

Análisis de Señales de EEG Mediante el Uso de Spectral Power Ratios

Nathaly Dongo, Sergio Cancán, Rubén Vargas and Sebastián Venero,
Universidad de Ingeniería y Tecnología – UTEC, Lima, Perú

Abstract—El objetivo de este *paper* es analizar de forma teórica las señales EEG correspondientes a los procesos cognitivos de "Baseline" y "Letter-Composing". La metodología consistió en utilizar un algoritmo de alto nivel de Spectral Power Ratios (SPR) implementado en Matlab. Se utilizó una segmentación de 10% y un overlapping de 30 % para los canales C3, C4, P3, P4, O3, y O4 correspondientes a las señales EEG de las tareas asignadas en los canales ch1, ch2, ch3, ch4, ch5 u ch6 respectivamente. Los Spectral Power Ratios se determinaron entre las taras correspondientes al mismo canal en la banda alpha (8-13 Hz). Los resultados obtenidos muestran que los canales que presentan menores fluctuaciones a lo largo del tiempo corresponden a los canales C3, O1 y O2, estos canales coincidieron con aquellos que registraban diferencias significativas entre ambos hemisferios. Los SPR son en su mayoría negativo lo que indica un mayor ASP para Letter-Composing. En conclusión, los canales correspondientes a las zonas corticales y occipitales del cerebro son aquellos que permiten apreciar de mejor manera la asimetría hemisférica y la relación de los SPR en las actividades de Baseline y Letter-Composing.

Index Terms—Machine Learning, SVMs (*Support-Vector Machines*), (*Neuronal Networks*), Kalman Filter, ICA, Frequency Bands, Periodogram, EEG Singlas Processing.

I. INTRODUCTION

LA investigación de señales de electroencefalograma (EEG) en neurociencia ha hecho sus mayores contribuciones al estudio del desarrollo cognitivo al iluminar mecanismos que subyacen a las observaciones conductuales realizadas anteriormente por los psicólogos[1]. El análisis de señales EEG es fundamental para la construcción de Interfaces cerebro computadora (ICC) [2]. Sin embargo, dado que la mayoría de actividades se llevan de manera asimétrica y específica en los hemisferios del cerebro [3], es difícil reconocer comportamientos y patrones en investigaciones sobre dichas señales, pero no imposible. Con la ayuda del sistema 10-20, un sistema de normalización del posicionamiento de los electrodos, las asimetrías cerebrales pueden ser utilizadas para explicar cualquier tipo de comportamiento desde la habilidad de leer hasta enfermedades neurológicas complejas[4]. De este modo, se propone realizar un análisis teórico de las señales EEG correspondiente a los procesos cognitivos de "Baseline" y "Letter-composing" con la finalidad de explorar el rol de los canales y la lateralización de las señales EEG.

II. OBJETIVOS

A. Generales

Analizar de forma teórica señales EEG correspondientes a procesos cognitivos utilizando un algoritmo de alto nivel de Spectral Power Ratios (SPR) implementado en Matlab.

B. Específicos

- Presentar los conceptos de análisis de SPR correspondientes a las tareas cognitivas de Baseline y Letter-Composing.
- Presentar resultados experimentales usando archivos de data real obtenidas de la base de datos Colorado State University.
- Determinar los canales que muestran patrones o relaciones sobre los SPR entre las actividades de Baseline y Letter-composing.
- Comprobar la respuesta asimétrica de los SPR entre las tareas de Baseline y Letter-composing para los canales en el hemisferio izquierdo y derecho.

III. MARCO TEÓRICO

A. Señales de Electroencefalogramas (EEG)

Las señales obtenidas mediante un encefalograma indican la actividad eléctrica cerebral. Estas son de naturaleza estocástica y contienen información útil sobre el estado del cerebro. Sin embargo, es difícil obtener esta información a simple vista en el dominio del tiempo[5]. Es por ello que existen diversas estrategias para poder analizar estas señales en el dominio de la frecuencia ya sea mediante la predicción lineal[6], el análisis de componentes independientes (ICA)[7], o utilizando la transformada de Fourier en el procesamiento de señales por ventanas[8] entre otros posibles métodos.

