

Sistema de Adquisición y Análisis de Señales Electroencefalográficas

C. Bustillo-Hernández, V. Rebollar-González, J. Figueroa-Nazuno,

Centro de Investigación en Computación
Instituto Politécnico Nacional
Unidad Profesional Adolfo López Mateos
chbustillo004@cic.ipn.mx, jfn@cic.ipn.mx
Paper received on 23/07/10, Accepted on 05/09/10.

Resumen. El Electroencefalógrafo juega un papel muy importante en la Medicina moderna, debido a que la información que provee puede ser usada para la detección y diagnóstico de patologías del cerebro. En los últimos años se han desarrollado métodos de análisis de señales de gran potencia y utilidad, capaces de ofrecer nuevos indicadores útiles en la determinación de patologías y estados fisiológicos. En este trabajo se presenta la implementación de un sistema de Electroencefalografía en hardware y software, donde se desarrolla la parte electrónica de forma completa a muy bajo costo y por otro lado, se acopla una etapa de análisis de señales con técnicas modernas muy poderosas para el estudio de la actividad eléctrica cerebral.

Palabras Clave: Análisis No Lineal, EEG, Electroencefalógrafo, Sistema

1 Introducción

El estudio de la anatomía y fisiología del cerebro humano es una de las tareas de investigación más importantes en el área de Neurofisiología; esto ha implicado el desarrollo de diversas técnicas que permitan obtener datos precisos acerca de su funcionamiento, una de las más utilizadas para su análisis es la Electroencefalografía, que permite explorar el cerebro mediante el registro de actividad eléctrica sin afectarlo o modificarlo, ya que es un procedimiento no invasivo.

Sin embargo el proceso de adquisición de dichas señales (que se caracterizan por ser de muy bajo voltaje), su procesamiento, visualización y análisis sigue siendo uno de los campos de investigación de diversas áreas y laboratorios con el objetivo de diseñar e implementar nuevos instrumentos y/o dispositivos, con mucha mayor precisión y velocidad, para adquirir estas señales en forma económica y rápida.

En este trabajo se presenta la implementación de un sistema de electroencefalografía (hardware y software), que permite realizar el registro y análisis de señales eléctricas del cerebro. Debido a que existe la necesidad de crear dispositivos de alta precisión accesibles que permitan obtener, ya sea los mismos resultados y/o inclusi-

ve mejores que los instrumentos comerciales, dado que éstos últimos resultan ser sumamente costosos. La implementación de electroencefalógrafos electrónicos basados en computadora es una propuesta técnicamente interesante, importante y de gran utilidad social.

Por otro lado, las técnicas de análisis que han sido utilizadas en Electroencefalografía como Fast Fourier Transform (FFT), desde 1932 por Hans Berger[1], no han tenido un avance significativo ya que se desconocen los nuevos métodos de análisis, derivados de distintas áreas, que puedan proponerse para obtener un diagnóstico más preciso.

2 Descripción del Sistema

2.1 Adquisición y Procesamiento de la Señal Electroencefalográfica.

Para la adquisición de la señal electroencefalográfica (EEG) se utilizaron electrodos con una aleación de cloruro de plata[1] y se implementó un circuito analógico que consta de las siguientes etapas: preamplificación, amplificación y filtrado. Debido a que la amplitud de la señal adquirida se encuentra en un rango de 1 a 100 μV_{pp} , incluyendo estados normales y patológicos [1], es necesario amplificar varias veces la señal antes de ser procesada. Sin embargo, este tipo de señal es sumamente sensible al ruido de 50 o 60Hz, que es el que se encuentra en instalaciones eléctricas comunes.

En la etapa de preamplificación se utilizó un circuito de protección eléctrica [1], el cual asegura que el paciente no sufra de alguna descarga electrostática y se configuró un amplificador instrumental con alta impedancia, haciendo posible medir la diferencia de voltaje entre dos electrodos. Esto asegura que un porcentaje de ruido no contamine la señal de interés.

Aunado a lo anterior, se implementa un amplificador denominado *driver right leg* (DRL), utilizado también en electrocardiografía (ECG), que permite atenuar el ruido de 50/60Hz en las entradas del amplificador instrumental. A continuación la señal pasa por un filtro pasa-altas que removerá los voltajes en corriente directa (DC) que se encuentren en la señal.

