



UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA TECNICA SUPERIOR DE
INGENIEROS DE TELECOMUNICACION

TRABAJO FIN DE GRADO

GRADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS ESPECÍFICAS DE
TELECOMUNICACIÓN, MENCIÓN EN SISTEMAS ELECTRÓNICOS

**DESARROLLO Y EVALUACIÓN DE EXPERIMENTOS DE
PSICOLOGÍA COGNITIVA EN UN SISTEMA BRAIN-COMPUTER
INTERFACE NO INVASIVO**

Autor:

D. Miguel Almanza Alonso

Tutores:

**Dr. D. Víctor Martínez Cagigal
Dr. D. Roberto Hornero Sánchez**

Valladolid, Junio de 2022

TÍTULO: **DESARROLLO Y EVALUACIÓN DE
EXPERIMENTOS DE PSICOLOGÍA
COGNITIVA EN UN SISTEMA BRAIN-
COMPUTER INTERFACE NO INVASIVO**

AUTOR: **D. Miguel Almanza Alonso**

TUTORES: **Dr. D. Víctor Martínez Cagigal
Dr. D. Roberto Hornero Sánchez**

DEPARTAMENTO: **Teoría de la Señal y Comunicaciones e Ingeniería Telemática**

TRIBUNAL

PRESIDENTE: **Roberto Hornero Sánchez**

VOCAL: **Jesús Poza Crespo**

SECRETARIO: **Carlos Gómez Peña**

SUPLENTE: **María García Gadañón**

SUPLENTE: **Mario Martínez Zarzuela**

FECHA:

CALIFICACIÓN:

Resumen del TFG

En 1929 Hans Berger desarrolló el electroencefalograma (EEG). Las ondas cerebrales, hasta entonces desconocidas, fueron investigadas a lo largo del siglo XX, siendo un gran avance en la biomedicina y facilitando el posterior estudio del diagnóstico de enfermedades como la epilepsia o diversos trastornos del sueño.

El presente trabajo tiene como objetivo diseñar, implementar y evaluar un conjunto de experimentos típicos de psicología cognitiva (tareas Go-NoGo, Stroop y N-Back) en MEDUSA, para, posteriormente, analizar las señales de los potenciales relacionados con eventos (ERP) de la señal EEG medida para cada una de las tareas. MEDUSA es una plataforma de propósito general para desarrollar sistemas BCI y experimentos de neurociencia en Python, creado por el Grupo de Ingeniería Biomédica de la Universidad de Valladolid. Estas tareas se utilizan para evaluar procesos mentales como la atención, la percepción o la memoria. Antes de implementar nuestras tareas, se realiza una revisión del estado de la técnica del registro de señales EEG con dichas tareas de psicología cognitiva, para analizar las diferentes tareas a implementar y los objetivos de estudio, además de realizar un análisis del EEG en tiempo real. Posteriormente se procede al diseño e implementación de las aplicaciones de las tareas, a través de Unity, y su posterior implementación en MEDUSA.

Tras el diseño e implementación, se evalúa con cinco sujetos, a través de una sesión de una hora, donde los sujetos realizan las diferentes tareas mientras se les registra su señal EEG y los resultados, para posteriormente realizar un análisis del ERP de los diferentes resultados obtenidos. Además, los sujetos realizan un cuestionario de satisfacción una vez han terminado las sesiones.

Una vez realizadas las sesiones y recogidos los datos, se analizan. En cuanto a los resultados de las tareas (número de respuestas correctas y tiempos de reacción), se ven diferencias al modificar la probabilidad de estímulos en la tarea Go-NoGo, para los diferentes estímulos en la tarea de Stroop y al variar la carga de la memoria de trabajo para la tarea N-Back. En los registros de EEG también se han visto ciertas características. En la tarea Go-NoGo la amplitud en algunas componentes es mayor en los estímulos no habituales respecto a los habituales. En la tarea de Stroop se destaca que la amplitud de los estímulos congruentes es menor en ciertos espacios temporales en los canales Fz y Cz. Por último, para la tarea N-Back hay algunos espacios temporales donde la amplitud disminuye a medida que se aumenta la carga de la memoria de trabajo. Estos resultados son discutidos y comparados con los de otros estudios similares.

Por último, se extraen conclusiones generales del presente trabajo, donde se destaca el empeoramiento de los resultados al aumentar la dificultad de las tareas y las modificaciones de las formas de onda de los ERPs al variar los parámetros. Se termina con unas ideas futuras de investigación.

Palabras clave

Electroencefalografía (EEG), potenciales relacionados con eventos (ERP), psicología cognitiva, tarea Go-NoGo, tarea de Stroop, tarea N-Back.

Abstract

In 1929 Hans Berger developed the electroencephalogram (EEG). Brain waves, until then unknown, were investigated throughout the 20th century, being a breakthrough in biomedicine and facilitating the subsequent study of the diagnosis of diseases such as epilepsy or various sleep disorders.

The present work aims to design, implement, and evaluate a set of typical cognitive psychology experiments (Go-NoGo, Stroop and N-Back tasks) in MEDUSA, and then analyze the event-related potentials (ERP) signals of the EEG measured for each task. MEDUSA is a general-purpose platform for developing BCI systems and neuroscience experiments in Python, created by the Biomedical Engineering Group of the University of Valladolid. These tasks are used to evaluate mental processes such as attention, perception, or memory. Before implementing our tasks, a review of the state of the art of EEG signal recording for cognitive psychology tasks is performed to analyze the different task that have been implemented and the objectives of our study, as well as to perform a real-time EEG analysis. Subsequently, we proceed to the design and implementation of each task applications, through Unity and its MEDUSA implementation.

Following the design and implementation of the proposed tasks, they were evaluated by five healthy users in a one-hour session, where they performed all tasks while their EEG signals were being recorded. Then, an ERP analysis of the different results obtained was performed. In addition, a satisfaction questionnaire was completed by the participants at the end of the evaluation sessions.

Once the sessions have been completed and the data have been collected, they were analyzed. Regarding the results of the tasks (number of correct responses and reaction times), differences were seen when modifying the probability of stimuli in the Go-NoGo task, for the different stimuli in the Stroop task and when varying the workload memory for the N-Back task. Certain features were also seen in the EEG recordings. In the Go-NoGo task the amplitude in some components is greater for the infrequent stimuli with respect to the frequent stimuli. In the Stroop task, it was noted that the amplitude of congruent stimuli is lower in certain time spans at Fz and Cz channels. Finally, for the N-Back task there were some temporal windows where the amplitude decreased as the workload memory increased. These results were discussed and compared with those of other similar studies.

Finally, general conclusions from the present work are drawn, highlighting the worsening of the results as the difficulty of the tasks increases and the modifications of the ERP waveforms as the parameters are varied. We conclude with some ideas for future research.

Keywords

Electroencephalography, sensorimotor rhythms, evoked potentials, artifacts, components, cognitive psychology tasks, Go-NoGo, Stroop, N-Back, ERP.

AGRADECIMIENTOS

Al Grupo de Ingeniería Biomédica de la Universidad de Valladolid, en especial a Víctor Martínez Cagigal por su preciada ayuda durante todo este tiempo y a Roberto Hornero por confiar en mi para realizar este proyecto.

ÍNDICE

Resumen del TFG.....	3
AGRADECIMIENTOS	5
CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN.....	9
1.1 Señales biomédicas	9
1.2 Electroencefalograma	10
1.3 Potenciales relacionados con eventos.....	11
1.4 Tareas de psicología cognitiva y estado de la técnica.....	11
1.4.1 Tarea Go-NoGo.....	12
1.4.1.1 Nami Kubo et al. (2021) – “The Effect of Prior Knowledge of Color on Behavioral Responses and Event-Related Potentials During Go/No-go Task”	13
1.4.1.2 Olivier Boucher et al. (2012) – “Response Inhibition and Error Monitoring during a Visual Go/No-Go Task in Inuit Children Exposed to Lead, Polychlorinated Biphenyls, and Methylmercury”	15
1.4.1.3 Hiroki Nakata et al. (2021) - Modality differences in ERP components between somatosensory and auditory Go/No-go paradigms in prepubescent children.	15
1.4.2 Tarea de Stroop	17
1.4.2.1 Yuan yao et al. (2015) – “Numerical processing efficiency improved in children using mental abacus: ERP evidence utilizing a numerical Stroop task”	18
1.4.2.2 Mehmet Ergen et al. (2014) – “Time–frequency analysis of the event-related potentials associated with the Stroop test”	18
1.4.2.3 Chang_Lin Li et al. (2011) – “EEG analysis for cognitive interference effects in a Stroop task”	19
1.4.3 Tarea N-Back.....	22
1.4.3.1 Yoshiaki Nakao et al. (2012) – “Temporal activities during P3 components on the working memory-related brain regions: N-back ERP study”	22
1.4.3.2 Valentina Pergher et al. (2018) – “N-back training and transfer effects revealed by behavioral responses and EEG”	23
1.4.3.3 Mahsa Alizadeh Shalchy et al. (2020) - N-Back Related ERPs Depend on Stimulus Type, Task Structure, Pre-processing, and Lab Factors.....	24
1.5 Objetivos del TFG	26
1.6 Estructura del TFG	26
CAPÍTULO 2 ANÁLISIS DEL EEG EN TIEMPO REAL Y ERPS.....	29
2.1 Introducción.....	29
2.2 Generación del EEG.....	29
2.3 Ritmos cerebrales	30
2.3.1 Descripción general de la anatomía del cerebro.....	30
2.4 Potenciales relacionados con eventos.....	33
2.5 Medida y registro del EEG.....	36
2.6 Adquisición y preprocesado de la señal.....	37

2.6.1	Adquisición de la señal	37
2.6.2	Preprocesado de la señal	38
CAPÍTULO 3 DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LOS EXPERIMENTOS.....		41
3.1	Objetivos de los experimentos.....	41
3.2	Explicación detallada de las tareas	41
3.2.1	Tarea Go-NoGo.....	41
3.2.2	Tarea de Stroop	42
3.2.3	Tarea <i>N</i> -Back.....	43
3.3	Arquitectura y Funcionamiento.....	44
3.4	Sujetos y protocolo de evaluación	46
3.4.1	Sujetos	46
3.4.2	Protocolo de evaluación	46
3.4.3	Cuestionario de satisfacción	47
CAPÍTULO 4 RESULTADOS.....		51
4.1	Análisis offline	51
4.1.1	Tarea Go-NoGo.....	51
4.1.2	Tarea de Stroop	54
4.1.3	Tarea <i>N</i> -Back.....	57
4.2	Resultados del cuestionario de satisfacción.....	59
CAPÍTULO 5 DISCUSIÓN.....		61
5.1	Análisis offline	61
5.1.1	Tarea Go-NoGo.....	61
5.1.2	Tarea de Stroop	64
5.1.3	Tarea <i>N</i> -Back.....	64
5.2	Cuestionario de satisfacción	66
5.3	Comparación con otros estudios	67
5.3.1	Go-NoGo.....	67
5.3.2	Stroop	69
5.3.3	<i>N</i> -Back.....	71
5.4	Limitaciones.....	73
CAPÍTULO 6 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS		75
6.1	Conclusiones	75
6.2	Tareas futuras.....	75
BIBLIOGRAFÍA.....		77

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

1.1 Señales biomédicas

La Ingeniería Biomédica es una disciplina encargada de aplicar los principios de la ingeniería a las ciencias de la vida. Combina los criterios de diseño de ingeniería y las herramientas de análisis provenientes de las matemáticas, la física y la química para la comprensión, definición y resolución de los problemas de la medicina, biología y las demás especialidades relacionadas [1]. El comienzo de esta materia depende del historiador, ya que, algunos investigadores consideran que comenzó hace más de 3.000 años cuando se encontró una prótesis de un dedo pulgar del pie en una tumba egipcia. En cambio, otros no consideran el origen de la Ingeniería Biomédica hasta el desarrollo de la instrumentación eléctrica y electrónica donde se podían registrar señales fisiológicas entre los años 1890 y 1910 [1].

El procesamiento de señales biomédicas se utiliza para extraer información relevante sobre un organismo o sistema biomédico para posteriormente ayudar al diagnóstico de ciertas enfermedades. Las señales biomédicas son observaciones de procesos fisiológicos en organismos (ritmos neuronales, ritmos cardiacos, imágenes de órganos, etc). Estas señales se pueden clasificar dependiendo de diferentes criterios. Algunos de ellos son: su descripción matemática, su origen y medio utilizado para su adquisición o sus características. Según su descripción matemática podemos diferenciar entre deterministas y aleatorias.

Las señales deterministas son aquellas que permiten ser representadas matemáticamente con una expresión cerrada, por lo tanto, sus valores futuros pueden ser predichos teniendo poca información del pasado. Estas señales deterministas pueden subdividirse en señales periódicas, cuasi periódicas y transitorias. En la realidad no hay señales deterministas debido a que siempre están acompañadas de algún ruido impredecible. Ocasionalmente estas expresiones se pueden aproximar por una función determinista.

Las señales aleatorias son aquellas que son imposibles de predecir su valor futuro aun sabiendo todos sus valores pasados. Esto es debido a la presencia de componentes aleatorios. Estas señales son muy abundantes en procesos físicos, por lo tanto, el análisis de su estacionariedad y ergodicidad es muy importante. Una señal es estacionaria si su media y su varianza permanecen constantes en el tiempo. La ergodicidad se produce cuando somos capaces de deducir todos los parámetros de la señal cuando se posee una sola muestra. Las señales biomédicas suelen ser aleatorias, debido a razones como el ruido generado por los instrumentos de medición o por la propia naturaleza aleatoria de las señales [1].

Según su origen podemos diferenciar las señales en eléctricas, acústicas, mecánicas, magnéticas, ópticas, bioquímicas, impedancias e imágenes.

Las señales eléctricas son las más conocidas. Suelen ser resultado de una actividad espontánea o la respuesta a un estímulo. Podemos subdividir estas señales eléctricas en función su localización: electroencefalograma (EEG) y el electrocorticograma (ECoG), que recogen la actividad del cerebro; el electromiograma (EMG), que recoge la actividad muscular; el electrooculograma (EOG), que recoge la actividad ocular; y el electrocardiograma (ECG), que recoge la actividad del corazón. En la Figura 1.1 podemos ver diferentes ejemplos de las principales señales biomédicas recogidas sobre el cuerpo humano [2].

Otra de las señales según su origen que podemos destacar son las señales magnéticas, en especial el magnetoencefalograma (MEG), refleja la actividad funcional del cerebro mediante la captación de campos magnéticos, y se emplea para estudiar la relación entre las estructuras cerebrales y sus funciones. Por último, podemos destacar la imagen por resonancia magnética funcional (fMRI, functional magnetic resonance imaging), las imágenes por resonancia magnética emplean principios físicos para ser obtenidas y permite localizar regiones cerebrales específicas.

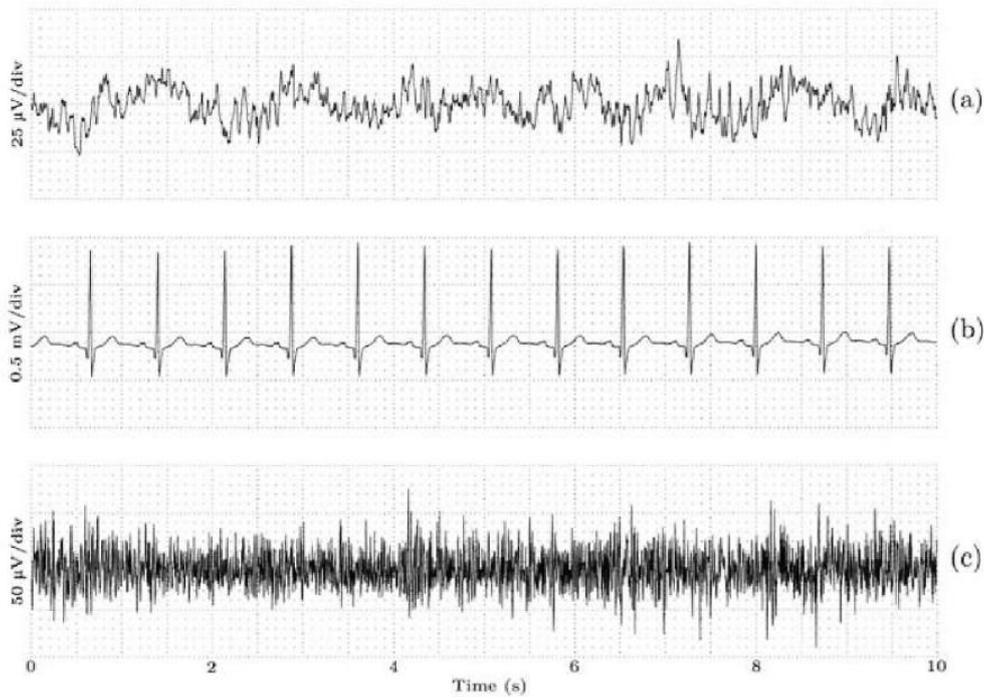


Figura 1.1 Ejemplos de las principales señales biomédicas recogidas sobre el cuerpo humano. (a): electroencefalograma (EEG), (b): electrocardiograma (ECG) y (c): electromiograma (EMG) [2].

Las señales biomédicas deben seguir una serie de transformaciones antes de ser analizadas. Estas transformaciones se aplican en diferentes etapas: la obtención y registro de las señales (muestreo, cuantificación y digitalización), la eliminación de artefactos y el procesado de la señal (filtrado) [2].

1.2 Electroencefalograma

Un EEG es una señal biomédica que registra la actividad bioeléctrica del cerebro de forma no invasiva [3]. Lo hace mediante la colocación de una serie de electrodos sobre el cuero cabelludo. El EEG es la actividad de millones de neuronas al mismo tiempo. Utilizando este método es imposible medir la actividad de una única neurona, debido a la baja amplitud, resultado de la atenuación sufrida por la señal. Esta atenuación se sufre por las capas que separan el córtex del electrodo (fluidos, huesos y piel). Las corrientes iónicas de las neuronas del cerebro tienen como resultado fluctuaciones de voltaje [3].

La amplitud de esta señal se relaciona con el nivel de sincronía con el que interactúan las neuronas. Una excitación sincronizada en un grupo de neuronas producirá una interferencia constructiva, que, a su vez, hará que la amplitud en la superficie del cráneo sea más alta. En cambio, si se produce una excitación asíncrona, la interferencia será destructiva haciendo que la señal EEG sea irregular y con amplitudes bajas. La amplitud de la señal puede ir desde los pocos μV hasta los $100\mu\text{V}$ [2].

La frecuencia de la señal EEG depende de la actividad realizada y suele relacionarse con la amplitud. En el EEG, típicamente la amplitud está inversamente relacionada con la frecuencia (a mayor frecuencia, menor amplitud; y viceversa). La amplitud de la señal tiende a atenuarse en respuesta a una estimulación, por lo tanto, cuando el cerebro está concentrado en alguna tarea concreta la señal tendrá una frecuencia elevada, generando una actividad asíncrona en las neuronas y por tanto haciendo que la amplitud sea menor. En la Figura 1.2 se pueden ver diferentes ritmos cerebrales dependiendo del estado del sujeto. Además, se puede apreciar una disminución de la frecuencia a medida que el sujeto está más dormido [2]. En cambio, cuando el

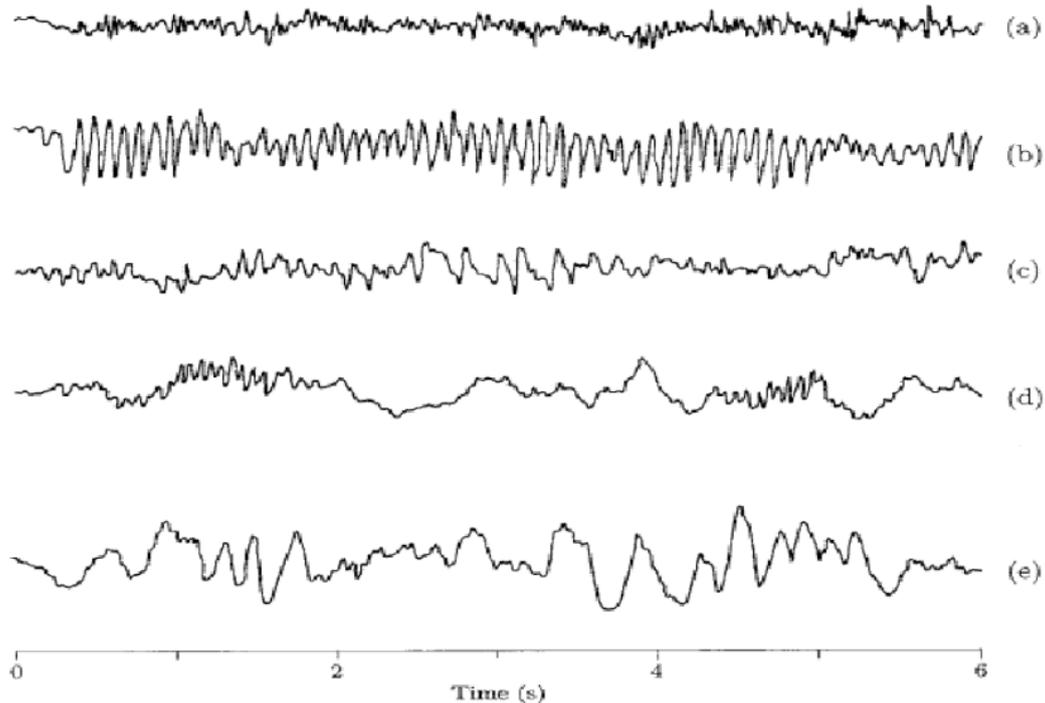


Figura 1.2 Ritmos electroencefalográficos observados durante el paso de vigilia a sueño profundo. (a) agitado, (b) relajado, (c) adormecido, (d) dormido, (e) sueño profundo [2].

cerebro está en un estado de adormecimiento, las neuronas estarán sincronizadas, haciendo que la frecuencia sea más baja y la amplitud más alta.

1.3 Potenciales relacionados con eventos

Los potenciales relacionados con eventos, (ERP, Event-Related Potentials) son cambios de voltaje producidos como respuesta a ciertos estímulos. Los ERPs contienen una serie de componentes característicos que se suelen producir antes de los 500 ms.

Entre todos las componentes hay dos principales que se asocian a los procesos cognitivos. Son las siguientes:

- N2. Es una componente negativa que se observa alrededor de los 200 ms después de la presentación del estímulo. Se cree que está relacionado con la inhibición de la respuesta porque suele ser mayor para una señal no objetivo que para una señal objetivo en las zonas fronto-centrales [4]. Se suele argumentar que esta componente refleja el proceso de control del conflicto más que la inhibición de la respuesta [5].
- P3. Se produce después de N2, cerca de los 300 ms después de la presentación del estímulo. Refleja una serie de mecanismos cognitivos como la confianza, el procesamiento de la novedad, la metacognición y la toma de decisiones, pero para este trabajo nos centramos en la influencia del conflicto y la inhibición para la tarea Go-NoGo, de Stroop y N-Back [6].

1.4 Tareas de psicología cognitiva y estado de la técnica

La psicología cognitiva es la rama que estudia los procesos mentales que intervienen en nuestra capacidad para razonar y pensar, asimilar nuevos conocimientos y resolver problemas [7]. Estos procesos cognitivos son determinantes tanto del aprendizaje informal como del escolar o académico. La psicología cognitiva ha investigado los mecanismos subyacentes al

comportamiento humano, es decir, qué procesos y estructuras internas desencadenan la respuesta humana. Algunos de estos procesos son:

- La percepción: es la capacidad que nos permite detectar un estímulo para su posterior análisis.
- La atención: es un mecanismo que pone en alerta a nuestro cerebro ante la presencia de estímulos o tareas que estamos realizando. El aprendizaje de la atención es sinónimo de maduración cognitiva.
- La memoria: es la capacidad que nos permite almacenar, organizar y recuperar la información. Según su funcionalidad se distinguen la memoria sensorial, a corto plazo, a largo plazo y la memoria de trabajo (WM).
- El lenguaje: es la capacidad propia del ser humano para expresar pensamientos o sentimientos. Se considera un gran instrumento de autorregulación cognitiva.
- El razonamiento: es el proceso mental superior por el cual somos capaces de extraer una hipótesis partiendo de unas premisas.

Para evaluar los procesos mentales mencionados previamente, se utilizan las tareas de psicología cognitiva, que sirven para caracterizar la cognición. El deterioro cognitivo tiene muchas causas. Algunas de ellas son: los efectos secundarios de los medicamentos, enfermedades en los vasos sanguíneos, depresión y demencia (la enfermedad del Alzheimer es el tipo de demencia más común). En el caso del presente Trabajo de Fin de Grado se utilizan las tareas Go-NoGo, de Stroop y *N-Back*.

A continuación, se realiza una breve introducción de estas tareas y se repasará el estado de la técnica actual y los últimos avances en el campo de la investigación, donde se vislumbran sus utilidades clínicas para la ayuda al diagnóstico de diversas patologías. Además, se mostrarán los distintos tipos de tareas a utilizar y sus características, dependiendo de los objetivos de estudio.

1.4.1 Tarea Go-NoGo

La tarea Go-NoGo es una prueba experimental donde partimos de la presentación de dos tipos de estímulos de manera aleatoria, a los que se debe actuar de diferente manera. En uno de los estímulos, considerado como “Go”, el sujeto debe realizar una acción (e.g., presionar una tecla). En el otro, considerado como “NoGo”, el sujeto no debe realizar ninguna acción.

Hay gran variedad de diseños, dependiendo del objetivo a investigar y de los gustos del diseñador. En nuestra tarea, los estímulos “Go” y “NoGo” se mostrarán visualmente y el sujeto deberá responder realizando una pulsación sobre la barra espaciadora del teclado cuando vea un estímulo “Go” y no hacer nada cuando sea “NoGo”. La finalidad de estas tareas es medir la atención sostenida del sujeto, ya que es necesario que este preste atención al tipo de estímulo, qué debe responder y además hacerlo con la mayor rapidez posible.

La tarea Go-NoGo se puede diseñar de diferentes maneras según los objetivos de nuestra investigación, por lo que podemos modificar bastantes características o parámetros. A continuación, se realizará una explicación más detallada de esas modificaciones:

- El tipo de estímulo según la percepción del sujeto. Puede ser visual, auditivo, sensoriomotor o una mezcla de ambos. Uno de los estudios donde se realiza una tarea Go-NoGo de manera auditiva es el de G. Shahaf et al. (2015) [8].
- El tipo de acción que se debe realizar ante cada estímulo. Puede ser una pulsación, hablar, no hacer nada o una mezcla de todas ellas. Cuantas más acciones diferentes haya, mayor

será la dificultad y por tanto habrá mayor posibilidad de fallo y los tiempos de reacción serán mayores.

- La forma de la respuesta, que puede ser natural (pulsar cuando aparece un Go) o contraria (pulsar cuando aparece un NoGo).
- El porcentaje de Go y de NoGo que habrá en la prueba. Suele haber tres opciones: en la primera, el estímulo Go aparece con mayor frecuencia; en la segunda, los dos estímulos aparecen con la misma frecuencia; en la tercera, el estímulo NoGo aparece con mayor frecuencia.
- La forma de mostrar el estímulo. Si lo hacemos de manera visual, podemos mostrar la imagen referente al Go con un color verde o azul (colores que los sujetos pueden asociar al Go) o mostrarlo de color rojo (color que la gente asocia al NoGo) [9].

A continuación, se realiza una revisión del estado de la técnica donde se detallan diferentes estudios en los que se utilizan los ERP medidos mientras se realiza la tarea Go-NoGo, donde se verá cómo se han desarrollado las tareas y los parámetros antes comentados, los diferentes objetivos y los resultados obtenidos.

1.4.1.1 Nami Kubo et al. (2021) – “The Effect of Prior Knowledge of Color on Behavioral Responses and Event-Related Potentials During Go/No-go Task”

Comenzamos con el estudio de Nami Kubo et al. (2021) [6], donde se estudia el efecto del conocimiento previo del color sobre las respuestas conductuales y los potenciales relacionados con eventos durante la tarea Go-NoGo. En este estudio se investigó cómo la forma de mostrar el estímulo afecta a los tiempos de reacción (RT) y a los ERP. Para dicha tarea, se establecieron diferentes colores para los casos Go y NoGo, con el objetivo de determinar cómo el conocimiento previo de las señales de los semáforos (el color azul indica que el semáforo está abierto, “Go”, y el rojo que está cerrado, “NoGo”) por parte de los sujetos afecta al estudio (en Japón, los semáforos utilizaban el color azul en lugar del verde). Se realizaron diferentes pruebas, estableciendo el color azul para Go y rojo para NoGo (al igual que los semáforos de tráfico) en la primera y el color rojo para Go y azul para NoGo (al contrario que los semáforos) en la segunda. Además, se modificó el porcentaje de Go y NoGo por cada prueba (30 %, 50 % y 70%), dando lugar a seis pruebas diferentes. En el caso de nuestra tarea, no modificamos el color de los estímulos mostrados, pero si modificamos el porcentaje de estos [6].

Utilizando estas pruebas se calcularon los RTs y las amplitudes N2 y P3 a partir de los datos del ERP. Los resultados mostraron que el RT era más rápido cuando se respondía a la señal de luz azul que a la roja y también era más lento con una menor probabilidad de Go. Estos tiempos quedan reflejados en la Figura 1.3. En general, la amplitud N2 fue mayor en el estímulo Go rojo que en el de Go azul y en el estímulo NoGo rojo que en el de NoGo azul. Además, la amplitud de P3 fue mayor en el estímulo NoGo rojo que en el de NoGo azul, estos análisis de la amplitud de la señal se pueden ver en la Figura 1.4.

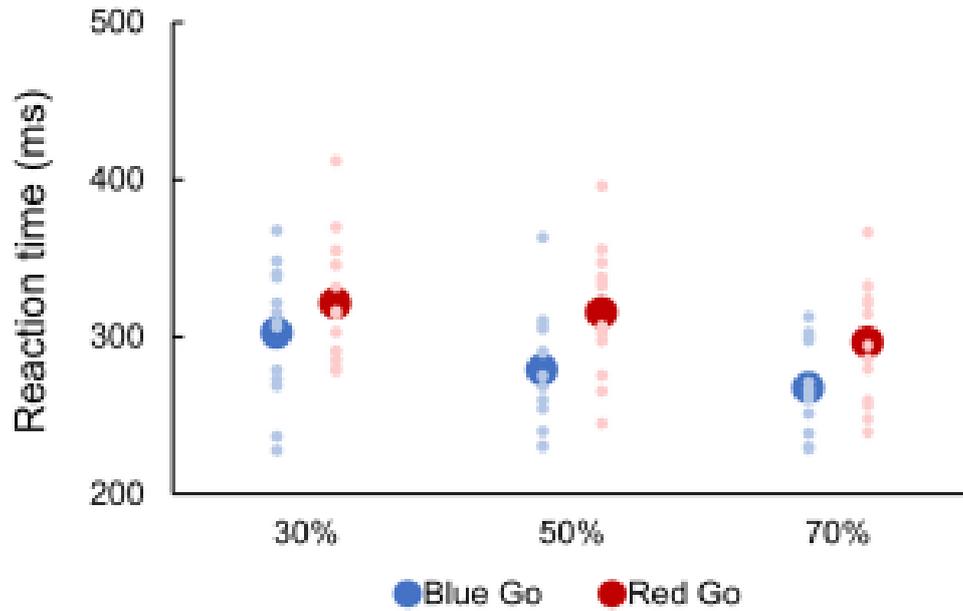


Figura 1.3 Tiempos de reacción para los diferentes estímulos [6].

