

# Implementación de la Transformada Discreta Wavelet en un sistema embebido para el análisis de registros electronistagmográficos

Lucas Matías Angarola<sup>1</sup>, Maximiliano Fermín Córdoba<sup>2</sup>, Miguel Angel Banchieri<sup>3</sup>

Departamento Ingeniería Electrónica  
UTN Facultad Regional Bahía Blanca  
Bahía Blanca, Argentina

<sup>1</sup>lucasangarola@hotmail.com, {<sup>2</sup>mfcordoba, <sup>3</sup>mbanch}@frbb.utn.edu.ar

**Resumen**—En el presente trabajo se describe el diseño y desarrollo de un sistema embebido basado en un microcontrolador de 32 bits, cuyo objetivo es determinar si la patología vertiginosa que sufre un paciente se debe al Sistema Nervioso Central (SNC) o al aparato vestibular. El software desarrollado para efectuar el análisis implementa la Transformada Discreta Wavelet (DWT), a fin de poder determinar la energía de los detalles de registros electronistagmográficos. Los resultados fueron comparados con los obtenidos con el software Matlab 7.0 instalado en una computadora personal. Se observó que los valores relativos de energías fueran similares, con la ventaja de tener un sistema fácilmente portable. La importancia de este desarrollo radica en que el método tradicional para efectuar este diagnóstico está basado en la observación de los registros en papel por parte de un especialista experimentado.

**Transformada Discreta Wavelet; Multiresolución; Microcontrolador; Electronistagmografía.**

## I. INTRODUCCIÓN

El estudio del nistagmus<sup>1</sup> mediante el registro electronistagmográfico<sup>2</sup> permite determinar si la patología vertiginosa se debe al Sistema Nervioso Central (SNC) o al aparato vestibular.

Para realizar el estudio se emplea un sillón rotatorio automático y se registra simultáneamente el nistagmus de un ojo y el movimiento del sillón, Fig. 1. Al paciente se lo sienta en el sillón con los ojos tapados por un antifaz y con una inclinación cefálica de aproximadamente 30° hacia delante.

El registro se almacena asociado con un archivo de texto en el cual constan el análisis y el diagnóstico efectuado por el profesional.

Previo al estudio se efectúa el ajuste de ganancia del canal de adquisición del electronistagmógrafo con el paciente.

<sup>1</sup> Nistagmus: desviación conjugada de los ojos de origen reflejo y de carácter rítmico.

<sup>2</sup> Registro electronistagmográfico: gráfico que representa el trazado de las desviaciones conjugadas de los ojos



Fig. 1 Pantalla de presentación del registro electronistagmográfico. La señal con pendiente negativa es la excitación al sillón giratorio.

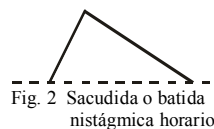


Fig. 2 Sacudida o batida nistágmica horario

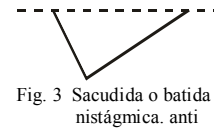


Fig. 3 Sacudida o batida nistágmica anti horario

Se hace girar el sillón junto con el paciente en sentido horario registrándose la respuesta del ojo y la excitación al sillón para que efectúe el giro. Luego se detiene el sillón y se continúa registrando la señal de nistagmus durante un lapso superior a los 30 segundos. El estudio se repite pero haciendo girar el sillón en sentido anti horario, Fig. 1.

Se analiza el registro de los primeros 30 segundos tanto sea cuando el sillón está girando como también cuando se detiene.

El profesional cuenta la cantidad de batidas, Figs. 2 y 3, dentro de los primeros 30 segundos del registro. Los criterios fijados para clasificar los distintos tipos de respuestas son:

Hiporreflexia: menos de 30 batidas en 30 segundos.

Estándar: entre 30 y 60 batidas en 30 segundos.

Hiperreflexia: más de 60 batidas en 30 segundos.

Analizando el registro electronistagmográfico, por medio de la Transformada Discreta Wavelet (DWT) [1], puede distinguirse si el paciente presenta una respuesta estándar o hiperreflexia.

El sistema embebido desarrollado tiene por objetivo analizar los registros electronistagmográficos utilizando la DWT.

Se compararon 32 registros correspondientes a 16 pacientes (rotación en sentido horario y anti horario) con respuesta estándar y ocho registros de 4 pacientes (rotación en sentido horario y anti horario) con respuesta hiperreflexia.

