

Nueva Técnica para Control de Calidad de Rodaduras de Engranajes y Rodamientos

Autores:

Ing O. García Peyrano - Ing. H. Damiani

**Laboratorio de Vibraciones
Centro Atómico Bariloche
S. C. de Bariloche, octubre de 2000**

Resumen: *en este trabajo se muestra una técnica digital de procesamiento de señales de vibración, medidas con acelerómetros piezoeléctricos, provenientes de diferentes dispositivos cuyas rodaduras son de interés estudiar.*

Esta técnica impulsiva sincrónica de barrido variable permite discriminar dentro de un espectro de frecuencias aquellos componentes de importancia para el estudio de rodaduras de cojinetes y engranajes que comúnmente se hallan enmascarados por resonancias, componentes de mayor amplitud o por el ruido propio de una medición.

Se realiza un descripción teórica de la técnica mencionada y de su aplicación a diferentes casos de interés. Además se comparan los resultados obtenidos mediante el análisis de señales utilizando esta técnica con los que resultan del uso de técnicas convencionales.

Se demuestra que este procesamiento de señales permite el diagnóstico de fallas en rodaduras mediante el análisis de los espectros obtenidos a partir de ella, lo cual es muy difícil de lograr mediante otras tipos de procesamientos.

I. Introducción

Las fallas en máquinas rotativas, especialmente en dispositivos tales como engranajes y cojinetes, se desarrollan a veces en tiempos muy cortos por lo que cuando se decide actuar sobre las mismas el daño es prácticamente irreversible.

En nuestro trabajo presentamos un método de análisis de señales de vibraciones que está orientado a la detección incipiente de cualquier falla o anomalía. Esto significa que mucho antes de que se produzca una falla total o terminal es posible tomar conocimiento de la misma y actuar en consecuencia.

Los métodos clásicos de análisis utilizan la FFT (transformada rápida de Fourier) como principal herramienta para el filtrado de las señales, luego se suele realizar un promedio en frecuencias para eliminar el ruido existente en el espectro, a pesar de este promedio existen casos, como mostraremos más adelante, en los que este procesamiento no alcanza para poder observar el comportamiento de ciertos componentes frecuenciales importantes para el monitoreo de rodaduras, pues suelen quedar enmascarados por componentes de mayor amplitud o por el ruido residual que queda luego del promedio.

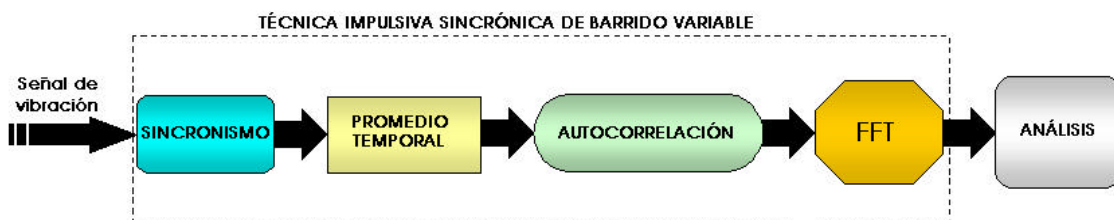


Figura 1. Esquema en bloques que muestran los diferentes procesos que se le realizan a la señal de vibración al aplicarle la técnica impulsiva sincrónica de barrido variable.

Para solucionar este problema es que se desarrolló la *técnica impulsiva sincrónica de barrido variable*, desde ahora técnica impulsiva sincrónica, presentada en este trabajo, la cual consiste en una serie de procesos matemáticos que se le aplican a la señal de vibración (Figura 1), dichos procesos matemáticos se describen a continuación:

- *Sincronismo*: la señal medida es luego sincronizada con la frecuencia que se desea estudiar o con la frecuencia que gobierna el proceso (en una máquina rotante, por ejemplo, se sincroniza con la velocidad de giro de la misma).
- *Promedio temporal*: una vez que la señal a sido sincronizada se hace un promedio en el tiempo de la misma, de esta manera sólo aquellas señales que estén en fase o tengan una diferencia de fase constante con la frecuencia de sincronismo sobrevivirán al promedio. Por lo que, si se elige como frecuencia de sincronismo a la que gobierna el proceso, se separan las señales propias del proceso de aquellas que son ajenas al mismo.
- *Autocorrelación*: se realiza un autocorrelograma con el resultado obtenido de la promediación de manera de separar las señales determinísticas de las estocásticas.