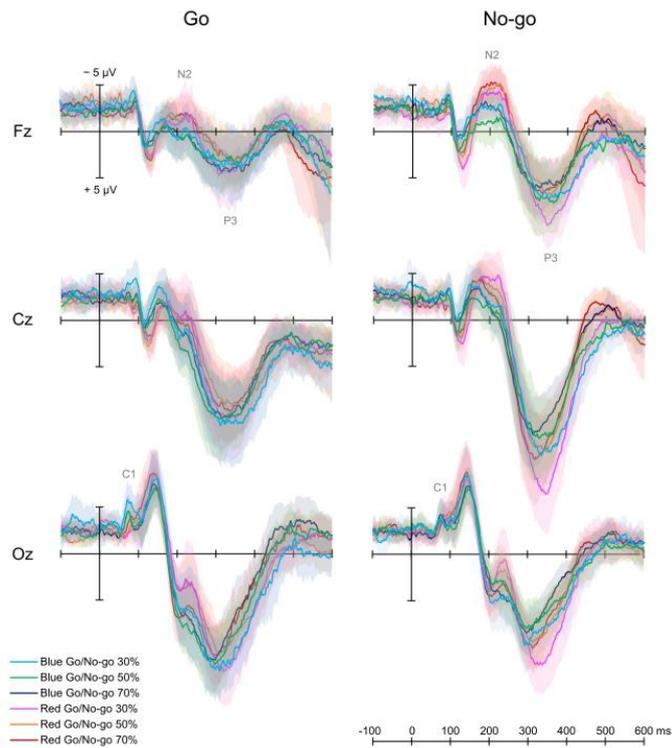


Figura 1.4 Señales ERP para los canales Fz, Pz y Oz para las diferentes variantes de la tarea [6].

Este estudio permite comprender mejor el efecto del conocimiento previo del color en las respuestas conductuales y sus mecanismos neuronales subyacentes [6].

1.4.1.2 Olivier Boucher et al. (2012) – “Response Inhibition and Error Monitoring during a Visual Go/No-Go Task in Inuit Children Exposed to Lead, Polychlorinated Biphenyls, and Methylmercury”

En el siguiente estudio se utiliza una tarea Go-NoGo para estudiar la correlación neurofisiológica del déficit en la inhibición de respuestas y monitorización del error asociados a la exposición al plomo, bifenilos, policlorados y metilmercurio. Para ello, se utilizan los ERPs en muestras de niños inuit en edad escolar del Ártico de Quebec. Dichas sustancias son contaminantes neurotóxicos que están relacionados con el deterioro de la inhibición de la respuesta [10].

En dicho estudio, se evaluó a 212 niños inuit con una edad media de 11,3 años en un paradigma visual de Go-NoGo. Para el paradigma se indicó a los sujetos que debían realizar una pulsación con el dedo índice de la forma más rápida posible y precisa para todas las letras presentadas individualmente (estímulo Go), a exclusión de la “X” (estímulo NoGo). Los estímulos aparecían visualmente durante 500 ms con intervalos aleatorios entre estímulos de 1,2 a 1,5 segundos. En el primer bloque se mostraban 40 estímulos Go a modo de ensayo, y es en el segundo bloque cuando se mostraban 126 estímulos Go (70%) mezclados con 54 de NoGo (30%), que fueron los utilizados para sacar los resultados [10].

Se analizaron las concentraciones de plomo (Pb), bifenilos policlorados (BPCs) y mercurio en muestras de sangre. Se llevaron a cabo análisis de regresión múltiple jerárquica para examinar las asociaciones de los niveles de contaminaciones con el rendimiento en la tarea Go-NoGo (tiempo de reacción medio, porcentaje de Go correcto, porcentaje de NoGo correcto) y cinco componentes de ERP (N2, P3, negatividad relacionada con el error, positividad del error (Pe) y positividad de la respuesta correcta (Pc)) después de controlar las variables de confusión [10].

Una vez realizadas las pruebas se obtuvo, como resultado, que las concentraciones actuales de Pb en sangre se asocian con mayor tasa de respuestas incorrectas ante estímulos NoGo y con la disminución de las amplitudes de P3. Las concentraciones actuales de BPC-153 en plasma se asociaron con tiempos de reacción más lentos y con amplitudes reducidas de los potenciales relacionados con la respuesta Pe y Pc. Las concentraciones de Hg no se relacionaron con ningún resultado en esta tarea, pero mostraron interacciones significativas con otros contaminantes en ciertos resultados. En la Figura 1.5 se puede ver una representación de los ERPs, donde se comparan sujetos con bajos y altos niveles de Pb [10].

La conclusión de dicho estudio sugiere que la exposición al Pb durante la infancia deteriora la capacidad del niño para asignar los recursos cognitivos necesarios para inhibir correctamente una respuesta dominante, lo que resulta en un aumento de la impulsividad. Por el contrario, la exposición postnatal al BPC, parece afectar a los procesos asociados a la monitorización del error, un aspecto de la regulación conductual necesario para adaptarse adecuadamente a las demandas cambiantes del entorno, lo que se traduce en una menor eficiencia en las tareas [10].

1.4.1.3 Hiroki Nakata et al. (2021) - Modality differences in ERP components between somatosensory and auditory Go/No-go paradigms in prepubescent children.

En este estudio Hiroki Nakata et al. (2021) estudiaron las diferencias en los componentes de ERP entre paradigmas somatosensoriales y auditivos probando una tarea Go-NoGo con niños prepúberes (aún no han llegado a la pubertad) con una edad media de 10 años y medio. Investigaron la diferencia en los componentes N2 y P3, además de evaluar la relación entre las respuestas conductuales (tiempo de reacción, variabilidad del tiempo de reacción y tasas de error en estímulos Go y NoGo) y las amplitudes y latencias de N2 y P3 durante la tarea Go-NoGo [11].

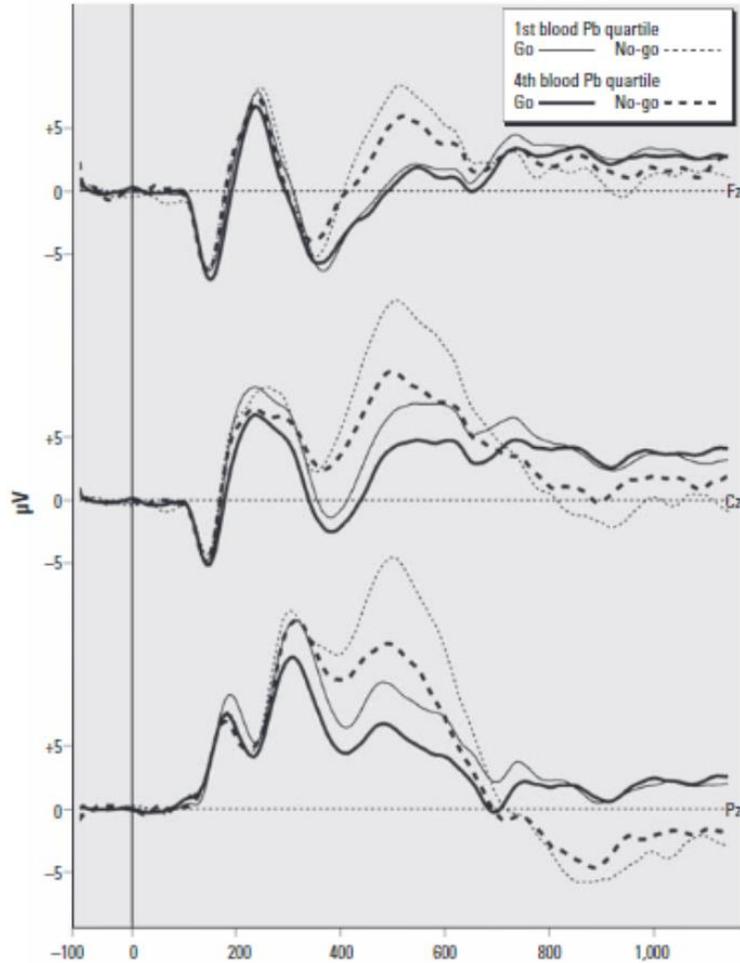


Figura 1.3 Promedio general de los ERP de la tarea Go-NoGo para los electrodos de la línea media (Fz, Pz y Cz), comparando participantes con poca concentración de Pb en sangre con participantes con alto nivel de Pb en sangre para los estímulos Go y NoGo [10].

Para la prueba Go-NoGo somatosensorial, el estímulo Go se aplicaba sobre el segundo dedo de la mano izquierda y el estímulo NoGo sobre el quinto dígito de la mano izquierda con electrodos de anillo. Se aplicaba un pulso de onda cuadrada constante de 0,2 ms de duración con una intensidad del doble a la del umbral sensorial [11]. Para la tarea auditiva los estímulos se aplicaban binauralmente (por los dos oídos) a través de auriculares durante 500 ms, estos tonos tenían 1.500 (Go) y 1.000 Hz (NoGo). Los sujetos debían responder pulsando un botón con el pulgar derecho lo más rápido posible ante los estímulos Go. Los estímulos Go y NoGo aparecían aleatoriamente con la misma probabilidad cada 2 segundos. Cada sesión comprendía 120 estímulos (60 Go y 60 NoGo), una vez realizada una prueba de practica de 20 estímulos [11].

Realizada la prueba se comparan las formas de onda de los ERPs correspondientes a los estímulos Go y NoGo para ambas pruebas (somatosensorial y auditiva). Los resultados de dichas pruebas dan como resultado una latencia máxima más corta de la componente N2 durante las pruebas somatosensoriales en la respuesta NoGo. La amplitud máxima de la componente P3 fue mayor para las pruebas somatosensoriales, mientras que la latencia máxima de P3 fue más corta. Para las pruebas auditivas se detectó correlación entre el tiempo de reacción y la amplitud máxima de la componente P3 para el estímulo NoGo y entre la variabilidad del tiempo de reacción y la latencia máxima de la componente P3 para el estímulo NoGo. También se observó correlación entre el error al pulsar en un estímulo NoGo y la latencia máxima de la componente N2 para las

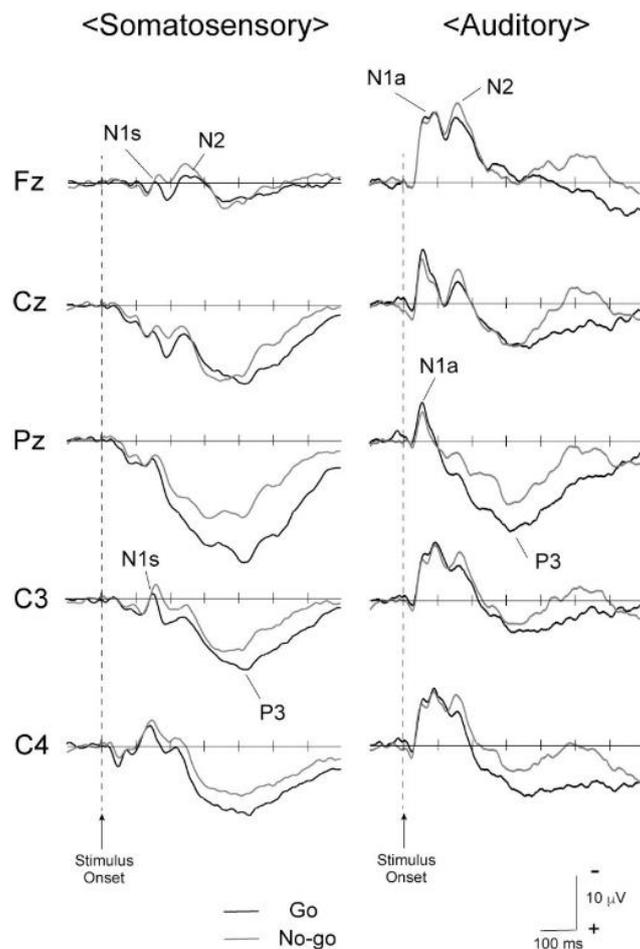


Figura 1.4 Formas de onda de los ERPs promediados en todos los participantes correspondientes a los estímulos Go y NoGo de la prueba somatosensorial y la prueba auditiva. La parte superior se muestra como negativa y la inferior como positiva [11].

pruebas somatosensoriales. En la Figura 1.6 podemos ver las diferentes formas de onda de los ERPs promediada de todos los participantes para las dos pruebas [11].

1.4.2 Tarea de Stroop

La tarea de Stroop se produce en el sujeto cuando realiza una prueba en la que debe indicar el color de la tinta con la que está escrita una palabra, que no coincide con su significado (Stroop-PC). Esta prueba atencional evalúa la habilidad del usuario para resistir la interferencia de tipo verbal, por lo que es adecuada para medir la atención selectiva y la percepción [12]. En dicha tarea se precisa la ejecución en un proceso controlado de una tarea novedosa, mientras se debe impedir la intrusión de un proceso automático. Esto ocurre cuando el significado de la palabra interfiere en la tarea a nombrar, en este caso el color de la tinta en el que está escrita la palabra. Se trata de una herramienta de tamizaje para el diagnóstico de patologías del desarrollo y adquiridas (como trastornos del espectro autista, traumatismos craneoencefálicos, síndrome de Tourette, Trastorno por déficit de atención e hiperactividad) [13] [14].

La tarea de Stroop puede que no tenga tantas variantes como puede tener la tarea Go-NoGo, pero sí se pueden modificar ciertos parámetros o características. En esta tarea podemos tener condiciones congruentes (el color de la tinta coincide con la palabra escrita, e.g., se escribe “rojo” con tinta roja), incongruentes (el color de la tinta no coincide con la palabra, e.g., se escribe “rojo” con tinta azul) y de control (la palabra no tiene relación con ningún color, e.g., se escribe “casa” en amarillo [15]).

1.4.2.1 Yuan yao et al. (2015) – “Numerical processing efficiency improved in children using mental abacus: ERP evidence utilizing a numerical Stroop task”

En el estudio de Yuan Yao et al. (2015) se utilizó para comprobar si el entrenamiento a largo plazo del cálculo mental basado en el ábaco (CMA) mejoraba la eficiencia del procesamiento numérico y en qué etapa aparecía el efecto. En dicho estudio se utilizó una tarea de Stroop numérica, se eligieron doce pares de números arábigos como estímulos (2-7, 3-8, 7-2, 8-3, 2-3, 7-8, 3-2, 8-7, 2-2, 3-3, 7-7, 8-8) los cuales podían aparecer, individualmente con diferente tamaño, siendo una fuente de 40, 45 o 50. Para la tarea NC (numerical magnitude) los sujetos debían indicar qué valor de la pareja era numéricamente mayor, en cambio en la tarea PC (physical size) los sujetos debían indicar el número físicamente mayor, apareciendo casos congruentes, incongruentes y neutros. Los sujetos tenían que pulsar un botón en el lado izquierdo o derecho dependiendo del número que quisieran indicar [16].

1.4.2.2 Mehmet Ergen et al. (2014) – “Time–frequency analysis of the event-related potentials associated with the Stroop test”

En el siguiente estudio, perteneciente a Mehmet Ergen et al. (2014), se investigan los ERPs generados por la prueba de Stroop. Para ello, se recogieron datos de EEG de 23 voluntarios sanos mientras realizaban esta tarea [17].

En dicha tarea, los estímulos eran tres nombres de colores en turco presentados en letras mayúsculas con condiciones congruentes e incongruentes: "KIRMIZI" (ROJO), "MAVİ" (AZUL), "YEŞİL" (VERDE). Todos los estímulos se presentaron en el centro de una pantalla de ordenador sobre un fondo gris. La prueba consistió en 60 estímulos congruentes y 60 incongruentes en orden aleatorio. Se pidió a los participantes que indicaran el color de la fuente pulsando uno de los tres botones del ratón del ordenador de la siguiente manera: botón izquierdo para el color rojo, botón central para el color azul, y botón derecho para el color verde con sus dedos índice, medio y anular, respectivamente. Todos los sujetos utilizaron su mano derecha (mano dominante) para manejar el ratón. Cada estímulo aparecía en la pantalla hasta que el participante respondía, y el siguiente estímulo aparecía 1,5 s después de la respuesta. Se dijo a los participantes que la tarea requería tanto velocidad como precisión [17].

En cuanto a los resultados, el tiempo medio de respuesta en la condición incongruente fue significativamente más largo que en la condición congruente (760,43 y 622,14 ms respectivamente). Los porcentajes de respuestas correctas en los estímulos congruentes fueron mayores que en los incongruentes (99,13% y 94,35%) [17].

Se comparan los datos de las condiciones congruentes e incongruentes. En la condición incongruente, la onda N450 era más negativa y la amplitud de la onda lenta tardía era más positiva. En el plano de tiempo-frecuencia, la amplitud de la banda theta (0-4 Hz) en la zona fronto-central (300-700 ms) fue mayor en la condición incongruente. La amplitud para el espacio temporal de 250 a 600 ms fue mayor en la condición congruente, especialmente en las regiones parieto-occipitales [17].

Se observaron los picos P100, N100, P200, N140, N200, P300 y N450. La amplitud del N450 fue más negativa en la condición incongruente. El N450 fue más negativo en los electrodos frontales y la diferencia de amplitud entre las dos condiciones fue pronunciada en la región parietal. En la condición incongruente, hubo un desplazamiento positivo sostenido dentro del período post-P300 (550- 950 ms). En la Figura 1.7 se pueden ver los ERPs obtenidos para cada condición. En la ventana temporal de 550-650 ms, la amplitud media fue significativamente mayor en la condición

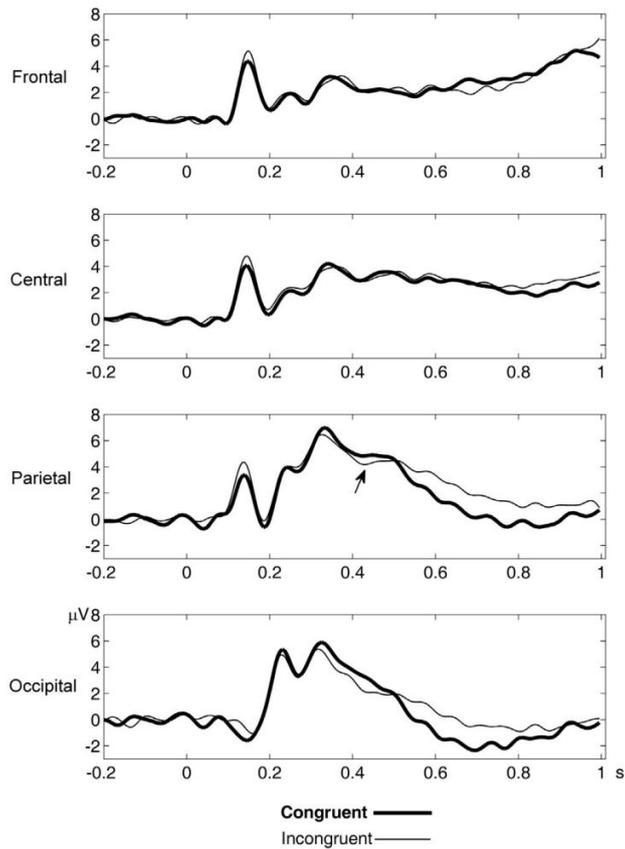


Figura 1.5 Formas de onda de ERP de media general obtenidas para las condiciones de estímulos congruentes e incongruentes. Se presentan las formas de onda promedio de los electrodos de la línea media y lateral para cada una de las regiones frontal, central, parietal y occipital. La flecha señala la onda N450 [17].

incongruente. No se encontraron diferencias significativas en P100, N100, P200, N140, N200 y P300 entre las dos condiciones.

En los resultados, la componente N2b (onda negativa sobre los 200 ms) estaba significativamente modulado con la cantidad de interferencia y correlacionado con el tiempo de respuesta. El N2b era alto y el tiempo de respuesta era lento cuando el estímulo de la palabra de acción era incongruente con la acción de respuesta requerida. Estos resultados implican que el componente relativamente temprano del ERP, N2b, puede ser detectado cuando el significado de un estímulo actual está en conflicto con una acción de respuesta requerida y esta señal podría ser útil para otros propósitos mecánicos como las aplicaciones BCI [17].

1.4.2.3 Chang_Lin Li et al. (2011) – “EEG analysis for cognitive interference effects in a Stroop task”

El presente estudio, Chang Lin Li et al. (2011) tenían como objetivo evaluar el conflicto perceptivo cerebral y los diferentes tiempos de reacción utilizando una tarea Stroop modificada. Se cambió la tarea Stroop utilizando palabras de color con dos respuestas motoras relevantes: pulsar un botón y pisar un pedal. Se analizaron los ERPs de 13 sujetos y sus tiempos de respuesta para tres condiciones experimentales (congruente, incongruente y neutra) con dos tipos de respuestas motoras [18].

Antes del experimento, se entrenó a los sujetos para que ejecutaran una determinada conducta motora en función del color de la señal de respuesta (pulsar el botón para el círculo amarillo y pisar el pedal para el círculo azul) en una sesión de entrenamiento. Este entrenamiento hizo que

los sujetos se familiarizaran con los dos tipos de acciones. Para el experimento, crearon la tarea Stroop, en la que el conflicto estímulo-respuesta se manipulaba mediante la congruencia entre las frases de acción y las respuestas de acción requeridas con las señales de color. Los sujetos tenían que realizar una acción de acuerdo con el color del estímulo, independientemente de lo que este significara. Por ejemplo, tenían que pulsar un botón siempre que vieran un estímulo de color amarillo, aunque el estímulo fuera la frase de acción del pie "pisar un pedal". La frase de acción coincidía con una acción de respuesta para los estímulos congruentes y la frase de acción no coincidía con una acción para los estímulos incongruentes. Además, se añadieron estímulos neutros, en los que se presentaron varios símbolos no verbales (“@@@ @@@”, “### ###”, “\$\$\$ \$\$\$” o “%%%%%%%%”) con los dos colores. Las 6 condiciones experimentales diferentes (congruente, incongruente, neutral × botón, pedal) se presentaron en 12 bloques de 30 estímulos y el orden de presentación fue aleatorio. Un estímulo comenzaba con una cruz de fijación durante 2 s e inmediatamente seguía un estímulo, presentado durante 1 s. Se intercaló un intervalo entre estímulos de 2 s y 4 s entre los estímulos [18].

Se analizaron los tiempos de reacción para las 6 condiciones experimentales, excluyendo las respuestas erróneas y la reacción rápida de anticipación (RT <100ms). La reacción rápida de anticipación se produce cuando el sujeto reacciona antes de percibir el estímulo, el sujeto es incapaz de analizar un estímulo en menos de 100 ms, por lo que se eliminan las respuestas anteriores a ese tiempo. Las condiciones incongruentes requieren un tiempo de reacción más largo. La precisión media obtenida fue 0,99 para los estímulos congruentes y 0,975 para los estímulos incongruentes, tal y como se muestra en la Figura 1.8 [18].

En la Figura 1.9, se presenta el ERP para las condiciones congruentes e incongruentes para todas las zonas de registro. En cada una, la región marcada con una red dispersa indicaba la época que mostraba una diferencia significativa entre las dos condiciones. En la mayoría de los sitios, el período de tiempo de 250 a 300ms mostró la diferencia como en una onda negativa. Este componente del ERP ha recibido varios nombres, N2, N2a y N2b, que se han encontrado en otras tareas de interferencia cognitiva como la tarea Go-NoGo. La diferencia era más evidente en el lóbulo frontal y disminuía progresivamente hasta el lóbulo occipital. Estas componentes (N2b) se han interpretado como un fenómeno cognitivo puro. Un punto valioso en los hallazgos actuales es que el componente negativo temprano se observa incluso en la tarea de Stroop motora. Esto implica que la interferencia entre el estímulo y la acción motora se produce en la fase temprana de planificación motora, no en la fase posterior de ejecución. Por lo tanto, los mecanismos neuronales implicados en la planificación motora real y el procesamiento semántico de la frase de acción parecen estar superpuestos. Esto puede implicar que los procesos motores pueden verse afectados por la comprensión del lenguaje, aunque el proceso motor y el proceso del lenguaje se hayan considerado como módulos cerebrales totalmente independientes [18].

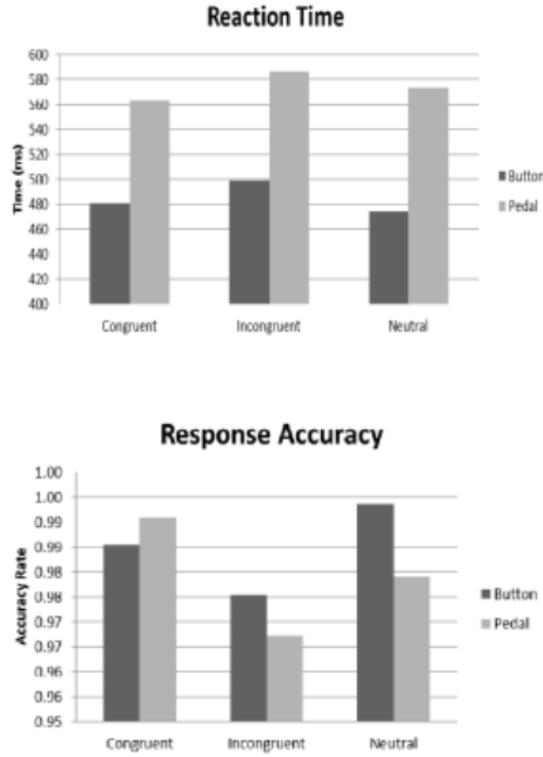


Figura 1.7 Graficas del tiempo de reacción y de las precisiones de respuesta para los diferentes casos (congruente, incongruente y neutro) de las diferentes acciones (pisar pedal y pulsar un botón) [18].

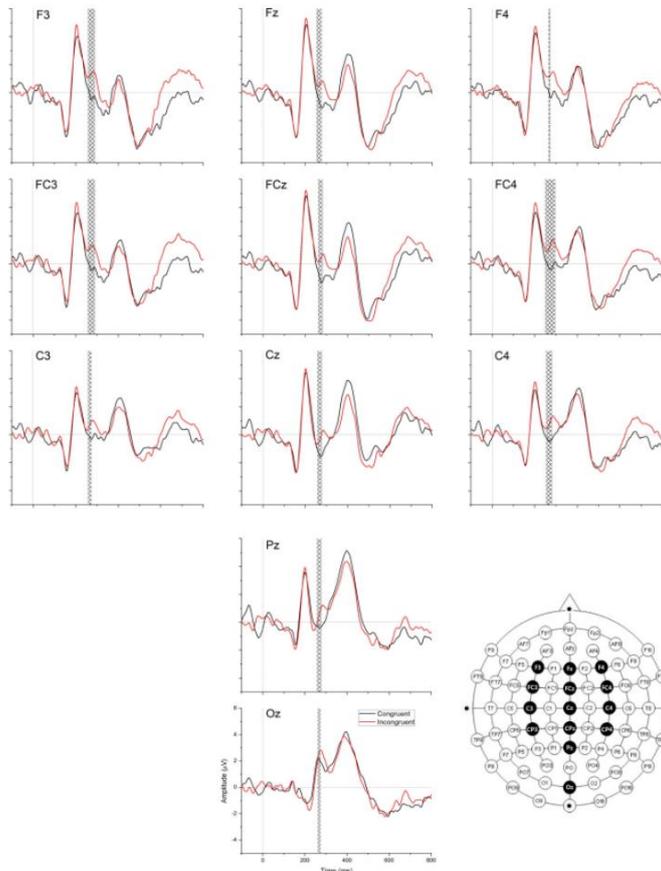


Figura 1.6 Señales ERP para los diferentes canales para las acciones congruentes e incongruentes [18].

1.4.3 Tarea *N*-Back

En la tarea *N*-Back el sujeto recibe una serie de estímulos y debe indicar si el estímulo actual coincide con el estímulo mostrado *N* pasos atrás. El factor *N* añade complejidad a la tarea, ya que cuanto mayor sea, mayor será el número de estímulos que tendrá que recordar el sujeto y por tanto mayor será la dificultad [19]. Esta tarea es útil a la hora de medir la carga de trabajo de la memoria, al variar los diferentes valores de *N*. Esta tarea fue desarrollada para investigar sobre la memoria a corto plazo, además sirve para medir la inteligencia fluida y la concentración [19]. No tiene una implementación única, ya que los estímulos pueden cambiar. Pueden ser visuales o auditivos, y a su vez pueden cambiar entre una secuencia de imágenes, de figuras, de letras o de palabras.

También se puede emplear la memoria espacial, identificando los estímulos según su posición en una rejilla o matriz [20]. Existen variantes más elaboradas de esta prueba como es el Dual-*N*-Back, donde se introduce la audición [21].

Al igual que las otras tareas, la tarea *N*-Back se puede implementar de diferentes maneras según los objetivos de estudio. Algunos de los parámetros utilizados en la tarea son el rango de valores de *N*, típicamente de 1 a 3, aunque puede llegar de 0 hasta 5 en algunos estudios [22]; otro parámetro puede ser el tipo de asignación de *N*, en nuestro caso son letras, pero pueden ser números o imágenes; otro parámetro es el número de valores diferentes que tengamos, en el caso de utilizar letras este puede ir desde 3 o 4 letras hasta las 27 letras que tiene el abecedario; al igual que en las otras tareas otro parámetro es la acción realizada por el usuario tras un estímulo; el tiempo disponible para la respuesta de los sujetos; el tiempo de muestra de los estímulos. Una vez comentados los diferentes parámetros utilizados en esta tarea, exponemos algunos de los estudios en los que se utiliza y sus objetivos.

1.4.3.1 Yoshiaki Nakao et al. (2012) – “Temporal activities during P3 components on the working memory-related brain regions: *N*-back ERP study”

El estudio de Yoshiaki Nakao et al. (2012) [23] tiene como objetivo aclarar las actividades temporales de las regiones cerebrales relacionadas con la memoria de trabajo. Para realizar este estudio se analiza la componente P300 durante las tareas *N*-Back con un análisis de fuentes. P300 es una componente de ERP que se genera cuando el usuario realiza una tarea oddball (e.g., trata de determinar cuándo se produce un evento infrecuente que está camuflado entre estímulos frecuentes) [23].

