



industriales
etsii

Escuela Técnica
Superior
de Ingeniería
Industrial

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial

Predicción del pensamiento motor mediante señales de Electroencefalograma EEG

TRABAJO FIN DE GRADO

GRADO EN: Ingeniería en Tecnologías Industriales

Autor: Félix Laencina Escobar
Director: Dr. José Manuel Cano Izquierdo
Codirector: Dr. Julio José Ibarrola Lacalle



Universidad
Politécnica
de Cartagena

Cartagena, Abril 2019



Contenido

1. Introducción.....	9
1.1. Objetivos del proyecto.....	9
1.2. Trabajo a desarrollar.....	10
1.3. Conceptos previos.....	12
1.4. Distribución de los electrodos.....	14
2. Búsqueda bibliográfica.....	18
2.1. Búsqueda de dispositivos de registro de señales EEG.....	18
2.2. Búsqueda de tipos de sensores secos.....	44
3. Desarrollo de la metodología.....	48
3.1. Desarrollo del procedimiento.....	48
3.2. Componentes del dispositivo.....	49
3.3. Preparación del experimento.....	52
3.4. Realización del experimento.....	58
3.5. Formulario.....	60
4. Tratamiento de datos.....	62
4.1. Registro de datos.....	62
4.2. Preprocesado de los ficheros.....	69
4.3. Procesado final de los ficheros.....	72
4.4. Esquema del proceso completo.....	81
5. Base de datos y resultados obtenidos.....	83
5.1. Resultados de los experimentos.....	85
6. Comparación y discusión de resultados.....	89
6.1. Comparación de los resultados.....	89
6.1.1. Comparativa general por grupos.....	89
6.1.2. Comparativa real por grupos.....	90
6.1.3. Comparación resultados de aspectos concretos.....	97
6.1.4. Comparación resultados formularios.....	104



6.2. Discusión del trabajo realizado	109
6.2.1. Discusión de las tareas principales.....	109
6.2.2. Discusión de subobjetivos.....	113
7. Conclusiones.....	115
7.1. Conclusión final.....	115
7.2. Valoración personal y trabajos futuros.....	116
8. Bibliografía	117



Índice de Figuras

1. Introducción	9
1.3. Conceptos previos	12
Figura 1. Partes encéfalo	
Figura 2. Registro monopolar	
Figura 3. Registro bipolar	
1.4. Distribución de electrodos	14
Figura 4. Sistema 10-20 de 21 electrodos	
Figura 5. Sistema 10-20 de 75 electrodos	
Figura 6. Distribución 1	
Figura 7. Distribución 2	
Figura 8. Distribución 3	
Figura 9. Distribución 1 con sensores de referencia	
2. Búsqueda bibliográfica	18
2.1. Búsqueda de dispositivos de registro de señales EEG	18
Figura 10. Distribución electrodos para Emotiv EPOC+	
Figura 11. Hardware de Emotiv EPOC+	
Figura 12. Precios SDK Emotiv EPOC+	
Figura 13. Distribución electrodos para Emotiv Insight	
Figura 14. Dispositivo Emotiv Insight	
Figura 15. Software EmotivPro	
Figura 16. Dispositivo OpenBCI Ganglion	
Figura 17. Casco UltraCortex Marx IV	
Figura 18. Electrodos de oro con forma de copa	
Figura 19. Disposición electrodos en OpenBCI Ganglion	
Figura 20. Software OpenBCI GUI	
Figura 21. Dispositivo Cyton Biosensing	
Figura 22. Dispositivo Cyton + Daisy Biosensing Board	
Figura 23. Dispositivo MindWave Mobile2	
Figura 24. Disposición electrodos MindWave Mobile2	
Figura 25. SDK MindWave Mobile2	
Figura 26. Dispositivo Muse y Muse 2	
Figura 27. Dispositivo Muse	
Figura 28. Disposición electrodos	
Figura 29. Colocación del dispositivo Muse	
Figura 31. Disposición electrodos Versus	
Figura 30. Dispositivo Versus	
Figura 32. Dispositivo Spark	
Figura 33. Aplicación Spark	
Figura 34. colocación dispositivo Spark	
Figura 35. Dispositivo BrainLink	
Figura 36. Colocación BrainLink	
Figura 37. Dispositivo BR8 Plus	
Figura 38. Disposición electrodos BR8 plus	
Figura 39. Colocación dispositivo BR8 plus	
Figura 40. Dispositivo BR32	
Figura 41. Disposición electrodos BR32	
Figura 42. Colocación dispositivo BR32	
Figura 43. Dry sensor Spring-Loaded	
Figura 44. Dry sensor Foam-Loaded	
Figura 45. Dispositivo IMEC	
Figura 46. Distribuciones electrodos IMEC	



2.2.	Búsqueda de tipos de sensores secos	44
	Figura 47. Sensor seco Drytode.....	
	Figura 48. Sensor seco Foretrode.....	
	Figura 49. Sensor seco Drytode.....	
	Figura 50. Sensor seco Dry Pad.....	
	Figura 51. Sensor seco g.Sahara.....	
	Figura 52. Sensor seco g.Sahara.....	
3.	Desarrollo de la metodología	48
3.2.	Componentes del dispositivo	49
	Figura 53. Malla.....	
	Figura 54. Electrodos.....	
	Figura 55. Encapsulado.....	
	Figura 56. Bluetooth.....	
	Figura 57. Bote gel conductivo.....	
	Figura 58. Bote gel limpieza.....	
	Figura 59. Jeringuilla.....	
	Figura 60. Bastoncillos.....	
3.3.	Preparación del experimento	52
	Figura 61. Dispositivo en funcionamiento.....	
	Figura 62. Dispositivo carga completa.....	
	Figura 63. Dispositivo batería baja.....	
	Figura 64. Correcta colocación de la malla sobre la cabeza.....	
	Figura 65. Pestaña Headset Setup Control Panel.....	
	Figura 66. Tipos de calidad de conexión.....	
	Figura 67. Conexión establecida.....	
	Figura 68. Pestaña Expresive Suite Control Panel.....	
	Figura 69. Pestaña Affectiv Suite Control Panel.....	
	Figura 70. Pestaña Cognitiv Suite Control Panel.....	
3.4.	Realización del experimento	58
	Figura 71. Posición correcta para realizar el experimento.....	
	Figura 72. Acción mano izquierda.....	
	Figura 73. Acción mano derecha.....	
	Figura 74. Letra de experimento.....	
	Figura 75. Fin de sesión.....	
	Figura 76. Usuario realizando experimento.....	
3.5.	Formulario	60
	Figura 77. Formulario experimento Emoc.....	
4.	Tratamiento de datos	62
4.1.	Registro de datos	62
	Figura 78. Carpeta para la realización de los experimentos.....	
	Figura 79. Mover la mano izquierda.....	
	Figura 80. Mover la mano derecha.....	
	Figura 81. Letra de experimento.....	
	Figura 82. Archivo eelogger_statusesBCIForms.....	
	Figura 83. Pantalla de configuración script "eelogger_statusesBCIForms.....	
	Figura 84. Carpeta con los archivos de los experimentos.....	
	Figura 85. Bucle While.....	
	Figura 86. Bucle for.....	
	Figura 87. Matriz de datos.....	
	Figura 88. Líneas de código para exportar resultados a csv.....	
	Figura 89. Contenido fichero de datos.....	



4.2.	Preprocesado de los ficheros	69
	Figura 90. Carpeta contenido para preprocesado.....	
	Figura 91. Archivos destacado para preprocesado.....	
	Figura 92. Distribución de posición para los sensores.....	
	Figura 93. Fichero ScriptPreprocessing.....	
	Figura 94. Carpeta de preprocesamiento.	
	Figura 95. Carpeta con archivos preprocesados.....	
4.3.	Procesado final de los ficheros	72
	Figura 96. Contenido carpeta de procesado.....	
	Figura 97. Fichero "ScriptFasArt".....	
	Figura 98. Primera parte código ScripFasArt.....	
	Figura 99. Parte aprendizaje código ScriptFasArt.....	
	Figura 100. Resultados mostrados por pantalla Matlab.....	
	Figura 101. Gráfica Modelo 1.....	
	Figura 102. Gráfica Modelo 2.....	
	Figura 103. Gráfica Modelo 3.....	
	Figura 104. Gráfica modelo final.....	
	Figura 105. Parte Test código ScriptFasArt.....	
	Figura 106. Ejemplo comparación de sesiones (Sin Poda de reglas).....	
	Figura 107. Ejemplo resultados Test Final (Con poda de reglas).....	
	Figura 108. Sección final ScripFasArt.....	
	Figura 109. Resultados y matriz de confusión (con poda de reglas).....	
6.	Comparación y discusión de los resultados	89
6.1.	Comparación de los resultados	89
6.1.2.	Comparativa real por grupos	90
	Figura 110. Gráfica de comparación promedio Sexo.....	
	Figura 111. Gráfica de comparación promedio Edad.....	
	Figura 112. Gráfica de comparación promedio Mano.....	
	Figura 113. Gráfica de comparación nivel de estudios.....	
	Figura 114. Gráfica de comparación promedio señales EEG.....	
	Figura 115. Gráfica de comparación promedio señales EEG.....	
	Figura 116. Gráfica de comparación promedio resultados TFGs.....	
6.1.3.	Comparación resultados aspectos concretos	97
	Figura 117. Gráfica de comparación promedio señales EEG.....	
	Figura 118. Distribución 1.....	
	Figura 119. Distribución 2.....	
	Figura 120. Distribución 3.....	
	Figura 121. Gráfica de comparación promedio número de electrodos.....	
	Figura 122. Gráfica de comparación promedio nivel de batería.....	
6.1.4.	Comparativa resultados formularios	104
	Figura 123. Gráfica de comparación comodidad Emoc.....	
	Figura 124. Gráfica dificultad experimentos.....	
	Figura 125. Gráfica cansancio general.....	
	Figura 126. Gráfica tiempo de descanso.....	
	Figura 127. Gráfica satisfacción general.....	
	Figura 128. Gráfica dificultad acción.....	



Índice de tablas

2. Búsqueda bibliográfica	18
2.1. Búsqueda de dispositivos de registro de señales EEG.....	18
Tabla 1. Lista de dispositivos BCI estudiados.....	
Tabla 2. Lista de dispositivos BCI estudiados.....	
Tabla 3. Dispositivos BCI caros.....	
Tabla 4. Dispositivos BCI descartados.....	
4. Tratamiento de datos	62
4.3. Procesado final de los ficheros	72
Tabla 5. Ejemplo resultados parte aprendizaje.....	
4.4. Esquema del proceso completo	81
Tabla 6. Ejemplo porcentaje de acierto.....	
Tabla 7. Ejemplo matriz de confusión.....	
5. Base de datos y resultados obtenidos	83
Tablas 8. Usuarios categorizados.	
Tabla 9. Usuarios diferenciados y categorizados.....	
5.1. Resultados experimentos	85
Tabla 10. Porcentajes usuario 1.....	
Tabla 11. Matriz de confusión usuario 1.....	
Tabla 12. Porcentajes usuario 2.....	
Tabla 13. Matriz de confusión usuario 2.....	
Tabla 14. Porcentajes usuario 3.....	
Tabla 15. Matriz de confusión usuario 3.....	
Tabla 16. Porcentajes usuario 4.....	
Tabla 17. Matriz de confusión usuario 4.....	
Tabla 18. Porcentajes usuario 5.....	
Tabla 19. Matriz de confusión usuario 5.....	
Tabla 20. Porcentajes usuario 6.....	
Tabla 21. Matriz de confusión usuario 6.....	
Tabla 22. Porcentajes usuario 7.....	
Tabla 23. Matriz de confusión usuario 7.....	
Tabla 24. Porcentajes usuario 8.....	
Tabla 25. Matriz de confusión usuario 8.....	
Tabla 26. Porcentajes usuario 9.....	
Tabla 27. Matriz de confusión usuario 9.....	
Tabla 28. Porcentajes usuario 10.....	
Tabla 29. Matriz de confusión usuario 10.....	
Tabla 30. Porcentajes usuario 11.....	
Tabla 31. Matriz de confusión usuario 11.....	
Tabla 32. Porcentajes usuario 12.....	
Tabla 33. Matriz de confusión usuario 12.....	
Tabla 34. Porcentajes usuario 13.....	
Tabla 35. Matriz de confusión usuario 13.....	
Tabla 36. Porcentajes usuario 14.....	
Tabla 37. Matriz de confusión usuario 14.....	
Tabla 38. Porcentajes usuario 15.....	
Tabla 39. Matriz de confusión usuario 15.....	



6. Comparación y discusión de los resultados	89
6.1. Comparación de los resultados	89
6.1.1. Comparativa general por grupos	90
Tabla 40. Comparación promedio Sexo.....	
Tabla 41. Comparación promedio Edad.....	
Tabla 42. Comparación promedio Mano predominante.....	
Tabla 43. Comparación promedio Estudios.....	
Tabla 44. Comparación promedio Señales EEG.....	
6.1.2. Comparativa real por grupos	90
Tabla 45. Comparación promedio Sexo.....	
Tabla 46. Comparación promedio Edad.....	
Tabla 47. Comparación promedio Mano predominante.....	
Tabla 48. Comparación promedio Estudios.....	
Tabla 49. Comparación promedio Señales EEG.....	
Tabla 50. Resultados promedio TFG.....	
Tabla 51. Resultados promedio TFG antiguo.....	
Tabla 52. Resultados promedio TFGs.....	
6.1.3. Comparación resultados aspectos concretos	97
Tabla 53. Porcentajes Usuario 1.....	
Tabla 54. Porcentajes usuario 6.....	
Tabla 55. Matriz de confusión usuario 6.....	
Tabla 56. Porcentajes usuario 12.....	
Tabla 57. Matriz de confusión usuario 12.....	
Tabla 58. Comparación porcentajes del número de electrodos.	
Tabla 59. Porcentajes usuario 14.....	
Tabla 60. Matriz de confusión usuario 14.....	
Tabla 61. Nivel de carga de los usuarios.	
Tabla 62. Comparación porcentajes nivel de batería.	

1. Introducción

El presente trabajo de fin de grado surge de la continuación de trabajos anteriores llevados a cabo por el departamento en los que se pretendía desarrollar un dispositivo BCI de bajo coste para la comparación de sus características con las de dispositivos dedicados al mismo ámbito de estudio pero cuyo precio es muy superior, que normalmente son utilizados en medicina. En estos proyectos anteriores se consiguió desarrollar un dispositivo BCI a partir de otro de bajo coste, realizando también la comparativa de ambos dispositivos entre sí [1]. En el presente trabajo de fin de grado lo que se pretende es realizar una investigación experimental amplia del sistema, denominado *Emoc*, desarrollado por el departamento para conocer las prestaciones y características del mismo y realizar con ello comparativas de los resultados tratando obtener distintas conclusiones finales.

1.1. Objetivos del proyecto

El objetivo principal del proyecto es el de realizar una base de datos a través del dispositivo Emoc para poder estudiar y comparar los resultados de modo que se puedan obtener unas conclusiones sólidas sobre las características del dispositivo. Para poder llevar a cabo este objetivo será necesario cumplir ciertos puntos a través de los cuales se irán completando subobjetivos cuya finalidad es la ya comentada, es decir cumplir el objetivo principal del proyecto.

A modo de resumen vamos a recopilar los puntos establecidos para la consecución efectiva del trabajo de fin de grado. Estos se muestran a continuación:

- 1. Búsqueda bibliográfica de sistemas de registro de señales EEG actuales y tipos de electrodos.**

Se realizará una búsqueda de los nuevos dispositivos que hay actualmente en el mercado con la finalidad de obtener uno de ellos y decidir sobre su posible aplicación en el presente proyecto. Además se realizará una segunda búsqueda de electrodos de tipo “seco” para una posible futura implementación en el dispositivo Emoc, sustituyendo así los que actualmente posee, que precisan de la aplicación de un gel que mejore la conexión entre cabeza y electrodo.
- 2. Desarrollo de la metodología que se llevará a cabo durante la realización de los experimentos.**

De cara a obtener la base de datos será necesario establecer un modus operandi para cada uno de los experimentos que se realicen, asegurándonos así de que todas pruebas son ejecutadas bajo las mismas condiciones.
- 3. Creación de la base de datos.**

Se llevará a cabo la realización del experimento a un número suficientemente grande de sujetos que nos proporcione una seguridad en el promedio de los valores finales obtenidos a partir de cual se puedan obtener las distintas conclusiones finales.

4. Preprocesado y preprocesado archivos.

Una vez se hayan completado los experimentos los archivos obtenidos serán sometidos a un procedimiento de procesado que contará con dos fases.

5. Estudio, comparación y discusión de resultados.

La base de datos obtenida será estudiada y sus resultados serán comparados entre sí con la finalidad de obtener diferentes conclusiones.

Gracias a estos cinco puntos podremos llevar a cabo el proyecto y con ello lograr el objetivo principal comentado al comienzo de este apartado. Para realizar todo ello es necesario establecer los pasos a seguir y el trabajo a desarrollar en cada uno de los puntos con su respectivo orden, ésto será comentado en el siguiente apartado.

1.2. Trabajo a desarrollar

Al comienzo del proyecto se acordó con el director y el codirector del presente trabajo ciertos aspectos para poder alcanzar los resultados buscados. Cada una de estas tareas nos facilitará la consecución de los puntos anteriormente comentados y por lo tanto nos simplificará la obtención del objetivo principal. El trabajo a realizar se enumera a continuación y posteriormente puede encontrarse desarrollado paso a paso de manera progresiva:

1. Estudio del problema.
2. Búsqueda bibliográfica de dispositivos alternativos y sensores.
3. Definición de experimentos a desarrollar y metodología para los mismos.
4. Realización de experimentos. Generación de base de datos.
5. Preprocesamiento y reconocimiento.
6. Estudio de los resultados.

En primer lugar se ha tenido que entender cuál es la finalidad de este trabajo de fin de grado y para ello se han debido tener las reuniones oportunas con el director de proyecto a la misma vez que se ha tenido que realizar una investigación a través de noticias y artículos científicos relacionados con el área de estudio de este proyecto, sobre el mundo de las señales EEG y de los sistemas BCI que hacen posible el registro de dichas señales.

Una vez entendido el funcionamiento del sistema *Emoc* y la finalidad que se pretende alcanzar con esta investigación se debe llevar a cabo una búsqueda bibliográfica que muestre los diferentes sistemas de captación de señales EEG que se encuentran actualmente en el mercado realizando una comparativa entre ellos para conocer los aspectos clave y la forma en que varían sus características en lo que ha capacidad y modo de registro de datos se refiere, la finalidad de esta primera búsqueda es la futura adquisición de un dispositivo BCI de bajo coste.

