

## CARACTERIZACIÓN DE SEÑALES NO ESTACIONARIAS EMPLEANDO DISTRIBUCIÓN WIGNER VILLE EN EL RECONOCIMIENTO DE ZONAS CEREBRALES

### RESUMEN

Las representaciones en los espacios conjuntos de tiempo y frecuencia han demostrado ser efectivas en tareas de caracterización de señales no estacionarias. En este trabajo se emplea la distribución Wigner Ville (WVD), como herramienta de representación en el espacio tiempo-frecuencia de señales de microelectrodos de registro (MER), para el reconocimiento de zonas cerebrales. Con el fin de reducir el costo computacional, se implementa una etapa de preproceso en la que se filtra y se aplica sub-muestreo a la señal.

**PALABRAS CLAVES:** Representación tiempo-frecuencia, extracción de características, Distribución Wigner-Ville, Señales MER.

### ABSTRACT

*Joint Time-Frequency representations have shown to be effective in non-stationary signals characterization tasks. In this paper, the Wigner-Ville distribution is employed as a representation tool in time-frequency space of Micro-Electrode Recordings (MER), to recognize brain regions. In order to minimize computational cost, a pre-process stage is applied to the signal, filtering and sub sampling it.*

**KEYWORDS:** Time-frequency representation, feature extraction, Wigner-Ville distribution, MER Signals.

### 1. INTRODUCCIÓN

A pesar de lo importante que ha sido el análisis en el dominio temporal de señales aleatorias, el análisis espectral sigue siendo de fundamental importancia en el análisis de procesos lineales y estacionarios. Entre las razones que existen para sostener esta afirmación, se encuentra el importante papel que juega la descomposición espectral en el filtrado de señales y remoción de perturbaciones, así como el empleo que se hace del espectro al ser base o punto de partida en el análisis temporal [1].

En muchas ocasiones se supone la estacionariedad de los procesos con el fin de simplificar su análisis, pero en muchos otros casos, la naturaleza y los principios físicos de las señales demandan un estudio no-estacionario. Tal es el caso en señales acústicas, de voz, geofísicas, biológicas, fisiológicas, etc. De todas formas no se puede calcular el espectro de un proceso no-estacionario mediante técnicas de estimación ordinarias, son necesarias herramientas matemáticas, tales como la representación en el espacio tiempo-frecuencia [2].

La STFT (Short Time Fourier Transform) y la CWT (Continuous Wavelet Transform) han sido herramientas bastante importantes y ampliamente utilizadas en el procesamiento de señales, ya que entregan una interpretación del *espectro local* de una señal en la vecindad de un tiempo  $t$ . Dentro de las grandes ventajas de estas transformadas se cuentan la facilidad de

### JULIAN DAVID ECHEVERRY

Ingeniero Electrónico  
Profesor Catedrático.  
Universidad Tecnológica de Pereira  
jdec@ohm.utp.edu.co

### JORGE EDUARDO CALLE

Ingeniero Electricista  
Profesor Titular  
Universidad Tecnológica de Pereira  
ject@utp.edu.co

### ENRIQUE GUIJARRO E.

PhD en Ingeniería.  
Grupo de Bioelectrónica.  
Universidad Politécnica de  
Valencia, España.  
eguijarro@eln.upv.es

implementación y la eficiencia computacional de sus algoritmos; pero por otra parte, estas transformadas no entregan información acerca de la energía instantánea de una señal en un instante de tiempo específico [3].

En el reconocimiento de zonas cerebrales mediante señales MER, determinar la energía en un intervalo de tiempo puede aportar información acerca del período de ocurrencia de los potenciales de acción, los cuales en definitiva, son los que caracterizan la zona cerebral de la que proviene la señal [4].

La transformada Wigner-Ville (o distribución W-V) aparece entonces como una herramienta de utilidad potencial, ya que permite determinar la energía de una señal en un intervalo  $(t-\tau/2, t+\tau/2)$  centrado en un tiempo  $t$ .

