

## MODELOS ESPECTRALES PARA EL ANALISIS DE FALLAS EN SISTEMAS MECÁNICOS

Sara De Federico<sup>(1)</sup>, Alicia Tinnirello<sup>(2)</sup>

*(1),(2) Laboratorio Informático Departamento Ciencias Básicas, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rosario*

Zeballos 1341. (2000) Rosario. e-mails: [sdefederico@frro.utn.edu.ar](mailto:sdefederico@frro.utn.edu.ar), [atinnirello@frro.utn.edu.ar](mailto:atinnirello@frro.utn.edu.ar)

### RESUMEN

En el análisis espectral de vibraciones se presentan diversas técnicas de procesamiento de señales que han sido propuestas para detectar y diagnosticar fallas, como así también para analizar el tipo y la severidad de las mismas. El cambio en la severidad enfoca en señales no estacionarias o transitorias, y se logra con la elaboración de análisis espectrales localizados en función de los tiempos de manifestación. Además, metodologías basadas en conceptos probabilísticos permiten el estudio de la señal adicionada con perturbaciones mediante modelos paramétricos que establecen el estado de buen funcionamiento y que luego son utilizados como filtro lineal para procesar el futuro estado, utilizando la señal residual entre la señal del modelo filtrado y la señal futura del estado original.

El análisis que proponemos habilita para conocer las herramientas matemáticas que el profesional de Ingeniería Mecánica debe conocer para un diagnóstico acertado tanto en la medición como en el análisis de vibraciones como para interpretar y anticiparse a problemas de funcionamiento de sistemas industriales y de esta forma prevenir o predecir futuras fallas atendiendo a las exigencias de calidad, para poder operar con confiabilidad y para la evaluación de la integridad de máquinas y estructuras planificando un programa de mantenimiento predictivo.

Para un diagnóstico acertado, que permita predecir con razonable seguridad la vida útil de un equipo, es de vital importancia el análisis de patrones de comportamiento. Mediante sistemas de cálculo simbólico presentaremos la modelización dinámica de dichos patrones, con el propósito de analizar en forma integrada el espectro y la forma de onda de la vibración lo que permite detectar defectos en rodamientos de máquinas de baja velocidad. Asimismo analizaremos, en el sentido académico de la propuesta, las distintas técnicas en el procesamiento de señales utilizadas en diagnóstico de fallas para el tipo y la severidad de la falla una vez detectada.

**Palabras Claves:** simulaciones, vibraciones, análisis espectral, modelos paramétricos

## **1. INTRODUCCIÓN**

En la actualidad, en los procesos que involucran máquinas y equipos con rodamientos, para preservar el funcionamiento de los mismos se programan actividades para realizar el mantenimiento de aquellos que resultan críticos de manera de prevenir fallas que ocasionen paradas para mantenimiento o reposición. También es de interés conocer cuanto tiempo una máquina puede operar con seguridad y detectar cambios en su funcionamiento con la debida anticipación.

Tanto en el diagnóstico como en el pronóstico de fallas es necesario la actuación de un experto en el tema, no obstante para interpretar el estudio de las condiciones operativas y el análisis frecuencial (o espectral) del informe es de fundamental importancia conocer los fundamentos del análisis de las señales correspondientes al estudio en cuestión, como el historial del comportamiento del equipo para la toma de decisiones.

La medición y el análisis de vibraciones es utilizado en todo tipo de industrias, como técnica de diagnóstico de fallas y evaluación de la integridad de máquinas y estructuras. En el caso de los equipos rotatorios, la ventaja que presenta el análisis vibratorio respecto a otras técnicas, es que la evaluación se realiza con la máquina funcionando, evitando con ello la pérdida de producción que genera una detención del proceso.

Para un diagnóstico acertado, que permita predecir con razonable seguridad la vida útil de un equipo es de vital importancia el análisis de patrones de comportamiento. En el presente trabajo se hace una aproximación al análisis de señales utilizando software de cálculo simbólico para la observación y comportamiento de diferentes patrones de señales específicas que corresponden a partes de maquinarias usuales, el resultado del adición de ruidos relacionados con las fallas más frecuentes; finalmente analizaremos modelos probabilísticos que mejoran el análisis de la señal sobre todo cuando se presentan grandes picos, y las técnicas de aplicación de estos modelos.

