

ANÁLISIS ESPECTRAL DEL ELECTROENCEFALOGRAMA

J. Alberto Delgado R.
Instructor Asistente
Ingeniería Eléctrica
Universidad Nacional de Colombia

RESUMEN

El artículo presenta un método de análisis del electroencefalograma basado en la Transformada de Fourier. Este enfoque permite complementar la información del médico y así obtener un diagnóstico mejorado. Adicionalmente, la técnica se utiliza para realizar investigaciones inherentes al cerebro y los múltiples problemas que se presentan, comparando la Densidad Espectral de Potencia de los EEG en bandas de frecuencia (δ , θ , α , β) para distintas condiciones.

ABSTRACT

This paper presents a method of analysis of the electroencephalogram based on the Fourier Transform. This point of view complements the medical information to obtain a better diagnosis. Additionally, the procedure is used to investigate the brain and its problems by comparing the Power Spectral Density of the EEG in the (δ , θ , α , β) frequency bands for different conditions.

INTRODUCCION [1] - [4]

El cerebro humano produce actividad eléctrica y fue Berger en 1920-1932 quien por vez primera registró este tipo de señal con electrodos posicionados sobre el craneo.

El EEG se convirtió en una herramienta práctica para el estudio de estados funcionales del cerebro y diagnóstico de daños. Para apreciar el EEG, su contenido frecuencial se define de acuerdo a los rangos,

$0.0 \leq \delta < 0.5$	Hz
$0.5 \leq \theta < 4.0$	Hz
$4.0 \leq \theta < 8.0$	Hz
$8.0 \leq \alpha < 13.0$	Hz
$13.0 \leq \beta < 30.0$	Hz

La presencia de las múltiples frecuencias depende de la ubicación de los electrodos, el estado de conciencia del sujeto y su edad. Por ejemplo, la actividad alfa (alrededor de 10Hz) aparece en la región occipital del cerebro en estado de reposo físico y mental con ojos cerrados; al abrirlos disminuye o desaparece.

Muchas enfermedades, daños y perturbaciones funcionales del cerebro afectan el EEG. En general, un daño severo causa actividad de baja frecuencia. Registrando simultáneamente el EEG de varias partes del cerebro es posible detectar una perturbación, juzgar su grado de severidad y localización, estas conclusiones consideran el contenido frecuencial del EEG.

El análisis clásico del EEG se basa en la detección de patrones espaciales, esto involucra fuertes elementos subjetivos. Un ejemplo es el encubrimiento de actividad delta y theta en presencia de fuerte alfa. Por ello la densidad espectral permite complementar los conocimientos del neurofisiólogo obtenidos por inspección del registro en el tiempo y así mejorar el diagnóstico.

El artículo está dividido en tres grandes secciones. En la primera se comenta el proceso de adquisición del EEG, las bases matemáticas para estimar la densidad espectral y el teorema de Parseval. En la sección de resultados se presentan los registros simulados y reales con sus correspondientes densidades espectrales. La conmutación ojos cerrados - ojos abiertos muestra el cambio en la actividad alfa en el periodograma. Finalmente, la discusión señala las ventajas de la densidad espectral para el análisis del EEG frente al estudio en el tiempo.

1. MATERIALES Y METODOS

En este aparte se comenta el procedimiento de adquisición del EEG hasta su almacenaje en el computador. También se presentan los fundamentos teóricos que soportan el método, estos incluyen la transformada discreta de Fourier y el teorema de Parseval.

1.1 ADQUISICION Y ALMACENAJE DEL EEG

La Fig.1 muestra esquemáticamente la adquisición del EEG y su almacenaje, como señal analoga, en cinta magnética (cassette).

Los electrodos activos se ubican en las regiones frontal, temporal, parietal y occipital tomando el lóbulo de la oreja ipsilateral como polo indiferente. Los registros se hacen mediante un polígrafo de 4 canales E & M Instruments Co. Inc. y simultáneamente se graban en cinta magnética por medio de una grabadora Physiotape de 4 canales CDR 411 E.M. Instrument Co. Inc.

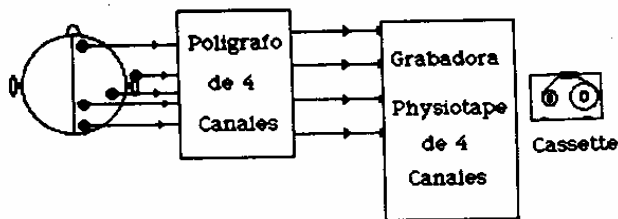


Fig. 1.- Adquisición y almacenaje del EEG en cinta magnética (cassette).