Posteriormente se amplifica la señal y se pasa por un filtro pasa-bajas a 50Hz tipo Bessel-Butterworth de tercer orden. Finalmente la señal obtenida es amplificada con un factor de 7808 veces por el circuito implementado y mediante una interfase muy sencilla se conecta a la PC para poder visualizar los datos y aplicar diferentes técnicas de análisis.[1]

2.2 Descripción de la Técnicas.

Las técnicas de análisis y procesamiento de señales basadas en métodos clásicos como la transformada de Fourier, en el sentido estricto, requiere que la señal sea infinita, estacionaria y lineal. Estas condiciones no se encuentran en señales reales dado que se caracterizan por tener tiempos finitos, no son lineales ni estacionarias.

El desarrollo de herramientas en software para el análisis de señales, es una de las necesidades básicas para diferentes áreas de investigación, siendo necesario emplear técnicas distintas, que no sean restrictivas en aplicaciones específicas y que el análisis realizado sobre la temática proporcione una mayor información.

Una característica muy importante dentro de los fenómenos descritos en el plano X-Y es que pueden tener muchas propiedades, las cuales no todas pueden ser visibles en el espectro de potencia. Sin embargo, en los últimos años han surgido nuevas técnicas de procesamiento y análisis que proporcionan una mayor información de la señal algunas provienen de áreas como: Matemática Moderna, Teoría de Sistemas Dinámicos No Lineales, Estadística Moderna y otras disciplinas que han desarrollado sus propias herramientas para la caracterización de sus fenómenos, por ejemplo en la Economía Moderna.

De acuerdo a lo anterior, en este sistema se implementan diferentes tipos de procesamiento y análisis de señales con técnicas modernas que puedan obtener diferentes características en diversos fenómenos, ya sea cuantitativamente o gráficamente. Además permiten hacer diferentes análisis de fenómenos que pueden ser en forma individual y/o en la comparación varias señales. La mayoría de estas técnicas están basadas en la teoría de sistemas dinámicos no lineales. A continuación se describe brevemente cada una de las técnicas implementadas.

1. **Cross Correlation.** La correlación es la relación que existe entre objetos, fenómenos o señales. El proceso para correlacionar dos señales discretas se denomina co-relación cruzada (cross-correlation.)

El algoritmo propuesto en esta técnica busca la relación de correspondencia entre dos señales utilizando operaciones de adición, multiplicación y estadísticas. En los resultados se puede observar gráficamente como se relacionaron ambas señales. [4]

2. **Dynamic Time Warping.** Es una transformación que permite la expansión y compresión de una secuencia, para la alineación local con respecto a otra secuencia, con el objeto de minimizar la distancia base, que comúnmente es la distancia euclidiana. DTW permite comparar y obtener un valor de semejanza entre secuencias que se encuentran desfasadas una con respecto a la otra, o cuando una de ellas presenta o ausenta segmentos con respecto a la otra. [5]
3. **Coupling Direction.** Permite determinar la interacción bidireccional o unidireccional de dos señales y cuantificar su grado de acoplamiento mediante un índice de sincronidad. Se puede comparar dos sistemas o fenómenos distintos que presenten comportamiento caótico, ruidoso y estructuralmente diferentes.

Algunas de las características de esta técnica son: a) revela la intensidad de interacción entre sistemas acoplados y b) caracteriza las relaciones “causales”, esto es: si el segundo sistema depende fuertemente del primero, siendo el eje principal de la interacción, entonces la evolución del segundo depende del primero. En base a lo anterior, la “predicción” del segundo sistema puede ser improvisada a partir de los datos previos del primer sistema. [6,7]

4. **Alineación de Señales.** Esta técnica permite la comparación de señales que presentan diferente longitud y son similares en forma. Se obtiene como resultado del análisis una representación general de las series, es decir, una señal canónica.

El algoritmo implementado permite que se pueda encontrar la similitud entre las señales de forma más directa. Esta técnica aborda el problema de comparación entre dos o más series donde existen cambios con respecto al tiempo, y es una aproximación al problema de alineamiento entre señales. [3]