El objetivo del análisis es poder extraer información útil para la apreciación del efecto aleatorio de las interferencias en la toma de datos reales, y la necesidad de un filtrado de las señales obtenidas por medio de los sensores captadores de la señal. La etapa de acondicionamiento de la señal consiste en captar la señal que sale del transductor eligiendo apropiadamente el tipo de sensor para el rango de frecuencia y para que la señal pueda ser medida adecuadamente; esto contempla en algunos casos, dependiendo del tipo de transductor, filtraje, integración, amplificación o demodulación.

## **2. DISTINTAS TÉCNICAS DE ANÁLISIS**

El objetivo del análisis es poder extraer el máximo de información relevante que un conjunto de datos captados de un sistema mecánico posee utilizando para ello diferentes técnicas basadas en el dominio tiempo como en el dominio frecuencia las que presentan diferentes ventajas según el caso en estudio.

Las técnicas utilizadas se implementan con el uso de software de cálculo simbólico son:

- ✓ Creación de señales y simulación de toma de datos.
- ✓ Análisis de espectro en frecuencia, obtenido mediante el uso del método de la FFT (Fast Fourier Transform)
- ✓ Análisis de espectro en tiempo - frecuencia, obtenido paso a paso.
- ✓ Inclusión de ruidos asociados a fallas determinadas.
- ✓ Presentación de modelos paramétricos y de su aplicación.

### 2.1.1 Simulación de señales

A partir del reconocimiento de las diferentes ondas que representan partes de sistemas engranados, se trabaja con datos simulados, creando así los modelos, patrones de ondas, para diversos tipos. Partiendo de una ecuación de onda sinusoidal sencilla:

$$f(t) = \text{Sen}(\pi \omega t) \quad (1)$$

se producen señales complejas por mezcla de armónicas o combinación de diferentes modulaciones, obteniéndose señales típicas de sonidos de engranajes y partes de sistemas de engranajes, en condiciones ideales de funcionamiento. Luego, por medio de algoritmos simuladores, se hacen muestras de valores de la señal. Estos datos ideales servirán para hacer un análisis espectral evidente y claro, que fortalecerá el afianzamiento de conceptos inestimables en los futuros abordamientos del tema en las materias relacionadas.

### 2.1.2 Análisis espectral

La esencia del análisis espectral es descomponer la señal vibratoria en el dominio del tiempo en sus componentes espectrales en frecuencia, este estudio se hace en esta oportunidad por medio de la aplicación del método de la FFT (Fast Fourier Transform). Este método se basa en el muestreo de la Transformada de Fourier Discreta de una señal, a través de la suma de los términos del muestreo, que se calculan de la siguiente manera:

$$x(t) \rightarrow x[n] = \sum_{k=0}^{N_F-1} x[k] \cdot e^{i2\pi \frac{nk}{N_F}} \xleftrightarrow{DF} x[k] = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N_F-1} x[n] \cdot e^{-i2\pi \frac{nk}{N_F}} \quad (2)$$

siendo  $N_F$  el tiempo total del muestreo y  $x[n] = x(nT_s)$  con  $T_s = \frac{1}{f_s}$ ,  $f_s =$  frecuencia del

muestreo. El tiempo total del muestreo y la frecuencia del muestreo se escogen en función de una visualización óptima del espectro, y es proporcional a la frecuencia fundamental de la señal, definiéndose como *ventana del muestreo* al espacio temporal seleccionado, que luego se aplica periódicamente en el tiempo. Cuánto más ventanas se elijan, más resolución tendrá el espectro resultante, debido a la mayor cantidad de datos muestreados.

El muestreo se grafica, obteniéndose una descripción discreta de la señal en dominio de la frecuencia, que es otra forma de salida usual en los equipos de medición de vibraciones.

Se presentan a continuación posibles formas de vibración caracterizadas por diferentes fallas en sistemas mecánicos. Se observan los gráficos en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia de algunos casos seleccionados:

- a) Señal senoidal simple producto de la rotación de un eje, su espectro de frecuencia muestreado en tiempo discreto a 16 Hz. La señal sigue la forma:

$$f(t) = A \text{Sen}(2 \pi f_r t) \quad (3)$$

siendo  $A$  la amplitud, y  $f_r$  la frecuencia de la rotación del eje.