Para este estudio se realizaron cinco tareas, la tarea de control (el sujeto debía observar los diferentes estímulos sin realizar ninguna acción, estos estímulos eran imágenes de fondo sin caracteres), 0-Back, 1-Back, 2-Back y 3-Back, en las cuales los estímulos eran secuencias pseudoaleatorias de caracteres japoneses y se mostraban durante 500 ms con un intervalo de 3 s entre estímulos. Se pidió a los sujetos que respondieran pulsando un botón lo más rápido posible, utilizando los pulgares dominantes, cuando apareciera un carácter objetivo. En cambio, se les pidió que no realizar la pulsación para los objetos de carácter no objetivo. En el caso de 0-Back se debía responder con una pulsación cuando apareciera una imagen elegida previamente por el sujeto. En la tarea 1-Back, 2-Back y 3-Back debían realizar una pulsación cuando la imagen coincidiera con la imagen mostrada *N* pasos atrás. Cada tarea se realizó en 5 conjuntos con 50 imágenes, cada serie contenía 15 objetivos, por lo que cada tarea tenía 75 objetivos. Las tareas se realizaron en el orden en el que se han explicado [23].

Se obtuvieron dos componentes P3 en las actividades P300; el P3 temprano y el P3 tardío. Las amplitudes de los picos correspondientes mostraron cambios de acuerdo con la carga de la memoria de trabajo. La P3 temprana, aproximadamente a 300 ms en Pz, y la P3 tardía, aproximadamente a 360 ms en Cz, se obtuvieron en las condiciones 0-Back, 1-Back, 2-Back y 3-Back. Para la amplitud de la P3 temprana, se reveló un efecto significativo de la carga de la memoria de trabajo. La amplitud del P3 temprano en Pz disminuyó significativamente a medida

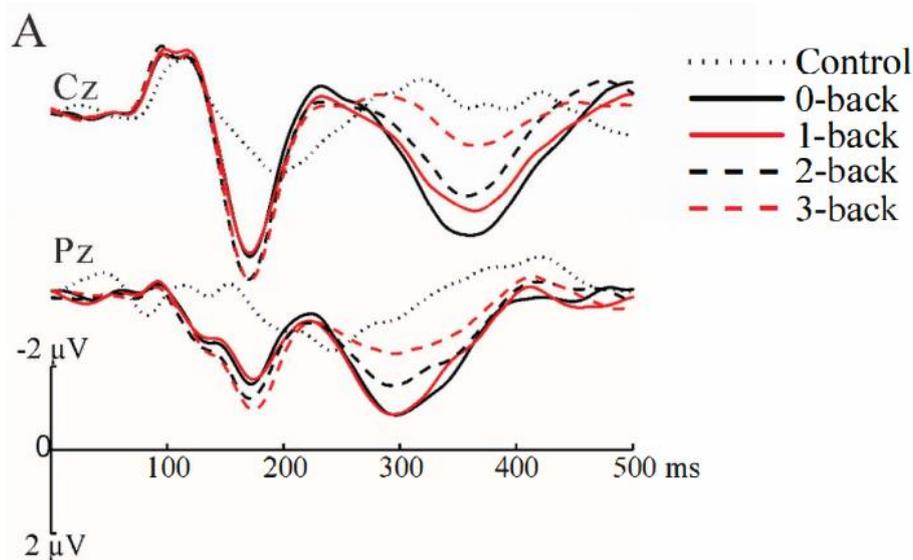


Figura 1.8 Formas de onda de ERP para las diferentes tareas de N-Back en los canales Cz y Pz [23].

que aumentó la carga de la memoria de trabajo. La amplitud del P3 tardío en Cz disminuyó significativamente a medida que aumentaba la carga de la memoria de trabajo. La Figura 1.10 muestra las formas de onda donde se pueden ver los resultados antes comentados [23].

1.4.3.2 Valentina Pergher et al. (2018) – “N-back training and transfer effects revealed by behavioral responses and EEG”

En el siguiente estudio, Valentina Pergher et al. (2018) se centran en el rendimiento de las funciones cognitivas. Este disminuye en los individuos con mayor edad en comparación con los jóvenes. Una solución a este problema sería el entrenamiento cognitivo. Este estudio investiga si este entrenamiento cognitivo mejora solo la tarea entrenada o también otras funciones cognitivas [24].

Esta investigación se centra en el análisis de los ERPs de la señal EEG, utilizando como tarea de entrenamiento de la memoria de trabajo la tarea N-Back. Se investiga la relación entre la componente P300 de ERP, el nivel de dificultad de la tarea y la precisión de la respuesta de la conducta y el tiempo de reacción en adultos sanos jóvenes y mayores [24].

Para los estímulos de la tarea N-Back, se utilizaron imágenes de objetos significativos que estaban presentes durante 1 segundo, seguidas de un intervalo de 2 segundos al que se añadía una fluctuación de 100 ms, en el cual se sustituye la imagen por una cruz de fijación. Se optó por imágenes coloridas que fueran fáciles de entender por todos los pacientes. Cuando la imagen era igual a la mostrada N pasos atrás los sujetos debían pulsar un botón del teclado (el 33% de las imágenes eran objetivos). Si la respuesta era correcta, aparecía una cara verde (retroalimentación visual) en la pantalla, y si era incorrecta, aparecía una cara roja. Las secuencias con idénticos niveles de dificultad (1- Back, 2- Back, 3-Back) se agruparon en bloques de 2 minutos en cuatro sesiones. Cada sesión incluía dos repeticiones de tres secuencias con un nivel de carga creciente (es decir, de 1 a 3-Back). En total, hubo ocho bloques. Para cada secuencia, había 60 estímulos, presentados en orden pseudoaleatorio, en la Figura 1.11 se muestra un ejemplo de secuencia. Se analiza el efecto del entrenamiento cognitivo examinando los datos conductuales (precisión, tiempo de reacción) de nuestros dos grupos de entrenamiento de sujetos jóvenes y mayores sanos durante 10 sesiones de entrenamiento [24].

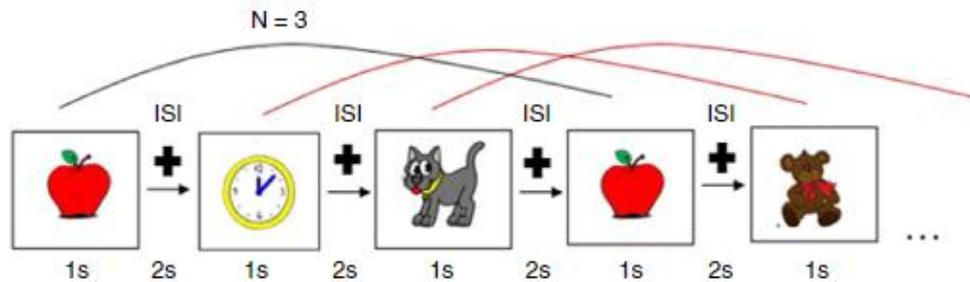


Figura 1.9 Ejemplo de secuencia con las diferentes imágenes mostradas y el tiempo transcurrido [24].

En cuanto a los resultados de este estudio, para los participantes jóvenes el RT disminuye con el número de sesiones de entrenamiento. Además, la precisión no aumentó de forma sustancial como resultado del entrenamiento. Al comparar las sesiones media y última, el rendimiento disminuye, probablemente debido al aburrimiento de los sujetos jóvenes. También se examinó la precisión y el RT durante el entrenamiento de *N*-back de los adultos mayores, encontrando un efecto significativo para el RT para todas las tareas, lo que indica que los sujetos se vuelven más rápidos con el entrenamiento, especialmente en las primeras cinco sesiones. En cuanto a la precisión, encontramos efectos significativos para 2-Back y 3-Back, aumentando la precisión con el entrenamiento. En cambio, no se encontró ninguna diferencia significativa entre las sesiones intermedias y las últimas, lo que indica que la precisión mejora con el entrenamiento, sobre todo en las tareas de 2 y 3, y entre las sesiones primera y media [24].

En cuanto a las amplitudes P300 de los electrodos de la línea media (Fz, Cz, Pz) en los adultos jóvenes, la amplitud P300 fue mayor para los niveles de *N*-back más fáciles (1 y 2-Back) y menor para el más difícil (3-Back). Estos datos apoyan la observación de que la amplitud P300 disminuye con el aumento de la carga/dificultad de la tarea, pero que con el entrenamiento *N*-Back, es posible invertir este fenómeno aumentando la amplitud P300 para la tarea 3-Back en comparación con las más fáciles (1 y 2-Back) [24].

Para adultos de edad avanzada, la amplitud P300 fue mayor para las tareas *N*-Back más fáciles (1 y 2-Back) y menor para la más difícil (3-Back). En este caso, después de entrenar a los adultos mayores, la amplitud P300 aumenta para la tarea más difícil (3-Back), lo que demuestra que la amplitud P300 disminuye con el aumento de la carga/dificultad de la tarea y que el entrenamiento *N*-Back puede cambiar la respuesta neuronal del sujeto [24].

La aplicación de un entrenamiento de la memoria de trabajo es una herramienta prometedora tanto para los adultos sanos como, en particular, para los sujetos de edad avanzada, ya que mostró diferencias fisiológicas y conductuales en la plasticidad cognitiva a lo largo de la vida y evidencias de beneficios en la tarea entrenada y efectos de transferencia cercana/lejana a otras funciones cognitivas [24].

1.4.3.3 Mahsa Alizadeh Shalchy et al. (2020) - *N*-Back Related ERPs Depend on Stimulus Type, Task Structure, Pre-processing, and Lab Factors

Este estudio permite ver la importancia del tipo de estímulo, la estructura de la tarea, los métodos de preprocesamiento y las diferencias en el entorno del laboratorio. Mahsa Alizadeh et al. (2020) se centran en ver dichas diferencias llevando a cabo nueve variaciones diferentes de una tarea *N*-Back, manipulando el tipo de estímulo y la estructura de la tarea, además de explorar el efecto del método de preprocesamiento y las diferencias en el entorno del laboratorio [25].

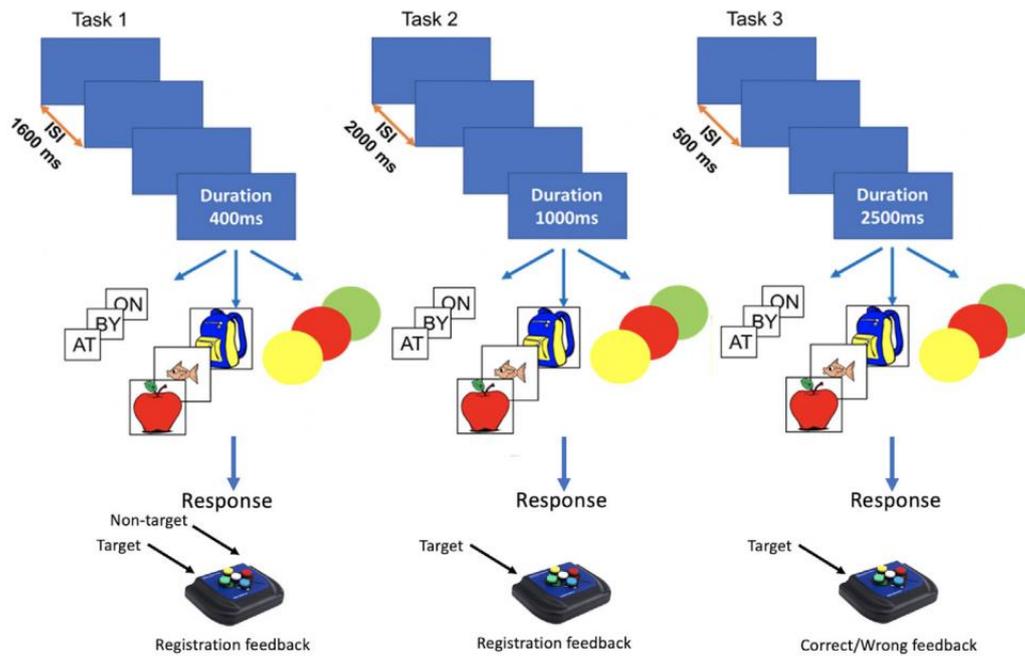


Figura 1.10 Representación gráfica de las características de la tarea *N*-Back para el tipo de estímulo, la duración, el intervalo entre estímulos [25].

En dicho estudio se incluyeron tres conjuntos de datos relativos a la tarea *N*-Back. El conjunto de datos 1 exploraba los posibles factores que afectarían a la morfología del ERP y a los resultados de la tarea *N*-Back. En el segundo conjunto de datos se estudiaron los subprocesos cognitivos practicados en el entrenamiento y los procesos mentales después de haber realizado 10 sesiones de entrenamiento. Para realizar las nueve variantes de la tarea *N*-Back se cruzaron tres estructuras de tareas con tres tipos de estímulos [25].

Para la primera estructura, los estímulos aparecían durante 400 ms con un tiempo entre estímulos de 1.600 ms, el sujeto debía de responder tanto a los estímulos objetivos como a los no objetivos. Durante los 1.600 ms aparecía una cruz de fijación blanca que se volvía azul cuando el sujeto respondía y roja cuando no lo hacía [25].

En la segunda estructura, los estímulos aparecían durante 1.000 ms con un tiempo entre estímulos de 2.000 ms. Los sujetos solo debían responder a los estímulos objetivos, cuando estos lo hacían aparecía la misma cruz blanca que en la estructura anterior [25].

En la tercera estructura, los estímulos aparecían durante 500 ms, con un tiempo entre estímulos de 500 ms. Los sujetos debían responder solo a los estímulos objetivo y recibían una respuesta de un círculo verde en caso de responder correctamente, y con un círculo rojo en caso de hacerlo de manera incorrecta [25].

Los tres tipos de estímulos eran: palabras (así, hacer, arriba), imágenes (manzana, pez y bolsa) y colores (rojo, verde y azul). En la Figura 1.12 podemos ver una representación gráfica de las características de cada tarea antes comentada [25].

Resumiendo, los resultados del estudio, no se demostró un efecto estadísticamente significativo del tipo de estímulo sobre la precisión. Pero sí se reveló un efecto significativo en la estructura de la tarea, mostrando una mayor precisión para la tarea 3 frente a la tarea 1 para todos tipos de estímulos y para la tarea 3 sobre la tarea 3 para las palabras y los colores. En definitiva existe un efecto altamente significativo de las tareas, pero el efecto es mucho menor para el tipo de estímulo [25].

1.5 Objetivos del TFG

El objetivo del presente Trabajo de Fin de Grado es diseñar, implementar y evaluar un conjunto de experimentos típicos de psicología cognitiva (tarea Go-NoGo, tarea de Stroop y tarea *N*-Back) en MEDUSA, un software de desarrollo de sistemas BCI, para posteriormente validar los experimentos mediante un equipo de EEG portátil, analizando los ERPs asociados a dichas tareas. Dichos experimentos se evaluarán con cinco sujetos de control. Para alcanzar el objetivo general se deben cumplir los siguientes objetivos específicos:

1. Familiarizarse con las tareas de psicología cognitiva y las técnicas de procesado de los registros EEG.
2. Realizar un repaso del estado de la técnica en cuanto al registro de EEG al realizar tareas de psicología cognitiva.
3. Diseñar y desarrollar las aplicaciones asociadas a las tareas de psicología cognitiva en Unity.
4. Analizar y comprender el funcionamiento de MEDUSA, un software de desarrollo de sistemas BCI creado por el Grupo de Ingeniería Biomédica (GIB) de la Universidad de Valladolid (UVa), para implementar las aplicaciones de psicología cognitiva en Python.
5. Realizar el registro EEG de los sujetos mientras realizan las tareas de psicología cognitiva.
6. Realizar el análisis offline de los registros obtenidos y evaluar los ERPs obtenidos, comparando las diferentes pruebas y los diferentes sujetos.
7. Discutir los resultados obtenidos y hacer una comparativa con los resultados de otros estudios.
8. Extraer conclusiones a partir de los resultados obtenidos.
9. Determinar posibles líneas futuras de investigación dentro del ámbito del estudio.

1.6 Estructura del TFG

El documento está formado por seis capítulos, los cuales se detallan a continuación:

En el primer capítulo, introducción, se describen las diferentes señales biomédicas y su clasificación atendiendo a distintas características de la señal. Se presenta el concepto de EEG junto con una breve historia, tras esto, se realiza una breve explicación de las tres tareas y su utilidad, acompañado de una revisión del estado de la técnica donde se revisan publicaciones científicas que analizan ERPs mientras se realizan las tareas de psicología cognitiva a implementar. Finalmente, se detallan los objetivos y estructura del presente trabajo.

En el segundo capítulo, análisis del EEG en tiempo real y ERPs, se explica la generación del EEG desde un punto de vista neuronal y los tipos de potenciales ERP. Se detallan los diferentes ritmos cerebrales, los potenciales relacionados con eventos y las diferentes formas de onda de los ERPs, y por último, se explica la metodología empleada en la medida y registro del EEG, tratando la adquisición mediante el estándar internacional 10-20 y el preprocesado de la señal.

En el tercer capítulo, diseño e implementación de los experimentos, se tratan los objetivos de cada tarea aplicada, junto a una detallada explicación. Se desarrolla la arquitectura y funcionamiento de las diferentes tareas. Por último, se incluyen los cuestionarios de satisfacción que deben realizar los sujetos una vez realizan las sesiones.

En el cuarto capítulo, resultados, se exponen todos los resultados obtenidos a lo largo del presente trabajo para todas las tareas, además de los resultados recogidos por los cuestionarios de satisfacción.

En el quinto capítulo, discusión, se discuten las tareas propuestas, los resultados obtenidos en el análisis y los resultados del cuestionario de satisfacción.

En el sexto y último capítulo, conclusiones y líneas futuras, se recopilan las principales ideas y conclusiones extraídas a lo largo de todo el Trabajo de Fin de Grado. Terminando con las líneas futuras de investigación que se pueden contemplar.

CAPÍTULO 2 ANÁLISIS DEL EEG EN TIEMPO REAL Y ERPs

2.1 Introducción

El cerebro humano es probablemente el órgano que más incógnitas ha causado al ser humano en su historia, debido a la complejidad de su funcionamiento. La comprensión del cerebro se ha visto ayudada por la técnica de la electroencefalografía (EEG), entre otras.

El EEG es una técnica electrofisiológica utilizada para registrar la actividad bioeléctrica cerebral mediante la colocación de electrodos sobre el cuero cabelludo. Es una de las técnicas más utilizadas en el estudio de la actividad cerebral, pues permite investigar las ondas cerebrales de manera fácil, con coste reducido y de forma no invasiva, facilitando enormemente el estudio del sistema nervioso central y ayudando a vincular la actividad cerebral con las funciones cognitivas y enfermedades [26].

El descubrimiento de las propiedades eléctricas del cerebro se atribuye al científico inglés Richard Caton (1842-1926). Al realizar el registro de la actividad eléctrica del cerebro de animales mediante el uso de un galvanómetro, Caton registró las fluctuaciones de la actividad eléctrica cerebral durante las horas de sueño y su ausencia después del fallecimiento. Más adelante Fritsch y Hitzig descubrieron que el cerebro humano puede ser estimulado eléctricamente. Fue en 1924 cuando Hans Berger, profesor de psiquiatría de la Universidad de Jena (Alemania), descubrió que las señales eléctricas cerebrales podían registrarse en el cuero cabelludo. En 1929, tras cinco años de estudio, Berger publicó el primero de sus 14 artículos sobre EEG, donde estableció la EEG como herramienta para el diagnóstico clínico y la investigación del cerebro. Su primer informe de registro de EEG en humanos fue de uno a tres minutos grabado sobre papel fotográfico. En 1938, comenzó a recibir reconocimiento internacional, y aunque el gobierno alemán cerró su laboratorio obligándole a jubilarse, su trabajo empezó a ser replicado por otros investigadores, apareciendo nuevos laboratorios de EEG en Europa y Estados Unidos, aumentando así la investigación en el campo de EEG [27].

La evolución del EEG ha sido un proceso que continuamente ha traído nuevos desarrollos, experimentos y estudios computacionales para el descubrimiento, reconocimiento, diagnóstico y tratamiento de numerosas anomalías neurológicas y fisiológicas del cerebro y del resto del sistema nervioso central (CNS). Actualmente, la forma de registro de EEG se realiza de manera no invasiva utilizando dispositivos equipados con aplicaciones de procesamiento de señales, electrodos de medida precisos y suficiente memoria para registros de varias horas de duración [27].

En este capítulo se explicará cómo se genera la señal de EEG desde el origen, se detallarán los principales ritmos cerebrales y los potenciales relacionados con eventos, el proceso de adquisición y registro de la señal EEG y, por último, el preprocesado de esta señal.

2.2 Generación del EEG

El sistema nervioso central está compuesto por células nerviosas y células gliales, que están distribuidas entre las neuronas. Las células nerviosas están formadas por axones, dendritas y cuerpos celulares. Estas responden a estímulos, transmitiendo información. Los axones transmiten los impulsos eléctricos. Las dendritas son prolongaciones que están conectadas a los axones o dendritas de otras células, y están encargadas de recibir o transmitir las señales de otros nervios. A continuación, en la Figura 2.1 podemos ver la estructura de la neurona con las partes nombradas anteriormente [27].

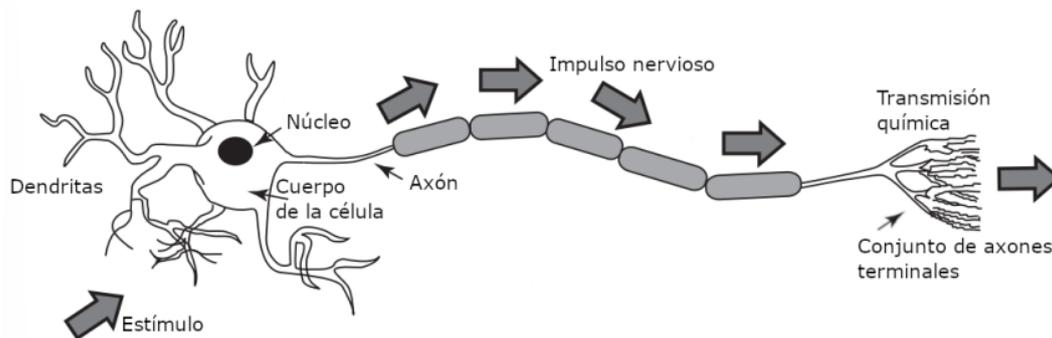


Figura 2.1 Estructura de una neurona [27].

La señal EEG es la medición de las corrientes que circulan en las dendritas de gran cantidad de neuronas piramidales en la corteza cerebral durante las excitaciones sinápticas. Estas corrientes se generan cuando se activan las neuronas, generando un campo magnético, medible por sistemas de magnetoencefalografía (MEG), y un campo eléctrico sobre la superficie del cuero cabelludo, medible por los instrumentos de EEG [27].

Las señales de EEG del cuero cabelludo están generadas por dos tipos diferentes de potenciales extracelulares: los potenciales de acción y los potenciales postsinápticos. Los potenciales de acción se originan cuando el potencial en reposo de la membrana neuronal sufre un cambio repentino, debido al intercambio de iones en la membrana. Los cambios de potencial se transmiten a lo largo del axón. El potencial postsináptico entre un par de membranas neuronales se produce cuando el potencial de acción de una neurona se propaga mediante una sinapsis. Cuando el potencial postsináptico supera un umbral de voltaje, el potencial de acción llega a otra neurona. El potencial postsináptico tiene una mayor duración y una menor magnitud, aun así, es el potencial que más contribuye, permitiendo una generación sincrona de potenciales postsinápticos de un gran número de neuronas. En la Figura 2.2 se pueden apreciar los dos potenciales y sus características [28].

La cabeza humana está formada por varias estructuras, como son el cuero cabelludo, el cráneo, el cerebro y muchas otras capas finas. Los electrodos que realizan la medición de las señales cerebrales se colocan sobre el cuero cabelludo, por lo que dichas señales tienen que atravesar estas capas para poder ser medidas, por lo que sufren atenuaciones. La capa que mayor atenuación provoca es el cráneo. Además de las atenuaciones, está el problema del ruido. La mayor parte del ruido se genera sobre el cuero cabelludo o en el interior del cerebro. Por lo tanto, solamente las grandes agrupaciones de neuronas activas llegan a generar suficiente potencial para que el electrodo, colocado en el cuero cabelludo, lo pueda registrar [28].

2.3 Ritmos cerebrales

Los ritmos cerebrales hacen referencia a distintos patrones de actividad neuronal masiva asociada a comportamientos específicos, al nivel de excitación y a los estados del sueño. Antes de detallar nada más sobre los ritmos cerebrales, realizamos una breve explicación de la anatomía del cerebro, para así poder entender mejor este aspecto, y posteriormente la situación de los electrodos y las zonas donde están situados [29].

2.3.1 Descripción general de la anatomía del cerebro

El encéfalo está compuesto por el cerebro, el diencefalo, el tronco encefálico y el cerebelo. A su vez, el cerebro está formado por la corteza cerebral y las áreas subcorticales. La corteza cerebral es la capa externa del tejido neural del cerebro y es un área de fácil acceso experimental, convirtiéndose en el foco principal de la investigación de BCI. Es conocida coloquialmente como materia gris debido al color que muestra su gran cantidad de neuronas. La corteza cerebral es una superficie muy enrevesada, compuesta por surcos (crestas) y circunvoluciones (surcos). En la

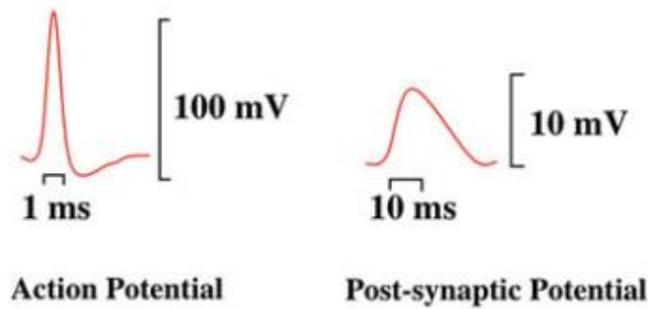


Figura 2.2 Tipos de potenciales que contribuyen a la generación del EEG [23].

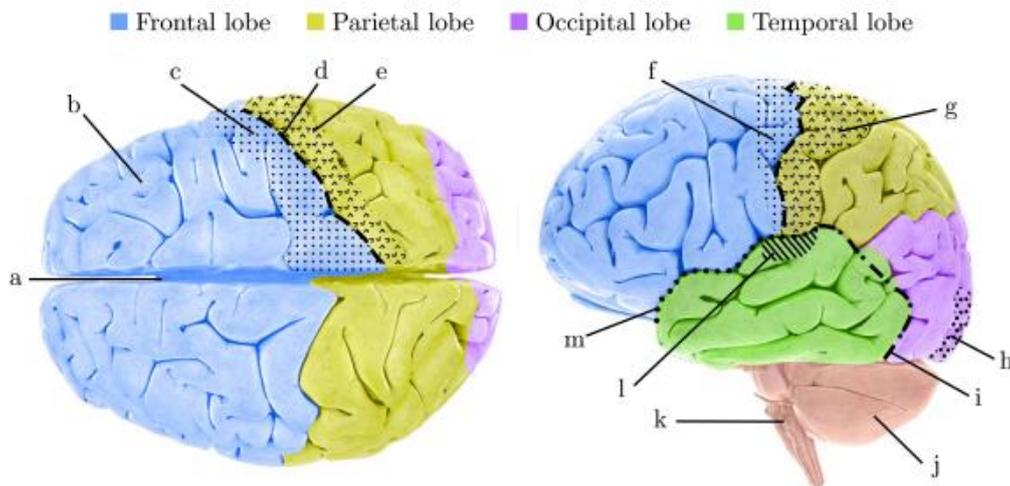


Figura 2.3 Áreas anatómicas principales de la corteza cerebral humana. (a) fisura interhemisférica, (b) corteza de asociación prefrontal, (c) giro precentral, (d) surco central, (e) giro poscentral, (f) corteza motora primaria, (g) corteza sensorial somática prima [49].

Figura 2.3 podemos ver una figura donde se ven las diferentes surcos y circunvoluciones, que dividen la corteza en cuatro lóbulos anatómicos principales: frontal, parietal, occipital y temporal [3].

En cuanto a la especialización del cerebro hay varias teorías. La teoría de la modularidad sugiere que el cerebro tiene regiones altamente especializadas, que son el dominio específico para diferentes funciones cognitivas [30]. En cambio, la teoría del procesamiento distribuido sugiere que el cerebro está altamente interconectado y que la información se procesa de manera distribuida [30]. Los estudios más recientes, que se basan en la teoría de grafos, sugieren que el comportamiento funcional del cerebro es una combinación de ambos [30]. Los procesos cognitivos complejos involucran la intervención entre diferentes partes del cerebro. Hay un consenso general de que ciertas áreas particulares están más especializadas que otras [30]. Para la investigación BCI, es importante centrar las mediciones de la actividad en ciertas áreas corticales específicas, relacionadas con el paradigma estudiado, para extraer las características adecuadas [3]. Los puntos clave más comunes son:

- Corteza motora primaria (M1). Ubicada en el lóbulo central, está estrechamente relacionada con el control del movimiento. Regiones particulares de M1 están destinadas a controlar áreas corporales particulares [3]. Controlar las partes más complejas del cuerpo, como manos o músculos faciales requiere áreas corticales más grandes que controlar las más simples, como la rodilla o el codo [3].

- Corteza somatosensorial primaria (S1). Ubicada en el lóbulo parietal. Área importante para el movimiento, relacionada con sensaciones como la temperatura, el dolor, el tacto o la propiocepción (sentido de la posición y el movimiento de las extremidades) [3].
- Corteza prefrontal (CPF). Se encuentra en la parte posterior del lóbulo frontal. Tiene un papel importante en las funciones ejecutivas de alto nivel relacionadas con el movimiento, la planificación del comportamiento cognitivo y social complejo, la expresión de la personalidad, la comunicación a corto plazo, memoria y toma de decisiones [3].
- Corteza visual primaria (V1). Ubicada en la parte anterior del lóbulo occipital. La información visual proveniente de la retina llega a la corteza visual. Está especializado en el procesamiento de entradas sensoriales del campo visual contralateral. La información visual no se procesa de forma espacial, sino como detección de bordes, para una imagen con cada mitad de un color contrastado, la línea divisoria produce el contraste más fuerte donde se centrarán la mayoría de las neuronas, mientras que pocas se centran la información del brillo [3].
- Corteza auditiva primaria (A1). Ubicado en las partes superior y media del lóbulo temporal. Especializado en el procesamiento de la información auditiva, involucrado en funciones superiores como la audición, el cambio de idioma o la identificación de la ubicación de un sonido en el espacio. Las neuronas A1 están ordenadas frecuentemente mejor reaccionan (mapa tonotópico) [3].

