

# MEDICIÓN Y PROCESAMIENTO DE SEÑALES PARA LA DETECCIÓN DE ANOMA-LÍAS DE CAMPO MAGNÉTICO DE MUY BAJAS FRECUENCIAS

L. M. Carducci<sup>1\*</sup>, F. Luna<sup>1</sup>, R. Alonso<sup>1</sup>, J. Julio<sup>1</sup>, E. Zothner<sup>1</sup>, W.G. Fano<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ingeniería, Bs.As. Argentina.

\*e-mail: <u>lcarducci@fi.uba.ar</u>

## **ABSTRACT**

Measurements of very low electromagnétic frequencies, such as the detection of Schumann resonances and other artificial frequencies such as 50 Hz interference from the high-voltage lines of the public electric power network were achieved with a high sensitivity magnetic field measurement system, with sensitivity in the order of pico Tesla, covering a range of frequencies from 0.01 to 50 Hz approximately. With this system, electromagnetic anomalies in this frequency band can be studied and linked with other phenomena of interest, such as: seismic precursors, neuronal activity, solar activity, geomagnetic activity, among other phenomena. From the measured signals, it has been possible to detect the first six Schumann resonances harmonics due to the earth-ionosphere resonator, produced by the electrostatic discharges on the planet. The results analysis was improved with different processing techniques on the measured data. It is possible to visualize the level variations of the signal sensed, significantly reducing the presence of noise through different types of digital processing, including also the automatic detection of Schumann resonances and their evolution over time.

**Keywords**: Natural signals, Schumann Resonance, Digital processing, Magnetic Field, Seismic precursors.

## RESUMEN

A partir de la construcción de un sistema de mediciones de campo magnético de alta sensibilidad, en el orden de los pico Tesla, que abarca un rango de frecuencias en la banda de 0.01 a 50 Hz aproximadamente, se han explorado las señales de origen natural de muy bajas frecuencias, como la detección de las resonancias de Schumann y otras como las interferencias de 50 Hz provenientes de las líneas de alta tensión de la red pública de energía eléctrica. Con esta plataforma es posible estudiar diferentes anomalías electromagnéticas en ese rango de frecuencias y vincularlas con otros fenómenos de interés, tales como: precursores sísmicos, actividad neuronal, actividad solar, actividad geomagnética, entre otros fenómenos. En este trabajo se han podido detectar las seis primeras resonancias de Schumann, debidas al resonador Tierra-ionósfera producidas por las descargas electrostáticas en el planeta. Asimismo se ha mejorado el análisis de los resultados mediante distintas técnicas de procesamiento sobre los datos de las mediciones registradas durante varias horas, incluyendo también la detección automática de las resonancias de Schumann y su evolución en el tiempo.

**Palabras Clave:** Señales de origen natural, Resonancia de Schumann, Procesamiento digital, Campo magnético, Precursores sísmicos.

# 1. Introducción

En los últimos dos siglos la humanidad ha alcanzado un gran conocimiento acerca de diversos fenómenos físicos vinculados al electromagnetismo . En particular el uso de ondas electromagnéticas ha formado parte de numerosos avances tecnológicos. No obstante, en el planeta es permanente la presencia de ondas electromagnéticas de origen natural con diferentes intensidades y longitudes de onda, como: infrarrojo, ultravioleta, rayos X, rayos gamma, campos de origen geomagnético, entre otras. Éstas podrían llegar a contener información muy valiosa vinculada a otros tipos de fenómenos de interés para la humanidad y el medio ambiente. Como ejemplo pueden mencionarse algunas evidencias de anomalías electromagnéticas de frecuencias significativamente bajas (0,01-100 Hz) debido a emisiones producidas durante movimientos tectónicos, estudiadas como posibles precursores sísmicos (Ikeya, M., 2004). Por otra parte, también puede



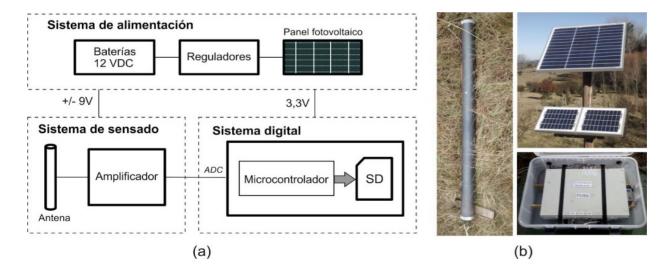
mencionarse el fenómeno conocido como resonancia de Schumann, del cual se han publicado trabajos donde se describe su vinculación con el cambio climático, actividad neuronal, etc.