B. Power Spectral Density (PSD)

El Power Spectral Density representa la distribución de la potencia de las señales EEG y puede ser usado para detectar anomalías en desórdenes mentales como el Alzheimer o ataques epilépticos usando el dominio de la frecuencia[9],[10]. Por lo general este estimado se determina mediante la medición de la actividad en las células corticales dispuestas en paralelo y espaciadas a la misma distancia sobre la corteza fisiológica[11]. Este se puede estimar mediante un modelo de autoregresión paramétrica (AR) o mediante la estimación clásica a través del uso de la FFT, este último es el que se usará en este estudio.

C. Absolute Spectral Power (ASP)

El Absolute Spectral Power es un cálculo de la potencia de la señal en función de la frecuencia. Este cálculo es especialmente útil para analizar la amplitud del PSD vs la frecuencia de una señal estocástica[12]. Por ende, resulta útil para efectos del estudio, puesto que el objetivo es analizar señales de EEG, las cuales no son determinísticas.

D. Spectral Power Ratio (SPR)

El Spectral Power Ratio es un parámetro que se emplea para comparar dos ASP. El SPR muestra los cambios en la distribución de potencia entre ambas señales mediante las unidades de frecuencia[9]. Este indicador es más fiable debido a su robustez cuando se presencia cambios bruscos en la potencia espectral[13].

IV. METODOLOGÍA

A. Base de Datos EEG:

Las señales EEG fueron obtenidas de la base de datos de Colorado State University[14]. Esta base de datos consta de pruebas ejercidas en 7 sujetos con 7 electrodos llamados canales cada uno, ubicados como se muestra en la Fig. 1. Los sujetos realizaron distintas tareas para obtener información específica sobre sus señales EEG. Sin embargo, no toda esa información fue utilizada para nuestra investigación. Con la finalidad de analizar las señales EEG se utilizaron las tareas de Baseline y Letter-Composing

Por otro lado, de los siete sujetos que se encontraban en el conjunto original de datos, solo se eligieron cuatro sujetos (sujeto 1, sujeto 3, sujeto 4 y sujeto 5) debido a que los otros tres tuvieron menos de diez sesiones o algunos errores en la grabación. El sujeto 1, a diferencia de los demás, tenía 48 años, trabajaba como empleado de una universidad y era zurdo. El resto de sujetos eran estudiantes universitarios diestros de entre 20 y 30 años.

Por último, solo se tomaron en cuenta los canales del 1 al 6 (C3, C4, P3, P4, O1 y O2 respectivamente). Cabe resaltar que los canales C3, P3 y O1 pertenecen al hemisferio izquierdo, mientras que los canales C4, P4 y O2 al derecho. Esta categorización, empleada en estudios de lateralización de la actividad cerebral[15], se utilizó para evaluar la asimetría hemisférica de las señales EEG.

B. Extracción de características

Esta sección describe los métodos utilizados para la extracción de las características.

1) *Procesamiento por ventana*: Las señales de entrada, $s(n)$, que corresponden a los datos recolectados por cada canal fueron divididas en un total de L segmentos, cada uno de ellos con una longitud M (Fig. 2). Dado que el valor de la segmentación fue del 10%, cada segmento contó con un total de 250 elementos. Se tomó en cuenta un overlap del 30%. De esta manera, se crearon 14 segmentos, cada uno llamados $s_l(n)$ En donde $s_l(n)$ puede ser obtenido de la señal original a través de la siguiente ecuación.

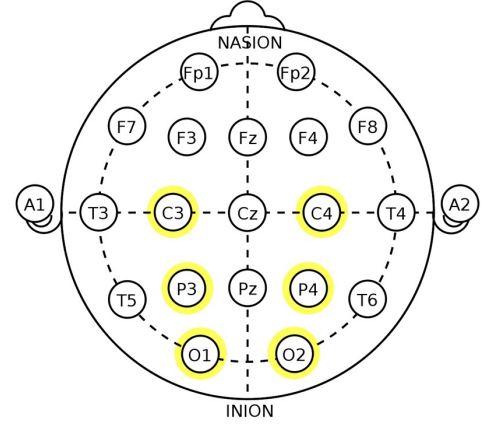


Fig. 1. Distribución de la colocación de electrodos sujeta al sistema internacional o sistema 10-20