Además de la búsqueda sobre lo que son los sistemas de captación de las señales en sí también se pretendía encontrar información referente a sensores utilizados para dicho registro de señales, es decir llevar a cabo una búsqueda sobre los distintos tipos de electrodos, centrándose en los que no requieran aplicación de ningún tipo de material para la mejora de la conductividad

de la señal ya que para nuestro dispositivo *Emoc* utilizamos unos sensores que necesitan de la aplicación de un gel conductivo que mejore la conexión entre la cabeza y los sensores utilizados. Por lo que para realizar esta primera búsqueda bibliográfica se establecieron estas dos comparativas, en primer lugar la investigación de diferentes tipos de sistemas de captación de señales EEG y en segundo la búsqueda de información sobre electrodos que no necesiten aplicación de gel conductivo para conseguir una buena conexión entre cabeza y casco.

El siguiente punto que se estableció al comienzo del proyecto fue el modo en el que se realizarían los experimentos y el número de usuarios sobre los que se llevaría a cabo. Se concretó realizar 20 experimentos para obtener así una base de datos lo suficientemente grande sobre la que poder realizar un estudio y obtener con ello conclusiones que tuvieran la suficiente base de información para defender las posturas finales establecidas.

En lo que a modo de ejecución se refiere quedó establecido que se realizarían 4 sesiones a cada usuario con un descanso de 5-10 minutos entre sesión. El modo de realización sería colocar a cada individuo sentado en una silla con la espalda apoyada en el respaldo, las piernas desdobladas y cada mano colocada sobre su correspondiente pierna de modo que la posición del cuerpo resultase cómoda y fuese siempre la misma durante la realización de cada sesión.

Una vez comenzada una sesión cada usuario debería realizar 3 acciones:

- Pensar en mover la mano derecha.
- Pensar en mover la mano izquierda.
- Pensar en palabras con una inicial determinada.

Mediante un software informático se mostraría a través de un ordenador, situado enfrente de cada usuario, 3 imágenes distintas de forma aleatoria e individual en intervalos de 15 segundos que harían relación a la acción que el individuo debe realizar. Éstas serían una imagen que refleje una flecha que indique la dirección con sentido izquierdo, otra que indique el sentido derecho y una letra que indique la inicial de las distintas palabras que cada usuario debe pensar.

Una vez la sesión ha terminado el individuo que esté realizando la prueba debe descansar el tiempo establecido y volver a repetir el procedimiento indicado exactamente de la misma forma. Se dará por concluido el experimento cuando el usuario haya terminado 4 sesiones de forma satisfactoria. El código informático nos ofrecerá un fichero de datos por cada sesión realizada, es decir 4 ficheros en total que deberán ser preprocesados y procesados mediante 2 códigos informáticos distintos para conseguir unos valores finales que serán los que utilicemos a la hora de llevar a cabo el estudio que nos concierne en este proyecto. Cuando se complete un experimento cada usuario deberá rellenar un formulario en el que se reflejen las opiniones personales a ciertas preguntas relacionadas con la comodidad y complejidad del experimento, así como se deberá rellenar información personal de cada usuario que nos sirva para categorizar los resultados, estudiarlos y con ello obtener las conclusiones finales.

Para terminar esta introducción al presente trabajo de investigación realizado nos falta comentar el último aspecto que quedó establecido y con ello dar por satisfecho los objetivos y obligaciones acordadas.



Una vez los ficheros finales con los resultados que muestran el porcentaje de acierto para cada usuario son obtenidos, tras el procedimiento de procesamiento total, se deben organizar de modo que sean fácilmente identificables para posteriormente llevar a cabo su correspondiente estudio al que le proseguirán las conclusiones que serán obtenidas de la comparación de dichos resultados.

El porcentaje de acierto de cada usuario sobre cada una de las tres acciones y el porcentaje global del experimento es obtenido a través de la comparación entre la media de los resultados de las 3 primeras sesiones y la última sesión, la semejanza entre ambos valores nos ofrecerá cómo de exitoso ha sido el experimento en un usuario en particular. Es decir lo que estará mostrando el resultado final será la capacidad que tiene cada individuo de repetir el mismo pensamiento generado en la última sesión realizada en comparación con la media de las 3 primeras, cuanto más parecido haya entre ambas más porcentaje de acierto mostrarán los resultados que finalmente serán obtenidos y posteriormente comparados.

Con esta comparación se busca mejorar y ampliar las conclusiones a las que se han llegado en trabajos de fin de estudios anteriores en los que la base de datos no ha sido tan extensa como la que se presenta en el proyecto actual, ya que existe una relación directa entre la cantidad de datos obtenidos y la fiabilidad que pudieran tener dichas conclusiones finales. Por lo que obtenidas dichas conclusiones podríamos dar por alcanzados los objetivos acordados al inicio del presente proyecto.

1.3. Conceptos previos

Antes de comenzar con todo el contenido del proyecto y la comparativa de los resultados obtenidos conviene realizar una pequeña introducción al mundo de las señales de electroencefalograma y todo lo que rodea a los dispositivos BCI de captación de señales EEG para poner en contexto la investigación científica que se ha llevado a cabo y así poder entender mejor las conclusiones a las que llegaremos en la parte final del presente trabajo de fin de estudios.

En primer lugar debemos conocer lo que se conoce como *Electroencefalografía*, etimológicamente proviene de unión de las palabras *Electro*, *Encéfalo* y *Grafía*, lo que viene a significar que su definición puede recogerse como

“Parte de la medicina que estudia la obtención e interpretación de los electroencefalogramas, que son señales eléctricas provenientes del encéfalo” según la RAE.

Es decir que es una *“exploración neurofisiológica que se basa en el registro de la actividad bioeléctrica cerebral en condiciones de reposo, vigilia o sueño”*.

Una vez establecido el concepto de electroencefalografía de forma simplificada diremos que el encéfalo está dividido en 3 partes: Tronco encefálico, cerebelo y cerebro. Por lo que cuando hablamos de señales electroencefalográficas no nos referimos únicamente a señales eléctricas provenientes del cerebro, si no al conjunto de estas tres partes.

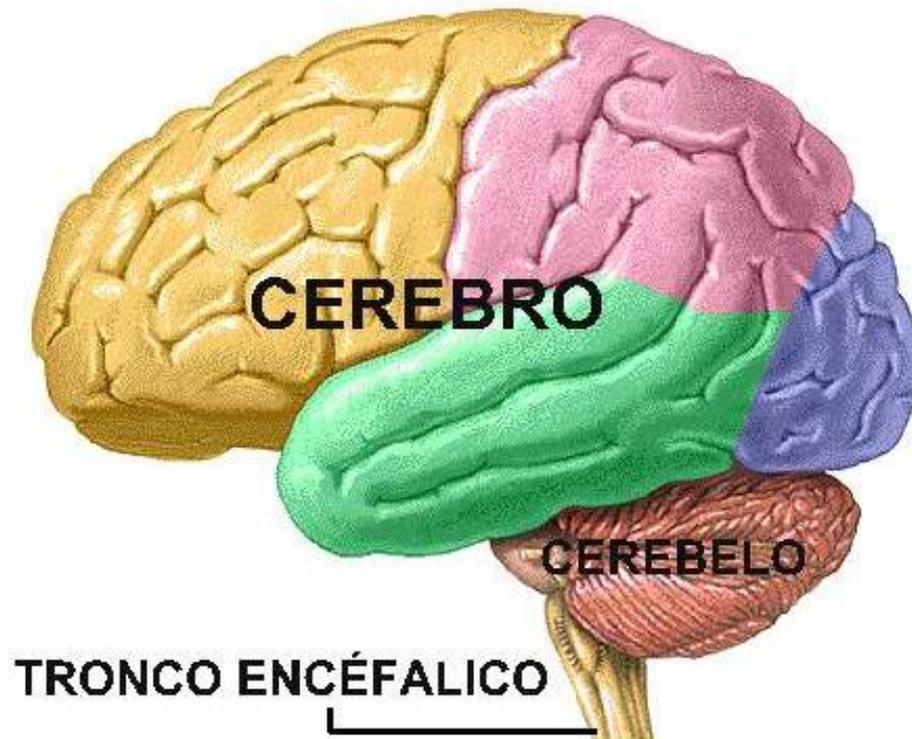


Figura 1. Partes encéfalo.

La unidad más básica por la que está formado el encéfalo es la *neurona* o *célula nerviosa*, que es la encargada de transportar información mediante impulsos nerviosos desde el encéfalo al sistema nervioso y de la misma forma es la encargada de recibir dichos impulsos provenientes del sistema nervioso para que puedan ser procesados por el encéfalo.

Las neuronas tienen una característica principal, pueden producir una excitación eléctrica, es decir producen una respuesta eléctrica, que como toda señal eléctrica se traduce en un potencial eléctrico. Dicho potencial es medible a través de electrodos colocados en el cuero cabelludo que recogen estos impulsos eléctricos produciendo así una diferencia entre voltajes recogidos por cada electrodo, que es lo que se conoce como diferencia de potencial.

A la hora de realizar la acción de pensar cada pensamiento es transformado en información codificada que reside en el encéfalo, esta información produce una excitación eléctrica en las neuronas y dicha excitación eléctrica es lo que tratamos de registrar con los dispositivos de captación de señales de electroencefalograma que presentaremos a continuación además de la correspondiente presentación del dispositivo que hemos usado en este proyecto para poder llevar a cabo los estudios en cada usuario. Es decir que lo que buscamos es recoger los impulsos eléctricos producidos por las células nerviosas.

Cada pensamiento que realizamos tiene una dimensión cuantificable en términos de potencial eléctrico, es decir de voltaje, por lo que cada pensamiento producirá una diferencia de potencial distinta recogida por los electrodos situados en el cuero cabelludo. Estas diferencias son muy pequeñas, estamos hablando de rangos de medida en torno a microvoltios, μV , por lo que las señales captadas deben ser amplificadas para así poder apreciar las variaciones presentes y alcanzar con ello una precisión mayor.

Para poder registrar estas medidas son necesarios al menos dos electrodos colocados en posiciones concretas, un electrodo, denominada electrodo de referencia, puede ser situado a tierra, es decir en una zona que no transmita o que al menos tenga una gran resistencia a la transmisión de corriente eléctrica, y otro electrodo sobre la superficie a partir de la cual captemos la señal eléctrica, que denominaremos electrodo activo. En nuestra cabeza el electrodo activo puede situarse en cualquier parte del encéfalo, o lo que es lo mismo sobre la superficie del cuero cabelludo, y el electrodo de referencia puede situarse en un lóbulo de la oreja, puesto que al ser en gran parte cartílago no se produce transmisión de corriente eléctrica. Estas posiciones producirán una diferencia de potencial eléctrico estable pero no son las únicas posiciones posibles puesto que dicha diferencia de potencial eléctrico puede producirse entre dos electrodos situados en zonas con impulsos nerviosos, la única diferencia es que el potencial eléctrico existente entre ambos electrodos no será la diferencia de voltaje entre 0 y el valor del electrodo activo de la señal si no que será la diferencia entre el valor de ambos electrodos activos.

A la distribución con un electrodo referencia y un electrodo activo se le denomina Registro Monopolar y a la distribución con dos dipolos activos se le conoce como Registro Bipolar. Podemos observar a continuación una ilustración de cada tipo de registro:

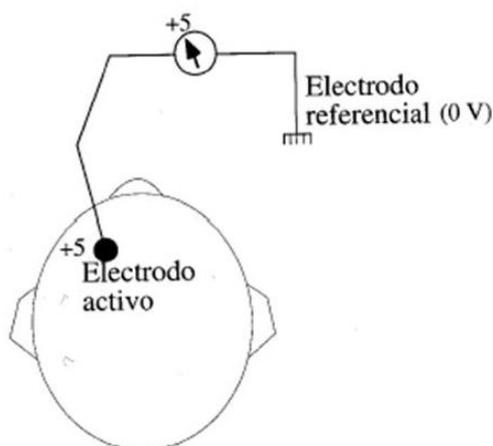


Figura 2. Registro monopolar

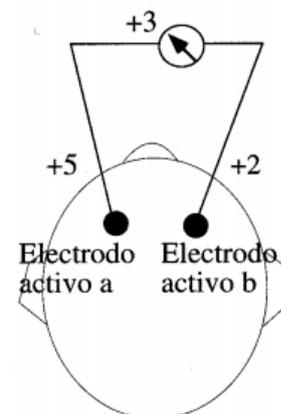


Figura 3. Registro bipolar

1.4. Distribución de los electrodos

Una vez aclarado como se produce el potencial eléctrico, producto de cada pensamiento a través del registro de señales eléctricas procedentes de las neuronas que forman el encéfalo, es momento de explicar qué distribución de electrodos son de las que hemos dispuesto en este proyecto y cuales hemos usado para registrar los datos en cada experimento.

Como hemos comentado para conseguir un potencial eléctrico hacen falta al menos 2 electrodos para comparar su valor en lo que a voltaje se refiere y obtener así una diferencia de potencial pero evidentemente podemos añadir cuantos electrodos consideremos de modo que el registro de valores sea mayor y con ello la precisión aumente ya que se dispondría de más puntos para la comparación de valores. Aunque esta precisión llegado a cierto punto se mantendrá estable y la adición de electrodos no implicará una mejora significativa en la precisión de los resultados.

Otro de los factores que influyen a la hora de obtener con precisión las diferencias de potencial entre electrodos es, como se ha comentado anteriormente, la posición de dichos electrodos a lo largo del cuero cabelludo, y es que la posición de cada electrodo podrá influir directamente en la calidad de la señal registrada. Un objetivo secundario de este proyecto, a parte de la obtención de los resultados de 20 experimentos con la misma posición de electrodos, era la comprobación de la variación de la precisión de los resultados según se cambiaba la posición de dichos electrodos. Los valores finales obtenidos serán presentados más adelante, el asunto que nos concierne en este apartado es dar a conocer las posibles distribuciones de las que hemos dispuesto con el sistema *Emoc*.

De entre todas las posiciones posibles para la captación de señales EEG la más utilizada internacionalmente a día de hoy es el sistema "10-20". Este método estandarizado usa 21 electrodos colocados sobre la cabeza y distribuidos de la siguiente forma:

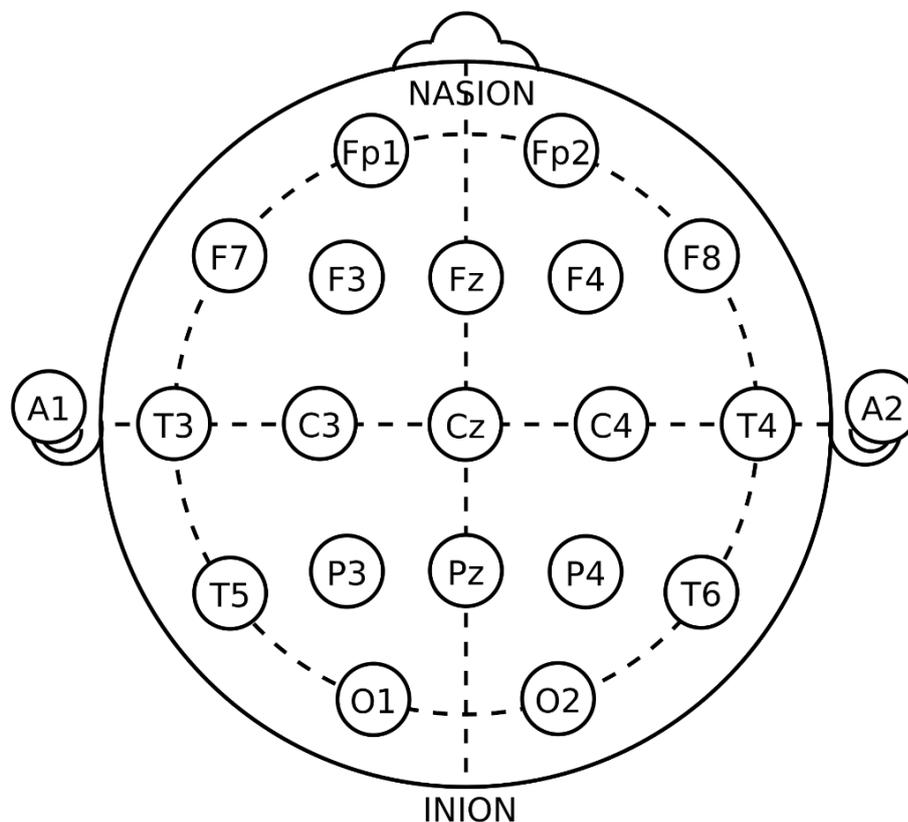


Figura 4. Sistema 10-20 de 21 electrodos

Como regla generalizada a la hora de nombrar los electrodos se asigna una numeración impar a los situados en el lado izquierdo de la cabeza y por el contrario una numeración par a los electrodos situados en la parte derecha. Esto mismo se puede observar en la figura anterior. También podemos ver que los electrodos centrales tienen el subíndice z debido a la palabra cero en inglés, "Zero".

El código Matlab a través de cual hemos podido realizar el procesado completo de los datos de cada usuario recoge 3 distribuciones distintas para la posición de los electrodos en la cabeza.

Estas distribuciones siguen el mismo patrón que el sistema 10-20 y las posibles posiciones de los electrodos han sido las siguientes:

Posición 1

'AF3' 'F7' 'F3' 'FC5' 'T7' 'P7' 'O1' 'O2' 'P8' 'T8' 'FC6' 'F4' 'F8' 'AF4'

Posición 2

'C3' 'CZ' 'C4' 'CP1' 'CP2' 'P3' 'PZ' 'P4' 'C1' 'C2' 'CP3' 'CP4' 'P1' 'P2'

Posición 3

'C3' 'CZ' 'C4' 'CP1' 'CP2' 'P3' 'PZ' 'P4'

Cada uno de los valores anteriores separados por comillas representan la posición de cada electrodo. Estas posiciones pueden verse ilustradas en la siguiente figura que muestra las posibles localizaciones de los electrodos:

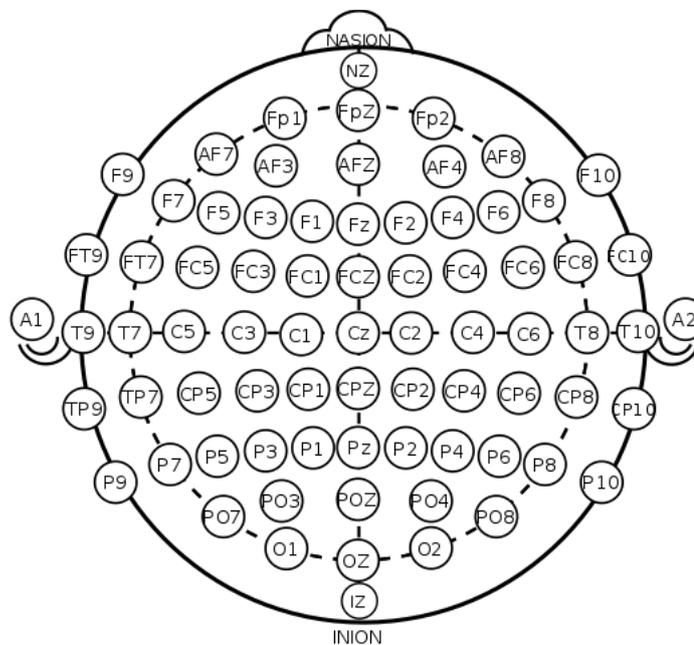


Figura 5. Sistema 10-20 de 75 electrodos.