## II. FUNDAMENTOS

### A. Transformada Wavelet (WT)

El análisis por medio de la transformada wavelet consiste efectuar el análisis de la señal con ventanas variables [2], Fig. 4.

La WT permite aumentar la exactitud cuando se trabaja con bajas frecuencias al poder emplear intervalos de tiempo largos y mejorar también la exactitud a altas frecuencias al poder conformar ventanas más angostas.

Una wavelet es una “onda pequeña”, Fig. 5, la cual tiene su energía concentrada en el tiempo y es una herramienta para analizar transitorios, fenómenos no estacionarios o variantes en el tiempo. Tiene la oscilación característica de una onda permitiendo efectuar el análisis simultáneo en tiempo y frecuencia con fundamentos matemáticos flexibles.

### B. La Transformada Wavelet Discreta

En este trabajo se empleará la transformada wavelet discreta (DWT).

Dada una señal discreta  $S(n)$ , se define la DWT de la siguiente forma:

$$C(j, k) = \sum_{n \in \mathbb{Z}} S(n) \psi_{j, k}(n) \quad (1)$$

Donde 
$$\psi_{j, k}(n) = 2^{-\frac{j}{2}} \psi(2^{-j} n - k) \quad (2)$$

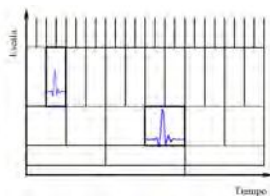


Fig. 4 Formas de las ventanas

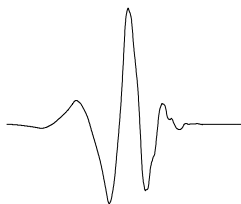


Fig. 5 Wavelet Daubechies 4

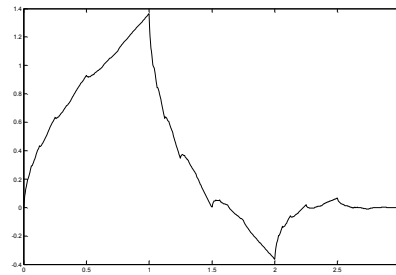


Fig. 6 Función escala Daubechies 4

Puede observarse que  $k$  representa un desplazamiento y  $j$  hace referencia al escalado de la función, Fig. 6.

La transformada inversa discreta se define como:

$$S(n) = \sum_{j \in \mathbb{Z}} \sum_{k \in \mathbb{Z}} C(j, k) \psi_{j, k}(n) \quad (3)$$

### C. Análisis Multiresolución

El concepto básico de multiresolución está dado por el cambio de escala de la función de la ventana conforme al avance de la misma sobre la señal.

Es posible implementarlo por medio de una serie de filtros pasa bajos y pasa altos, permitiendo cambiar la resolución de la señal por medio del filtro pasa bajos y la escala con el filtro pasa altos. Este método es conocido como codificación de sub-bandas.

Es importante mencionar que el escalado se realiza con una escala diádica ( $2, 4, 16, 32, \dots, 2^n$ ) debido a la facilidad que la misma representa al momento implementarlo en un sistema computacional.

Del filtro pasa bajos se tiene la función escalado  $h(n)$  y con el filtro pasa altos la función wavelet  $g(n)$  relacionada.

Al excitar simultáneamente con la señal  $S(n)$  a los filtros pasa bajos y pasa altos, se tendrá a la salida del filtro pasa bajos un vector denominado aproximación  $c_1$  de longitud  $n/2$  y a la salida del filtro pasa altos un vector denominado detalle  $d_1$  del mismo tamaño que el de las aproximaciones, Fig. 7. La resolución del tiempo se reduce a la mitad, pero se incrementa al doble la resolución en frecuencia.

Si se aplica el mismo procedimiento de doble filtrado a la aproximación  $c_1$  obtenida anteriormente, se tendrán dos vectores  $c_2$  y  $d_2$  de longitud  $n/4$ , reduciendo así la resolución temporal en cuatro veces e incrementando cuatro veces la resolución en frecuencia, Fig. 7.

Se continúa este proceso hasta que el vector resultante tenga longitud unitaria [3].

Por ejemplo, utilizando la escala diádica y una señal con 1024 muestras, se tendrán 10 niveles de descomposición; donde por cada iteración se reduce a la mitad el vector y la señal de entrada es la aproximación  $c$  anterior.

