



SISTEMA DE DETECCIÓN DE GRIETAS BASADO EN EL ANÁLISIS ESPECTRAL DE LA SEÑAL DE RESONANCIA

Xavier Castell^(*), Margarita Cabrera^(*), Rafael Montoliu^(**)

() Signal Theory and Communications Department. Universitat Politècnica de Catalunya. Campus Nord D5. Jordi Girona 1-3. 08034-Barcelona-SPAIN.*

*(**) Aleaciones de Metales sinterizados: ALME-AMES. Sant Vicenç dels Horts. Barcelona Spain. Contact mail: marga@gps.tsc.upc.es*

Resumen.- En este artículo se presenta un sistema de detección de grietas sobre piezas metálicas sinterizadas, diseñado como estrategia de control de calidad, para su introducción en tiempo real dentro de la cadena de producción de dichas piezas. El algoritmo de procesamiento de señal se halla basado en el análisis espectral de la señal medida a través de técnicas de resonancia ultrasónica. El espectro se obtiene mediante la aplicación del algoritmo Chirp. A partir de los máximos del mismo, coincidentes con las frecuencias de resonancia de las piezas se calcula la distancia euclídea respecto al vector de frecuencias de resonancia esperado. Mediante la probabilidad de falsa alarma esperada se apartan finalmente las piezas clasificadas como defectuosas. El sistema ha sido testeado en diferentes entornos de producción y con diferentes tipos de piezas, dando en todas las situaciones resultados satisfactorios.

1. INTRODUCCIÓN

La inspección por resonancia ultrasónica es una técnica ampliamente utilizada para la detección de piezas metálicas (especialmente sinterizadas) defectuosas. En un proceso de producción en serie, resulta un proceso de gran interés, debido a que consiste en una estrategia no destructiva. Cada pieza producida es excitada a frecuencia de ultrasonidos para vibrar en un determinado ancho de banda. La señal de resonancia queda de este modo modulada por las frecuencias de resonancia naturales de la pieza producida, de modo que el espectro de dicha señal constituye una especie de firma espectral de la pieza o de señal de identificación. Cuando se analiza una pieza diferente a la serie de piezas en cuestión, (pieza con diferente densidad de materiales, pieza agrietada, etc.), se produce un cambio en el conjunto de frecuencias de resonancia obtenidas. El éxito de la inspección por resonancia se basa en el hecho de que el espectro de resonancia es muy sensible a los cambios producidos en la composición o en la estructura. Así pues, como paso previo a la clasificación de piezas propiamente dichas se debe obtener un modelo para las frecuencias de resonancia que caracterice a una clase o serie de piezas no defectuosas, admitiendo cierta variación. De este modo, una pieza defectuosa podrá ser identificada mediante un cambio en sus frecuencias de resonancia. En general el cambio producido es proporcional al tamaño del defecto.

El presente trabajo, ha sido desarrollado para su implantación como sub-sistema de control de calidad, dentro de un sistema de fabricación en serie de piezas metálicas. Las técnicas algorítmicas seleccionadas para el análisis espectral, la detección de picos espectrales y el algoritmo de clasificación, constituyen un compromiso entre un sistema de detección de defectos eficiente y unas etapas de procesamiento de señal computacionalmente rápidas.

En la sección 2 presentamos el esquema general del sistema diseñado. En la sección 3 se describen brevemente las etapas de procesamiento de señal. En la sección 4 se desarrolla el cálculo de la probabilidad de falsa alarma (es decir, la probabilidad de clasificar una pieza defectuosa cuando no lo es), y finalmente en la sección 5 se presentan algunos resultados interesantes de análisis de las piezas.