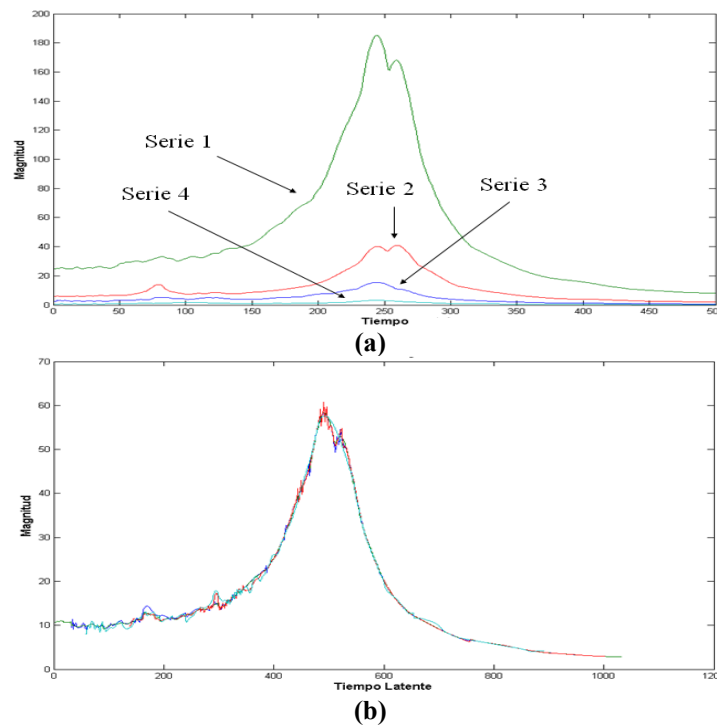


Fig. 1. Datos correspondientes a Espectros de Respuesta de una señal, a) Series desalineadas y no escaladas, b) Series Alineadas y Escaladas después de 10 iteraciones.

5. **Intrinsic Mode Function (IMF).** Un método alternativo a los análisis de Fourier para el procesamiento de datos no estacionarios provenientes de sistemas no lineales; es el referido como la Transformada Hilbert-Huang (HHT). La HHT se compone de la descomposición empírica en modos (EMD) y el análisis espectral de Hilbert. Cualquier registro en el dominio del tiempo, por más complicado que éste sea, puede ser descompuesto a través de la EMD en un reducido número de funciones de modos intrínsecos (IMF) que admiten la transformación Hilbert. Una IMF representa un modo de oscilación simple, similar a una componente

armónica de Fourier, pero mucho más general. La EMD explora la variación temporal en la escala de tiempo característica a cada conjunto de datos por lo que se adapta fácilmente a los procesos no lineales y a los datos no estacionarios. El análisis espectral de Hilbert define las frecuencias temporales (dependientes del tiempo) de los datos a través de la transformación de Hilbert de cada componente IMF.

La EMD es un método de análisis muy poderoso para datos no estacionarios. La técnica descompone los datos en funciones de modos intrínsecos IMF's tal que la señal original sea igual a la suma de las IMF's y un residuo.

El algoritmo básico tiene como objetivo identificar las IMF's que representan los modos de oscilación, embebidos en los datos de la señal, a partir de dos condiciones simples: 1) En el conjunto de datos, el número de veces que atraviesa el eje cero es igual o difiere a lo más en uno, 2) En cualquier punto el valor medio de la envolvente definida por los máximos locales y la envolvente definida por los mínimos locales es cero (esta condición modifica un requerimiento global por uno local y es indispensable para asegurar que la frecuencia instantánea no presente fluctuaciones no deseadas, como las inducidas por formas de onda asimétricas). [8]

6. **Detección de Picos.** Su implementación esta basada en un algoritmo que determina los picos y valles de una señal deseada sin importar la presencia de ruido. Se basa en el principio de que un punto alto se encuentra entre dos bajos; la ventana de detección de picos se puede variar con la finalidad de ajustarse a las condiciones necesarias de la señal.
7. **Cross Sample Entropy.** Este método se basa en el análisis estadístico llamado Sample Entropy [1], con el cual se obtienen valores de sincronía y una cantidad específica de alineamientos en una época determinada. Dada una época (E) queda establecido en un rango de tiempo determinado, esto es, donde n es el total de datos de la señal y todo esto esta basado en la Entropía de Shannon.[2]
8. **Pseudo Spectral.** Es una técnica alternativa para la obtención del espectro de una señal a través de un procedimiento basado en la codificación simbólica y en el análisis de strings de pulsos digitalizados obtenidos directamente de la señal; con lo cual se puede obtener un gráfico de pseudoespectro de la serie de tiempo analizada.
Otra característica importante de esta técnica es que no requiere satisfacer las tres condiciones estrictas que se mencionaron al principio de la FFT, se puede obtener una representación o firma fácil de interpretar, y al igual que en el espectro obtenido por Fourier, hay pérdida de información, sin embargo se gana mucho en rapidez y simplicidad computacional.
9. **Recurrence Period Density Entropy (RPDE).** Esta técnica se utiliza para la caracterización de series de tiempo donde existen secuencias iguales repetidamente. Este procedimiento es similar al método de autocorrelación lineal e información mutua, excepto que esta medida de re-

petitividad se obtiene en el espacio de fase del sistema, de modo que etrae información basada en la dinámica subyacente del sistema. Una de sus ventajas es que no hace consideraciones de linealidad, distribución gaussiana de los datos o comportamiento determinista que pueda presentar el sistema. [9]