Posteriormente para muestrear y digitalizar los EEGs se conecta la grabadora al voltímetro 3437A Hewlett Packard, canal por canal, el cual es controlado por el Instrument Controller 1720A Fluke, a través del estándar de comunicación IEEE.

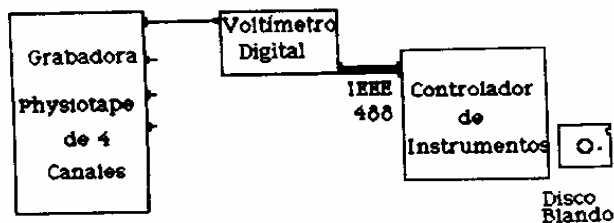


Fig. 2.- Muestreo, digitalización y almacenaje en disco magnético del EEG.

En el controlador de instrumentos se ejecuta un programa en BASIC que se encarga de disparar el muestreo, leer los datos digitalizados por el voltímetro, 2048 muestras por canal, y almacenarlos en un disco magnético blando junto con información adicional que permite identificar el registro. El muestreo se realiza a 200 Hz, lo cual significa un ancho de banda de 100 Hz, según el teorema de Nyquist.

Finalmente, los registros se transfieren a un computador VAX - 730 donde son analizados con múltiples métodos, uno de los cuales utiliza la transformada discreta de Fourier y se describirá a continuación.

1.2 ESTIMACION DE LA DENSIDAD ESPECTRAL DEL EEG [5] - [7]

Para una señal continua en el tiempo $x(t)$ la transformada de Fourier $X(f)$ se define,

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot e^{-2\pi i f t} dt \quad (1)$$

cuando la señal $x(t)$ es una sinusoidal de 10 Hz, la representación frecuencial $X(f)$ es un delta en esta frecuencia y nula en las demás.

La transformada de Fourier para una señal discreta $x(k)$, como el EEG muestreado se puede escribir,

$$X(j) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x(k) \cdot e^{-j 2 \pi \frac{j k}{N}} \quad (2)$$

$$j = 0, 1, \dots, N-1$$

N : Número de muestras del registro EEG

Una vez se ha calculado la transformada discreta (2) para el EEG en cuestión, un estimador de la densidad espectral de potencia es el denominado periodograma dado por,

$$S^*(j) = \frac{1}{N} [X(j)]^2 \quad (3)$$

$$j = 0, 1, \dots, N-1$$

$S^*(j)$: Estimador de la densidad espectral o periodograma de la señal $x(k)$

El estimador de la densidad espectral (3) se caracteriza por un sesgo que se reduce al incrementar el número de muestras N del EEG estudiado y una varianza aproximadamente igual al cuadrado del verdadero espectro.

Para mejorar el estimador y reducir su varianza se formula un periodograma modificado, el cual es un promedio de periodogramas. Es decir, el registro $x(k)$ de N datos se divide en L segmentos de longitud M cada uno ($N=LM$). Posteriormente se calcula (3) para cada segmento y se promedian para lograr el estimador mejorado,

$$S^{**}(n) = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L S_i^*(n) \quad (4)$$

$$n = 0, 1, \dots, M-1$$

$S_i^*(n)$: Periodograma para cada uno de los L segmentos en que se dividió el registro.

1.3 TEOREMA DE PARSEVAL

Como se anotó en la introducción, al analizar el EEG es importante conocer el porcentaje de potencia en cada banda de frecuencia ($\epsilon, \delta, \theta, \alpha, \beta$). Para ello se utiliza el teorema de Parseval [6],

$$\sum_{k=0}^{N-1} x^2(k) = \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} |X(j)|^2 \quad (5)$$