2. ESQUEMA GENERAL

En la figura 1 se muestra un esquema general del sistema desarrollado. Como señal de excitación se genera digitalmente una señal de ruido blanco en un determinado ancho de banda y posteriormente a través de un convertidor D/A, se obtiene la señal analógica de ruido de espectro plano. El máximo ancho de banda permitido es de 200 Khz. Dicha señal se filtra paso bajo, con propósitos de reconstrucción y se amplifica con el objetivo de excitar directamente a un transductor emisor piezoeléctrico que hace vibrar la pieza en cuestión. A partir de la vibración dicha pieza, se obtienen dos señales eléctricas de resonancia, las cuales se miden mediante dos transductores receptores, situados correctamente bajo la pieza a testear. Las señales se digitalizan a una frecuencia de conversión de 625 Khz cada una de ellas.

Sobre las dos señales de resonancia capturadas a través de sendos convertidores A/D, se aplica sobre ellas un algoritmo de análisis espectral con la finalidad de obtener a partir de sus máximos las frecuencias de resonancia. El algoritmo seleccionado, consiste en la transformada Chirp, cuya implementación se realiza basada en la FFT. La transformada Chirp permite seleccionar un determinado ancho de banda en el cual se concentran todos los puntos del espectro, mejorando de este modo la precisión en la obtención de muestras del espectro. Como resultado de aplicar la transformada Chirp sobre las dos señales de resonancia, se obtienen dos vectores en el dominio de la



frecuencia. A partir de los mismos se han de calcular las frecuencias de resonancia. La etapa de detección de máximos o picos espectrales puede considerarse especialmente crítica, debido al carácter aleatorio y ruidoso del espectro obtenido para cada una de las dos señales de resonancia. Es decir, en la práctica aparecen numerosos máximos locales y con gran variedad y variación en cuanto a sus amplitudes. Por tanto y como paso previo a la detección de los máximos espectrales o frecuencias de resonancia, se aplica un algoritmo de "limpieza" de picos espectrales espurios, de baja potencia en general. Dicho algoritmo se conoce con el nombre de "Top Hat". A partir de las señales procesadas mediante "Top Hat", se estiman directamente las frecuencias de resonancia las cuales se introducen directamente a la etapa de clasificación propiamente dicha, donde finalmente se decide si la pieza se clasifica como defectuosa o no.

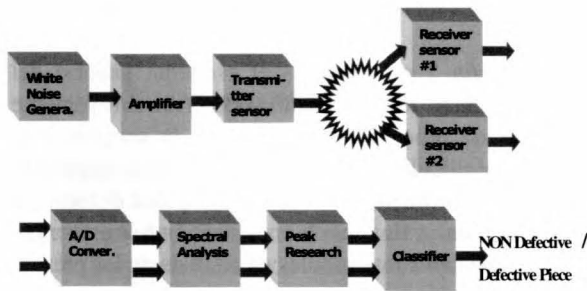


Figura 1. Diagrama General de Bloques

3. ETAPAS DE PROCESADO DE SEÑAL

Durante la primera etapa de investigación del proyecto se probaron diferentes técnicas de estimación espectral, tanto paramétricas como no paramétricas [1], con el fin de obtener las frecuencias de resonancia. Para la presente aplicación, la técnica que produjo mejores resultados en cuanto a un compromiso de resolución, precisión y eficiencia computacional fue el uso de la transformada Chirp [2], promediada según la técnica de estimación espectral no paramétrica del periodograma. La etapa de clasificación propiamente dicha (ver figura 1), se tuvo que resolver con mayores dificultades, debido a la imposibilidad de modelar el comportamiento en cuanto a frecuencias de resonancia de piezas defectuosas. Se observó gran variabilidad que el reducido conjunto disponible de dichas piezas, al ser analizado rigurosamente.