Después de haber realizado una pequeña descripción de la anatomía del cerebro humano, nos centramos en los diferentes tipos de ritmos cerebrales [27]. En neurofisiología clínica, se suelen distinguir cinco tipos, diferenciadas según el rango de frecuencia que abarcan. En la Figura 2.4 podemos ver las diferentes bandas detalladas a continuación [27].

- **Ondas delta (δ)**. Banda de frecuencia más lenta, se encuentran en el rango de 0,5 Hz - 4 Hz. Caracterizadas por su gran amplitud. Estas ondas se asocian principalmente al sueño profundo de los adultos, pueden estar presentes en un estado de vigilia. Una actividad delta excesiva y generalizada es anormal, comúnmente asociada a lesiones subcorticales, profundas de la línea media o difusas, así como con encefalopatía metabólica hidrocefalia [27].
- **Ondas theta (θ)**. Su frecuencia está entre los 4 Hz y 8 Hz, predomina en regiones frontales o frontofrontales y es más común en adultos jóvenes. Estas ondas suelen identificarse por la somnolencia o la hiperventilación y están asociadas a estados meditativos, al acceso a material inconsciente, a la inspiración creativa y a la meditación profunda. Tienen un papel muy importante en la infancia. En adultos despiertos la gran mayoría de la actividad de estas ondas es anormal y se debe a varios problemas patológicos, como una encefalopatía difusa leve o hidrocefalia [27].
- **Ondas alfa (α)**. La frecuencia de las ondas alfa, también conocidas como ritmo básico posterior, varía entre 8 Hz y 13 Hz. Aparecen en la mitad posterior de la cabeza y se encuentran frecuentemente sobre la región occipital del cerebro durante la vigilia relajada. Normalmente tienen forma sinusoidal, es el ritmo más prominente en todo el ámbito de la actividad cerebral. Dichas ondas están vinculadas con una conciencia relajada, sin concentración o atención. Suelen aparecer en adultos cuando se encuentran en un estado de reposo, aumentando su amplitud inmediatamente después de cerrar los ojos y se atenúan al abrirlos o al realizar un esfuerzo mental. Esta banda también se conoce como ritmo mu (μ) cuando su topografía se ubica principalmente sobre la corteza sensoriomotora (regiones S1 y M1). Este ritmo es una disminución de la actividad alfa contralateral asociada a los movimientos de las extremidades o con la imaginación de

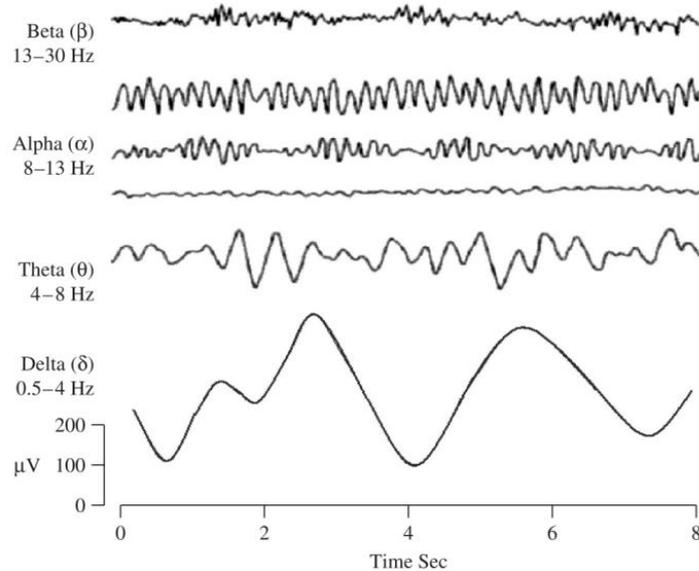


Figura 2.4 Diferentes ritmos cerebrales hasta los 30 Hz [27].

estos. El comportamiento anormal se refleja si el ritmo μ es persistente o no reactivo a la ejecución motora [27].

- **Ondas beta (β).** Las ondas beta tienen un rango de frecuencia entre 13 y 30 Hz. Se encuentran principalmente entre las regiones centrales y frontales en los adultos sanos. Los ritmos de baja amplitud se relacionan estrechamente con la ansiedad, la concentración activa, la somnolencia o el sueño ligero. Una activación excesiva de esta banda suele asociarse con el consumo de benzodiazepinas, barbitúricos e hidratos de cloral, así como patologías como el síndrome Dup15. Estas ondas se relacionan con el pensamiento activo, la atención, el análisis del mundo exterior, la resolución de problemas. La onda beta tiene gran actividad cuando el sujeto está en estado de pánico [27].
- **Ondas gamma (γ).** Ondas con frecuencias superiores a los 30 Hz. Están menos estudiadas, se cree que están relacionadas con un alto procesamiento cognitivo. Surgen durante el procesamiento sensorial transmodal (percepción que involucra dos o más sentidos al mismo tiempo) y la coincidencia de memoria a corto plazo. Otros estudios asocian este ritmo con interacciones abruptas entre las concentraciones de neurotransmisores inhibidores y excitadores. Aunque sus amplitudes y su ocurrencia son muy bajas, la detección de esta banda se usa para confirmar determinadas enfermedades mentales [27].

2.4 Potenciales relacionados con eventos

Los ERPs son cambios de voltaje generados en las estructuras del cerebro como respuesta a ciertos eventos o estímulos específicos (visual, auditivo o táctil). Estos cambios de voltaje en la señal EEG están asociados en tiempo a eventos cognitivos, motores o sensoriales y nos permiten estudiar de manera segura y no invasiva la correlación fisiológica de los procesos mentales. Los ERPs en cualquier experimento son formas de onda con una serie de componentes característicos, o picos de potencial (máximos o mínimos locales), que se producen normalmente antes de los primeros 500 milisegundos de recibir el estímulo. La amplitud de estos componentes, la latencia de los estímulos o la covarianza pueden ser estudiados [3].

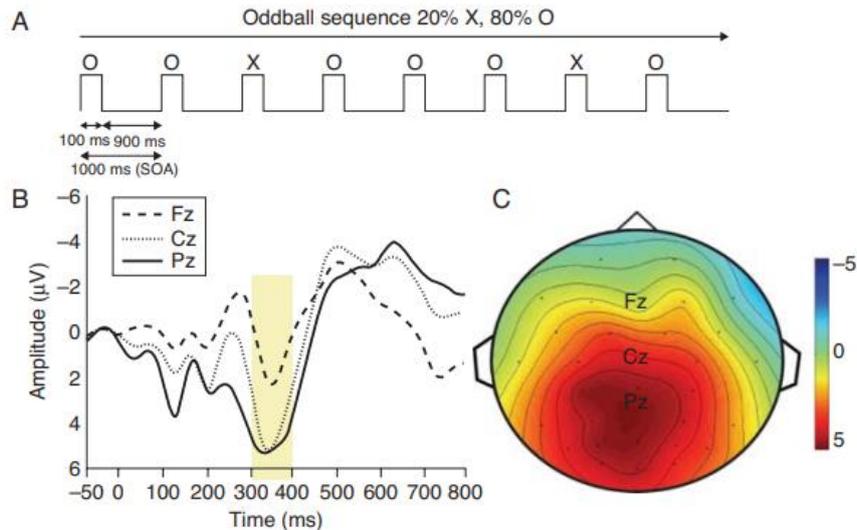


Figura 2.5 (A) Curso temporal de los estímulos raros (X) y comunes (O). (B) Promedio de ERPs para una tarea oddball, para las ubicaciones de electrodos Fz, Cz, Pz. (C) distribución topográfica de la amplitud media de la ERP entre 300 y 400 ms después del estímulo [3].

Los voltajes que constituyen los ERPs están integrados en la actividad cerebral general del EEG registrada en el cuero cabelludo, y además suelen ser más pequeños en relación con el EEG en curso, por lo que están enmascarados por la actividad de fondo del EEG que no está relacionada con el evento, haciendo que sea imposible identificarlos a simple vista. Aun así, estos ERPs están ligados a eventos y siguen un curso temporalmente constante, por lo que se pueden extraer realizando un promedio de múltiples ensayos de eventos provocados, haciendo que la actividad de fondo se cancele y fortalezca la respuesta de bloqueo de tiempo. El resultado de este promedio es una serie de deflexiones positivas y negativas, a las que anteriormente hemos denominado componentes. Los patrones de voltaje ERP dependen completamente del tipo de estímulo y de la tarea o paradigma. En Figura 2.5 podemos ver un curso temporal de los estímulos comunes y menos comunes para un protocolo estándar de impares, además de la forma de onda de ERP en ciertos canales de un sujeto [3].

Los componentes sucesivos normalmente difieren en su frecuencia de estímulo y dependencia de la amplitud, en sus distribuciones topográficas y sus relaciones con las actividades de procesamiento de información cerebral [3].

Los ERPs pueden estar originados por diferentes eventos y se clasifican en dos categorías. Por un lado, los ERPs sensoriales o exógenos, que alcanzan su punto máximo antes de los 100 milisegundos después del estímulo, debido a que dependen principalmente de los parámetros físicos del estímulo. Estos componentes tienden a reflejar la actividad de los sistemas sensoriales primarios, y sus formas de onda y distribuciones del cuero cabelludo varían según la modalidad de los estímulos provocados. Por otro lado, los ERPs cognitivos o endógenos, que contienen componentes de latencia más larga, (100 milisegundos después del estímulo) debido al tiempo de evaluación del estímulo por parte del sujeto, que necesita examinar el procesado de la información. Por lo tanto, dichos componentes reflejan la actividad de procesamiento de la información, de naturaleza cognitiva, y por consiguiente dependen menos de la modalidad del estímulo y más de la importancia del evento que lo provoca. Las formas de onda de los ERPs suelen describirse en términos de amplitud y latencia [3].

Cuando el ERP está bloqueado en el tiempo para un evento visual, como un destello breve, la aparición de imágenes repentinas o cambios de color abruptos se conoce como potencial evocado

visual (VEP). Se generan cerca de V1 y normalmente son las prominentes sobre las áreas occipitales [3].

A continuación, se describirán las diferentes formas de onda de los ERPs. Estos ERPs están recogidos sobre la zona occipital, para tener en cuenta la polaridad, ya que esta depende del electrodo donde se haya promediado.

- **P50.** Pico más pronunciado entre los 40 y los 75 milisegundos después del estímulo. Indica la respuesta neurológica ante un estímulo redundante. Este estímulo nos permite ver la capacidad del sujeto de prestar atención al estímulo relevante e ignorar la información repetitiva o trivial [31].
- **N100 o N1.** Pico de voltaje negativo generado entre los 100 y 250 milisegundos después del estímulo. No se tienen muchos conocimientos sobre esta componente, pero se relaciona con un procesamiento perceptivo influenciado por la atención del sujeto, pudiendo formar parte de un sistema de emparejamiento cognitivo de estímulos sensoriales a través del uso de la memoria [31].
- **P200 o P2.** Pico positivo situado entre 100 y 250 milisegundos después del estímulo. Aunque todavía no se tienen muchos conocimientos sobre esta componente, está relacionada con un procesamiento perceptivo influenciado por la atención, pudiendo ser parte de un sistema de emparejamiento cognitivo de estímulos sensoriales a través del uso de la memoria [31] [32].
- **N200 o N2.** Pico de voltaje negativo en torno a los 200 milisegundos después del estímulo. Dentro del N200 podemos diferenciar tres componentes. (1) N2a, o potencial de disparidad auditivo (mismatch negativity, MMN), representa el proceso automático del cerebro encargado de la detección de diferencias o cambios en los estímulos; (2) N2b, aparece cuando los cambios en las propiedades físicas del estímulo son relevantes; y (3) N2c, se genera cuando es necesario clasificar los estímulos dispares [31].
- **N300.** Hallazgo reciente, relacionado con la coherencia y la expectativa semántica [31].
- **P300.** En los estímulos auditivos, la latencia está entre los 250 y 400 milisegundos después del estímulo. La latencia se interpreta como la velocidad al clasificar un estímulo, resultado de la discriminación de un evento de otro. Las latencias más bajas indican que el rendimiento mental es superior. La amplitud está relacionada con la información del estímulo, el nivel de atención genera ondas con mayor amplitud. La reducción considerable de la amplitud nos indica amplias vulnerabilidades neurobiológicas por parte del sujeto, correspondientes a varios trastornos mentales. La tarea más común para generar un P300 es una prueba auditiva, visual o somatosensorial en la cual el sujeto tiene que identificar un estímulo concreto e ignorar el resto, conocida como paradigma oddball [31].
- **N400.** Onda negativa generada entre los 300 y 600 milisegundos después del estímulo. Suele ser máxima en las zonas de electrodos centro parietales. Descrita por primera vez en el contexto de la incongruencia semántica [31].
- **P600.** Pico positivo en torno a los 600 milisegundos después del estímulo. Está relacionado con el procesado del lenguaje, e.g., cuando se identifican errores gramaticales o anomalías sintácticas [31].
- **Potencial cortical relacionado con el movimiento** (movement-related cortical potentials, MRCP). Señala una serie de potenciales relacionados con el movimiento o cierta actividad similar al movimiento, pueden ocurrir antes o después del movimiento [31].

- **Variación contingente negativa** (contingent negative variation, CNV). Se genera durante un rango de tiempo en el que el sujeto está respondiendo a un estímulo, cuando previamente ha recibido otro estímulo de preparación. Las componentes de CNV se pueden ver en el tiempo entre estímulos, estas componentes pueden ser tempranas o tardías, y se asocian respectivamente a indicadores de procesos de activación y a indicadores de atención a tareas experimentales [31].
- **Variación post-imperativa negativa** (post-imperative negation variation., PINV). Es una continuación negativa del CNV, después del segundo estímulo y sirve como marcador de la actividad cognitiva sostenida [31].

2.5 Medida y registro del EEG

En cuanto a la medición de la señal de EEG, esta se realiza midiendo la diferencia de potencial entre dos puntos del cuero cabelludo diferentes, por lo tanto, son necesarios al menos dos electrodos. Los electrodos empleados para registrar el EEG pueden ser de diferentes tipos, como electrodos desechables, electrodos de disco reutilizables, electrodos en cintas para la cabeza o en gorro. Para el registro multicanal, con gran cantidad de electrodos se suelen utilizar los electrodos colocados sobre un gorro.

Los electrodos se pueden colocar siguiendo diferentes configuraciones, aunque habitualmente se suele utilizar la configuración estándar del sistema internacional 10-20, como se muestra en la Figura 2.6 [33].

La forma de colocar los electrodos puede variar en el número y, por tanto, en el lugar de colocación. En este TFG atendemos al estándar, aprobado por la Federación Internacional de Sociedades de Electroencefalografía y Neurofisiología Clínica, conocido como *sistema internacional 10-20*. Este fue desarrollado para estandarizar la reproducibilidad, con el fin de facilitar la comparación de estudios en el tiempo y con diferentes sujetos [34]. En este estándar los electrodos son distribuidos según las diferentes zonas del córtex y el hemisferio en el que se encuentran. Este estándar utiliza distancias proporcionales del 20% de la longitud total a lo largo de los contornos entre los puntos de referencia del cráneo. Estos puntos de referencia son el entrecejo (nasion) y la nuca (inion), la sección central se encontrará en el medio de la distancia antes comentada y estará separada un 20% de esta distancia de las demás secciones contiguas (frontal y parietal), a su vez estas dos secciones se separarán un 10% de las secciones frontopolar y occipital. Para poder nombrar a cada electrodo se emplea una división craneal de seis zonas: frontopolar (Fp), frontal (F), central (C), parietal (P), occipital (O) y temporal (T). Los electrodos usados para este trabajo son Fz, Cz, P3, Pz, P4, PO7, PO8 y Oz. Además del estándar antes comentado, existen otros como pueden ser el estándar 10-5 o el 10-10. En el estándar 10-5 se utilizan distancias del 10% y del 5% (por lo que se podrían colocar más electrodos). En el estándar 10-10 solo se usan distancias del 10% [33].

La nomenclatura de estos electrodos se compone de una letra identificativa a la sección donde está situado y un subíndice identificativo al hemisferio en el que se encuentra, asignando números impares al hemisferio izquierdo y números pares para el derecho, cuando se posiciona en el centro de los dos hemisferios se identifica con la letra "z" (zero). En cuanto a los electrodos utilizados como referencia, se suelen ubicar en los lóbulos de las orejas y se identifican con A1 para el lado izquierdo y A2 para el derecho [33].

El registro del EEG se puede realizar de dos formas. Según el método bipolar, en el cual los electrodos están emparejados de tal forma que se miden las diferencias de potencial entre cada pareja. El otro método sería el método monopolar, en el que se utiliza un electrodo como electrodo de referencia y se realizan las mediciones entre cada electrodo y electrodo de referencia. En teoría este electrodo de referencia se puede colocar en cualquier lugar del cuero cabelludo, pero lo ideal es hacerlo en algún sitio donde no haya fuentes neuronales (como puede ser el lóbulo de la oreja). Como la distribución de diferencias de potenciales a lo largo del cuero cabelludo cambia según la posición del electrodo de referencia, es común utilizar un filtrado CAR (common average

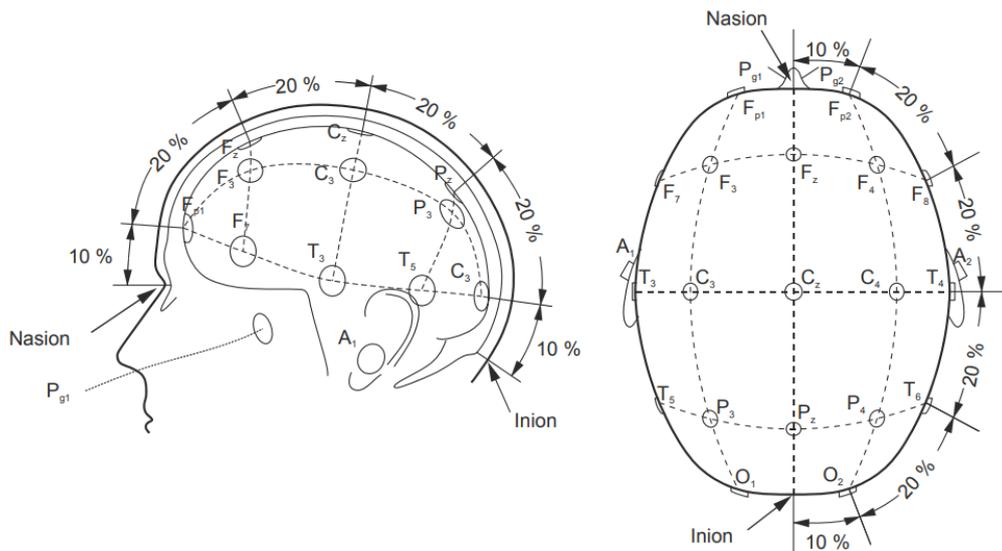


Figura 2.6 Figura donde se representa la localización de los electrodos en el Sistema Internacional 10-20 [33].

reference). El filtrado CAR consiste en restar el promedio de todos los electrodos a la diferencia de potencial de cada electrodo [3], [35].

Las señales del EEG tienen unas amplitudes del orden de microvoltios y contienen componentes en frecuencia que pueden llegar hasta los 300 Hz. Para llegar a tener la información que nos interesa de estas señales es necesario amplificarlas y realizar un filtrado. Los filtros utilizados no tienen que introducir ningún cambio o distorsión en las señales. Se suele utilizar un filtro paso banda (BPF) entre 0,5 Hz y la máxima frecuencia permitida por Nyquist, para poder eliminar las componentes interferentes de muy baja frecuencia, como las de la respiración. Posteriormente se utiliza un notch para eliminar la interferencia de red a 50 o 60 Hz [35].

2.6 Adquisición y preprocesado de la señal

2.6.1 Adquisición de la señal

La frecuencia de muestreo utilizada se ha establecido en 250 Hz, adecuada para el análisis del EEG, puesto que cumple de sobra el Teorema de Nyquist, evitando el solapamiento en el dominio de la frecuencia. Además, se ha aplicado un filtrado hardware paso-banda entre 1–30 Hz, con el objetivo de eliminar la interferencia de la red eléctrica. Adicionalmente, como pre-procesado de la señal, se ha empleado un filtrado espacial CAR con el fin de eliminar el posible difuminado espacial.

La señal se obtiene mediante el dispositivo g.USBamp disponible en el laboratorio del Grupo de Ingeniería Biomédica (GIB) de la Universidad de Valladolid. Este equipo se encarga de realizar la conversión analógico-digital de los datos registrados por el EEG, previa amplificación. Posteriormente, almacena en el buffer dichos datos a la espera de que la aplicación los requiera mediante el puerto USB, ya que es el medio por el cual se conecta el sistema g.USBamp con el ordenador. Los drivers disponibles son para Windows 7 aunque también son compatibles con Windows 10, y este último será el sistema operativo elegido para la máquina donde se realizará la evaluación del sistema [36].

Una vez obtenidos los datos de EEG a través del amplificador g.USBamp, únicamente hay que quedarse con una banda de frecuencias concreta, para que las demás frecuencias no afecten a las de interés.

2.6.2 Preprocesado de la señal

Una vez que se realizó el registro de la EEG, es necesario realizar un filtrado de la señal. Para ello, se utiliza un filtrado frecuencial y un filtrado espacial. Para la visualización de las señales en MEDUSA [37], mientras se realizan los registros, se utiliza un filtro de respuesta al impulso infinita (IIR, Infinite Impulse Response) de orden 7. Este tipo de filtro puede producir pendientes más pronunciadas entre la banda de paso y la banda eliminada. También requiere menos memoria y es más rápido, lo cual nos interesa para poder mostrar la señal en tiempo real. Sin embargo, su diseño es más complicado, ya que pueden volverse inestables.

Filtrado frecuencial

Para el filtrado frecuencial recurrimos a un filtro FIR (Finite Impulse Response) paso banda, de orden 1.000 y frecuencias de paso entre 1 Hz y 30 Hz. Al usar un filtrado superior a 1 Hz eliminamos la componente de continua y al ser inferior a los 30 Hz eliminamos la componente de la red eléctrica (50 Hz) y banda gamma.

Filtrado espacial

El fin de utilizar un filtrado espacial es reducir el difuminado espacial, que es un efecto causado por la distancia entre los electrodos y las fuentes cerebrales que generan la señal. Esto se debe a que los tejidos que se encuentran en el cerebro no son homogéneos [38].

Hay diferentes métodos para reducir este difuminado espacial, pero los más comunes son los filtros Laplacianos, los métodos de referencia de media común (CAR). En el caso de nuestro estudio utilizamos el método de referencia de media común (CAR) [38].

El filtrado CAR se calcula restando a cada canal medido la media común de todos los electrodos. Este filtrado se utiliza cuando el cuero cabelludo está cubierto completamente por electrodos equiespaciados entre ellos y el potencial generado en el córtex está muy focalizado en ciertos puntos. El filtro CAR elimina el ruido común para todos los electrodos [38]. En la Figura 2.7 se muestra el filtrado CAR junto a otros dos filtrados espaciales, el filtrado Laplaciano corto y el filtrado Laplaciano largo, y el valor del offset de la oreja [39].

El voltaje de cada canal se obtiene restando la media común del voltaje obtenido en el resto de los electrodos, según la expresión:

$$v_h^{CAR}(t) = v_h(t) - \frac{1}{H} \cdot \sum_{i=1}^H v_i(t)$$

Fórmula 2.1 Voltaje para cada canal mediante el filtrado CAR.

Donde $v_n(t)$ es en voltaje registrado por el canal n -ésimo respecto a la referencia de la oreja, siendo h , el canal donde se realiza el filtrado y H , el número de electrodos empleados en la medición, incluyendo el canal que se está filtrando [38].

Para realizar este filtrado se han utilizado las funciones `fir_filter_designer()` y `filtfilt()` presentes en el script `frequency_filtering.py` de MEDUSA [37]. La etapa de preprocesado se realiza justo antes de la extracción de características, tras obtener el trial correspondiente de la señal de EEG.

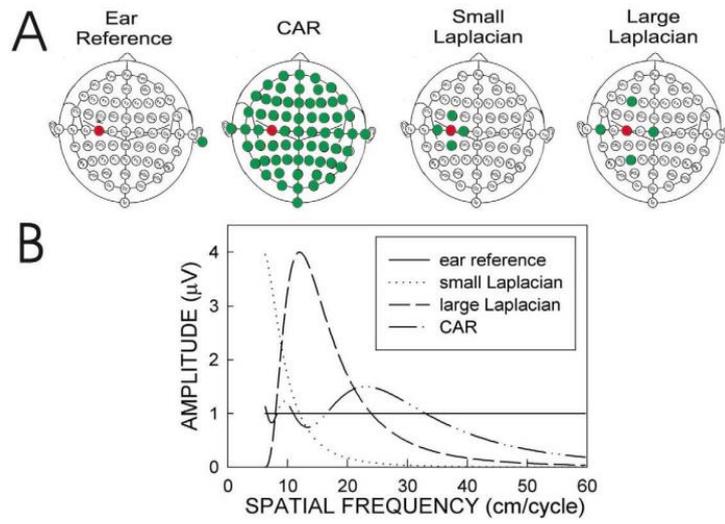


Figura 2.7 (A) Representación del filtrado de la referencia de la oreja, del filtrado CAR, Laplaciano corto y Laplaciano largo en cuanto a los electrodos colocados sobre el cuero cabelludo. (B) Representación gráfica de las formas de los filtros mencionados anterior [39].

CAPÍTULO 3 DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LOS EXPERIMENTOS

3.1 Objetivos de los experimentos

A continuación, explicaré los objetivos de cada una de las tareas implementadas en este Trabajo de Fin de Grado.

- Tarea Go-NoGo. El objetivo de dicha tarea es medir la atención sostenida del sujeto, ya que este debe prestar atención al tipo de estímulo que reciba y dar la respuesta correspondiente en el menor tiempo posible. Para esto, se analizarán los ERPs y los TRs para los diferentes resultados de la tarea. Estos resultados son la correcta e incorrecta acción por parte del sujeto, tanto para los estímulos Go, como para los NoGo. Para la primera subtarea, en la cual tenemos un 20% de estímulos *NoGo*, el usuario puede asumir que el estímulo será *Go* y puede obtener unos tiempos de reacción menores y mayor número de fallos. En cambio, para la segunda subtarea, al tener la misma probabilidad de encontrar un estímulo *Go* como uno *NoGo*, el sujeto deberá prestar más atención y es probable que tenga menos acciones erróneas, pero también que los tiempos de reacción sean mayores. Analizando los resultados de ambas subtareas podemos ver las diferencias [40].
- Tarea de Stroop. El objetivo en esta tarea es evaluar el conflicto perceptivo cerebral producido por la interferencia de la palabra y la tarea a realizar. Se analizarán los ERPs y los TRs de los sujetos para los diferentes casos de la tarea de Stroop, es decir, para respuestas correctas, respuestas incorrectas, respuestas correctas para estímulos congruentes y respuestas incorrectas para estímulos incongruentes. Para todos estos casos se obtendrá el ERP donde se analizará, se comparará con otros estudios similares y se extraerán conclusiones [12].
- Tarea *N-Back*. El objetivo de esta tarea es analizar los ERPs y los TRs en los diferentes resultados de la tarea, es decir, cuando el sujeto realiza la acción correcta y cuando no. Con estos resultados podemos medir la carga de trabajo de la memoria, al ver las diferencias cuando se cambia el valor del parámetro *N*. Se calculará el ERP para los casos comentados y se comparará con otros estudios para analizarlo y obtener conclusiones [41].

3.2 Explicación detallada de las tareas

3.2.1 Tarea Go-NoGo

Como ya hemos comentado en el apartado 1.3, en la tarea Go-NoGo se parte de dos condiciones, donde el sujeto debe actuar de diferente manera. En el caso particular de nuestra tarea, estas condiciones son dos estímulos visuales diferentes: en uno se muestra una elipse verde con la palabra “GO” escrita en su interior, mientras que en el otro se muestra una elipse roja con “NO GO” en su interior. Ambos se muestran sobre un fondo negro, tal y como se muestra en la imagen de los diferentes estímulos en la Figura 3.1 y en la Figura 3.2. Las acciones que debe realizar el usuario son, la pulsación de la tecla espaciadora del teclado cuando aparezca el estímulo *Go* y no hacer ninguna pulsación cuando aparezca el estímulo *NoGo*. Dichos estímulos irán apareciendo de manera aleatoria. Los estímulos aparecerán cada 3 segundos (si el sujeto no realiza ninguna acción, es decir, no pulsa) o 500 ms después de una pulsación, siempre que se haya realizado la acción correcta (pulsar el *space* para un estímulo *Go* y no hacer nada para un estímulo *NoGo*). Por el contrario, si no se realiza la acción correcta se mostrará un mensaje de error en la pantalla durante 1 segundo, para posteriormente mostrar el siguiente estímulo. Para dicha tarea se valora tanto el tiempo de reacción del sujeto, como la correcta realización de la tarea.

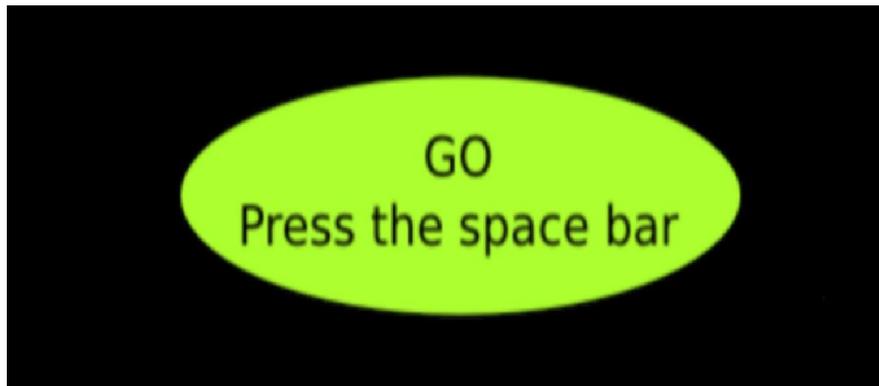


Figura 3.1 Imagen del estímulo Go.

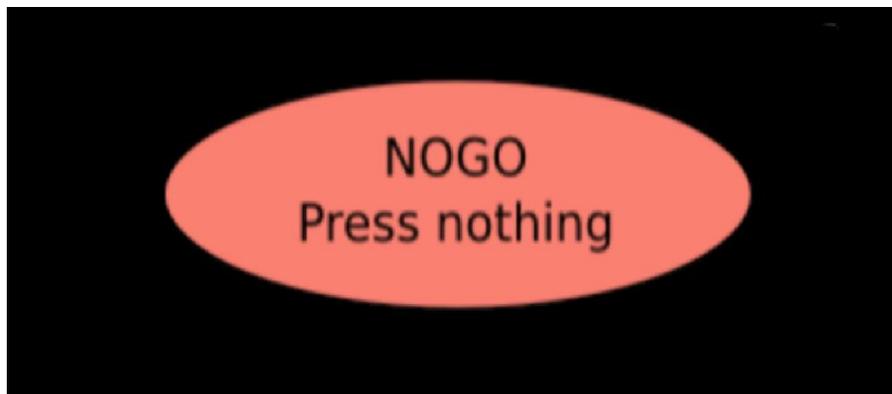


Figura 3.2 Imagen del estímulo NoGo.