El programa implementado en el VAX para estudiar los EEGs aplica la fórmula (5), normalizando la potencia en cada banda respecto al total dado por,

$$\epsilon + \delta + \theta + \alpha + \beta = 100\% \quad (6)$$

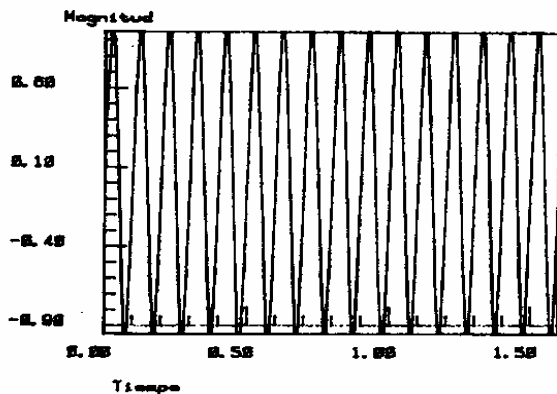
2. RESULTADOS

A continuación se ilustra la aplicación de las expresiones (3) y (4) para estimar la densidad espectral de registros simulados y reales. Los primeros contienen una sinusoidal pura de 10 Hz y la misma señal mas ruido. Los registros reales corresponden a EEGs tomados en la región occipital donde se manifiesta actividad alfa.

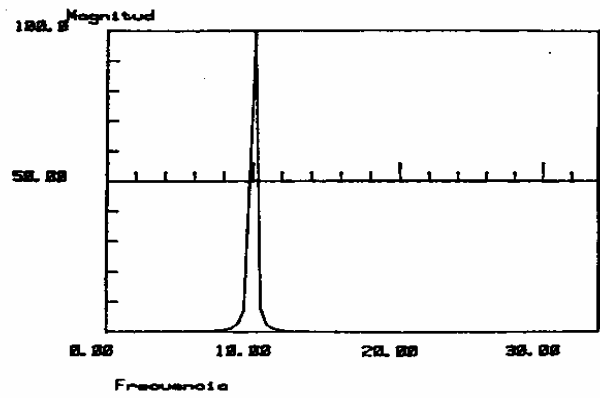
2.1 REGISTROS SIMULADOS

La Fig.3(a) muestra una sinusoidal de amplitud unitaria y frecuencia 10 Hz; en 3(b) su correspondiente periodograma con magnitud normalizada, note el pico.

La Fig.4(a) es la misma sinusoidal anterior pero contaminada con ruido blanco Gaussiano de media cero y varianza unitaria; la Fig.4(b) ilustra el periodograma para $L=1$ y $M=N=2048$; finalmente, la Fig.4(c) es el periodograma modificado para $L=8$ y $M=256$, se observa un pico en 10 Hz y el ruido de fondo se ha suavizado. Al analizar el registro de la Fig.4(a) es imposible afirmar que se trata de ritmo alfa contaminado, por ello el periodograma de la Fig. 4(c) es útil ya que recupera información enmascarada.

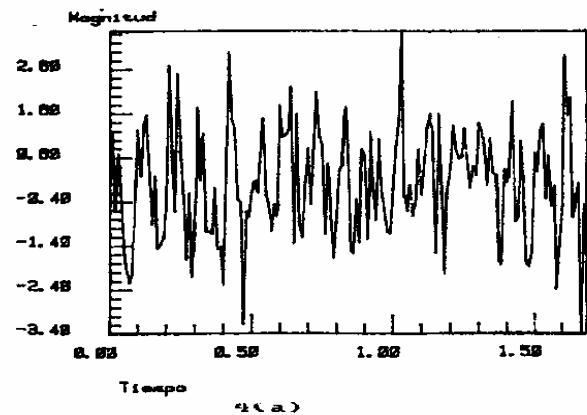


3 (a)

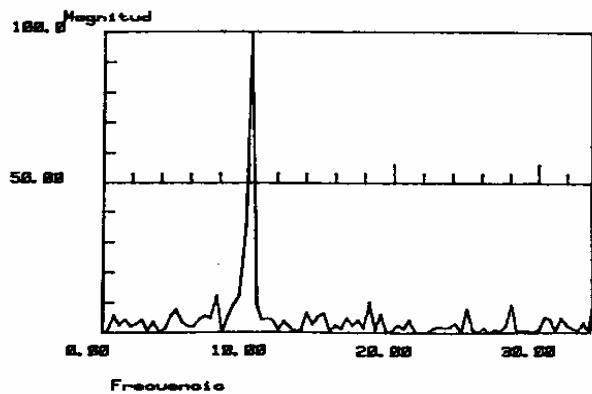


3 (b)

Fig.3.- (a) Sinusoidal de 10 Hz; (b) Periodograma



4 (a)



4 (b)

2.2 ELECTROENCEFALOGRAMAS

La Fig.5(a) muestra un segmento de EEG de .80 segundos tomado en la región occipital izquierda de un sujeto adulto. Un análisis en el tiempo, conteo de picos, concluye que se trata de ritmo alfa. El periodograma de la Fig.5(b) verifica la presencia de actividad rítmica dominante de 9 Hz.