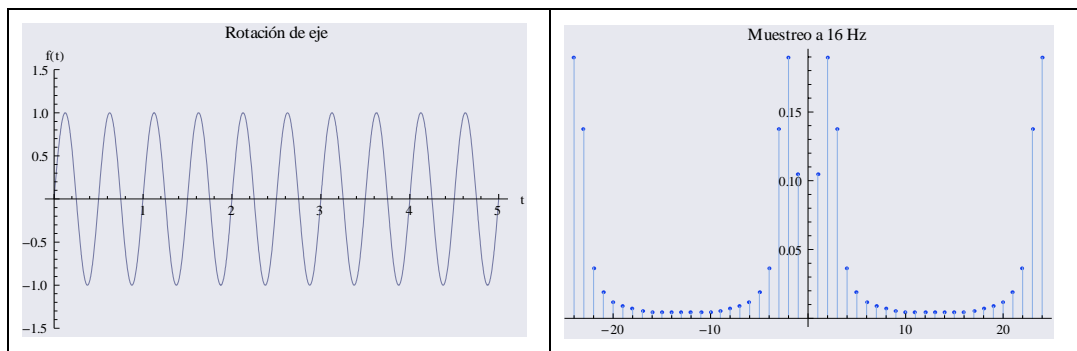


Figura 1 Señal de rotación de un eje en condiciones normales

- b) La señal de un engranaje que presenta una frecuencia fundamental proporcional al eje de rotación y al número de dientes, con 2° y 3° armónicas producidas por desviaciones en los dientes del engranaje, que pueden ser producidas por desgaste, daños en el material por exceso de temperatura o defectos de fábrica. La señal tiene la forma:

$$f(t) = \sum_{n=0}^N A_n \text{Sen}(2 \pi n f_e t) + \varphi_n \quad f_e = f_r N \quad (4)$$

siendo  $\varphi_n$  el ángulo de fase y  $N$  la cantidad de dientes del engranaje.

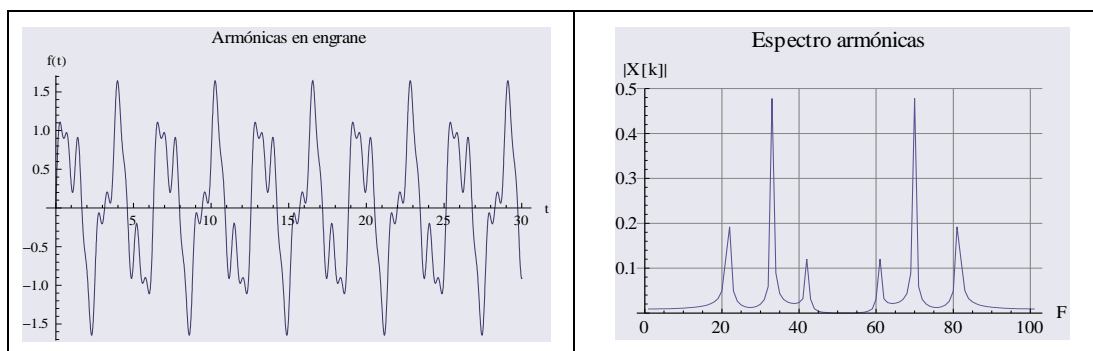


Figura 2 Señal de vibraciones de un eje con engranajes con fallas en los dientes

- c) El cambio en las amplitudes de las frecuencias indica una desviación del eje de rotación, que puede ser producida por fallas en los cojinetes o desperfecto estructural del mecanismo. La señal tiene la forma:

$$f(t) = \sum_{n=0}^N A_n \text{Sen}(2\pi n f_r t) + \varphi_n + \sum_{j=0}^J A_j \text{Sen}(2\pi n f_e t) + \varphi_j \quad f_e = f_r N \quad (4)$$

siendo  $\varphi_i$  los ángulos de fase y  $A_j$  la amplitud de la j-ésima armónica.