La autocorrelación se calcula mediante [1], físicamente consiste en multiplicar la señal digital (que es un vector) por si misma desplazada un cierto número de puntos y dividir por el número de puntos multiplicados. En el autocorrelograma se grafica el resultado obtenido en función del número de puntos que se desplazó la señal (intervalos temporales). En la figura 2 se muestra un ejemplo de autocorrelograma para una señal senoidal con ruido random, se observa un valor máximo para cero, es decir cuando se multiplica la señal por si misma sin desplazamiento, luego se observa un comportamiento senoidal de la frecuencia de la señal original, de esta manera, tomando sólo esta última parte de un autocorrelograma, se eliminan los componentes estocásticos de la señal original.

$$y_{xx}(n) = \frac{\sum_{i=0}^N x(i) \cdot x(i+n)}{N-n} \quad [1]$$

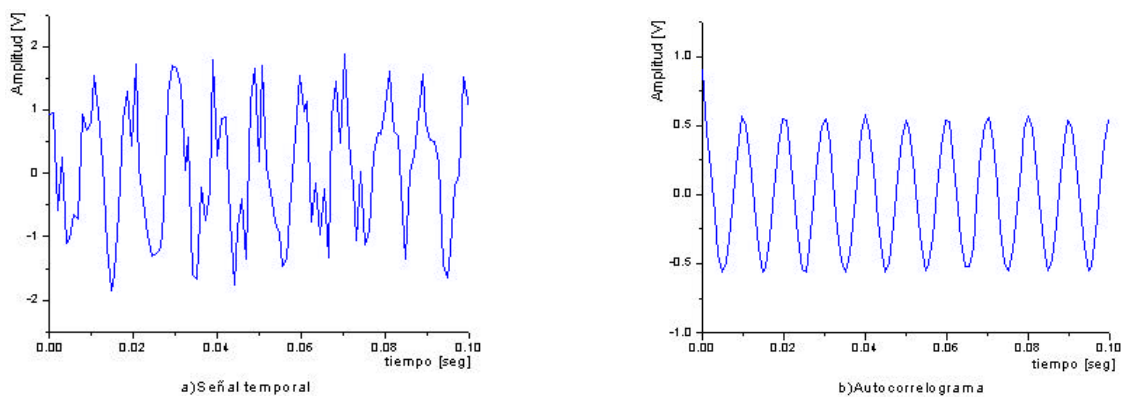


Figura 2. Señal temporal, formada por una onda senoidal más ruido random, y su respectivo autocorrelograma. Se observa el máximo del mismo para un desplazamiento cero y luego un comportamiento senoidal con la frecuencia de la señal original.

- *FFT*: se calcula la transformada de Fourier de la autocorrelación. Obteniéndose un espectro que sólo posee los componentes de interés para el análisis del estado de una máquina y en particular el de una rodadura.

II. Resultados y comparación con otras técnicas

Para determinar los alcances de la técnica desarrollada en este trabajo, se comparó la misma con dos técnicas de procesamiento convencionales: la FFT y la FFT más promediación en frecuencias.

Estos tres métodos fueron aplicados a dos señales generadas digitalmente: una simulaba la señal proveniente de un acelerómetro montado sobre un porta-cojinetes y la otra a una señal medida por un acelerómetro colocado sobre una caja de engranajes, ambas señales digitales son mostradas en la figura 3.