A partir de ella podemos ilustrar las distribuciones han sido empleadas en nuestro trabajo:

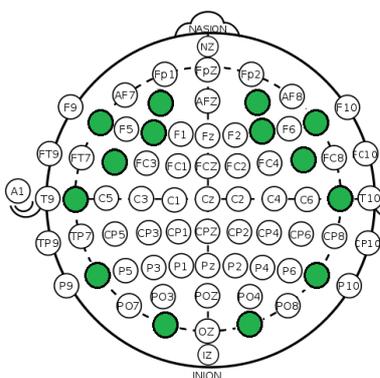


Figura 6. Distribución 1

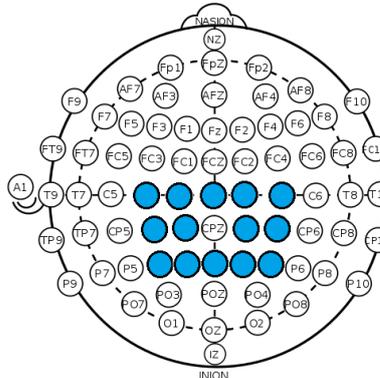


Figura 7. Distribución 2

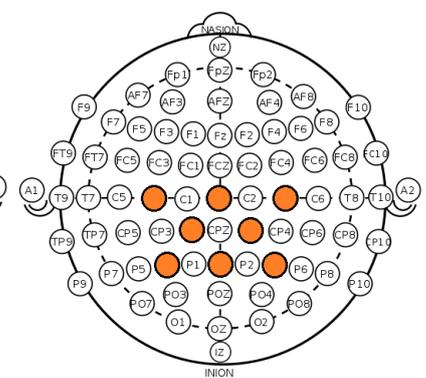


Figura 8. Distribución 3

La distribución sobre la que se realizarán gran parte de los experimento será la primera:

'AF3' 'F7' 'F3' 'FC5' 'T7' 'P7' 'O1' 'O2' 'P8' 'T8' 'FC6' 'F4' 'F8' 'AF4'

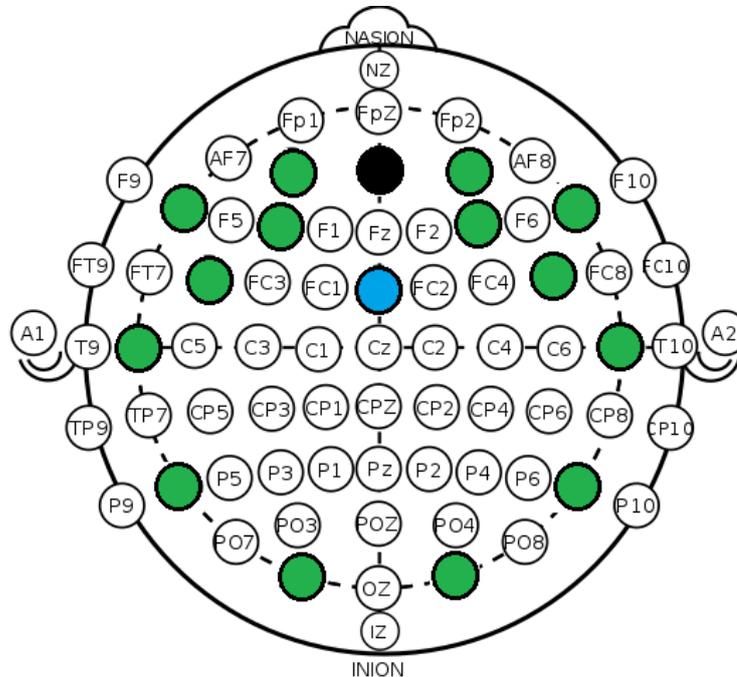


Figura 9. Distribución 1 con sensores de referencia.

Aunque no era un objetivo principal se ha realizado el experimento a varios usuarios variando posición de los electrodos, trabajando también con la distribución 2. Los resultados obtenidos han sido presentados en su correspondiente apartado, es decir en el apartado 5 “*Base de datos y resultados obtenidos*”.



2. Búsqueda bibliográfica.

Una vez concluida la introducción y puesto en contexto el tipo de proyecto que se ha realizado se van a ir desarrollando los objetivos establecidos uno a uno. En primer lugar, a parte de lo que es la realización de los experimentos y el estudio de los resultados, se estableció que debía producirse una búsqueda bibliográfica en referencia a dos factores:

- Búsqueda de dispositivos de registro de señales EEG.
- Búsqueda de tipos de sensores secos.

A continuación se expone la búsqueda realizada para cada uno de ellos:

2.1. Búsqueda de dispositivos de registro de señales EEG

Para realizar esta primera investigación bibliográfica se centró como objetivo la búsqueda de dispositivos de bajo coste capaces de registrar señales EEG. Dentro del abanico de precios se focalizó dicha búsqueda en dispositivos cuyo precio no fuera superior a los 1000€ pues lo que se pretendía conseguir con todo esto era reunir diferentes opciones de dispositivos de bajo coste con la intención de adquirir uno y realizar con él la misma investigación que se ha llevado a cabo en este proyecto, buscando así obtener distintas conclusiones finales en dispositivos de estas características, comparando los resultados de la investigación con los de dispositivos de precios mucho más elevados, tratando de buscar de algún modo la mejora de las prestaciones de los dispositivos de bajo coste y produciendo así un abaratamiento de los sistemas existentes cuyos precios son muy elevados, motivo por el cual no son accesibles a la gran parte del público que o los consume en determinadas actividades o los pueda utilizar en un futuro para satisfacer cualesquiera que sean las necesidades que tenga.

En el momento que dio comienzo el presente trabajo de fin de grado se realizó una búsqueda exhaustiva que le fue proporcionada al director del proyecto para que tuviera un material de apoyo a la hora de decidir cuál era el dispositivo más adecuado para su adquisición. Esta lista de dispositivos se dio por concluida en su momento pero se ha realizado una segunda búsqueda para así actualizar el contenido de la misma al presente curso y año actual, 2019. Por lo que todos y cada uno de los valores han sido comprobados y verificados para estar actualizados al mes de la entrega del presente trabajo.

En la siguiente página podemos encontrar una lista de dispositivos con sus correspondientes características más importantes y que además nos pudieran interesar de cara a una posible futura adquisición. Datos como por ejemplo el precio del dispositivo, el número y tipo de sensores empleados, la frecuencia de muestreo, qué tipo de salida de datos posee, si los SDKs, es decir los desarrolladores de señales, son accesibles gratuitamente o necesitan una suscripción, etc.



Empresa	Dispositivo	Precio (\$)	Sensores	Tipo de sensor	Frecuencia de muestreo	Duración batería (horas)	Salida de datos	Plataformas	SDKs	Precio SDK
Neurosky	Mindwave 2	99,99	1+1	Secos	512Hz	8	CVS	Windows, Mac, iOS, Android	NeuroView NeuroSkyLab	499,99\$/mes
Emotiv	EPOC+	799,00	14+2	Mojados	256 Hz	12 (6 con BT)	EDF	Windows, Linux, Mac, iOS, Android	EmotivPro	99,00\$/mes
Emotiv	Insight	299,00	5+2	Semisecos	128Hz	8 (4 con BT)	EDF	Windows, Linux, Mac, iOS, Android	EmotivPro	99,00\$/mes
Interaxon	Muse 2	269,00	4+3	Secos	256Hz	5	Muse	Windows, Mac, iOS, Android	MuseLab MusePlayer	Free
OpenBCI	Ganglion	199,99	4	Mojados/secos	125Hz	Variable	EDF	Windows Linux	OpenBCI GUI	Free
OpenBCI	Cyton BB	499,99	8	Mojados/secos	125Hz	Variable	EDF	Windows Linux	OpenBCI GUI	Free
Senselabs	Versus	1299,00	5+2	Secos	250Hz	5	No	iOS	SenseLab	29,95\$/mes
PNDDevices	Spark	99,00	4	Secos	256Hz	8	No	No	No	Free
Macrotellect	BrainLink	149,00	2+1	secos		8	No	iOS, Android	No	Free
Brain Rhythm	BR8 Plus	-	8+2	secos	500Hz	10	EDF	Windows	Brain Viewer Open Vibe NeuroRTstudio	-
Brain Rhythm	BR32	-	32+2	secos	250Hz	10	EDF	Windows	Brain Viewer Open Vibe NeuroRTstudio	-
IMEC	Imec Headset	-	8	secos	256Hz	8	No	Android	No	-

Tabla 1. Lista de dispositivos BCI estudiados

(Los espacios en blanco es información que no se ha podido encontrar ni contrastar)

Además de todos éstos he podido encontrar muchos más ejemplos pero superaban un precio asequible, es decir estaríamos hablando de que son dispositivos mucho más caros destinados a la investigación en el ámbito de la medicina. También se han estudiado cierto tipo de dispositivos que no han sido finalmente incluidos en la tabla anterior debido a que las especificaciones y características que presentaban estos dispositivos no se encontraban dentro de marco que buscamos para poder ser empleados en investigación en la UPCT. Todos estos casos se han recopilado en distintas tablas que se puede encontrar al final de este bloque para al menos conocer de qué dispositivos se tratan.

A continuación vamos a estudiar cada uno de los BCIs recogidos en la tabla de arriba:

Emotiv EPOC+

[Emotiv EPOC+](#) es un BCI de 14 canales que utiliza electrodos de cloruro de plata con contactos esponjosos que están mojados con solución salina. Además de estos 14 canales, tiene 2 sensores de referencia, CMS/DRK, en las posiciones P3 y P4. La distribución de los electrodos se representa en la siguiente figura:

Posiciones: AF3, F7, F3, FC5, T7, P7, O1, O2, P8, T8, FC6, F4, F8, AF4

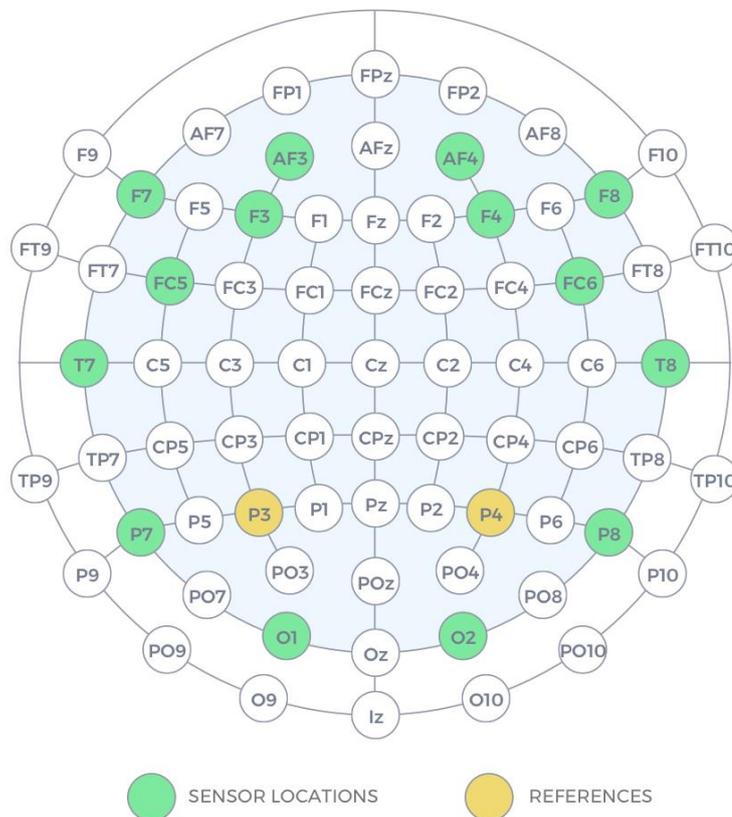


Figura 10. Distribución electrodos para Emotiv EPOC+

La frecuencia de muestreo interna del dispositivo es 2048 Hz. Pero los datos se reducen a 128 Hz antes de que el sistema esté disponible para capturar las señales EEG, esta frecuencia puede ser modificada por el usuario y llegar a disponer de los datos a una frecuencia final de 256 Hz. En cuanto a la transferencia de datos, se realiza a través de Bluetooth Smart. Tiene una batería interna de litio que ha sido aumentada recientemente de 480mAh a 640mAh y que garantiza más de 12 horas de duración utilizando el USB y 6 horas a través de Bluetooth. Los sensores funcionan con una solución salina por lo tanto este dispositivo se englobaría dentro del tipo que usan sensores mojados.

EPOC+ proporciona la señal bruta después de un breve procesamiento. El filtrado se produce entre 0,1 y 100 Hz y además tienen filtros de muesca a 50 y 60 Hz, que es lo que realmente se obtiene como salida.



Figura 11. Hardware de Emotiv EPOC+

Este dispositivo está realmente diseñado para la investigación de las EEG y las aplicaciones avanzadas de interfaz informática cerebral (BCI). El EPOC+ proporciona acceso a datos de EEG crudos de alta calidad y densidad, sin embargo ha cambiado el método con el que podemos acceder a dichas señales a lo largo de los años ya que los SDKs, lo que comúnmente se conoce como desarrolladores de software, en un principio fueron gratuitos, hace un par de años pasaron a ser un software de suscripción con un precio de 49\$ dólares al mes y actualmente este software evolucionó a uno más avanzado cuyo precio también se ha incrementado y que ofrece distintas posibilidades de adquisición siendo el precio mensual de 99\$.

A continuación vamos a resumir brevemente la evolución que han sufrido los productos Emotiv [2]. En el pasado teníamos EPOC y su SDK llamado TestBench, posteriormente Emotiv cambió la forma en la que podíamos disponer de este desarrollador creando uno nuevo a partir del antiguo, al que llamaron PureEEG, que básicamente hacía lo mismo que TestBench aunque poseía menos características y además requería de acceso a internet para poder usarlo en sus 2 dispositivos, ya que Emotiv mejoró la versión EPOC creando EPOC+ y además diseñó un nuevo BCI con menor número de sensores siendo éstos además secos al que llamaron Emotiv Insight, el cual será el siguiente dispositivo que analizaremos. Actualmente PureEEG ha evolucionado y la

marca *Emotiv* ha sacado al mercado el software denominado [EmotivPro](#). Las características son muy similares aunque con mejores prestaciones.

Los archivos que genera el SDK de *Emotiv EPOC+* se pueden o bien subir a la nube o bien guardarlos en el ordenador con un formato EDF, lo que implica que se puede importar fácilmente a otros dispositivos para su análisis, y además se ha vuelto a implementar la posibilidad de poder trabajar sin internet. Las librerías de EEG más desarrolladas están por supuesto disponibles para MATLAB (EEG LAB).

En cuanto a posibilidades de suscripción *Emotiv* brinda la posibilidad de elegir entre varias opciones, siendo una de ellas destinada al estudio en universidades. Para este caso los precios varían en función del tiempo que se contrate el servicio, habiendo cuatro opciones posibles.

MONTHLY	ANNUAL PREPAY	3 YEAR PREPAY	5 YEAR PREPAY
\$99	\$89	\$60	\$55
PER MONTH	PER MONTH	PER MONTH	PER MONTH
\$99 after free trial & every month	\$1,068 after free trial & every year	\$2,160 after free trial & every 3 years	\$3,300 after free trial & every 5 years
ADD TO CART	ADD TO CART	ADD TO CART	ADD TO CART

Figura 12. Precios SDK Emotiv EPOC+

El servicio más sencillo tendría un coste de 99\$ mensuales, lo que supone un incremento de 50\$ con respecto al último SDK del que *Emotiv* disponía, aunque si es cierto que para el anterior el precio estaba fijado a un número concreto de grabaciones, siendo éste 50. Actualmente la suscripción al software *EmotivPro* no limita el número por lo que aunque suponga un incremento en el precio mejora la disponibilidad de uso.

En términos de desarrollo de nuevas aplicaciones que funcionan con los dispositivos de *Emotiv*, todavía no hay un SDK establecido para desarrollar tales aplicaciones, simplemente sería para la investigación de la señales que obtenemos en cada estudio realizado. Para poder desarrollar cualquier tipo de aplicación con *Emotiv* habría que hablar directamente con ellos.

<https://www.emotiv.com/>

Por último comentar que a parte de este software *Emotiv* presenta otro completamente gratuito denominado [EmotivBCI](#) que trabaja con señales EEG pero que no está destinado al estudio de las mismas. Las características son muy similares al *EmotivPro* aunque con la carencia de no poder realizar investigaciones por lo que no resultaría de utilidad para lo que buscamos con nuestro proyecto.

Emotiv Insight

[Emotiv Insight](#) es otro BCI fabricado por Emotiv, una versión más barata acompañada de una peor calidad en la adquisición de datos aunque con sus correspondientes ventajas. Se trata de un auricular móvil EEG de 5 canales que está especialmente diseñado para su uso en la investigación de las señales EEG. Además de los 5 sensores, los cuales son parcialmente secos y están contruidos con un material a base de polímeros, tiene 2 sensores de referencia, CMS y DLR, situados en el mastoides izquierdo.