$$s_l(n) = s(n + (l - 1)M(0.3)) \quad (1)$$

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

Cabe resaltar que el último segmento $s_{14}(n)$ fue rellenado con un vector de ceros hasta obtener la longitud M . Esto se realizó con la finalidad de estandarizar el tamaño de los segmentos y poder trabajar de forma escalable sin ningún problema. Por último, es pertinente mencionar que el análisis por ventanas fue utilizado para disminuir la fluctuación de las señales durante la realización de las tareas cognitivas, asumiendo que un periodo menor de tiempo posee menores variaciones[15].

2) *Absolute Spectral Power*: La actividad rítmica de las señales EEG fue analizada únicamente en la banda alfa. El propósito de analizar el ASP en la banda alfa fue para representar la potencia de las señales correspondientes a una frecuencia entre 8 y 13 Hz. Actualmente se sabe que los cambios en la potencia de las bandas en señales EEG están sujetos a un evento en particular[16]. Específicamente, la banda alfa está directamente asociada con un estado mental de relajación y está inversamente relacionada con la "activación" cortical[17]. Dado que las tareas estudiadas fueron Baseline y Letter-Composing, analizarlas en el dominio de la banda alfabrindaría una mayor noción sobre la actividad cerebral en cada una de ellas.

Matemáticamente, el ASP en la banda de frecuencia i -th se calcula como la suma de coeficientes de PSD en dicha banda como se muestra en la ecuación (2) [18].

$$P_i = \log \sum \text{PSD}_{sl}(\omega), \omega \in \alpha \quad (2)$$

A la vez, el PSD en la ventana l -th se determinó en Matlab con el comando `pwelch`.

$$P_{xx}, F] = pwelch(x, ventana, noverlap, freqrange, fs)$$

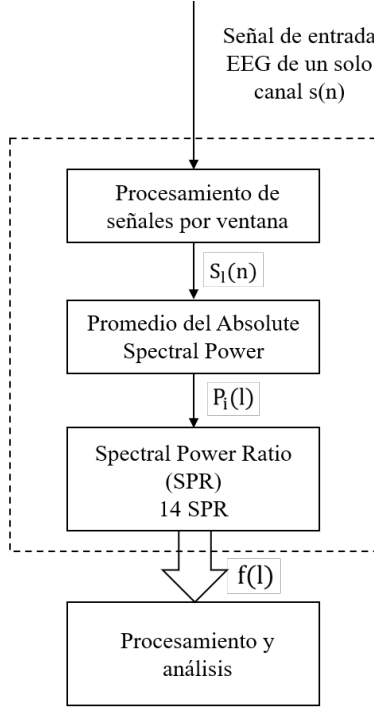


Fig. 2 Diagrama de flujo para la extracción de características

Donde la ventana l -th, $s_l(n)$ fue introducida como la señal de entrada x . Adicionalmente, se utilizó una ventana rectangular de longitud igual a $s_l(n)$. No se consideró overlap dentro de la función. Así mismo, el parámetro $freqrang$ incluyó únicamente los valores de la banda expresados como vector fila. Finalmente, la frecuencia de muestreo fs fue la misma de la base de datos, 250 Hz. De este modo, el ASP del segmento $s_l(n)$ fue obtenido según la ecuación 1.

Por último, luego de calcular el ASP de cada segmento $s_l(n)$, se calculó la media aritmética de las repeticiones del experimento por canal. Este cálculo se realiza debido a que se asume que el ruido es aleatorio y se cancela automáticamente promediando un número suficiente de ensayos[15]. De esta manera, cada canal tuvo únicamente un vector de datos $ASP_{mean}(l)$ que incluyó 14 valores, los cuales fueron los promedios de los ASP de todos los segmentos l -th de las N repeticiones (Fig. 2).