3.1 Análisis Espectral.

La transformada Chirp se aplica sobre cada una de las dos señales digitalizadas mediante los conversores A/D: $x_1[n]$; $x_2[n]$. Los vectores capturados a partir de una única pieza se dividen en L segmentos de N_B muestras cada uno.

$$x_{i-l}[n] = x_i[n + (l-1)N_B]; \quad (1)$$

$$i = 1, 2; l = 1..L; 0 \leq n \leq N_B - 1$$

La transformada Z se aplica sobre cada segmento de N_B muestras:

$$S_{i-l}(z) = \sum_{n=0}^{N_B-1} x_{i-l}[n] z^{-n}; \quad i=1,2 \quad (2)$$

Fijando un punto inicial en el dominio transformado:

$z_0 = r_0 e^{j\omega_0}$ y un término de incremento frecuencial $W = e^{j\Delta\omega}$, la ecuación (2) se puede re-escribir como (3) cuando se evalúa para una frecuencia simple: $z_k = z_0 W^k$.

$$S_{i-l}(z_k) = \sum_{n=0}^{N_B-1} x_{i-l}[n] (z_0)^{-n} W^{-kn} \quad (3)$$

$k=1..M-1$. M designa el número de puntos del espectro o frecuencias dentro del ancho de banda seleccionado, para los cuales se calcula el espectro. La ecuación (3) puede obtenerse de modo eficiente considerando:

$$nk = (n^2 + k^2 - (k-n)^2) / 2$$

$$S_{i-l}(z_k) = \sum_{n=0}^{N_B-1} y_{i-l}[k] W^{\frac{-k^2}{2}} \quad (4)$$

$$\text{donde } y_{i-l}[k] = \sum_{n=0}^{N_B-1} g_{i-l}[n] \cdot h[k-n],$$

$$h[n] = W^{\frac{n^2}{2}} \quad \text{y} \quad g_{i-l}[n] = x_{i-l}[n] \cdot (z_0)^{-n} \cdot W^{\frac{-n^2}{2}}$$

De la ecuación (4) se interpretan las señales "y" como una convolución de las señales "g" con "h" y por tanto se puede procesar a partir de i) transformada de Fourier mediante algoritmo FFT, ii) producto directo de señales en el dominio transformado y iii) transformada inversa de Fourier mediante algoritmo IFFT. Posteriormente se utiliza el estimador de periodograma para promediar los L segmentos de espectro obtenidos.

$$\hat{S}_i(f) = \frac{1}{L} \sum_{l=0}^{L-1} S_{i-l}(f) \quad (5)$$

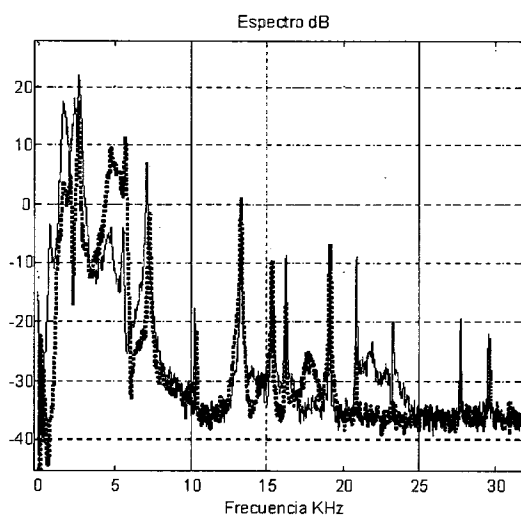


Figura 2. Espectro Chirp obtenido a partir de una pieza no defectuosa. Línea continua para la señal 1 y discontinua para la señal 2.

En la figura 2 se muestra el espectro obtenido a partir de una pieza no defectuosa. En este ejemplo se trabajó con $M=4096$ puntos espaciados uniformemente en un ancho de banda de 40 KHz y promediando $L=150$ segmentos de longitud $N_B=28673$ muestras pre-enventanadas mediante una ventana de Hanning. Las dos señales espectrales corresponden a una pieza circular y por tanto con simetría axial. Aunque ambas señales, deberían presentar idénticas frecuencias de resonancia, la forma del espectro presenta diferencias debido a la presencia de ruido de medida y a la diferente respuesta impulsional de los dos sensores receptores utilizados en la grabación de las señales.