Posiciones: (AF3, AF4, T7, T8, Pz)

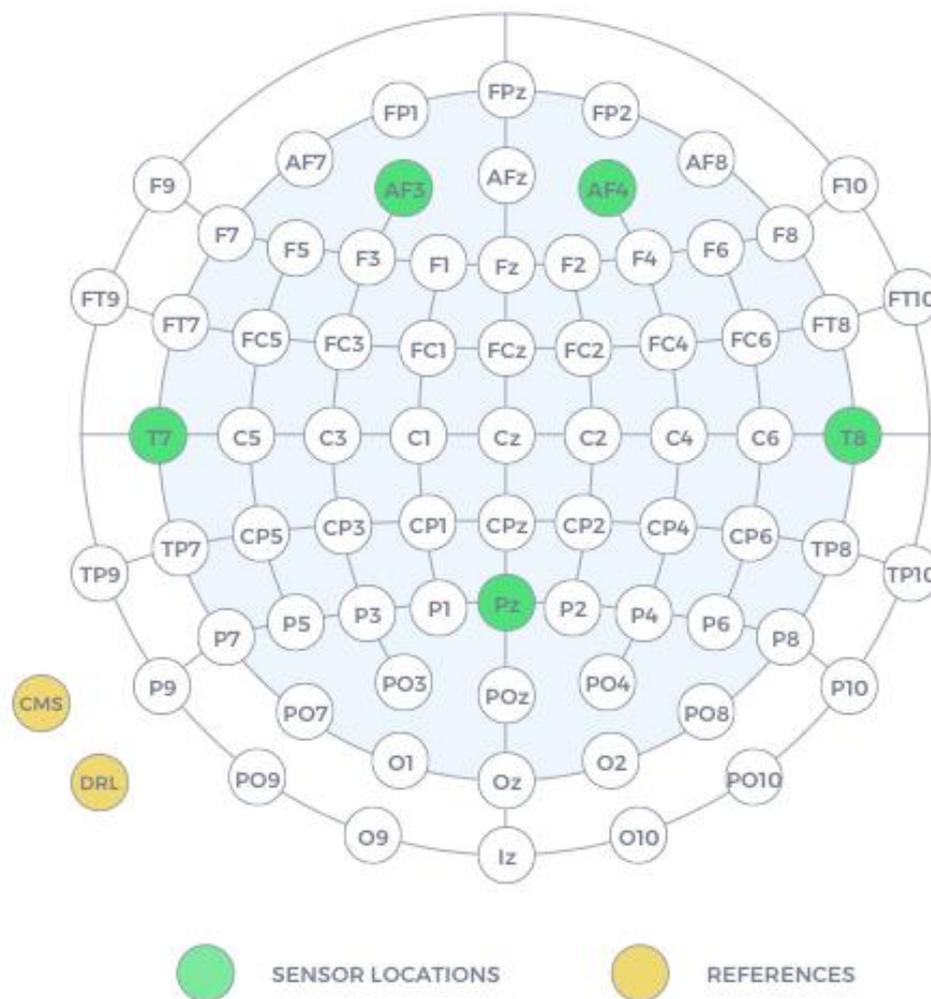


Figura 13. Distribución electrodos para Emotiv Insight

En cuanto a la frecuencia de muestreo, ésta es de 128Hz, no dispone de los 256 Hz que tiene el dispositivo EPOC+. La transferencia de datos la puede realizar a través de Bluetooth 4.0 BL, tiene una batería interna de litio que garantiza más de 8 horas de duración utilizando el USB y 4 horas a través de dicho Bluetooth.



Figura 14. Dispositivo Emotiv Insight

En el siguiente enlace podemos ver el aspecto completo que tiene el casco de [Emotiv Insight](#). Este dispositivo tiene un precio de 299\$, que incluye únicamente el dispositivo. Para acceder a las SDKs, debe hacerse del mismo modo que con Emotiv EPOC+, es decir habría que contratar mensualmente uno de los paquetes que ofertan para poder disponer de EmotivPro y con ello de todas sus características para la investigación de señales EEG. Todo por el mismo precio y las mismas condiciones que para EPOC+ ya que el SDK es el mismo.

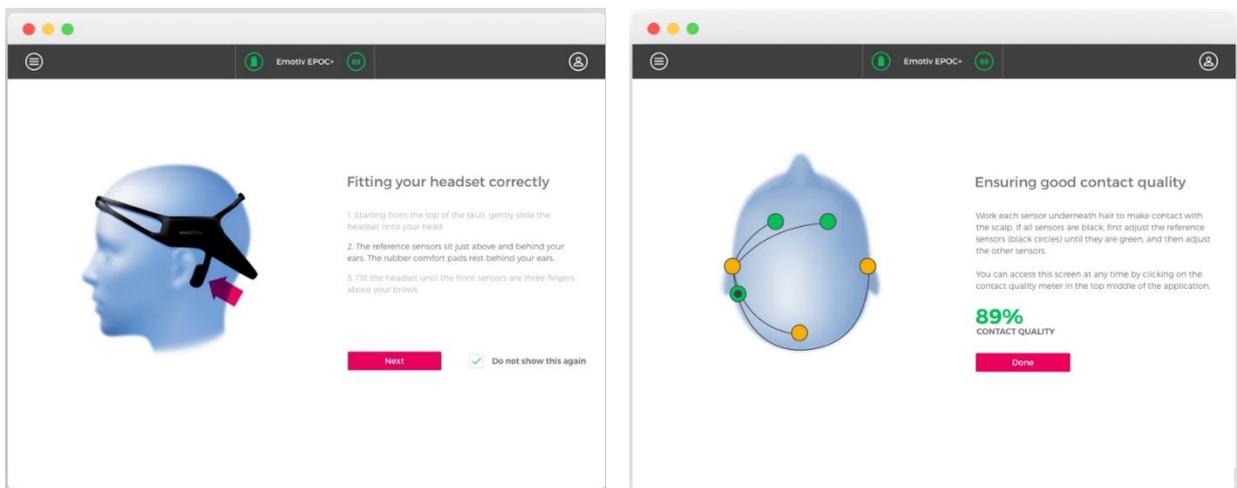


Figura 15. Software EmotivPro

Hasta aquí hemos visto que Emotiv ha mejorado el dispositivo *EPOC* que tenía con *EPOC+* y además ha creado uno nuevo con menor número de sensores, más fácil de usar y sin necesidad de utilizar geles para mejorar la conexión, *Insight*, por lo que nos puede surgir la duda de cuál tiene mejores prestaciones o es óptimo para su uso en investigación en lo que se refiere al departamento de la UPCT involucrado en el proyecto, que es uno de los objetivos a conseguir con esta búsqueda bibliográfica. Pues comparando ambos dispositivos podemos llegar a las siguientes conclusiones:



Ambos modelos son muy parecidos en cuanto a prestaciones aunque *EPOC+* estaría un nivel por encima en lo que ha calidad de datos, frecuencia de muestreo y duración de batería se refiere, por contra en la usabilidad *Insight* sobrepasa al Emotiv *EPOC+* de lejos, la preparación para su uso es mucho más sencilla ya que no hay necesidad de aplicación de gel conductivo y presenta un número menor de sensores, lo que implica menor tiempo de calibración. El desarrollador es exactamente el mismo para ambos, EmotivPro, sin embargo en lo que se refiere a precio *EPOC+* costaría 799\$ e *Insight* solamente 299\$ por lo que son varias las cuestiones a tener en cuenta.

A continuación podemos ver una comparativa entre ambos realizada por la propia empresa Emotiv, en la que además de estos dos dispositivos se añade el *EPOC FLEX KIT*, que resulta ser un dispositivo también creado por Emotiv, más parecido al dispositivo *Emoc* con el que realizaremos nuestros experimentos, pero cuyo precio supera los 1000€, situándose exactamente en los 1699€, motivo por el cual no ha sido incluido en el presente estudio: <https://www.emotiv.com/comparison/>

En su día cuando se entregó esta búsqueda bibliográfica para finalmente adquirir un dispositivo de registro de señales EEG con posibilidad a investigar los datos ofrecidos por el desarrollador comenté que, para el tipo de investigación que se quiere llevar a cabo en la universidad, el dispositivo de Emotiv que más nos podría interesar sería el modelo *Insight*, ya que en cuanto a prestaciones y características era el más adecuado para lo que buscamos.

Finalmente de todos los dispositivos que fueron considerados, teniendo en cuenta también los que serán presentados a continuación, el departamento de Sistemas y Automática decidió comprarlo y aquí es necesario comentar que este dispositivo se adquirió con la intención de realizar una posible experimentación con él en este trabajo pero viendo, a través de unos experimentos preliminares, que se obtuvieron unos resultados pobres en la predicción de intención de movimiento con el dispositivo se decidió descartarlo para este trabajo fin de grado y continuar por lo tanto con el casco que tenía el departamento, es decir el dispositivo *Emoc*, que ha sido con el que finalmente se ha llevado a cabo todo el proyecto.

Open BCI

[OpenBCI Ganglion](#). De los tres BCI que ha desarrollado Open BCI [3] este es el más asequible que ha puesto a disposición de sus usuarios. La singularidad en este caso es que se trata de una placa base, por lo que no tiene ningún tipo de casco que interactúe con el sujeto.

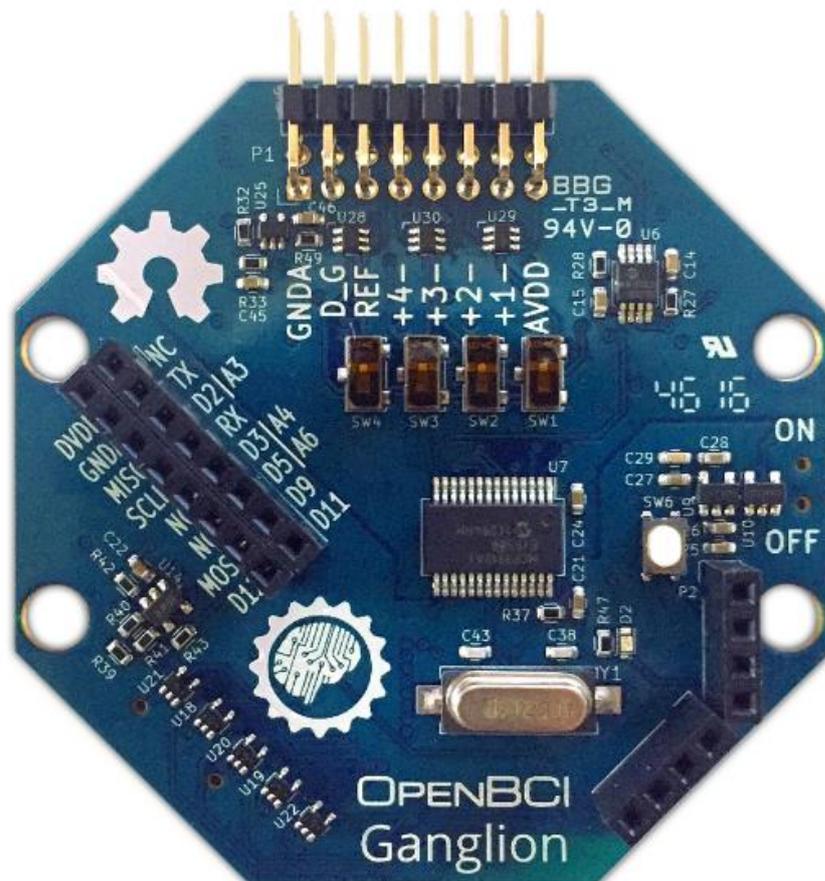


Figura 16. Dispositivo OpenBCI Ganglion

El dispositivo cuenta con 4 canales de entrada y otro como tierra (DRL), una alimentación de tensión positiva (Vdd) y una fuente de tensión negativa (Vss). Las entradas se pueden utilizar como entradas diferenciales individuales para medir EMG o ECG, o pueden conectarse individualmente a un electrodo de referencia para medir EEG, que es lo que nosotros pretenderíamos.

El microcontrolador que utiliza es un [Simblee](#). Es compatible con Arduino de próxima generación de [RF Digital](#), y más pequeño, barato y robusto que el [RFDuino](#), que han estado utilizando en nuestros OpenBCI 32bit Boards y Dongles USB. La alimentación que tiene se puede cubrir con una batería de 3.3V a 12V DC. Esta batería no viene incluida.

El precio de [OpenBCI Ganglion](#) es de 199.99\$ y únicamente incluye lo que es el dispositivo en sí y un paquete de batería de 6V AA (baterías no incluidas) y 4 sujeciones de plástico (para la estabilización del tablero).

Para acompañar a esta placa base Open BCI ha diseñado un casco denominado [UltraCortex Marx IV](#), que viene en varias configuraciones, desde 4 a 32 electrodos. Evidentemente la configuración de 4 canales es para el [OpenBCI Ganglion](#) que acabamos de definir. Los electrodos de los que dispone *UltraCortex Marx IV* son de oro secos, aunque pueden ser usados con pasta conductora para mejorar la calidad del contacto, estos electrodos si se quieren comprar por separado tienen un precio de 29,99\$ para 10 electrodos.

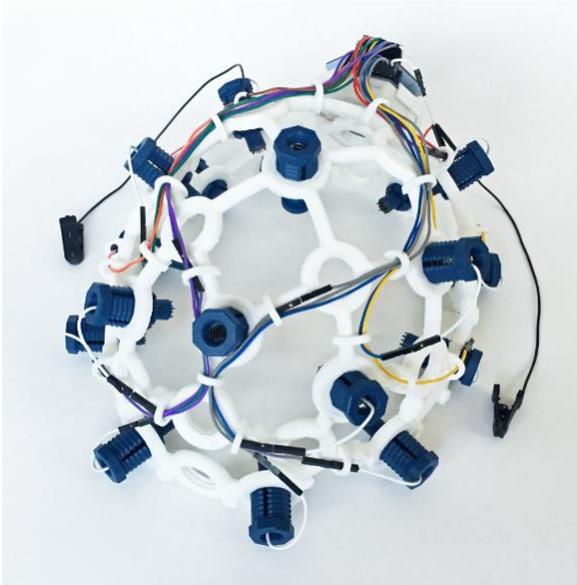


Figura 17. Casco UltraCortex Marx IV

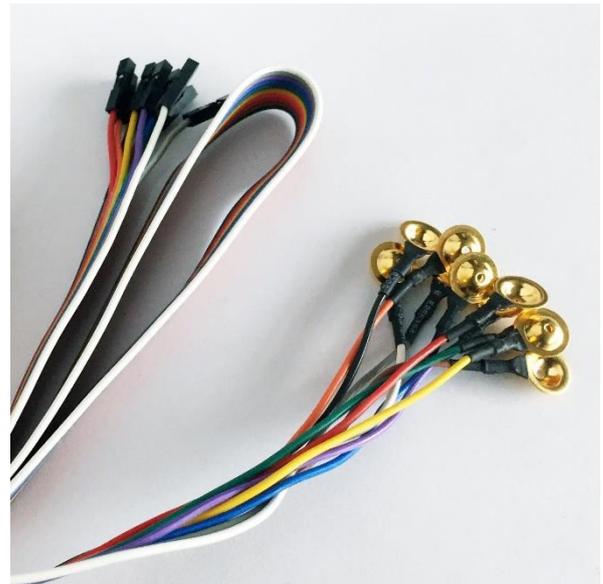
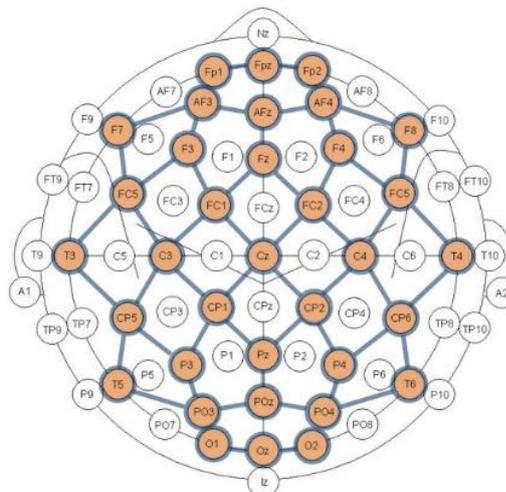


Figura 18. Electrodos de oro con forma de copa

La disposición de estos electrodos la podemos ver en la siguiente figura. Se trata de una distribución basada en el sistema 10-20, que como se comentó en la introducción es el sistema más utilizado internacionalmente.

Ultracortex Mark IV Node Locations (35 total)



Based on the internationally accepted **10-20 System** for electrode placement in the context of EEG research
Figura 19. Disposición electrodos en OpenBCI Ganglion

El *Ultracortex Mark IV* es capaz de muestrear hasta 16 canales de EEG de hasta 35 diferentes ubicaciones. Esta versión es la última edición del Ultracortex, y además de ser imprimible en 3D es compatible con todas las placas OpenBCI, y según aseguran desde la propia empresa tarda menos de 30 segundos en colocarse y ponerse en marcha. Una gran ventaja de este dispositivo reside en su facilidad de reparar y reemplazar las piezas que se rompen

El precio del [UltraCortex Marx IV](#) es relativo ya que depende del modo en el que se solicite y de los canales que disponga. El estándar de 8 canales tiene un precio de 599.99\$ y viene sin ensamblar. Ensamblado costaría 200 dólares más, aunque también te dan la opción de imprimirlo en 3D tú mismo, para lo cual te dan las instrucciones de cómo hacerlo, en este caso el precio sería de 349.99\$. Luego tenemos la opción de elegirlo con el doble de canales, 16 en total, por lo que habría que sumar 100\$ a cada caso. En ninguna opción incluyen las baterías, pero te aconsejan cuál comprar.

Lo bueno que tiene OpenBCI es que sus desarrolladores son completamente gratuitos, en este caso su software se denomina [Open BCI GUI](#). Por lo tanto con comprar la placa base que hemos visto, una batería y unos buenos electrodos, podríamos tener un BCI muy asequible, de buena calidad y con disponibilidad completa para el estudio de las señales EEG.

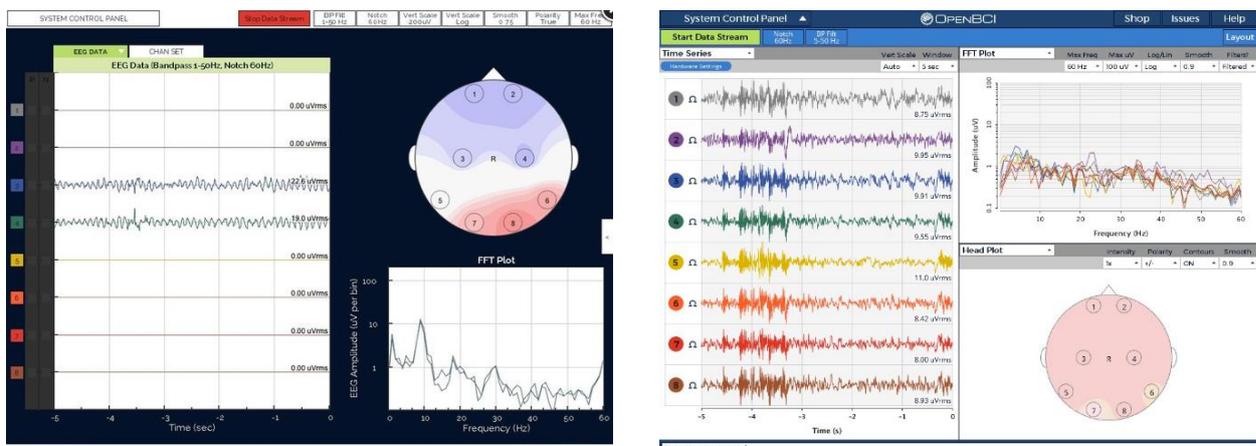


Figura 20. Software OpenBCI GUI

Otra ventaja a parte de que dicho software sea gratuito es que los archivos se guardan en formato EDF que permite analizarse en cualquier plataforma, y en cuanto al dispositivo en sí, el OpenBCI, posee otras características positivas como por ejemplo el hecho de disponer de algunas herramientas de SDK que son básicamente un conjunto de plantillas y desarrolladores de aplicaciones en Java, Python y Node.js que están disponibles en su [web](#) y en [github](#).