3) *Spectral Power Ratio*: El SPR de cada canal es denominado por R_j y fue determinado de la siguiente forma.

$$R_j(l) = ASP_{meanTask1,j}(l) - ASP_{meanTask2,j}(l), \quad (3)$$

$$l = 1, 2, \dots, 14$$

Donde $R_j(l)$ es igual a la división del término l -th del ASP promedio del Task 1, Baseline ($ASP_{meanTask1}$), entre el término l -th del Task 2, Letter-Composing ($ASP_{meanTask2}$).

C. Análisis Estadístico de Spectral Power Ratio

El análisis de los SPR obtenidos por canal y sujeto fueron analizados estadísticamente y presentados en distintas gráficas con la finalidad de mostrar los 5 mejores resultados sobre la diferencia temporal del SPR entre el par de actividades asignadas.

En primer lugar, para comprobar la existencia de una relación entre la actividad de las señales EEG registrada y la tarea llevada a cabo, se decidió hallar la desviación estándar del vector de SPR para cada sujeto, y posteriormente hallar el promedio de las desviaciones de todos los sujetos para un solo canal. Esto se realizó dado que una recopilación sobre la funcionalidad del cerebro intacto mostró que los ratios se encuentran correlacionados con la dificultad de la actividad llevada a cabo, incluyendo Letter-Composing y Baseline, y no varían en gran medida entre ellos [19][20]. Sin embargo, estos estudios se realizaron en individuos diestros y sin una gran diferencia de edad. Dado que en nuestro estudio solo 3 de los 4 sujetos son diestros y existe una gran disparidad de edad, se consideró conveniente analizar aquellas gráficas cuyos SPR, para cada sujeto, se desviaran en menor medida respecto a su media, para ello se utilizó su desviación estándar. Por último, se graficaron aquellos grupos con menor desviación.

En segundo lugar, se analizó la asimetría hemisférica de los Spectral Power Ratios de los canales 1 y 2 (C3 y C4), 3 y 4 (P3 y P4), y de los canales 5 y 6 (O1 y O2). El método analítico para evaluar la asimetría fue el T-Test, dado que ha demostrado ser ampliamente utilizado en la comprobación de preguntas inferenciales relacionadas a diferencias entre grupos de datos de señales EEG[21]. La hipótesis alterna en esta subsección consistió que la media de los canales era significativamente distinta. Finalmente, se seleccionaron dos sujetos a graficar, el primero fue aquel con las mejores diferencias significativas obtenidas en el T-Test y el segundo, fue aquel con las peores diferencias significativas en el T-Test.

V. RESULTADOS EXPERIMENTALES

A. Spectral Power Ratios entre Baseline y Letter-Composing

Al analizar las desviaciones estándar de los canales según los sujetos, mostrada en la Tabla 1, nos encontramos que el canal C3, O1 y el canal O2 son los canales con menor desviación en promedio. Por otro lado, el canal P4 tiene una desviación considerablemente mayor a los de los demás.

En cuanto a los sujetos, podemos ver que el sujeto 4 en la mayoría de los casos posee una de las desviaciones más bajas, la cual es la menor en varios casos entre todos los grupos. En cambio, se puede notar que el sujeto 3 es el que presenta la mayor desviación entre todos los canales excepto en el canal O2.

De acuerdo a la información obtenida en la Tabla 1, se graficaron los canales O2, O1, y C3 (Fig. 21, 31 y 41), los cuales presentaron los menores valores de desviación estándar.

TABLE I
VARIANZA DE LOS SPR PARA CADA SUJETO SEGÚN EL CANAL

Canal	Sujeto	Desviación Estándar	D. Estándar Promedio
Canal C3	Sujeto 1	0.0904	0.0929
	Sujeto 3	0.1081	
	Sujeto 4	0.0748	
	Sujeto 5	0.0985	
Canal C4	Sujeto 1	0.1294	0.1281
	Sujeto 3	0.1374	
	Sujeto 4	0.1110	
	Sujeto 5	0.1346	
Canal P3	Sujeto 1	0.0875	0.0962
	Sujeto 3	0.1250	
	Sujeto 4	0.0808	
	Sujeto 5	0.0915	
Canal P4	Sujeto 1	0.1139	0.1079
	Sujeto 3	0.1469	
	Sujeto 4	0.0878	
	Sujeto 5	0.083	
Canal O1	Sujeto 1	0.0802	0.0936
	Sujeto 3	0.1101	
	Sujeto 4	0.1020	
	Sujeto 5	0.0822	
Canal O2	Sujeto 1	0.1305	0.0838
	Sujeto 3	0.0938	
	Sujeto 4	0.0634	
	Sujeto 5	0.0474	

En la Fig. 3, 4 y 5 vemos que en todas las gráficas el sujeto 4 posee ratios negativos a diferencia de los otros sujetos en todos los canales (C3, O1 y O2).