3.2 Algoritmo de Detección de picos espectrales

Tal como se comenta en la sección 2, el proceso de detección de picos espectrales se facilitó mediante la aplicación del algoritmo "Top Hat" [4] [5], algoritmo basado en principios de morfología matemática mediante el cual se obtiene información relativa a la geometría del espectro. El objetivo final de la aplicación de este algoritmo es conseguir que la señal espectral no presente picos ruidosos que dificulten la detección de los picos principales o frecuencias de resonancia. El algoritmo top hat, se basa en dos operadores básicos en morfología: dilatación y erosión. Con la dilatación y la erosión, se construyen operadores más complejos, como son la apertura y el cierre, que también son utilizados en el algoritmo.

Tanto el operador de dilatación como el de erosión, se basan en el deslizamiento de un elemento estructurante a través de la señal a procesar. En nuestro caso, el elemento estructurante es una ventana temporal que se centra en el punto que se quiere procesar y que engloba los puntos de la señal que intervienen en el procesado. En el caso de la erosión, se realiza un estudio local para cada punto a procesar y se escoge el mínimo que se encuentra dentro de la ventana que conforma el elemento estructurante. En

el caso de la dilatación, el efecto es el contrario, pues se escoge el punto de mayor amplitud.

Los resultados obtenidos mediante estas transformaciones morfológicas, dependen directamente del tamaño seleccionado para el elemento estructurante. A priori, es difícil conocer cual es el tamaño que implica mejores resultados. En nuestro caso, la anchura de los lóbulos principales de las frecuencias de resonancia se encuentra directamente relacionada con el tipo de enventanamiento utilizado en el proceso de estimación espectral y el número de muestras utilizado para este. Es por esto que la anchura del elemento estructurante es un factor que debe ser modificado cuando cambian los parámetros de configuración del sistema, en cuanto a análisis espectral se refiere.

El operador de cierre, se define como la erosión de una señal que previamente ha sido dilatada. El operador de apertura en cambio, realiza el efecto contrario, pues realiza primero una dilatación de la señal, y posteriormente realiza una erosión. La aplicación del algoritmo "Top Hat" es el resultado de sustraer a la señal original la señal procesada mediante la apertura del cierre de la señal original y forzar a cero todos los puntos para los cuales se obtiene un resultado negativo.

$$x - \wedge \{ \gamma(\phi(x)), x \} \quad (6)$$

En (6), $\wedge \{ \}$ se refiere al operador mínimo. $\gamma(\)$ y $\phi(\)$ son respectivamente los operadores de apertura y de cierre.

Si se procesa una señal con el operador de cierre, se consigue una señal envolvente que elimina los picos inferiores manteniendo los picos principales y los picos superiores debidos al ruido. En la figura 3 se observa juntamente con la señal original, un fragmento de señal procesada con el operador de cierre.

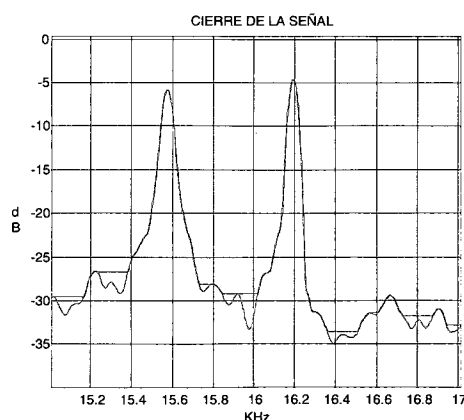


Figura 3. Fragmento de espectro procesado mediante el operador de cierre, junto con la señal original. Línea continua para la señal procesada y línea discontinua para la señal original.

Si la señal obtenida mediante la aplicación del cierre es procesada mediante el operador de apertura, se consigue una señal como la que se presenta en la figura 4. Dicha señal, recorta los picos principales, que son los que

queremos detectar y mantiene la propiedad de señal envolvente eliminado los picos inferiores.

