

# Steady State Visually Evoked Potential: Cortical Frequency Response in Healthy Subjects

Gerardo L. Padilla<sup>1</sup>, Jorge H. Soletta<sup>1,2</sup> and Fernando D. Farfán<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Laboratorio de Investigación en Neurociencias y Tecnologías Aplicadas (LINTEC),  
Departamento de Bioingeniería, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología,  
Universidad Nacional de Tucumán, Tucumán, Argentina.

<sup>2</sup>Instituto Superior de Investigaciones Biológicas (INSIBIO),  
Consejo Superior de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Tucumán, Argentina.

---

**Abstract**— A Brain Computer Interface (BCI) is an alternative communication system that replaces conventional pathways such as speech and movement. A BCI acquires signals from the brain (e. g., electroencephalogram, EEG) during the performance of cognitive tasks that reflects the user's desire or intention. In recent years, efforts have been made to optimize the performance of cognitive tasks that reflects the user's desire or intention. In recent years, efforts have been made to optimize the information transfer speed of this alternative communication channel through systematic responses by the brain that do not depend or minimally depend on the user's emotional/cognitive state. For this reason, the steady-state visual evoked potentials (SSVEP) have taken a boom in research and implementation of BCI systems. This study aims to characterize the ability to evoke SSVEP at different stimulation frequencies. It is referred to herein as cortical frequency response.

**Keywords**— SSVEP, EEG, BCI.

---

**Resumen**— Una Interfaz cerebro computadora (ICC) es un sistema de comunicación alternativo que reemplaza los canales convencionales tales como el habla y los movimientos. Una ICC adquiere señales del cerebro (p. e. el electroencefalograma, EEG) durante la realización de tareas cognitivas que reflejen el deseo o la intención del usuario. En los últimos años se puesto mucho esfuerzo en optimizar la velocidad de transferencia de información de este canal de comunicación a través de respuestas sistemáticas del cerebro que no dependan, o mínimamente lo hagan, del estado emocional/cognitivo del usuario. Por esta razón es que los potenciales corticales visuales de estado estacionario (SSVEP) han tomado gran auge en la investigación e implementación de las ICCs. En este estudio se pretende caracterizar la capacidad de evocar SSVEP en diferentes frecuencias de estimulación. Esta caracterización ha sido referida aquí como respuesta en frecuencia cortical.

**Palabras clave**— SSVEP, EEG, ICC.

---

## I. INTRODUCCIÓN

Una Interfaz Cerebro Computadora (ICC) es un sistema de comunicación a través del cual las intenciones del usuario son transmitidas el mundo exterior sin utilizar los canales normales de comunicación como los nervios y músculos. Estas interfaces son de gran utilidad en personas que poseen habilidades motoras nulas o reducidas, ya que permiten convertir la actividad del cerebro en señales de control para dispositivos externos como: deletreadores, neuroprótesis, sistemas domóticos, sillas de ruedas, entre otros [1].

Existen muchos paradigmas bajo los cuales se puede implementar una ICC, entre los más conocidos se pueden mencionar, aquellos basados en: la imaginación de movimientos motores [2], los potenciales corticales lentos [3], los potenciales evocados P300 [4], los potenciales evocados visuales transitorios [5] y de estado estacionario [6]. En todos los casos el rendimiento de las ICC (medidos a través de la precisión y transferencia de información) está

supeditado a los procesos de entrenamiento y aprendizaje por parte de sus usuarios. La precisión está relacionada al error cometido en la diferenciación de un estado mental específico de otros, mientras que la transferencia de información está relacionada a la cantidad de comandos, palabras o bits por unidad de tiempo capaz de ser transmitido por el sistema. Así mismo, también es sabido que son sensibles a los estados cognitivos/emocionales de los usuarios. En la actualidad se busca que las ICC capturen respuestas sistemáticas del cerebro que no dependan de los estados cognitivos/emocionales del usuario. En este sentido, los potenciales corticales visuales de estado estacionario (SSVEPs, por sus siglas en inglés) han adquirido especial interés [7, 8, 9].