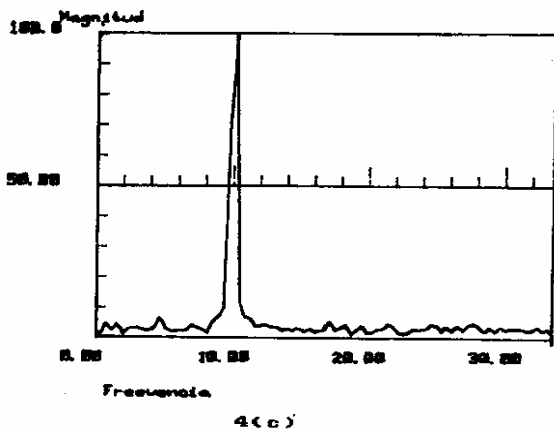


Fig. 4.- (a) Sinusoidal de 10 Hz contaminada;
 (b) Periodograma L-1 M-N=2048;
 (c) Periodograma modificado L=8, M=256,
 N=2048.

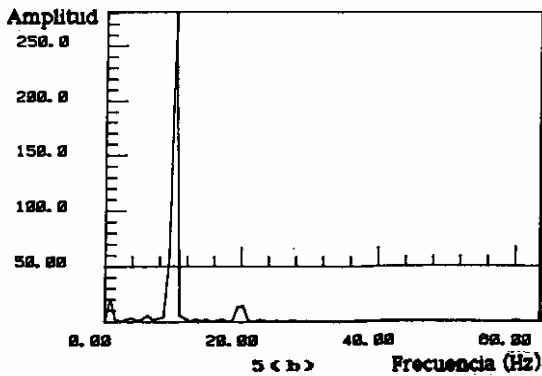
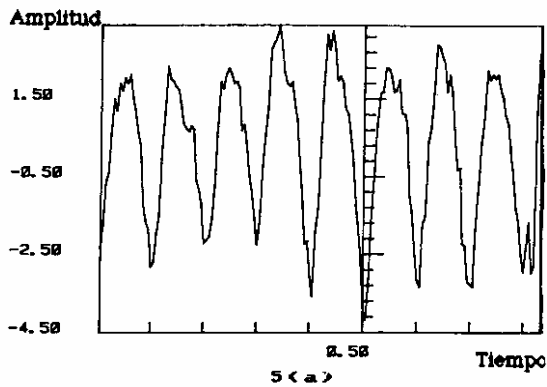


Fig. 5.- (a) Registro EEG occipital; (b) periodograma.
 La actividad alfa es clara en ambas representaciones.

La Fig. 6(a) corresponde a un EEG de . s a s tomado en la región occipital izquierda de un sujeto adulto. Note que el estudio en el tiempo no es fácil por la existencia de

otras señales superpuestas. El periodograma de la Fig. 6(b) aclara la situación; efectivamente, hay actividad alfa, sin embargo, se encuentra contaminada con una señal de 60 Hz cuyo origen es la inducción de la red eléctrica que alimenta el laboratorio.

La Fig. 7(a) es el periodograma modificado (L=8, M=256) de un registro EEG tomado en la región occipital izquierda de un sujeto adulto con ojos cerrados. Los porcentajes de potencia en las bandas de interés son,

- $\epsilon = 0.00 \%$
- $\delta = 34.81 \%$
- $\theta = 8.83 \%$
- $\alpha = 40.81 \%$
- $\beta = 15.55 \%$

Es decir, la actividad alfa es dominante.

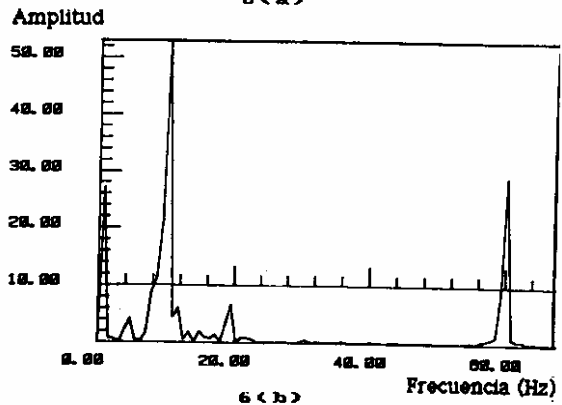
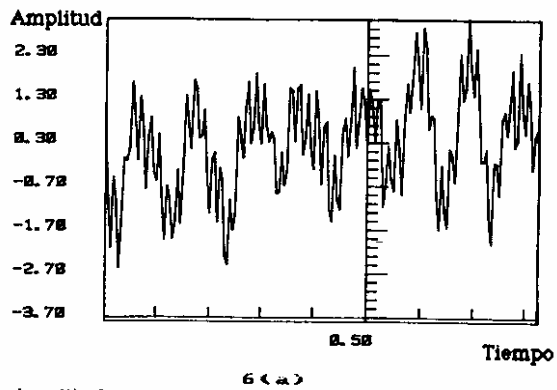


