

TUBOS RESONANTES PARA MODELAR FUENTES RUIDOSAS

Maximino Peña Guerrero

Academia de Acústica de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica del Instituto Politécnico Nacional,
Zacatenco, D. F. Ciudad de México, mpenag@ipn.mx

Manuel González Hernández

Área Académica de Ingeniería del Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería de la Universidad Autónoma del Estado de
Hidalgo, Pachuca Hidalgo, México, mghdez@uaeh.edu.mx

José de Jesús Negrete Redondo

Academia de Acústica de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica del Instituto Politécnico Nacional,
Zacatenco, D. F. Ciudad de México, josenegreter@yahoo.com.mx

Oleksandr Karelin

Área Académica de Ingeniería del Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería de la Universidad Autónoma del Estado de
Hidalgo, Pachuca Hidalgo, México, karelin@uaeh.edu.mx

ABSTRACT

In this paper we are presenting a technique to build a model of a noise source using resonance tubes with the purpose to obtain another alternative to analyze any signal and treat it, and compare it with others ones. In preventive maintenance is possible to use source noise to identify fails of some devices. The use of resonance tubes in order to detect a fail in some devices was taken from how the vocal tract of a person which is modeled as the concatenation of acoustic tubes of different diameters, since the signal speech is produced when a column of air from the lungs excites the vocal tract, which behaves as a resonant cavity. This leads to an unsteady linear model, since the sections tubes fit tightly to changing according to the phoneme being emitting by persons. In our case we were capture a signal from source signal noisy of device's component using a microphone and then we analyze it and modeled it as resonance tubes. We show the results and the procedure how we have got the parameters of noisy source.

Keywords: Noise, automatic maintenance, resonant tubes, preventive maintenance

RESUMEN

En este trabajo se presenta una técnica para construir un modelo de una fuente de ruido utilizando tubos de resonancia con el propósito de obtener una alternativa más para analizar cualquier señal y tratarla, y compararla con otras señales. En el mantenimiento preventivo es posible utilizar el ruido de origen para identificar fallas de algunos dispositivos. El uso de tubos de resonancia para detectar una falla de algunos aparatos electromecánicos se tomó de cómo el tracto vocal de una persona se modela como la concatenación de tubos acústicos de diferentes diámetros, ya que la señal de voz se produce cuando una columna de aire de los pulmones excita el tracto vocal, que se comporta como una cavidad resonante. Esto conduce a un modelo lineal inestable, ya que los tubos de secciones encajan firmemente a cambiar de acuerdo con el fonema emitido por las personas. En nuestro caso capturamos la señal de la fuente ruidosa del componente en cuestión por medio de un micrófono y luego lo analizamos y modelamos como tubos de resonancia. Mostramos los resultados y el procedimiento de cómo hemos conseguido los parámetros de una fuente ruidosa.

Palabras clave: Ruido, mantenimiento automático, tubos resonantes, mantenimiento preventivo.

1. INTRODUCTION

El propósito de esta investigación es mostrar el tratamiento de la fuente ruidosa como una concatenación de tubos resonantes (Rabiner and Juang, 1993, 1998) que la representan.

Se divide la señal de ruido en secciones de tal manera que la señal que se capturó parezca una concatenación de tubos de resonancia, el modelo consiste en que cada sección de la señal se modeló como un tubo de resonancia con un diámetro que cambia de acuerdo con el valor del coeficiente de reflexión que se calcula por el método de correlación de dos señales; el original y el predecible (auto correlación). Los parámetros como los coeficientes de esa señal se calcularon en base área del tubo de cada sección. La concatenación de varios tubos de diferente tamaño representa la forma aproximada de la figura geométrica de una fuente de sonido. Por ejemplo, tenemos 10 coeficientes reflexión de ruido del componente de un dispositivo en funcionamiento normal, (en nuestro ejemplo usamos un motor eléctrico) que sirve para identificar y discriminar un ruido característico de otras señales.

