojinete radial y mediante un cojinete axial de presión de segmentos. Para la absorción de la elevada carga axial se montó en la parte superior de la carcaza un cojinete de presión de segmentos.

Lubricación

La lubricación y refrigeración se realiza mediante una circulación continua de aceite, con un sistema de abastecimiento montado separadamente.

1.2 Planteamiento del problema

Fallas ocurridas

Los cojinetes centrales que sostienen la mesa (el de la mesa, el del eje dentado en el acople y el del engranaje cónico) son piezas difíciles de medir desde la carcasa, pues con bajas frecuencias de falla (aprox. 220 rpm), sumadas a la ubicación, hace que sea difícil la interpretación de sus vibraciones. Una falla característica reportada en varias máquinas ha sido el desgaste del asiento para el cojinete radial de la estación de planetarios, el cual es difícil detectar con un acelerómetro desde la carcasa, debido a que en este punto se recogen muchas frecuencias de vibración que en un espectro atenúan las frecuencias de falla de los cojinetes y engranajes. Este ejemplo es claro, y demuestra que aunque el análisis de vibraciones es una herramienta muy poderosa, puede perder al analista cuando es mal utilizada. En este caso los puntos de toma y la frecuencia de colección son el principal obstáculo, seguidos muy de cerca por las características del transductor utilizado.

1.3 Objetivos

General

Registrar la experiencia adquirida en la primera etapa de selección y montaje de un sistema de monitoreo de vibraciones en dos reductores FLENDER KMP para molinos verticales de rodillos utilizados en la industria del cemento.

Específicos

1. Explicar de manera breve la teoría de vibraciones.
2. Explicar el procedimiento para establecer niveles de alarma.
3. Que variables de operación son generadoras de vibración.
4. Selección de transductores y elementos de control.
5. Composición de la máquina y puntos de control.
6. Análisis costo – beneficio del proyecto.

1.4 Justificación

- La experiencia descrita busca orientar al usuario de estos reductores, hacia la importancia del monitoreo de condición a través del análisis de vibraciones.
- Al tomar en cuenta lo que significa vibración excesiva (aumento del desgaste, reducción del tiempo de funcionamiento, sobreesfuerzos de reparación, altos costos de reparación y operación, y pérdida de producción) un programa de monitoreo de condición se hace imprescindible.
- Es necesario hacerlo por varias razones:
 - Puesto que son máquinas en desarrollo y en algún momento la necesidad de controlar la máquina de la manera propuesta se habría dado.
 - Además de ser una oportunidad de mejora, es un proyecto bastante interesante.
 - Los problemas por variaciones de operación son padecidos por otros usuarios de estas máquinas, es por eso que uno de los objetivos es la elaboración de una serie de recomendaciones para el procedimiento de selección y montaje.
- Este trabajo tiene como punto de partida las experiencias adquiridas en las dos máquinas anteriores, y la etapa de mejoramiento se hará en el montaje de una tercera máquina.
- El alcance del proyecto se limita al tipo de reductores para molinos verticales FLENDER KMP. Y a la primera etapa del proyecto, quedando la implementación del sistema de control en línea como una siguiente etapa.
- El costo aproximado por reparación asciende a 200,000 USD, más los costos por pérdida de producción.
- El costo proyectado para la implementación completa del sistema de monitoreo en línea de cinco reductores del tipo FLENDER KMP (engranaje cónico-planetario), es de 100,000 USD.

1.5 Alcance y entorno

El proyecto se desarrolla en la planta San Miguel de Cementos Progreso S.A. Cinco reductores de este tipo son utilizados de la siguiente forma: uno para el proceso de preparación de la harina cruda, dos para la preparación de combustible sólido para hornos rotatorios en la fabricación de clinker, y dos para la molienda de cemento. El alcance del proyecto se limita al tipo de reductores para molinos verticales FLENDER KMP.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Fundamentos

Vibración Mecánica

La vibración es la respuesta de un sistema a un estímulo interno o externo. Para comprenderla debe suponerse que es una onda sinusoidal perfecta. Por lo tanto está conformada por tres parámetros, los cuales son de suma importancia para el análisis, pues son la base o el punto de partida de este último:

- **Amplitud:** indica la cantidad de vibración en una frecuencia determinada, o la suma de todas las vibraciones (valor global)
- **Frecuencia:** es el número de ocurrencias por unidad de tiempo. Para efectos de análisis se usa el minuto o el segundo. El analista, para orientarse, ubica las distintas vibraciones experimentadas por la maquina según las frecuencias de operación de la misma. Es expresada en CPM o Hz.
- **Fase:** es la posición de un elemento vibrante respecto de otro que puede estar en reposo o vibrando. Las distintas combinaciones de diferencia de fase entre los puntos de una maquina, indican que tipo de problema está ocurriendo.

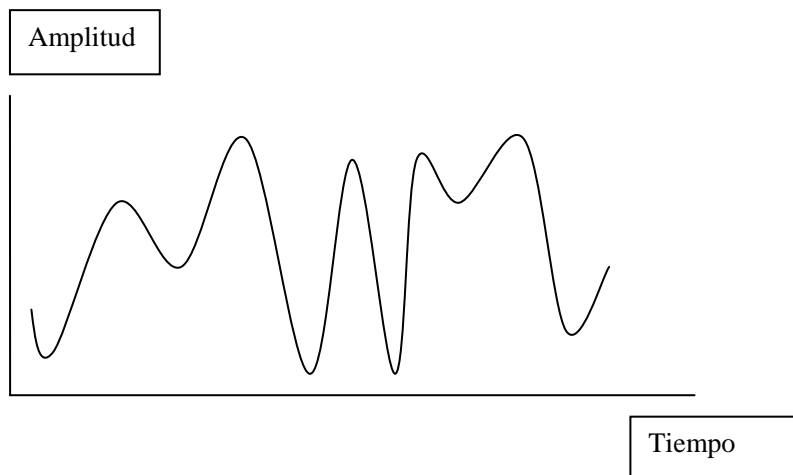
Las características cuantitativas de la onda sinusoidal son las unidades de medida que determinan cuando un nivel de vibración es o no aceptable. Dicho de otra manera: la Amplitud puede ser expresada en términos de estas unidades (desplazamiento, velocidad y aceleración) La frecuencia y las relaciones de fase indican de donde proviene determinada vibración.

