

Análisis tiempo-frecuencia de las resonancias en la combustión

S. Cerdá, J. Romero y J. Navasquillo.
Laboratorio de Acústica. Facultad de Física. Universidad de Valencia.
e-mail:cerdaj@uv.es
G. Zurita
Acoustics Group.Division of Environment Technology.
Lulea University of Technology.
e-mail:Grover.Zurita@arb.luth.se

PACS: 43.60.Gk

Resumen

En este trabajo estudiamos los fenómenos no estacionarios que se producen en las resonancias en la combustión. La aparición de estos fenómenos está asociada al denominado efecto de *knock*. Este efecto corresponde a la combustión espontánea de los gases y va en detrimento del rendimiento. Esta combustión es muy rápida y produce la aparición de las resonancias propias de la cavidad. Al ser un proceso variable con el tiempo, los mecanismos de análisis tiempo-frecuencia nos permiten observar cómo varían estas resonancias.

Summary

In this paper the study of non-stationary features due to resonances in the combustion process has been focused. The rapid rise in Diesel engines is recognised as an audible impulse noise, which is known as “knock”. The knock is caused by the spontaneous combustion of a significant volume of fuel/air mixture. The knock produces shock waves within the combustion chamber and result a great number of combustion chamber resonance frequencies. A time-frequency analysis has been performed to detect the variation of the resonances.

1. Introducción

El objetivo de este trabajo es el análisis tiempo-frecuencia a la detección del fenómeno de *knock* en la combustión.

Esta tarea se enmarca en la aplicación del análisis tiempo-frecuencia al diagnóstico y seguimiento de la maquinaria. La importancia de la detección de este fenómeno reside en que los motores de hoy en día son más eficientes próximos al punto en el que se produce el *knock*, es decir la combustión espontánea de los gases residuales de la combustión. Algunos automóviles llevan un detector de este fenómeno, para que la combustión se realice sin llegar al punto en el que se produce la combustión de los gases, pues esta es perjudicial para el rendimiento y el propio motor. La detección de este fenómeno se suele realizar mediante filtros pasa-banda.

Algunos estudios [7] remarcan el carácter no estacionario de este fenómeno, como indicación de una posible mejora en su detección utilizando métodos de análisis tiempo-frecuencia. En la siguiente sección introduciremos el concepto de *knock* y analizaremos la no estacionariedad de este fenómeno. El análisis de este fenómeno se realiza a partir de la señal de presión en el interior del cilindro (desde un punto de vista académico), y la vibración obtenida en el exterior del cilindro. Los métodos habituales de detección utilizan esta última señal (vibración), dada la dificultad y coste que corresponde al trabajar con la señal de presión. En la sección tercera presentamos un análisis de la presión.

2. El fenómeno de “knock”

El fenómeno del ‘knock’, aparece por la ignición espontánea de una fracción de los gases residuales durante un ciclo de la combustión [7]. La liberación de calor que acompaña al auto-encendido es tan rápida que produce un

aumento local de la presión pudiéndose formar ondas de choque [4]. Esta onda de choque excita las resonancias del cilindro, produciendo un sonido particular (*knocking sound*). La formación de estas ondas de choque, aunque son la causa de los daños mecánicos, es una consecuencia del auto-encendido y no su causa [4].

Desde un punto de vista acústico, consideramos el cilindro como una cavidad con paredes duras, cerrada con tapas planas [10] y repleta de un gas homogéneo [7]. La onda de choque que aparece excita los modos de vibración de la cavidad que vienen dados por la expresión:

$$f_{m,n,p} = c \sqrt{\left(\frac{x_{m,n}}{B}\right)^2 + \left(\frac{p}{2L}\right)^2}$$

donde c es la velocidad del sonido, B es el diámetro del cilindro y L es la longitud axial del cilindro. Los valores $x_{m,n}$ son los ceros de la derivada de la función de Bessel de primera especie, es decir satisfacen: $J'_m(\pi x_{m,n}) = 0$. Por otro lado, la velocidad del sonido viene dada por la expresión:

$$c = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}, \quad \gamma = \frac{C_p}{C_v}$$

Esto nos indica que dos son las fuentes de la variación de las frecuencias: el cambio de la temperatura y el cambio producido por el movimiento del pistón. Nótese que el movimiento del pistón también influye en el cambio de la temperatura.