Los SSVEP son respuestas corticales evocadas por estímulos luminosos y parpadeantes [1]. En el electroencefalograma (EEG), estos potenciales se manifiestan como una componente en la señal la cual tiene la misma frecuencia que el estímulo. Normalmente pueden ser evocados por estímulos de hasta 90 Hz [10]. Estos potenciales han sido usados en investigaciones relacionadas al cerebro, visión y el desarrollo de interfaces cerebro computadoras [11].

Las ICCs basadas en SSVEP están formadas por diferentes fuentes luminosas las cuales parpadean a diferentes frecuencias, así, cuando el usuario dirige la mirada a alguna de estas fuentes, a nivel cortical, y más principalmente en la corteza visual primaria, se evoca este potencial [11, 12]. Los SSVEP pueden ser detectados a través del procesamiento de la señal de EEG y convertido en un comando de control [13].

En este estudio se pretende caracterizar la capacidad que tiene un sujeto, sin trastornos visuales, de evocar potenciales visuales de estado estacionario en diferentes frecuencias de estimulación. Esta caracterización ha sido referida en este trabajo como *Respuesta en frecuencia cortical* del sujeto.

## II. MATERIALES Y MÉTODOS

A continuación, se describirá el protocolo experimental utilizado para evocar y adquirir los SSVEP y las herramientas computacionales para procesarlos y analizarlos.

### A. Desarrollo y control del sistema de estimulación visual

Los SSVEP fueron evocados utilizando un led rojo parpadeante. Las frecuencias de parpadeo fueron desde 13.1 a 99.6 Hz. Los pasos, de una frecuencia a otra, no fueron uniformes debido a la manera en que fue programado el modulo controlador del parpadeo (Arduino, Fig. 2). Así, las frecuencias resultantes fueron: 13.1, 16.1, 19.2, 22.6, 24.9, 29.3, 31.1, 35.6, 38.3, 41.5, 45.3, 49.9, 55.4, 62.3, 71.2, 83.0 y 99.6 Hz. En la Fig. 1 se observan las líneas de código utilizados en la programación de la frecuencia de parpadeo.

```
#define LED 2 //Damos el alias a nuestro pin 2.
#define TRIG 3 //Damos el alias a nuestro pin 3.

int Te = 50;
int Ta = 50;
int A = 0;

void setup() {
  // put your setup code here, to run once:
  pinMode(LED, OUTPUT); // declaramos el pin 13 como salida
  pinMode(TRIG, OUTPUT); // declaramos el pin 13 como salida
}

void loop() {
  // put your main code here, to run repeatedly:

  A = 0; // Reinicio el contador
  Te = 38;
  Ta = 38; // queda una frec de 13.1 Hz
  while(A <= 10000){
    digitalWrite(LED,HIGH); // encendemos el led
    digitalWrite(TRIG,HIGH); // encendemos el led
    delay(Te);
    digitalWrite(LED,LOW); // apagamos el led
    digitalWrite(TRIG,LOW); // apagamos el led
    delay(Ta);
    A = A + Te + Ta; // Sumo al contador el tiempo transcurrido
  }
  delay(1000);
}
```

Fig. 1: Líneas de código utilizadas para la programación y configuración de la frecuencia de parpadeo del Led controlado por Arduino. En el sombreado azul se encuentran las líneas de código correspondiente a la inicialización y configuración de los pines donde se conectará el Led (pin 2) y el trigger (pin 3) que servirá de señal de sincronismo con el sistema de adquisición Biopac Student. Las líneas bajo el sombreado rojo corresponden a la configuración de la frecuencia de parpadeo. Te es el tiempo de encendido del Led en ms, mientras que Ta es el tiempo de apagado. Así,  $fp = 1/(Ta+Te)$  es la frecuencia de parpadeo. Note que tanto

Ta como Te son variables enteras, por esta razón la fp no se pudo establecer de manera uniforme.