3 Ejemplos de Pruebas Experimentales

En esta sección se presentan ejemplos de las pruebas experimentales con las que se obtuvo señales electroencefalográficas, así como los diferentes análisis que se hicieron. Los resultados se obtuvieron de sujetos de sexo femenino con edades de 15, 22 y 23 años, en estado de vigilia; pudiéndose captar señales tipo alfa y beta.

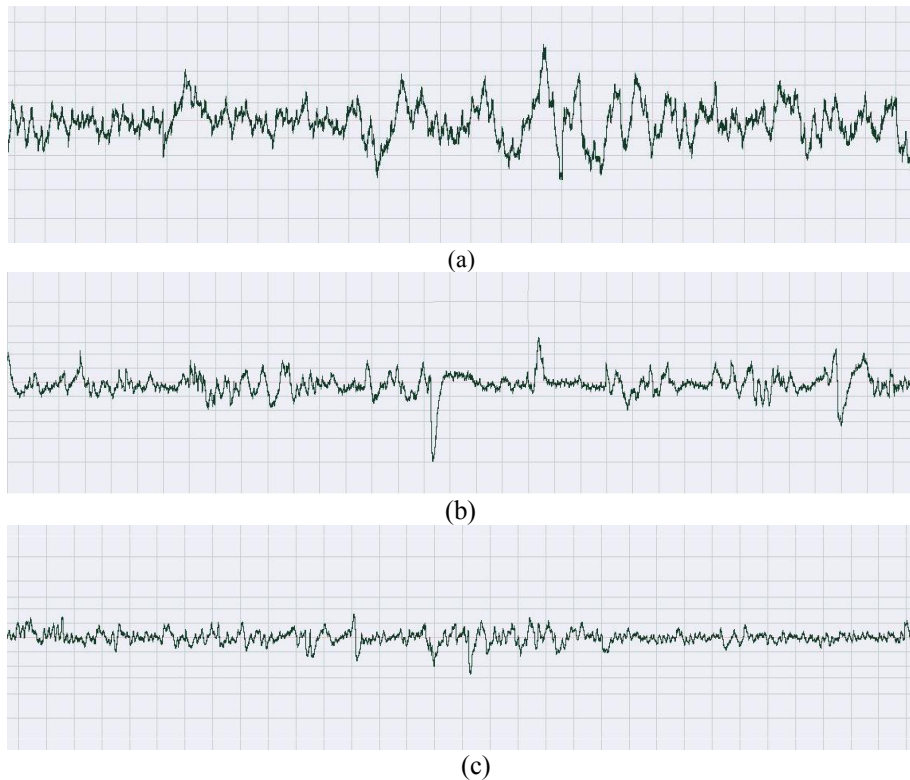


Fig. 2. Señales electroencefalográficas obtenidas de sujetos femeninos de 15 y 22 años respectivamente con el sistema implementado con frecuencias de: a) 38Hz , b) 28 y 47Hz. y c) 30y 50Hz.

En la Fig. 3 se muestra la señal característica cuando se encuentran los ojos abiertos y los ojos cerrados, obtenido de un sujeto masculino de 33 años en estado

de vigilia. El resultado que se presenta es el adquirido con un equipo comercial de Electroencefalografía.