En el presente trabajo, se busca contribuir al estudio de estas anomalías de bajas frecuencias a partir de los datos recogidos en una estación de medición desarrollada específicamente para este propósito. Se aplicaron dos técnicas de procesamiento con las que se obtuvo una mejor estimación de las señales y parámetros de interés tomando como ejemplo las resonancias de Schumann.

## 2. Resonancias de schumann

En 1952, Winfried Otto Schumann postuló la existencia de las Resonancias al considerar a la superficie de la Tierra y a la ionósfera como dos esferas concéntricas que en bajas frecuencias se comportan como conductores eléctricos formando una cavidad resonante esférica en el sistema Tierra-ionósfera, cuyas frecuencias de resonancia poseen una longitud de onda del orden del radio de la Tierra, es decir, de frecuencias extremadamente bajas (Schlegel K., Füllekrug, 2002; Maffia et al, 2011). La ionósfera es formalmente un plasma ionizado, y la cantidad de iones que se forman dependerá de la energía que recibe la atmósfera de la Tierra, particularmente de las rayos de alta energía como los rayos UV, X y gamma. Las descargas eléctricas atmosféricas que se producen con los rayos, que son pulsos de corrientes extremadamente altos, son las que excitan esta cavidad, formando las resonancias que podrán medirse mediante instrumentos de alta sensibilidad en bajas frecuencias (Volland, 1984). En la Tierra se producen alrededor de 50 rayos por segundo, cuya descomposición espectral posee armónicos que contienen algunas de las frecuencias que puedan excitar la cavidad. Las principales fuentes de descargas eléctricas de excitación se localizan principalmente en América Central, América del Sur, África y el Este de Asia. Las primeras mediciones experimentales de la potencia espectral de ruido detectado en frecuencias extremadamente bajas, donde se pueden observar las resonancias de Schumann, han sido obtenidas por Balzer y Wagner en 1960 (Balzer, Wagner, 1960). Desde ese momento los científicos han descubierto que las variaciones en la Resonancias de Schumann corresponden a cambios de estación, actividad solar, actividad en el campo magnético ambiental y los fenómenos ligados a la Tierra.

$$fi = 5.8\sqrt{l(l+1)}$$
 con  $l = 1,2,3....$  (1)



**Figura 1**. (a) Diagrama en bloques del "Monitor de Precursores sísmicos". (b) Imágenes del equipo instalado en zona de sierras, Villa Alpina Córdoba.



Las frecuencias de resonancia de Schumann se pueden calcular mediante la ecuación (1) (Maffia et al, 2011).

## 3. Estación de medición

Una de las características de este sistema de medición es que opera en las bandas TLF, ELF y SLF (rango de interés 0.01-50 Hz) y permite registrar las señales de manera ininterrumpida en un dispositivo de almacenamiento externo (memoria SD) durante periodos prolongados de tiempo. En la Figura 1 se muestra un diagrama simplificado de la estación de medición utilizada.

Para este primer prototipo, se ha optado por censar las señales de bajas frecuencias en una sola dimensión espacial con una antena conformada por una bobina tipo solenoide de 96000 vueltas, con núcleo de hierro dulce, una inductancia de 2500 H y resistencia serie de 16.7 k $\Omega$ . El campo censado por la antena es amplificado por una etapa analógica compuesta de un amplificador de alta ganancia y bajo ruido, ya que las señales que se pretenden detectar son de muy baja intensidad. Por otro lado, se incluye también una etapa digital donde se muestrea la señal analógica proveniente del amplificador a una tasa de 100 sps y almacenada luego en la memoria externa. Por otra parte, el sistema de alimentación que le otorga la autonomía energética, está conformado por un banco de baterías de 12 V (de 7 Ah), reguladores de tensión para las etapas digital (3.3 V) y analógica (+/- 9 V) y dos paneles fotovoltaicos que suministran la energía solar para la recarga de las baterías.