Esta tarea de Go-NoGo se divide en dos subtareas, en las cuales se cambia el porcentaje de estímulos Go y estímulos NoGo. En ambas tareas se muestran 50 estímulos, repartidos entre Go y NoGo. Para la primera tarea, el porcentaje de NoGo es del 20% de los estímulos totales, es decir, hay 10 estímulos NoGo y 40 estímulos Go, por lo que el estímulo NoGo se considerará el estímulo no habitual.

En la segunda tarea, el porcentaje de NoGo será del 50%, por lo tanto, tendremos 25 estímulos de cada, por lo que el sujeto tendrá la misma probabilidad de encontrarse un estímulo u otro. Cada una de las subtareas deberá realizarse 4 veces, de modo que, para la primera subtarea tendremos 160 resultados de respuestas a estímulos *Go* y 40 resultados para estímulos *NoGo*. Para la segunda subtarea tendremos 100 resultados de respuestas para cada uno de los estímulos.

3.2.2 Tarea de Stroop

En la tarea de Stroop, al igual que se ha comentado anteriormente, se produce una interferencia entre el significado de la palabra y el color de la tinta con la que está impresa [12]. Para el caso de nuestra tarea, solo tenemos los casos congruentes (el color de la tinta coincide con la palabra, e.g. escribimos “rojo” con tinta roja) e incongruentes (el color de la tinta no coincide con la palabra, e.g. escribimos “rojo” con tinta azul). Los diferentes colores que aparecen en los estímulos son “red”, “yellow”, “green” y “blue”, tanto para las palabras como para el color de la tinta, lo harán de manera aleatoria y sobre un fondo negro, podemos ver estos estímulos en la Figura 3.3. El usuario deberá responder a cada estímulo indicando el color de la tinta con la que está impresa cada palabra, lo hará pulsando la letra “R” (red) cuando aparezca alguna palabra

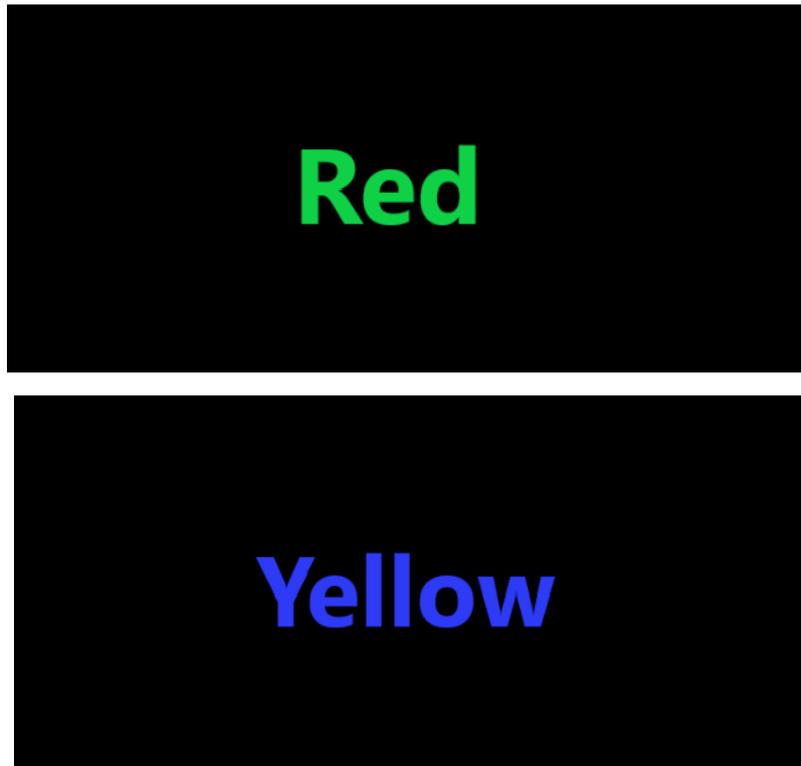


Figura 3.1. Imágenes de dos estímulos de la tarea de Stroop.

escrita en rojo, “Y” (yellow) cuando aparezca alguna palabra escrita en amarillo, “B” (blue) cuando aparezca alguna palabra en azul y “G” (green) cuando aparezca alguna palabra en verde, en el ejemplo de la Figura 3.3 se debe pulsar la tecla “G” y posteriormente “B”. Para esta tarea solo realizamos una tarea, en la cual aparecerán 50 estímulos diferentes de manera aleatoria, donde el sujeto dispondrá de tres segundos para pulsar la tecla correcta y una vez pulsada o pasados los tres segundos aparecerá un mensaje de error (“WRONG”) o de acierto (“CORRECT”). Para esta tarea, se valora tanto el tiempo de reacción del sujeto, como la correcta pulsación. Como solo disponemos de una tarea, y esta se realizará 4 veces, tendremos 200 resultados de respuestas, con una probabilidad del 25% (50 respuestas) para estímulos congruentes y 75% (150 respuestas) para estímulos incongruentes.

3.2.3 Tarea N-Back

Para esta tarea el sujeto recibe una serie de estímulos a los que debe responder indicando si el estímulo actual coincide con el estímulo mostrado N pasos atrás [41]. Para el caso de nuestra tarea, utilizaremos letras mayúsculas sobre un fondo negro para mostrar estos estímulos y el sujeto deberá indicar si la letra actual es la misma que la que se mostró N pasos atrás. Las trece letras que se mostrarán son “A”, “B”, “C”, “D”, “E”, “H”, “I”, “K”, “L”, “M”, “O”, “P” y “R”, y habrá una probabilidad del 33% de que la letra actual sea la misma que en la posición N anterior. Se opta por esta probabilidad de coincidencia (33%), menor al 50%, para evitar que el sujeto pueda pulsar en caso de no saber la respuesta y tener un 50% de probabilidad de acierto. En la Figura 3.4 se muestran 2 ejemplos de estímulos.

El sujeto deberá pulsar la tecla “M” del teclado en caso de querer indicar que la letra actual coincide y no hacer nada en el caso contrario. El valor de N cambiará entre 1 y 3, en el caso de $N = 1$ el usuario deberá indicar si la letra actual es la misma que apareció en la imagen anterior, es el caso más sencillo. Para $N = 2$ el usuario deberá indicar si la letra actual es la misma que apareció hace 2 imágenes y para $N = 3$ el usuario deberá indicar si la letra es igual a la que apareció tres posiciones atrás. La complejidad de la tarea aumentará a medida que aumenta el

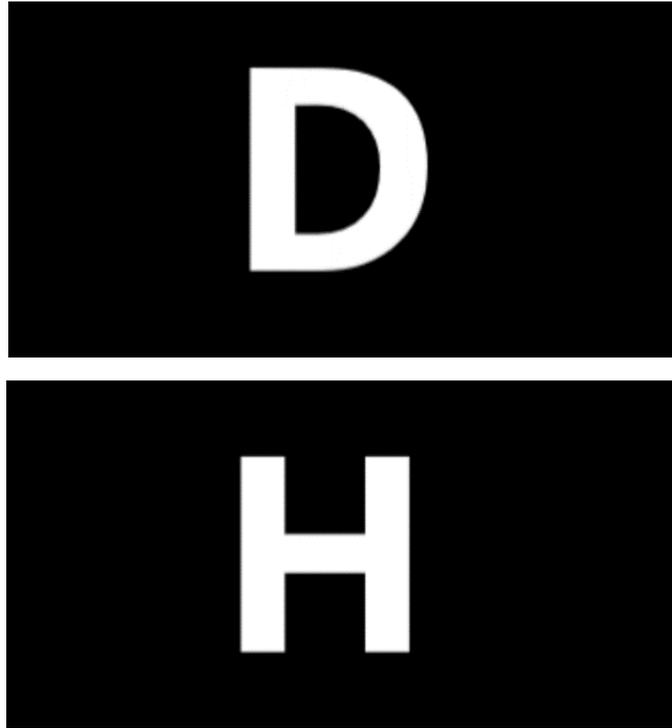


Figura 3.2 Imágenes de dos estímulos (letras D y H) para la tarea N -Back.

valor de N , debido a que el sujeto debe memorizar mayor número de letras, un valor mayor de tres supondría una gran dificultad.

Los diferentes estímulos aparecerán cada 3 segundos (si el sujeto no realiza ninguna acción, es decir, no pulsa) o 500 milisegundos (si el sujeto realiza una pulsación de la tecla “M”, ya sea de forma correcta o incorrecta). Esta tarea se divide en tres subtareas, en las cuales el único parámetro que cambia es el valor de N , siendo 1 en la primera, 2 en la segunda y 3 en la tercera. De este modo, vamos aumentando la carga de trabajo de la memoria a medida que pasamos a la siguiente subtarea. Así, se esperan mayores tiempos de reacción y mayor número de fallos a medida que pasamos de subtarea. En esta tarea, al igual que las dos anteriores, se valora tanto el tiempo de reacción del sujeto, como el realizar la acción correcta. Cada una de las tres subtareas se realizará cuatro veces, y al tener una probabilidad del 33% de que la letra sea igual a la N anterior, tendremos una media de 66,67 respuestas ante estímulos que requieren pulsación y 133,32 respuestas ante estímulos que no lo requieren.

3.3 Arquitectura y Funcionamiento

Todas las tareas se han programado en Unity (C#), motor de videojuego multiplataforma creado por Unity Technologies, disponible como plataforma de desarrollo para Microsoft Windows, Mac OS, Linux. La plataforma de desarrollo tiene soporte de compilación con diferentes tipos de plataformas. Dichas aplicaciones serán lanzadas por Unity a través de MEDUSA (Python) [37]. MEDUSA es una plataforma de propósito general para desarrollar sistemas BCI y experimentos de neurociencia en Python. Unity es el encargado de registrar los datos correspondientes a las aplicaciones, como pueden ser la respuesta del sujeto o el tiempo de reacción. Estos datos se envían a MEDUSA, para su posterior análisis. MEDUSA se comunica con el paradigma/tarea de Unity en todo momento mediante el protocolo TCP/IP [37].

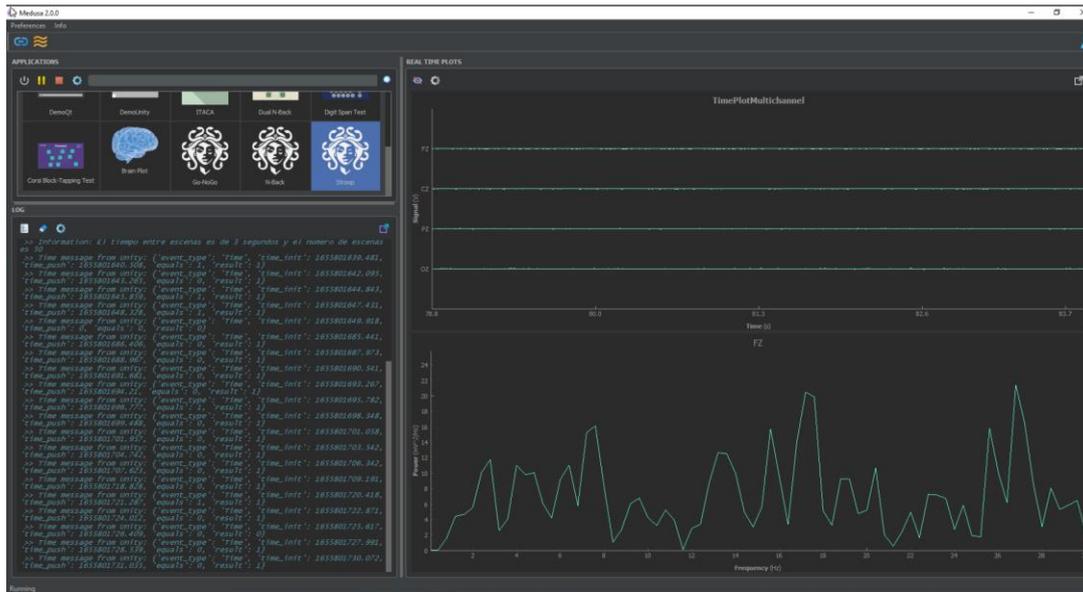


Figura 3.3 Funcionamiento de MEDUSA. En la parte superior izquierda se muestran las diferentes aplicaciones implementadas en MEDUSA. En la parte inferior izquierda se muestra la comunicación entre Unity y MEDUSA. En la parte derecha se muestra la señal EEG, en este caso proveniente de un simulador (Signal generator) [37].

MEDUSA implementa las principales etapas de una plataforma BCI, como son la adquisición y preprocesado de la señal, extracción, selección y clasificación de características, y paradigma de estimulación. En el caso de este Trabajo de Fin de Grado, solo nos centraremos en las etapas de adquisición y preprocesado de la señal, ya que no estamos diseñando un sistema BCI de ciclo cerrado. Para estas etapas, MEDUSA cuenta con ciertos módulos, con métodos y funciones implementadas en cada uno de ellos [37].

En cuanto al módulo de adquisición de la señal, implementa las funciones necesarias para la recepción de la señal EEG desde el amplificador y para la retransmisión de esta al resto de la plataforma. MEDUSA es compatible con cualquier amplificador utilizando Lab Streaming Layer (LSL), un protocolo open-source para la adquisición de datos en tiempo real. Este software, desarrollado por el Swartz Center for Computational Neuroscience de la Universidad de California San Diego (UCSD) [42], añade una capa de abstracción sobre el protocolo de comunicación específico de cada amplificador, permitiendo homogeneizar la comunicación con la aplicación. Actualmente, el repositorio de LSL cuenta con una amplia biblioteca de aplicaciones que crean esta capa de abstracción para multitud de dispositivos (por ej. g.USBamp, Emotiv, Enobio, Biosemi, etc.), haciendo que MEDUSA sea compatible con todos ellos, a cualquier frecuencia de muestreo, y con cualquier configuración de canales [37], [43].

El módulo de preprocesado implementa métodos para: i) mejorar la calidad de la señal de EEG, eliminando ruido, artefactos y componentes de continua de cada canal; y ii) seleccionar determinadas bandas en frecuencia o épocas de señal que sean de especial interés. De todos los métodos disponibles en MEDUSA hemos utilizado los dos siguientes:

- Filtros espaciales, en concreto se implementa el filtro CAR.
- Filtros frecuenciales paso banda tipo Butterworth. En el caso de este trabajo utilizamos el filtro CAR y el filtro frecuencia paso banda de tipo Butterworth.

MEDUSA cuenta con un servidor (“AppController”), que se encarga de la comunicación con los clientes de Unity, este servidor inicializa el servidor TCP, abriendo el archivo .exe de Unity y comunicándose con él. Este “AppController” se encarga de enviar y recibir mensajes con Unity, además de procesar las señales de EEG [37].

3.4 Sujetos y protocolo de evaluación

A continuación, se detallará el protocolo de evaluación seguido y los sujetos que realizan las sesiones. Por último, se mostrará el cuestionario de satisfacción entregado a cada sujeto.

3.4.1 Sujetos

Los experimentos se han evaluado por cinco sujetos sanos (3 mujeres y 2 hombres), con una edad media de $23,4 \pm 1,5$ años, en una única sesión de una hora. Los electrodos empleados son Fz, Cz, P3, Pz, P4, PO7, PO8 y Oz, y no han cambiado para ningún sujeto, al igual que la frecuencia de muestreo, que se ha mantenido siempre en 250 Hz. A continuación, se describen las diferentes tareas que se llevan a cabo en la sesión.

3.4.2 Protocolo de evaluación

Para el protocolo de evaluación, se han realizado 6 tareas diferentes, en las que se han modificado ciertos parámetros de las tareas originales (Go-NoGo, Stroop y *N*-Back). A continuación, se detallan cada una de ellas.

Primera tarea. En ella el sujeto debía realizar la prueba Go-NoGo. En dicha prueba hay 50 estímulos, con un porcentaje de NoGo del 20% del total. La tarea se repetirá 4 veces, de modo que contaremos con 200 muestras de cada sujeto, 40 correspondientes a estímulos NoGo y 160 a Go.

Segunda tarea. Esta corresponde a la prueba Go-NoGo, pero ahora con un 50 % de NoGo sobre el total, que vuelven a ser 50 estímulos. Esta tarea se repite 4 veces, por lo que volvemos a tener 200 muestras, 100 muestras para cada estímulo. En esta segunda tarea hacemos que el sujeto no pueda intuir el estímulo siguiente, ya que ambos tienen la misma probabilidad, así podemos ver diferencias en el número de acciones correctas, en los tiempos de reacción y en los ERPs. El tiempo dedicado a estas dos primeras tareas, pertenecientes a Go-NoGo, es de unos 15 minutos.

Tercera tarea. Que corresponde a la tarea de Stroop. En dicha tarea hay 50 estímulos, en la que, como ya hemos comentado anteriormente, aparecerán de manera aleatoria diferentes palabras en diferentes colores, tanto de manera congruente como incongruente. El tiempo dedicado a esta tarea de Stroop es de unos 12 minutos.

Cuarta tarea. En ella se realizará la tarea *N*-Back. En la que el valor de *N* será 1. Hay 50 estímulos, con una probabilidad del 33% de que el estímulo actual sea igual al *N* anterior.

Quinta tarea. Que es completamente igual a la anterior, con la única diferencia de que el valor de *N* es 2. Aumentamos el nivel de carga de trabajo de la memoria, al hacer que el sujeto memorice mayor número de letras, y por tanto aumenta el nivel de dificultad.

Sexta tarea. En esta última tarea se vuelve a realizar la tarea *N*-Back, que es igual a las dos anteriores, con la diferencia de que el valor de *N* es 3. Volvemos a incrementar la carga de trabajo de la memoria, acercándonos al límite, ya que utilizar un valor de *N* superior o igual a 4 supondría grandes dificultades para la mayoría de los usuarios. Estas últimas tres tareas permiten comparar los ERPs, TRs y número de acciones correctas para las diferentes cargas de trabajo de la memoria. El tiempo dedicado a estas últimas tres tareas, pertenecientes a *N*-Back es de 33 minutos, por lo que el tiempo total de la sesión es de 1 hora.

3.4.3 Cuestionario de satisfacción

Una vez que los sujetos finalizaron sus sesiones, se les entregó un cuestionario de satisfacción para poder recoger su experiencia personal y sugerencias para poder realimentar el proyecto. En dicho cuestionario, se pedirá al sujeto que valore si las tareas son intuitivas y la duración de las tareas Go-NoGo, Stroop y *N*-Back en una escala del 1 al 5. Además, para cada una de las subtareas se pedirá que valore la dificultad, el nivel de atención necesario, el nivel de fatiga, estrés y motivación producido, en una escala del 1 al 100. A continuación, se muestra el cuestionario de satisfacción entregado a cada uno de los sujetos al terminar el experimento.

Tarea GO-NOGO

Por favor califique la siguiente información en una escala del 1 al 5, siendo 5 “totalmente de acuerdo” y 1 “totalmente en desacuerdo”

La tarea me ha resultado intuitiva.

1	2	3	4	5
1	2	3	4	5

La duración de la tarea es la adecuada

1° tarea GO-NOGO

Indique en una escala del 1 al 100:

- La dificultad de la tarea:
- El nivel de atención necesario para superar la tarea:
- El nivel de fatiga o cansancio producido por la tarea:
- El nivel de estrés o frustración producido por la tarea:
- El nivel de motivación producido por la tarea:

2° tarea GO-NOGO

Indique en una escala del 1 al 100:

- La dificultad de la tarea:
- El nivel de atención necesario para superar la tarea:
- El nivel de fatiga o cansancio producido por la tarea:
- El nivel de estrés o frustración producido por la tarea:
- El nivel de motivación producido por la tarea:

Tarea STROOP

La tarea me ha resultado intuitiva.

1	2	3	4	5
1	2	3	4	5

La duración de la tarea es la adecuada

Indique en una escala del 1 al 100:

- La dificultad de la tarea: _____
- El nivel de atención necesario para superar la tarea: _____
- El nivel de fatiga o cansancio producido por la tarea: _____
- El nivel de estrés o frustración producido por la tarea: _____
- El nivel de motivación producido por la tarea: _____

Tarea N-BACK

Por favor califique la siguiente información en una escala del 1 al 5, siendo 5 “totalmente de acuerdo” y 1 “totalmente en desacuerdo”

La tarea me ha resultado intuitiva.

1	2	3	4	5
1	2	3	4	5

La duración de la tarea es la adecuada

1º tarea N-BACK

Indique en una escala del 1 al 100:

- La dificultad de la tarea: _____
- El nivel de atención necesario para superar la tarea: _____
- El nivel de fatiga o cansancio producido por la tarea: _____
- El nivel de estrés o frustración producido por la tarea: _____
- El nivel de motivación producido por la tarea: _____

2º tarea N-BACK

Indique en una escala del 1 al 100:

- La dificultad de la tarea: _____
- El nivel de atención necesario para superar la tarea: _____
- El nivel de fatiga o cansancio producido por la tarea: _____
- El nivel de estrés o frustración producido por la tarea: _____
- El nivel de motivación producido por la tarea: _____

3º tarea N-BACK

Indique en una escala del 1 al 100:

- La dificultad de la tarea: _____
- El nivel de atención necesario para superar la tarea: _____
- El nivel de fatiga o cansancio producido por la tarea: _____
- El nivel de estrés o frustración producido por la tarea: _____
- El nivel de motivación producido por la tarea: _____

CAPÍTULO 4 RESULTADOS

4.1 Análisis offline

Una vez finalizadas las sesiones con sujetos y disponemos de los datos de la señal EEG, junto a los resultados de las tareas, se realizó el análisis offline por el cual obtendremos los ERPs. Para este estudio se implementan diferentes scripts para las cada una de las tareas a través de MEDUSA [37].

Una vez se realiza el filtrado, se guardó la señal EEG relativa a cada acción de cada tarea en diferentes matrices. Estas acciones son, para la tarea Go-NoGo, cuando se ha reaccionado correctamente a un estímulo Go, cuando se ha hecho de manera incorrecta, cuando se ha reaccionado correctamente a un estímulo NoGo y cuando se ha hecho de manera incorrecta; para la tarea de Stroop, cuando se ha reacción correctamente a un estímulo y cuando no; y para la tarea N-Back, tenemos las mismas acciones que para la de Stroop. Las matrices son tridimensionales, ya que tienen la forma: [número de acciones] x [número de muestras] x [canales]. Una vez tenemos las diferentes matrices se calcularon los ERP de cada una de ellas, para, posteriormente, mostrarlos visualmente.

En las figuras se muestra el ERP de cada acción acompañado del intervalo de confianza del 95 %, rellenando el espacio entre el error positivo y el negativo del mismo color que el ERP, pero semitransparente. Dicho intervalo reduce el rango de desviación, ya que ahora el 95% de los datos recogidos están entre el máximo y el mínimo, en vez del 100%, como ocurre en la desviación estándar.

4.1.1 Tarea Go-NoGo

A continuación, pasaremos a detallar los resultados de las dos subtareas Go-NoGo. La primera subtarea realizada por los sujetos es la tarea Go-NoGo, en la que el 20% de los estímulos son estímulos “NoGo”. Para dicha subtarea los sujetos tienen porcentaje de acierto de un 98.7%. De las 1.000 muestras obtenidas de todos los sujetos, solo 13 han sido erróneas y todas ellas pertenecen a estímulos “NoGo”, en los cuales los usuarios realizaron una pulsación. Para todos los estímulos “Go” los sujetos han reaccionado de forma correcta, esto se debe a que el tiempo disponible para realizar la pulsación es suficientemente largo (3 segundos). Para esta misma tarea el tiempo de reacción es de 388 ms, para calcular este tiempo hemos obviado las 13 pulsaciones incorrectas y solo hemos tenido en cuenta las 987 correctas. La desviación estándar de estos RT es de 84 ms.

En cuanto a la segunda tarea de la prueba “Go-NoGo”, en la cual disponemos de la misma cantidad de estímulos “Go” y “NoGo”, el porcentaje de acciones correctas es mayor, siendo del 99,8 %, de las 1.000 acciones totales, las únicas 2 acciones incorrectas pertenecen a estímulos “NoGo”. En cuanto al RT, al igual que en el caso anterior, teniendo en cuenta las acciones correctas, es de 421 ms y la desviación estándar de 95 ms. Los datos para ambas subtareas aparecen en la tabla 4.1.

Después de haber detallado las acciones de los usuarios y los tiempos de reacción procedemos a ver los resultados de las ondas de ERP.

Análisis de los ERP

Para la primera tarea Go-NoGo 20-80, calculamos el ERP de cada uno de los diferentes casos, estos casos son:

Tabla 4.1 Resultados (respuestas correctas y tiempos de reacción) de las tareas Go-NoGo para todos los sujetos y la media de todos ellos junto a la desviación estándar.

		S1	S2	S3	S4	S5	Media
Go-NoGo 20-80	Aciertos (%)	197 (98,5 %)	199 (99,5 %)	195 (97,5 %)	197 (98,5 %)	199 (99,5 %)	197.4 (98,7 %)
	RT	0,349	0,451	0,347	0,378	0,416	0,388 SD: 0,084
Go-NoGo 50-50	Aciertos (%)	199 (99,5 %)	200 (100 %)	199 (99,5 %)	200 (100 %)	200 (100 %)	199.6 (99,8 %)
	RT	0,354	0,436	0,371	0,448	0,498	0,421 SD: 0,095

- Cuando se responde de manera correcta a un estímulo Go, simplificado a ERP_TP (ERP True Positive).
- Cuando se responde de manera incorrecta a un estímulo Go, simplificado a ERP_FP (ERP False Positive).
- Cuando se responde de manera correcta a un estímulo NoGo, simplificado a ERP_TN (ERP True Negative).
- Cuando se responde de manera incorrecta a un estímulo NoGo, simplificado a ERP_FN (ERP False Negative).

El estímulo Go se asocia a Positive, el estímulo NoGo se asocia a Negative, una respuesta correcta se asocia a True y una incorrecta a False. Además, se calcula su desviación estándar, representada con un color semitransparente. En la Figura 4.1 se representan los diferentes ERPs para cada uno de los canales del promediado de todos los sujetos, para la tarea Go-NoGo 20-80. Se ha calculado el “*grand average*” promediando todos los sujetos. Como no se dispone de ningún estímulo Go al que se haya respondido de manera incorrecta, este caso no aparece en las gráficas. Además, el ERP correspondiente al estímulo NoGo respondido erróneamente (ERP_FN) tiene mucho ruido y no se puede ver con claridad. Esto se debe a los pocos casos de los que se dispone. Al tener pocos casos, las diferentes componentes no aparecen en nuestra representación.

Si obviamos este caso (ERP_FN), nos podemos centrar con más claridad en los otros dos (ERP_TP, y ERP_FP), cuando el sujeto responde de manera correcta a los dos estímulos. En la Figura 4.2 se vuelve a mostrar los ERPs para los diferentes canales del promediado de todos los sujetos en la tarea Go-NoGo 20-80, pero esta vez sin mostrar el ERP_FN. En la Figura 4.3 se muestran los mismos datos, pero de la tarea Go-NoGo 50-50.

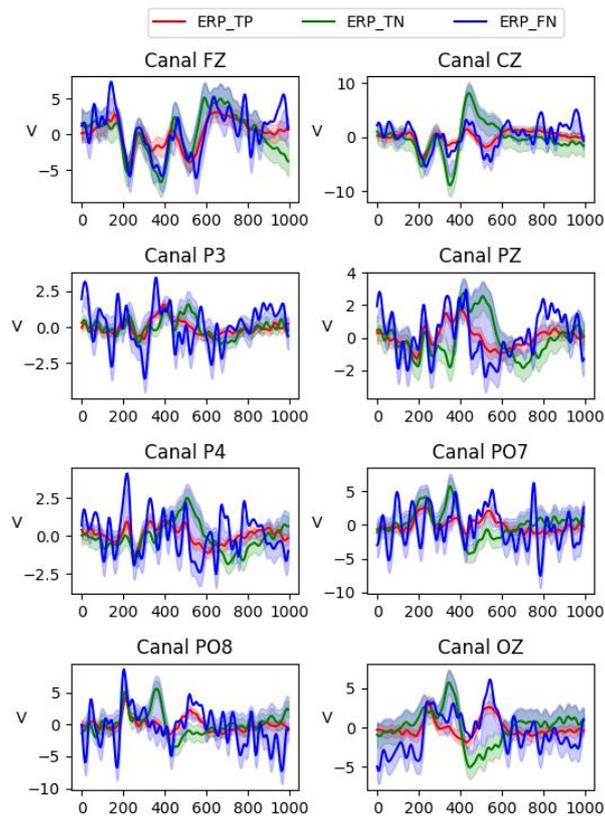


Figura 4.1 Representación gráfica de los diferentes ERPs, para los diferentes canales del promediado de los sujetos, que han realizado la tarea Go-NoGo 20-80.

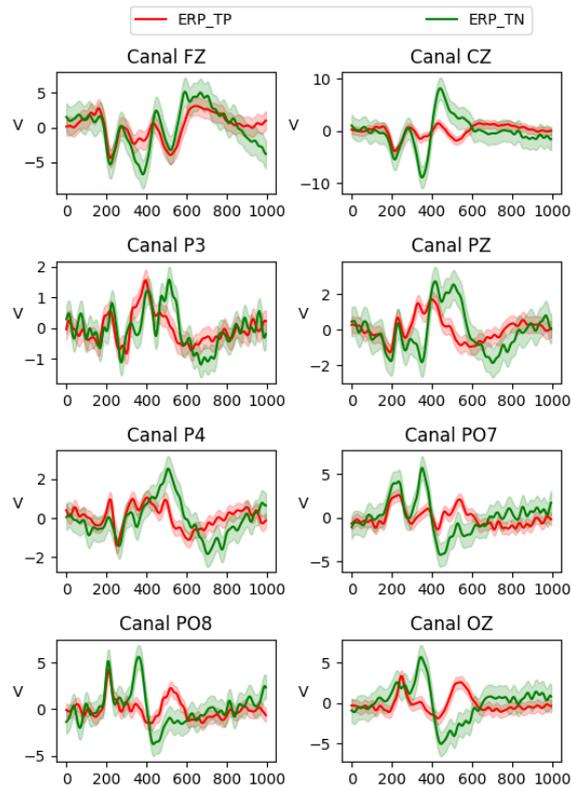


Figura 4.2 Representación gráfica de los diferentes ERPs, obviando el ERP_FN, para los diferentes canales del promediado de los sujetos, que han realizado la tarea Go-NoGo 20-80.