La investigación se centra como alternativa en el mantenimiento preventivo basado en ruido, el análisis de cualquier señal proveniente de los componentes de algún dispositivo que genera ruido, capturamos el ruido usando un micrófono y comparamos y descartar a los demás señales de ruidos, principalmente comparando la señal original del componente del dispositivo. Creemos que nuestra contribución en este trabajo es mostrar un nuevo tratamiento en el problema de mantenimiento preventivo, utilizando tubos resonantes para investigar o detectar cuando un componente del algún dispositivo va a fallar sólo mediante la identificación de su ruido. Debido a que necesitábamos monitorear el comportamiento del dispositivo tuvimos que construir un sistema computacional para reconocer la señal y desechar de otras. Con el fin de comparar las señales solamente usamos los coeficientes del modelo matemático de la señal de ruido del componente del dispositivo en operación y la señal original del mismo.

El sistema computacional fue programado en lenguaje C y con esto monitoreamos todo el tiempo los ruidos del dispositivo durante su funcionamiento, la prueba del sistema de cómputo se hizo con un motor eléctrico. El mantenimiento preventivo es una de las tareas más importantes en la industria, ya que representa sobre todo, la seguridad de las personas cuando la operación de la maquinaria se encuentra en funcionamiento, también mantenimiento preventivo es un reflejo de una calidad constante del producto elaborado, financieramente se traduce en el ahorro de dinero, por otra parte se evitan los daños en el equipo y el aumento la vida media de sí mismo entre otros.

Existen varios modelos de mantenimiento preventivo entre los más comunes son aquellos que hacen el seguimiento a través de una programación, y otros, utilizando acelerómetros instrumentados en el equipo para registrar las vibraciones del equipo y detectar posibles fallas.

El documento fue construido en tres partes, en la primera justificación la justificación del uso tubos de resonantes, en la segunda se analiza la señal, se propone el modelo y su programación y finalmente en la tercera se obtienen los coeficientes numéricos de la señal original y la del equipo en operación y sus diferencias que indican con cierta tolerancia la posible falla en las componentes del dispositivo, se dan los resultados, conclusiones y referencias bibliográficas.

2. Modelo con tubos resonantes para simular una fuente ruidosa

Una maquinaria cuando trabaja correctamente, produce ruidos característicos provenientes de componentes en funcionamiento. A partir de este sonido, un experto humano puede, pero no siempre, ser capaz de inferir el mal

funcionamiento del equipo. Para el cumplimiento de esta idea de una forma automatizada, se requiere necesariamente obtener o bien el registro de la señal y hacer con él un procesamiento digital de señales, con el fin de obtener los coeficientes de la representación numérica de la señal, y así sucesivamente, nuestro sistema digital puede distinguir una señal de otra. Con los parámetros de la señal podemos construir un filtro para separar algunas frecuencias de un sonido característico. Para diseñar un filtro analógico normalmente la gente usa Transformada de Fourier y de Laplace, y en el diseño de un filtro digital se usa la Transformada Discreta de Fourier y la transformada Z. También se pueden utilizar transformadas $\sin(x)$ y $\cos(x)$, entre otros menos conocidos (Hamming, 1989).

Un filtro ya sea analógico o digital tiene sus representaciones equivalentes en la naturaleza en una forma real, básicamente lo que implican movimientos ondulatorios físicamente. Por ejemplo, un circuito resonante RLC figura 1, un resonador de Helmholtz, un sistema de masa y resorte, una sección de tubos figura 2, el tracto vocal, y en general, cualquier fenómeno físico. En general, cualquier filtro puede ser descrito por una función de transferencia que relaciona la salida a la entrada (Hayes, 1999). Sin embargo, en esta investigación utilizamos análisis de predicción lineal (LPC) con lo cual es posible extraer de la señal de varios componentes numéricos que pueden ser utilizados para reconocer el patrón de la señal de sonido, es decir:

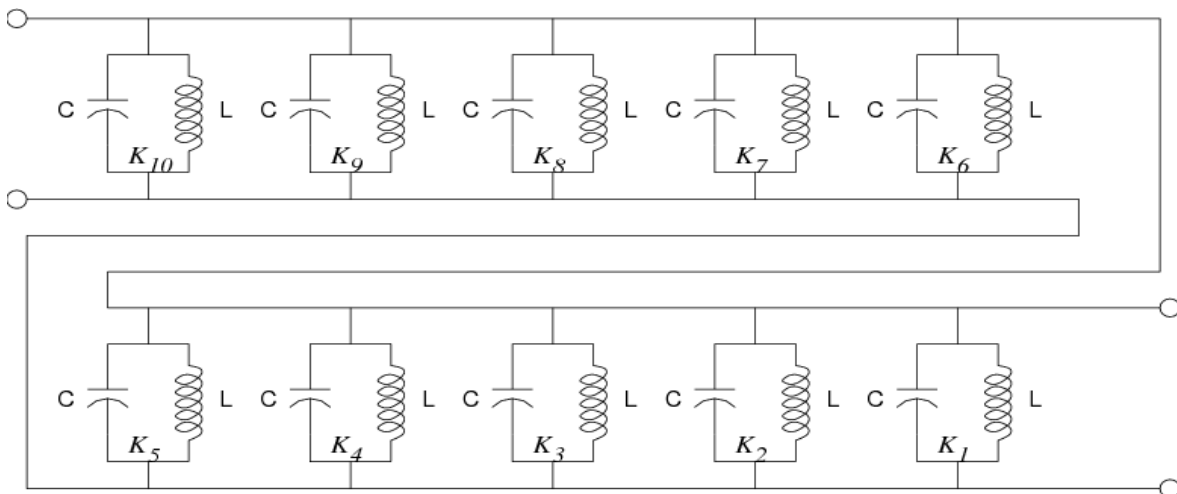


Figura 1: El modelo eléctrico equivalente del filtro de señal analógica

- (a) los coeficientes de predicción lineal,
- (b) las raíces de un polinomio predictor,
- (c) coeficientes centrales,
- (d) la respuesta de un impulso del filtro
- (e) coeficientes de autocorrelación,
- (f) coeficientes de autocorrelación de los coeficientes,
- (g) coeficientes de una función logarítmica del área de un tubo acústico,
- (h) la energía de la señal y
- (i) los coeficientes de reflexión de una onda de sonido en el interior del tubo (Rabiner and Juang, 1978), (Rabiner and Juang, 1993).

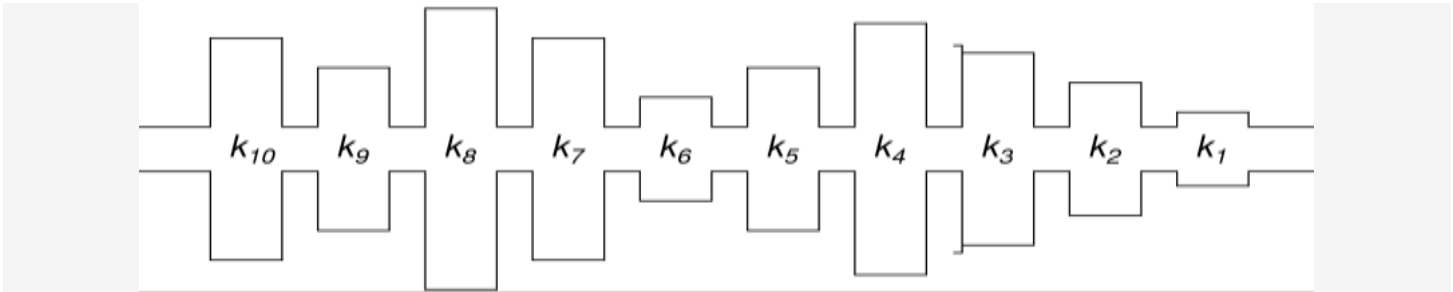


Figura 2 La fuente de la señal representada como una concatenación de los tubos de resonancia.