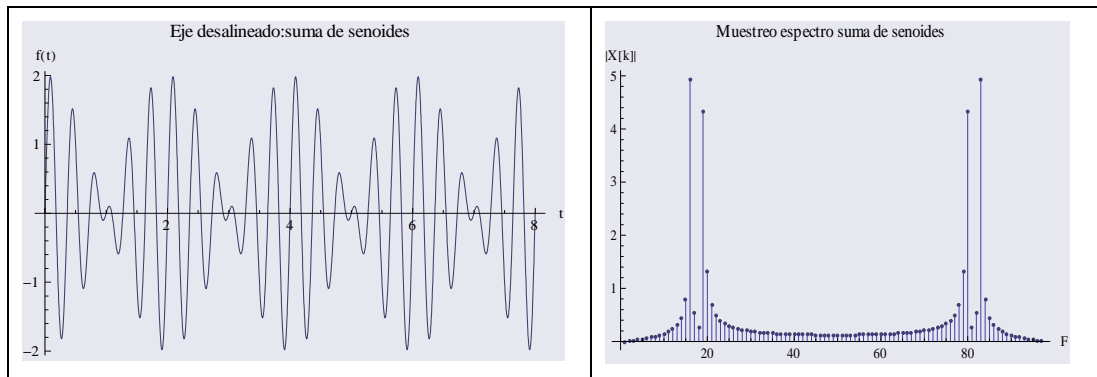


Figura 3 Señal de un eje desviado o desalineado

- d) Una señal continua con saltos de amplitud periódicos se deben al impacto por golpeteo o salto por desgaste en el rodamiento. El impacto se determina por una función salto que provoca un pico de amplitud proporcional al daño de la pieza. La forma de la señal es:

$$f(t) = S(t) A \text{Sen}(2\pi \Omega t) \quad S(t) = \text{Salto} \quad (5)$$

siendo  $\Omega$  la frecuencia resonante producto del fallo en conjunto con la rotación del eje.

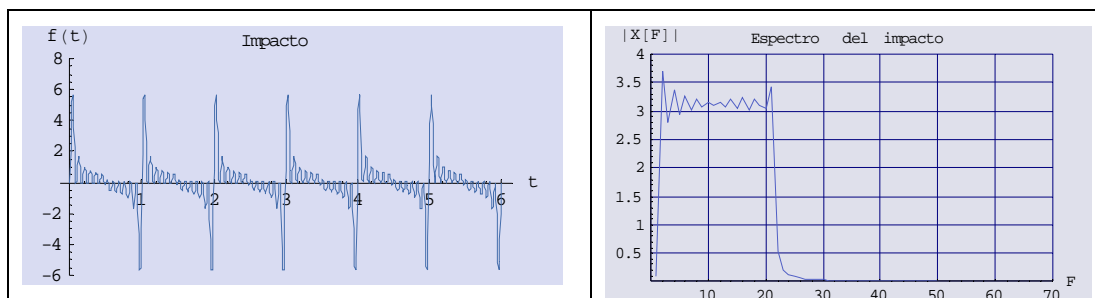


Figura 4 Señal que indica un impacto por golpe

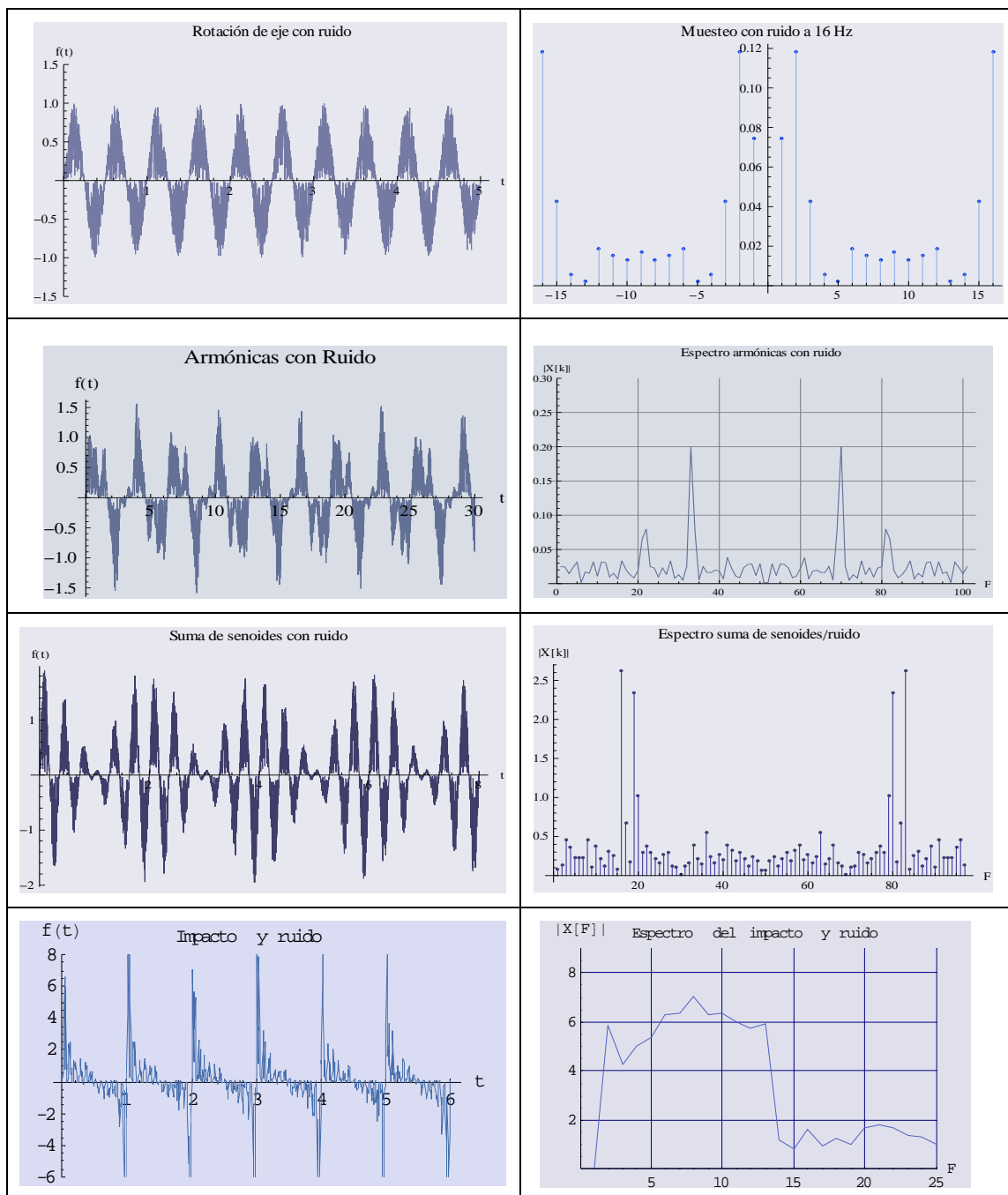
### 3. ANÁLISIS ESPECTRAL DE SEÑALES CON RUIDO

