



## Evaluación de la Respuesta Cardíaca y Cerebral ante Estresores Cognitivos y su Regulación con Biofeedback

D. L. Rojas-Sánchez<sup>1</sup>, G. Dorantes-Méndez<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Av. Salvador Nava Martínez s/n, Zona Universitaria, San Luis Potosí, S.L.P., 78290, México

*Resumen* – Los efectos que el estrés prolongado puede tener sobre el organismo han sido ampliamente estudiados, sin embargo, es necesario profundizar en el conocimiento sobre los mecanismos de acción que el cuerpo ejerce para lidiar con esta situación, contribuyendo así, a desarrollar técnicas que no sólo permitan mejorar el afrontamiento inmediato, sino que funcionen como un verdadero método de prevención de enfermedades cardiovasculares y/o psicológicas. En este trabajo se evalúa la respuesta en el Sistema Nervioso Central (SNC) y el Sistema Nervioso Autónomo (SNA) ante estresores de tipo cognitivo en 22 sujetos, 11 hombres y 11 mujeres, y se miden los cambios en su desempeño mediante el análisis de los ritmos cerebrales y la Variabilidad de la Frecuencia Cardíaca, utilizando el control de la frecuencia respiratoria como técnica de biofeedback. Se encontró que existe un aumento significativo en la activación, mayormente, del lóbulo frontal izquierdo después de controlar la respiración, al igual que en la del SNA, lo que podría inferir una mejora en el desempeño sistémico de los individuos.

*Palabras clave* – Electroencefalograma, Estrés, Respiración, Variabilidad de la Frecuencia Cardíaca

### I. INTRODUCCIÓN

El estrés es la respuesta fisiológica ante una amenaza, ya sea física o psicológica, que enfrenta un organismo. Esta respuesta inicia en el hipotálamo, que activa lo necesario para proveer al cuerpo la energía requerida para afrontar el peligro y, una vez que éste ha pasado, restaura las condiciones de homeostasis, de modo que, el estrés es, en realidad, un mecanismo de supervivencia necesario y no una amenaza para la salud. Por otro lado, cuando esta respuesta es forzada a mantenerse durante un período prolongado, el cuerpo pierde la capacidad de recuperar la homeostasis lo que, a la larga, se asocia con problemas en el sistema inmune, desórdenes psiquiátricos (ansiedad, depresión), Alzheimer y enfermedades cardiovasculares [1]. Tal es la magnitud de su incidencia, que la OMS ha considerado al estrés como la gran enfermedad del siglo XXI. A pesar de que lo anterior refleja la importancia que tendría llevar a cabo una monitorización continua de los niveles de estrés en la población, son pocas las herramientas confiables con las que se cuenta, de modo que muchos de los estudios frecuentemente se limitan a evaluaciones psicológicas, cuya interpretación, aunque es

bastante útil, puede ser subjetiva. Es por ello que el análisis cuantitativo y cualitativo de diferentes señales fisiológicas puede aportar otro tipo de información medible para el planteamiento de estrategias de enfrentamiento al estrés.

Mientras que la actividad cardíaca es registrada por medio de un electrocardiograma (ECG), la actividad cerebral requiere de un electroencefalograma (EEG). Ambas técnicas no son invasivas. Uno de los métodos ampliamente utilizados para evaluar el estado cardiovascular de un individuo es la Variabilidad de la Frecuencia Cardíaca (VFC), producto de las interacciones que ocurren entre el Sistema Nervioso Autónomo (SNA) y el Sistema Cardiovascular. El análisis de la VFC se ha utilizado para evaluar el SNA, en personas sanas [2] y/o enfermas [3]. Existen esfuerzos previos sobre la evaluación del estrés utilizando el análisis de la VFC, donde se ha estudiado el progreso de entrenamientos y de la adaptabilidad del sujeto al estrés físico y mental y se ha encontrado que la VFC disminuye conforme aumenta el nivel de estrés en las personas sanas o bien, en aquellas que presentan enfermedades cardiovasculares o trastornos emocionales, como la depresión o la ansiedad [4]. La actividad cerebral también ha sido analizada en situaciones de estrés [5], ayudando a la comprensión de los mecanismos de acción entre los hemisferios y los lóbulos y las relaciones existentes con el SNA y con el resto de los sistemas del organismo. Sin embargo, aún falta profundizar en el estudio de estrategias para el manejo de estrés como lo es el biofeedback [6] y su evaluación a través del análisis de señales fisiológicas. El objetivo de este trabajo es evaluar el efecto del control del ritmo respiratorio en el SNA y el Sistema Nervioso Central (SNC) mientras se utilizan estímulos cognitivos.