- **Desplazamiento:** es la distancia recorrida por el objeto vibrante, medida desde su posición de reposo hasta su máximo alejamiento. Es expresada en mils o milipulgadas, o en micras o milésimas de milímetro.

- **Velocidad:** es la rapidez con la que el objeto vibrante cubre el desplazamiento. Se expresa en unidades de pulgada por segundo, o milímetros por segundo.
- **Aceleración:** es el cambio de velocidad entre la posición de reposo y el punto máximo de desplazamiento. En ambos puntos la velocidad es cero y la aceleración máxima. Es expresada en G's, medida que indica cuantas fuerzas de gravedad experimenta el elemento vibrante en los procesos de aceleración y desaceleración.
- **Energía de impulsos:** energía a altas frecuencias (300K CPM a 50,000K CPM) Aparece en periodos muy cortos, este aspecto es aprovechado para hacerla coincidir con la frecuencia natural del transductor (acelerómetro) y procesarla para convertirla en GSE (energía de impulsos), este concepto fue desarrollado por IRD.

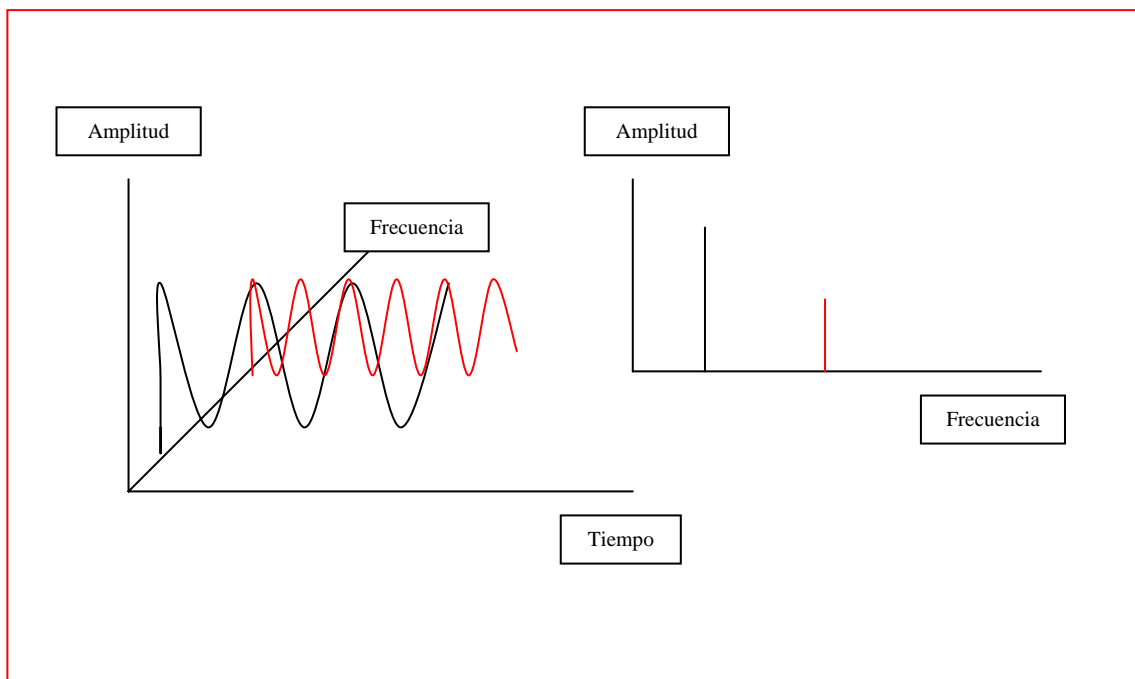
Espectro de vibración

Los tres parámetros de la onda sinusoidal, y las características cuantitativas, se analizan en un espectro de vibración; en el cual son graficadas las amplitudes y las frecuencias de operación. En un grafico donde la amplitud (eje Y) y el tiempo (eje X) son las variables, veríamos representada la forma de onda (dominio del tiempo)



Utilizar este grafico para el análisis de vibraciones es sumamente complicado. El espectro de vibración lo simplifica, pues es desarrollado

mediante la transformada de Fourier, pasando del dominio del tiempo al de la frecuencia. En el grafico anterior (dominio del tiempo) todas las vibraciones de la maquina son representadas en una onda sinusoidal. En el dominio de la frecuencia se separan todas las vibraciones, y cada una es analizada desde su frecuencia particular. Por ejemplo: en una caja de metal, conectada a un transductor de vibración, hacemos rebotar dos pelotas distintas: una de fútbol y una de tenis. Los ciclos de rebote por unidad de tiempo (frecuencia) serán distintos. Esto, además, quiere decir que los desplazamientos, las velocidades y las aceleraciones de los rebotes serán distintas. En el dominio del tiempo estaría representada una sola onda, y no sabríamos con certeza como rebota cada pelota (como vibra) En el dominio de la frecuencia sabríamos las diferencias entre las características de cada rebote (características de vibración) Cada pelota se ubicaría en una frecuencia particular. Esto permitiría determinar cual de las dos rebota más rápido (velocidad de vibración) Cual hace mas fuerza al rebotar (aceleración y desaceleración de vibración) Este detalle es el que permite determinar con bastante certeza, cual pieza tiene problemas en una maquina. Los espectros de vibración son utilizados como firmas, o perfiles de falla (incipiente, en niveles de precaución o catastrófica) En el grafico siguiente existen dos señales de vibración, cada cual ocurre en una frecuencia determinada, y la amplitud es distinta.