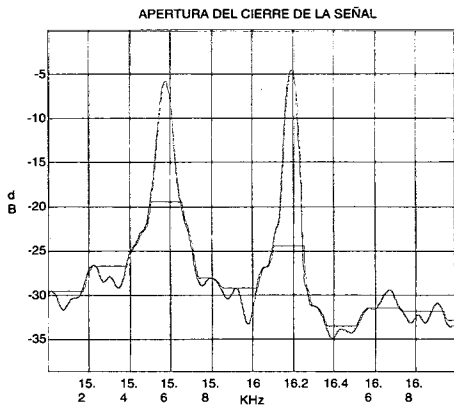


Figura 4. Fragmento de espectro procesado mediante la apertura del cierre, junto con la señal original. En línea continua se presenta la señal procesada y en línea discontinua la señal original.

Para recuperar una señal que solo presente los picos significativos, se tiene que substraer la señal procesada mediante la aplicación del cierre y apertura a la señal original y poner a cero los puntos cuyo valor sea negativo. Como puede suceder que no se eliminen todos los picos de ruido, en vez de inicializar a cero los puntos negativos, se pueden poner a cero los puntos que no superen un umbral determinado.

En la figura 5 se muestra el resultado de procesar mediante el algoritmo "top hat" una señal de espectro completa, como la mostrada en la figura 2.

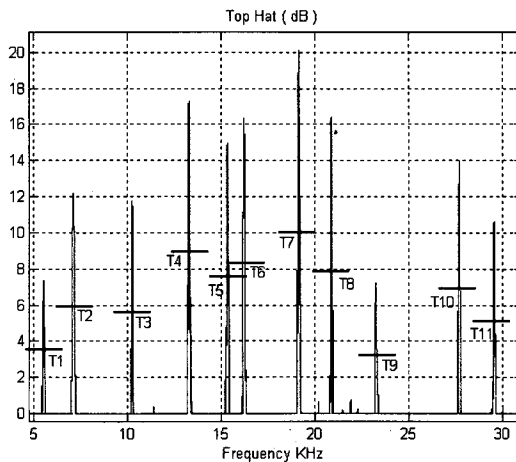


Figura 5. Espectros procesados mediante el algoritmo Top Hat. En este ejemplo se seleccionaron 11 picos con sus respectivos umbrales.

A partir de los cruces por cero de la derivada de la señal "Top Hat" se detectan las frecuencias de resonancia. Mediante un umbral en amplitud se limita inferiormente la potencia que debe presentar un máximo espectral para ser considerado frecuencia de resonancia de la pieza. Previa-

mente a la etapa de clasificación propiamente dicha, se desarrolla una etapa de entrenamiento, en la cual se aprende o graba el comportamiento esperado para las piezas buenas en cuanto a: i) Número de frecuencias de resonancia, ii) Vector de frecuencias medias, iii) Varianzas del vector de frecuencias. La clasificación de cada nueva pieza se realiza en base a los parámetros anteriores.

3.3 Algoritmo de Clasificación

Desde una perspectiva de clasificación [3], el algoritmo de detección debería distinguir o clasificar entre dos modelos: Piezas defectuosas y piezas no defectuosas. En la presente aplicación se ha aplicado el criterio de distancia euclídea mínima, entre cada nuevo vector de frecuencias a clasificar y el valor esperado para el mismo en caso de que se trate de una pieza no defectuosa. Debido a la dificultad para obtener un modelo simplificado para las piezas defectuosas, se ha modelado únicamente el comportamiento estadístico de las piezas no defectuosas. Así, de cada pieza medida se graban dos vectores que constituyen su firma espectral o señal identificativa. En (7) N_f representa el número de frecuencias de resonancia. Es decir, el número de componentes de los vectores $\mathbf{f}_1, \mathbf{f}_2$:

$$\mathbf{f}_i = (f_{i-1} : f_{i-N_f})^T; \quad i = 1, 2 \quad (7)$$

Durante el periodo de entrenamiento se miden los dos vectores para el máximo número de piezas no defectuosas posible y se graba el siguiente conjunto de parámetros:

- Vectores media de los canales 1 y 2: $\hat{\mathbf{f}}_1; \hat{\mathbf{f}}_2$
- Matrices de covarianza de los canales 1 y 2: $\mathbf{C}_1; \mathbf{C}_2$

Tras el periodo de entrenamiento se desarrolla la estrategia de clasificación aplicando el siguiente criterio. Para la pieza número "n":

- Se miden los vectores de frecuencia $\mathbf{f}_1[n]; \mathbf{f}_2[n]$

- Si una componente frecuencial no se halla en el margen esperado: $(f_{i-k} - K_T \sigma_{i-k}, f_{i-k} + K_T \sigma_{i-k})$ la pieza se clasifica como defectuosa. En la expresión previa i denota el canal ($i=1,2$), k es el número de componente ($k=1..N_f$) y K_T es un umbral que se selecciona empíricamente a partir de la etapa de entrenamiento.

- Cada vector de frecuencias se normaliza a partir de la media y la varianza esperadas.

- Se calculan las dos distancias euclídeas: $d_1 = d(\hat{\mathbf{f}}_1, \mathbf{f}_1[n]), d_2 = d(\hat{\mathbf{f}}_2, \mathbf{f}_2[n])$ y para piezas

con simetría axial también la distancia cruzada $d_{1-2} = d(\mathbf{f}_1[n], \mathbf{f}_2[n])$. Debido a la normalización previa, el valor esperado para estos parámetros es:

$$E[d_1^2] = 1, \quad E[d_2^2] = 1, \quad E[d_{1-2}^2] = 2(1 - \rho).$$

ρ representa la correlación cruzada entre los dos canales. Para un conjunto de N_p piezas el valor esperado es de:

$$\frac{1}{N_f} \frac{1}{N_p - 1} \sum_{n=1}^{N_p} \sum_{i=1}^{N_f} f_{1-i}[n] f_{2-i}[n]$$

- Tras el cálculo de las tres distancias normalizadas, se testea si cada una de las tres métricas medidas se halla en

el correspondiente intervalo: $(0, K_T \sqrt{E[d_x^2]})$, donde

x denota distancia ($x=1,2$ o $1-2$), y K_T representa un umbral seleccionado empíricamente durante la etapa de entrenamiento.

- Finalmente, si las medidas de la pieza aparecen en todos los márgenes esperados, tanto a nivel de vector de frecuencias como a nivel de distancias medidas, la pieza se clasifica como no defectuosa y en caso contrario como defectuosa.

Hay que destacar, que el conjunto de parámetros estadísticos (medias y varianzas de los vectores de frecuencias y de las distancias euclídeas) medidos en etapa de entrenamiento, se adaptan continuamente durante la etapa de clasificación, con cada nueva pieza clasificada como no defectuosa. De este modo, el sistema se va adaptando a pequeños cambios dentro de la serie de piezas fabricadas.

En la figura 6 se muestra el histograma obtenido para una de las frecuencias (15.58KHz) medido a partir de una serie de 150 piezas no defectuosas y en la figura 7

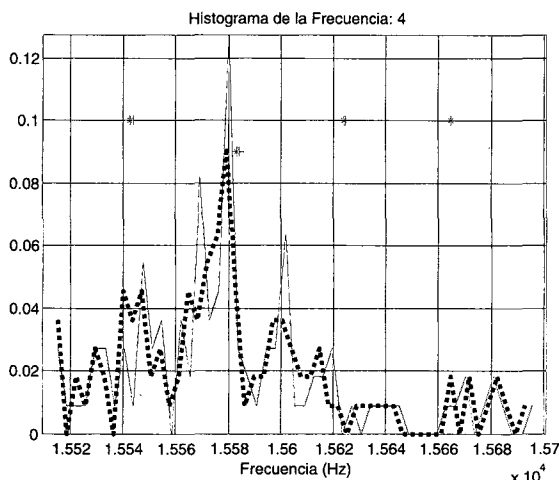


Figura 6. Histograma obtenido para la frecuencia de resonancia: 15.58KHz Línea continua para la señal 1 y discontinua para la señal 2. Los asteriscos muestran los saltos en varianza: $f_{i-k} \pm n\sigma_{i-k}$, $n = -2 : +2$.

se muestra el histograma obtenido para las 3 distancias euclídeas normalizadas.