### 2. REPRESENTACIÓN CONJUNTA DE SEÑALES EN EL ESPACIO TIEMPO-FRECUENCIA

Existen transformaciones que ofrecen una representación conjunta en el espacio  $t$ - $f$ , tales como la STFT y la CWT. Estas son transformaciones lineales, ya que satisfacen el teorema de la superposición [3]:

$$T[\alpha_1 f_1 + \alpha_2 f_2] = \alpha_1 T[f_1] + \alpha_2 T[f_2] \quad (2.1)$$

donde  $T$  representa cualquiera de las dos transformaciones y  $f_1$  y  $f_2$  son dos señales diferentes con coeficientes  $\alpha_1$  y  $\alpha_2$  respectivamente.

Estas transformadas no entregan información acerca de la energía instantánea de la señal en un tiempo específico  $t$ . Para lograr esto se podría pensar en una transformada del tipo

$$\int_{-\infty}^{\infty} |f(\tau - t)|^2 e^{-j\omega\tau} d\tau = \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau - t) \overline{f(\tau - t)} e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (2.2)$$

Pero aun así, sigue siendo difícil determinar la energía de una señal en un tiempo dado  $t$  (principio de incertidumbre). Resulta más coherente considerar la energía dentro de un intervalo  $(t - \tau/2, t + \tau/2)$  centrado alrededor del tiempo  $t$ . En este sentido, Ville [5] replanteó la teoría de Eugene Wigner, aplicada en física cuántica, para describir la distribución de la energía de una señal en el plano  $t$ - $f$ .

### 2.1. DISTRIBUCIÓN WIGNER VILLE (WVD)

La WVD se define como

$$W_f(t, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f\left(t + \frac{\tau}{2}\right) \overline{f\left(t - \frac{\tau}{2}\right)} e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (2.3)$$

Esta distribución es de tipo no lineal (o bilineal), ya que analizando la ecuación (2.3) se puede ver que las señales son integradas en más de una ocasión, de manera que no se cumple el teorema de la superposición (2.1).

Vista de otra forma, la WVD se expresa como la transformada de Fourier de la autocorrelación de la señal  $f(t)$ , la cual tiene simetría con respecto a  $\tau$  (simetría Hermitiana) [6].

Aparte de la no linealidad las propiedades de esta distribución son [7]:

- *Conservación de la energía:* La energía de la señal  $f(t)$  se obtiene al integrar la WVD en todo el espacio  $t$ - $f$ .

$$E_f = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} W_f(t, \omega) dt d\omega \quad (2.4)$$

- *Propiedades marginales:* La densidad espectral de energía y la potencia instantánea se pueden obtener como las distribuciones marginales de  $W_f$ .

$$\int_{-\infty}^{\infty} W_f(t, \omega) dt = |F(\omega)|^2 \quad (2.5)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} W_f(t, \omega) d\omega = |f(t)|^2$$

- *Negatividad:* El espectro de la distribución WV toma siempre valores reales. Estos valores bien pueden ser negativos, por lo que la WVD no se define como una función de densidad.

- *Covarianza en la traslación:* La WVD es covariante en tiempo y frecuencia. Sea  $g(t)$  igual a una función  $f(t)$  desplazada en tiempo o frecuencia, se tiene que

$$g(t) = f(t - t_0) \Rightarrow W_g(t, \omega) = W_f(t - t_0, \omega) \quad (2.6)$$

$$g(t) = f(t) e^{j2\pi\omega_0 t} \Rightarrow W_g(t, \omega) = W_f(t, \omega - \omega_0)$$

En el caso de una señal discreta  $f(n)$ , la Pseudo-WVD discreta se evalúa usando una ventana simétrica y de longitud finita  $h(\tau)$  [8].

$$W_{fh}(n, k) = 2 \sum_{\tau=-L}^L f(n + \tau) \overline{f(n - \tau)} \times \quad (2.7)$$

$$\times h(\tau) \overline{h(\tau)} e^{-j4\pi k\tau / N}$$

Siendo  $h(\tau)$  la función de ventaneo que satisface la condición

$$h(\tau) = 0; \quad |\tau| > L \quad (2.8)$$

Las variables  $n$  y  $k$  corresponden a las variables discretas de tiempo y frecuencia respectivamente.