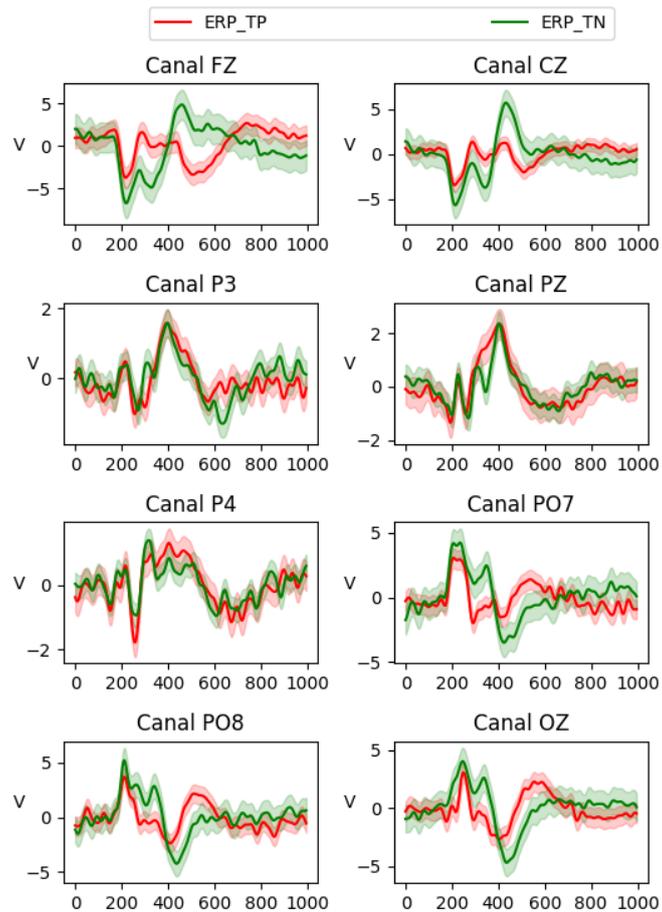


Figura 4.1 Representación gráfica de los diferentes ERPs, obviando el ERP_FN, para los diferentes canales del promediado de los sujetos, que han realizado la tarea Go-NoGo 50-50

4.1.2 Tarea de Stroop

Para la segunda prueba de la sesión, la tarea de Stroop, se ha obtenido un 98,9% de respuestas correctas. De los 1.000 resultados obtenidos entre todos los sujetos, solo 11 han sido erróneos, por supuesto todos ellos se deben a estímulos incongruentes. El RT medio es de 827 ms, teniendo en cuenta únicamente las acciones correctas. Como se podía esperar, todos los sujetos han tenido tiempos de reacción menores para los estímulos congruentes respecto a los estímulos incongruentes, siendo la media de estos de 767 y 846 ms respectivamente. Los datos correspondientes a esta prueba se muestran en la tabla 4.2. La desviación estándar del RT para los estímulos congruentes es de 271 ms y 289 ms para los estímulos incongruentes.

Análisis de los ERP

Para la tarea de Stroop no hay ninguna subtarea. Para esta tarea se calculan los ERPs de los dos casos, estos casos son:

- Cuando se responde de manera correcta a un estímulo congruente, simplificado a ERP_TC (ERP True Congruent).
- Cuando se responde de manera incorrecta a un estímulo congruente, simplificado a ERP_FC (ERP False Congruent).
- Cuando se responde de manera correcta a un estímulo incongruente, simplificado a ERP_TI (ERP True Incongruent).

Tabla 4.2 Resultados (aciertos y tiempo de reacción, para las condiciones congruentes e incongruentes) de la tarea de Stroop para todos los sujetos y la media de todos ellos junto a la desviación estándar.

		S1	S2	S3	S4	S5	Media
Tarea de Stroop	Aciertos (%)	200 (100 %)	196 (98 %)	196 (98 %)	197 (98,5 %)	200 (100 %)	197.8 (98,9 %)
	RT	0,779	0,829	0,605	0,895	1,024	0,827 SD: 0,271
	RT (congruentes)	0,691	0,774	0,524	0,85	0,994	0,767
	RT (incongruentes)	0,799	0,85	0,632	0,909	1,033	0846 SD: 0,289

- Cuando se responde de manera incorrecta a un estímulo incongruente, simplificado a ERP_FI (ERP False Incongruent).

Se utiliza la misma nomenclatura que para la tarea Go-NoGo. Una respuesta correcta se asocia a True y una incorrecta a False. También, se calcula su desviación estándar, representada con un color semitransparente. En la Figura 4.4 se muestran los diferentes ERPs (ERP_T y ERP_F) para cada uno de los canales del promediado de todos los sujetos. Se ha calculado el “grand averages” promediando todos los sujetos.

En el ERP correspondiente a una respuesta incorrecta (ERP_F) ocurre lo mismo que en la tarea Go-NoGo, tiene mucho ruido y no se puede ver con claridad. Esto se debe a los pocos casos de los que se dispone. Al tener pocos casos, las diferentes componentes no se pueden anular entre sí y, por lo tanto, aparecen en nuestra representación. Si obviamos el ERP_F, nos podemos centrar con más claridad en el ERP_T, que a su vez se puede dividir en ERP_TC, y ERP_TI (respuesta correcta ante estímulos congruentes e incongruentes, respectivamente). En la Figura 4.5 se muestra ERP_TC y ERP_TI para los diferentes canales del promediado de todos los sujetos en la tarea de Stroop, sin mostrar el ERP_F.

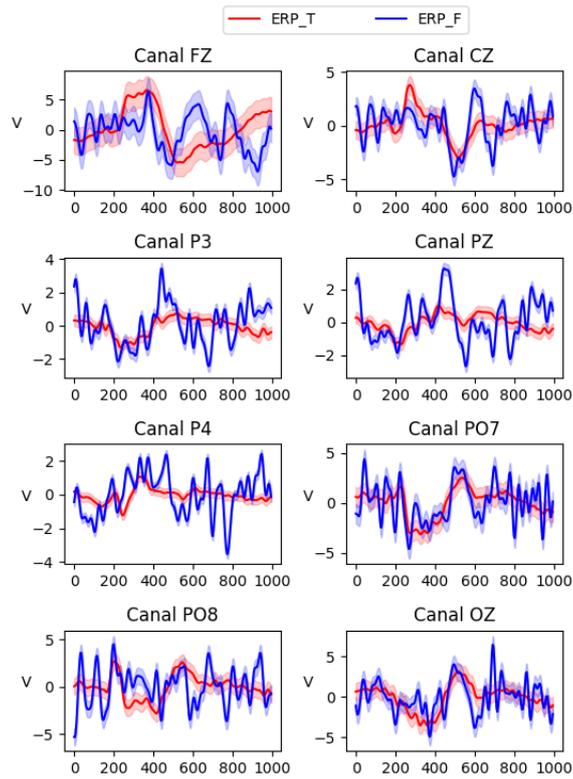


Figura 4.2 Representación gráfica de ERP_T y ERP_F, para los diferentes canales del promediado de los sujetos, que han realizado la tarea de Stroop.

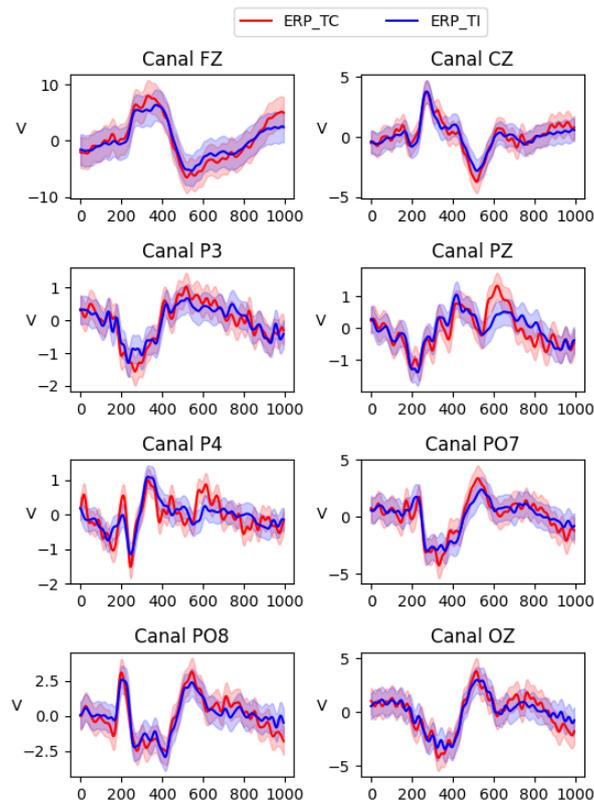


Figura 4.3 Representación gráfica de ERP_TC y ERP_TI, obviando el ERP_F para los diferentes canales del promediado de los sujetos, que han realizado la tarea de Stroop.

Tabla 4.3 Resultados (aciertos y tiempo de reacción) de la tarea de *N*-Back para todos los sujetos y la media de todos ellos.

		S1	S2	S3	S4	S5	Media
1-Back	Aciertos (%)	199 (99,5 %)	200 (100 %)	185 (92,5 %)	197 (98,5 %)	196 (98 %)	195.4 (97,7 %)
	RT	0,378	0,461	0,444	0,517	0,525	0,465 SD: 0,134
2-Back	Aciertos (%)	193 (96,5 %)	196 (98 %)	184 (92 %)	184 (92 %)	177 (88,5 %)	186.8 (93,4 %)
	RT	0,478	0,786	0,677	0,154	0,670	0,734 SD: 0,489
3-Back	Aciertos (%)	187 (93,5 %)	163 (81,5 %)	179 (89,5 %)	182 (91 %)	168 (84 %)	175.6 (87,8 %)
	RT	0,812	1,148	1,265	0,78	0,73	0,938 SD: 0,504

4.1.3 Tarea *N*-Back

La última tarea de la sesión es la tarea *N*-Back, dividida en tres subtareas. En la primera, 1-Back, los sujetos han respondido correctamente al 97,7 % de los estímulos, de las 23 respuestas erróneas, 2 pertenecen a fallos de pulsaciones cuando no debían haber pulsado y 21 a fallos de no realizar la pulsación cuando debían. El RT, perteneciente solo a las respuestas correctas, es de 465 ms y su desviación estándar de 134 ms.

Para la tarea 2-Back, el porcentaje de respuestas correctas, como es de esperar, ha disminuido, siendo este del 93,4 %. De las 66 respuestas incorrectas, 21 pertenecen a pulsaciones realizadas cuando no se debía y 45 a no pulsaciones cuando se debía. El RT es de 734 ms, mayor que en el caso anterior, como se esperaba. La desviación estándar es de 489 ms. Los resultados han sido peores a los de la tarea anterior.

Para la tercera y última prueba, 3-Back, las respuestas correctas han vuelto a disminuir, siendo en este caso del 87,8 %. De las 121 respuestas correctas, 32 pertenecen a pulsaciones y 89 a no pulsaciones. El RT para esta prueba es de 938 ms, otra vez mayor al RT de la prueba anterior. La desviación estándar de este RT es de 504 ms. Los resultados de todas las subtareas se pueden ver en la tabla 4.3.

Análisis de los ERP

La tarea *N*-Back cuenta con tres subtareas diferentes, para cada una de estas subtareas se calcula el ERP de los dos casos, estos casos son:

- Cuando se responde de manera correcta a un estímulo, simplificado a ERP_T (ERP True).
- Cuando se responde de manera incorrecta a un estímulo, simplificado a ERP_F (ERP False).

Para las tareas 1-Back y 2-Back, el número de respuestas erróneas es muy pequeño y, por lo tanto, al igual que pasaba con otras tareas, el ERP correspondiente (ERP_F) no se puede calcular correctamente y aparece con mucho ruido. Lo podemos ver en la Figura 4.6, donde se muestra el ERP_T y ERP_F para la tarea 1-Back, se aprecia el ruido de este último. En cambio, para la tarea 3-Back, al tener una carga de memoria de trabajo elevada, el número de respuestas erróneas es superior y el ERP_F se puede representar correctamente, aunque podría ser mejorable si hubiera más muestras. En la Figura 4.7 se muestra el ERP_T y ERP_F para la tarea 3-Back.

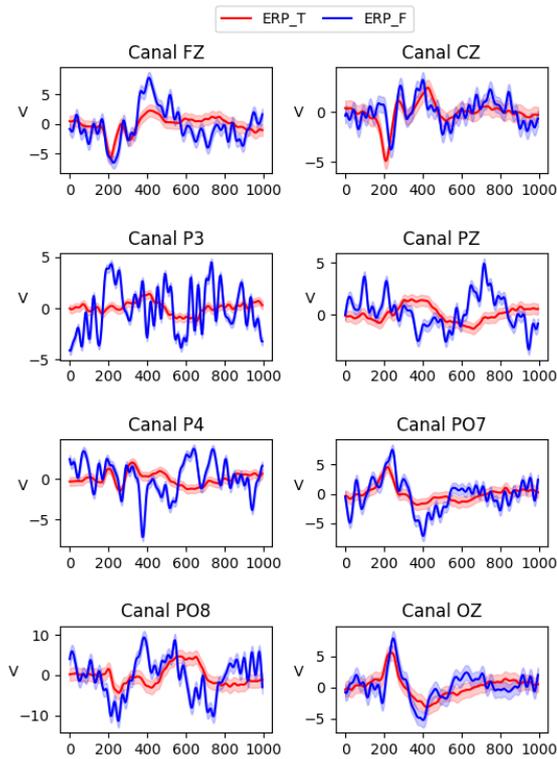


Figura 4.4 Representación gráfica de ERP_T y ERP_F, para los diferentes canales del promediado de los sujetos, que ha realizado la tarea 1-Back.

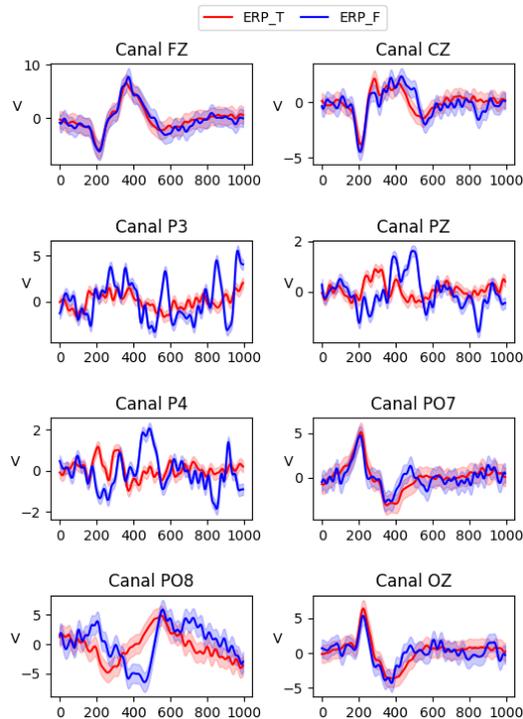


Figura 4.7 Representación gráfica de ERP_T y ERP_F, para los diferentes canales del promediado de los sujetos, que ha realizado la tarea 3-Back.

Además, se representan las formas de onda de los ERPs de respuestas correctas para las tres tareas de N -Back (1-Back, 2-Back y 3-Back). En la Figura 4.8 se muestran estos ERPs, donde las nomenclaturas T1, T2 y T3 hacen referencia a la tarea 1-Back, 2-Back y 3-Back, respectivamente.

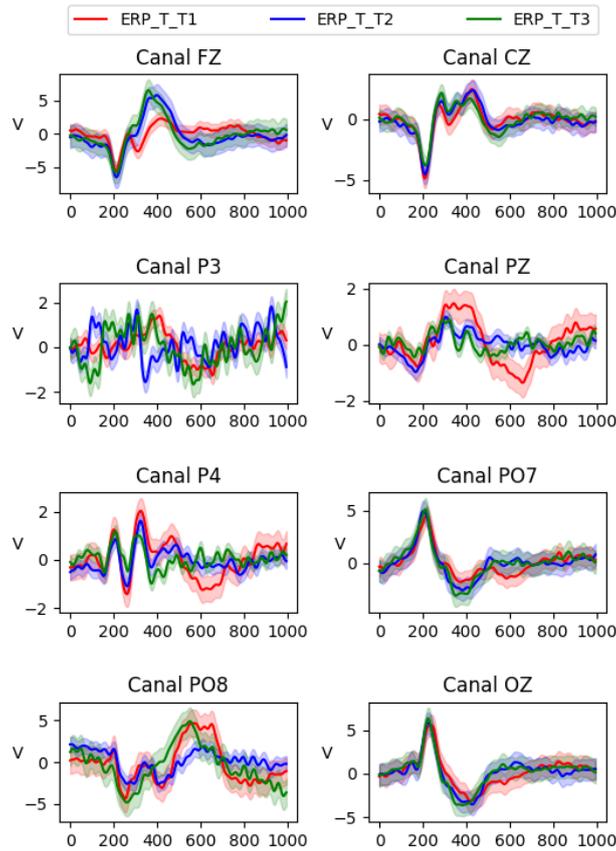


Figura 4.8 Representación gráfica de ERP_T para las tres tareas de *N*-Back, para los diferentes canales del promediado de los sujetos.

4.2 Resultados del cuestionario de satisfacción

Como ya se ha comentado anteriormente, los sujetos recogieron su experiencia personal en un cuestionario de satisfacción. En dicho cuestionario había dos preguntas sobre cada tarea, para la cual debían responder si estaban de acuerdo o en desacuerdo, en una escala del 1 al 5, siendo 5 “totalmente de acuerdo” y 1 “totalmente en desacuerdo”. Dichas cuestiones aparecen con un sombreado gris claro. Para cada una de las subtareas, los sujetos debían responder a cinco cuestiones, en una escala del 1 al 100, siendo 100 la puntuación máxima y 1 la mínima. Dichas cuestiones aparecen en la tabla sobre un fondo blanco.

Las respuestas obtenidas sobre dichas cuestiones, de los 5 sujetos, se muestran en la tabla 4.4. Para cuantificar los resultados se ha calculado la media de los 5 sujetos y la desviación estándar.

Tabla 4.4 Tabla que refleja la media y la SD de los resultados del cuestionario de satisfacción.

Tarea	Cuestiones planteadas	Media de respuestas	SD
Go-NoGo	La tarea me ha resultado intuitiva.	4.8	0.44
	La duración de la tarea es la adecuada	4	0.7
Go-NoGo 20-80	La dificultad de la tarea	15.2	10.85
	El nivel de atención necesario para superar la tarea	55	31.62
	El nivel de fatiga o cansancio producido por la tarea	24	9.62
	El nivel de estrés o frustración producido por la tarea	26.4	34.31
	El nivel de motivación producido por la tarea	67.4	37.13
Go-NoGo 50-50	La dificultad de la tarea	14.2	11.65
	El nivel de atención necesario para superar la tarea	52.4	39.83
	El nivel de fatiga o cansancio producido por la tarea	21.4	9.74
	El nivel de estrés o frustración producido por la tarea	28	38.01
	El nivel de motivación producido por la tarea	67.2	37.57
Stroop	La tarea me ha resultado intuitiva.	4.8	0.45
	La duración de la tarea es la adecuada	4.8	0.45
	La dificultad de la tarea	42.6	21.65
	El nivel de atención necesario para superar la tarea	75.4	24.2
	El nivel de fatiga o cansancio producido por la tarea	29	12.45
	El nivel de estrés o frustración producido por la tarea	22	17.89
	El nivel de motivación producido por la tarea	79.2	30.87
N-Back	La tarea me ha resultado intuitiva.	4.2	0.84
	La duración de la tarea es la adecuada	4.4	0.55
1-Back	La dificultad de la tarea	34.2	27.63
	El nivel de atención necesario para superar la tarea	66	31.90
	El nivel de fatiga o cansancio producido por la tarea	38.2	22.39
	El nivel de estrés o frustración producido por la tarea	23.2	22.55
	El nivel de motivación producido por la tarea	69	36.12
2-Back	La dificultad de la tarea	73	9.08
	El nivel de atención necesario para superar la tarea	94	4.18
	El nivel de fatiga o cansancio producido por la tarea	71.4	10.36
	El nivel de estrés o frustración producido por la tarea	71	8.94
	El nivel de motivación producido por la tarea	62	27.52
3-Back	La dificultad de la tarea	91	8.22
	El nivel de atención necesario para superar la tarea	98	4.47
	El nivel de fatiga o cansancio producido por la tarea	83	14.83
	El nivel de estrés o frustración producido por la tarea	87.8	8.76
	El nivel de motivación producido por la tarea	61	15.17

CAPÍTULO 5 DISCUSIÓN

5.1 Análisis offline

5.1.1 Tarea Go-NoGo

Como hemos visto en el capítulo de resultados, la tarea Go-NoGo 20-80 tiene un porcentaje de aciertos general más bajo al de la tarea Go-NoGo 50-50, 98,7% y 99,8%, respectivamente. El parámetro cambiante entre ambas tareas es el porcentaje de estímulos NoGo, que pasa de ser 20% a 50%. Como era de esperar, la tarea que tiene un estímulo (NoGo) en menor cantidad, obtiene peores resultados en cuanto a número de respuestas correctas. Esto se debe, a que en la tarea Go-NoGo 20-80, el sujeto puede asumir que el siguiente estímulo a recibir sea un Go, ya que tiene mayor probabilidad. Por tanto, se pueden dar casos en los que se anticipe la respuesta, antes de visualizar el estímulo y se produzca un fallo. En la tarea Go-NoGo 50-50, al haber la misma probabilidad de recibir un estímulo Go que uno NoGo, el sujeto no puede intuirlo y debe esperar a observar el estímulo. Por esto se produce un menor número de fallos en la segunda tarea.

Para la tarea Go-NoGo 20-80 se han obtenido 13 falsos positivos (cuando el estímulo presentado era NoGo, pero el sujeto actuó como si fuese Go), en cambio, para la tarea Go-NoGo 50-50 solo se han obtenido 2 falsos positivos. Si calculamos la ratio de falsos positivos (False positive rate, FPR) para ambos casos, obtenemos 0,08 y 0,004, para las tareas Go-NoGo 20-80 y Go-NoGo 50-50, respectivamente. Obtenemos una mayor FPR para la tarea donde el estímulo NoGo aparece un 20%. Con estos resultados respaldamos la afirmación anterior de que el sujeto se anticipa al estímulo.

Por la misma causa, el tiempo de reacción es menor en la primera tarea, 388 ms frente a 422 ms en la segunda. Como se ha comentado previamente, en algunos casos, los sujetos anticipan su respuesta para la tarea Go-NoGo 20-80. Como consecuencia, los tiempos de reacción son menores a los de la tarea Go-NoGo 50-50, en la que los sujetos no anticipan su respuesta, ya que no se puede intuir el siguiente estímulo. Después de haber hecho un análisis de los resultados de la tarea, es decir, número de aciertos y tiempo de reacción, pasamos a hacer el análisis de las formas de onda de ERP. En cuanto a la desviación estándar del RT, no se destaca nada, debido a que es muy similar en ambas tareas.

En cuanto al análisis de los ERPs, nos centramos en los canales Cz y PO8, ya que son dos canales donde la señal se ve claramente. En los demás hay cierto ruido, se puede ver en la Figura 4.1 y 4.2 del capítulo anterior. Comenzamos analizando la tarea Go-NoGo 20-80, el canal Cz para el promediado de todos los sujetos. A los 200 ms de mostrar el estímulo hay un pico negativo, con amplitud muy próxima para las dos señales ERP (ERP_TP y ERP_TN), pero siendo un poco menor en el caso del ERP del NoGo. En torno a los 300 ms la señal muestra un pico positivo, pero no muy pronunciado y con amplitud similar para los dos tipos de estímulos. Entre los 350 y 400 ms, la señal vuelve a tener un pico negativo mínimo, en este caso si se aprecia que el ERP relativo al estímulo NoGo es mucho más negativo, llegando a los $-10 \mu\text{V}$. En los 450 ms la señal vuelve a tener otro pico positivo, alcanzando el máximo y siendo mucho mayor para el ERP del estímulo NoGo, llegando a los $10 \mu\text{V}$. Este pico puede ser un P300, ya que en ciertos casos se suele retrasar. En la mayoría de los picos el valor absoluto de la amplitud ha sido mayor para el estímulo NoGo, siendo mucho más notorio entre 350 y 450 ms.

Por el contrario, en el canal PO8 las señales de ERP tienen unos picos en los mismos lugares temporales, pero con amplitudes complementarias. A los 200 ms hay un pico positivo, con una amplitud ligeramente mayor para el estímulo NoGo. A los 300 ms el pico es negativo con amplitud similar para ambas señales. Entre los 350 y 400 ms hay un pico positivo máximo, mucho

más pronunciado en los estímulos NoGo. Y a los 450 ms se produce un mínimo negativo, siendo mucho menor en el estímulo NoGo. También para este canal el valor absoluto de la amplitud ha sido mayor para el estímulo NoGo, especialmente entre 350 y 450 ms.

Una vez analizamos el ERP de la tarea 20-80, pasamos a la tarea 50-50, donde tenemos el mismo porcentaje de estímulos Go y NoGo.

Al igual que en la tarea anterior, comenzamos analizando el canal Cz para el promediado de todos los sujetos. Esta señal tiene una forma de onda parecida a la de la tarea anterior, a los 200 ms tiene un pico negativo mínimo, con menor amplitud para el estímulo NoGo. A los 300 ms tiene un pico positivo, con una amplitud ligeramente mayor para el estímulo NoGo. A los 350 ms hay un pico positivo, donde la amplitud del estímulo NoGo es ligeramente menor. A los 450 ms se produce un pico máximo, donde la amplitud del estímulo NoGo es mayor.

Si comparamos estos resultados con los de la tarea anterior, podemos ver que los picos negativo y positivo situados en 200 y 300 ms son muy parecidos para ambos estímulos, pero no ocurre lo mismo con los picos posteriores. Esto se debe a que los dos primeros picos son VEP, los cuales no necesitan procesamiento de la tarea y solo reflejan la capacidad del sujeto para visualizar el estímulo. Para el pico negativo en 350 ms y el pico positivo en 450 ms, la amplitud del estímulo NoGo en la tarea 20-80 está cerca de los -10 y 10 μV , en cambio, para la tarea 50-50 está en torno a los -5 y 5 μV . Estos mismos picos para el estímulo Go tienen una amplitud parecida en ambas tareas, en la Figura 5.1 podemos ver los ERPs comentados. Por lo tanto, podemos decir que en el canal Cz, la amplitud del estímulo NoGo, en el espacio temporal 350-450 ms, cambia para cada tarea.

Para el canal PO8 de la tarea Go-NoGo 50-50, vemos que es muy similar a la de la tarea Go-NoGo 20-80. En general se producen los mismos picos en los mismos espacios temporales, y con una amplitud similar. La amplitud del pico situado en 350 ms, correspondiente al estímulo NoGo, es mayor en la tarea 20-80 (5 μV), que en la tarea 50-50 (2.5 μV). En la Figura 5.2 podemos ver estas formas de onda.

Al igual que ocurrió en el canal Cz, en el canal PO8 vemos que se produce un cambio en la amplitud del estímulo NoGo de una tarea a otra.

En resumen, podemos decir que para ambas tareas las señales de ERP tienen ciertos picos positivos y negativos, en los mismos espacios temporales, complementarios para el electrodo Fz y PO8, esto ocurre para todos los sujetos. Los picos correspondientes a estímulos Go (ERP_TP) tienen amplitud con valor absoluto menor que los picos correspondientes a estímulos NoGo (ERP_TN) para ambas tareas. Pero en la tarea Go-NoGo 20-80 la diferencia entre la amplitud de ambos estímulos es mayor que en la tarea Go-NoGo 50-50. Podemos decir que al haber menos estímulos NoGo hace que la amplitud en ciertos puntos tenga un valor absoluto mayor. Si analizamos las formas de onda de los sujetos individualmente, vemos que en algunos sujetos se ve más claramente, como en el sujeto 4 y 5, y que en otros sujetos es más difícil verlo como en el sujeto 1.

La razón por la que el valor absoluto de la amplitud de los picos correspondientes a la señal ERP_TN es mayor en la tarea Go-NoGo 20-80 que en la tarea Go-NoGo 50-50, es la diferencia entre el número de veces que aparecen. Para la tarea Go-NoGo 20-80, los estímulos NoGo aparecen un 20% del total, por lo que, son considerados estímulos no habituales. En cambio, para la segunda tarea Go-NoGo 50-50 aparecen el mismo número de veces que el estímulo Go, en este caso, no se consideran estímulos no habituales. Al ser considerados estímulos no habituales o raros, estos provocan una mayor amplitud en los picos de la señal ERP. Estos picos probablemente sean P300, ya que aparecen más tarde que los VEP típicos. Esto se debe a que involucran procesamiento mental, aunque sea algo sencillo, como distinguir entre dos estímulos. En la Figura

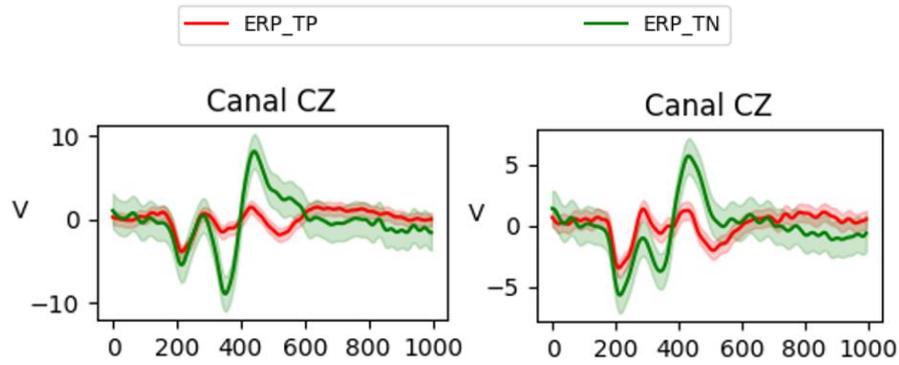


Figura 5.3 Representación de los ERPs para el canal Cz de la tarea Go-NoGo 20-80 y de la tarea Go-NoGo 50-50.

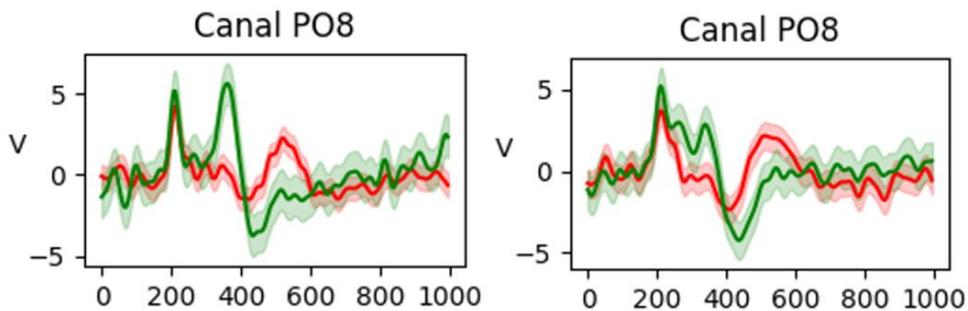


Figura 5.2 Representación de los ERPs para el canal PO8 de la tarea Go-NoGo 20-80 y de la tarea Go-NoGo 50-50.