Importancia

El monitoreo de condición a través del análisis de vibración es una tendencia global, puesto que dicha herramienta brinda información valiosa para la detección de fallas a una edad muy temprana. Por si sola —Mantenimiento Predictivo — reduce costos evitando fallas repentinas y/o catastróficas, y reduciendo los inventarios. En combinación con la lubricación, por ejemplo, puede prolongarse la vida de un cojinete correlacionando los niveles de vibración a altas frecuencias (energía de impulsos) con la respuesta de los intervalos de lubricación. Esto significa que el proceso de producción no será interrumpido, evitando paradas no planeadas.

La debilidad de un programa de este tipo radica en dos cosas: las interrupciones que pueda tener el programa de recolección y análisis de datos, y la preparación del analista.

Como sucede en cualquier tipo de análisis, es importante darle prioridad a la calidad de la información.

Transductores (sensores)

Cuatro tipos son utilizados en el campo de las vibraciones: acelerómetros, transductores de velocidad, transductores de proximidad (de no contacto) y los que utilizan accesorios de contacto directo. Cada tipo puede ser utilizado en una serie de aplicaciones dentro del campo de las vibraciones. En este caso, el acelerómetro fue el tipo escogido, puesto que su costo es relativamente más bajo con relación al resto de transductores, además pueden ser montados con facilidad. Los acelerómetros diseñados para montaje permanente son capaces de soportar ambientes severos, esto permite que puedan estar sumergidos dentro de varios fluidos, como el agua, aceite o lubricantes de corte.

Entre otras particularidades: proporcionan la medición directa de la aceleración. Poseen tres características básicas de funcionamiento que afectan su rendimiento: la sensibilidad al voltaje (mV/g), la respuesta de frecuencia (Hz o CPM) y el peso (onzas o gramos) Funcionan bajo el principio

piezoeléctrico, que en términos generales, es el efecto que tiene un cristal de acumular cargas eléctricas en su superficie cuando es sometido a una presión mecánica.

Criterios de selección

Nota: el transductor seleccionado es el 970i IRD

Rango de sensibilidad característico

La sensibilidad es la capacidad del transductor para determinar la amplitud del movimiento de vibración (desplazamiento, velocidad o aceleración) proveniente de la amplitud de señal de voltaje. Un ejemplo podría ser 100 mV/g (para un acelerómetro) donde g es una unidad de gravedad (10 mts/seg^2) Si este acelerómetro generó 10 mV, convertiría este voltaje a una amplitud de 0.1g (10/100mV)

Acelerómetro 970i IRD: 50 mV/g \pm 10%

Rango de frecuencia característico

Es la capacidad de medición de la frecuencia extrema baja y alta del transductor. Cada transductor tiene su propio rango de frecuencia (la que debe conocer el usuario) La sensibilidad del transductor controla principalmente el extremo bajo del rango de frecuencia. Ésta y la robustez, fueron las características que definieron el uso de los 970i, de lo contrario se deben seleccionar acelerómetros con distinto rango: unos para cubrir las frecuencias en los puntos de alta velocidad, y los otros para los de baja.

Acelerómetro 970i IRD:

- \pm 5% desde 6Hz a 2KHz (360cpm a 120,000cpm)
- \pm 10% desde 5Hz a 10KHz (300cpm a 600,000cpm)

Rango de frecuencia natural

Es el factor límite para la capacidad del rango de frecuencia superior del transductor. Cuando una frecuencia impositiva comienza a aproximarse a la frecuencia natural del transductor, la amplitud de vibración se incrementará hasta 50 veces debido a la condición de resonancia del transductor. Por ello, es de suma importancia que la frecuencia de interés más alta esté muy por debajo de la frecuencia natural del transductor. En general, el rango más

efectivo para un acelerómetro será de 20 a 33% de su frecuencia natural fija (por lo tanto, para un acelerómetro con una frecuencia natural de 30,000 Hz, su rango efectivo quizá estará limitado a únicamente 6,000 a 10,000 Hz, o 360,000 a 600,000cpm)

Acelerómetro 970i IRD: 27KHz (1,620,000cpm)

Rango de peso característico

En este caso la razón por la que el peso del transductor es importante, se debe a que esta característica debe corresponder con una fracción mínima del peso de la cubierta donde se fijará. Cuando el peso es tal que afecta la masa del componente que se va a medir, puede tener un importante efecto en la frecuencia natural de dicho componente y, en consecuencia, en la respuesta de frecuencia verdadera.

Acelerómetro 970i IRD: 220 gr.

Rango de temperatura útil característico

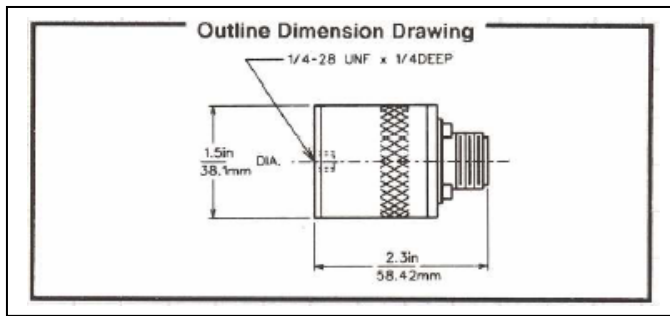
Ésta es la temperatura mínima y máxima que puede soportar un transductor sin que afecte demasiado su capacidad de respuesta. En este caso es de suma importancia determinar este parámetro, antes de hacer la selección.