En [7], se argumenta que dado que el fenómeno ocurre poco después de que el pistón alcance su altura mayor (TDC), las componentes axiales son despreciables. Por tanto el cambio en las frecuencias proviene de la variación en la temperatura que se produce en el interior del cilindro: *se espera un cambio en las frecuencias de resonancia del orden del 5-20 % como consecuencia del cambio en la temperatura* [7]. Para esta aproximación las frecuencias vienen dadas por:

$$f_{m,n} = \frac{c_0 \sqrt{T} x_{m,n}}{B}$$

Si consideramos que la expansión es adiabática [2], tenemos que

$$TV^{\gamma-1} = \text{constante}$$

esto implica [7], considerando el ángulo de giro como parámetro en vez del tiempo, que para las frecuencias no-axiales:

$$\frac{f(\theta)}{f(\theta_0)} = \left(\frac{V(\theta_0)}{V(\theta)}\right)^{\gamma-1/2}$$

El cambio que se produce en el volumen en función del ángulo de giro viene dado por la expresión

$$V(\theta) = V(0) + \pi R^2 \left[l_A (1 - \cos(\theta)) + 1 - \sqrt{l_B^2 - l_A^2 \sin^2(\theta)} \right]$$

en la que l_A y l_B son las longitudes de la biela y manivela.

Como vemos la expresión anterior complica el cálculo de la variación de las frecuencias y además supone el conocimiento de los parámetros geométricos del cilindro.

3. Análisis de la presión

En esta sección vamos a estudiar el fenómeno a partir de la señal obtenida en el interior del cilindro. Una señal típica de la presión la podemos ver en la siguiente figura 1. En esta figura hemos indicado varios puntos que caracterizan termodinámicamente a la señal [2], [6].

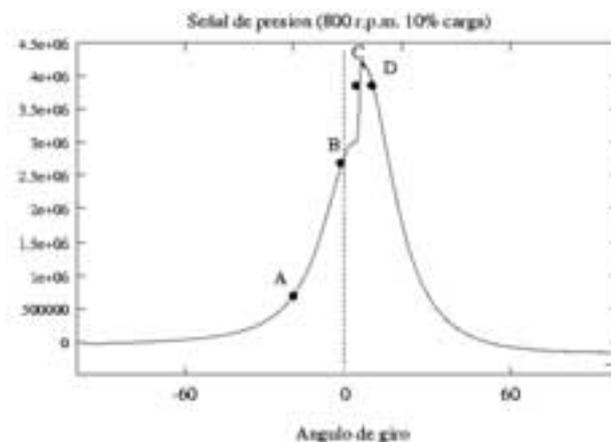


Figura 1

1. **Inyección, AB.** El combustible se introduce en el interior del cilindro donde hay aire caliente. Durante este periodo el combustible se separa en gotas que se van vaporizando y mezclando con el aire.

2. **Combustión incontrolada, BC.** El encendido causa un rápido aumento de presión.

3. **Combustión controlada, CD.** La combustión ocurre a una velocidad determinada por la mezcla.

4. **Final de la combustión, D.** Se acaba la combustión hasta que todo el aire o el combustible se termina.

Los datos con los que hemos trabajado, corresponden a distintas velocidades (800, 1400 y 2000 r.p.m) y con dife-

rentes cargas de combustible (10%, 50% y 100%). Por otro lado, el motor utilizado fue un motor diesel de 11 litros, 6 cilindros en línea, modificado, trabajando con etanol mejorado. El motor esta fabricado por Scania, con un cilindro de 127 mm de diámetro, y un recorrido de 145 mm con una relación de compresión de **18:1**.

En cada ciclo, pueden existir variaciones en la presión causadas principalmente por diferencias en la inyección del combustible y cambios locales de la temperatura. Estas variaciones son importantes pues en un proceso de detección hay que estimar si utilizar un método ciclo a ciclo o de promediado [8].

4. Análisis de la vibración

En la sección anterior consideramos el análisis de la presión en el interior del cilindro. Sin embargo, este procedimiento no es el que se utiliza en la detección de ‘knock’, pues implica introducir un detector en el interior del cilindro con el consecuente gasto. Normalmente se analiza la vibración que se transmite fuera del cilindro. En esta vibración nos encontramos diversas componentes producidas por las distintas partes del motor.