Por otro lado, en la Fig. 3 se muestra que la media de los SPR se encuentra entre -0.3 y 0.3. En la Fig. 4 la media está entre -0.5 y 0.1. Y en la Fig. 5 la media oscila entre -0.4 y 0.1 a lo largo del tiempo. Para este último canal, se muestra que en ciertos boxplots (1 al 5, 8, 10, 13 y 14) los valores de los SPR de los sujetos 1, 3 y 5 se encuentran muy próximos. Además, para estos sujetos, la mayor parte de sus valores se encuentran entre -0.5 y 0, excluyendo algunos picos donde pueden llegar hasta 0.5 como el sujeto 3 y 5 para los boxplot 7 y 11.

Respecto a la Fig. 4 del canal O1, se puede observar que los ratios del sujeto 1 se encuentran muy cerca a los valores máximos en los primeros siete diagramas de cajas. Además, casi siempre los valores del sujeto 1 y 5 se encuentran por encima de la media. Este no es el caso para el sujeto 3, puesto que posee ratios que varían por encima y por debajo del promedio mayormente.

Por último, se puede observar que en el canal O2 existe una mayor desviación que en el resto de los canales graficados. Esto concuerda con el comportamiento de los sujetos que no poseen algún tipo de tendencia, si no que pueden tomar valores cerca de la media o los valores máximos dentro de los diagramas de cajas.

B. Asimetría Hemisférica de SPR de las señales EEG

Según los resultados del T-test, Tabla 2, los pares de canales C3 y C4 mostraron una diferencia significativa

en la media de los sujetos 3, 4 y 5. Esta diferencia se puede apreciar especialmente en el sujeto 5, el cual tiene un p-value considerablemente menor respecto a los demás sujetos. Por otro lado, se puede apreciar una diferencia significativa entre los canales P3 y P4 del sujeto 4. Este T-Test tiene el menor p-value entre los pares de canales del sujeto mencionado. Finalmente, el sujeto 5 cuenta con el menor p-value encontrado en los pares de canales O1 y O2. Mientras que el sujeto 1 cuenta con los valores de p-value necesarios para rechazar la hipótesis alterna. Es por esto que se eligió al sujeto 5 y al sujeto 1 para graficar sus canales.

TABLE II
T-TEST ENTRE LOS CANALES DE LOS HEMISFERIOS IZQUIERDO Y DERECHO PARA CADA SPR

Sujeto	Canal	t-value	P-value
Sujeto 1	ch1-ch2	0.640	0.5350000
	ch3-ch4	-1.170	0.2640000
	ch5-ch6	-1.760	0.1010000
Sujeto 3	ch1-ch2	2.760	0.0162000
	ch3-ch4	1.900	0.0805000
	ch5-ch6	-1.720	0.1090000
Sujeto 4	ch1-ch2	2.780	0.0156000
	ch3-ch4	3.290	0.0058700
	ch5-ch6	-0.290	0.7760000
Sujeto 5	ch1-ch2	5.250	0.0001580
	ch3-ch4	2.170	0.0489000
	ch5-ch6	-6.490	0.0000203