Acelerómetro 970i IRD: 5% desviación desde -17°C a $+140^{\circ}\text{C}$

Tamaño del transductor

En el caso tratado en este documento es muy probable que no surjan problemas por el peso, esto debido a que la mayor parte de acelerómetros no son tan pesados, relativamente. Sin embargo para aplicaciones en otro tipo de cajas reductoras se recomienda lo siguiente: contemplar el tamaño de las superficies para que el transductor pueda instalarse sin problemas. Por ejemplo: si el lugar o la pieza en donde se instalará el transductor es muy pequeña. Si el transductor pesa más que la pieza (en este caso puede modificarse la frecuencia natural del objeto y alterar su movimiento vibratorio)

Acelerómetro 970i IRD:



Suministro de energía del transductor

Para operar, la mayoría de los transductores, necesita de una fuente de energía. Existen tres métodos comunes para alimentar un transductor:

1. Fuente de energía CIP (circuito integrado piezoeléctrico) El instrumento de vibración envía la energía a través de un cable de alimentación que se conecta al transductor. Esta opción es la utilizada en el proyecto.
2. Suministros de energía independientes: en estos casos se emplea una batería o una unidad de corriente alterna (CA) para alimentar el transductor.
3. Amplificador de carga: entre el transductor y el instrumento se coloca una batería o una unidad de corriente alterna (CA) para amplificar el voltaje de la señal.

Acelerómetro 970i IRD: +18 a +24VDC

Tipos de cables

Para el caso tratado la longitud de los cables puede llegar hasta los 300 mts, debido a que la alimentación de energía es CIP. Aunque se recomienda colocar amplificadores de carga en cada tramo de 15 mts cuando los transductores sean alimentados de otra manera.

Acelerómetro 970i IRD: 35 mts. Cable protegido, a prueba de salpicaduras.

Método de sellado

Es importante tomar en cuenta este punto, especialmente en esta aplicación. Incluso la humedad afecta el funcionamiento del transductor. Por ello es necesario revisar con especial atención las especificaciones de sellado.

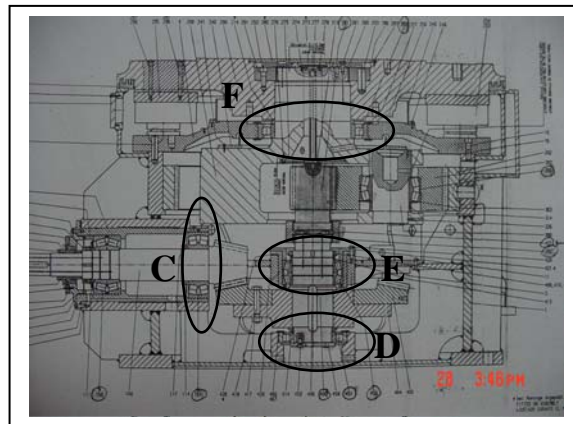
Acelerómetro 970i IRD:

- Carcaza: acero inoxidable de la serie 300 (soldada)
- Impermeable
- Hermético (a prueba de polvo)

Selección de los puntos de medición e instalación de los transductores

Estos deben estar lo más cerca posible de los cojinetes. Se deben ubicar dentro de la zona de carga. De lo contrario, es muy probable que la cantidad de ruido afecte la calidad de la información, un ejemplo de esto son las vibraciones del cojinete del engranaje sol (alta carga y baja velocidad) La experiencia en los dos reductores ha demostrado que las amplitudes de la vibración tomada desde la parte externa del alojamiento del cojinete, se incrementan alrededor de un 100% respecto de la vibración tomada desde la carcasa, principalmente las señales a alta frecuencia (a frecuencias de paso de elementos rodantes y pistas de rodadura, por ejemplo) Esto es un ejemplo claro, puesto que señales ocasionadas por problemas incipientes, antes ni siquiera se veían.

Puntos de medición dentro del reductor



El instalar los transductores muy cerca de los cojinetes es importante para la medida de la aceleración y/o energía de impulsos en bandas de alta frecuencia, las cuales son información vital para la detección de las primeras fases de falla en los cojinetes.

El hecho de instalar los transductores de forma permanente es un aspecto de seguridad que puede prevenir daños potenciales, ya que el acceso a la carcasa de los reductores puede ser limitado, como en el caso de los molinos para coque.

Se recomienda instalar los transductores en posición horizontal paralela al horizonte terrestre, tanto por que en esta posición se recolecta la mayor parte de las vibraciones y por el espacio disponible dentro de los reductores.

Identificar de la siguiente forma los puntos a medir:

1. A (motor lado libre)
2. B (motor lado acople)
3. C (cojinete piñón)
4. D (cojinete piso)
5. E (cojinete acople)
6. F (cojinete mesa)

En el software, como material de apoyo, se recomienda adjuntar un diagrama de cada reductor, en el que estén identificados los puntos de medición. Si es posible, incluir la información de la configuración, por ejemplo: tipo de engranaje, número de dientes, rangos de velocidad de operación por componente, especificaciones de los cojinetes y engranajes.

Cálculo de alarmas

En las configuraciones de niveles de alarma totales y de banda de espectro se debe emplear análisis estadístico. El procedimiento para evaluar los niveles de alarma total se resume de la siguiente manera:

1. Trabajar con la información capturada más recientemente en cada punto.
2. Calcular el nivel total de un punto (X_{pro}), para lo cual se deben sumar los datos y dividir entre el número total de muestras.
3. Calcular la desviación estándar (S) de los datos.
4. Luego, calcular la alarma total estadística mediante la siguiente formula:

$$AT \text{ Estadística}_1 = X_{pro} + 2S$$

(Se usa en general durante la línea de base, y muy a menudo en los primeros estudios)

$$AT_{\text{Estadística}_2} = X_{\text{pro}} + 3S$$

(Se usa después de realizar estudios reiterados y acción correctiva)

De haber una distribución normal, aproximadamente 95.5% de la información deberá caer dentro de 2 desviaciones estándar del promedio estadístico, en tanto que 99.7% deberá caer dentro de 3 desviaciones estándar. Las notas en el punto 4 están basadas en estudios que han demostrado que sólo un total estadístico igual al nivel promedio (X_{pro}) más 2 desviaciones estándar deberían utilizarse durante la línea base y durante algunos de los primeros estudios de seguimiento, antes que se haya tenido oportunidad de realizar acciones correctivas (puesto que los niveles de vibración serán más altos para entonces) Luego, tras realizar acciones correctivas (lo que deberá disminuir los niveles de vibración), hay que usar la ecuación 2, añadiendo 3 desviaciones estándar al valor medio del total estadístico.