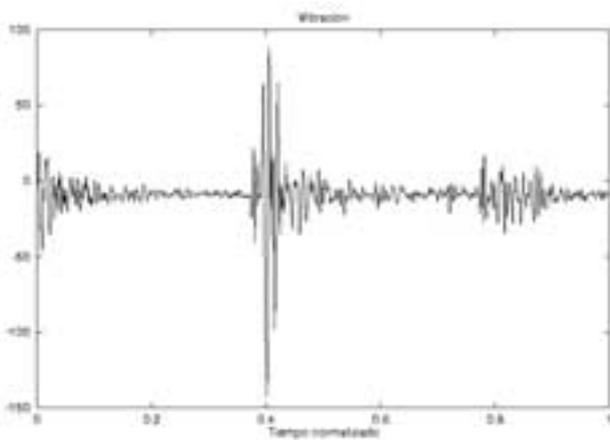


Figura 2

En la figura 2, podemos ver la vibración medida en el exterior del cilindro para el mismo momento en el que el interior teníamos la señal que aparece en la figura 1.

Podemos apreciar que ahora la señal está sumergida en un fondo con otras vibraciones. Esto se observa también en el dominio de frecuencias tal y como aparece en la figura 3 .

En general la vibración es una señal con una relación señal-ruido muy pobre, dificultando la detección del fenómeno de ‘knock’. Esta relación todavía disminuye más con el aumento de la velocidad [3] .

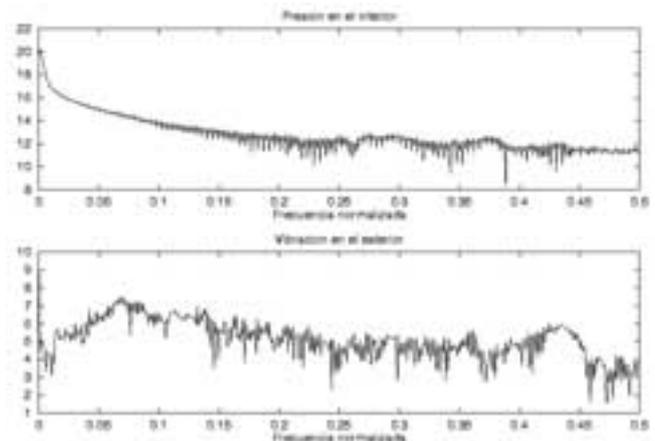


Figura 3

5. Mecanismos de detección

Como dijimos antes, el fenómeno de ‘knock’ produce una onda de choque que excita las resonancias del cilindro. Los sistemas de detección de ‘knock’ actúan en diferentes dominios: tiempo, frecuencia o tiempo-frecuencia [3],[9] . Estos mecanismos pueden hacer un análisis ciclo-a-ciclo, o de forma estadística determinando la “tendencia” del fenómeno [3], [8], [9] . Normalmente, en la señal de presión, las resonancias se pueden aislar mediante un filtro pasa-banda, trabajando por tanto en el dominio temporal. Estas frecuencias de resonancia dependen de las dimensiones del cilindro y de la velocidad del sonido en la mezcla aire-combustible que hay en el interior y por tanto de la temperatura en el interior.

Por otro lado, la vibración que se detecta en el exterior del cilindro depende de la función de transferencia del motor. Cualquier vibración mecánica del motor perturba la detección del knock. Por ejemplo, el cierre de las válvulas produce vibraciones de alta frecuencia semejantes a las resonancias [9] .

En el proceso de detección se pueden distinguir tres partes:

1. **Procesado.** En el que se produce la detección de la señal en una banda determinada.
2. **Extracción de características.** En este paso se determinan los parámetros que nos caracterizan la señal.
3. **Control de la señal.** En esta parte y mediante el estudio de los parámetros calculados, se determina si se ha producido o no el fenómeno.

5.1. Procesado

Existen detectores que miden la presión directamente. En este caso tenemos la mejor señal para analizar. Para cada ci-

lindro tenemos que tener un detector y el problema del coste puede ser importante. Aunque las medidas de presión se suelen utilizar solamente en la investigación hay algunos vehículos comerciales que si que introducen estos sensores [5]. Sin lugar a duda, estos sensores son los que se utilizaran en un futuro cuando los costes se reduzcan.