### II. METODOLOGÍA

#### A. Población

Se evaluó un total de 22 sujetos: 11 hombres y 11 mujeres con edad de  $21.7 \pm 1.24$  años. Como criterios de exclusión se consideró que estos no fueran fumadores, no obesos, normotensivos y no estuvieran bajo ninguna prescripción médica permanente. Se les solicitó no ingerir cafeína ni alcohol durante las 12 horas previas al registro. Las mujeres fueron agendadas dentro de la fase folicular del ciclo

menstrual para aminorar las variaciones provocadas por los cambios hormonales.

### B. Protocolo

El protocolo está compuesto por cinco etapas (Fig. 1). Durante todo el registro, los sujetos permanecieron sentados con las manos apoyadas sobre las rodillas y con los ojos abiertos. A los participantes se les solicitó no hablar y no realizar movimientos bruscos con la cabeza o las piernas.

El estímulo estresante consistía en una combinación de sumas de números aleatorios alternadas con el test de Stroop, en éste se le pedía al sujeto que identificara el color de la palabra y no la palabra misma. Para llevarlo a cabo, se diseñó una interfaz, donde la operación o la palabra se ubicaba en el centro de la pantalla y, en cada esquina inferior se encontraba una posible respuesta. El sujeto debía cerrar su mano, izquierda o derecha, dependiendo del lugar de la respuesta que él considerará correcta. Cada estímulo tenía una duración de dos segundos. De la misma forma, con ayuda de la interfaz, se mantuvo la frecuencia de la respiración a 6 respiraciones por minuto (rpm), donde el sujeto seguía visualmente una pelota para inhalar y exhalar al ritmo configurado.

Después de comunicarles las indicaciones necesarias y resolver todas las dudas concernientes al procedimiento, los sujetos firmaron una carta de consentimiento informado.

Para el registro de las señales se utilizó la tarjeta de adquisición de datos Cyton de OpenBCI con la versión de software OpenBCI GUI v3.3.0. La adquisición se configuró con un filtro pasabanda de 1 a 50 Hz. La frecuencia de muestreo fue de 250 Hz. Se utilizaron seis canales de adquisición para EEG y uno para ECG.

Para este último se utilizó la derivación CM5, mientras que para el EEG se utilizaron las derivaciones unipolares F3/F4, C3/C4 y P3/P4, en base al Sistema Internacional 10-20 para el posicionamiento de electrodos.

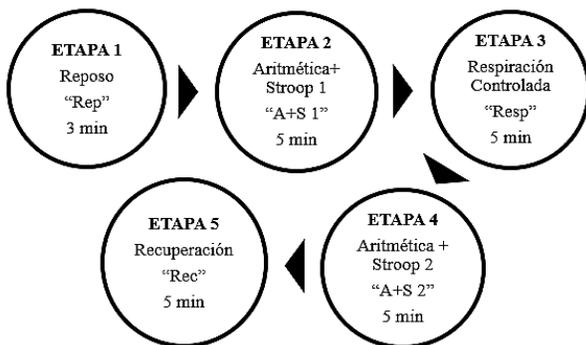


Fig. 1 Secuencia del protocolo experimental utilizado. Duración total: 21 minutos.

### C. Procesamiento de los datos

Los datos fueron procesados utilizando el software Matlab de MathWorks Inc. En primer lugar, fue necesario eliminar los artefactos más evidentes en cada canal, asumiendo que cada uno de ellos cuenta con un número determinado de  $n$  muestras, éstas fueron sustituidas por el promedio de las  $n/2$  muestras anteriores y las  $n/2$  muestras posteriores a cada artefacto. Los índices fueron calculados cada tres minutos: en los intervalos RR, las maniobras de cinco minutos de duración, se dividieron primero en dos ventanas de tres minutos traslapadas por uno y después se tomó su promedio. En el caso del EEG, los índices se calcularon cada minuto y después se consideró el promedio de los minutos correspondientes a cada maniobra. La tabla 1 muestra la distribución de estas ventanas en cada etapa y la duración total del protocolo.

#### a) Intervalos RR

A los registros de ECG les fue aplicado un filtro pasabanda tipo FIR de orden 500 en el rango de 5 a 50 Hz, con el propósito de minimizar la influencia del ruido muscular y de comenzar a resaltar el complejo QRS, los complejos QRS fueron extraídos con un algoritmo de detección [7] y la serie de intervalos RR se obtuvo a partir de la diferencia en tiempo, en segundos, de la ubicación de la onda R.