#### 4. Resultados

Los datos extraídos de la estación de censado para este trabajo fueron obtenidos en la localidad de VillaAlpina, Córdoba, Argentina, en una zona de sierras despoblada. De las mediciones registradas se han detectado las primeras seis resonancias de Schumann. Para ello, se calculó la densidad espectral de potencia S (k) (periodograma) de la señal digitalizada x (n) a partir de la transformada rápida de Fourier (FFT) mediante el estimador  $S(k) = 1/n |X(k)|^2$ , donde  $X(k) = FFT\{x(n)\}_N$  y N el largo de la señal. Sin embargo, con este estimador de la densidad espectral no es posible identificar con claridad las resonancias de Schumann, ya que éstas son de muy baja intensidad y quedan enmascaradas debido a la alta varianza espectral presente en . Por lo tanto, se ha realizado un procesamiento digital adicional aplicando dos etapas de refinamiento sobre el periodograma computado originalmente. La primera consiste en hacer una partición de la señal en múltiples segmentos más cortos (donde i, es el número de segmento) para luego promediar los periodogramas de cada segmento. En la segunda etapa se computa, un promedio móvil ponderado mediante la convolución directa en el dominio de la frecuencia.

# 4.1 Refinamiento por segmentación

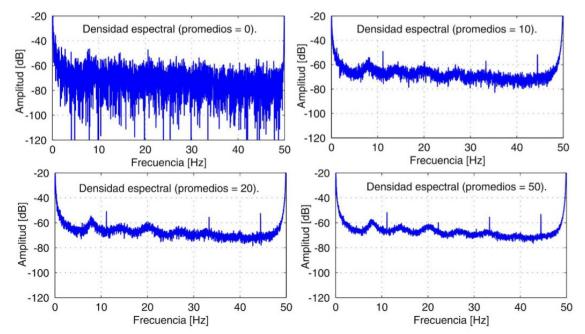
Utilizando el periodograma, calculado a partir del segmento (para segmentos sin solapamiento) puede reducirse significativamente la varianza de la densidad espectral empleando la ecuación 2, también conocido como método de Bartlett (Sornmo, L $_{D(k)} = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^{L} S_i(k)$ .....de de la cantidad L de segmentos utilizados.

Como se puede apreciar en la Figura 2, además del periodograma original (sin promedio), se han considerado los casos L=10, 20 y 50 segmentos de 1 minuto cada uno, observando que la varianza espectral se reduce notablemente, pudiendo apreciar más claramente las diferentes resonancias de Schumann, conforme se incrementa el número L de segmentos, además de otras interferencias. No obstante, un elevado valor de L implicaría también una pérdida de resolución temporal, ya que mayor cantidad de segmentos implican tomar un intervalo de tiempo de señal también mayor, pudiendo perder así la estacionariedad para el cómputo de D(k).

# 4.2 Refinamiento por convolución

Si bien la primera técnica de refinamiento ha mejorado notablemente la estimación del espectro, aún existe





**Figura 2**. Estimación de la densidad espectral de potencia aplicando el método de Bartlett para los casos: periodograma original, L = 10, L = 20, L = 50

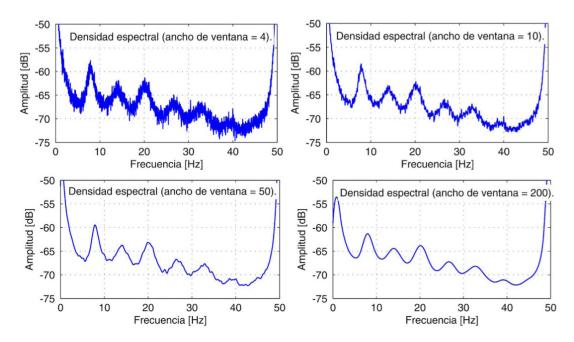
un nivel significativo de varianza que sería deseable mitigar, pero que sin embargo no sería conveniente hacerlo incrementando demasiado el valor de L. Por consiguiente, se puede computar el refinamiento por convolución de mediante la  $P(k) = \sum_{j=0}^{M-1} D(k-j)W(j)$  elegido una ventana tipo Hamming de largo M.

En la Figura 3, se pueden observar los resultados para distintos largos, en particular M = 4, 10, 50 y 200, observándose una importante mejora en la reducción de la varianza espectral. No obstante, aumentar demasiado el valor de M implicaría una pérdida de resolución espectral pudiendo distorsionarse o eliminarse por completo las componentes espectrales de interés. Por esta razón las dos técnicas son necesarias y complementarias ya que permiten optimizar los trade-off propios de cada una.