Las plataformas en las que se puede utilizar *Ganglion* en un PC son Windows y Linux (Ubuntu o Fedora).

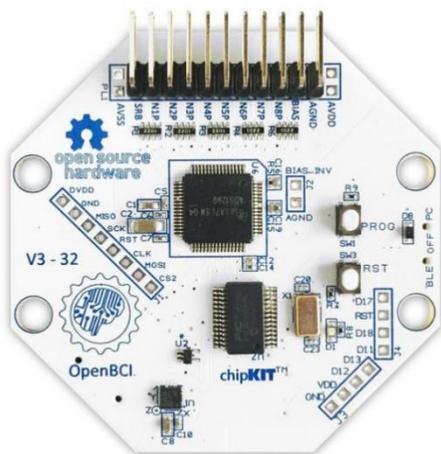
En lo referente a la frecuencia de muestreo, para los productos de OpenBCI esta frecuencia es de 125Hz, en comparación con los 128 para *EPOC+* e *Insight*, lo cual es bastante similar, aunque se encuentran un poco lejos de los dispositivos clínicos que varían entre los 512 Hz y 1 kHz, pero evidentemente éstos son muchísimo más caros.

En cuanto a la batería, básicamente dependerá de las que le queramos poner, aunque la propia empresa recomienda una batería recargable de iones de litio de 500mAh.

Y respecto a los electrodos, han puesto a la venta los [electrodos de oro](#) a los que hemos hecho referencia al comienzo, junto a la [pasta](#) para mejorar la conectividad de los mismos, aunque sería perfectamente posible adquirir otros electrodos desde otra empresa y conectarlos a [OpenBCI Ganglion](#), como podrían ser unos electrodos completamente secos.

Además de la placa base que hemos comentado, Open BCI dispone de dos dispositivos BCI más, los cuales nos permiten el acceso a un mayor número de canales.

[Cyton Biosensing Board](#). Este dispositivo es también una placa base, pero en vez de darnos acceso a 4 canales para obtener información, tal y como lo hacía el anterior, en este caso podemos manejar 8 canales. Es compatible con Arduino y tiene un procesador de 32 bits. Respecto al microcontrolador, este BCI utiliza un [PIC32MX250F128B](#), dándole más memoria local y velocidades de procesamiento rápidas. La placa viene precalentada con el cargador de arranque chipKIT™ y el último firmware de OpenBCI.



Al igual que todas las placas de Open BCI, ésta se comunica de forma inalámbrica al ordenador a través de [OpenBCI USB dongle](#) que utiliza Bluetooth 4.0, exactamente igual que las demás, el cual viene incorporado, y también puede comunicarse de forma inalámbrica con cualquier dispositivo móvil o tableta compatible con Bluetooth Low Energy (BLE).

El precio de esta versión es de 499.99\$, que no incluye electrodos ni baterías.

Figura 21. Dispositivo Cyton Biosensing Board

Por último tendríamos la versión más cara de OpenBCI, el [Cyton + Daisy Biosensing Boards](#). En este caso tendríamos además de la placa base anterior un módulo OpenBCI Daisy incorporado. Este dispositivo tiene las mismas características que el que acabamos de ver pero con la posibilidad de disponer del doble de canales, 16 en total.

La diferencia en el número de canales se ve reflejada en el precio, ya que básicamente al doblar el número de canales OpenBCI dobla el precio de su dispositivo, pudiendo adquirirlo por 949.99\$.



Figura 22. Dispositivo Cyton + Daisy Biosensing Board

Neurosky

El dispositivo desarrollado por Neurosky se llama MindWave Mobile 2, que es una versión mejora del original, denominado MindWave Mobile, éste casco en sí mismo está formado por un clip auricular como toma de tierra y un brazo sensor [4]. Dicho brazo sensor presenta únicamente un electrodo de acero inoxidable que está colocado en la frente.



Figura 23. Dispositivo MindWave Mobile2

Este sensor, posición FP1, proporciona una frecuencia de muestreo de 512 Hz como salida (en comparación con 128 y 125 Hz para Emotiv y OpenBCI, respectivamente). La transferencia de datos la realiza a través de Bluetooth BT/BLE dual mode, con un rango de 10 metros. Y tiene una sola batería AAA con 8 horas de duración, la cual no está incluida. [Especificaciones MindWave Mobile.](#)

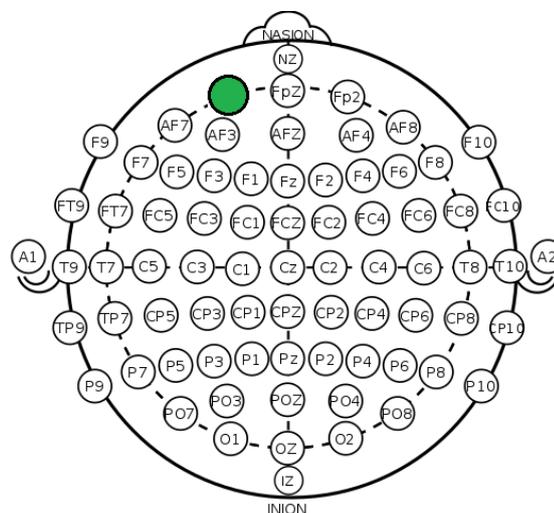


Figura 24. Disposición electrodos MindWave Mobile2

Ha sido construido con la finalidad de utilizarlo en aplicaciones de consumo propio, no para investigación, y tiene un mercado de aplicaciones y [SDKs](#), es decir desarrolladores de software, bien establecidos para iOS, Android, Mac y Windows.

Sin embargo, Neurosky dispone de 2 tipos de SDK distintos, los cuales son [NeuroView](#) y [NeuroSkyLab](#), que están dedicados a la investigación de las señales EEG. Cada uno está dirigido a diferentes tipos de investigadores, el primero es para principiantes o intermedios en EEG y el segundo es para investigadores avanzados que estén familiarizados con el entorno de MATLAB.

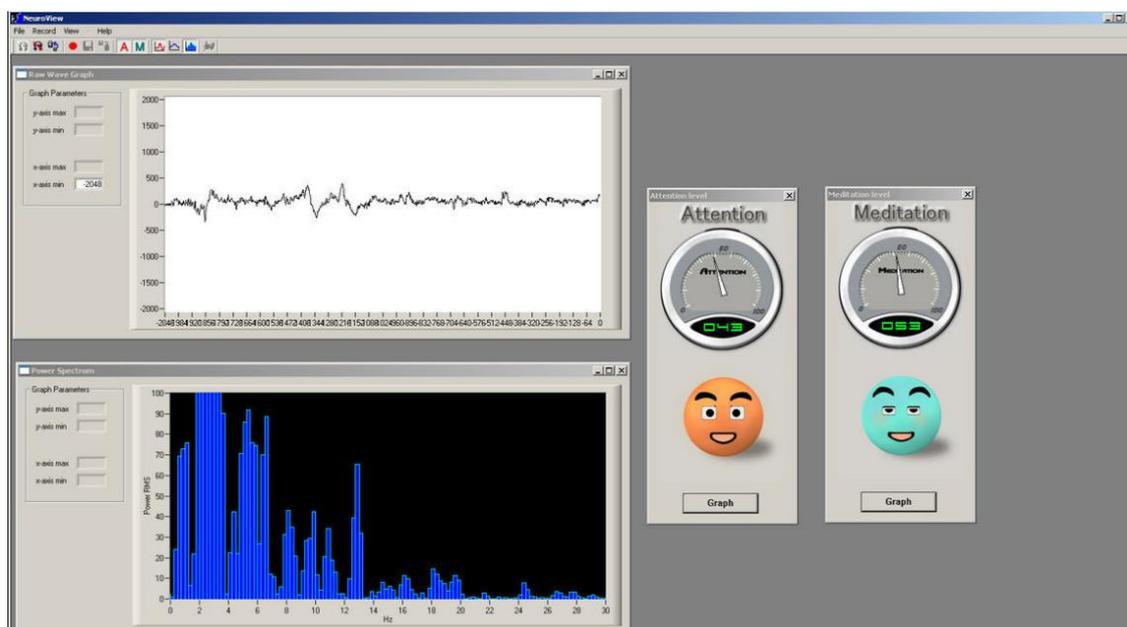


Figura 25. SDK MindWave Mobile2

Otra diferencia entre uno y otro reside en la accesibilidad a los datos, mientras que NeuroView registra datos en un archivo Comma-Separate-Values (CSV), que puede ser abierto con Excel, y además de no proporcionar una salida de EDF, NeuroSkyLab está más integrado con MATLAB, el cual es el entorno que estamos empleando en la UPCT.

En lo referente al precio ambos desarrolladores cuestan 499.99\$, precio que no incluye el dispositivo, simplemente es el software, y solo funcionan con Windows. En cuanto al dispositivo en sí, [MindWave Mobile](#), tiene un precio de 99\$ y se compra desde Amazon a partir de la cuenta oficial de Neurosky.

Esta empresa también dispone de una herramienta de investigación denominada [MyndPlay Pro](#), que ofrece todas las funciones básicas de Neuroview y Neuroskylab, pero solo cuesta 121.74\$ y funciona tanto en Mac como en PC. Este desarrollador va dirigido a los usuarios que quieran mejorar las funciones y posibilidades del MindWave Mobile ya que contiene lo básico de los 2 desarrolladores de investigación que hemos mencionado, además de venir todo distribuido de una forma sencilla para que sea fácil de usar. En definitiva, es un desarrollador de software a nivel usuario. [Especificaciones MyndPlay Pro](#).

Enlace a la página de Neurosky: <https://store.neurosky.com/>

Muse 2.

[Interaxon](#) presenta su dispositivo conocido como “Musa”. [Muse 2](#) es la versión mejorada del dispositivo original denominado Muse [5]. Este nuevo hardware trabaja con señales EEG aunque realmente su funcionalidad principal se reduce a ser un asistente de meditación personal. Los electrodos colocados a lo largo del dispositivo miden la actividad cerebral al igual que un tensiómetro mide la frecuencia cardíaca para saber si estamos relajados o alterados. Básicamente el fundamento del dispositivo es entrenar la meditación mediante prácticas en las que te guía paso a paso. Gracias a la mejora del dispositivo lo que originalmente con Muse se limitaba a controlar lo referente a la cabeza ahora con Muse 2 se amplía y te permite más partes del cuerpo como puede ser el corazón, la respiración y el aparato digestivo.

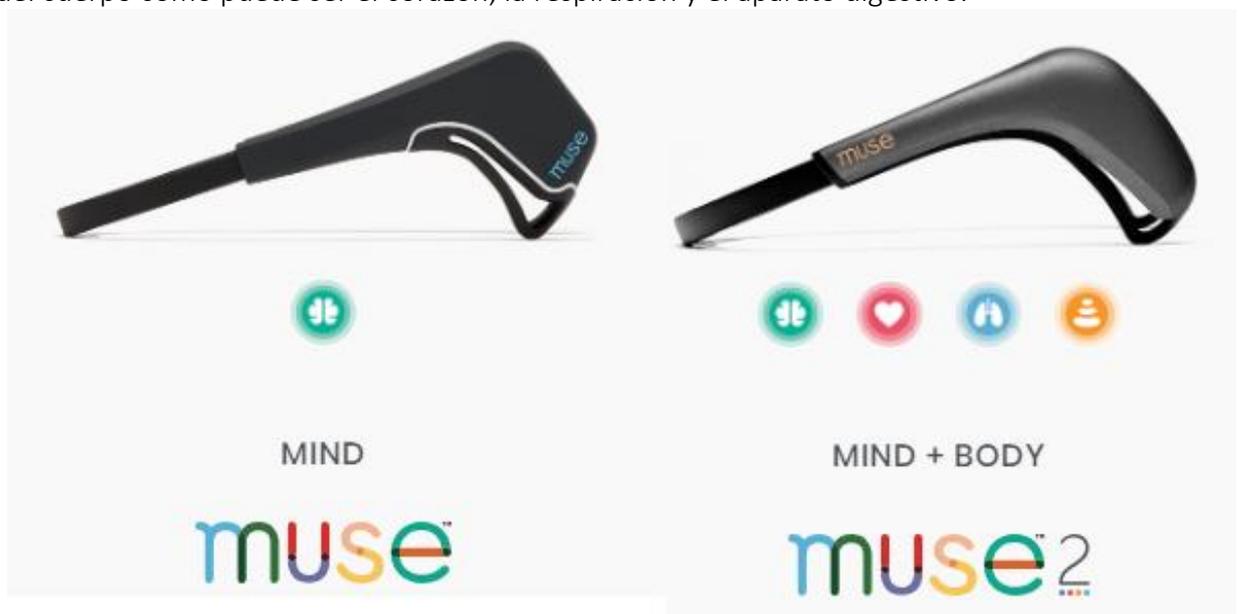


Figura 26. Dispositivo Muse y Muse 2

Funciona del siguiente modo:

Te colocas Muse, es decir el dispositivo con los sensores en la cabeza, de la manera indicada (ver imagen). Te colocas los auriculares, que pueden ser unos normales. Inicias la aplicación que han desarrollado y tratas de relajarte. Durante este proceso Muse, a través de impulsos eléctricos recogidos mediante los sensores, mide si estás relajado o estresado y traslada esa información a la aplicación que transformará los datos en sonidos atmosféricos. Cuando estás calmado escucharás sonidos atmosféricos tranquilos y cuando comienzas a estresarte se cambian a sonidos más intensos. La aplicación tratará de guiarte para que vuelvas al estado de relajación. En cada sesión se revisa tu información, se fijan metas y se busca conseguir un estado de relajación cada vez más profundo, ya que a través la práctica la relajación se vuelve mejor con el paso del tiempo.

El dispositivo tiene 7 sensores, todos ellos secos. Dispone de 4 canales para la toma de datos, 2 de ellos son sensores de plata colocados en la frente y 2 son de silicona detrás de la oreja, y además tendremos 3 sensores que serán de referencia colocados entre los 2 electrodos frontales



Figura 27. Dispositivo Muse

Algunas fuentes de internet señalan que todos estos sensores están un paso, en términos de calidad de la señal, por encima de los sensores de acero inoxidable que vimos en el Neurosky.

Muse electrode locations by 10-20 International Standards.

-  Reference
-  Channel

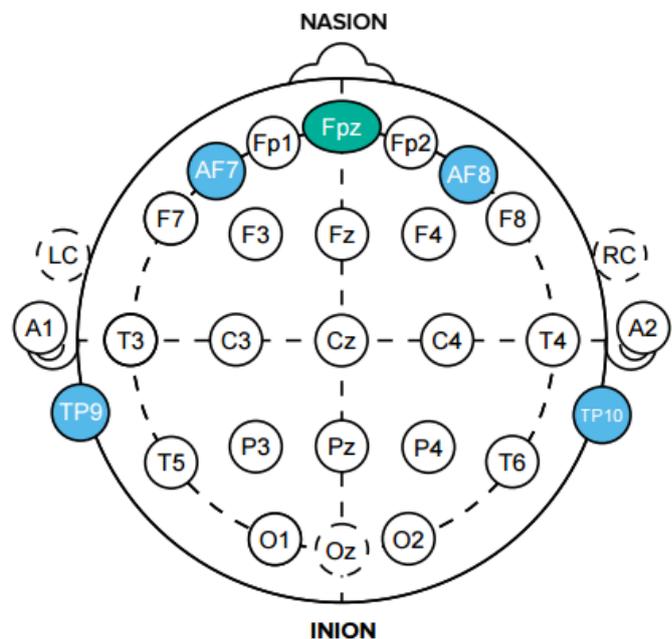


Figura 28. Disposición electrodos

En lo que a características de Muse se refiere hay 2 versiones, una versión original más antigua de 2014 y la actual de 2019 que lleva ya varios años en funcionamiento. Para explicar las características nos fijaremos en la versión actual aunque se hará algún comentario sobre la versión de 2014.



Figura 29. Colocación del dispositivo Muse

La conexión se establece a través de Bluetooth 5.0 BTL. Las velocidades de muestreo están establecidas a 256 Hz y filtradas en paso bajo a 100 Hz. La batería tiene una duración de máximo 5 horas.

Una vez se obtiene la señal se puede acceder a ella a través de su SDK (kit de herramientas de desarrollo) sin necesidad de ser procesada pero de cara a obtener la señal cruda para la investigación, que sería el caso que pretendemos en este proyecto, se requieren dos programas independientes: MuseIO, que enlaza con el dispositivo y MuseLab, que transmite los datos de MuseIO y nos los hace posible acceder a ellos. Llegados a este punto el software nos permitiría grabar y guardar la señal, pero el asunto no termina aquí, ya que los datos se guardan en un "formato Muse", por lo tanto necesitaríamos otra aplicación, denominada MusePlayer, que nos permitiría convertir la señal a un formato CSV o MATLAB, para así poder manejarlos. Es un proceso un tanto farragoso.

Aquí tenemos el enlace a las especificaciones de Muse: [Características Muse](#).

Se distribuyen desde Estados Unidos y Canadá, y el precio del dispositivo es de 219,99\$ para la versión original y de 269,00\$ para la versión mejorada Muse 2. El acceso a los programas MuseIO, MuseLab y MusePlayer al parecer estaría incluido en dicho precio.

Muse es compatible con un rango bastante amplio de dispositivos móviles, tanto de Apple como de Android. En el siguiente enlace tenemos todos los dispositivos compatibles con Muse: [Lista de dispositivos compatibles](#).

En conclusión, la finalidad del dispositivo no es la que a nosotros nos interesa, no está creado como un dispositivo para la investigación sino como una herramienta personal. Sin embargo, permite obtener señales EEG mediante un dispositivo bastante manejable, el cual dispone de sensores secos de buena calidad. Ahora bien, la forma en la que pretendemos leer las señales que recoge no es la más adecuada ya que necesita de varios programas para finalmente obtener una señal que podamos manejar con herramientas como MATLAB, ya que el dispositivo genera señales en su propio formato por lo que sería un tanto tedioso tener que trabajar con este BCI.