### 3. RECONOCIMIENTO DE REGIONES CEREBRALES

El estudio de señales provenientes de microelectrodos de registro cerebral (MER) se ha convertido en un tópico de interés especial en el campo de la neurociencia en el sentido que la información extraída de estas señales es utilizada en el tratamiento de trastornos neurológicos como el Parkinsonismo y Alzheimer [9], en donde se hace necesario ubicar zonas específicas del cerebro para llevar a cabo procedimientos como ablación, estimulación o inserción de células con el fin de reducir o eliminar los síntomas de estas disfunciones.

Las señales MER se caracterizan por contener potenciales de acción, o espigas, de diferentes regiones que rodean al microelectrodo [10], siendo la zona de mayor actividad la que determina la ubicación del mismo. La caracterización de señales MER se convierte entonces, en una herramienta indispensable para el reconocimiento de la región cerebral de interés.

#### 4. PROCEDIMIENTO

En este trabajo se caracterizan señales pertenecientes a dos zonas cerebrales (tálamo y subtálamo) mediante la distribución Wigner-Ville. La base de datos pertenece al Grupo de Bioelectrónica de la Universidad Politécnica de Valencia <sup>1</sup>.

En la figura 1 se muestran señales de ambas zonas cerebrales.

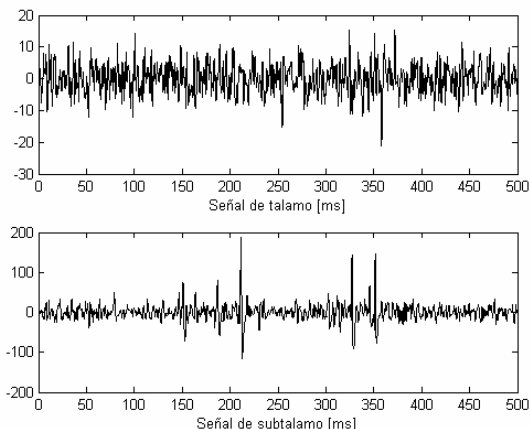


Figura 1. Arriba, señal de tálamo. Abajo, señal de subtálamo.

##### 4.1 PREPROCESO DE LAS SEÑALES

Con el fin de minimizar el costo computacional del cálculo de la WVD, se optó por tomar de cada grabación de 10 segundos, algo menos que la décima parte, aproximadamente 0,8 segundos por señal de análisis. De acuerdo con [11] un segmento de 0,5 segundos de duración puede representar bastante bien las características de la estructura neuronal de donde fue grabado, lo cual cabe perfectamente dentro de la segmentación que se propone. De forma adicional se submuestreó la señal original; esto con el fin de tener mayor cantidad de potenciales de acción o espigas de la señal en un número determinado de muestras. El factor de submuestreo fue de 3, garantizando que no hubiera pérdida de información en la señal.

Se filtró la señal por medio de un filtro elíptico de segundo orden, con el fin de atenuar la actividad remanente de diferentes regiones diferentes a la región en estudio [12].

##### 4.2 PROCESO DE LAS SEÑALES

Se obtuvo entonces la transformada Wigner-Ville de cada segmento de las señales por medio de la ecuación (2.3).

El plano tiempo-frecuencia que se obtuvo como resultado de la transformación sobre una señal de la región del tálamo es el mostrado en la figura 2.

En la figura 3 se aprecia una proyección tridimensional del mismo.

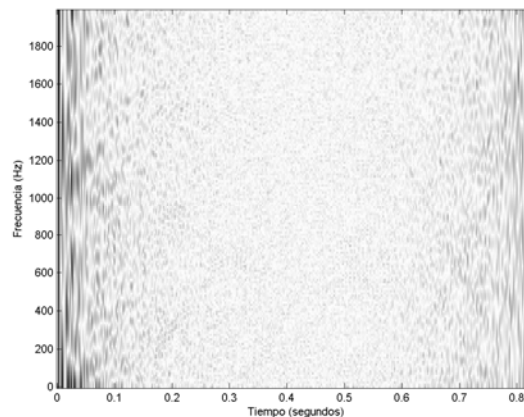


Figura 2. Distribución Wigner-Ville de señal de tálamo.