Los detectores más utilizados miden las vibraciones que se transmiten a través de la estructura. La señal recibida está contaminada por otras fuentes. Existen dos tipos de sensores: sintonizados y de banda. Los sintonizados detectan la presencia de la frecuencia fundamental del cilindro. Como esta frecuencia depende de cada vehículo hay que tener un detector para cada vehículo, considerando las características propias del lugar donde se coloca. Los detectores de banda, se aplican sin dificultad a diversos modelos y localizaciones, necesitando un tratamiento de detección programable, ajustándose a las características del cilindro y del funcionamiento.

5.2.Extracción de características

El parámetro más utilizado sin duda es la energía de la señal. Sin embargo esta energía se puede estudiar mediante su expresión concreta, mediante histogramas de amplitudes o mediante un estudio por bandas de frecuencia o combinaciones de estos parámetros [3]. Si en el procesado la señal obtenida no está sometida a filtro, se puede hacer un filtro digital que es económico y de fácil implementación. En la Figura 4, mostramos una señal de presión en el interior y la señal filtrada mediante un filtro pasa alta de frecuencia de corte 0.25 tipo Butterworth. Obsérvese que en este caso, en amplitud la señal filtrada apenas corresponde a un 2% de la señal original.

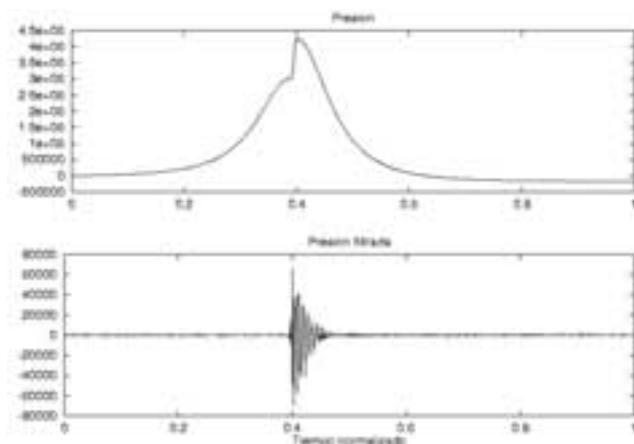


Figura 4

Si en vez de trabajar con la presión utilizamos la vibración correspondiente a la misma señal de la figura 4, al filtrar obtenemos una relación de amplitudes mucho mayor ($\approx 40\%$). Esto da muestra de la dificultad del análisis para la vibración.

6. Control de la señal

Para controlar el fenómeno del ‘knock’, nos fijaremos en la presencia o no de las resonancias. En diversos estudios se propone utilizar mecanismos de reconocimiento de patrones o clasificación [3], [8], [9]. La idea es establecer algún índice que nos de cuenta del grado de ‘knock’ que hay presente en la combustión. Esto se puede hacer ciclo a ciclo o mediante promedio de varios ciclos. Además se pueden utilizar diferentes parámetros de la señal o combinación de los mismos. Nuestra idea es estudiar cómo son las resonancias. Y establecer un modelo que nos sirva de filtro para determinar si estas resonancias están o no presentes y con qué energía.

6.1 Efectos no estacionarios

Como ya dijimos anteriormente, la frecuencia de cada resonancia depende de la temperatura y dimensiones del cilindro. Como estas características varían con el tiempo hay que esperar efectos no estacionarios en las mismas. Es decir cabe esperar que el valor de cada frecuencia cambie con el tiempo. Para visualizar este cambio hemos de utilizar métodos de análisis no estacionario. En la siguiente figura mostramos el resultado de la distribución Choi-Williams (con $\sigma=1$), promediada sobre tres señales correspondientes a la presión, para una velocidad de 800 r.p.m y una carga del 10%.