Los patrones de señales sirven para incorporar un conocimiento previo del comportamiento de sistemas mecánicos en condiciones teóricas de funcionamiento, pero la captación de datos en situación real vuelca señales afectadas por ruidos e interferencias que alteran la salida y la visualización de las vibraciones. Por ello se toman las señales simuladas y se les aplica ruido por medio de generadores estocásticos, con este procedimiento se provee una estimación de

señales reales aportándole aleatoriedad al sistema, y permitiendo un reconocimiento más genuino de los gráficos.

En la Tabla 1 se pueden observar los patrones antes estudiados a los que se les adiciona ruido, que proporciona una desviación aleatoria de los datos de su valor medio. En los espectros de frecuencia la onda base queda atenuada parcialmente por los picos intermedios de frecuencias.

*Tabla 1 Señales afectadas por ruido y su espectro de frecuencia*



Cuando una señal se ve afectada por un ruido intenso o extremo, se desdibuja completamente, y su espectro de frecuencia es caótico. En la Figura 5 se observa un caso especial de ruido por desajuste del montaje que provoca todo tipo de vibraciones combinadas y un ruido extremo.

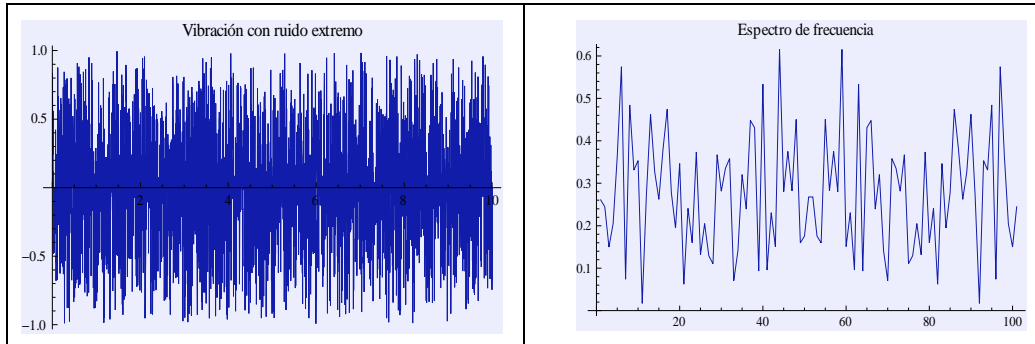


Figura 5 Señal de vibración con ruido intenso