Para construir nuestro modelo requerimos los coeficientes de reflexión de la señal. Estos se obtienen mediante la extrapolación del valor una muestra de señal $x(n)$ desde k muestras anteriores $x(n-1)$, $x(n-2)$, ..., $x(n-k)$. Para ello se minimiza el error entre $x(n)$ y $\tilde{x}(n)$, utilizando los mínimos cuadrados para calcular el error cuadrático medio E en el intervalo de rango n de N muestras como máximo. De esta manera, los coeficientes a_i , así obtenidos forman un vector representativo de una señal sonora de entrada (Vinay and Proakis, 2007).

$$\tilde{x}(n) = \sum_{i=1}^k a_i \cdot x(n-i)$$

$$E = \sum_n e^2(n) = x(n) - \sum_{i=1}^k a_i \cdot x(n-i)$$

para $0 \leq n \leq N-1$

donde:

$x(n)$	muestra de referencia (señal original)
$\tilde{x}(n)$	muestra predicha
n	intervalo de las muestras
i	índice de una muestra anterior
k	máximo de muestras anteriores
a_i	coeficiente de una muestra
N	tamaño de un conjunto de muestras
E	mínimo valor cuadrático medio.

Resolviendo E para $a_j \mid 1 \leq j \leq k$

$$\frac{\partial E}{\partial a_j} = 0 \quad 1 \leq j \leq k$$

$$\begin{aligned} & \sum_n x(n-j) \cdot \left[x(n) - \sum_{i=1}^k a_i \cdot x(n-i) \right] = \\ & \sum_n x(n-j) \cdot x(n) - \sum_{i=1}^k a_i \cdot \sum_n x(n-j) \cdot x(n-i) = \\ & C_{j0} - \sum_{i=1}^k a_i \cdot C_{ji} \end{aligned}$$

donde:

$$C_{ji} = \sum_n x(n-j) \cdot x(n-i)$$

Colocando una ventana rectangular en el intervalo, $0 \leq n \leq N-1$, se anulan las muestras que se encuentran fuera de este intervalo limitando el valor de n . Si esto resulta $C_{ij} = C_{ji} = r_{|i-j|}$, entonces los valores de $r_{|i-j|}$ son los coeficientes de una matriz de autocorrelación (Toeplitz) que se resuelve con el método recursivo de Levinson-Durbin.

Con los coeficientes de reflexión que hemos obtenidos, construimos un filtro digital que se va a utilizar para reconstruir la señal original. En la figura 6 se muestra el patrón de ruido que produce un motor eléctrico en operación normal. Los coeficientes de reflexión son dados en las tablas 1 y 2 que representan la señal de ruido de la figura 6.

$$\sum_{i=1}^k r_n(|j-i|) \cdot a_i = r_n(j) \quad 1 \leq j \leq k$$

o en forma matricial

$$\begin{bmatrix} r_n(0) & r_n(1) & r_n(2) & \dots & r_n(k-1) \\ r_n(1) & r_n(0) & r_n(1) & \dots & r_n(k-2) \\ r_n(2) & r_n(1) & r_n(0) & \dots & r_n(k-3) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_n(k-1) & r_n(k-2) & r_n(k-3) & \dots & r_n(0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ \vdots \\ a_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_n(1) \\ r_n(2) \\ r_n(3) \\ \vdots \\ r_n(k) \end{bmatrix}$$

Un filtro todo polos es un filtro FIR (Finite Impulse Response) que en nuestro caso funciona como un filtro inverso. En la figura 4, se muestra la estructura de este filtro. Un filtro lattice todo polos es una cascada de redes de dos puertos. Una red de dos puertos se define por el valor de sus coeficientes de reflexión. En la figura 3 se muestra la estructura lattice con 10 coeficientes de reflexión. La función que relaciona la entrada a la salida es:

$$H(z) = \frac{1}{A(z)}$$

Para los 10 coeficientes, la ecuación de diferencias correspondiente es:

$$y(n) = b_0x(n) - a_0y(n) - a_1y(n-1) - a_2y(n-2), \dots, -a_9y(n-9)$$

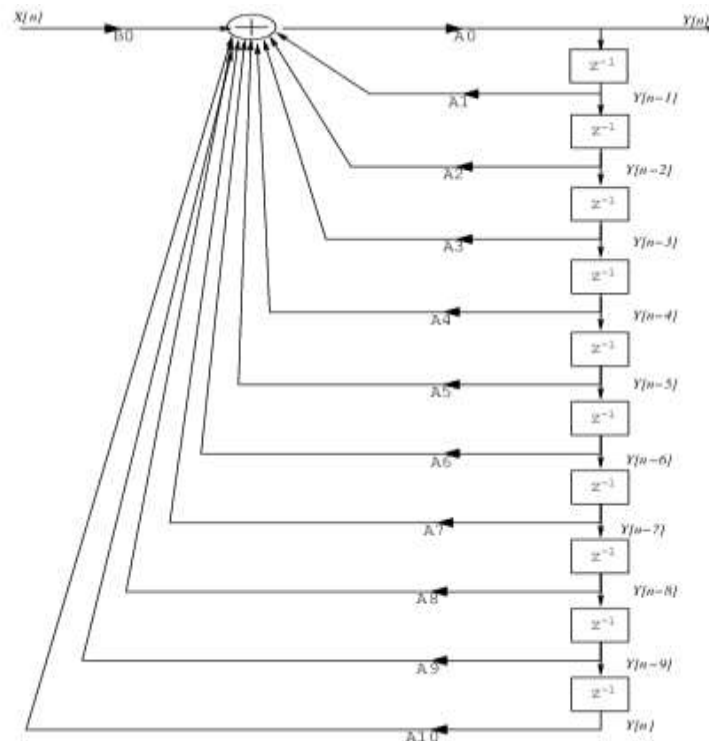


Figura 3: Modelo en forma directa del filtro todo polos.