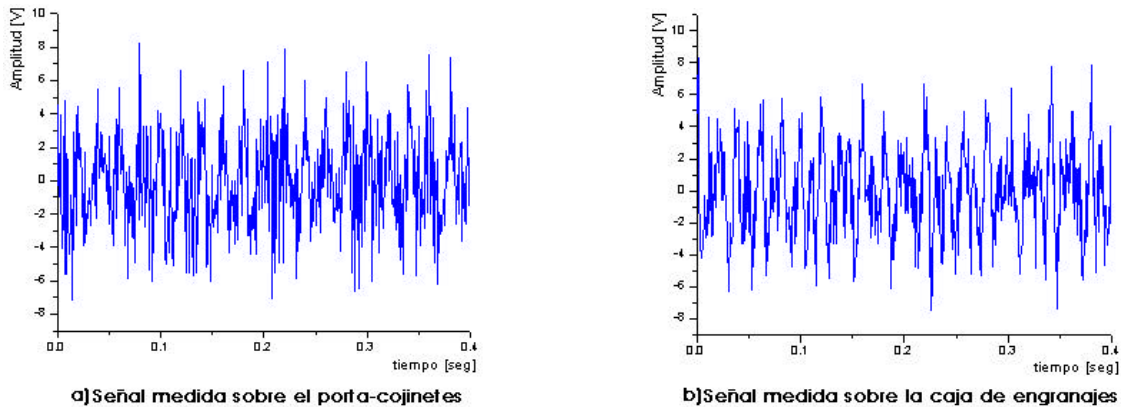


Figura 3. Señal digitales que simulan las señales medidas por un acelerómetro colocado: a) sobre un porta-cojinetes y b) sobre una caja de engranajes.

II.1. Comparación de los espectros obtenidos

En la figura 4 se pueden observar los espectros obtenidos mediante la aplicación de la FFT a las señales mostradas en la figura 3. Se pueden ver claramente los picos correspondientes a la velocidad de giro del motor (50 hz) y su segunda armónica (100 hz), el resto del espectro tiene demasiado ruido, el cual está mezclado con las resonancias del sistema y otras frecuencias que pueden ser de interés, como por ejemplo la de toque de dientes en el caso de la señal medida sobre la caja de engranajes, la cual es igual a:

$$\text{frecuencia de toque de dientes} = 50 \text{ hz} * 11 (\text{número de dientes del eje solidario al motor}) = 550 \text{ hz}$$

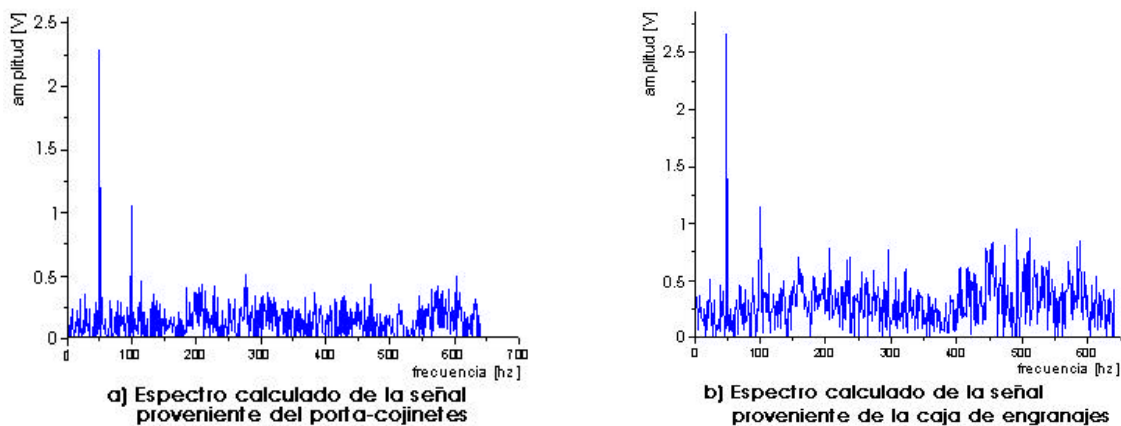


Figura 4. Espectros calculados mediante la FFT sin ningún otro procesamiento para las señales provenientes del: a) acelerómetro sobre el porta-cojinetes y b) acelerómetro sobre la caja de engranajes.

En la figura 5 se muestran los espectros obtenidos mediante la segunda técnica estudiada, FFT más promedio en frecuencias. Se observa que los espectros son similares, pero con mucho menor ruido lo cual permite observar las resonancias del sistema, pero no otras frecuencias de interés que están enmascaradas por estas resonancias.