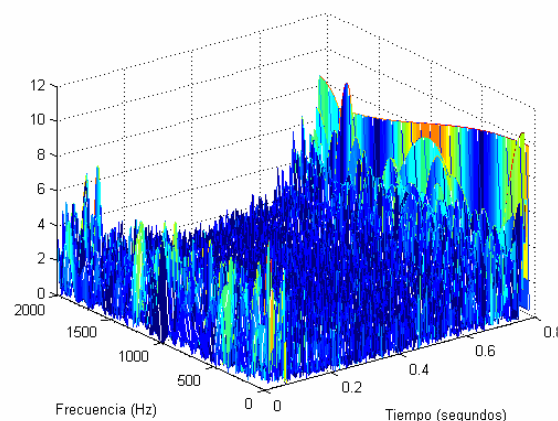


Figura 3. Proyección 3-D de la WVD sobre la región tálamo.

Para la región de subtálamo, se obtuvo el plano que se ve en la figura 4. La densidad espectral de la energía es más concentrada. En la figura 5 puede verse una proyección tridimensional del mismo plano.

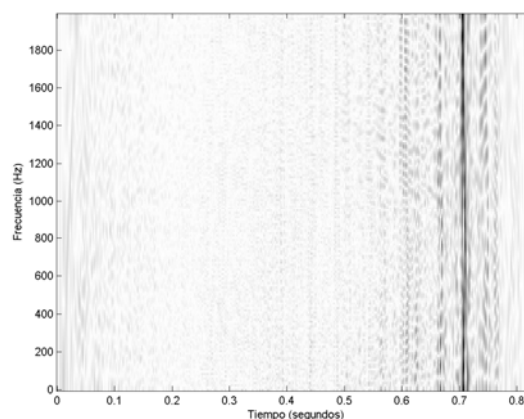


Figura 4. Distribución Wigner-Ville de señal de subtálamo.

1. La base de datos aparece etiquetada como Paciente 1012, Try 1.

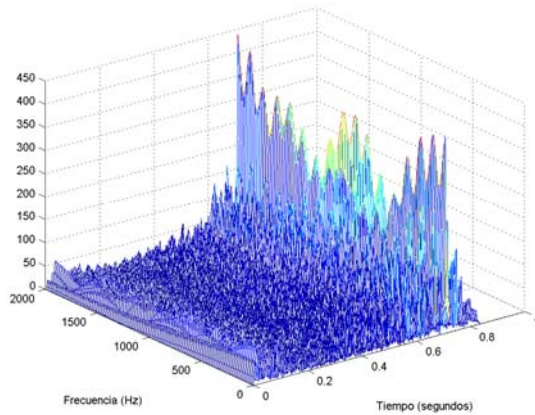


Figura 5. Proyección 3-D de la WVD sobre la región subtálamo.

## 5. RESULTADOS

Estando la WVD calculada sobre las señales de ambas regiones (20 de la región tálamo y 24 de la región subtálamo), se extrajeron de estas distribuciones, parámetros estadísticos y de información que permitieran su completa caracterización.

Con el fin de comprobar el reconocimiento de zonas cerebrales, se aplicó el algoritmo de *leave-one-out* en la tarea de clasificación. Fueron empleados varios clasificadores con el fin de evaluar el proceso de caracterización.

La Tabla 1 muestra los resultados de la clasificación. En las columnas (las cuales representan las regiones) se muestran los aciertos que tuvo el algoritmo al clasificar señales de la misma región cerebral. El rendimiento del algoritmo se calcula como el porcentaje del total de muestras que han sido clasificadas correctamente.

<i>Patrón de medida</i>	<b>Región tálamo</b>	<b>Región subtálamo</b>	<b>Rendimiento (%)</b>
Media	20	24	99,9
Máximo	19	21	90,9
Mediana	20	24	99,9
Varianza	19	23	95,45
Covarianza	18	21	90,69
Entropía (Shannon)	19	24	97,7
Entropía (Log Energy)	20	24	99,9

Tabla 1. Resultado de la clasificación.