### B. Registros de los SSVEP

Los registros de SSVEP fueron obtenidos a través de electrodos colocados en O1-O2 y T7-T8 (Fig. 2). Las señales fueron registradas utilizando un sistema de adquisición BIOPAC Student Lab Pro, módulo MP30 ([www.biopac.com](http://www.biopac.com)), a una frecuencia de muestreo de 1 kHz, y con un ancho de banda de 0.5 a 100 Hz. Los parámetros de adquisición fueron configurados con el software BSL Student Pro para Windows. Un tercer canal de registro fue utilizado para obtener la señal on-off del led (*trigger*) el cual fue configurado con la mínima ganancia posible y sin etapa de filtrado. A partir de la serie obtenida por este canal se determinó la frecuencia de parpadeo del Led. El electrodo de referencia para los canales bipolares O1-O2 y T7-T8 fue colocado en la frente de los sujetos experimentales (Fig. 2).

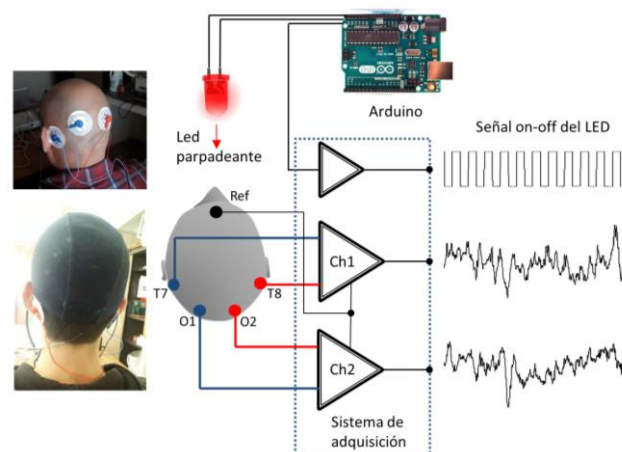


Fig. 2: Setup experimental. El Led parpadeante es colocado a 0.5 m de distancia del observador. A la izquierda, fotografía de dos sujetos experimentales y los electrodos utilizados. En la fotografía superior, al sujeto calvo se le colocaron electrodos adhesivos superficiales, en la inferior, el sujeto tiene electrodos del mismo tipo en T7-T8, mientras que sobre O1-O2 se colocaron electrodos tipo discos a los cuales se les mejoró el contacto con el cuero cabelludo usando gel conductor y un gorro elástico. El sistema de adquisición es un BIOPAC Student Lab Pro, módulo MP30. Tres canales de registro fueron configurados adecuadamente.

### C. Protocolo experimental

El sujeto mantuvo la dirección de su mirada a un led situado a 0.5 m, durante todo el protocolo experimental. Inicialmente, se registraron los SSVEP y la señal de trigger, mientras el sujeto observa el led parpadeando a 13.1 Hz, durante 10 s, seguido de un estado off de 1 seg. Posteriormente se repite el ciclo, pero con el led parpadeando a 16.1 Hz, y así sucesivamente hasta alcanzar los 99.6 Hz. La duración total de este protocolo fue de 187 seg. Eventualmente este protocolo experimental fue repetido.

En este experimento participaron tres sujetos experimentales de  $35 \pm 13$  años.

#### D. Procesamiento de los registros de SSVEP

Las situaciones experimentales (estimulación visual a diferentes frecuencias de parpadeo) fueron establecidas a partir de la señal de on-off (trigger). Cada situación de 10 seg de duración fue segmentada en intervalos de 1 seg donde se determinó el espectro de potencial usando el método de Welch. Este estimador espectral es similar al método del periodograma, con la diferencia del uso de ventanas promediadas (*Hamming*). Así, cada situación experimental intra-sujeto, quedó conformado por 10 espectros de potencias (PSD, por sus siglas en inglés). Luego, el promedio y la desviación estándar fue analizado. La respuesta en frecuencia fue evaluada a partir del incremento relativo de los SSVEP respecto a la actividad basal determinada en los intervalos de 1 seg (estado del Led en off).

Todo el procesamiento fue implementado usando el software MATLAB.