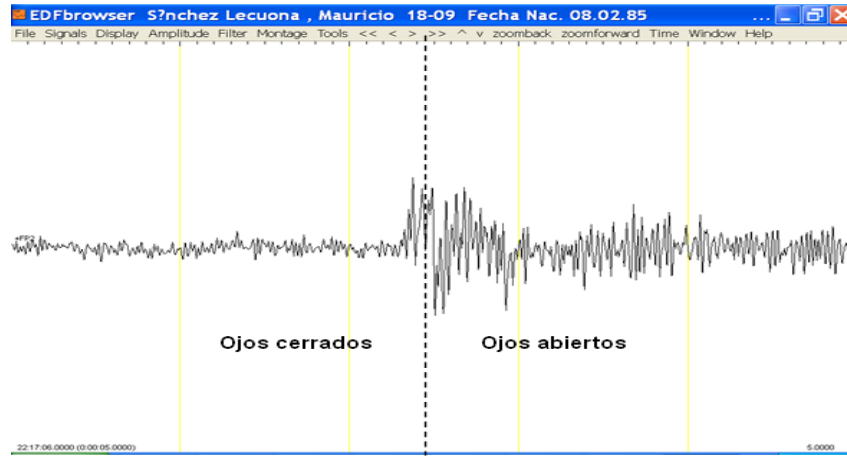


Fig. 3. Señal captada entre 30 y 50Hz. Montaje bipolar, electrodos frontales (Fp1 y Fp2)

En la Fig. 4 se presenta la misma condición obteniendo señal electroencefalográfica de electrodos frontales (Fp1 y Fp2) con el sistema propuesto.

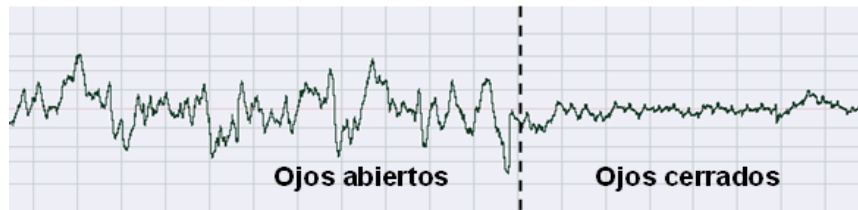


Fig. 4. Señal captada entre 30 y 50Hz, sujeto femenino 15 años.

Los valores obtenidos para la caracterización de los dos estados que se presentan en la Fig.4 con la técnica RPDE, para los datos cuando los ojos están abiertos fue $H_{NORM}=0.68702$ y ojos cerrados $H_{NORM}=0.7434$, esto indica que el fenómeno para ambos casos es complejo, ya que para señales periódicas el valor $H_{NORM}=0$ y en las estocásticas $H_{NORM} \approx 1$ [9]. Por otro lado, con la técnica Coupling Direction se logra observar mucho mejor las diferencias entre los dos estados: a) mediante gráficas de fase de los datos (Fig. 5) y b) verificando la Fig. 7 b) donde se observa el desacoplamiento de los datos en tiempo.

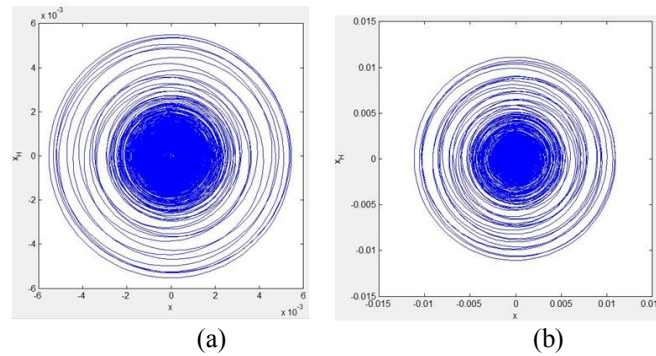


Fig. 5. Gráficas de fase de los datos obtenidos con la técnica Coupling Direction a) ojos abiertos, b) ojos cerrados