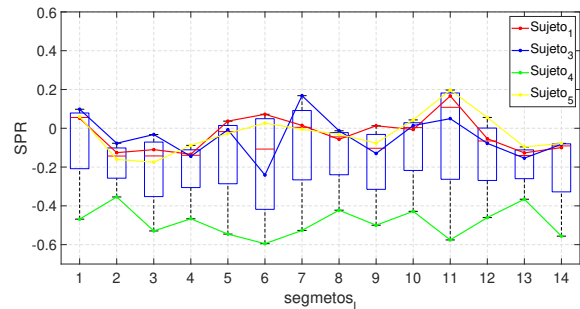


Fig. 3. Comparación de los SPR de los sujetos en el canal C3

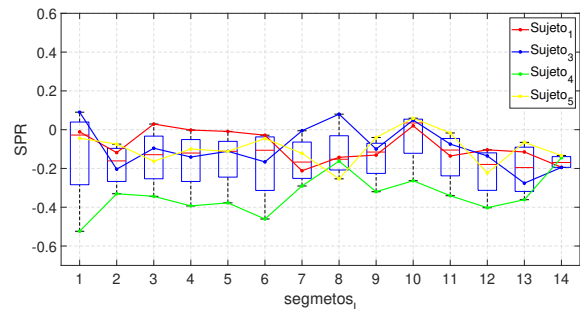


Fig. 4. Comparación de los SPR de los sujetos en el canal O1

En la Fig. 6 y 7, se puede apreciar que los SPR del canal C3 (canal 1) para el sujeto 5 y 1 es mayor que los SPR del canal C4 (canal 2). Además, ambos canales mantienen

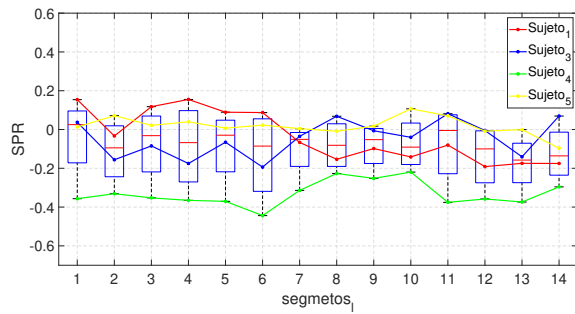


Fig. 5. Comparación de los SPR de los sujetos en el canal O2

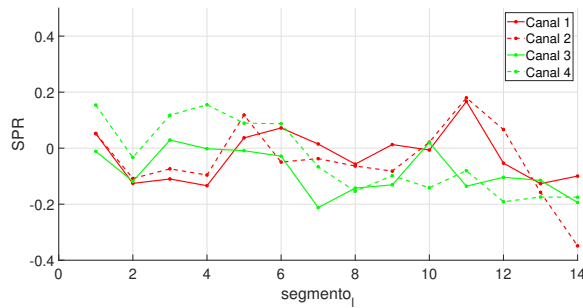


Fig. 6. Comparación de tareas entre canales C3,C4,O1yO2 del Sujeto 1. Líneas punteadas pertenecen al hemisferio derecho, líneas continuas pertenecen al hemisferio izquierdo. Líneas rojas representan canales C, Líneas verdes representan canales O.

una tendencia similar en sus fluctuaciones a lo largo de los segmentos.

De manera similar, en la Fig. 6 y 7, también se puede notar que un canal tiene un mayor media de SPR que el otro. En este caso, el canal O2 tiene mayor SPR que el canal O1 para el sujeto 5 y 1.

Asimismo, en todos los pares de canales existe una tendencia similar de aumentos y decrecimientos en los SPR.

VI. DISCUSIÓN

Dado que el SPR obtenido se encuentra denotado por la ecuación 3, es lógico esperar que los valores negativos se deban a que la primera tarea, Baseline, posea un menor ASP que la segunda tarea, Letter-composing. Los resultados obtenidos en la primera sección, SPR entre Baseline y Letter-Composing, muestran que las medias de los SPR para los canales C3, C4 y O2 oscilan entre valores negativos y positivos, al igual que con cada sujeto, siendo negativos en su mayoría. Esto podría deberse a que el EEG en banda alfa es particularmente sensible a varias demandas relacionadas con la ideación creativa [22]. Además dado que la banda alfa aumenta durante la ideación creativa, los valores mayores de SPR podrían reflejar un estado de atención que se caracteriza por la ausencia de estimulación externa [23]. La falta de estimulación externa puede asemejarse al estado de Baseline o relajación, lo que podría explicar las variaciones de los valores entre positivo y negativo. Sin embargo, existen otros