Enlace a la página de Muse: <http://www.choosemuse.com/>

Spark

La empresa [Personal Neuro Devices](#) sacó hace un par de años un dispositivo BCI al que denominaron Spark [7]. Esta empresa se dedica a desarrollar BCI's de bajo coste y crear aplicaciones con el que poder usarlas. El dispositivo original fue modificado y mejorado y actualmente la versión no está aún disponible al público. Al ser un dispositivo Spark relativamente joven no hay demasiada información sobre él, ni si quiera en la propia página web, pero podemos describir sus características y su función por encima.



Figura 32. Dispositivo Spark

Este dispositivo ha sido creado para el consumidor de a pie, transmite datos al Smartphone a través de Bluetooth v. 4.0. Y viene con una aplicación para el móvil denominada [BrainMoji](#), que es la evolución de la aplicación original, [Transcend](#).



Figura 33. Aplicación Spark

La función principal de esta aplicación es la de poder ver la actividad cerebral en imágenes a tiempo real en forma de emoticonos que muestren tus reacciones o estado de ánimo mediante datos recopilados a través de Spark y su vez puedan ser publicadas en redes sociales, ya que está ideada para ser usada en el ámbito de interacción social.

La frecuencia de muestreo es de 256Hz y dispone de una batería de 8 horas de duración.

La parte mala es la misma que en el BCI anterior (Versus), es decir tampoco dispone de un desarrollador para estudiar la señal bruta, simplemente está ideada para ser utilizada de una forma cotidiana, no para investigación. La parte buena es el precio, ya que tan solo cuesta 99\$, precio que incluye todos los servicios, tanto hardware como software, y este precio tan bajo es el motivo por el cual he decidido añadirlo a la lista, ya que tiene una frecuencia de muestreo bastante buena.



Figura 34. colocación dispositivo Spark

BrainLink

[Macrotellect](#) ha diseñado [BrainLink](#), un dispositivo BCI que en un principio utilizaron para la investigación de las EEG pero que actualmente lo venden como acompañamiento a las aplicaciones que ellos mismos han desarrollado [8]. Su principal función es la misma que la de Muse, Versus y Spark, [MBrainTrain](#), es decir la de mejorar la meditación en el usuario.



Figura 35. Dispositivo BrainLink

Más allá de esta función la empresa no tiene ninguna SDK para su dispositivo. En cuanto a sus características, este BCI dispone de Bluetooth 3.0 ERB para transmitir los datos. Tiene 2 sensores secos + 1 de referencia en el mastoides izquierdo.



Figura 36. Colocación BrainLink

La batería es Litio y tiene una duración de 8 horas necesitando solo 1 de carga. Se desconoce la frecuencia de muestreo ya que no la incluyen en su [hoja de especificaciones](#). El dispositivo se puede adquirir desde Amazon por 198,00 \$ o por MindTecstore por 149\$.

Brain Rhythm Inc

[Brain Rhythm Inc](#) es una compañía que tiene sede en Taiwan y está especializada en BCI. Tiene varios dispositivos y algunos componentes como sensores secos además de 3 softwares distintos para estudiar las EEG.

[BR8 Plus](#) es uno de los BCI que Brain Rhythm Inc ha desarrollado. Este dispositivo está formado por 8 sensores secos, hechos de espuma, más 2 electrodos de referencia situado en los mastoides.



Figura 37. Dispositivo BR8 Plus

La frecuencia de muestreo interna del dispositivo es 1000Hz, aunque los datos se reducen a 500 Hz antes de que el sistema esté disponible para capturar las señales EEG tal y como podemos ver en la [hoja de especificaciones de 2015](#) [9]. La transmisión de datos se realiza a través de Bluetooth 2.1 y posee una batería con 10 horas de duración continuada.

La disposición de los canales (Fp1, Fp2, Fz, C3, C4, Pz, O1 y O2) la podemos ver en la siguiente figura:

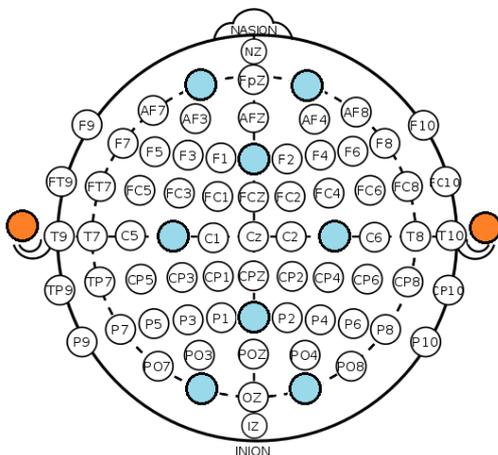


Figura 38. Disposición electrodos BR8 plus



Figura 39. Colocación dispositivo BR8 plus

Los datos de salida se pueden encontrar en los siguientes formatos: EDF, BDF, TXT, CNT Y CSV. Por lo que estaríamos hablando de una libertad muy grande para disponer de las señales y poder trasladarlas a otro lugar para su estudio.

Esta compañía ha desarrollado 3 tipos diferentes de Software: [Brain Viewer](#), [Open Vibe](#) y [NeuroRT Studio](#). Los cuales pueden utilizarse únicamente con Windows.

El primero, [Brain Viewer](#), es un software estándar cuya función es obtener los datos EEG crudos. Además tiene las herramientas básicas de procesamiento de señales en tiempo real, tales como visualización de señal de tiempo/frecuencia, filtro de paso de banda y función de difusión de canal de distribución.

El segundo, [Open Vibe](#), es una plataforma de software dedicada a diseñar, probar y usar interfaces cerebro-computadora. El paquete incluye una herramienta de diseño para crear y ejecutar aplicaciones personalizadas, junto con varios programas preconfigurados y de demostración que están listos para su uso. Puede usarse para adquirir, filtrar, procesar, clasificar y visualizar señales cerebrales para procesamiento en tiempo real.

Y por último tenemos a [NeuroRT Studio](#), el más completo de los tres, cuyo software está enfocado al diseño de experimentos en tiempo real y análisis de la señal. Proporciona un editor gráfico para arrastrar y soltar cajas de una biblioteca que cubre los pasos esenciales de tal análisis: lectura y escritura de datos (de/a un dispositivo y/o un archivo), filtrado temporal y espacial, selección, operaciones matemáticas, visualización y demás.

Además del dispositivo BCI del que hemos hablado al comienzo, el BR8 plus, la compañía [Brain Rhythm Inc](#) ha desarrollado otro casco denominado [BR32S](#). Este modelo está especialmente diseñado para investigación de las EEG y al igual que el primer modelo éste también transmite los datos mediante Bluetooth 2.1.



Figura 40. Dispositivo BR32

Está formado por 32 electrodos secos, hechos también de espuma, más los dos diodos de referencia situados en los mastoides. La frecuencia de muestreo es de 250Hz, y la batería de la que dispone tiene una duración de 10 horas mínimo. El resto de características las podemos ver en la [hoja de especificaciones](#).

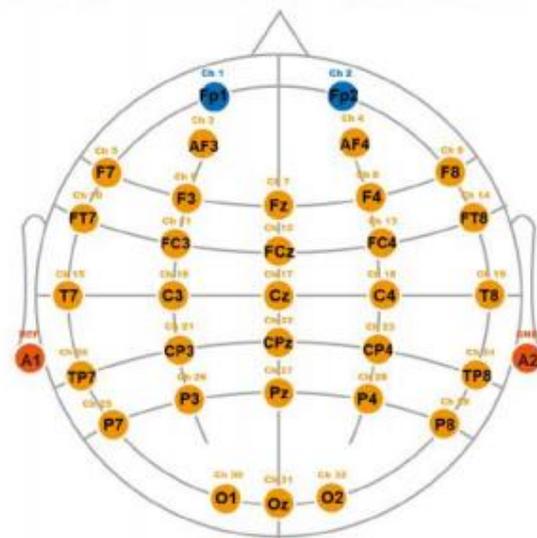


Figura 41. Disposición electrodos BR32



Figura 42. Colocación dispositivo BR32

La salida de datos en este caso también es en formatos EDF, TXT y CNT, y los softwares con los que se puede estudiar las señales EEG son los mismos que antes, siendo Windows la única plataforma en la que se pueden usar.

Una de las ventajas de estos dos BCIs reside en su facilidad de reemplazar o reparar los sensores secos, los cuales te ofertan en la propia página web, habiendo 2 tipos distintos de sensores:

- [Spring-Loaded](#). Este tipo de sensor seco está optimizado para deslizarse a través del cabello hasta la piel. No requiere ninguna preparación del cuero cabelludo para su uso.



Figura 43. Dry sensor Spring-Loaded

Las características del mismo las podemos encontrar en la [hoja de especificaciones](#).

- [Foam-Based](#) es el otro tipo de sensor seco. Está también hecho a base de espuma, siendo de fácil uso y produce señales de alta fidelidad sin preparación de ningún tipo de gel.



Figura 44. Dry sensor Foam-Loaded

Sus características las podemos encontrar en la [hoja de especificaciones](#).

Después de haber visto todos estos productos de [Brain Rhythm Inc](#) nos queda por conocer el precio de cada uno. Pues lo cierto es que la empresa no ha puesto a nuestro conocimiento ese dato. Aunque hay algunos foros que tratan ese tema, y trabajadores de la misma empresa contestan las dudas que van surgiendo, aunque no lo hacen con el tema del precio:

<https://neurobb.com/t/brain-rhythm-br8-plus-any-previous-experiences/331/4>

Podemos intuir que no será barato del todo, aunque si existiera interés real en adquirir alguno de sus productos solo tendríamos que preguntar.

IMEC

La empresa [IMEC](#) posee a su disposición un dispositivo BCI al que denominaron Imec headset. Este BCI está dedicado al estudio clínico ya que su uso está orientado a la medicina en lo que a detección de problemas de estado de ánimo y estrés se refiere. Las características principales las podemos encontrar en su [hoja de características](#) [10], que recoge como características más importantes entre otras el registro de datos con una frecuencia de muestreo de 256 Hz, la transmisión de datos la realiza a través de Bluetooth 2.1 y los sensores utilizados son secos favoreciendo la usabilidad. La apariencia del dispositivo IMEC es la siguiente:



Figura 45. Dispositivo IMEC

Este dispositivo cuenta con 8 electrodos secos hechos a partir de polímeros. La disposición de dichos sensores se centra en la parte frontal pudiendo utilizar 3 configuraciones distintas.

Configuration 1	Measurement electrodes: Fp1, Fp2, F3, F4, F7, F8, T3, T4 Reference: Fz, Patient bias: Fpz
Configuration 2	Measurement electrodes: F7, F8, T3, T4, C3, C4, P3, P4 Reference: Cz, Patient bias: Fpz
Configuration 3	Measurement electrodes: F3, F4, F7, F8, Fz, C3, C4, Cz Reference: right mastoid (A2), Patient bias: left mastoid (A1)

Figura 46. Distribuciones electrodos IMEC

La batería tiene una duración de 8 horas, necesitando únicamente 2 para completar la carga. En cuanto al precio no podemos comentar nada ya que para conocerlo hay que mostrar interés y comunicarse con la empresa.

Los SDK no están desarrollados para la investigación, únicamente están destinadas al chequeo de la salud a través de las aplicaciones propias de IMEC.

Hasta aquí llega la recopilación de todos los dispositivos recogidos en la tabla localizada al comienzo de esta sección, la cual podemos encontrar al comienzo de esta sección y que recuperamos a continuación para poder tener una breve visión de toda la información hasta ahora expuesta.

Empresa	Dispositivo	Precio (\$)	Sensores	Tipo de sensor	Frecuencia de muestreo	Duración batería (horas)	Salida de datos	Plataformas	SDKs	Precio SDK
Neurosky	Mindwave 2	99,99	1+1	Secos	512Hz	8	CVS	Windows, Mac, iOS, Android	NeuroView NeuroSkyLab	499,99\$/mes
Emotiv	EPOC+	799,00	14+2	Mojados	256 Hz	12 (6 con BT)	EDF	Windows, Linux, Mac, iOS, Android	EmotivPro	99,00\$/mes
Emotiv	Insight	299,00	5+2	Semisecos	128Hz	8 (4 con BT)	EDF	Windows, Linux, Mac, iOS, Android	EmotivPro	99,00\$/mes
Interaxon	Muse 2	269,00	4+3	Secos	256Hz	5	Muse	Windows, Mac, iOS, Android	MuseLab MusePlayer	Free
OpenBCI	Ganglion	199,99	4	Mojados/secos	125Hz	Variable	EDF	Windows Linux	OpenBCI GUI	Free
OpenBCI	Cyton BB	499,99	8	Mojados/secos	125Hz	Variable	EDF	Windows Linux	OpenBCI GUI	Free
Senselabs	Versus	1299,00	5+2	Secos	250Hz	5	No	iOS	SenseLab	29,95\$/mes
PNDevices	Spark	99,00	4	Secos	256Hz	8	No	No	No	Free
Macrotellect	BrainLink	149,00	2+1	secos		8	No	iOS, Android	No	Free
Brain Rhythm	BR8 Plus	-	8+2	secos	500Hz	10	EDF	Windows	Brain Viewer Open Vibe NeuroRTstudio	-
Brain Rhythm	BR32	-	32+2	secos	250Hz	10	EDF	Windows	Brain Viewer Open Vibe NeuroRTstudio	-
IMEC	Imec Headset	-	8	secos	256Hz	8	No	Android	No	-

Tabla 2. Lista de dispositivos BCI estudiados

Como ya se ha comentado, además de estos dispositivos se han podido estudiar muchos más BCIs junto con sus características pero finalmente he decidido no incluirlos en este estudio debido al hecho de que o bien su valor supera significativamente los 1000€ o las especificaciones y características que presentaban estos dispositivos no se encontraban dentro de marco que buscamos para poder emplearlos en investigación en la UPCT. Ambos motivos han sido diferenciados y se ha creado una tabla para cada uno.

Empresa	Dispositivo
Brain Products	AntiCHamp
ANT Neuro	eego sport
Biosemi	Active Two
Brain Products	AntiCHamp
NeuroElectrics	Enobio 32
g.Tec	g. Nautilus
Mind Media	Nexus 32
QUASAR	DSI 10/20
Mitsar	EEG 201
Neuroscan	QuickCap EEG
Cognionics	Quick-30 Dry Headset
Adv. Brain Monitoring	B-Alert X24
Mindo	Mindo-32
Wearable	DSI 24 y DSI 7

Tabla 3. Dispositivos BCI caros.

En primer lugar podemos observar a la izquierda la tabla que recoge aquellos dispositivos estudiados y descartados por tener un precio superior a los 1000\$.

Estos dispositivos están creados en su mayoría por las empresas más importantes que actualmente están trabajando con EEGs y que han diseñado sus propios BCI. En la mayoría de casos tienen a la venta varios modelos, con una accesibilidad a los datos bastante grande, pero en la tabla solo he recogido los que tienen mejores características.

En segundo lugar presentamos la siguiente tabla que recoge aquellos dispositivos que no han sido considerados debido a la finalidad para la que han sido construidos o simplemente porque la información publicada en internet no es lo suficientemente fiable, simplemente es deficiente en cuanto a calidad y cantidad.

Empresa	Dispositivo
Mattel	Mindflex Duel
Melon	Melon
myBrainTech	Melomind
Neorowear	Neorowear
Mindo	Mindo
Cusoft	Cusoft

Tabla 4. Dispositivos BCI descartados

Estamos hablando de dispositivos sin mucha información o simplemente dedicados a aplicaciones o juegos que pueden ser descargados desde internet para su uso cotidiano y que además no poseen desarrolladores para las señales EEG. De este tipo se han descrito varios BCI a fondo por lo que no he visto la necesidad de comentar todos los que hay en el mercado si la finalidad para la que estamos realizando esta investigación dista mucho de las posibilidades reales que el dispositivo nos pueda llegar a ofrecer.

Acabamos aquí con la primera de las búsquedas bibliográficas que como objetivo debía realizarse.

2.2. Búsqueda de tipos de sensores secos

Como objetivo secundario en esta sección se encuentra la búsqueda de diferentes tipos de sensores secos que tengan la capacidad de ser aplicados en los sistemas de registro de señales EEG que estamos viendo o que vayamos a utilizar, ya que una de las características generales del dispositivo con el que vamos a realizar la captura de datos es el hecho de poseer electrodos que necesitan de la aplicación de un gel que mejore la conexión de registro. Por lo tanto buscamos poder aplicar un sensor seco que nos aporte una buena calidad de lectura de datos mejorando así la usabilidad del futuro dispositivo ya que estaríamos evitando el procedimiento farragoso de aplicar este gel del que hablamos cada vez que se use el casco.

Muchas de estas empresas de las que hemos hablado anteriormente y que han sido ordenadas en alguna de la 3 tablas presentadas tiene a su disposición diferentes tipos de accesorios para aplicarlos en un BCI. Dentro de este abanico de accesorios podemos encontrar electrodos, lo cual a nosotros nos interesa pues quizás sea factible conseguir una placa base, como puede ser por ejemplo una OpenBCI, y formar en la UPCT un nuevo casco desde cero que mejore las prestaciones de los que están a nuestra disposición actualmente.

A día de hoy en el mundo de las señales EEG hay muchos fabricantes que han puesto electrodos destinados a registrar este tipo de señales. Estos electrodos poseen muy buenas características y están a disposición del consumidor. Algunos de ellos también disponen de electrodos secos, y son éstos los que nos interesan ya que en el mercado actual la calidad de imagen transmitida no difiere tanto como antes entre el caso de un diodo que necesita una solución salina o un tipo de gel para mejorar la conductividad y un diodo completamente seco.

No son muchas las empresas que facilitan electrodos secos de calidad para el consumidor, por lo que la búsqueda presentada a continuación puede ser ampliada conforme el mercado evolucione.

A continuación haré una descripción de varios modelos de diodos secos:

Drytrode

[Drytrode](#) está específicamente creado para aplicación de un BCI. [NeuroElectrics](#) [11] desarrolló un dispositivo llamado [Enobio](#) junto con su correspondiente software, [NUBE](#), para estudiar señales EEG. Cuando la calidad de los electrodos secos comenzó a ser evidente, *Neuro Electrics* desarrolló este electrodo específicamente para Enobio, el cual tiene 3 modelos, de 8, 20 y 32 canales, cuyos precios son 4.995€, 14.495€ y 24.995€ respectivamente, un precio mucho mayor a los dispositivos de bajo coste estudiados en esta sección.