5. Comparar el total especificado de un punto contra la alarma total estadística calculada. Si resultan ser muy diferentes, se debe elegir un nivel de alarma cercano al de alarma estadística, puesto que está basado en mediciones reales. Sin embargo, si se considera que la alarma estadística se calculó a partir de un número alto de muestras cuando el elemento (cojinete o engranaje) tenía problemas, o por el contrario, las condiciones no eran las normales de operación (por ejemplo, que el equipo trabaje con muy poca carga), entonces se debe continuar con la alarma total ubicada entre la especificada y la estadística, pero que tienda más hacia esta última.

3. TRABAJO PROPUESTO

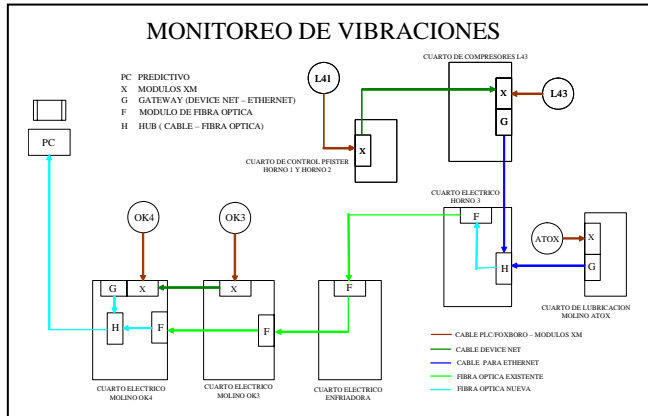
3.1 Información disponible

Descripción de la experiencia

Los molinos verticales de rodillos utilizados en la industria del cemento son máquinas con pocos años de trabajo, es por eso que a esta etapa aún se le puede clasificar como de desarrollo. La historia apunta a que son estables y muy resistentes, en conclusión: un buen diseño. Sin embargo, las variables en la operación pueden generar cambios repentinos y mucha inestabilidad, que en la mayor parte de los casos degeneran en niveles dañinos de vibración o contaminación del lubricante. Dos experiencias propias, aunadas a otras vividas en varias plantas, fueron el punto de partida para la búsqueda de procedimientos que permitieran conocer mejor las respuestas de la máquina a las variaciones de operación.

Al inicio se utilizó el análisis de vibraciones en ruta con una frecuencia mensual. Se hizo recolectando datos desde la carcasa de la máquina, los cuales eran analizados posteriormente en el laboratorio. Sin embargo, después de dos años no se pudieron establecer con exactitud perfiles de fallas en los elementos que están más alejados de los puntos de toma en la carcasa, además de no poder seguir en el tiempo las fallas, puesto que la etapa detectable desde la carcasa, en un cojinete, por ejemplo, es, quizá, la última de su desarrollo, y es muy probable que ocurra en un tiempo corto.

En la primera etapa del proyecto se trabajaron dos máquinas pertenecientes a los procesos de Harina Cruda y Hornos, este último en la molienda de coque. En esta fase quedaron instalados los transductores (Entek 970i) y los módulos de control en campo (XM y XMGateWay, y protocolos de comunicación: Device Net, Ethernet y fibra óptica), quedando pendiente la parte del software.



Molino de Molienda de Harina Cruda: ATOX
Molinos de Molienda de Pet Coke: L43 y L41
Molinos de Molienda de Cemento: OK3 y OK4

A la fecha el proyecto se encuentra en fase de desarrollo. Es por eso que este documento se enfoca, principalmente, en la selección e instalación de los transductores, y en el seguimiento mediante recolección de datos desde los puntos de toma. Sin embargo, se hace especial énfasis en el monitoreo en línea, como una recomendación especial. Pues de esta manera las características de un Mantenimiento Proactivo: el permitir diagnosticar fallas, planear acciones correctivas y preventivas de mantenimiento y operación, y evitar paradas inesperadas, quedaran reforzadas, a tal grado, que el cambio de sólo mantenimiento Predictivo a Proactivo será más eficaz y eficiente.

Sobre la propuesta

La propuesta fue tomar como base el monitoreo en línea, pretendiendo llevar un control más cerrado para establecer perfiles de falla y determinar niveles de alarmas que permitieran la toma de decisiones a tiempo, recolectando la información desde los puntos más cercanos a los mecanismos en el interior de la máquina. El análisis de vibración fue la herramienta seleccionada, debido a que es la tecnología utilizada en el Mantenimiento Predictivo que tiene la capacidad de acercarse al inicio de un grupo grande de fallas y seguirlas en el tiempo.

Con la información de la selección y montaje plasmada en un documento accesible, se beneficiará directamente a usuarios de este tipo de reductor. Se pretende aportar los conocimientos para mejorar el desempeño y evitar paradas innecesarias que provoquen problemas ambientales, condiciones

inseguras y mal manejo de los recursos. Aunado a esto, un control más cerrado evitará gastos elevados por parada de máquina, reparación y falta de producción. Por supuesto que las técnicas expuestas no se limitan a este tipo de reductor, en cualquier máquina aplican los procedimientos de cálculo, montaje y selección.

Sobre la falla

La falla ocurrió en un reductor FLENDER del tipo KMP 620. Fue puesto en marcha en 1996. En septiembre 1, 2001 ocurre la falla: el motor principal estaba en operación, el eje de entrada giraba, pero la mesa no. Al destapar el reductor se pudieron observar algunos fragmentos metálicos. Se sospechó que el manguito del acople estaba roto, ó los dientes del eje.