Fig. 6.- (a) Registro occipital contaminado;
 (b) Periodograma. El ruido de 60 Hz es propio de la red eléctrica del laboratorio.

En la Fig. 7(b) se tiene el periodograma modificado para el mismo sujeto, pero ahora se encuentra con ojos abiertos. Los porcentajes de potencia en cada banda son,

$\epsilon = 0.00 \%$
 $\delta = 46.69 \%$
 $\theta = 15.18 \%$
 $\alpha = 20.60 \%$
 $\beta = 17.63 \%$

Es notoria la disminución de actividad alfa y el incremento de delta.

3. DISCUSION

Los registros simulados y los reales han hecho evidente que el análisis en el tiempo es más sensible a interferencias que el periodograma. En el caso de la sinusoidal de amplitud unitaria contaminada con ruido, el registro no permite conclusión alguna, sin embargo, el periodograma recupera el pico en 10Hz.

Cuando hay segmentos de EEG libres de contaminación, su análisis por conteo de picos es verificado por el periodograma y adicionalmente este revela otros ritmos.

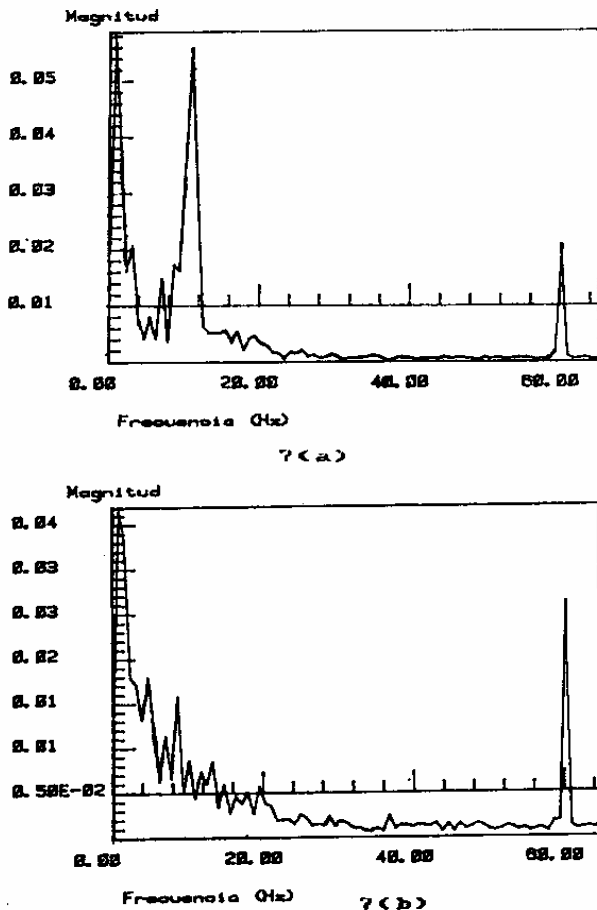


Fig.7.- (a) Periodograma modificado de un EEG occipital con ojos cerrados; (b) Periodograma similar al anterior pero con ojos abiertos.

El periodograma muestra el cambio en el contenido frecuencial del EEG al realizar la conmutación ojos cerrados - ojos abiertos, un hecho bien conocido. La Fig.8 resume en dos gráficas circulares la situación; la parte (a) con dominio de actividad delta corresponde a ojos abiertos, en (b) al cerrar los ojos la actividad alfa se duplica aproximadamente. Por tanto, vemos que el periodograma junto con el teorema de Parseval permiten cuantificar la alteración en los ritmos con un cambio del sistema monitoreado, algo complicado si se realiza en el tiempo.

Este método frecuencial se constituye en un complemento para los diagnósticos del neurofisiólogo, y también podrá utilizarse en investigaciones clínicas asociando los porcentajes de potencia en las bandas de interés con daños o perturbaciones del cerebro.