Los parámetros de medida de la Tabla 1 han sido calculados sobre las columnas de la WVD de cada señal, o mejor dicho, sobre cada instante de tiempo de la representación tiempo-frecuencia.

## 6. CONCLUSIONES

La distribución Wigner-Ville es bastante efectiva en la descomposición tiempo-frecuencia de señales no estacionarias; su resolución es mayor comparada a la resolución entregada por técnicas lineales como la STFT, lo que permite una mejor localización de la energía en el espacio  $t-f$ .

Debido a que la WVD toma solamente valores reales, permite una mejor interpretación de los datos. Las distribuciones muestran claramente las componentes energéticas que caracterizan cada señal de las regiones cerebrales analizadas.

La región subtálamo presenta una concentración mayor de energía en los instantes en que ocurren los potenciales de acción; estos potenciales son más definidos en esta región que en el tálamo, lo que a su vez permite que sean caracterizados con mayor precisión por la WVD.

Los patrones calculados sobre la distribución WV permiten al clasificador reconocer acertadamente la zona cerebral; el rendimiento de éste fue alto, cerca del 100% para la mayoría de los patrones. No fue necesario el uso de una matriz con varios patrones o características. Bastó con un solo patrón, para que el reconocimiento de las zonas fuera totalmente exacto.

Los términos cruzados, producto de la bilinealidad de la WVD, pueden ser removidos empleando ventanas suavizantes. Este método, conocido como PSWVD (Pseudo Smoothed WVD), se aplicaría en procesos donde estos causen mala interpretación de la información.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] JAFFARD, Stéphane. *Wavelets: Tools for Science & Technology*, Primera edición, 253 páginas, Siam, Philadelphia, 2001.
- [2] MARTIN, Wolfgang & FLANDRIN, Patrick. *Wigner-Ville Spectral Analysis of Nonstationary Processes*, IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing. Vol. ASSP-33, No. 6, Diciembre, 1985.
- [3] GOSWAMI, Jaideva & CHAN, Andrew. *Fundamentals of Wavelets*, Primera edición, 301 páginas, Wiley, Texas, 1999.
- [4] DAYAN, Meter & ABBOTT, L.F. *Theoretical Neuroscience*, Primera edición, 439 páginas, MIT Press, 2001.

- [5] VILLE, J. Théorie et Applications de la Notion de Signal Analytique, Câbles et Transmissions, Laboratoire de Télécommunications de la Société Alsacienne de Construction Mécanique, 1948.
- [6] MALLAT, Stéphane. A Wavelet Tour of Signal Processing, Segunda Edición, 629 páginas, Academic Press, 1999.
- [7] DEBNATH, Lokenath. Wavelet Transforms and Their Applications, Primera Edición, 555 páginas, Birkhauser, 2002.
- [8] LEONOWICZ, Z. & LOBOS, T. & REZMER, J. Spectrum Estimation of Non-Stationary Signals in Power Systems, International Conference on Power Systems Transients – IPST 2003, New Orleans, 2003.
- [9] SCHIFF, S. & DUNAGAN, B. & WORTH, R. Failure of single-unit neuronal activity to differentiate globus pallidus internus and externus in parkinson disease, Journal of Neurosurgery, No. 97, pp. 119-128, 2002.
- [10] LEWICKI, M. A review of methods for spike sorting: the detection and classification of neural potentials. Comput. Neural Syst. Vol. 9, pp. 53-78, 1994.
- [11] FALKENBERG, J.H. & McNAMES, J. & ABOY, M. & BURCHIEL, K.J. Segmentation of Extracellular Microelectrode Recordings with Equal Power, pp. 2475-2478, Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology - Proceedings, 2003.
- [12] QUIROGA, Rodrigo. Unsupervised Spike Detection and Sorting with Wavelets and Superparamagnetic Clustering, Neural Computation, Vol. 6, pp. 1681-1687, MIT, 2004.