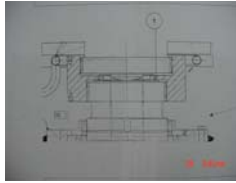
Luego de desarmar el reductor se encontraron, además, estas partes dañadas:

- Manguito del acople roto.
- Eje dentado del acople con algunos dientes rotos.
- Cojinete radial para guía de la estación de planetarios había girado en su asiento, estaba operando 80 mm abajo de la posición original.

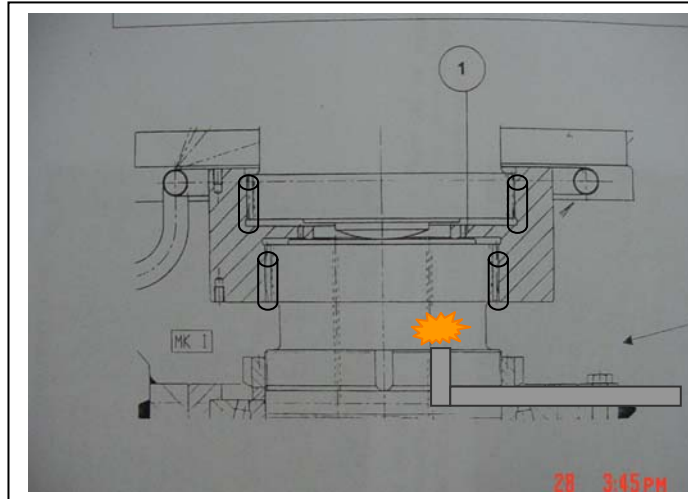
La reparación incluyó el reemplazo del acople de manguito y su cojinete, el cojinete del engranaje cónico del piso y el cojinete radial de la estación de planetarios, y la recuperación del alojamiento de éste último.

Una de las teorías apunta a la lubricación. Se sospecha que el aceite no fluyó a través de los agujeros en el acople de manguito, porque la fuerza centrífuga fue más grande que la fuerza de gravedad. Además el diseño del sistema de lubricación para el acople de manguito no es adecuado para operación con aceite levemente contaminado. En el collarín, entre la parte de arriba y la de abajo, el flujo de aceite es retenido o restringido. El cojinete del engranaje sol en la estación de los planetarios está en similares condiciones de operación. El aceite fluye desde el nivel superior del reductor a través de los pequeños agujeros hacia el cojinete. Para que la alimentación sea adecuada,

se requiere aumentar la cantidad de agujeros y el diámetro de los mismos. Además, puntos de lubricación por aspersion pueden ubicarse por debajo del manguito del acople.



Agujeros más grandes, y lubricación forzada hacia el interior del acople



Los costos aproximados en los que se incurre por reparación de estas piezas, es el siguiente:

O. T.	FECHA	CL. TRAB.	HAC	DESCRIPCION	COSTO EN QUETZALES	REALIZADO POR
437511	27.02.03	PREV	RE0-105	Mantenimiento Programado a reductor	Q 40,198.96	CEMPRO
483813	27.02.03	CORR	RE0-105	Maquinado de Housing	Q 19,315.31	INMECASA
475594	27.02.03	PREV	RE0-105	Desarme de reductor	Q 170,000.00	A & H
448415	27.02.03	CORR	RE0-105	Hospedaje de Técnicos Flender	Q 1946.18	FLENDER
483306	27.02.03	FAB	RE0-105	Reparación y reconstrucción de reductor	Q 43,500.00	TECNOMECANICA
448415	27.02.03	PREV	RE0-105	Asesoría por Técnico Flender	Q 931,549.72	FLENDER

Aspectos de operación

Los tipos de material que se muelen difieren en muchas características. Sin embargo los problemas que generan exceso de vibración son los mismos:

- Perdida de calibración entre la mesa de molienda y uno o varios rodillos.
- Desgaste irregular en corazas de rodillos y/o mesa de molienda.
- Desprendimiento de una coraza.

- Perdida de material en corazas recuperadas con soldadura.
- Entrada de objetos metálicos al molino.
- Exceso de material de retorno cuando el separador no funciona apropiadamente.
- Perdida de la cama de material entre mesa de molienda y rodillos.
- Perdida de presión en sistema hidráulico que lubrica las zapatas que levantan la mesa.
- Error en las señales de control.
- Perdida de aditivos y/o agua para el proceso de molienda.
- Burlar las señales que funcionan como barreras, haciendo puentes en el programa de control.
- Arranques en vacío (sin cama de material)
- Arranques con exceso de material.

En una operación violenta los planetarios son excitados, causando movimiento radial y vertical que afecta:

- la condición del acople
- porque provoca un movimiento deslizante fuera de las condiciones de diseño
- los cojinetes dobles de rodillos de los planetarios, porque un desplazamiento angular es creado causando fretting y una carga dinámica adicional.

En caso de una lubricación defectuosa, un mecanismo de fatiga puede iniciar en ambas partes del acople, ocasionando daños subsecuentes (pitting y breakage)

Que en un molino quede fuera de operación, es un gran impacto a los planes de producción. Para ejemplo; un molino de cemento produce 140 tm/hr, 37% de la capacidad total de la planta.

Actores

Los departamentos de Mantenimiento Predictivo e Instrumentación, como responsables directos del diseño, montaje y puesta en marcha, son los principales involucrados. El apoyo técnico está a cargo de la empresa proveedora del equipo (hardware, software, transductores, cables y módulos)

Recursos**Humanos**

Por parte de planta el personal encargado del proyecto en la parte mecánica es el Dep. de Mantenimiento Predictivo. Para la parte de programación y electrónica, será el Dep. de Instrumentación.

Financieros

El proyecto fue presentado a Gerencia por los superintendentes de Mantenimiento e Instrumentación, quedando aprobado por un total de 100,000.00 USD para los cinco reductores.