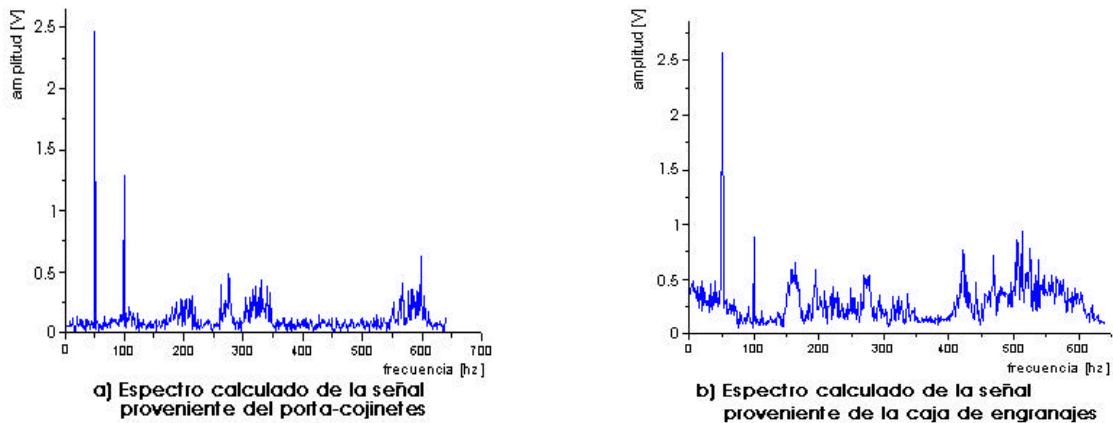


Figura 5. Espectros calculados mediante la FFT más promediación en frecuencias para las señales provenientes del: a) acelerómetro sobre el porta-cojinetes y b) acelerómetro sobre la caja de engranajes.

Los espectros obtenidos utilizando la técnica impulsiva sincrónica se pueden ver en la figura 6. En este caso se observa que el ruido fue eliminado completamente, debido a la autocorrelación, al igual que las resonancias, las cuales, al no tener una diferencia de fase fija respecto a la velocidad de giro del motor (componente elegida como frecuencia de sincronismo) son eliminadas cuando se hace el promedio temporal de la señal sincronizada. De esta manera sólo sobreviven las componente de 50 hz, 100 hz y 550 hz (toque de dientes) que sí tienen una fase fija respecto a la frecuencia de sincronismo.

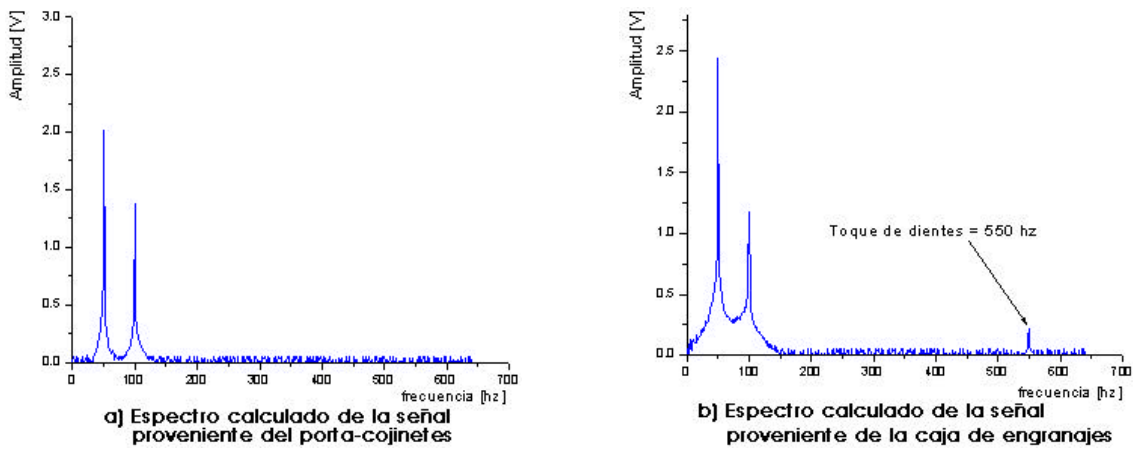


Figura 6. Espectros calculados mediante la técnica impulsiva sincrónica para las señales provenientes del: a) acelerómetro sobre el porta-cojinetes y b) acelerómetro sobre la caja de engranajes. En este último caso se puede observar claramente el pico correspondiente a la frecuencia de toque de dientes