#### 4. ANÁLISIS DE ESPECTROS EN TIEMPO-FRECUENCIA: APRECIACIÓN CUALITATIVA

Del conjunto de señales estudiadas se posee ahora una muestra de datos de los cuales se puede extraer más información que la ya obtenida. Existe entonces la necesidad de un estudio que describa más apropiadamente señales no estacionarias o transientes, y esto se consigue con las distribuciones o transformadas tiempo-frecuencia. La transformada tiempo-frecuencia permite un análisis tridimensional amplitud-tiempo-frecuencia, es decir, se agrega una nueva dimensión, el tiempo, a la clásica FFT. Para observar el comportamiento temporal de la señal, se programan los algoritmos extractores de datos simulados para que adquieran no sólo una muestra en un instante, sino  $m$  muestras espaciadas en el tiempo por períodos relacionados con la frecuencia fundamental o un período de tiempo en interés particular. Luego se grafican en conjunto estas  $m$  muestras en 3D en tiempo – frecuencia [4]. Construidas con software de cálculo simbólico, estas configuraciones visuales exigen del alumno un análisis profundo de los componentes de la ley que define una señal.

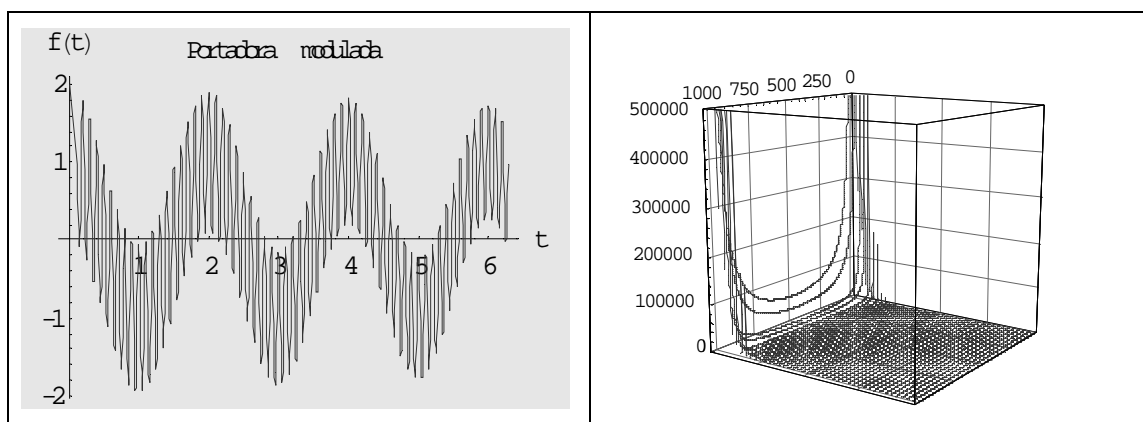
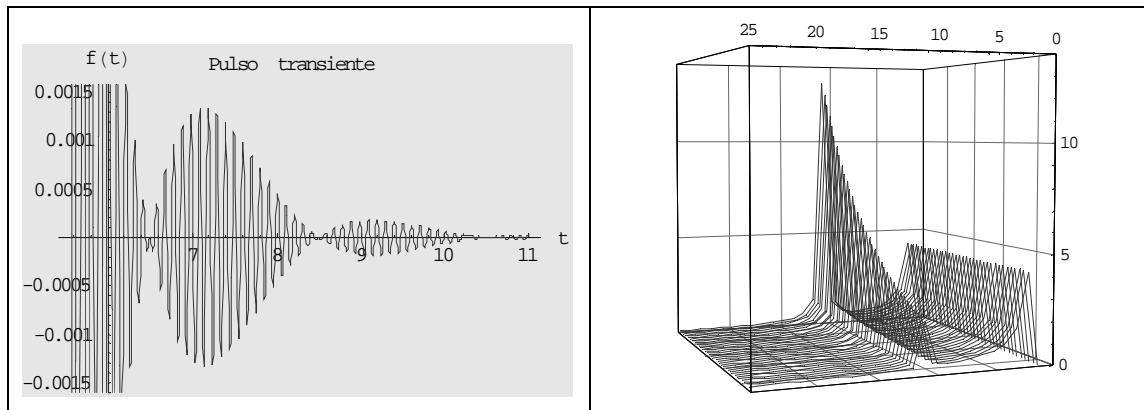
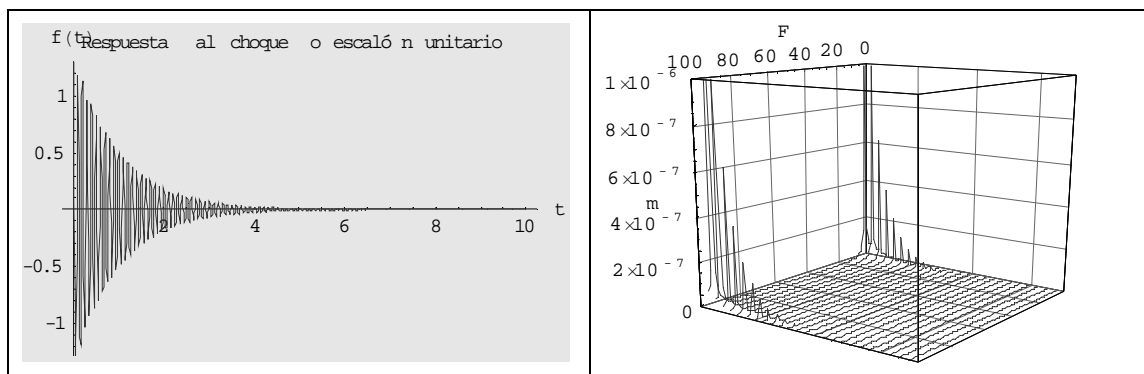