Resultados

Cronograma

LISTA DE ACTIVIDADES MONITOREO DE VIBRACIONES		Responsable	S E M A N A						Total días
Descripcion			45	46	47	48	49	50	
1	MOLINO DE CARBON LINEA 1 & 2								
1.1	INSTALAR PANEL EN CUARTO DE ANALIZADOR PARA ELECTRONICAS	Instrumentación	5						
1.2	INSTALAR Y CONECTAR ELECTRONICAS DE MONITOREO DE VIBRACIONES	Instrumentación		2.5					
1.3	INSTALAR Y ALIMENTAR DESDE UPS FUENTE DE DC PARA INSTRUMENTOS	Instrumentación		2.5					
1.4	ENTUBAR CABLEAR Y CONECTAR SENSORES DE VIBRACION HACIA REDUCTOR	Instrumentación			6				
1.5	CABLEAR Y CONECTAR SALIDAS ANALOGICAS DE PANEL A PLC L41	Instrumentación				1			
1.6	CABLEAR Y CONECTAR SALIDAS DIGITALES DE PANEL A PLC L41	Instrumentación				1			
1.7	CABLEAR Y CONECTAR MODEM Y RED DE COMUNICACIONES EN F.O.	Instrumentación				2			
1.8	CONECTORIZACIÓN DE F.O.	Instrumentación				2			
	RED ETHERNET VA. DE MOLINO L41 A MOLINO L43	Instrumentación						22	
2	RED DE COMUNICACIONES								
2.1	HACER CONEXIÓN DE FIBRA OPTICA HACIA PC DE DEPTO PREDICTIVO	Instrumentación					3		
2.2	HACER CONEXIÓN DE RED DEVICE-NET DENTRO DE CADA PANEL	Instrumentación					2		
								5	
3	MOLINO DE CARBON LINEA 1 & 2								
3.1	DESMONTAR REDUCTOR	Mecánico SM				2			
3.2	DESARME REDUCTOR	Mecánico SM				4			
3.3	INSTALAR SENSOR EN COJINETE INFERIOR DEL EJE CENTRAL DE PLANETARIOS	Predictivo y Técnico Flender					2		
3.4	INSTALAR SENSOR EN COJINETE INTERNO DEL PINÓN						2		
3.5	INSTALAR SENSOR EN COJINETE DE CORONA INFERIOR						2		
3.6	INSTALAR SENSOR EN COJINETE SUPERIOR DEL EJE CENTRAL DE PLANETARIO						1		
3.7	ARMAR REDUCTOR	Mecánico SM						4	
3.8	MONTAJE REDUCTOR	Mecánico SM						2	
								19	
TOTAL								27	

Discusión de resultados

Monitoreo de condición

Se puede hacer de dos formas: por frecuencias establecidas (rutas) Y en línea, que es monitoreo constante en tiempo real. El propósito es obtener información de los reductores para determinar las condiciones en que éstos se encuentran, así como para que su operación y mantenimiento sean sencillos, seguros y económicos. El método en línea es el más efectivo, y resulta en dar mantenimiento preventivo a intervalos irregulares, siempre que las condiciones de la máquina indiquen si estas reparaciones son necesarias. De cualquier manera, el monitoreo mediante rutas establecidas también proporciona información para localizar variaciones en la vibración y determinar las condiciones de engranajes y cojinetes. Basándose en las evaluaciones realizadas proporciona el tiempo de adelanto para prevenir las fallas incipientes.

Cuando ya se está familiarizado con una máquina y se ha observado el tipo de fallas que presenta, una simple inspección de sus condiciones proporciona datos suficientes para determinar si puede seguir funcionando durante otro período sin presentar problemas. Otra opción consistente es instalar una

alarma, o barrera, que indique que el período de funcionamiento sin problemas ya se encuentra en un nivel crítico. El análisis de un reductor se puede utilizar para comparar las condiciones en que se encuentra el resto. También pueden analizarse en detalle las observaciones hechas para determinar la causa más probable que provocó el problema.

Esta es la forma más económica de realizar mantenimiento, puesto que los reductores son supervisados y reparados solamente en función de su condición.

Beneficios

1. Mayor aprovechamiento de la planta que resulta en un mayor rendimiento del capital invertido.
2. Reducción de los costos de mantenimiento.
3. Reducción en las primas del seguro.
4. Incremento en la seguridad de los transeúntes y personal de limpieza.
5. Mayor eficiencia en la operación de la planta y mayor consistencia en la calidad.
6. Negociaciones más efectivas con el fabricante, que es el que presta el servicio de mantenimiento mayor, respaldándose en las evaluaciones sistemáticas de las condiciones.
7. Mejores relaciones con el cliente que surgen por haber evitado demoras inoportunas.
8. La ocasión de preparar y diseñar cambios para el futuro.

Como aparecerán estos beneficios

1. El tiempo de funcionamiento de los molinos puede incrementarse, alargando al máximo el tiempo que hay entre las reparaciones generales. Estas reparaciones se reducen porque se conoce la naturaleza del problema y porque los repuestos y las personas que las reparan están disponibles. El deterioro consecuente puede reducirse o eliminarse.

2. El tiempo de adelanto que proporciona el monitoreo de condición permite detener las máquinas antes de que lleguen a un estado crítico, en especial cuando no se permiten interrupciones instantáneas.
3. Con el tiempo, una buena experiencia permitirá que la carga y la velocidad de operación se eleve para obtener un mejor acomodo entre el rendimiento y el tiempo de operación que hay hasta el próximo mantenimiento mayor.
4. Las evaluaciones que se realizan cuando los equipos son nuevos (mortalidad infantil), cuando se termina el periodo de garantía y cuando se hace una reparación general, proporcionan valores comparativos útiles.
5. El tiempo de adelanto que proporciona el monitoreo de condición hace posible que se eviten interrupciones inesperadas.
6. La experiencia acumulada con relación a la operación de la maquinaria se usa con este propósito.