En el dominio del tiempo, la gráfica de Poincaré es una representación de las correlaciones entre los intervalos RR: la duración del latido actual ( $RR_i$ ) se muestra en el eje  $x$ , y la duración del siguiente latido ( $RR_{i+1}$ ) en el eje  $y$ , de modo que cada punto ( $RR_i, RR_{i+1}$ ) corresponde a dos latidos sucesivos. A partir de esta gráfica se obtienen los índices SD1 (1) y SD2 (2), que se relacionan con la actividad del Sistema Nervioso Parasimpático (SNP) y, mayormente con la del Sistema Nervioso Simpático (SNS), respectivamente, así como la relación entre ambos, SD2/SD1, asociado al balance existente en el SNA [8].

$$SD_1 = std\left(\frac{RR_i - RR_{i+1}}{\sqrt{2}}\right) \quad (1)$$

$$SD_2 = std\left(\frac{RR_i + RR_{i+1}}{\sqrt{2}}\right) \quad (2)$$

Para calcular los índices en el dominio de la frecuencia se determinó el área bajo la curva de la Densidad Espectral de Potencia (PSD, Power Spectral Density) de la serie de intervalos RR, utilizando el método de Welch y se analizaron dos rangos: LF, entre 0.04 y 0.15 Hz, relacionado con SD1 y

TABLA 1. DISTRIBUCIÓN Y TRASLAPE DE CADA UNA DE LAS VENTANAS UTILIZADAS PARA LA SEGMENTACIÓN

Minutos (EEG)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21		
Ventanas (RR)	Reposo			A+S 1.1			A+S 1.2			Resp 1.1			Resp 1.2			A+S 2.1			A+S 2.2			Recuperación	
Promedio (EEG/RR)	Reposo			Aritmética + Stroop 1						Respiración Controlada						Aritmética + Stroop 2						Recuperación	
	Etapa 1			Etapa 2						Etapa 3						Etapa 4						Etapa 5	

HF, entre 0.15 y 0.4 Hz, relacionado con SD2. De manera similar, se determinó el balance simpátovagal con LF/HF [9].

#### b) EEG

Las señales fueron remuestreadas a 120 Hz. Para calcular los ritmos cerebrales, se aplicó a cada rango un filtro tipo FIR de orden 500: Theta (3.5 a 7.5 Hz), Alfa (8 a 12 Hz), Beta 1 (14 a 18 Hz) y Beta 2 (18 a 30 Hz). Se determinó la PSD de cada banda utilizando el método de Welch y se calculó el área bajo la curva para obtener la potencia relativa de cada ritmo. Con el objetivo de evidenciar información, se calcularon los siguientes radios: Alfa/Theta, Beta 2/Beta 1, Beta 2/Alfa, Beta 1/Alfa, Beta 2/Theta y Beta 1/Theta.

#### D. Análisis Estadístico

Para determinar la distribución de los datos se utilizó la prueba de Lilliefors, de la cual se obtuvo que los datos no provienen de una distribución normal. Para determinar las diferencias existentes entre las diferentes etapas, se realizó un análisis de Kruskal – Wallis usando el test de Tukey – Kramer como prueba post hoc.

La comparación entre las etapas dos y cuatro (A+S 1, A+S 2) se hizo con un test de Wilcoxon para muestras pareadas. Un tercer análisis se llevó a cabo calculando primero la diferencia entre ambas etapas de aritmética para después comparar el resultado obtenido entre cada pareja de electrodos, F3 vs. F4, C3 vs. C4 y P3 vs. P4, por medio de un test de Wilcoxon.

### III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se encontraron diferencias significativas entre la etapa de respiración y ambas etapas “A+S”, en los radios  $\alpha/\theta$ ,  $\beta_1/\theta$  y  $\beta_2/\theta$  de todos los canales correspondientes al hemisferio izquierdo: P3, C3 y F3. En la Fig. 2 se aprecia el comportamiento de estos radios únicamente en los canales del lóbulo frontal, F3 y F4, aunque en el resto de los sitios de adquisición la tendencia entre maniobras es muy similar. Es notable que, a pesar de que en los puntos del hemisferio derecho se aprecien resultados entre etapas análogos al hemisferio izquierdo, no se hayan encontrado diferencias significativas, lo que sustenta la asimetría cerebral