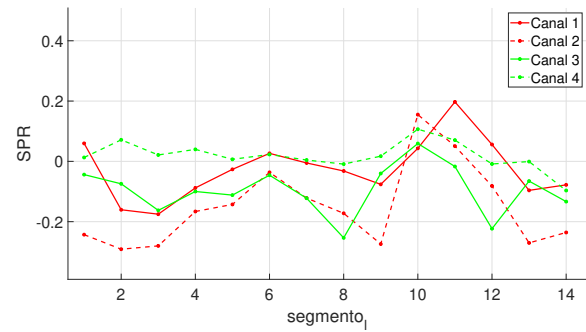


Fig. 7. Comparación de tareas entre canales C3,C4,O1yO2 del Sujeto 5. Líneas punteadas pertenecen al hemisferio derecho, líneas continuas pertenecen al hemisferio izquierdo. Líneas rojas representan canales C, Líneas verdes representan canales O.

estudios que sugieren que la variación en los ratios se deben a una potencia de ruido distribuida uniformemente a lo largo de la media de los SPR entre las tareas de Baseline y Letter-composing [24].

Los valores del canal O1 y O2, tienden a ser cero o positivos y en menores casos negativos, sobretodo en primer canal. Lo cual significa que existe un mayor ASP promedio de las señales de Baseline sobre las de Letter-composing. Los resultados obtenidos para este canal pueden deberse a que existe una correlación positiva entre los ASP y los lóbulos occipitales y corticales, sobretodo en los canales del hemisferio izquierdo (O1 y C3), las cuales se encuentran envueltas en el proceso de creatividad, que corresponden a Letter-composing. Además, independiente del canal, como se mencionó anteriormente la actividad producida durante la tarea cognitiva Baseline también presenta altos valores de ASP [21].

Por otro lado, respecto a la actividad asimétrica de los canales que obtuvieron un menor p-value fueron C3, C4, O1 y O2. Esto concuerda con estudios anteriores de la Universidad de Sydney que afirman que los canales más precisos para analizar tareas de Letter-Composing son estos mismos canales ,C4 y O1, con 76.4% de precisión[25].

Un dato importante encontrado es que entre los pares de canales C3 y C4 (ch1 y ch2), el canal C3 presentó un SPR mayor al canal C4. Esto podría significar que en el canal C3 el ratio del promedio de los ASP de la tarea cognitiva de Baseline fue mayor que en el canal C4 o que el ASP del promedio de Letter-composing en el canal C3 fue menor que en el canal C4, sin descartar que en ambas tareas el ASP de Baseline seguiría siendo menor que el ASP correspondiente a Letter-composing. La primera suposición viene respaldada por los estudios mencionados con anterioridad, la segunda suposición concuerda con estudios que comprueban que existe un mayor ASP en las señales EEG recibidas desde el hemisferio derecho durante la ejecución de tareas verbales, como Letter-composing [21].

Una de las complicaciones observadas en el estudio fue

la estandarización de los segmentos antes de procesarlos. Si bien es recomendable rellenar con ceros los segmentos con tamaños distintos a los deseados, esto puede producir un error más adelante en el análisis de los componentes de la banda alfa, dado que los ceros son tomados en cuenta por la función pwelch de Matlab. Por ello se recomienda que el último segmento simplemente sea más pequeño que los demás. Ello evita inexactitud que se optiene del análisis anterior.

Así mismo, el método que se usó para calcular el PSD, es decir, el método de Welch estuvo limitado en su uso porque a pesar de poseer una baja varianza al costo de una mala resolución de frecuencia. Apesar de ser el camino computacionalmente más eficiente se recomienda el uso del método de aproximación del PSD Multitaper, ya que este tiene una baja varianza en altas resoluciones de frecuencia. Sin embargo, cualquiera de los métodos anteriores es recomendable para el análisis de señales EEG.