Figura 6 Señal modulada y muestreo en tiempo-frecuencia



*Figura 7 Señal transiente y su muestreo en tiempo-frecuencia*



*Figura 8 Señal sinusoidal amortiguada y su muestreo en tiempo-frecuencia*

## 5. MODELOS PARAMÉTRICOS

Se hallan disponibles una gran variedad de modelos paramétricos para modelar señales provenientes de sistemas mecánicos, estos incluyen los modelos autorregresivos (AR), los autorregresivos de medias móviles (ARMA) y los modelos armónicos.

Los modelos autorregresivos (AR) provienen de la demanda de una estimación espectral de alta resolución. Estos pertenecen a los métodos de modelado paramétricos con una función de transferencia racional. El modelo AR es apropiado para la estimación de espectros con picos pronunciados pero sin valles profundos, tal es el caso de las señales de rodamientos y es particularmente útil para modelar secuencias con comportamiento senoidal.

Un proceso random determinístico es aquel perfectamente predecible basado en el pasado, esto significa que una secuencia de datos (o una señal de tiempo discreta)  $x[n]$  puede ser expresada por una combinación lineal infinita de todos los valores precedentes; la secuencia de datos puede aproximarse utilizando  $p$  valores precedentes. Este tipo de modelo se expresa como una regresión lineal más una serie error de aproximación, ec. (6):

$$x[n] = -\sum_{k=0}^{p-1} a[k]x[n-k] + e[n] \quad (6)$$

Donde  $e[n]$  es una serie ruido blanco gaussiano con media cero y varianza  $\sigma^2$  y  $p$  el orden del modelo. La densidad espectral de potencia de la secuencia de los datos  $x[n]$  es:

$$P_{x,AR}(f) = \frac{\sigma^2}{|A(f)|^2} \quad (7)$$

Donde  $|A(f)|^2$  representa la densidad espectral de los coeficientes  $a[n]$  del modelo AR, con  $n = 1, 2, \dots, p$ .

Para representar secuencias con un espectro que contenga picos pronunciados y valles se pueden utilizar los modelos ARMA, representados por:

$$x[n] = -\sum_{k=1}^p a[k]x[n-k] + \sum_{k=0}^q b[k]e[n-k] \quad (8)$$

La segunda parte de la ec. (8) es efectivamente un promedio de los valores previos de la serie ruido  $e[n]$  llamado promedio móvil MA ( $q$ ) de orden  $q$ . La ec. (8) es un combinación de modelos AR y MA llamados ARMA ( $p, q$ ). Es importante puntualizar que la serie ruido  $e[n]$  es una parte innata del modelo y representa la parte de naturaleza aleatoria de la serie observada. En las Fig. 9 y Fig. 10 se muestra la simulación de una señal con impacto adicionada con ruido, y el modelo AR obtenido para luego, mediante el reporte espectral del mismo, lograr información de mejor resolución que con el análisis FFT mostrado en la Fig.4 y en la Tabla 1.