### III. RESULTADOS

En la Fig. 3 se observan los PSD correspondientes a los SSVEP evocados por el Led parpadeante a 31.2, 38.4, 71.2 y 83 Hz obtenidos en T7-T8 (Fig. 3A) y en O1-O2 (Fig. 3B). La línea continua roja corresponde al PSD promedio, mientras que el sombreado indica la desviación estándar. La línea continua azul es el promedio de la actividad basal, obtenida en los intervalos de tiempo en el cual el Led se mantuvo en off (intervalos de 1 seg). En T7-T8 los SSVEP evocados a 31.2 y 38.4 son vagamente diferenciados del estado basal (componentes frecuenciales indicados por flechas azules). Sin embargo, los SSVEP evocados a 71.2 y 83 Hz revelan una aparente mayor diferenciación del estado basal (Fig. 3A).

Los SSVEP registrados en O1-O2 revelan una mayor diferenciación con el estado basal, comparado a aquellos registrados en T7-T8 (Fig. 3B), y más aún para las frecuencias de parpadeo en 71.2 y 83 Hz.

La respuesta en frecuencia cortical de los SSVEP obtenidos tanto en T7-T8 como en O1-O2 se muestra en la Fig. 4. Para la construcción de estas gráficas se consideró la amplitud relativa de los SSVEP respecto al EEG registrado en ausencia de estimulación visual (Led apagado). Una amplitud relativa igual a '1' significa que la amplitud del SSVEP no incrementó (o no se diferencia) del EEG sin estimulación basal. Una amplitud relativa igual a 10 significa que la amplitud del SSVEP es 10 veces más grande que la amplitud del EEG en la frecuencia analizada.

Un análisis cualitativo de la respuesta en frecuencia cortical en T7-T8 muestra que la amplitud relativa de los SSVEP es aparentemente más grande que la actividad del EEG basal para frecuencias de parpadeo mayores a 60 Hz, no superando al doble de amplitud (amplitud relativa aproximadamente igual a 2).

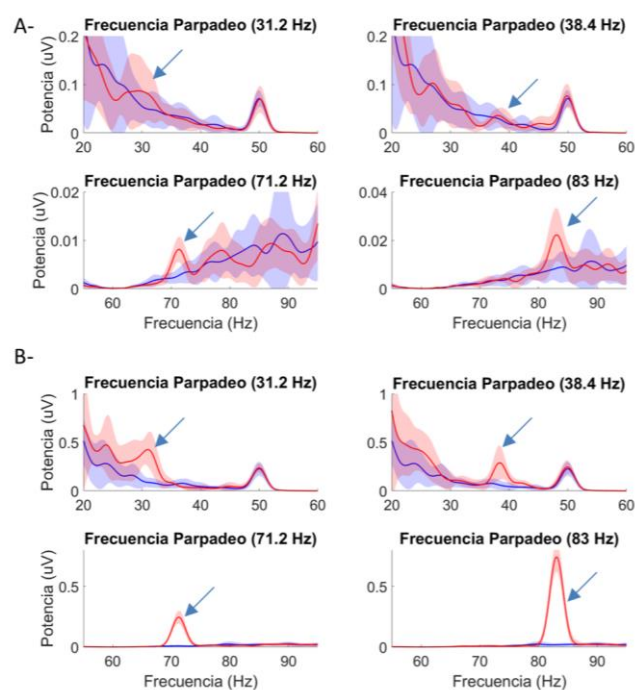


Fig. 3: Análisis del contenido espectral de potencial (PSD) de los SSVEP evocados por la observación del Led parpadeante a 31.2, 38.4, 71.2 y 83 Hz. En línea continua roja se grafica el PSD promedio de los SSVEP, mientras que en línea continua azul se grafica los PSD promedio del EEG registrado en ausencia de estimulación visual (Led en estado off). Los correspondientes sombreados semitransparentes (rojo y azul) representan la desviación estándar de los PSD promediados. A) SSVEP registrados en T7-T8 (en rojo) y en azul el EEG basal. B) SSVEP registrados en O1-O2.