II.2. Comparación de la capacidad de detección de falla

Como vimos en la sección anterior, en los espectros calculados con cualquiera de las tres técnicas se observan claramente la 1X (50 hz) y la 2X (100 hz) del motor, lo cual lleva a la conclusión que las tres técnicas son útiles para la detección de desbalanceo o desalineamiento en una máquina rotante.

Por lo que sería interesante observar como responde cada una de las técnicas ante otros tipos de fallas, especialmente en rodaduras, como por ejemplo una falla en la pista externa del un cojinete de bolas o pérdida de contacto de uno de los dientes del engranaje solidario al motor, estas serán las dos fallas que simularemos para analizar la respuesta de cada método a fallas en rodaduras.

II.2.1 Falla en la pista externa del cojinete de bolas

La frecuencia característica de una falla en la pista externa de un cojinete depende de la geometría de este y, por supuesto, de la frecuencia de giro de la máquina, que en nuestro caso la tomamos como 50 hz. Siendo, para un cojinete tipo girando a esta velocidad, igual a 310 hz.

Por lo tanto es de esperarse que al producirse este tipo de falla aparezca en el espectro un pico a dicha frecuencia. Sin embargo en los espectros obtenidos mediante FFT y FFT más promediación en frecuencias esta componente es enmascarada por el ruido y por las resonancias del sistema, según se puede ve en las figuras 7 y 8 respectivamente.

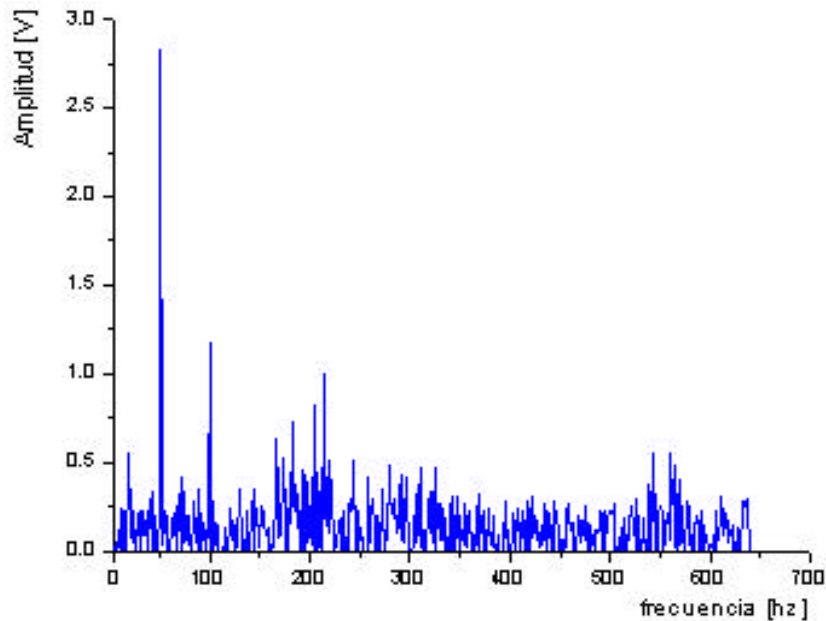


Figura 7. Espectro calculado mediante la FFT sin ningún otro procesamiento para la señal proveniente del acelerómetro sobre el porta-cojinetes cuyo cojinete tiene una falla en la pista externa.

Si observamos el espectro obtenido con la técnica impulsiva sincrónica (Figura 9) aparece un pico, aunque de baja amplitud, a la frecuencia esperada esto se debe a las bolas del cojinete giran solidarias al eje el motor produciendo golpes al pasar por la falla de la pista con una frecuencia que tiene una diferencia de fase fija respecto a la 1X del motor.