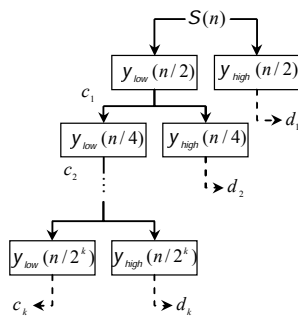


Fig. 7 Esquema del análisis multiresolución

Los coeficientes de la DWT son la concatenación de los detalles  $d$  empezando con el de mayor nivel. Es importante notar que el vector de coeficientes tiene la misma longitud que el vector de datos.

La función transferencia de ambos filtros está relacionada de la siguiente forma:

$$g(L-1-n) = (-1)^n h(n) \quad (4)$$

Donde  $L$  es la longitud del vector que contiene los coeficientes del filtro.

Para reconstruir la señal original se procede de forma inversa.

### III. IMPLEMENTACIÓN

#### A. Transformada Wavelet Discreta Directa e Inversa

Para lograr implementar la DWT en un microcontrolador, se trabajó sobre un entorno de programación de lenguaje C soportado por el sistema operativo Windows Vista, en una computadora personal con procesador dual-core.

El algoritmo se basó en una matriz cuadrada que contiene los coeficientes de los filtros pasa bajos y pasa altos, es decir de las funciones *escalado* y *wavelet* respectivamente.

De forma genérica, considerando filtros  $g(n)$  y  $h(n)$  de longitud  $L$ , se tendrá una matriz cuadrada de  $n \times n$ :

$$T = \left[ \begin{array}{l} \left. \begin{array}{l} h_k^{i,j}, g_k^{i+1,j}; \\ k=0,1,\dots,L-1; \\ i=0,2,4,\dots,n-L; \\ j=i,i+1,\dots,i+L-1; \end{array} \right\} \text{si } i \leq n-L \\ \left. \begin{array}{l} h_k^{i,j}, g_k^{i+1,j}; \\ k=0,1,\dots,L-1; \\ i=n-L+2, n-L+4, n-1; \\ \left\{ \begin{array}{l} j=i,i+1,\dots,n-1; \text{ si } k \leq L-1-i+n/2 \\ j=0,1,\dots,i-n/2-1; \text{ si } k > L-1-i+n/2 \end{array} \right. \end{array} \right\} \text{si } i > n-L \end{array} \right] \quad (5)$$

Donde  $i$  corresponde a la  $i$ -ésima columna y  $j$  a la  $j$ -ésima fila de la matriz.  $k$  es el número de coeficiente de los filtros cuya transferencia es  $g(n)$  y  $h(n)$ .

Dado un vector de señal  $S(n)$ , por cada iteración se realiza la siguiente operación:

$$V = T S \quad (6)$$

Donde  $V$  es el vector resultante que tiene igual longitud que el vector de entrada, pero está conformado con los coeficientes de detalles y aproximaciones.

De forma similar se puede hallar la matriz de transformación inversa calculando la matriz transpuesta de la matriz  $T$ . De esta forma se obtendrá la señal nuevamente mediante la iteración.

$$S = T^T V \quad (7)$$

#### B. Procedimiento del análisis

El procedimiento de análisis, que ha sido implementado con el software del sistema embebido, se encuentra detallado en [1]. Dicho procedimiento puede resumirse de la siguiente manera:

En primer lugar se adquiere un bloque de 256 muestras de la señal a analizar, a la cual se elimina el valor medio. Posteriormente se realiza el análisis con la DWT empleando la wavelet *Daubechies 4*. Del resultado del mismo se extrae la aproximación correspondiente al tercer nivel  $c_3$ . Esta aproximación se resta a la señal original, ya que se comprobó que contenía la mayor energía correspondiente a los *artefactos*<sup>3</sup> [1].

La señal resultante se analiza nuevamente con la DWT pero utilizando la wavelet *Daubechies 8*. Del mismo se obtienen los valores de las energías correspondientes a los detalles  $d_1$  a  $d_8$ .

De los estudios realizados se obtuvo que cuando el paciente presenta una respuesta estándar, la energía correspondiente al detalle  $d_3$  es mayor que la energía del detalle  $d_1$ . En cambio si la energía del detalle  $d_1$  es mayor que la del detalle  $d_3$ , el paciente presenta hiperreflexia.

#### C. Sistema Embebido

Una vez desarrolladas las rutinas para la obtención de la DWT en lenguaje C, se embebieron en el kit de desarrollo STM32VLDISCOVERY [4] [5], el cual está basado en un microcontrolador de la familia STM32F100 [6] [7]. El mismo posee comunicación USB para carga y depuración del software, contando además con conectores especiales de entrada/salida. Estas características, permitieron usar las herramientas necesarias para evaluar el prototipo, disminuyendo así el tiempo de depuración.