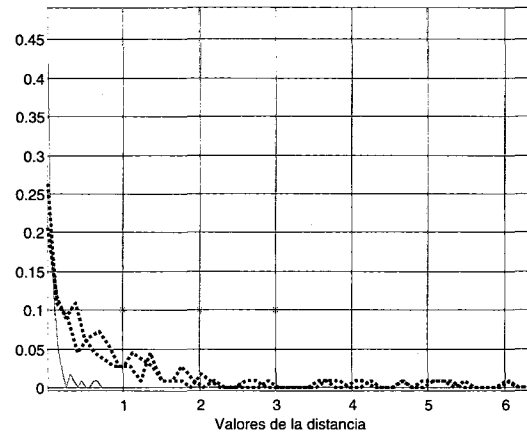


Figura 7. Histogramas obtenidos para las tres distancias euclídeas normalizadas. Línea discontinua para d_1 y d_2 y continua para d_{1-2} . Los asteriscos muestran los múltiplos de

los valores esperados: $nE[\hat{d}_x^2]$; $n = 1 : 3$

4. PROBABILIDAD DE FALSA ALARMA

Con el objeto de estimar la probabilidad de falsa alarma como medida de calidad del sistema, se han asumido las siguientes consideraciones:

- Los dos vectores de frecuencias presentan una distribución gaussiana.
- La probabilidad de falsa alarma se calcula en el dominio del subespacio de señal.

Los vectores de frecuencia se proyectan sobre el subespacio de las N_R componentes o autovectores principales obtenidos a partir de la descomposición de la matriz de covarianza medida:

$$C = E \left[\begin{pmatrix} \mathbf{f}_1 - \hat{\mathbf{f}}_1 \\ \mathbf{f}_2 - \hat{\mathbf{f}}_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{f}_1^T - \hat{\mathbf{f}}_1^T & \mathbf{f}_2^T - \hat{\mathbf{f}}_2^T \end{pmatrix} \right] \quad (8)$$

El nuevo vector proyectado es de N_R componentes y se distribuye como:

$$\mathbf{x} : \mathbf{N}(0, \text{diag}(\sigma_1^2, \dots, \sigma_{N_R}^2)) \quad (9)$$

El umbral previo K_T se transforma en K_N . En estas condiciones la probabilidad de falsa alarma se calcula como:

$$P_{FA} = \sum_{n=1}^{N_R} 2 \int_{K_N \sigma_n}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_n} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma_n^2}\right) dx = N_R \text{erfc}(K_N) \quad (10)$$

K_N	1	2	3	4
$\text{erfc}(K_N)$	0,16	4,6 e(-3)	2,2 e(-5)	1,5 e(-8)

Tabla 1. Valores estimados para la probabilidad de falsa alarma.

5. CONCLUSIONES Y RESULTADOS

A partir de piezas defectuosas, se observa como las frecuencias de resonancia sufren cambios (figura 8), o incluso para algunas piezas desaparecen algunas de las frecuencias de resonancia (figura 9). Cuando ocurre cualquiera de estos dos fenómenos, automáticamente el sistema clasifica la pieza como defectuosa.