A medida que pasa el tiempo la falla en la pista externa se va extendiendo lo cual produce un ensanchamiento del pico, como si fuera una resonancia, **pero siempre aparece en el espectro** pues es una resonancia sincrónica con la velocidad de giro de la máquina. En la figura 10 se observa la evolución temporal de esta componente frecuencial lo cual

permite hacer un seguimiento del estado de la rodadura. Es decir que la técnica impulsiva sincrónica no sólo detecta la falla sino que además permite realizar un estudio de la evolución temporal de la misma.

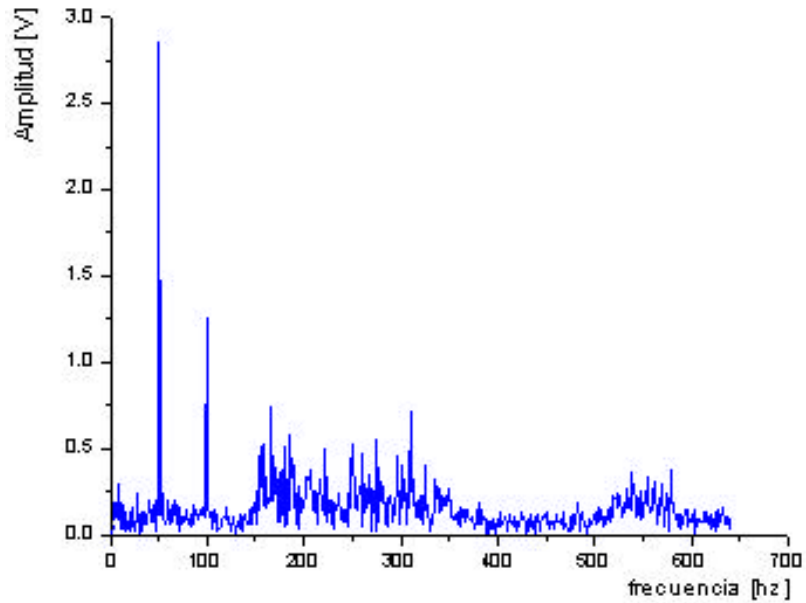


Figura 8. Espectro calculado mediante la FFT más promediación en frecuencias de la señal proveniente del acelerómetro sobre el porta-cojinetes cuyo cojinete tiene una falla en la pista externa.

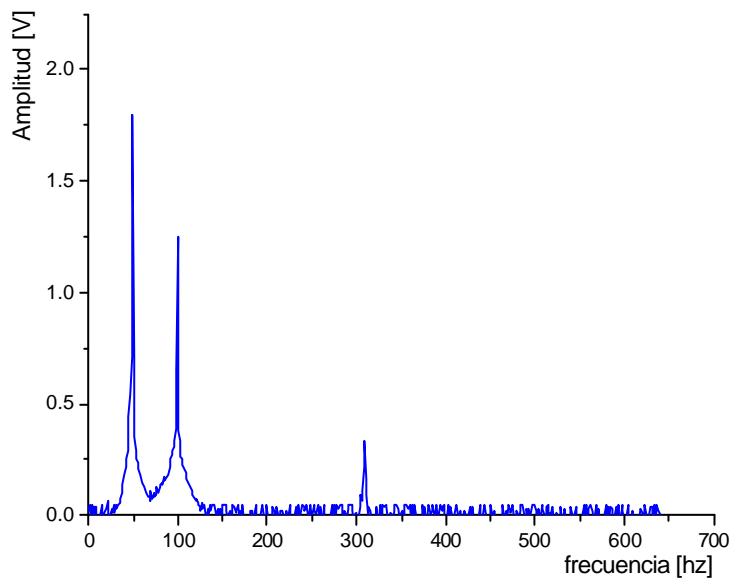


Figura 9. Espectro, calculado mediante la técnica impulsiva sincrónica, de la señal proveniente del acelerómetro sobre el porta-cojinetes cuyo cojinete tiene una falla en la pista externa. Se observa el pico en 310 hz correspondiente a la frecuencia de falla en pista externa