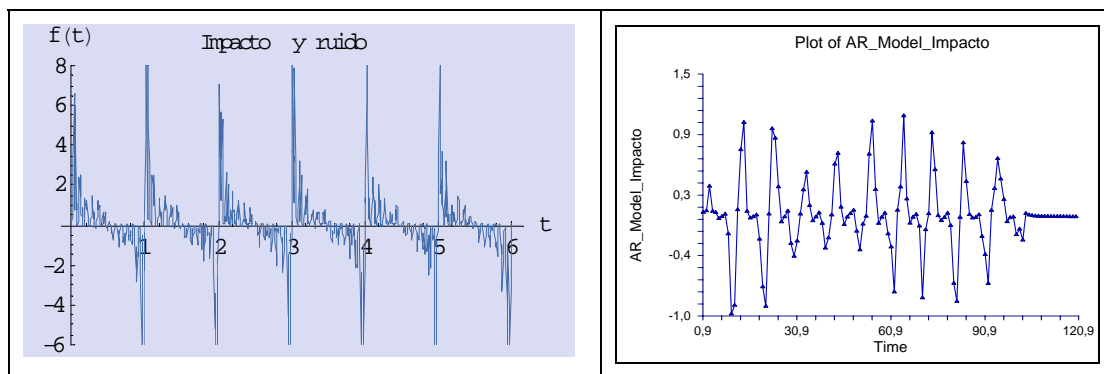


Figura 9 Señal de impacto y modelo AR

Teniendo en cuenta investigaciones recientes los modelos AR parecen ser más apropiados para representar señales de rodamientos, esto es debido a: (i) las señales están compuestas predominantemente por armónicas senoidales, (ii) la densidad espectral de potencia de la señal está dominada por grandes picos en el mezclado de las armónicas y (iii) los algoritmos de estimación de los parámetros de los modelos AR son computacionalmente eficientes.

Este tipo de modelos puede también representar, con mejor resolución, las señales de rodamientos compuesta fundamentalmente por composición de armónicas senoidales [5].

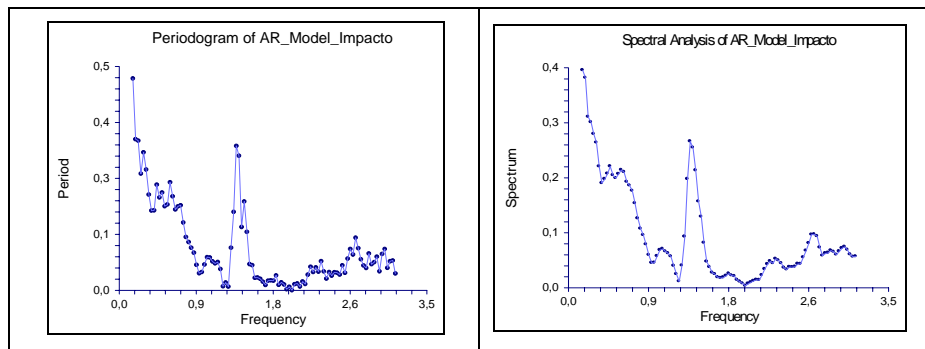


Figura 10 Periodograma y espectro de frecuencia del modelo AR

## 6. CONCLUSIONES

Las simulaciones realizadas presentan una breve reseña de las herramientas de análisis espectral de señales para detectar fallas en sistemas mecánicos, mostrando distintas causas que pueden darse en la tarea de localizar fallas o eventos en el funcionamiento de los equipos; el modelo matemático involucrado y el análisis tiempo-frecuencia. La metodología utilizada habilita para presentar las herramientas matemáticas que el profesional de Ingeniería Mecánica debe conocer para realizar un diagnóstico, tanto en la medición como en el análisis de vibraciones, como para interpretar y anticiparse a problemas de funcionamiento de sistemas industriales y de esta forma participar en la prevención o predicción de futuras fallas.

## 7. REFERENCIAS

- [1] M. J. Roberts, Señales y Sistemas, Mc Graw Hill, 2004.
- [2] A. V. Oppenheim & A S Willsky, I T Young, Signal and Systems, Prentice Hall Internacional Editions, 1983.
- [3] H. Kwakernaak & R Sivan, Modern Signals and Systems, Prentice Hall I& SSS, 1991.
- [4] Haym Benaroya, Mechanical Vibration: Analysis, Uncertainties and Control, Second Edition Mechanical Engineering, 2004
- [5] Wenyi Wang and Albert K Wong " A Model-Based Gear Diagnostic Technique" DSTO Defense Science & Technology Organization C. of Australia Dec. 2000