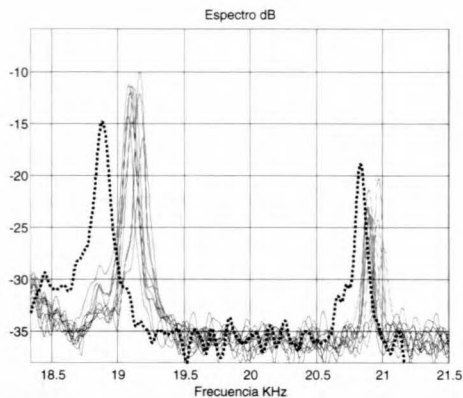


Figura 8. Espectro parcial en dB y frecuencia en Khz. Pieza defectuosa en línea discontinua

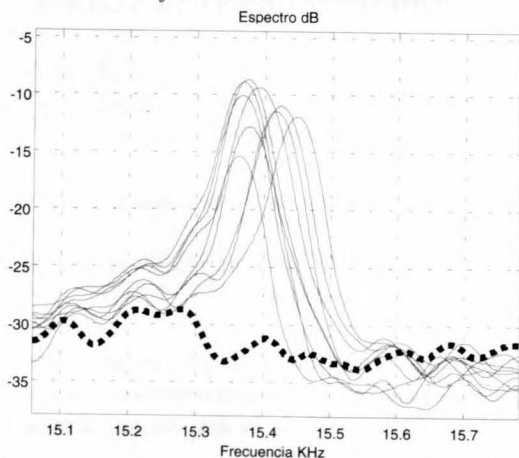


Figura 9. Espectro parcial en dB y frecuencia en Khz. Pieza defectuosa en línea discontinua.

Como conclusión, se ha desarrollado un sistema de detección de piezas defectuosas, para su aplicación como sistema de control de calidad dentro de una cadena de fabricación en serie. El sistema es lo suficientemente flexible como para trabajar con anchos de banda de hasta 200 Khz y para testear diferentes tipos de piezas metálicas sinterizadas.



Figura 10. Sistema de excitación y grabación de señales de resonancia por ultrasonidos. Un sensor transmisor y dos sensores receptores se colocan simétricamente alrededor de la pieza metálica sinterizada circular y con simetría axial.

6. REFERENCIAS

- [1] S. M. Kay. "Modern Spectral Estimation - Theory and Application". Prentice Hall, 1988.
- [2] J. G. Proakis, D. G. Manolakis. "Introduction to Digital Signal processing". Macmillan, 1988.
- [3] R. O. Duda, P. E. Hart, D. G. Stork. "Pattern Classification", Ed. Wiley Interscience, 2001.
- [4] F. Meyer, A. Van Driel "The application of mathematical morphology in cervical cancer screening" Elsevier Publishers 1985.
- [5] Jean Serra "Image analysis and mathematical morphology" voll. Ed. Academic Press, 1982.
- [6] L. L. Sharf, "Statistical Signal Processing". Addison Wesley, 1991.
- [7] M. Cabrera, X. Castell, R. Montoliu. "Crack Detection System Based On Spectral Analysis of Ultrasonic Resonance Signals". IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, ICASSP, Hon Kong 2003.

AUTORES



Xavier Castell Castells nació en Vic el 29 de Marzo de 1978. Obtuvo la titulación de Ingeniero Superior de Telecomunicaciones en el año 2002 en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Telecomunicaciones de Barcelona (Universidad Politécnica de Cataluña). Su proyecto final de carrera, consistió en el diseño e implementación de un sistema de

control de calidad basado en la técnica de inspección por resonancia ultrasónica. Actualmente trabaja como investigador en Formación en el IRI (Instituto de Robótica e Informática Industrial UPC-CSIC) donde colabora con el grupo de visión por computador.

Margarita Cabrera es Profesora Titular de Universidad del Departamento de "Teoria del Senyal i Comunicacions" de la "Universitat Politècnica de Catalunya". Desarrolla sus actividades de docencia en la "Escola Tècnica d'Enginyers de Telecomunicació de Barcelona". Participa en proyectos de investigación relacionados con UMTS, modelado de canales de propagación, procesamiento de antenas inteligentes, y en general aplicaciones de procesamiento de señal. Es miembro del IEEE.

Rafael Montoliu es Ingeniero de Telecomunicaciones y actualmente Jefe de Planificación en ALME (Aleaciones de Metales Sinterizados), AMES. Sant Vicenç dels Horts (Barcelona).