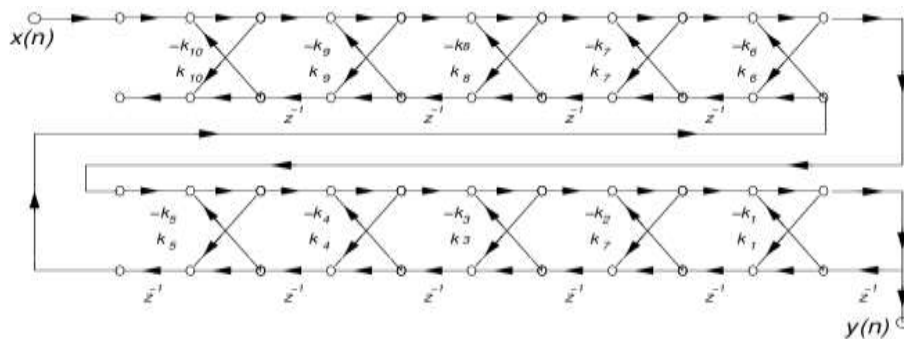


Figure 4 Modelo lattice todo polos

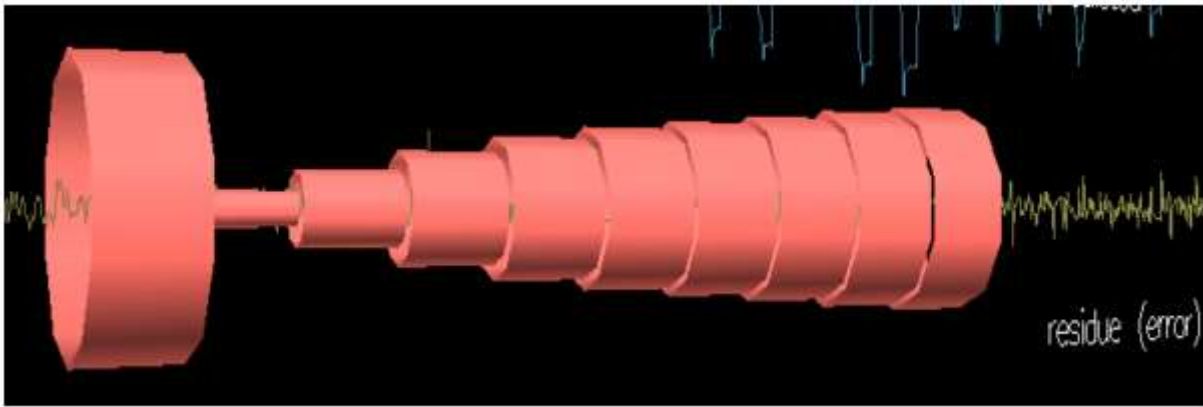


Figura 5: Modelado con tubos en tiempo real con *rt_lpc.exe*

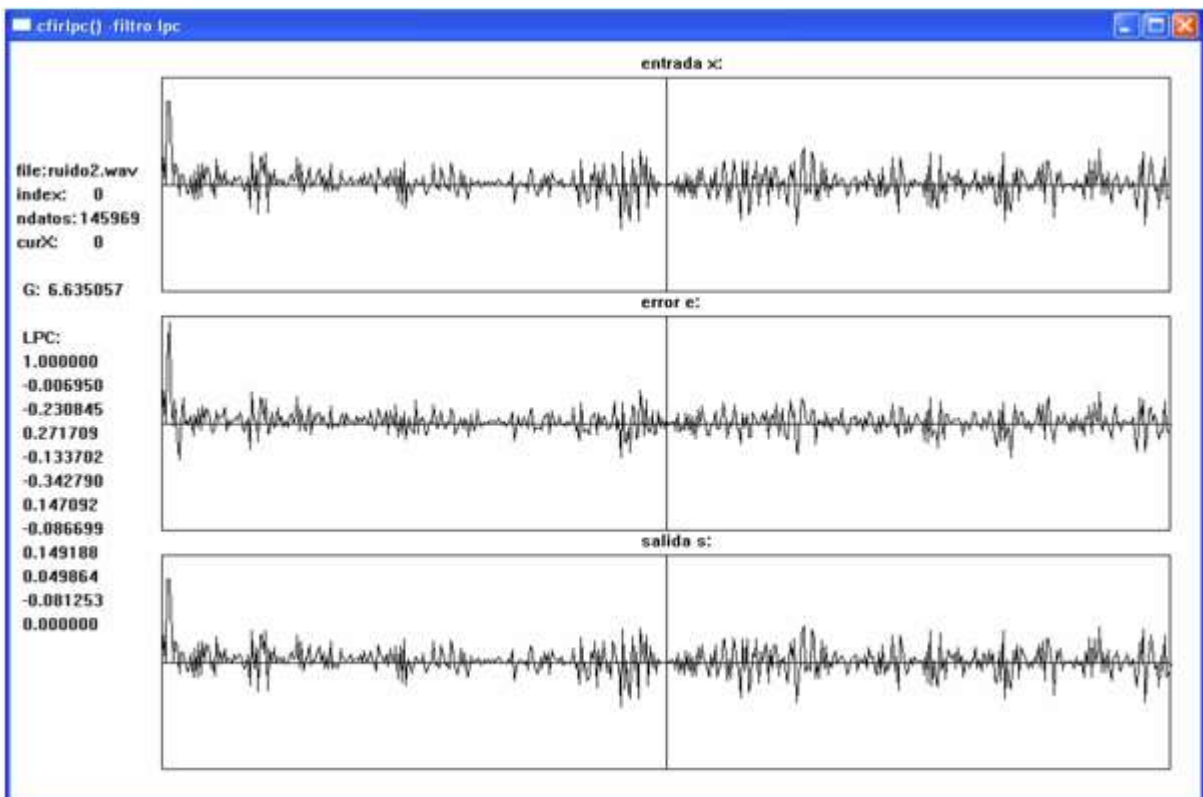


Figura 6: La señal original, el error y la señal reconstruida.