VII. CONCLUSIONES

En conclusión se logró analizar de forma teórica las señales EEG correspondientes a procesos cognitivos utilizando un algoritmo de alto nivel de Spectral Power Ratios implementado en Matlab. Como parte de ello se logró presentar los conceptos de análisis de SPR correspondientes a las tareas cognitivas de Baseline y Letter-Composing. Los SPR obtenidos en los distintos sujetos son mayormente negativos, lo que indican un mayor ASP para la tarea de Letter-composing en comparación de Baseline. Además, se logró determinar que los canales que mostraban patrones o relaciones sobre los SPR entre las actividades asignadas, corresponden en su mayoría a los pares O1 y O2 (ch5 y ch6), y C3 y C4 (ch1 y ch2), que a su vez coinciden con los canales sugeridos en la bibliografía para analizar dichas actividades. Adicionalmente, se logró comprobar la respuesta asimétrica de los SPR entre las tareas de Baseline y Letter-Composing para los canales del hemisferio derecho e izquierdo, este último presentó un mayor ASP. Finalmente, los canales que demostraron una mayor asimetría de las tareas llevadas a cabo coinciden con los que presentaban patrones significativos sobre los SPR.

REFERENCES

- [1] A. Diamond and D. Amso, "Contributions of Neuroscience to Our Understanding of Cognitive Development," Current directions in psychological science, Apr-2008. [Online]. Disponible en <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2366939/>.
- [2] H. Jeong, K. Park and Y. Ha, "Image Preprocessing for Efficient Training of YOLO Deep Learning Networks", 2018 IEEE International Conference on Big Data and Smart Computing (BigComp), 2018. Disponible en <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8367193>.
- [3] H. Urréa, "El Dominio de los Hemisferios Cerebrales", Dialnet, 2020. [Online]. Disponible en <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5210276>.
- [4] A. Diamond and D. Amso, "Contributions of Neuroscience to Our Understanding of Cognitive Development," Current directions in psychological science, Apr-2008. [Online]. Disponible en <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2366939/>.
- [5] Subha, D.P., Joseph, P.K., Acharya U, R. et al. EEG Signal Analysis: A Survey. J Med Syst 34, 195–212 (2010). <https://doi.org/10.1007/s10916-008-9231-z>
- [6] Pradhan, N., and Dutt, D. N., Data compression by linear prediction for storage and transmission of EEG signals. Int. J. Biomed. Comput. 35(3):207–217, 1994 doi:10.1016/0020-7101(94)90076-0
- [7] Tzyy-Ping, J., Makeig, S., Mckeown, M. J., Bell, A. J., Te-Won, L., and Sejnowski, T. J., Imaging Brain Dynamics Using Independent Component Analysis. Proc. IEEE. 89(7):1107–1122, 2001 doi:10.1109/5.939827.
- [8] Rao, R. M., and Bopardikar, A.S., Wavelet Transforms introduction to theory and applications. Addison Wesley, Longman Inc, Reading, MA, 1998.
- [9] Z. Zhang and K. K. Parhi, "Low-Complexity Seizure Prediction From iEEG/sEEG Using Spectral Power and Ratios of Spectral Power", IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems, vol. 10, pp. 693-706, 2016.
- [10] Wang, R., Wang, J., Yu, H., Wei, X., Yang, C., Deng, B. (2014). Power spectral density and coherence analysis of Alzheimer's EEG. Cognitive Neurodynamics, 9(3), 291–304. doi:10.1007/s11571-014-9325-x
- [11] Akin M, Kiyimink MK (2000) Application of periodogram and AR spectral analysis to EEG signals. J Med Syst 24:247-256
- [12] M. Zainuddin Lubis, Signal Processing for Power Spectral Density(PSD), vol.1, 16va edición. EEUU: Lap Lambert Academic, 2016. pp. 15-25
- [13] Van Laar JOEH, Peters CHL, Houterman S, Wijn PFF, Kwee A, Oei SG. Normalized spectral power of fetal heart rate variability is associated with fetal scalp blood pH. Early Hum Dev. 2011;87:259-63.
- [14] Colorado University
- [15] R. Van der Lubbeand, C. Utzerath., "Lateralized power spectra of the EEG as an index of visuospatial attention", "Advances in Cognitive Psychology", volume 9(4), 2013 [Online]. Disponible en doi: 10.2478/v10053-008-0144-7