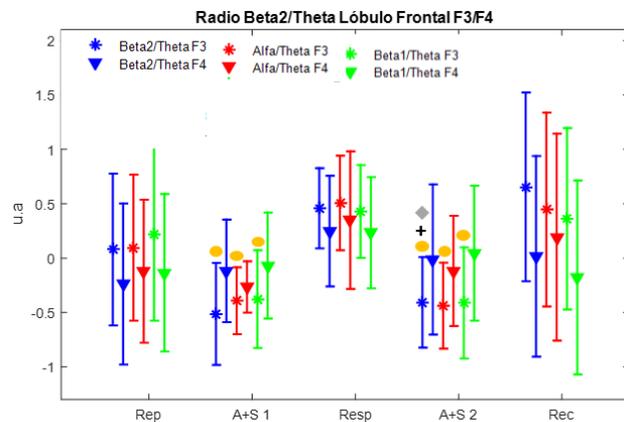


Fig. 2. Media y desviación estándar de los radios Beta2/Theta, Beta1/Theta y Alfa/Theta en el Lóbulo Frontal en ambos hemisferios en las diferentes etapas del protocolo (●) Diferencias contra Resp. (+) Diferencias contra A+S1. (♦) Diferencias contra H. Derecho.  $p < 0.05$

mencionada por Lewis y col. [10], en donde se reporta que el hemisferio izquierdo está involucrado con el procesamiento de emociones positivas, mientras que el derecho se encarga del análisis de las emociones negativas, y menciona la importancia del lóbulo frontal, actuando éste como una unidad de programación, regulación y verificación de la actividad consciente, conformando un sitio de integración y secuenciación de las experiencias sensoriales, asociativas y conductuales. En este mismo estudio, se ha sugerido que cuando la actividad en el hemisferio derecho es baja, la del sistema inmune también lo es, lo que podría acentuar el impacto de estrés en el organismo.

La relevancia de la activación del lóbulo frontal derecho está evidenciada por el aumento significativo encontrado en A+S 2 con respecto a A+S 1, resultado del efecto provocado por la etapa tres, Resp, dado que a esta frecuencia (6 rpm) aumenta la eficiencia respiratoria [11] y es la única en la que la Arritmia Sinusal Respiratoria (ASR) está sincronizada tanto con la inhalación, aumentando el ritmo cardíaco, como con la exhalación, disminuyéndolo, de modo que se tiene la máxima concentración alveolar de oxígeno, incrementando la eficiencia del intercambio gaseoso y mejorando la respuesta del individuo ante la situación [6]. Dicho incremento no sólo

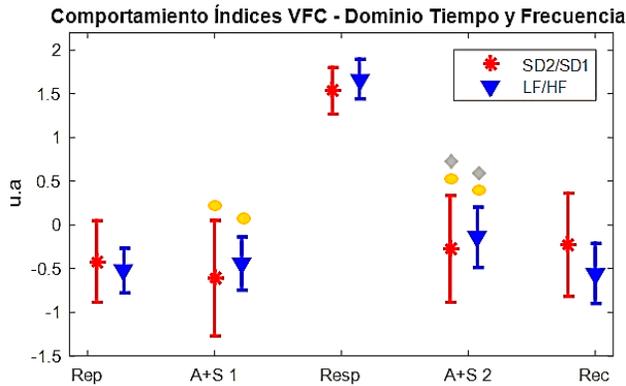


Figura 4. Media y desviación estándar de SD2/SD1 y LF/HF en las diferentes etapas del protocolo (●) Diferencias vs. Resp. (◆) Diferencias vs. A+S 1.  $p < 0.05$

está presente en  $\beta_2/\theta$ , sino también en  $\beta_2/\beta_1$  y  $\beta_2/\alpha$ , lo que evidencia la predominancia del ritmo  $\beta_2$  como indicador de la mejora en el desempeño cognitivo de los sujetos, dado que esta banda se asocia con una elevada activación cortical [12], consecuencia del mayor nivel de concentración requerido para realizar la tarea en cuestión.

Las tendencias observadas en los radios de EEG son aún más claras en los índices de la VFC, algunos de los cuales están en la Fig. 3, en la que se muestra el balance simpátovagal tanto en el dominio del tiempo, SD2/SD1, como en el de la frecuencia, LF/HF. Dado que los valores de HF y de SD1 se asocian con la actividad del SNP, el aumento encontrado entre ambas etapas A+S evidencian el aumento en la activación del hemisferio derecho, ya que cuando se presenta un estímulo estresante, la principal reacción es la secreción de epinefrina y norepinefrina por parte del SNS, lo que provoca como respuesta posterior, el incremento en la actividad del SNP, mediada por el barorreflejo, cuya función es reajustar los niveles de presión arterial tanto como sea posible en respuesta a un estímulo físico o mental que le cause estrés al sujeto [13]. El aumento en todos los índices después de la etapa Resp confirma que son resultado de la interacción entre los diferentes sistemas del organismo y no una mera influencia de factores externos, como la que puede darse cuando la frecuencia respiratoria no es controlada durante la adquisición, alterando la interpretación en términos del SNP, el SNS y el SNC [11].