El microcontrolador cuenta con 128 KB de memoria flash, 8 KB de memoria RAM, su núcleo es de 32 bits, y una frecuencia máxima del procesador de 24 MHz con la cual logra una performance de 1,25 DMIPS/MHz. Además está provisto a nivel hardware de mecanismos de multiplicación y división de 32 bits.

<sup>3</sup> Energía que no forma parte de la respuesta fisiológica en las exploraciones objetivas, la cual debe ser controlada para que estas exploraciones alcancen su validez diagnóstica.

TABLA I. TIEMPOS DE EJECUCIÓN DE DIFERENTES OPERACIONES POR EL MICROCONTROLADOR

| Operación       | Ciclos de reloj | Tiempo de ejecución |
|-----------------|-----------------|---------------------|
| double * double | 83              | 3,45 $\mu$ s        |
| float * float   | 39              | 1,625 $\mu$ s       |
| int *int        | 3               | 0,125 $\mu$ s       |
| sin(float)      | 2291            | 95 $\mu$ s          |
| sin(double)     | 2359            | 98 $\mu$ s          |
| double / double | 162             | 6,75 $\mu$ s        |
| float / float   | 65              | 2,71 $\mu$ s        |

Se le incorporó al kit una pantalla LCD de 20x4 caracteres y 3 pulsadores, con el fin de lograr una interfaz amigable con el usuario.

El software de desarrollo utilizado es la versión KickStart del entorno de programación IAR Embedded Workbench EWARM. Se utilizaron las librerías matemáticas, de retardos y de hardware provistas de manera estándar para la familia STM32, habiéndose desarrollado librerías propias para el cálculo de la DWT. Para determinar el rendimiento del microcontrolador, se simuló diversas operaciones matemáticas con diferentes tipos de variables, a la máxima frecuencia del procesador, resultando los tiempos de ejecución presentados en la Tabla I.

#### IV. RESULTADOS

Una vez introducidas las funciones en el sistema embebido, se evaluó el tiempo de ejecución de las mismas. En la Tabla II se muestra una comparación de los tiempos de ejecución de las funciones en diferentes entornos.

Pese a que el tiempo de ejecución empleado por el sistema embebido es muy superior a los del Matlab y C, no es condicionante ya que es inferior a los tiempos de las señales analizadas.

Se compararon los resultados obtenidos con el sistema embebido con respecto a los obtenidos con la computadora personal empleando el software Matlab 7.0 y el programa desarrollado en lenguaje C. Para ello se introdujeron los datos provenientes de 16 pacientes, formando vectores de 256 valores cada uno. El sistema permite seleccionar los datos de entrada de uno de los pacientes y realizar el análisis por medio de la DWT. Finalizado el mismo, se graficó en pantalla un cuadro comparativo de los diferentes valores de energías normalizadas correspondientes a los detalles  $d_1$  a  $d_3$ , determinándose si los mismos corresponden a un paciente con respuesta estándar o hiperreflexia, Figs. 8 y 9.

Debido a que por medio del kit se puede ejecutar el programa paso por paso, y analizar el contenido de las variables internas, se realizó una comparación de los tiempos empleados por el microcontrolador con respecto al de la computadora personal. A modo de ejemplo en la Tabla III se muestran los valores de energías resultantes para ambos métodos, tomando el registro de un paciente.

TABLA II. TIEMPOS DE EJECUCIÓN DE FUNCIONES (ms)

| Función             | Matlab | C      | STM32F100 |
|---------------------|--------|--------|-----------|
| DWT                 | 2,776  | 0,1134 | 13,19     |
| IDWT <sup>4</sup>   | 3,835  | 0,0812 | 12,69     |
| Calculo de Energías | 0,763  | 0,0676 | 232,28    |

#### V. CONCLUSIÓN

Se logró embeber en un microcontrolador STM32F100, un algoritmo para calcular la DWT, con el fin de realizar evaluaciones a los registros electronistagmográficos para determinar si un paciente presenta respuesta estándar o hiperreflexia. Cabe destacar que los resultados obtenidos coincidieron con los efectuados en el trabajo original.

En el método tradicional el especialista debe ubicar visualmente los nistagmus y contarlos, siendo una tarea tediosa que se realiza para 4 registros a saber: horario, anti horario y los dos pos rotacionales.