La amplitud relativa de los SSVEP obtenidos en O1-O2 son mayores al EEG basal a partir de los 22.6 Hz (aproximadamente igual a 2.6), para 38.4 Hz la amplitud relativa promedio resulta en 4.3, es decir que la amplitud del SSVEP es 4 veces más que la amplitud del EEG en estado basal. Para frecuencias de parpadeo mayores a 60 Hz, la amplitud relativa de los SSVEP evocados resulta mayor a 14, alcanzando valores cercanos a 49 (gráfica inferior de la Fig. 4).

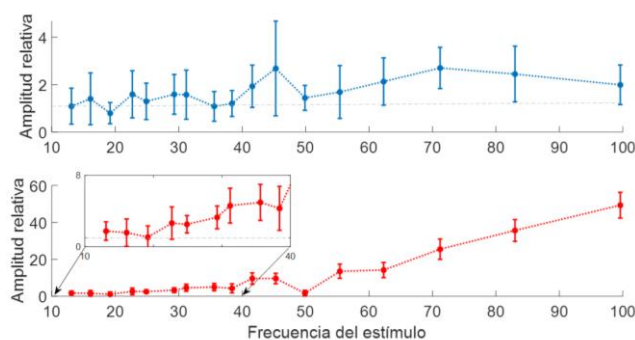


Fig. 4: Respuesta en frecuencia cortical. Amplitud relativa de los SSVEP registrados en T7-T8 (gráfica superior azul) en relación al EEG registrado en ausencia de estimulación visual. En la gráfica inferior (rojo) se representa la amplitud relativa de los SSVEP registrados en O1-O2 en relación con el EEG registrado en ausencia de estimulación visual.

Los resultados de, a) mayor amplitud relativa en O1-O2 respecto de T7-T8, y b) mayor amplitud relativa en frecuencias de parpadeo mayores a los 60 Hz, fueron observados en todos los sujetos experimentales.



## IV. DISCUSIÓN

En este trabajo se evocaron SSVEP empleando un Led parpadeante a diferentes frecuencias con el fin de establecer una gráfica de respuesta en frecuencia cortical. Se evaluaron las amplitudes relativas de tales potenciales con respecto al EEG basal (sin estimulación visual) en las posiciones T7-T8 la cual podemos referir en este trabajo como actividad global cortical, y en O1-O2 como actividad del área occipital. Un análisis preliminar y cualitativo de los registros obtenidos puso en evidencia la gran amplitud relativa observada en el área occipital y para frecuencias de parpadeo mayores a 60 Hz.

Una caracterización electrofisiológica basada en la respuesta en frecuencia cortical permitiría evaluar las posibilidades de control de un sistema ICC basado en SSVEP, y optimizar tanto el posicionamiento de los electrodos de registro como la determinación de las frecuencias de parpadeo más reactivas para el usuario. Esta primera experiencia muestra que las frecuencias mayores a 60 Hz serían las más adecuadas al momento de seleccionar un paradigma de control basada en SSVEP.

Los próximos pasos de esta investigación consisten en involucrar otras variables al protocolo experimental, las cuales permitan caracterizar más profundamente la respuesta en frecuencia cortical basada en los SSVEP, tales como la implementación de Leds con diferentes longitudes de onda (colores) en la estimulación visual, variaciones de la distancia entre el sujeto y la fuente luminosa, y la discriminabilidad entre diferentes fuentes luminosas estimulando al mismo tiempo. La evaluación de todas estas variables permitirá optimizar y particularizar el control de interfaces basadas en SSVEP.

## CONCLUSIONES

El estudio propuesto permite caracterizar la capacidad de evocar potenciales visuales de estado estacionario en diferentes frecuencias de estimulación (respuesta en frecuencia cortical). Las potenciales aplicaciones de esta investigación abarcan las áreas del control de sistemas ICC (Interface Cerebro Computadora) basados en la generación de SSVEP.