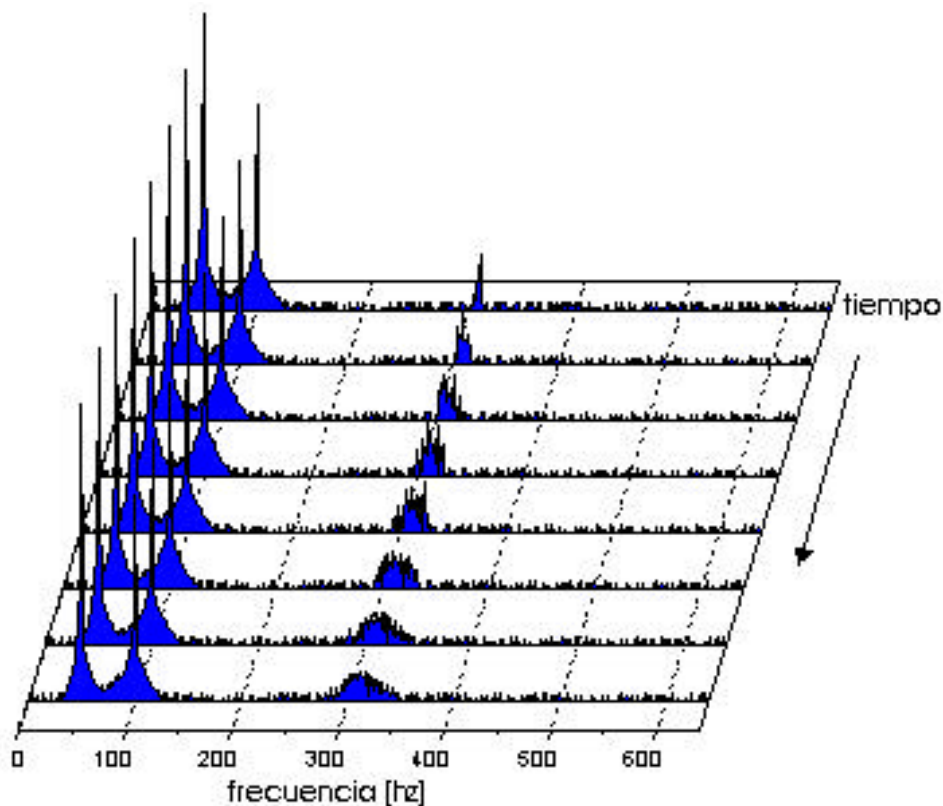


Figura 10. Espectros obtenidos con la técnica impulsiva sincrónica que muestran la evolución temporal de la falla en la pista externa del cojinete. Se observa que a medida que la falla se va extendiendo el pico se va ensanchando en frecuencias.

II.2.2 Pérdida de contacto de uno de los dientes del engranaje solidario al motor

Como ya vimos anteriormente la componente frecuencial correspondiente al toque de dientes sólo es observada en el espectro calculado mediante la técnica presentada en este trabajo, debido a que en los otros dos casos se confunde dentro de las resonancias del sistema.

Supongamos ahora que uno de los dientes del engranaje solidario al motor empiece a desgastarse en mayor medida que los otros, a causa, por ejemplo, de un desalineamiento motor-multiplicador, esto hace que la componente correspondiente a la frecuencia de toque de dientes empiece a perder energía, es decir amplitud, se ensanche levemente y que aparezca un pico aunque de muy baja amplitud, al principio, de una frecuencia igual a la frecuencia de giro de la máquina por el número de dientes del engranajes menos uno, debido a que en algunas vueltas el diente desgastado no entrará en contacto.

A medida que el diente se desgaste cada vez más llegará un momento en el cual no participará más en la rodadura por lo que el pico correspondiente al toque de dientes se correrá 50 hz para abajo en el espectro. Esta evolución temporal puede observarse en la

figura 11. Cabe destacar que si bien la simulación se realizó con el desgaste de un sólo diente la técnica es totalmente aplicable a un cualquier número de dientes.