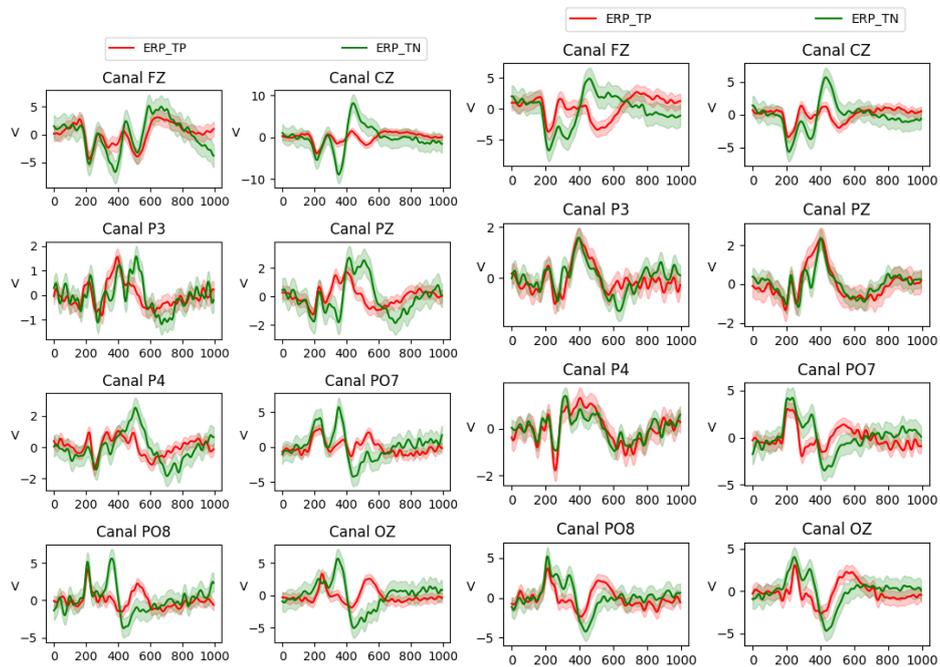


Figura 5.1 Formas de onda de ERP_TP y ERP_FTn para la tarea Go-NoGo 20-80 (izquierda) y Go-NoGo 50-50 (derecha).

5.3 podemos ver los diferentes ERPs, para las dos tareas Go-NoGo, de los que se ha hablado anteriormente.

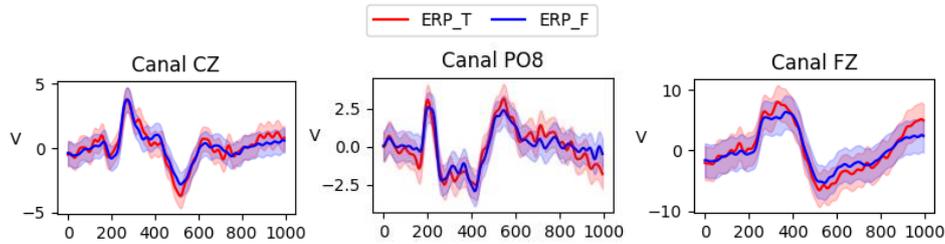


Figura 5.4 Representación gráfica de los diferentes ERPs, obviando el ERP_F para los canales Cz, PO8 y Fz del promediado de los sujetos, que han realizado la tarea de Stroop.

5.1.2 Tarea de Stroop

En cuanto a la tarea de Stroop, al comparar el tiempo de reacción de los estímulos congruentes y de los estímulos incongruentes, 767 ms y 846 ms respectivamente, vemos que es menor para los primeros, como era de esperar. En dichos estímulos no se produce interferencia entre la palabra y su color, por lo que el sujeto tarda menos en dar una respuesta, aun así, la diferencia entre ambos tiempos es pequeña. Con estos resultados podemos afirmar que la prueba produce una interferencia en los sujetos, y decir que es útil a la hora de medir la resistencia a dicha interferencia y medir la atención selectiva. En esta tarea tampoco hay una diferencia significativa en la desviación estándar del RT de ambos tipos de estímulos.

En cuanto al análisis de las formas de onda de los ERPs, nos centramos en tres canales, ya que son los que menos ruido tienen, son Cz, PO8 y Fz. Analizando el ERP del canal Cz, vemos una serie de picos, muy similares a los vistos en el ERP de la tarea Go-NoGo. A los 200 ms hay un pico negativo con amplitud similar para ambos tipos de estímulos. A los 300 ms hay un pico positivo máximo. En torno a los 350 ms volvemos a tener otro pico negativo muy poco pronunciado. Sobre los 400 ms volvemos a tener otro pico positivo muy poco pronunciado. Por último, en 500 ms tenemos un pico negativo mínimo. Este último, probablemente sea un P300, ya que suelen caer más tarde de los 300 ms.

Con el canal PO8 ocurre lo mismo que en la tarea Go-NoGo. Hay unos picos en los mismos espacios temporales, pero con amplitud complementaria a los picos del canal Cz. Hay un pico pronunciado positivo en 200 ms. Un pico negativo sobre 250 ms. Otro pico positivo muy poco pronunciado en 350 ms. Un pico negativo mínimo en 400 ms. Por último, un pico positivo en 500 ms.

En cuanto al canal Fz hay que destacar la amplitud más negativa de los estímulos congruentes en el espacio temporal de 450 a 800 ms. Para el canal Cz ocurre lo mismo, pero en el espacio temporal de 450 a 550 ms. Antes de 400 ms no se ven muchas diferencias de amplitud, ya que los picos que vemos son VEP y no requieren procesamiento mental. Y es a partir de los 400 ms donde vemos los P300. En la Figura 5.4 se muestran los canales Cz, PO8 y Fz, analizados anteriormente.

5.1.3 Tarea N-Back

En cuanto a las tres tareas de N-Back, vemos que a medida que se aumenta el valor de N, el porcentaje de respuestas correctas disminuye y el tiempo de reacción aumenta. Para la primera tarea, el porcentaje de acierto es muy alto: 97,7 %, y el tiempo de reacción bastante bajo: 465 ms. Datos comparables a los de la tarea Go-NoGo, en la que no se requiere un gran procesamiento de información, por lo que vemos que el nivel de la carga de trabajo es muy bajo y los sujetos no tienen dificultades.

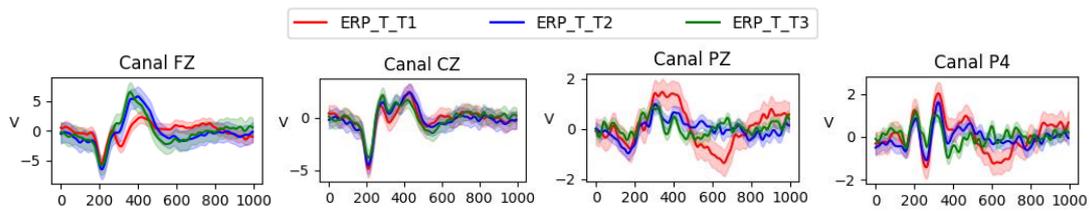


Figura 5.5 Representación gráfica de los diferentes ERPs, obviando el ERP_F para los canales Fz, Cz, Pz y P4 del promediado de los sujetos, que han realizado la tarea de Stroop.

Para la tarea 2-Back, el porcentaje de aciertos baja a 93,4 % y el tiempo de reacción aumenta a 734 ms. Al aumentar el valor de N aumentamos la carga de trabajo. Lo mismo ocurre con la tarea 3-Back, el porcentaje de aciertos disminuye a 87,8 % y el tiempo de reacción aumenta a 938 ms, ya que se ha vuelto a aumentar la carga de trabajo. Vemos como de la tarea 1-Back a la tarea 3-Back el porcentaje de aciertos disminuye un 10 % y el tiempo de reacción pasa a ser el doble. En cuanto a la desviación estándar del RT, vemos un gran salto de la tarea 1-Back a la tarea 2-Back y 3-Back. En la tarea 1-Back los sujetos suelen responder en unos tiempos muy similares, ya que tienen que memorizar pocos estímulos. En cambio, para la tarea 2-Back y 3-Back la carga de memoria es superior y habrá momentos en los que el sujeto necesite un mayor tiempo de procesamiento, haciendo que la desviación estándar aumente.

Estos resultados son los esperados, a medida que se aumenta el valor de N , los sujetos deben memorizar mayor número de letras en orden, por lo tanto, la carga de la memoria de trabajo aumenta, esto se traduce en un número de respuestas correctas menor y unos tiempos de reacción más largos.

Una vez analizado el número de respuestas correctas y el tiempo de reacción para las diferentes tareas, pasamos al análisis de las formas de onda de los ERPs. Nos centramos en los canales Fz, Cz, Pz y P4, ya que son los canales donde menos ruido hay.

Comenzando por el análisis del ERP del canal Fz, hay un pico mínimo inicial a 200 ms, donde las tres condiciones tienen una amplitud similar, en torno a 300 ms se produce otro pico negativo, donde la amplitud de la tarea 1-Back es algo menor. Cerca de 350 ms se produce un pico positivo máximo, donde la amplitud es proporcional a la carga de la memoria de trabajo. La amplitud máxima se obtiene para la tarea 3-Back y la amplitud mínima para la tarea 1-Back, esto se puede ver especialmente en el espacio temporal de 300 a 500 ms.

Para el canal Cz, podemos ver este mismo resultado para el pico situado a 200 ms y para el pico situado a 300 ms. La amplitud aumenta a medida que aumenta la carga de trabajo.

En cambio, si analizamos el canal Pz, para el pico situado a 300 ms, la amplitud disminuye a medida que aumenta la carga de trabajo.

Por último, en el canal P4 vemos que la amplitud disminuye a medida que aumenta la carga de la memoria de trabajo para el espacio temporal de 250 a 350 ms, donde se produce un pico máximo y otro mínimo. En la Figura 5.5 se muestran los cuatro canales comentados anteriormente, Fz, Cz, Pz y P4.

En los espacios temporales donde se ve la diferencia de amplitud entre las tareas, probablemente estén situados los P300, ya que suelen aparecer más tarde de los 300 ms. Para otros canales como el PO7 o el Oz, las señales no tienen apenas ruido. Pero las señales correspondientes a las tres tareas están muy solapadas, y no se ve ningún cambio significativo respecto a la carga de la memoria de trabajo.

5.2 Cuestionario de satisfacción

A continuación, se discuten todos los resultados del cuestionario de satisfacción.

Los cinco sujetos han estado de acuerdo en que todas las tareas han sido intuitivas y han tenido una duración adecuada. Las tareas son básicas, con acciones sencillas y, en un principio, no se prevé que el sujeto tenga dificultad para entenderlas.

Tareas Go-NoGo. Todos los sujetos han calificado la dificultad como baja, y no se han visto cansados tras realizar la tarea. En dicha tarea los sujetos solamente tienen que pulsar una tecla cuando vean un estímulo, se puede considerar que no tiene mucha dificultad y no produce un gran cansancio.

En cambio, los sujetos difieren en otras cuestiones, tanto para la tarea Go-NoGo 20-80 como 50-50, se han obtenido resultados bastante dispares en el nivel de atención necesaria para superar la prueba. Algunos sujetos han considerado máxima la atención necesaria. La tarea Go-NoGo, en parte, está diseñada para medir el nivel de atención, por lo que es de esperar que los sujetos presten cierta atención. Otros sujetos la han considerado mínima. Esto se puede deber a que les han dado menor importancia a los resultados. En cuanto al nivel de estrés producido por la tarea, ha sido bajo, y la motivación alta para todos los sujetos, a excepción del sujeto 4. La mayoría de los sujetos no se han visto estresados al realizar la prueba, debido a que la prueba no tiene una gran exigencia.

Tarea de Stroop. Todos los sujetos consideran la dificultad como medio baja, al igual que el nivel de cansancio y estrés producido por la tarea que ha sido calificado como medio bajo. La dificultad de esta tarea aumenta respecto a la anterior, se puede entender, ya que el sujeto tiene un rango de respuestas más amplio. El nivel de estrés también puede aumentar por el aumento del desafío de la tarea, requiere mayor exigencia, pero siguiendo en unos valores bajos. El nivel de cansancio era de esperar que no fuera alto, ya que, al tener mayor número de estímulos la tarea puede ser más entretenida, además de no tener ninguna subtarea diferente.

En cambio, todos los sujetos consideran el nivel de atención necesario para superar la prueba y la motivación producido por esta como alto, a excepción del sujeto número 4. Los sujetos sufren la interferencia del efecto Stroop y, por lo tanto, requieren un tiempo de procesamiento, al ser el tiempo de reacción un factor importante en esta prueba es entendible que se requiera bastante atención [12]. Esta tarea tiene mayor número de respuestas y aparecen varios estímulos diferentes, por lo que es de esperar que la motivación del sujeto no sea baja, ya que

Tareas N-Back, Los sujetos califican la dificultad de la tarea 1-Back como medio baja, medio alta para 2-Back y alta para 3-Back. Para la tarea 1-Back, al igual que ocurre en otros estudios [21][24], la dificultad es considerada baja, ya que el sujeto solo debe recordar un estímulo y la respuesta es básica. Por consiguiente, para la tarea 2-Back y 3-Back, al aumentar el número de estímulos a recordar, la dificultad de la tarea aumenta, al igual que ocurre en otros estudios [24].

En nivel de atención necesario para superar las tareas ha sido calificado como medio-alto, alto y alto, respectivamente. Era de esperar que el nivel de atención necesario fuera alto, ya que al tener que dar una respuesta en el menor tiempo posible, además de recordar el estímulo anterior, se requiere tener cierta atención.

En cuanto al nivel de fatiga o cansancio producido, ha sido calificado como medio bajo, alto y alto. Las tareas 2-Back y 3-Back requieren memorizar 2 y 3 estímulos durante 2 minutos que dura la prueba y las 4 veces que se repite. Los sujetos deben estar memorizando estímulos durante bastante tiempo, así que es de esperar que sufran cierto cansancio. En cambio, en la tarea 1-Back hay que memorizar un estímulo, por ello el cansancio es menor.

En nivel de estrés producido por las tareas *N-Back* se ha considerado medio-bajo (1-Back), medio-alto (2-Back) y alto (3-Back). La tarea 1-Back no requiere de mucha exigencia a la hora de memorizar los estímulos, por lo que se espera que no produzca un gran estrés. Para 2-Back y 3-Back la carga de la memoria aumenta, llegando al límite en la tercera tarea para algunos sujetos, esto tiene como resultado un mayor nivel de estrés en los sujetos.

El nivel de motivación es alto (1-Back), a excepción de un sujeto; medio-alto (2-Back), a excepción de un sujeto; y medio alto (3-Back). Era de esperar que un punto de dificultad mayor también supusiera una mayor motivación, en cambio, vemos que disminuye al aumentar la dificultad. Esta disminución no es muy notoria, pero se produce. Aunque no sepamos la causa, puede que haya una pérdida de interés al no conseguir memorizar los estímulos y ser incapaz de dar una respuesta, especialmente en la tarea 3-Back.

5.3 Comparación con otros estudios

En este apartado se comparan los resultados obtenidos en nuestras tareas con otros estudios similares. Se buscan estudios en los que se modifiquen los mismos parámetros que se han modificado en nuestras tareas para poder comparar la variación de los resultados.

5.3.1 Go-NoGo

En cuanto a las tareas de Go-NoGo, comparamos nuestros resultados con los resultados del estudio visto anteriormente en el estado de la técnica de Nami Kubo et al. (2021) [6], donde también se realiza una modificación de la repartición de los estímulos Go y NoGo. También lo comparamos con el estudio de Shulan Hsieh et al. (2016), “**Adaptive Strategies for the Elderly in Inhibiting Irrelevant and Conflict No-Go Trials while Performing the Go/No-Go Task**” [44]. En dicho estudio se investigó si los adultos mayores son más propensos a la distracción o al conflicto, inducidos por estímulos irrelevantes y conflictivos. Además, pretendía determinar si los adultos mayores dedicarían más esfuerzo a retener un estímulo NoGo en la condición de mayor demanda de control en comparación con la condición de menor demanda de control, (20% respecto a 50% y 80% de probabilidad de estímulos NoGo), este es el objetivo que más nos interesa para compararlo con nuestro estudio.

En cuanto a los resultados en la precisión de la respuesta. Para el primer estudio, en las pruebas donde el estímulo Go aparece un 70%, el número de fallos es mayor que para las pruebas donde aparece un 50%. Podemos ver estos datos en la Figura 5.6 [6]. Para el segundo estudio el número de errores también es mayor para la condición con un 20% de estímulos NoGo, tanto errores ante estímulos Go como para estímulos NoGo, podemos ver unas representaciones graficas de todos estos datos en la Figura 5.7.

En cuanto al tiempo de reacción. Para el primer estudio, el tiempo de reacción es menor para las pruebas con mayor probabilidad de estímulos Go. Lo podemos ver en la Figura 1.3 del capítulo 1. Para el segundo estudio, el RT también era menor para las condiciones con un 20% de probabilidad de NoGo. Para este estudio nos basta con comprobar los resultados del grupo de jóvenes, ya que es el rango de edad más próximo al del presente trabajo de Fin de Grado. En la Figura 5.7 se muestran estos datos.

En resumen, el número de errores aumenta, y el tiempo de reacción es menor, para las pruebas donde el estímulo Go aparece con mayor probabilidad, respecto a las pruebas donde los dos estímulos tienen igual probabilidad. Podemos ver que los resultados coinciden con los de nuestro trabajo.

Pasamos al análisis de las formas de onda del ERP. Comenzando con el primer estudio, se reveló que la amplitud del pico situado a 200 ms fue mayor para la prueba donde el estímulo NoGo se

	Blue Go 30%/Red No-go 70%	Blue Go 50%/Red No-go 50%	Blue Go 70%/Red No-go 30%	Red Go 30%/Blue No-go 70%	Red Go 50%/Blue No-go 50%	Red Go 70%/Blue No-go 30%
Go omission errors	0.77 ± 1.77	1.08 ± 1.75	1.08 ± 1.50	0.46 ± 0.97	0.54 ± 1.20	1.23 ± 3.85
No-go commission errors	0.31 ± 0.63	0.31 ± 0.63	0.46 ± 0.52	0.23 ± 0.44	0.69 ± 0.75	0.77 ± 1.24

Figura 5.7 Errores para las diferentes pruebas del estudio de Nami Kubo et al. (2021) [6].

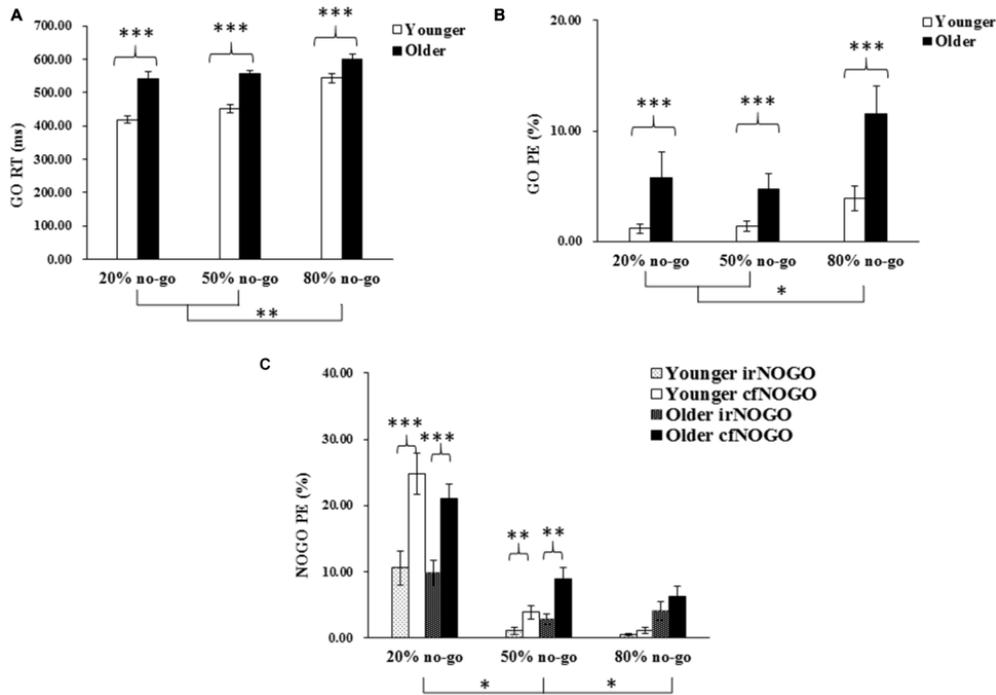


Figura 5.6 Representaciones graficas de los tiempos de reacción y los errores para las diferentes condiciones del estudio de Shulan Hsieh et al. (2016) [44].

mostraba un 30% que en las demás. También, se reveló que la amplitud del pico situado a 300 ms para los ERPs de Go era mayor en el 30% que en el 70% de probabilidad de Go, y que la amplitud del mismo pico para los ERPs de NoGo era mayor en el 30% que en el 50% y 70% de probabilidad de NoGo, tanto en Fz como en Cz. En la Figura 1.5 del capítulo 1 podemos ver una representación de las formas de onda de dicho estudio, donde la amplitud negativa está en el eje superior. El pico situado a 300 ms equivale al pico situado en 400 ms para nuestro estudio, ya que nuestra señal se ve retrasada respecto a la del estudio comentado. Por lo tanto, estos resultados coinciden con los nuestros en que las amplitudes son mayores para cuando un estímulo se muestra con menor probabilidad. En el segundo estudio, analizando el canal Cz, para la condición con 20% de estímulos NoGo. La amplitud de P3 es mucho mayor para el estímulo NoGo que para el estímulo Go, 15 y 9 μV , respectivamente. En cambio, para la condición con 50% de estímulos NoGo, la amplitud de P3 es muy parecida para los estímulos Go y NoGo, este entorno a los 12 μV para ambos. En la Figura 5.8 podemos ver una representación gráfica de los datos. Estos resultados coinciden con los de nuestro estudio. En cuanto a la amplitud de N2, analizando el canal FCz, para la condición con 20% de estímulos NoGo, es menor en el estímulo NoGo que en el estímulo Go, -10 y -3 μV . Para nuestro estudio, no disponemos del canal FCz, pero tenemos canales Fz y Cz, en dichos canales, para la tarea Go-NoGo 20-80, la amplitud de N2 para el estímulo NoGo tiene unos valores muy próximos a los -10 μV , mientras que para los estímulos Go tiene un valor en torno a -2 μV , valores muy próximos a los del estudio antes comentado. Para la condición de 50% de NoGo la amplitud es más parecida entre los diferentes estímulos, -4 μV para NoGo y -2

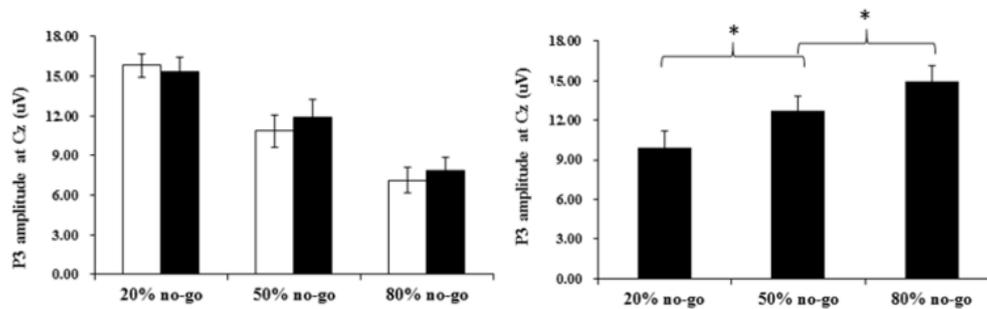


Figura 5.8 Representaciones graficas la amplitud P3 para el canal Cz, para las diferentes condiciones de los estímulos NoGo y Go, respectivamente [44].

	Congruent	Control	Incongruent
Reaction time (ms)	613.6 (104.4)	632.3 (96.8)	749.9 (142.6)
Accuracy	95.9 (2.4)	95.4 (3.1)	92.6 (4.3)

Standard deviations are shown in parenthesis.

Figura 5.9 Datos del porcentaje de respuestas correctas y del tiempo de reacción para la tarea de Stroop del estudio de Gjurgjica Badzakova et al. (2009) [45].

μV para Go. En el caso de nuestra tarea vemos que ocurre lo mismo, la amplitud sigue siendo menor para el estímulo NoGo, pero con valores más próximos.

Los resultados de los estudios de Nami Kubo et al. (2021) y Shulan Hsieh et al. (2016) son muy similares a los nuestros. Podemos ver como para todos los estudios la amplitud es mayor para los estímulos considerados como no habituales. La única diferencia por considerar es el retraso en la señal de nuestro estudio. Podemos ver que las componentes están retrasadas respecto a las de los otros estudios.

5.3.2 Stroop

Para comparar los resultados de la tarea de Stroop vamos a utilizar tres estudios, uno de ellos, el de Mehmet Ergen et al. (2014) [17], utilizado en la revisión de la técnica. En el segundo estudio, de Gjurgjica Badzakova et al (2009), “**An ERP investigation of the Stroop task: The role of the cingulate in attentional allocation and conflict resolution**” [45], se investigaba el papel del cíngulo en la asignación atencional y la resolución de conflictos, utilizando un EEG de alta densidad para registrar los ERP mediante la realización de una tarea de Stroop. El tercer y último estudio, de Yeganeh Shahsavari y Majid Ghosghuni (2018) es “**Assessing the impact of congruent and incongruent stimulus in stroop task, using event-related potentials (ERP) in patients with depression**” [46]. En este estudio se quería evaluar los efectos de las estimulaciones producidas por una tarea de Stroop en actividades cerebrales de pacientes con diferentes grados de depresión.

Comenzamos analizando los resultados de la tarea (precisión en la respuesta y tiempo de reacción). En el primer estudio, el RT medio fue mayor para la condición incongruente que para la congruente, 760.43 y 622.12 ms respectivamente. Los porcentajes de respuestas correctas fueron mayores para los estímulos congruentes, 99,1% respecto a 94,35%. En el segundo estudio la precisión fue mayor para los estímulos congruentes en comparación con los incongruentes y los tiempos de reacción fueron menores. En la Figura 5.9 podemos ver estos datos. Los datos de estos estudios coinciden con los de nuestro trabajo.

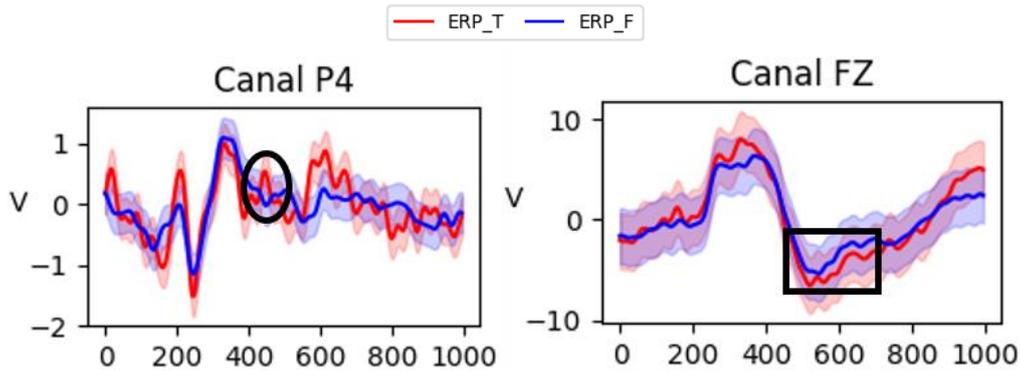


Figura 5.10 Forma de onda de ERP para los canales P4 y Fz de todos los sujetos. El círculo hace referencia al componente N450 y el rectángulo al espacio temporal 550 – 650 ms.

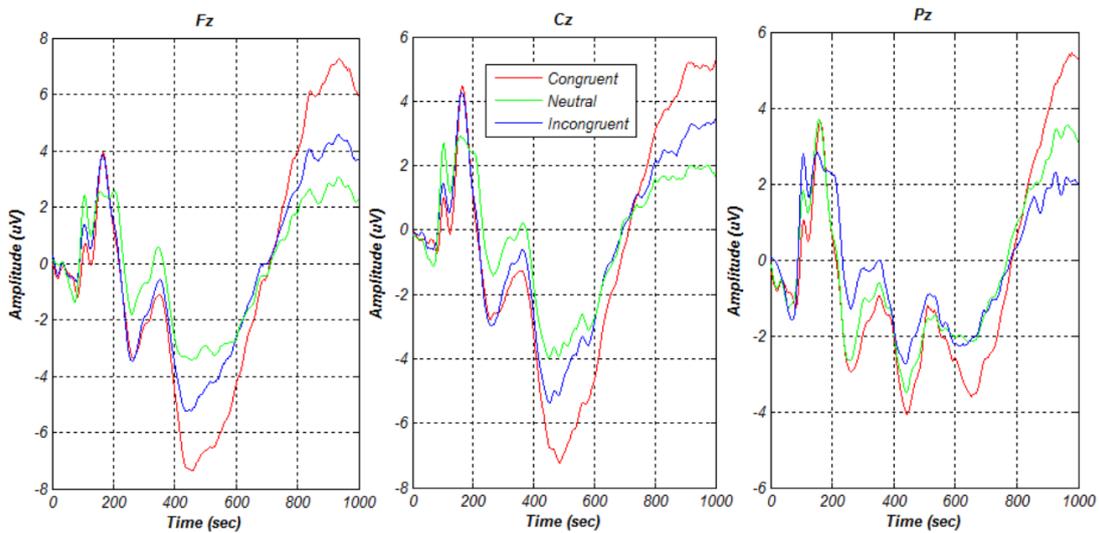


Figura 5.11 Representación del promediado ERP de los 18 sujetos, para las condiciones congruente, incongruente y neutro, para los canales Fz, Cz y Pz del estudio de Gjurgjica Badzakova et al. (2009) [45].

En cuanto a las formas de onda de los ERPs. Comenzando con el primer estudio, se observaron los picos P100, N100, P200, N140, N200, P300 y N450 en las condiciones congruentes e incongruentes. La amplitud del N450 fue más negativa en la condición incongruente en comparación con la condición congruente. En la condición incongruente se vio un cambio positivo sostenido dentro del periodo post-P300 y en la ventana temporal de 550-650 ms, la amplitud media fue significativamente mayor en la condición incongruente. En la Figura 1.7 del capítulo 1, podemos ver la representación de estas formas de onda ERP, se muestran las formas de onda promedio de los electrodos de la línea media y lateral para las regiones frontal (F3, Fz, F4), central (C3, Cz, C4), parietal (P3, Pz, P4), y occipital (O1, Oz, O2), el componente 450 se muestra con una flecha. En la Figura 5.10, podemos ver el canal P4 de nuestro estudio, donde se aprecia la amplitud más negativa de la condición incongruente para el componente N450. En la misma figura, se muestra el canal Fz, donde se puede ver la amplitud media mayor para la condición incongruente en la ventana temporal de 550 – 650 ms. Vemos que estas características coinciden con las del estudio anterior.