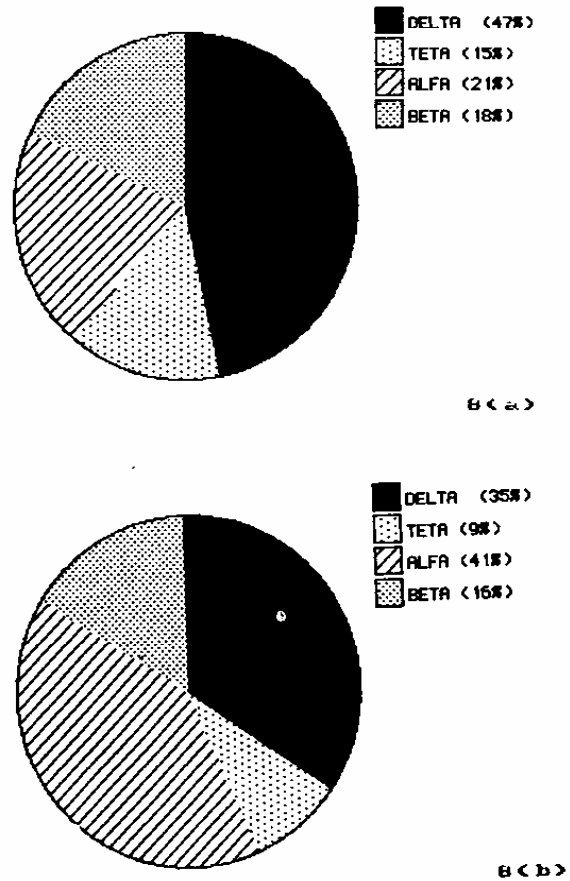


Fig.8.- Distribución de potencia de un EEG occipital; (a) ojos abiertos; (b) ojos cerrados. Note el cambio en los ritmos alfa y delta.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. El periodograma (modificado) se constituye en una técnica útil para el neurofisiólogo al señalar con mayor precisión el contenido frecuencial del EEG que los métodos en el tiempo.
2. El método frecuencial facilita la caracterización del EEG en porcentajes para cada banda, lo cual no es posible con el análisis temporal.
3. Para que esta técnica de análisis resulte aplicable es preciso implementar un sistema de adquisición y diagnóstico en tiempo real que involucre sistemas expertos.
4. la densidad espectral puede asociarse con múltiples patologías de forma similar a los compendios que existen [1], donde se relacionan estas con patrones en el tiempo.
5. Al realizar investigaciones clínicas con ayuda de la densidad espectral será necesario modificar las bandas de frecuencia conocidas e incrementar su número reduciendo el rango.

REFERENCIAS

- [1] Kilo, L. G., Mc Comas, A. J. y Osselson, J. W. : *Clinical Electroencephalography*, Butterworths, London, 1972.
- [2] Isaksson, A., Wennberg, A. y Zetterberg, L. H. : *Computer Analysis of EEG Signals with Parametric Models*, Proc. IEEE, vol. 69, Nº 4, pp. 451-461, Abril 1981.
- [3] Sciabassi, R. J. y Harper, R. M. : *Laboratory Computers in Neurophysiology*, Proc. IEEE, vol. 61, Nº 11, pp. 1602-1614, Noviembre 1973.
- [4] Demarre, D. A. y Michaels, D. : *Bioelectronic Measurements*, Prentice-Hall, New Jersey, Cap. 7, 1983.
- [5] Marple, S. L. : *Digital Spectral Analysis with Applications*, Prentice-Hall, New Jersey, 1987.
- [6] Brigham, E. O. : *The Fast Fourier Transform*, Prentice-Hall, New Jersey, 1974.
- [7] Cooley, J. W., Lewis, P.A.W. y Welch, P. D. : *The Fast Fourier Transform and its Applications*, IEEE Transactions on Education, vol. 12, Nº 1, pp. 27-34, Marzo 1969.

BIOGRAFIA

J. Alberto Delgado R. finaliza estudios universitarios en 1986, obteniendo el grado de Ingeniero Eléctrico. Posteriormente, 1988, termina el magister en el área de control y tratamiento de señales en la Universidad de los Andes. Desde Agosto de 1988 se desempeña como Instructor Asistente en el departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Nacional de Colombia.

Correspondencia : A.A. # 25268, Bogotá - Colombia.