## REFERENCIAS

- [1] Zhu, D, Bieger J, Molina GG, Aarts RM (2010) A survey of stimulation methods used in SSVEP-based BCIs. *Comput. Intell. Neurosci.* 1–12.
- [2] Pfurtscheller G, Neuper C, Flotzinger D, Pregenzer M (1997) EEG-based discrimination between imagination of right and left hand movement. *Electroenceph. Clin. Neurophysiol.* 103:642–651.
- [3] Birbaumer N, Ghanayim N, Hinterberger T, Iversen I, Kotchoubey B, Kübler A (1999) A spelling device for the paralysed. *Nature* 398:297–8.
- [4] Donchin E, Spencer KM, Wijesinghe R (2000) The mental prosthesis: assessing the speed of a P300-based brain-computer interface. *IEEE Trans Rehabil Eng.* 8:174–179.
- [5] Sutter EE (2000) The brain response interface: communication through visually induced electrical brain responses. *J Microcomput Appl.* 15:31–45.
- [6] Middendorf M, McMillan G, Calhoun G, and Jones SK (2000) Brain-computer interfaces based on the steady-state visual-evoked response. *IEEE Trans. Rehab. Eng.*, vol. 8, no. 2, pp. 211–214.
- [7] İşcan Z, Nikulin VV (2018) Steady state visual evoked potential (SSVEP) based brain-computer interface (BCI) performance under different perturbations. *PLoS ONE* 13(1): e0191673. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0191673>.
- [8] Chen J, Zhang D, Engel AK, Gong Q, Maye A (2017) Application of a single-flicker online SSVEP BCI for spatial navigation. *PLoS ONE* 12(5):e0178385. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0178385>.
- [9] Xiao Xing, Yijun Wang, Weihua Pei, Xuhong Guo, Zhiduo Liu, Fei Wang, Gege Ming, Hongze Zhao, Qiang Gui & Hongda Chen (2018) A High-Speed SSVEP-Based BCI Using Dry EEG Electrodes. *Scientific Reports*, vol. 8, 14708.
- [10] Herrmann C (2001) Human EEG responses to 1–100 Hz flicker: Resonance phenomena in visual cortex and their potential correlation to cognitive phenomena. *Exp. Brain Res.* 137, 346–353.
- [11] Norcia AM, Appelbaum LG, Ales JM, Cottreau BR, Rossion B (2015) The steady-state visual evoked potential in vision research: A review. *J. Vis.* 15, 4.
- [12] Vialatte FB, Maurice M, Dauwels J, Cichocki A (2010) Steady-state visually evoked potentials: Focus on essential paradigms and future perspectives. *Prog. Neurobiol.* 90, 418–438.
- [13] Allison B, Lüth T, Valbuena D, Teymourian A, Volosyak I, Gräser A (2010) BCI demographics: How many (and what kinds of) people can use an SSVEP BCI? *IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng.* 18, 107–116.



**Gerardo Padilla** es estudiante avanzado de la Carrera de Ingeniería Biomédica de la Universidad Nacional de Tucumán. Actualmente se encuentra realizando su tesina de grado en el Laboratorio de Investigación en Neurociencias y Tecnologías para Rehabilitación y Deporte (LINTEC). Sus áreas de interés son el procesamiento de señales biomédicas, neurociencias, e ingeniería en rehabilitación.



**Jorge H. Soletta** es Ingeniero Biomédico de la Universidad Nacional de Tucumán (2011) y Doctor en Ciencias Biológicas (2017). Actualmente es becario posdoctoral CONICET, Docente en la carrera de Ingeniería Biomédica (UNT) e integrante del LINTEC. Sus áreas de interés son el procesamiento de señales biomédicas, rehabilitación y deporte y la neurociencia computacional.



**Fernando D. Farfán** es Ingeniero Electrónico, Magíster en Bioingeniería y Doctor en Ciencias Biológicas. Actualmente es Profesor Adjunto en la carrera de Ingeniería Biomédica (UNT) e Investigador adjunto en CONICET. Sus áreas de interés son las neurociencias, biomimética y la biomecánica.