En el tercer estudio, las formas de onda de los ERPs se muestran en la Figura 5.11. En el canal Fz, la amplitud del ERP correspondiente al estímulo congruente tiene una amplitud menor a la del estímulo incongruente, para el espacio temporal de 400 a 700 ms. A partir de los 800 ms la amplitud es mayor para el estímulo congruente, podemos ver que para nuestro estudio las formas

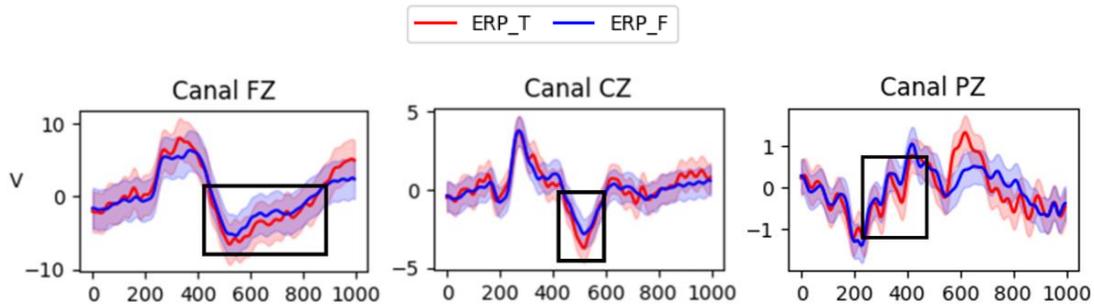


Figura 5.12 Representación de las formas de onda de ERP para los canales Fz, Cz y Pz del estudio de nuestro estudio.

de onda coinciden. En cuanto al electrodo Cz, para el pico situado en torno a 500 ms, la amplitud del estímulo congruente es menor a la del estímulo incongruente, coincidiendo con nuestros resultados. En el electrodo Pz, tenemos tres picos negativos entre los 200 y los 700 ms, en todos ellos la amplitud del estímulo congruente vuelve a ser menor a la del estímulo incongruente, coincidiendo también con los resultados de nuestro estudio. En la Figura 5.12 podemos ver una figura con las formas de onda de los ERPs del presente trabajo, donde se ven las similitudes con el estudio antes comentado.

Para esta tarea también vemos similitudes entre los estudios de Mehmet Ergen et al. (2014) y Gjurgjica Badzakova et al (2009). Se pueden destacar coincidencias en la componente N450 del canal P4 y en el rango de 550 a 6500 ms del canal Fz con el primer estudio. Para el segundo estudio vemos similitudes en los canales Fz, Cz y Pz. En resumen, las amplitudes de los picos negativos para los estímulos congruentes son menores a la de los estímulos incongruentes y el estímulo congruente tiene mayor amplitud en la componente N450 del canal P4.

5.3.3 N-Back

En la comparación de la tarea *N-Back* vamos a utilizar el estudio de Yoshiaki Nakao et al. (2012) visto en el capítulo 1 [23], donde se utiliza la tarea *N-Back* con diferentes condiciones (tarea de control, 0-Back, 1-Back, 2-Back y 3-Back). En segundo lugar, el estudio de Shanshan Dong et al (2015), “**Individual differences in working memory capacity are reflected in different ERP and EEG patterns to task difficulty**” [47]. En este estudio se examinó la existencia de marcadores neurales de las diferencias individuales en la capacidad de la WM y si las diferencias se manifiestan al realizar tareas con cargas de memoria exigentes o en todos los niveles de dificultad. Para ello se registró el EEG mientras los sujetos realizaban una tarea *N-Back* donde se variaba la dificultad de 1 a 4, para posteriormente medir los ERPs.

Comenzamos comparando los resultados de la tarea. Para el primer estudio, los porcentajes medios de respuestas correctas fueron: 99.3% para 0-back, 99.2% para 1-back, 95.9% para 2-back y 87.5% para 3-back, los tiempos medios de respuesta fueron. 412.7 ms para 0-back, 455.9 ms para 1-back, 546.9 ms para 2-back y 651.2 ms para 3-back. En el segundo estudio los resultados cambian de la misma forma al estudio anterior y a los resultados del presente trabajo. La precisión disminuyó, y el RT aumentó a medida que la carga de la memoria de trabajo aumenta. En la Figura 5.13 se muestran los datos del segundo estudio.

Seguimos con el análisis de las formas de onda de los ERPs, comenzando con el primer estudio. La amplitud del P3 temprano en Pz y del P3 tardío en Cz disminuyó a medida que aumentaba la carga de la memoria de trabajo. Se puede ver en la Figura 1.10 del capítulo 1, teniendo en cuenta que la amplitud positiva está en el eje inferior. En las formas de onda de nuestro trabajo coinciden en que, la amplitud del pico P3, para el canal Cz y Pz disminuye al aumentar la carga de la memoria de trabajo. Se puede ver en la Figura 5.14, especialmente para el caso 3-Back.

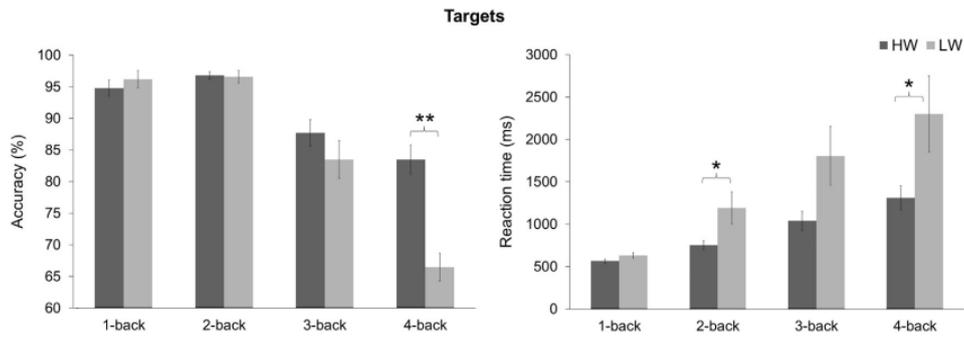


Figura 5.13 Representación gráfica para el porcentaje de respuestas correctas y el tiempo de reacción para el estudio de Shanshan Dong et al. (2015) [47].

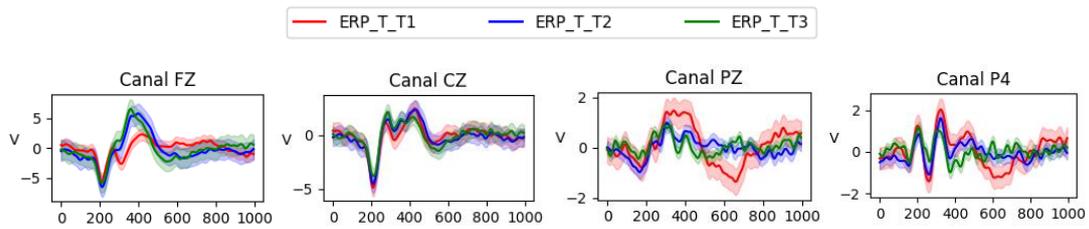


Figura 5.9 Representación de las formas de onda de ERP para los canales Fz, Cz, Pz y P4 del estudio de nuestro estudio.

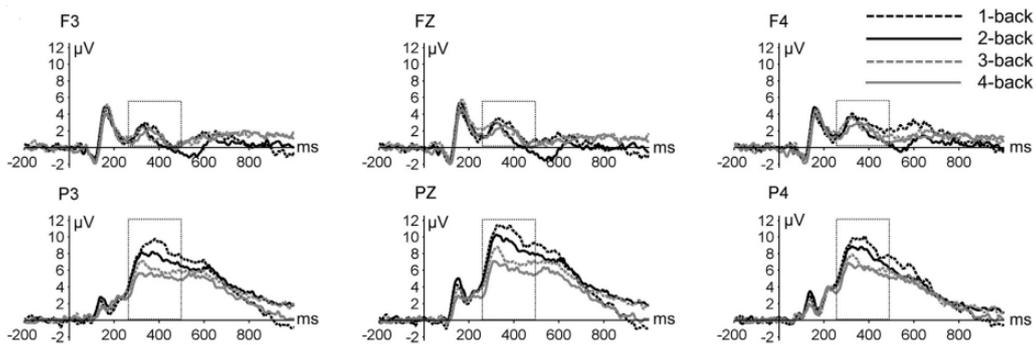


Figura 5.15 Formas de onda de los ERPs para el estudio de Shanshan Dong et al. (2015) [47].

Las formas de onda del segundo estudio para los canales F3, Fz, F4, P3, Pz y P4 se muestran en la Figura 5.15, aunque nos centramos en Fz, Pz y P4. Para el electrodo Fz es difícil hacer una comparación ya que, el ERP de las diferentes condiciones están muy juntos y no vemos diferencias significativas, pero si podemos destacar que el ERP correspondiente a la condición 3-Back alcanza el máximo en el primer pico positivo por encima de las demás condiciones, al igual que ocurre en nuestro estudio. Para el electrodo Pz, en el espacio temporal de 250 a 500 ms la amplitud de la condición 1-Back es la mayor, seguida de 2-Back y 3-Back, lo mismo que ocurre en nuestro estudio, con la diferencia de que el espacio temporal es de 300 a 500 ms. Algo muy parecido ocurre en el electrodo P4, en el espacio temporal de 250 a 500 ms la amplitud de la condición 1-Back es mayor a la de 2-Back, que a su vez es mayor a la de 3-Back. Lo mismo que ocurre en nuestro trabajo para el espacio temporal de 300 a 500 ms.

En los resultados de la tarea N-Back se han visto similitudes con los estudios de Yoshiaki Nakao et al. (2012) y de Shanshan Dong et al (2015). Con el primer estudio tenemos similitudes en la componente P3 de los canales Pz y Cz, cuya amplitud disminuye a medida que aumenta la carga de la memoria de trabajo. Para el segundo estudio las similitudes se ven en el espacio temporal de 250 a 500 ms del canal Pz y P4, con la pequeña diferencia que nuestra señal esta algo retrasada.

Para los espacios temporales antes comentados de todos los estudios la amplitud disminuye a medida que aumenta la carga de la memoria de trabajo.

5.4 Limitaciones

La primera y más importante limitación es el análisis estadístico. Para determinar las diferencias entre los ERPs de las distintas condiciones haría falta un análisis estadístico. Sin este análisis no se puede determinar si los ERPs son significativamente diferentes.

Otra limitación por destacar es la ausencia de una gran cantidad de muestras para ciertas condiciones en cada tarea. En la mayoría de las tareas realizadas, el número de fallos es pequeño, lo que dificulta el cálculo del ERP correspondiente a estos casos. Para el caso de las tareas Go-NoGo, el número de respuestas incorrectas es mínimo y es imposible calcular el ERP donde se vea claramente la forma de onda. Para la tarea de Stroop pasa exactamente lo mismo. Por último, para las tareas de *N*-Back no estamos tan limitados. En el caso de 1-Back tenemos el mismo problema que para las tareas anteriores, disponemos de muy pocas señales para respuestas erróneas. Para 2-Back se mejora un poco, el número de respuestas incorrectas aumenta, pero aun así es difícil ver la señal ERP correctamente. Es para la tarea 3-Back donde más respuestas erróneas se dan, de todas las tareas realizadas. En este caso se puede calcular el ERP y para ciertos canales es posible ver la señal y sus componentes con cierta claridad, pero, aun así, el resultado mejoraría si se tuvieran más muestras.

La última limitación por mencionar es la simplicidad de las formas de onda de los ERPs. En el aspecto visual, estas formas de onda son muy simples y no se pueden analizar con mucho detalle.

En resumen, las señales correspondientes a las respuestas erróneas disponen de muy pocas muestras y, por lo tanto, no es posible calcular el ERP de forma que sus componentes se vean con claridad. Además, no se ha realizado un análisis estadístico para ver las diferencias entre los ERPs y las formas de onda tienen un aspecto muy simple.

Para solucionar el primer problema bastaría con aumentar el número de sujetos, de este modo se dispondría de más muestras. Aunque hubiera ciertas condiciones que se repiten poco para cada sujeto en particular, al tener muestras de muchos sujetos se podría calcular el ERP correctamente. En cuanto a la segunda limitación, bastaría con realizar un análisis estadístico. Y para la tercera y última habría que representar las señales de una forma más detallada, ya sea aumentando el tamaño de las gráficas, cambiando el grosor de las líneas, etc.

CAPÍTULO 6 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

6.1 Conclusiones

Durante el presente Trabajo Fin de Grado, se ha realizado un estudio de las principales investigaciones realizadas sobre el registro de EEG mediante la realización de tareas de psicología cognitiva. Se ha realizado un estudio de la generación del EEG, de los ERPs, de la medida y registro del EEG y del preprocesado de la señal. Se ha investigado en cuanto a tareas de psicología cognitiva, para posteriormente diseñar e implementar nuestras propias aplicaciones en MEDUSA mediante Unity. Una vez realizado esto, hemos registrado la señal EEG de cinco sujetos mientras realizaban estas aplicaciones, hemos filtrado estas señales y se han calculado los ERPs. Con todos los datos recogidos, se han analizado los datos de las tareas y de las formas de onda de ERP, comparándolos con otros estudios similares [37].

Algunas de las conclusiones que se han extraído son:

- Las tareas de psicología cognitiva tienen una gran cantidad de variables o composiciones, las cuales se pueden modificar dependiendo de los objetivos de estudio. En el caso de nuestras tareas hemos modificado pocos parámetros, pero se podrían implementar aplicaciones mucho más complejas y con muchos más objetivos de estudio.
- Como era de esperar, los resultados de las tareas han empeorado a medida que se dificultan. Para la tarea de Stroop, los resultados han sido peores para los estímulos incongruentes respecto a los congruentes.
- Para la tarea *N-Back*, los resultados han sido peores a medida que se aumenta el valor de la variable *N* (se aumentaba la carga de la memoria de trabajo).
- Para la tarea *Go-NoGo* no se ha modificado la dificultad exactamente, pero si se han visto ciertos cambios, el número de respuestas correctas ha disminuido y el tiempo de reacción ha sido menor para las tareas que tienen un estímulo que aparece en menor medida (*Go-NoGo* 20-80).
- Las formas de onda de los ERPs se han visto modificadas al variar los parámetros de las tareas comentados anteriormente, comúnmente se ven variaciones en la amplitud.

6.2 Tareas futuras

En cuanto a las vistas de futuro, las tareas que se han puesto en práctica se pueden modificar y buscar otros objetivos de estudio diferentes. Como ya hemos hablado en capítulos anteriores y visto en otros estudios, las tareas tienen ciertas características que se pueden modificar, de modo que se pueden implementar gran cantidad de tareas diferentes dependiendo del objetivo de estudio.

En cuanto a la tarea *Go-NoGo*, en nuestro caso solo hemos modificado el porcentaje de estímulos *NoGo* que aparecen, pero en un futuro se podrían modificar otras características como:

- La manera de hacer llegar el estímulo al sujeto, que puede ser visual, auditivo, sensoriomotora.
- La forma de mostrar los estímulos, como hemos visto en el estudio de Nami Kubo et al. (2021) [6], los estímulos, tanto *Go*, como *NoGo* se pueden mostrar de manera diferente, pueden ser con diferentes imágenes, letras o colores.

- La respuesta que tienen que dar los sujetos, en nuestro caso para un estímulo Go hay que pulsar un botón y para un NoGo no hacer nada, pero podría ser hacerlo de manera inversa o realizar acciones diferentes para cada estímulo.
- El tiempo de presentación del estímulo y el tiempo entre estímulos.

Se podría ver cómo afectan todas estas características, ya sea de manera individual, o combinando alguna de ellas, a los resultados de respuestas correctas, tiempo de reacción y formas de onda de los ERPs.

En cuanto a la tarea de Stroop, puede que no tenga tantas opciones para ser modificada como la tarea Go-NoGo, pero si se pueden hacer ciertas modificaciones, algunas de ellas pueden ser:

- Aumentar o disminuir el número de colores, en el estudio actual los estímulos son 4 palabras diferentes con sus respectivos colores, dando un total de 16 combinaciones. El sujeto debe responder pulsando 4 letras. Se podría disminuir este número llegando a 2 o 3 colores, pero el estudio quedaría muy simple, también se podría aumentar usando 5, 6 o 7 colores, pero así se aumentaría la dificultad de la tarea.
- Añadir un estímulo neutro. Como se ha comentado en capítulos anteriores, o hemos visto en otros estudios, se puede añadir un estímulo neutro, para disponer de resultados intermedios a los resultados de los estímulos actuales.
- La manera de mostrar los estímulos. Se podría modificar la manera de mostrar los estímulos, ya sea con el tamaño de las palabras, la tonalidad de los colores o el fondo de la pantalla.
- El tiempo de presentación del estímulo y el tiempo entre estímulos.

Para estudios futuros se podría modificar alguno de estos parámetros y ver cómo afectan a los resultados.

Para la tarea de *N*-Back, en nuestro estudio solo hemos modificado el valor de *N* y por consiguiente la carga de la memoria de trabajo. Pero se podrían modificar otra serie de parámetros como pueden ser:

- El tipo de estímulo. Para nuestra tarea hemos utilizado diferentes letras para mostrar los estímulos, pero se podría emplear otras cosas, como imágenes, colores o números.
- El número de estímulos diferentes. En nuestro caso hemos utilizado 12 letras diferentes, pero se podrían emplear más o menos estímulos diferentes y, por lo tanto, afectara a la dificultad.
- El tiempo de presentación del estímulo y el tiempo entre estímulos.

Para estudios futuros se podría modificar alguno de estos parámetros, sin modificar el valor de *N* o combinando varias modificaciones de parámetros y ver cómo afecta a los resultados.

Otra posible línea futura puede ser implementar otras tareas de psicología cognitiva diferentes, como la tarea de Flanker, tarea Keep Track, tarea Letter Memory, tarea Plus-Minus entre otras. Y dentro de estas tareas las diferentes variantes que permitan [48].

La última línea futura sería la de añadir nuevos electrodos. De este modo se podrían registrar más canales para aplicar técnicas de conectividad funcional. La conectividad funcional es la dependencia temporal de la actividad neuronal entre regiones cerebrales anatómicas separadas.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. D. Bronzino, *The Biomedical Engineering Handbook. Medical devices and systems*. 2006. doi: 10.1201/9781420003864.
- [2] L. Pecen, “Electrical signal processing,” *Int. J. Electron.*, vol. 73, no. 5, pp. 1085–1086, 1992, doi: 10.1080/00207219208925773.
- [3] E. Sugawara and H. Nikaido, *Brain–Computer Interfaces Principles and Practice*, vol. 58, no. 12. 2014. [Online]. Available: <http://www.elsevier.com/locate/scp>
- [4] J. R. Folstein and C. Van Petten, “Influence of cognitive control and mismatch on the N2 component of the ERP: A review,” *Psychophysiology*, vol. 45, no. 1, pp. 152–170, 2008, doi: 10.1111/j.1469-8986.2007.00602.x.
- [5] S. Nieuwenhuis and N. Yeung, “Nieuwenhuis 2003. EEG in a gonogo task,” vol. 3, no. 1, pp. 17–26, 2003.
- [6] N. Kubo *et al.*, “The Effect of Prior Knowledge of Color on Behavioral Responses and Event-Related Potentials During Go/No-go Task,” *Front. Hum. Neurosci.*, vol. 15, no. June, pp. 1–11, 2021, doi: 10.3389/fnhum.2021.674964.
- [7] L. W. Barsalou, *Cognitive psychology. An overview for Cognitive Scientists*.
- [8] G. Shahaf, T. Fisher, J. Aharon-Peretz, and H. Pratt, “Comprehensive analysis suggests simple processes underlying EEG/ERP - Demonstration with the go/no-go paradigm in ADHD,” *J. Neurosci. Methods*, vol. 239, pp. 183–193, 2015, doi: 10.1016/j.jneumeth.2014.10.016.
- [9] P. Gomez, R. Ratcliff, and M. Perea, “A Model of the Go/No-Go Task,” *J. Exp. Psychol. Gen.*, vol. 136, no. 3, pp. 389–413, 2007, doi: 10.1037/0096-3445.136.3.389.
- [10] O. Boucher *et al.*, “Response inhibition and error monitoring during a visual Go/No-Go task in Inuit children exposed to lead, polychlorinated biphenyls, and methylmercury,” *Environ. Health Perspect.*, vol. 120, no. 4, pp. 608–615, 2012, doi: 10.1289/ehp.1103828.
- [11] H. Nakata, M. Takezawa, K. Kamijo, and M. Shibasaki, “Modality differences in ERP components between somatosensory and auditory Go/No-go paradigms in prepubescent children,” *PLoS One*, vol. 16, no. 11 November, pp. 1–16, 2021, doi: 10.1371/journal.pone.0259653.
- [12] P. Gulowski and J. Błaszczak, “Stroop-like interference of grammatical and visual number,” vol. 65, pp. 259–291, 2018, doi: 10.1556/2062.2018.65.2.
- [13] A. Kóbor *et al.*, “Children With ADHD Show Impairments in Multiple Stages of Information Processing in a Stroop Task: An ERP Study,” *Dev. Neuropsychol.*, vol. 40, no. 6, pp. 329–347, 2015, doi: 10.1080/87565641.2015.1086770.
- [14] S. Morand-Beaulieu and M. E. Lavoie, “Cognitive and motor event-related potentials in Tourette syndrome and tic disorders: A systematic review,” *Clin. Neurophysiol.*, vol. 130, no. 6, pp. 1041–1057, 2019, doi: 10.1016/j.clinph.2018.10.022.
- [15] F. Kreusch, E. Quertemont, A. Vilenne, and M. Hansenne, “Alcohol abuse and ERP components in Go/No-go tasks using alcohol-related stimuli: Impact of alcohol avoidance,” *Int. J. Psychophysiol.*, vol. 94, no. 1, pp. 92–99, 2014, doi: 10.1016/j.ijpsycho.2014.08.001.
- [16] Y. Yao, F. Du, C. Wang, Y. Liu, J. Weng, and F. Chen, “Numerical processing efficiency improved in children using mental abacus: ERP evidence utilizing a numerical Stroop

- task,” *Front. Hum. Neurosci.*, vol. 9, no. MAY, pp. 1–13, 2015, doi: 10.3389/fnhum.2015.00245.
- [17] M. Ergen, S. Saban, E. Kirmizi-Alsan, A. Uslu, Y. Keskin-Ergen, and T. Demiralp, “Time-frequency analysis of the event-related potentials associated with the Stroop test,” *Int. J. Psychophysiol.*, vol. 94, no. 3, pp. 463–472, 2014, doi: 10.1016/j.ijpsycho.2014.08.177.
- [18] C. L. Li, D. Yun, D. Lee, and M. Y. Jeong, “EEG analysis for cognitive interference effects in a Stroop task,” *Int. Conf. Control. Autom. Syst.*, pp. 348–351, 2011.
- [19] K. Sawami, H. Nakagawa, Y. Katahata, and C. Suishu, “Verification of Preventive Effect of Dual-Task and N-Back Task- Incorporated Music Therapy against Dementia,” *Neurochem. Neuropharmacol.*, vol. 03, no. 01, pp. 1–5, 2017, doi: 10.4172/2469-9780.1000115.
- [20] A. R. Dores *et al.*, “Study of behavioural and neural bases of visuo-spatial working memory with an fMRI paradigm based on an n-back task,” *J. Neuropsychol.*, vol. 11, no. 1, pp. 122–134, 2017, doi: 10.1111/jnp.12076.
- [21] L. Lilienthal, E. Tamez, J. Talley Shelton, J. Myerson, and S. Hale, “Dual n-back training increases the capacity of the focus of attention,” *Psychon. Bull. Rev.*, vol. 105, pp. 193–199, 2008, doi: 10.3758/s13423-012-0335-6.
- [22] B. Lamichhane, A. Westbrook, M. W. Cole, and T. S. Braver, “Exploring brain-behavior relationships in the N-back task,” *Neuroimage*, vol. 212, no. February, p. 116683, 2020, doi: 10.1016/j.neuroimage.2020.116683.
- [23] Y. Nakao, A. Kodabashi, M. Yarita, T. Fujimoto, and T. Tamura, “Temporal activities during P3 components on the working memory-related brain regions: N-back ERP study,” vol. 25, no. C, pp. 424–427, 2012.
- [24] V. Pergher, B. Wittevrongel, J. Tournoy, B. Schoenmakers, and M. M. Van Hulle, “N-back training and transfer effects revealed by behavioral responses and EEG,” *Brain Behav.*, vol. 8, no. 11, pp. 1–12, 2018, doi: 10.1002/brb3.1136.
- [25] M. A. Shalchy, V. Pergher, A. Pahor, M. M. Van Hulle, and A. R. Seitz, “N-Back Related ERPs Depend on Stimulus Type, Task Structure, Pre-processing, and Lab Factors,” *Front. Hum. Neurosci.*, vol. 14, no. October, pp. 1–13, 2020, doi: 10.3389/fnhum.2020.549966.
- [26] M. Sela *et al.*, *Electroencephalography: An introductory Text and Atlas*, vol. 62, no. 12. 2002.
- [27] S. S. and J. A. Chambers, *EEG Signal Processing*, vol. 2, no. C. 2003. doi: 10.1016/S0922-3487(08)70228-4.
- [28] J. W. Choi and K. H. Kim, *Computational EEG Analysis*. 2018. doi: 10.1007/978-981-13-0908-3.
- [29] U. Binder, Marc D.; Hirokawa, Nobutaka; Windhorst, *Encyclopedia of neuroscience*, vol. 1, no. 1. 1989. doi: 10.1097/00008506-198903000-00016.
- [30] L. E. Ismail and W. Karwowski, “A Graph Theory-Based Modeling of Functional Brain Connectivity Based on EEG: A Systematic Review in the Context of Neuroergonomics,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 155103–155135, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3018995.
- [31] S. Sur and V. Sinha, “Event-related potential: An overview,” *Ind. Psychiatry J.*, vol. 18, no. 1, p. 70, 2009, doi: 10.4103/0972-6748.57865.
- [32] R. Freunberger, W. Klimesch, M. Doppelmayr, and Y. Höller, “Visual P2 component is related to theta phase-locking,” *Neurosci. Lett.*, vol. 426, no. 3, pp. 181–186, 2007, doi: 10.1016/j.neulet.2007.08.062.

- [33] L. F. Nicolas-Alonso and J. Gomez-Gil, “Brain computer interfaces, a review,” *Sensors*, vol. 12, no. 2, pp. 1211–1279, 2012, doi: 10.3390/s120201211.
- [34] G. H. Klem, H. Otto Lüders, H. Jasper, and C. Elger, “The ten±twenty electrode system of the International Federation.”
- [35] J. R. E. and A. Abarbanel, *Introduction to Quantitative EEG and Neurofeedback*, vol. 59.
- [36] “g.USBAMP RESEARCH | EEG/Biosignal Amplifier | g.tec medical engineering GmbH medical engineering.” <https://www.gtec.at/product/gusbamp-research/> (accessed Jun. 10, 2022).
- [37] J. P. y R. H. Eduardo Santamaría-Vázquez, Víctor Martínez-Cagigal, Diego Marcos-Martínez, Víctor Rodríguez-González, Sergio Pérez-Velasco, Selene Moreno-Calderón, “MEDUSA©.” <https://www.medusabci.com/> (accessed Jun. 11, 2022).
- [38] D. J. McFarland, L. M. McCane, S. V. David, and J. R. Wolpaw, “Spatial filter selection for EEG-based communication,” *Electroencephalogr. Clin. Neurophysiol.*, vol. 103, no. 3, pp. 386–394, 1997, doi: 10.1016/S0013-4694(97)00022-2.
- [39] D. J. McFarland and J. R. Wolpaw, “Brain-computer interfaces for communication and control,” *Commun. ACM*, vol. 54, no. 5, pp. 60–66, 2011, doi: 10.1145/1941487.1941506.
- [40] L. Carter, P. N. Russell, and W. S. Helton, “Target predictability, sustained attention, and response inhibition,” *Brain Cogn.*, vol. 82, no. 1, pp. 35–42, 2013, doi: 10.1016/j.bandc.2013.02.002.
- [41] K. Khaksari, E. Condy, J. B. Millerhagen, A. A. Anderson, H. Dashtestani, and A. H. Gandjbakhche, “Effects of performance and task duration on mental workload during working memory task,” *Photonics*, vol. 6, no. 3, 2019, doi: 10.3390/photonics6030094.
- [42] “Introduction — Labstreaminglayer 1.13 documentation.” <https://labstreaminglayer.readthedocs.io/info/intro.html> (accessed Jun. 26, 2022).
- [43] “medusa-platform/lsl at master · gib-uva/medusa-platform.” <https://github.com/gib-uva/medusa-platform/tree/master/lsl> (accessed Jun. 21, 2022).
- [44] S. Hsieh, M. Wu, and C. H. Tang, “Adaptive strategies for the elderly in inhibiting irrelevant and conflict no-go trials while performing the Go/No-Go task,” *Front. Aging Neurosci.*, vol. 7, no. JAN, pp. 1–14, 2016, doi: 10.3389/fnagi.2015.00243.
- [45] G. Badzakova-Trajkov, K. J. Barnett, K. E. Waldie, and I. J. Kirk, “An ERP investigation of the Stroop task: The role of the cingulate in attentional allocation and conflict resolution,” *Brain Res.*, vol. 1253, pp. 139–148, 2009, doi: 10.1016/j.brainres.2008.11.069.
- [46] Y. Shahsavari and M. Ghoshuni, “Assessing the impact of congruent and incongruent stimulus in stroop task, using Event-Related Potentials (ERP) in patients with depression,” *Biomed. Eng. - Appl. Basis Commun.*, vol. 30, no. 5, pp. 1–9, 2018, doi: 10.4015/S1016237218500345.
- [47] S. Dong, L. M. Reder, Y. Yao, Y. Liu, and F. Chen, “Individual differences in working memory capacity are reflected in different ERP and EEG patterns to task difficulty,” *Brain Res.*, vol. 1616, pp. 146–156, 2015, doi: 10.1016/j.brainres.2015.05.003.
- [48] P. Sandberg, M. Rönnlund, L. Nyberg, and A. Stigsdotter Neely, “Executive process training in young and old adults,” *Aging, Neuropsychol. Cogn.*, vol. 21, no. 5, pp. 577–605, 2014, doi: 10.1080/13825585.2013.839777.
- [49] V. Martínez-Cagigal, “Toward Practical P300-based Brain-Computer Interfaces,” *Pap. Knowl. . Towar. a Media Hist. Doc.*, vol. 7, no. 2, pp. 107–15, 2014.