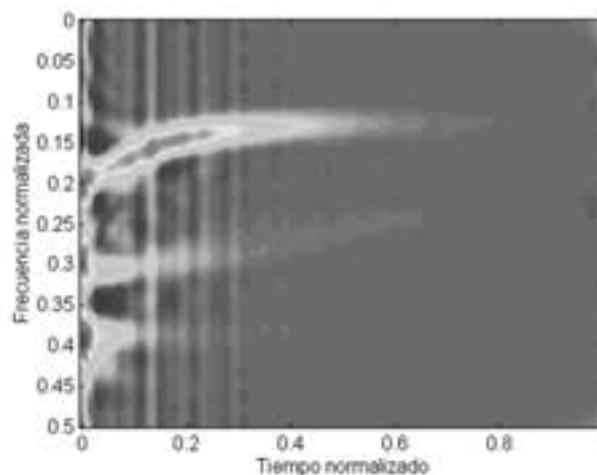


Figura 5

Se puede apreciar en la figura 5, como hay tres resonancias que varían en el tiempo. De estas representaciones tiempo-frecuencias queremos extraer la mayor información posible sobre la evolución de las resonancias. Esta información consistirá en el cambio que se produce en la frecuencia y la evolución de la amplitud de la misma. En las siguientes figuras 6, 7, 8, presentamos la evolución de las frecuencias para tres velocidades diferentes (800, 1400 y 2000 r.p.m.). Para cada velocidad se presenta el promedio de la evolución considerando diferentes cargas de combustible.

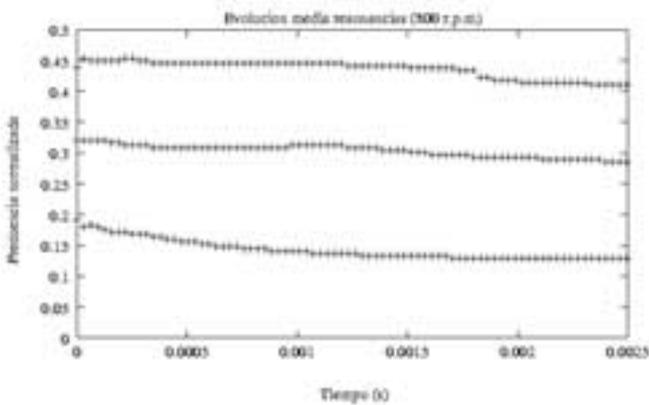


Figura 6

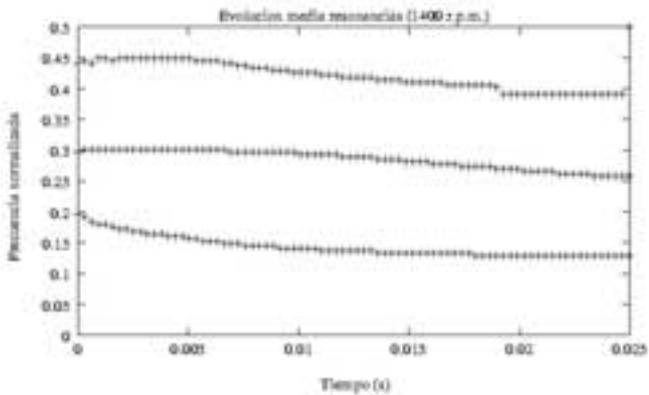


Figura 7

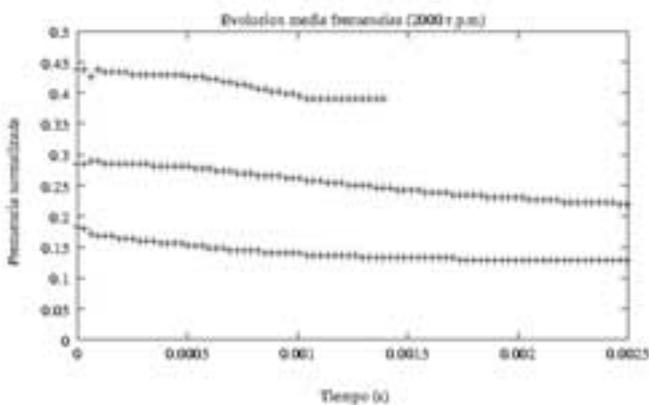


Figura 8

Como vemos hay cambios según la velocidad, aunque por las figuras parece que los modos que se dan son siempre los mismos. Los cambios pueden ser debidos a la variación en la temperatura. Por otro lado, si ordenamos por frecuencia de menor a mayor, las resonancias 2 y 3 parecen evolucionar paralelamente. Esto solo se explicaría si se tratase de modos en los que $p=0$ ó $m=0, n=0$. Para estos casos, al cumplirse

$$\frac{f_{m,n,0}}{f_{m',n',0}} = \frac{x_{m,n}}{x_{m',n'}} \quad \frac{f_{0,0,p}}{f_{0,0,p'}} = \frac{p}{p'}$$

la relación entre las frecuencias es constante (evolucionan paralelamente). Si por el contrario tenemos una resonancia del tipo $f_{m,n,p}$, que no corresponde a los casos anteriores, la relación entre las frecuencias no permanece constante.