El sistema embebido implementado facilita la tarea de análisis ya que podría realizarse el análisis con un operador avezado, bajo la supervisión de un especialista, redundando en un gran ahorro de tiempo y disminución de posibles errores.

#### VI. TRABAJOS FUTUROS

Es necesario ampliar la capacidad de memoria RAM, para aumentar la precisión y disminuir algunos tiempos de procesamiento. Para ello, podría utilizarse algún microcontrolador de las familias superiores en prestaciones a las de la STM32F100, como por ejemplo la STM32F105/7, cuyos modelos alcanzan los 64 KB.

Actualmente, a los fines de evaluar el desempeño del algoritmo, los datos de los pacientes son cargados en memoria de programa. Está previsto, a corto plazo, desarrollar la etapa de adquisición y muestreo, para obtener a través de los electrodos y amplificadores de instrumentación (con sus correspondientes etapas de filtrado), los biopotenciales de eventuales pacientes bajo estudio. La señal de salida de estos amplificadores deberá ser muestreada por los conversores A/D propios del microcontrolador, para graficar el nistagmus y realizar su posterior análisis.

TABLA III. ERROR EN EL CALCULO DE ENERGIAS

| Detalles | Energía [%] |            | Error                  |
|----------|-------------|------------|------------------------|
|          | Matlab      | STM32F100  |                        |
| 1        | 18,1662707  | 18,1662731 | 13,2x10 <sup>-6</sup>  |
| 2        | 31,6045396  | 31,6045417 | 6,64x10 <sup>-6</sup>  |
| 3        | 45,9653118  | 45,9653015 | -22,4x10 <sup>-6</sup> |
| 4        | 4,21554877  | 4,21554946 | 16,3x10 <sup>-6</sup>  |
| 5        | 0,04823088  | 0,04823096 | 165,8x10 <sup>-6</sup> |
| 6        | 0,00005335  | 0,00005335 | 0,000                  |
| 7        | 0,00004472  | 0,00004473 | 0,022                  |
| 8        | 0,00000006  | 0,00000006 | 0,000                  |

<sup>4</sup> Transformada Wavelet Discreta Inversa

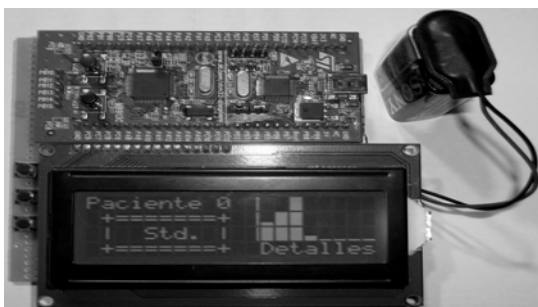


Fig. 8 Se observa el kit empleado con la pantalla incorporada en la cual puede verse como es la presentación de un análisis con respuesta estándar

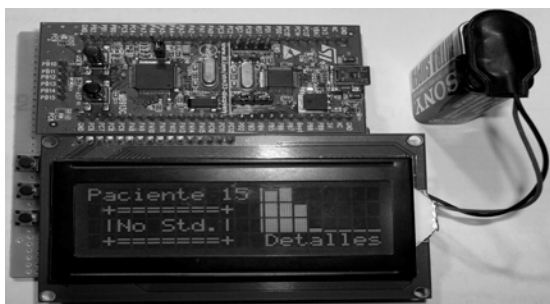


Fig. 9 En esta imagen se puede apreciar la respuesta de un paciente con hiperreflexia.

#### REFERENCIAS

- [1] Banchieri M.A., "Evaluación de registros electronistagmográficos empleando la transformada wavelet", Universidad Favaloro, 2008.
- [2] Amara Graps, "An Introduction to Wavelets", Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, 1995.
- [3] Castro Fernandez.R, "Análisis de la teoría de ondas orientada a las aplicaciones en ingeniería eléctrica: Fundamentos", E.T.S.I. Industriales – Dto. Ingeniería Eléctrica, 2002.
- [4] AN3268 Application Note, STM32VLDISCOVERY firmware package, 2010.
- [5] UM0919 User Manual, STM32VLDISCOVERY, 2010. Datasheet STM32F100x, 2010.
- [6] Datasheet STM32F100x, 2010.
- [7] RM0041 Reference Manual, STM32F100XX advanced ARM-based 32-bit MCUs.