Transductores seleccionados

Los seleccionados para todos los puntos fueron los acelerómetros 970i de IRD. Una de las razones por las cuales se escogió este tipo de transductor, fue su potencial en cuanto a los límites de frecuencia, pues es mucho mayor que el resto de los transductores. Además la instalación con perno y pegamento es mucho más sencilla.

Montaje de los transductores

Es necesario asegurar los cables dentro y fuera de la máquina, puesto que en mediciones de baja frecuencia este movimiento puede llegar a formar parte del nivel global o aparecer como una señal en el espectro. Y aunque no tenga que ver con la operación de la máquina, podría causar confusión en el análisis.

Las superficies donde se instalarán los transductores deben estar limpias y sin obstáculos (sin bordes o grietas), y suficientemente planas para que los transductores no oscilen. La instalación con perno, significa que su eje debe estar perpendicular a la superficie para que queden a escuadra. Los materiales

adheridos a la superficie, como pintura o restos de lubricante, pueden actuar como un aislante debajo del transductor.

Con este tipo de instalación se proporciona el rango de respuesta de frecuencia más alto y es un medio efectivo para mantener el transductor en su lugar. Es recomendable usar un pegamento, el 609 de Loctite es una buena opción. Tomar en cuenta que el espesor de la película de pegamento no debe ser excesivo (si es demasiado grueso aumentará el amortiguamiento y degradará el rendimiento de alta frecuencia) Se dice que la respuesta es buena porque ofrece datos muy repetibles sobre una serie de pruebas de medición.

Se recomienda proteger los cables afuera del reductor, puesto que derrames de material proveniente del molino, pueden dañar el forro por las altas temperaturas.

CONCLUSIONES

1. El concepto de monitoreo de condición es tan bueno como las estrategias de manejo de equipo y como la mejora continua de la condición, incluso, si sólo incluye las rutas de inspección VOSO.
2. Los componentes que fallaron: cojinete de rodillos de la estación de los planetarios y el acople de manguito (conexión acanalada), son críticas para cualquier reductor de este diseño, independiente del proveedor.
3. Las causas observadas se atribuyen a lubricación deficiente de los componentes en cuestión y una condición de operación desfavorable (comportamiento dinámico, frecuentes paradas y arranques, etc)
4. Los problemas principalmente fueron causados por excesivo movimiento deslizante y/o problemas de lubricación.
5. Los problemas mecánicos arriba mencionados, principalmente, pueden atribuirse a los inconvenientes de diseño y/o a las deficiencias en la operación.
6. La mayor cantidad de problemas radica en la falla del acople (entre el engranaje cónico y la estación de los planetarios) el cojinete del engranaje sol y el radial de rodillos de la estación de los planetarios.
7. La falla inicial en el cojinete radial de la estación de los planetarios es deslizamiento por pérdida de ajuste en el asiento.
8. Otra falla es el daño en el maquinado de los dientes, tanto en la conexión acanalada (acople de manguito), como en el piñón cónico (por morder material de desgaste proveniente del sistema de acoplamiento).
9. Ambas fallas inician por problemas de lubricación defectuosa.
10. El concepto de lubricación fue basado sólo en la fuerza de gravedad (circulación)
11. El análisis de costo – beneficio demuestra que la inversión es totalmente justificable en cuanto a que los gastos en los que se incurre por una falla superan el valor total de la inversión del proyecto, aun sin agregar los costos por pérdidas de producción.

RECOMENDACIONES

Técnica de análisis

1. Es recomendable dedicar tiempo al aprendizaje de la operación normal del equipo, pues se debe reconocer la firma de vibración específica, debido a que las condiciones de operación, aun en un rango estable, pueden generar incrementos en estas señales, lo que podría generar confusión en la interpretación de los resultados.

2. Continuar con la implementación hasta lograr el monitoreo de vibraciones en línea, partiendo de su calidad como herramienta de diagnóstico.

3. Varios usuarios de esta herramienta coinciden en la frecuencia de recolección y análisis, partiendo de que dos semanas es un tiempo prudente para observar cambios y establecer patrones de comportamiento. Por esto se recomienda, mientras no esté instalado el programa completo de monitoreo en línea, se proceda a seguir esta recomendación.

4. Modificaciones a:
 - a. lista de partes
 - b. rutinas de chequeo y conceptos de monitoreo de condición
 - c. estrategias de operación y medidas preventivas.

5. Los parámetros que se deben monitorear para alcanzar un programa completo de monitoreo, son:
 - a. Torque en ejes rotativos para control de la carga de torsión
 - b. Niveles establecidos y limitados por alarmas para control de la vibración severa.

- c. Niveles de pulso de impacto para el control de la condición de los cojinetes.
 - d. Presión y temperatura del circuito de aceite.
 - e. Diferencial de presión en los filtros.
 - f. Análisis de aceite.
 - g. Inspecciones visuales de los filtros de aceite.
 - h. Inspecciones visuales de la estación de engranajes cónicos.
 - i. Inspección audio/visual.
 - j. Evaluar la información en dos caminos:
 - i. De manera estática: a través de un espectro tomado en cierto tiempo.
 - ii. Análisis del comportamiento en línea.
6. Es correcto hacer énfasis en los siguientes aspectos:
- a. Mantener las alarmas con el mínimo de los parámetros de condición para reducir la carga dinámica.
 - b. Evitar las continuas paradas y arranques para reducir la carga de impacto.
 - c. Mantener los circuitos de aceite bajo una observación continua, temperatura y eficiencia de los filtros.

BIBLIOGRAFÍA

1. Machinery Failure Analysis and Troubleshooting
Tercera edición
Heinz P. Bloch- Fred Geitner
Gulf Publishing
Houston, Texas.
2. The Simplified Handbook of Vibration Analysis
Library of Congress Catalog Card number 92-72682
3. Mantenimiento Predictivo y análisis de señal para la identificación de
firmas de vibración
IRD Mechanalysis, Inc