En cuanto a la amplitud, podemos ver cómo varía esta en las figuras 9, 10 y 11, para las que se presenta un promedio de la amplitud sobre distintas cargas para las velocidades de 800, 1400 y 2000 r.p.m. Se aprecia que es la segunda resonancia la que proporciona inicialmente mayor amplitud. También se observa que ahora el comportamiento es muy similar para las tres velocidades. Además, se observa que el comportamiento para cada una de las resonancias es diferente.

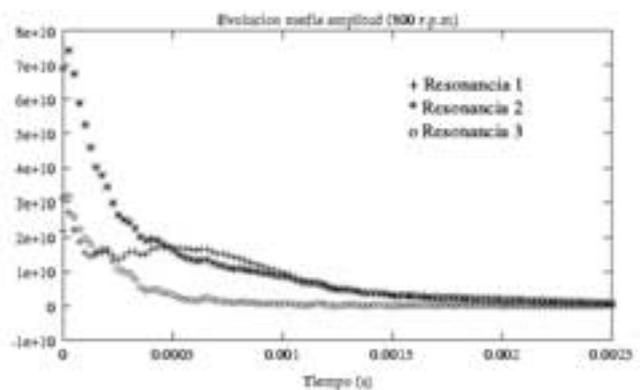


Figura 9

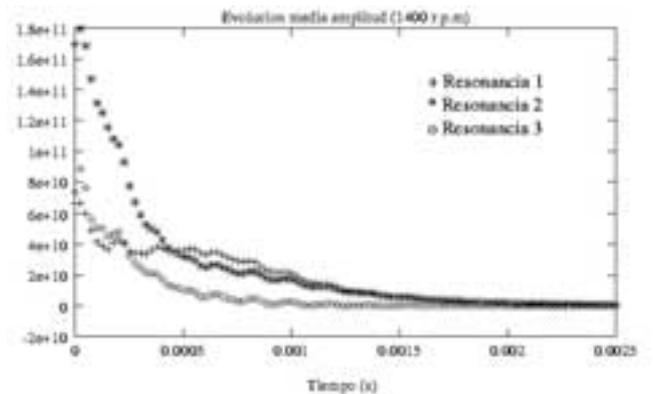


Figura 10

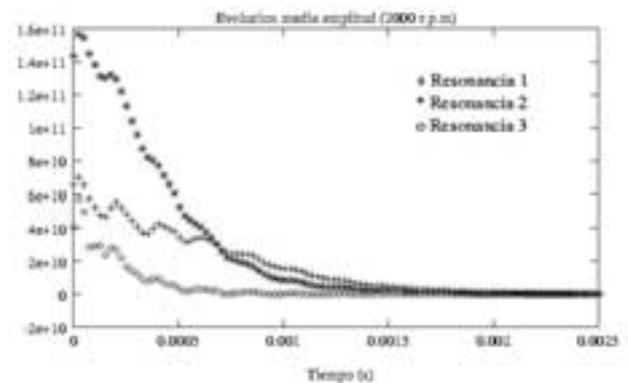


Figura 11

A partir de estos datos podemos reconstruir las resonancias utilizando una expresión del tipo

$$s(t) = A(t)\cos(\omega t)$$

utilizando la amplitud promediada y la correspondiente frecuencia. En la Figura 12 podemos ver la reconstrucción de las tres resonancias para 800 r.p.m. Igualmente, en las figuras 13 y 14, presentamos las resonancias reconstruidas para 1400 y 2000 r.p.m. Obsérvese las diferencias de amplitud en los tres casos.