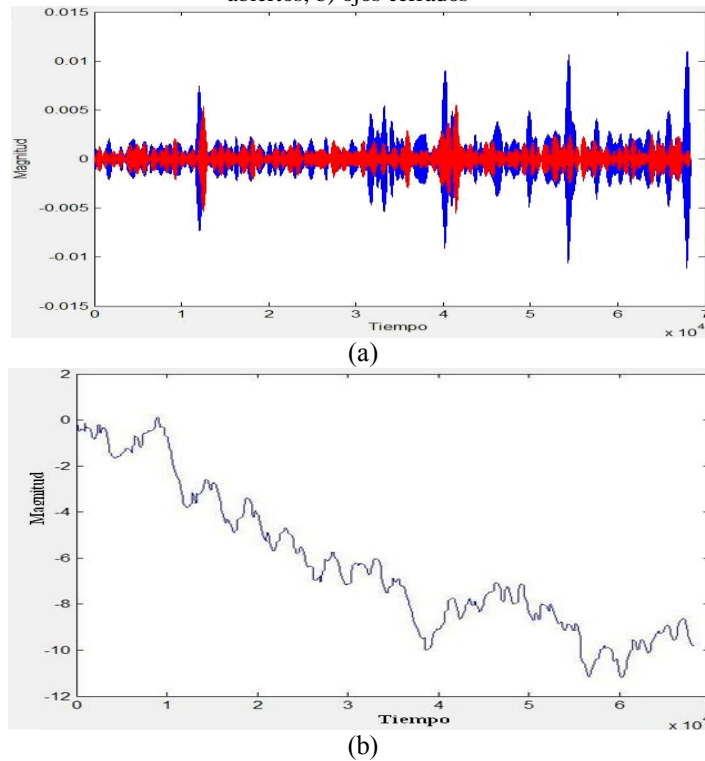


Fig. 6. Resultados gráficos, a) datos filtrados y b) acoplamiento de ambas señales.

4 Discusión

En este trabajo, como se puede observar, esta compuesto de dos partes; la primera es la implementación electrónica directa de un electroencefalógrafo digital mediante componentes electrónicos modernos y técnicas de filtrado eficientes, esta

parte es un sistema cerrado que se encuentra entre los electrodos de registro de EEG que se colocan en el sujeto y una PC, en donde los datos obtenidos con dicha implementación electrónica pasan a la computadora. En esta segunda parte, se pueden hacer diferentes estudios utilizando las técnicas de Cross-Correlation, Dynamic Time Warping, Coupling Direction, Alineación de Señales, Intrinsic Mode Function, Detección de Picos, Cross Sample Entropy, Pseudo Spectral y Recurrence Period Density con las cuales, como se indica en la introducción, se pueden hacer análisis de los datos en forma diferente y más poderosa que sólo el simple registro de la señal electroencefalográfica o con técnicas clásicas como Fourier.

Por lo tanto, las contribuciones que se presentan son en dos aspectos, tanto en la implementación electrónica, económica y directa así como las técnicas de análisis de señales moderno que pueden facilitar el diagnóstico y la investigación de las señales de EEG.

5 Conclusiones

El registro de señales electroencefalográficas requiere de una instrumentación compleja y de técnicas de procesamiento adecuadas de análisis para una mejor utilización en el diagnóstico.

El sistema implementado en Matlab, muestra la utilidad para la obtención de datos, ya que permite observarlos, almacenarlos y puede emplearse para automatizar diagnósticos en análisis intensivos de señales.

Los resultados obtenidos con este sistema proporcionan más información sobre el comportamiento de la señal de EEG y además permite detectar propiedades muy complejas en su estructura, útiles para el diagnóstico.

Referencias

1. C. Bustillo Hernández.: Electroencefalograma Modular para su Uso en Pc's. Tesis Licenciatura, Escuela Superior de Cómputo, IPN (2009)
2. T. Zhang, Z. Yang, J. H. Coote.: Cross-sample entropy statistic as a measure of complexity and regularity of renal sympathetic nerve activity in the rat. *Exp Physiol*, 92 (4) 659–669.
3. J. Listgarten, R. M. Nealy, S.T. Roweis, Andrew Emiliz.: Multiple Alignment of Continuous Time Series. *Advances in Neural Information Processing Systems*, MIT Press, Cambridge 17 817-825.
4. Chugani Mahesh, Shuler Charles.: *Digital Signal Processing: A hands Approach*. Mc. Graw Hill. (2000)
5. Angeles Yreta, J. Figueroa-Nazuno, K. Ramírez-Amaro.: Búsqueda de Semejanza entre Objetos 3D por Indexado. *Reunion de Otoño de Comunicación, Computación Electrónica y Exposición Industrial ROC&C, IEEE Sección México*, pp. 112-117., Acapulco, Guerrero, (2005).
6. Bezruchko, V. Ponomarenko.: Characterizing direction of coupling from experimental observations, *Chaos* 13 (1) pp.179-185
7. M. Rosenblum, L. Cimponeriu, A. Pikovsky.: Coupled oscillators approach in analysis of bivariate data, *Handbook of Time Series Analysis*. Wiley-VCH pp. 159-180 (2006)

8. H. Solís-Estrella, M. Ortega, F. Correa, K. Ramírez-Amaro, A. Angeles-Yreta, J. Figueroa-Nazuno y S. García.: Descomposición Empírica en Modos: una interpretación sísmica. XV Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, CCS84 (2005)
9. M. Little, P. McSharry, I. Moroz, S. Roberts.: Nonlinear, Biophysically-Informed Speech Pathology Detection, IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, ICASSP 2006 Proceedings, Toulouse, France. pp. II-1080-II-1083. (2006)