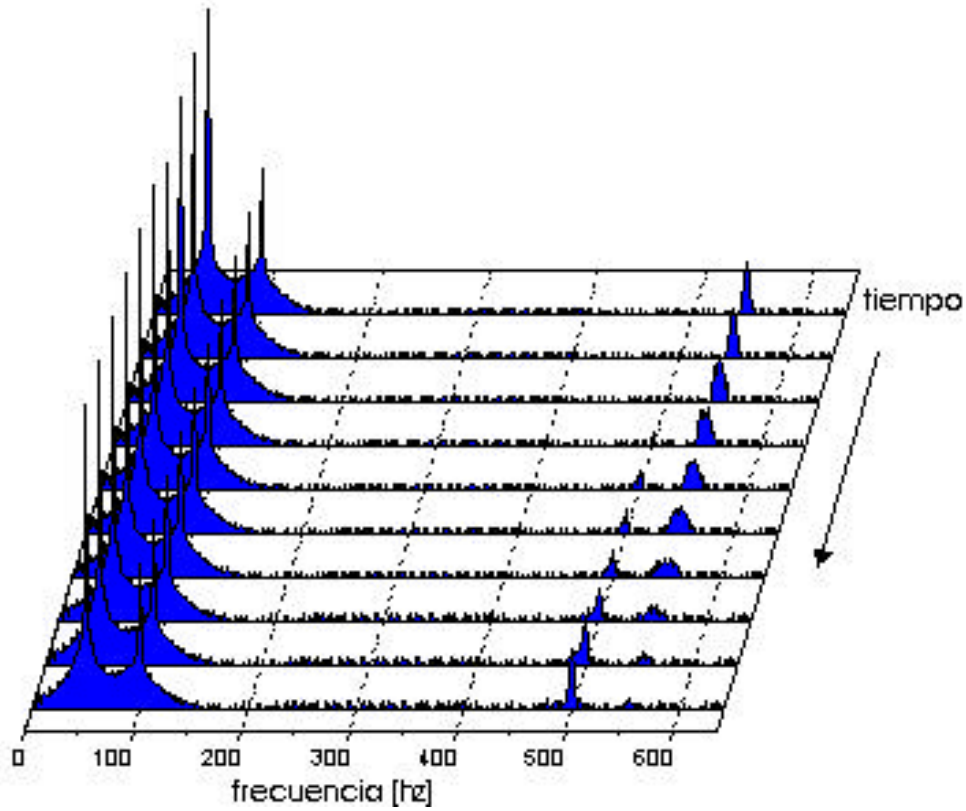


Figura 11. Espectros obtenidos con la técnica impulsiva sincrónica que muestran la evolución temporal de la pérdida de contacto de un diente del engranaje solidario al motor. Se observa que a medida que el diente es desgastado el pico correspondiente al toque de dientes se ensancha y aparece otro a 50 hz más abajo correspondiente al contacto del nuevo número de dientes.

III. Conclusiones

Se desarrolló una nueva técnica de procesamiento de señales de vibración totalmente digital, denominada técnica impulsiva sincrónica de barrido variable (T.I.S.), que se basa en la utilización de la autocorrelación y el sincronismo digital con las frecuencias que se desean analizar dentro de un espectro de Fourier.

Se verificó la eficacia de esta técnica para separar señales propias del sistema a analizar de aquellas que son externas al mismo y/o de origen estocástico.

Se compararon los resultados obtenidos, al analizar el estado dos tipos de rodaduras: cojinete de bolas y engranajes, mediante la aplicación de esta técnica de procesamiento con los que se logran mediante la utilización de dos técnicas convencionales: la FFT y la FFT más promediación en frecuencias.

Se comprobó que es la única de las tres técnicas estudiadas capaz de detectar fallas incipientes en rodaduras y de permitir el estudio de la evolución temporal de dichas fallas.

Los resultados obtenidos permiten asegurar que la técnica desarrollada en este trabajo posibilita la detección temprana de fallas en componentes críticos de máquinas-herramientas, tales como cojinetes y cajas de engranajes.

Además, debido a que es una técnica totalmente digital y aplicable a señales provenientes de cualquier sensor de vibración convencional, tales como acelerómetros, detectores de proximidad, sensores de fuerza, etc., es de bajo costo y fácil implementación pudiendo ser montada en un sistema de análisis y diagnóstico paralelo al sistema de seguridad de la máquina.