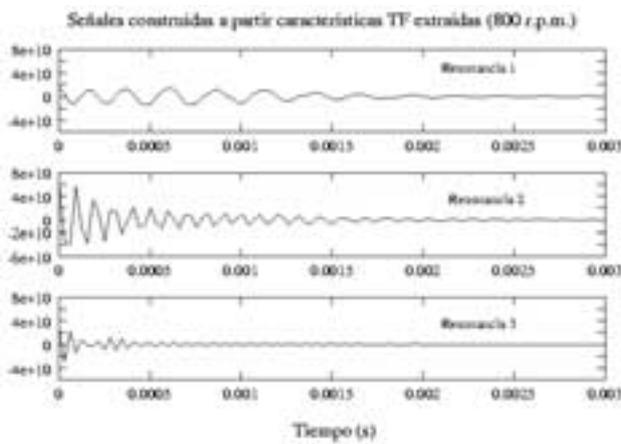


Figura 12

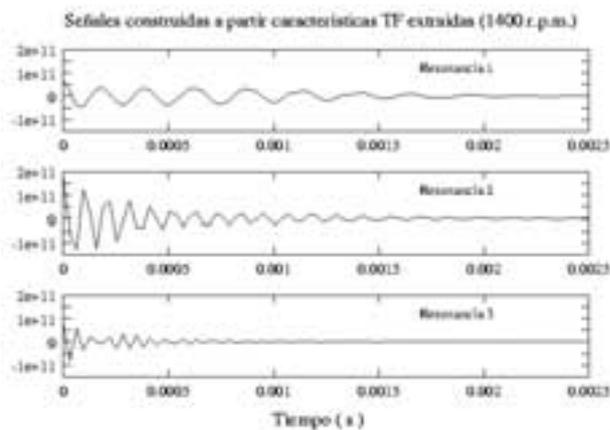


Figura 13

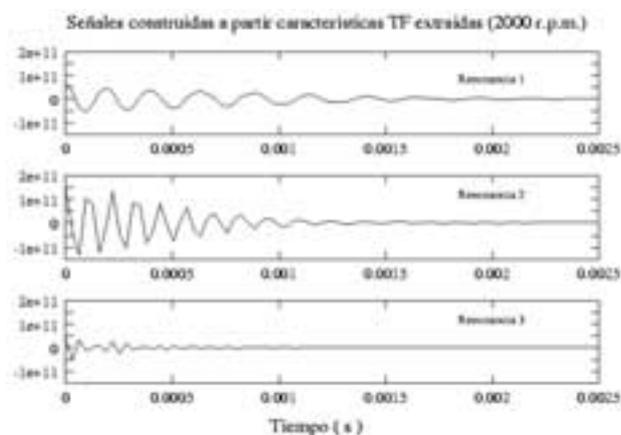


Figura 14

7. Conclusiones

En este trabajo hemos estudiado las variaciones que se producen en las resonancias que aparecen en la combustión. Mediante el uso de métodos de análisis tiempo-frecuencia hemos determinado los desplazamientos en las frecuencias y la evolución de la amplitud de las mismas. A partir de estos resultados hemos sido capaces de reconstruir las resonancias.

Consideramos que este es un buen punto de partida para profundizar en este fenómeno no estacionario. En un futuro trabajo intentaremos establecer que modos aparecen en este tipo de proceso y determinar la variación teórica de las resonancias para comparar con los resultados experimentales.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Hickling R. et al, *Cavity resonances in engine combustion chambers and some applications*, J.Acoust. Soc. Am., 1983,73,1170-1178.

[2] J. Aguilar, *Curso de termodinámica*, 1986, Alambra.

[3] Molinaro F, Castaniè F, *Signal processing pattern classification techniques to improve knock detection in spark ignition engines*, Mechanical Systems and Signal Processing, 1995,9,51-62.

[4] Moses E et al, *On knocking prediction in spark ignition engines*, Combustion and Flame, 1995,101,239-261.

[5] Horner T. *Engine knock detection using spectral analysis techniques with a TMS320 DSP*. DSP system-semiconductor group Texas Instruments, 1995.

[6] G. Zurita, *Multivariate Analysis and Wavelet Transform Analysis of Diesel Engine Combustion Noise*, Lulea University of Technology, 1996.

[7] Samimy B, Rizzoni G, *Mechanical signature analysis using time-frequency signal processing: application to internal combustion engine knock detection*, Proceedings of the IEEE, 1996, 84, 1330-1343.

[8] Ortmann S et al. *Engine knock detection using multi-feature classification by means of non-linear mapping*, ISATA conference 97ME019. 1997.

[9] Rychetsky M et al. *Application of hierarchical mixture of experts works to engine knock detection*. EUFIT'97, 1997, 1714-1718.

[10] J. Hellgren. *Investigation of knocking in combustion engines: Feature extraction using time-frequency analysis*. Chalmers University of Technology, 1998.