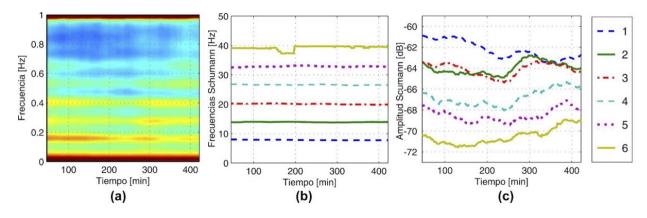
Finalmente, utilizando las técnicas mencionadas anteriormente, se computó el periodograma para distintos instantes de tiempo utilizando una de las señales registradas cuya duración es de 6 horas y 18 minutos (12:27 pm - 18:45 pm), hora de Córdoba. En la Figura 4 (a), se puede apreciar el espectrograma computado con incrementos de tiempo en pasos de 2 minutos, aplicando L = 30 segmentos de 1 minuto cada uno para computar D ( k ) y un largo M = 200 para el refinamiento por convolución de P ( k ), el cual puede definirse en función del tiempo n como y la frecuencia f como: P n ( f ). Allí pueden visualizarse claramente las resonancias de Schumann, en particular las tres primeras, aunque también se logran percibir hasta la sexta. Por otra parte, para cada periodograma P n ( f ), la reducción de la varianza en el espectro permitió detectar con relativa facilidad tanto las frecuencias de Schumann como sus intensidades, según se muestra en las Figuras 4 (b) y (c), pudiendo además apreciar la evolución en el tiempo de estos parámetros asociados al fenómeno de Schumann.

De la ecuación 1, se pueden calcular las frecuencias de Schumann teóricas y compararlas con las componentes detectadas correspondientes a la Figura 4 (b), calculando para éstas la media e incertidumbre (estimada como dos veces el desvío), obteniendo los resultados indicados en la Tabla 1.





**Figura 3**. Estimación de la densidad espectral de potencia aplicando el método de refinamiento por convolución en frecuencia, para los casos: M = 4, M = 10, M = 50, M = 200.



**Figura 4**. (a) Espectrograma. (b) Frecuencias de Schumann detectadas en función del tiempo. (c) Amplitudes de las resonancias de Schumann en función del tiempo.

**Tabla 1**. comparación entre las resonancias de Schumann calculadas teóricamente y las estimadas a partir de las mediciones

	1er [Hz]		2da [Hz]		3ra [Hz]		4ta [Hz]		5ta [Hz]		6ta [Hz]	
Teórica	8.2		14.2		20.1		25.9		31.7		37.6	
<i>Media</i> ±2σ	7.85	0.20	13.93	0.18	20.9	0.29	26.61	0.28	32.82	0.39	39.17	0.37



#### 5. Conclusiones

En este trabajo se destacó la importancia de efectuar mediciones en forma ininterrumpida del espectro electromagnético a frecuencias extremadamente bajas y su utilidad en el estudio de otros fenómenos de interés para la humanidad o el medio ambiente. Teniendo en cuenta que la plataforma de mediciones utilizada es un primer prototipo, se obtuvieron resultados altamente satisfactorios al lograr detectar hasta la sexta resonancia de Schumann. También se pudo verificar la gran importancia de aplicar diferentes técnicas de procesamiento, ya que de esta forma se logró mejorar notablemente el análisis sobre las señales. Por otra parte, en trabajos futuros se esperan mejorar algunos aspectos técnicos del equipo, como menor susceptibilidad a interferencias, mayor autonomía y posibilidad de enviar los datos periódicamente mediante un enlace inalámbrico. Asimismo, se buscará mejorar el procesamiento aplicando métodos aún más precisos y estudiar con mayor detalle otras anomalías electromagnéticas, particularmente aquellas posiblemente vinculadas a la presencia de movimientos sísmicos.

#### Referencias

Balzer, M. and Wagner, C.A. 1960. Observations of earth ionosphere cavity resonance. *Nature 188*, 638-641.

Ikeya, M., 2004. "Earthquakes and animals: From folk legends to science," World Scientific Publishing Co.Pte. Ltd. 5 Toh Tuck Link, Singapore 596224.

Leif Sornmo and Pablo Laguna, 2005. Bioelectrical signal processing in cardiac and neurological applications. ISBN: 0-12-437552-9. United States of America.

Maffia, E., Trainotti, V., Fano W.G. y Trench. 2011. Medición de la Resonancia de Schumann. *Latinmag Letters 1*, Special Issue, A02, 1-8. Proceedings Tandil, Argentina

Schlegel K. and Füllekrug M., 2002. 50 Years of Schumann Resonance. <a href="https://www.vitatec.com/docs/ref-erenz-umgebungsstrahlung/schlegel-2002.pdf">https://www.vitatec.com/docs/ref-erenz-umgebungsstrahlung/schlegel-2002.pdf</a>

Volland, H., ed. 1984, Handbook of atmospheric electrodynamics. Springer Verlag.