Además de lo expuesto anteriormente, existe una equivalencia entre una estructura de filtro lattice figura 4, una red eléctrica que contiene varios circuitos tanque resonante figura 1, y un modelo de tubos de resonancia figura 2. Utilizando la aplicación de Ananya Misra, Ge Wang y Perry Cook *rt_lpc: real time LPC+analysis+synthesis+visualization* (http://soundlab.cs.princeton.edu/software/rt_lpc) se muestra un patrón de ruido capturado en tiempo real figura 5. Además, en la figura 6 se muestra una señal de ruido original, la señal de error que se obtiene calculando los coeficientes de predicción, y la señal de salida que se obtiene con un filtro que utiliza como parámetros a dichos coeficientes.

3. Resultados y Conclusiones

En el laboratorio de acústica y utilizando el método de Levinson- Durbin calculamos 10 coeficientes de reflexión y 10 coeficientes de predicción. Para este cálculo programamos en C / C ++, las siguientes funciones: (a) `getfac()`, calcula los valores de autocorrelación de la señal, (b) `getcref()`, calcula los coeficientes de reflexión, (c) `getlpc()`, calcula los coeficientes de predicción lineales. Estas y otras funciones de apoyo son controladas por un programa principal (`test.c`). En la figura 6 podemos ver tres señales: la señal original, el error que se produce cuando se calcularon los coeficientes, y la señal de salida de la que se recupera utilizando un filtro cuyos parámetros son coeficientes de predicción lineal. Por otra parte en la Tabla 1 Se muestran los coeficientes de reflexión obtenidos, y en la Tabla 2 se muestran los coeficientes de predicción obtenidos a partir de una fuente de señal de ruido producido por un motor de inducción. Con una aplicación externa (`rt_lpc`) podemos ver en la figura 5 un tubo que corresponde a la señal ruidosa que hemos estado analizando. Finalmente, se muestran las tablas de los valores de los coeficientes de reflexión para un tubo y los coeficientes LPC para un tubo. Sólo resta mencionar que fue muy interesante modelar una fuente ruidosa con tubos de resonancia y establecer la factibilidad de aplicarlo en mantenimiento preventivo.

Tabla 1: Coeficientes de reflexión para un tubo.

$RC[1] = -0.999814$
$RC[2] = 0.300585$
$RC[3] = 0.394866$
$RC[4] = 0.302412$
$RC[5] = 0.231131$
$RC[6] = 0.395477$
$RC[7] = -0.034947$
$RC[8] = 0.084053$
$RC[9] = 0.121510$
$RC[10] = 0.102158$

Tabla 2: Coeficientes LPC de reflexión para un tubo.

$A[1] = 1.000000$
$A[2] = -0.895069$
$A[3] = -0.220949$
$A[4] = -0.012718$
$A[5] = -0.030027$
$A[6] = -0.178566$
$A[7] = 0.393647$
$A[8] = -0.136563$
$A[9] = -0.049742$
$A[10] = 0.028803$

4. References

- Hamming R. W.**, *Digital Filters*. (1989). 3rd. ed. Dover, 284 pgs. Bell Laboratories.
- Hayes H. Monson.** (1999). *Theory and Problems of Digital Signal Processing*, Schaum's McGraw-Hill, 432 pgs.
- Ingle Vinay K., John G. Proakis.** (2007). *Digital Signal Processing using MATLAB*, 2nd. ed., CENEAGE Learning Bookware Companion Series, 605 pgs.
- Rabiner L. R., R. W. Schafer.** (1978). *Digital Processing of Speech Signals*, Prentice, Hall.
- Rabiner L. Juang.** (1993). *Fundamentals of Speech Recognition*, Prentice Hall.
- Rodríguez M., E. Iglesias, R. Martínez, E. Muñoz.** (1984). “Alternativas para síntesis de voz”, Mundo Electrónico, No. 144, pp. 67-79.
- Rabiner, L. & Juang, B-H** (1998). *Speech Recognition by Machine*, Chap. 47 in *The Digital Signal Processing Handbook*, CRC Press, IEEE Press.

Authors authorize LACCEI to publish the paper in the conference proceedings. Neither LACCEI nor the editors are responsible either for the content or for the implications of what is expressed in the paper.