#### IV. CONCLUSIÓN

En este trabajo se ha comprobado mediante un análisis cuantitativo de ambas señales adquiridas, que el control del ritmo respiratorio como técnica de biofeedback es eficaz para aumentar el desempeño cardiovascular y cognitivo en

individuos sanos, lo que podría ayudar a desarrollar programas de entrenamiento y seguimiento específicos para diferentes tipos de población, principalmente de aquellos con un riesgo alto de padecer patologías cardíacas, degenerativas y/o psicológicas.

#### BIBLIOGRAFÍA

- [1] Hernando Alberto, Lázaro Jesús, Gil Eduardo, Arza Adriana, Garzón Jorge, López-Antón Raúl, *et al.* Inclusion of respiratory frequency information in heart rate variability analysis for stress assessment. *IEEE journal of biomedical and health informatics*, 20(4): 1016-1025, 2016. DOI: [10.1109/JBHI.2016.2553578](https://doi.org/10.1109/JBHI.2016.2553578)
- [2] Castaldo R, Melillo P, Bracale U, Caserta M, Triassi M, Pecchia L. Acute mental stress assessment via short term HRV analysis in healthy adults: a systematic review with meta-analysis. *Biomedical Signal Processing and Control*, 18: 370-377, 2015. DOI: [10.1016/j.bspc.2015.02.012](https://doi.org/10.1016/j.bspc.2015.02.012)
- [3] Hughes Joel, Stoney Catherine. Depressed mood is related to high-frequency heart rate variability during stressors. *Psychosomatic medicine*, 62(6): 796-803, 2000.
- [4] Tonhajzerova I, Visnovcova Z, Mestanikova A, Jurko A, Mestanik M. "Cardiac vagal control and depressive symptoms in response to negative emotional stress". En *Pulmonary Dysfunction and Disease*, Springer, 2016, pp. 23-30.
- [5] Subhani AR, Xia L, Malik AS. "EEG signals to measure mental stress". En *2nd International Conference on Behavioral, Cognitive and Psychological Sciences*, Maldivas, 2011, pp. 84-88.
- [6] Lehrer P.M. Biofeedback training to increase heart rate variability. *Principles and practice of stress management*, 2007, Ed. 3, pp 227-248.
- [7] Pan Jiapu, Tompkins Willis. A real-time QRS detection algorithm. *IEEE Trans. Biomed. Eng.* 32(3): 230-236, 1985. DOI: [10.1109/TBME.1985.325532](https://doi.org/10.1109/TBME.1985.325532)
- [8] Guzik P, Piskorski J, Krauze T, Schneider R, Wesseling K, Wykretowicz A, *et al.* Correlations between the Poincare plot and conventional heart rate variability parameters assessed during paced breathing. *The Journal of Physiological Sciences*, 57(1): 63-71, 2007. DOI: [10.2170/physiolsci.RP005506](https://doi.org/10.2170/physiolsci.RP005506)
- [9] Roldas Gil, Pedrel-Carballido C, Capdevila L, Villegas-García J. Variabilidad de la frecuencia cardíaca: concepto, medidas y relación con aspectos clínicos (I). *Archivos de medicina del deporte* (123): 41-47, 2008.
- [10] Lewis Richard, Weekes Nicole, Wang Tracy. The effect of a naturalistic stressor on frontal EEG asymmetry, stress, and health. *Biological psychology*, 75(3): 239-247, 2007. DOI: [10.1016/j.biopsycho.2007.03.004](https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2007.03.004)
- [11] Bernardi Luciano, Wdowczyk-Szulc Joana, Valenti Cinzia, Castoldi Stefano, Passino Claudio, Spadacini Giammario, *et al.* Effects of controlled breathing, mental activity and mental stress with or without verbalization on heart rate variability. *Journal of the American College of Cardiology*, 35(6): 1462-1469, 2000.
- [12] Gelpi R.J., Buchholz B. *Neurocardiología: Aspectos fisiopatológicos e implicaciones clínicas*. Elsevier Health Sciences, 2018, p 143
- [13] Aslanyan E, Kiroi V, Stoletnii A, Lazurenko D, Bakhtin O, Minyaeva N, *et al.* Effects of Individual Features on the Ability of Humans to Produce Voluntary Control of the Expression of the Alpha and Beta EEG Rhythms. *Neuroscience and Behavioral Physiology*, 46(8): 916-925, 2016.