Drytrode tiene 10 puntos de contacto con la cabeza y está diseñado para poder ser utilizado también en usuarios con pelo largo, ya que se desliza entre el cabello.

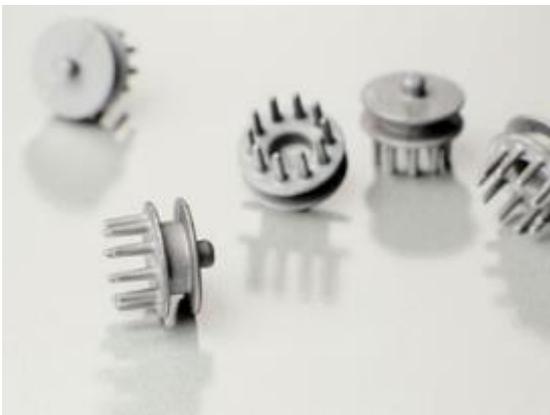


Figura 47. Sensor seco Drytrode

En su [hoja de características](#) estiman que su usabilidad está limitada a 100 usos, ya que quizás se pierda calidad en siguientes estudios, y recuerdan que para su fijación se necesita un casco del estilo que utilizan con Enobio, es decir como el casco de “*FrankiEmotiv*”, desarrollado en la UPCT.

Foretrode

[Foretrode](#) es el otro electrodo seco desarrollado por la misma empresa que Drytrode, es decir [NeuroElectrics](#) [11]. Este electrodo no necesita ningún tipo de aplicación de geles o disoluciones salinas, aunque se pueden emplear sin ningún problema. La diferencia principal con Drytrode reside en que este tipo de electrodo está destinado a zonas sin pelo, como puede ser la frente, mientras que Drytrode se centra en zonas con cuero cabelludo.



Figura 48. Sensor seco Foretrode

También recomiendan en su [hoja de características](#) una usabilidad de 100 veces, y lavarlo con agua tras cada uso.

El precio de estos electrodos no los facilita la empresa, por lo que para conocerlos hay que ponerse en contacto con ellos.

Además venden clips para la oreja como electrodos referencia, que se conocen como [Earclip](#).

Flex Sensor

[Flex sensor](#) es uno de los 2 tipos de electrodos secos que [Cognionics](#) a puestos a disposición del consumidor. Al igual que sucedía con la empresa anterior, [Cognionics](#) [12] diseñó Flex sensor para introducirlo en sus BCI, tiene 3 tipos destinados al estudio de las EEG: [Quick-20 Dry Headset](#), [Quick-30 Dry Headset](#) y [Mobile-72 Wireless](#).

Este tipo de sensor tiene 8 tomas de contacto con la cabeza, y está especialmente diseñado para ser usado en zonas con cuero cabelludo.

Está hecho de un elastómero conductor. No necesita ninguna aplicación de genes y no necesita ser lavado tras cada estudio.

En su [hoja de características](#) podemos encontrar toda la información.



Figura 49. Sensor seco Drytode

Dry Pad

El otro tipo de electrodo seco diseñado por [Cognionics](#) es [Dry Pad](#). Está destinado a zonas sin pelo, al igual que Foretrode. Está hecho de plata y el núcleo de cloruro de plata.



Figura 50. Sensor seco Dry Pad

Podemos ver todas sus especificaciones en su [hoja de características](#).

Se desconoce su precio ya que la empresa no lo ha podido en conocimiento en su página web, tampoco el de Flex Sensor.

g.SAHARA

[g.tec](#) es una compañía especializada en el estudio de las EEG. Tienen un BCI al que han llamado [g.Nautilus](#) que han equipado con un tipo de electrodos secos que ya han sido probados en todo el mundo por su excelente calidad de transmisión de imagen EEG, estos electrodos secos se llaman [g.SAHARA](#) [13].

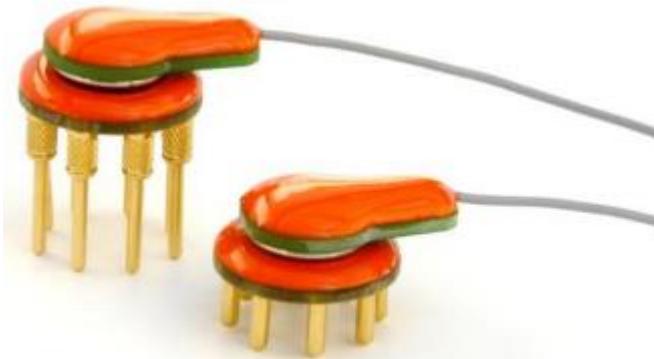


Figura 51. Sensor seco g.Sahara

Estos electrodos están formados por ocho pines y están hechos de una aleación de oro. Esta aleación de oro reduce la impedancia del electrodo y mejora la transmisión de la señal. Los hay de varias longitudes en función del cabello que haya en la zona de colocación, pueden tener una longitud de 7mm o de 16mm. Pueden capturar el espectro de frecuencias de las EEG desde 0.1 hasta 40Hz.

Está dirigido al consumidor que quiera investigar las señales EEG obteniendo una buena calidad de transmisión sin necesidad de utilizar geles o soluciones salinas. Por lo que es perfecto para lo que en la UPCT estamos buscando.

Además de estos electrodos g.tec ha diseñado un g.clip para utilizar en conjunto con los [g.SAHARA](#) facilitando así el remplazamiento de los electrodos secos.

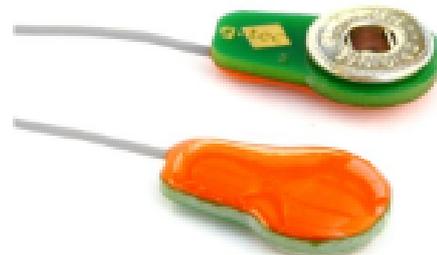


Figura 52. Sensor seco g.Sahara

Respecto al precio, se ha realizado un búsqueda completa en bastantes páginas y ninguna da ningún tipo de precio, siempre aconsejan llamar a la empresa para preguntarlo. En cuanto a si se pueden utilizar con otro tipo de BCI, no tiene por qué haber ningún problema ya que se pueden comprar por separado y montarlo por ejemplo en OpenBCI o Emotiv EPOC+.

Respecto a todos los electrodos secos de calidad que he encontrado sin duda este tipo es el que mejor opinión tiene entre todos los consumidores que lo han probado. No parece haber mucha diferencia entre el g.Sahara y los electrodos convencionales de oro que utilizan geles. Por lo que si el precio es razonable este electrodo es el más recomendable a la hora de comprar cualquier electrodo seco para estudiar las EEG.



3. Desarrollo de la metodología.

En esta sección definiremos cuales han sido las pautas a seguir para llevar a cabo cada uno de los resultados. Serán explicados todos los pasos realizados desde el comienzo de un experimento hasta su finalización sin entrar aún en la parte del procesado de los archivos obtenidos de cada sesión realizada.

A continuación se describen las fases que se han llevado a cabo antes y durante la realización de los experimentos.

3.1. Desarrollo del procedimiento

Lo primero que necesitamos conocer es el proceso y las condiciones en las que se llevarán a cabo cada uno de los experimentos. Establecer este procedimiento es fundamental de cara al estudio de los resultados finales ya que, para que la comparación de los mismos sea lo más precisa posible, es necesario que todos los experimentos se lleven a cabo bajo las mismas condiciones y con la misma metodología.

El procedimiento de experimentación consiste en completar 4 sesiones de manera correcta realizando cada una de ellas de la misma forma. Éstas consisten en colocar a cada individuo sentado en una silla con la espalda apoyada en el respaldo, las piernas desdobladas y cada mano colocada sobre su correspondiente pierna de modo que la posición del cuerpo resulte cómoda y sea siempre la misma durante la realización de cada sesión. Se ha establecido un descanso de 5 minutos entre sesión, que junto a los 4 minutos que dura cada sesión hace que el tiempo desde que comienza hasta que termina el experimento para cada usuario sea entorno a la media hora.

Una vez comenzada una sesión cada individuo deberá realizar 3 acciones:

- Pensar en mover la mano derecha.
- Pensar en mover la mano izquierda.
- Pensar en palabras con una inicial determinada.

Estas acciones serán comunicadas al individuo que esté realizando la prueba a través de 3 imágenes distintas que irán apareciendo en la pantalla de un ordenador situado enfrente de cada usuario e irán cambiando de forma aleatoria e individual en intervalos de 15 segundos. Estas imágenes reflejan una flecha que indica la dirección con sentido izquierdo, otra que indica el sentido derecho y una letra que indica la inicial de las distintas palabras que cada usuario debe pensar.

Cuando se complete un experimento de forma correcta cada usuario deberá rellenar un formulario en el que se reflejan las opiniones personales a ciertas preguntas relacionadas con la comodidad y complejidad del experimento. Además se deberá rellenar un apartado de información personal de cada usuario que nos servirá para categorizar los resultados, estudiarlos y con ello obtener las conclusiones finales.

3.2. Componentes del dispositivo

En primer lugar para poder llevar a cabo los experimentos era necesario disponer de todos y cada uno de los componentes que forman parte del dispositivo que registre los datos. Algunos de estos componentes fueron adquiridos de un fabricante alemán denominado Bionic Ibérica S.A. [14], el cual nos proporcionó un kit de elementos llamado *EASYCAP*, y el resto fueron fabricados por Francisco Javier Muñoz Sánchez en su trabajo final de grado [1].

Al comienzo del presente proyecto se me facilitó una caja que contenía todos estos instrumentos que serían los que iba a necesitar para llevar a cabo los experimentos y cuyo contenido es el siguiente:

- Malla para la colocación de los electrodos.

Es una malla elástica de 60cm la cual está agujereada siguiendo el sistema 10-20 de posición de electrodos, posibilitando así la colocación de los sensores a lo largo de toda la malla.



Figura 53. Malla

- Electrodo.

Se trata de unos electrodos formados por cloruro de plata, al igual que los del dispositivo Epoch del que se obtuvieron, y está numerados y etiquetados para conocer la posición de cada uno. En total tenemos 16 electrodos para realizar el registro, 14 de ellos diferenciados por cables de color rojo dedicados al registro de cada zona sobre la que son situados, y otros 2 empleados como referencia, CMS/RDK, siendo uno de ellos de color azul y otro negro.

Estos electrodos se encuentran conectados a un dispositivo conector que nos permite conectar los electrodos a un encapsulado, por lo que la función de los electrodos es la de registrar y transmitir los datos a dicho encapsulado.



Figura 54. Electrodo

- Encapsulado.

Fabricado por Francisco Javier Muñoz Sánchez, se trata de una caja que contiene la placa necesaria para transmitir los datos registrados mediante Bluetooth. Esta caja permite la conexión con los electrodos a través de una clavija hembra en la que se introducirá el macho localizado en el extremos de todos los electrodos al que convergen. La caja se encuentra cubierta por una tela que nos permite a través de una superficie de velcro fijarla a la malla elástica que se situará sobre la cabeza.



Figura 55. Encapsulado

- Receptor Bluetooth

Se trata de un pen drive que hace posible la recepción de la información que los sensores están registrando y que ha sido transmitida a través del encapsulado. Viene acompañado de un cable alargador USB que permite alejar el pen drive del ordenador para así evitar posibles ruidos en la señal producto de dicho ordenador. La distancia máxima que alcanza en el registro de señales es de 2 metros si nos encontramos en un entorno con ruido y de 4 metros si no hay interferencias.



Figura 56. Bluetooth

- Kit de ensamblaje.

Se trata de un kit formado por varios componentes encargados tanto de mejorar la conexión como de realizar la limpieza del dispositivo una vez concluye el experimento. Este kit está formado por 2 botes de gel, distintos entre sí, uno dedicado a mejorar la conductividad SuperVisc y otro dedicado a la limpieza denominado ABRALYT HICL, ambos vienen en botes de 250 gramos.



Figura 57. Bote gel conductivo



Figura 58. Bote gel limpieza.

Además en este kit podemos encontrar jeringuillas, que serán utilizadas para aplicar el gel en el interior de los electrodos, y los bastoncillos, destinados a la limpieza una vez acabe el experimento.



Figura 59. Jeringuilla



Figura 60. Bastoncillos

Este kit ha sido adquirido a través de la empresa “Bionic Ibérica S.A.” [14], la cual se dedica al estudio y producción de este tipo de materiales para su utilización en aplicaciones que estén relacionadas con las señales EEG. Esta misma empresa ha sido la que también nos ha proporcionados los gels, los electrodos e incluso la malla para colocar dicho electrodos.

Una vez conocemos los elementos que forman parte del dispositivo con el que se realizarán los experimentos, denominado *Emoc*, es momento de pasar al siguiente punto en el que preparará dicho dispositivo.

3.3. Preparación del experimento

Para poner a punto nuestro BCI distintos pasos han de ser completados.

1. Comprobación del estado de carga del encapsulado.

Lo primero de todo y antes de nada hay que asegurarse de que el dispositivo tiene carga suficiente para llevar a cabo el experimento. El encapsulado nos indica el estado de carga a través de una luz en su carcasa, siendo el color azul indicativo de que posee batería suficiente, el color rojo que necesita ser recargado ya que su nivel de batería es bajo y por último el color verde que nos indicará que el estado de carga ha finalizado siendo el nivel de batería el máximo que se puede alcanzar.



Figura 61. Dispositivo en funcionamiento.



Figura 62. Dispositivo carga completa



Figura 63. Dispositivo batería baja

Proyectos anteriores indican que la batería de nuestro dispositivo tarda 11 horas en cargar al 100%, con las cuales se alcanza una duración de uso de 9 horas.

2. Colocación de los electrodos en la posición correcta de la malla.

Una vez comprobado que tenemos batería suficiente para realizar los experimentos debemos realojar cada electrodo, que se encuentra numerado y etiquetado, en su posición indicada en la malla que será colocada en la cabeza de cada usuario. Para ello se introducen uno a uno los electrodos con la distribución elegida asegurándonos de que la posición sea la correcta. Una vez completemos este paso procederemos a colocar la malla en la cabeza de la persona que vaya a realizar el experimento.



Figura 64. Correcta colocación de la malla sobre la cabeza.

3. Establecer el conexionado de los electrodos.

Para poder realizar el experimento es necesario que todos los electrodos sean capaces de registrar los impulsos eléctricos producidos por cada pensamiento. Para realizar este registro de forma correcta nos debemos asegurar de que la conexión entre cabeza/electrodo es la óptima. Para ello haremos uso de dos elementos, el primero es el SDK antiguo de Emotiv denominado Control Panel con el que trabajamos en este proyecto, y el segundo es la aplicación del gel de mejora conductiva a través de la jeringuilla en cada uno de los electrodos. Gracias a estos elementos comprobaremos y nos aseguraremos de que la conexión se establece correctamente.

Para conocer el funcionamiento del primero de los elementos, el Control Panel, vamos a describir sus funcionalidades brevemente. La apariencia de este desarrollador la podemos ver representada en la siguiente serie de figuras que nos muestran sus funcionalidades más características.

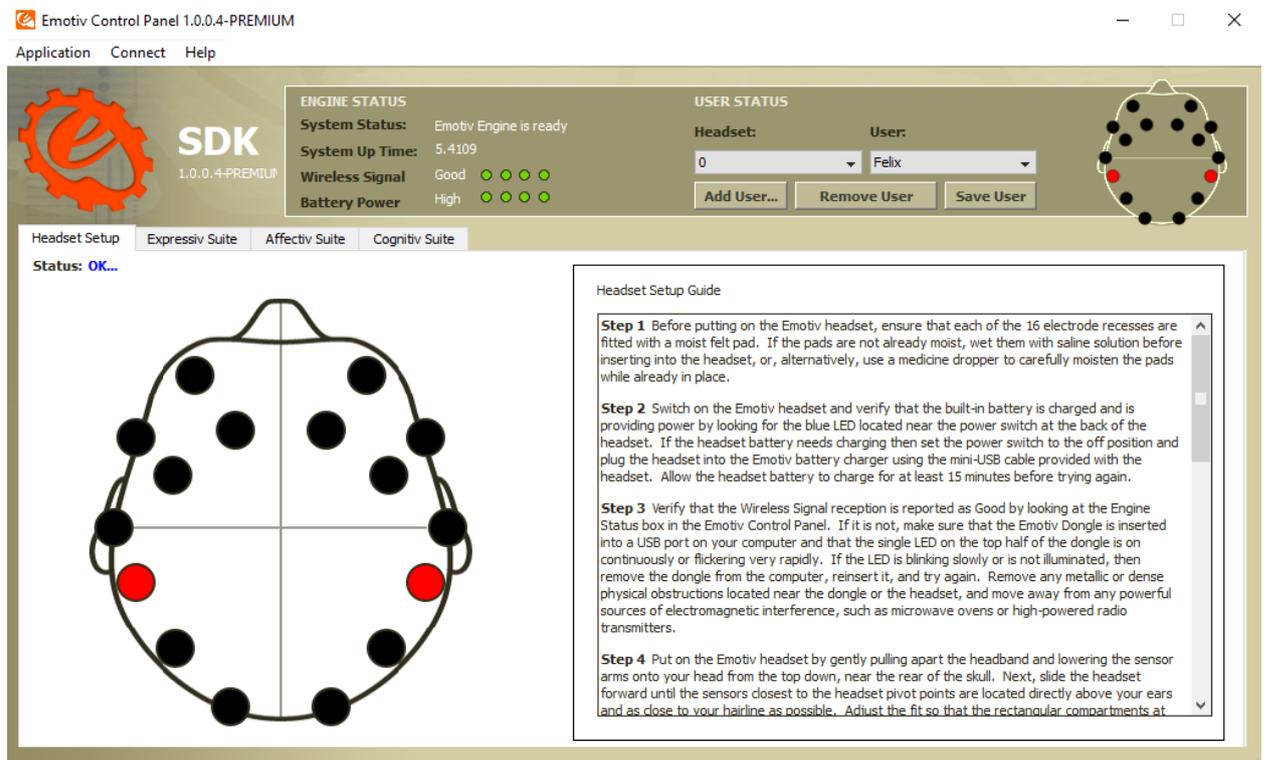


Figura 65. Pestaña Headset Setup Control Panel

En primer lugar, y como principal característica, este SDK nos permite a través su primera pestaña chequear el estado de conexión de cada electrodo. En esta pestaña, denominada Headset Setup, podemos visualizar el tipo de conexión que tenemos en cada electrodo, debiendo asegurarnos de que la conexión una vez aplicado el gel conductivo sea la mejor posible. Para ello nos ofrecen una guía de colores indicativos del tipo de conexión establecida:

- Black** No signal
- Red** Very poor signal
- Orange** Poor signal
- Yellow** Fair signal
- Green** Good signal

Figura 66. Tipos de calidad de conexión

Cuando se establezca la conexión trataremos de conectar todos los electrodos de forma óptima consiguiendo así la mejor calidad de señal posible, señal que nos será indicada con el color verde. Este proceso de conexión es llevado a cabo mediante la aplicación del gel conductor en los electrodos uno a uno. La apariencia que debe tener el Control Panel antes de comenzar el experimento es la siguiente:

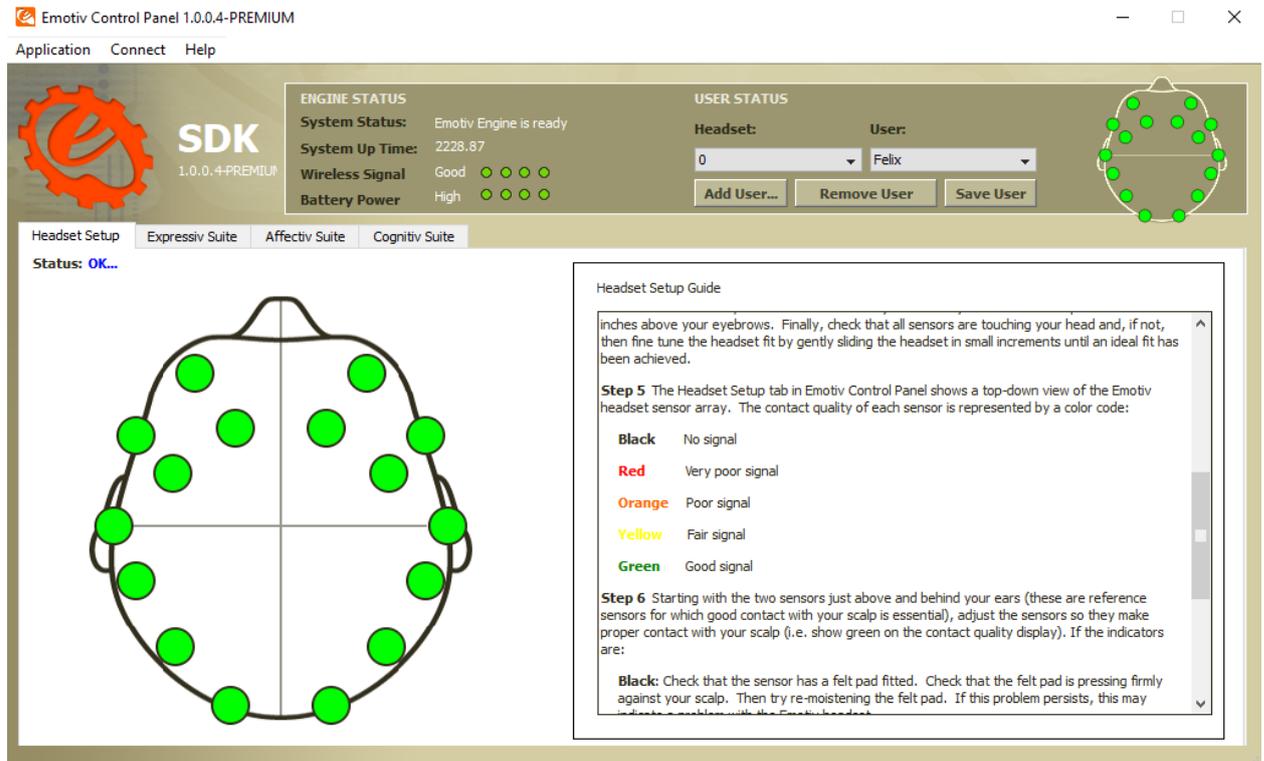


Figura 67. Conexión establecida

Antes de continuar con el siguiente paso una vez se ha conseguido la conexión buscada vamos a explicar un poco más las diferentes funcionalidades de este desarrollador de señales EEG de Emotiv [2], ya que ésta no es la única aplicación posible. Además de la función para la que emplearemos el Control Panel también podemos obtener mucha más información a partir de él. Por ejemplo podemos conocer de otra forma el estado de carga del dispositivo y la conexión de la señal inalámbrica simplemente mirando en la parte superior del panel.

Si nos desplazamos a través de las 4 pestañas que nos ofrece el Control Panel, en cada una de ellas podemos ver una posible aplicación distinta. Por ejemplo en la segunda pestaña “Expressive Suite” nos encontramos una aplicación que nos permite interactuar con un rostro digital que registra nuestras expresiones y las imita y muestra en pantalla.

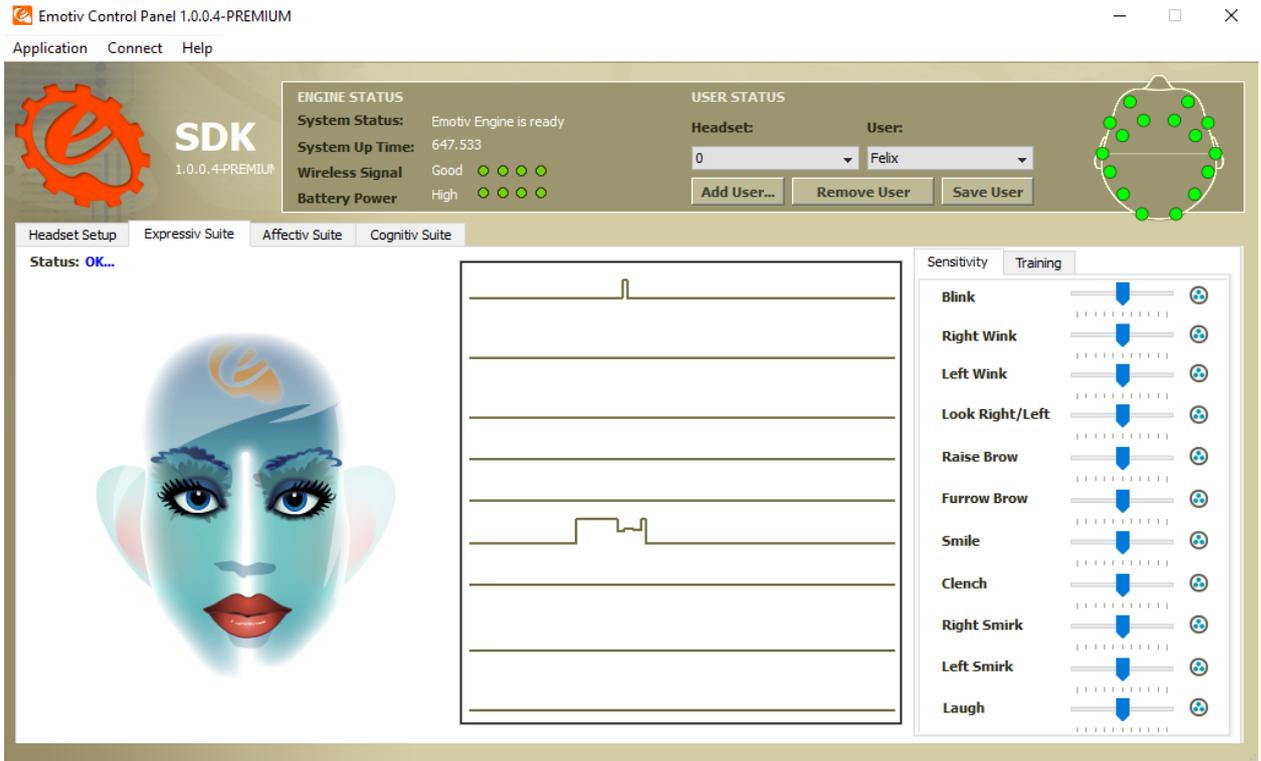


Figura 68. Pestaña Expressive Suite Control Panel

La siguiente pestaña nos muestra los diferentes estados emocionales que se están produciendo en la persona que lleva puesto el dispositivo Emoc. A través de señales de distintos colores podemos ver reflejado nuestro estado de relajación, frustración, excitación, etc.

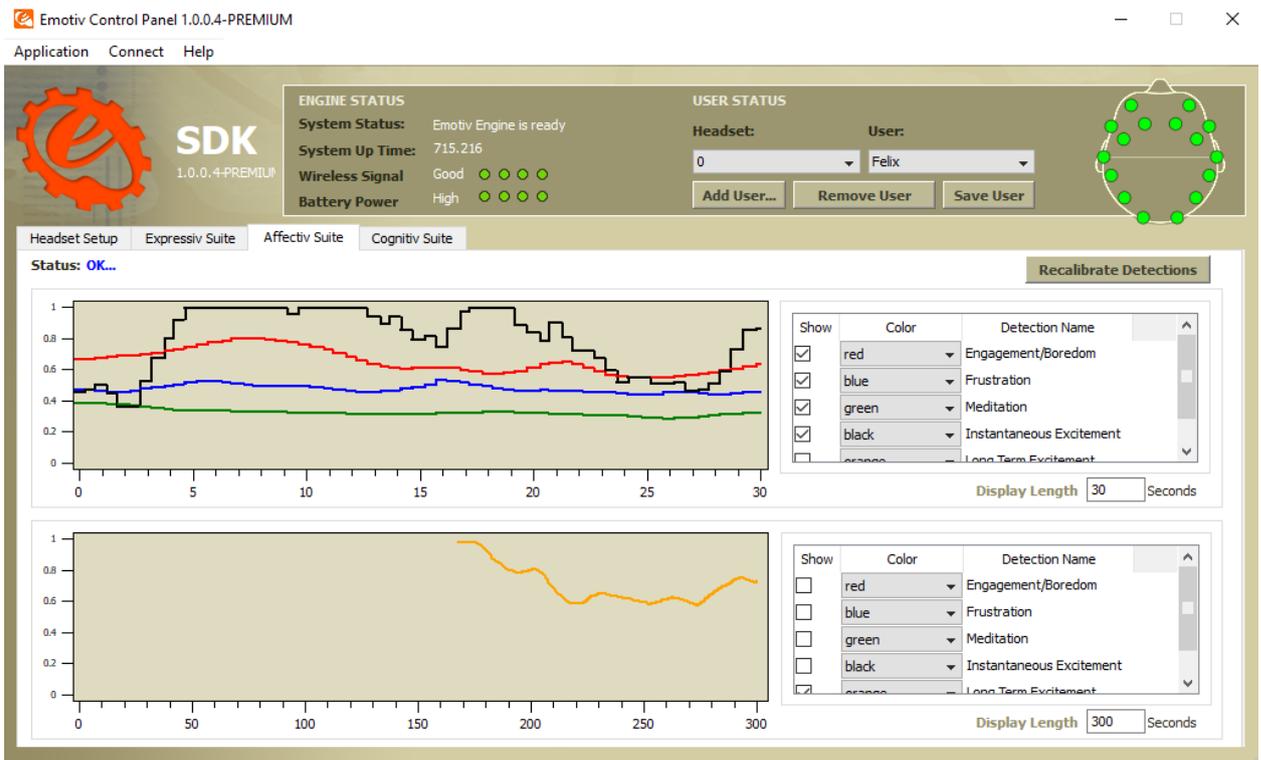


Figura 69. Pestaña Affectiv Suite Control Panel

Y por último la cuarta pestaña nos ofrece la posibilidad de interactuar con un cubo digital que se encuentra flotando en mitad de la pantalla. Esta opción es realmente interesante ya que nos permite recopilar información a través de minisiciones de corta duración denominadas entrenamientos y enlazarlas a una acción en concreto que realizar sobre el cubo. Una vez se ha obtenido suficiente base de información se puede ir al modo “Acción” y tratar de mover el cubo con la mente a través de la repetición de los pensamientos entrenados. Estas acciones a realizar por el cubo pueden ser por ejemplo moverlo a la izquierda, a la derecha, empujarlo, subirlo, bajarlo, etc.

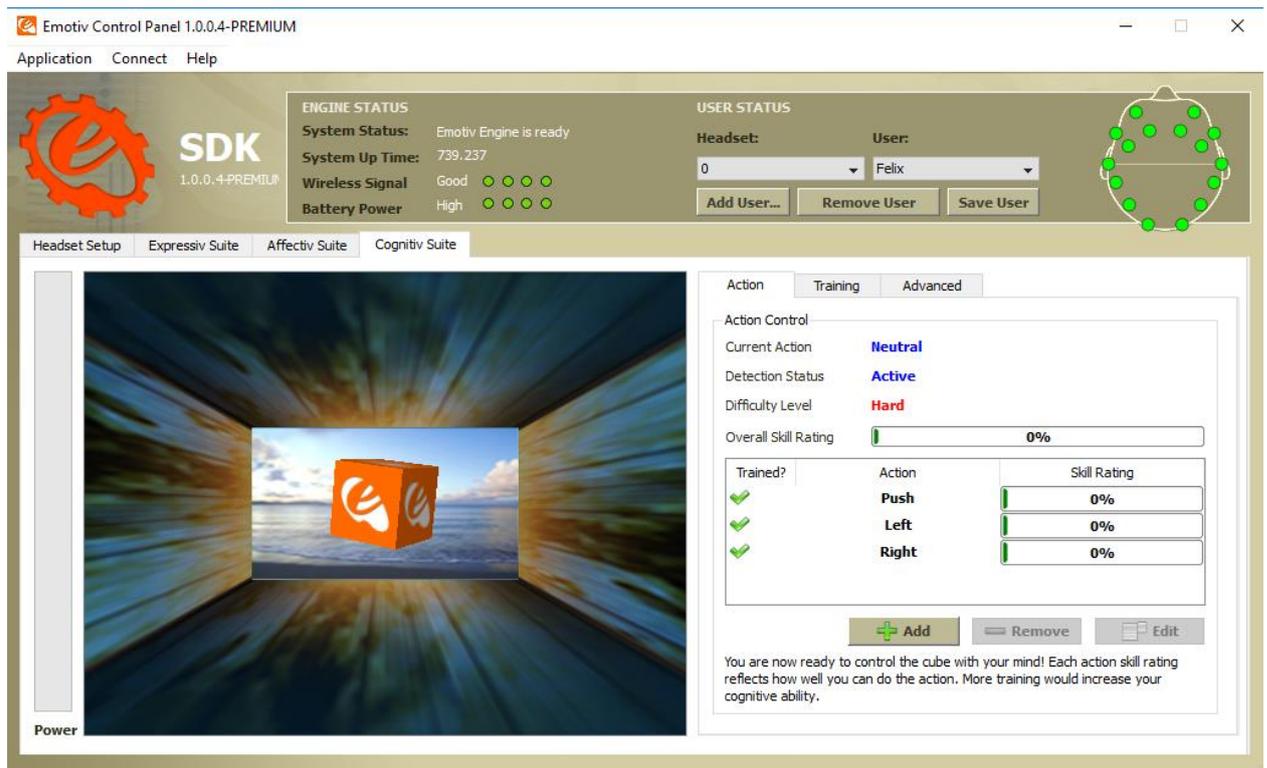


Figura 70. Pestaña Cognitiv Suite Control Panel

Una vez visto por encima las distintas aplicaciones que podemos manejar con el Control Panel de Emotiv y habiendo explicado el funcionamiento que le damos en este experimento a dicho desarrollador, a través del cual nos aseguramos del buen conexionado de los electrodos, vamos a pasar al siguiente punto a realizar.

3.4. Realización del experimento

Una vez hemos completado las etapas anteriores podemos dar comienzo al experimento. Para ello, tal y como se comentó en la introducción, el sujeto que vaya a realizar las 4 sesiones debe situarse sentado con las piernas descruzadas y con cada mano descansando en su respectiva pierna, la espalda debe apoyarse en el respaldo teniendo así una posición cómoda y relajada. Esta posición y todos los pasos realizados a partir de ahora serán los mismos para todos y cada uno de los sujetos, de forma que podamos obtener unos resultados habiendo realizado el proceso en las mismas condiciones para todos los individuos.



Figura 71. Posición correcta para realizar el experimento.

Estando ya sentado, se ubicará en frente del ordenador con el script de Matlab “eeglogger_statusesBCIForms” inicializado y preparado para ser usado en pantalla. Este archivo será ejecutado y lo que hará ser mostrar 3 imágenes distintas de forma individual y aleatoria en intervalos de 15 segundos que harán relación a la acción que el individuo debe realizar.



Figura 72. Acción mano izquierda

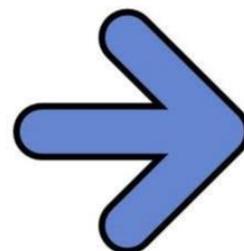


Figura 73. Acción mano derecha



Figura 74. Letra de experimento

Recordamos que las acciones a realizar durante el experimento son:

- Pensar en mover la mano derecha
- Pensar en mover la mano izquierda
- Pensar en palabras con la misma inicial.

Una vez concluida cada sesión, cuya duración es de 4 minutos, será mostrado por pantalla un mensaje que nos avise de que el registro de datos ha terminado. Este mensaje tendrá la siguiente apariencia:



Gracias por su colaboración

Figura 75. Fin de sesión

A partir de ese momento el usuario descansará un periodo de tiempo de 5 minutos. Tras este descanso se volverán a repetir los pasos descritos en este punto para llevar a cabo cada una de las sesiones restantes. Antes de repetir una sesión debemos asegurarnos de cambiar el nombre del fichero que se crea cada vez que una sesión es completada con éxito para así no sobrescribir los datos de una sesión a otra.

Al terminar la 4 sesiones correspondiente deberemos tener 4 archivos tipo bloc de notas, una vez nos aseguremos de que todo ha concluido de forma correcta podremos dar por terminado el experimento.

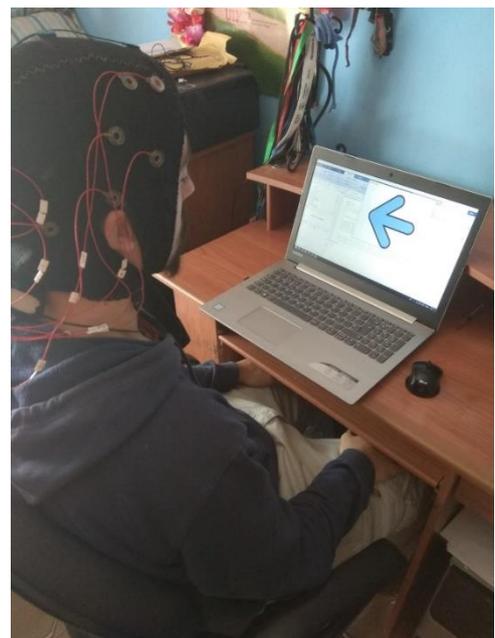


Figura 76. Usuario realizando experimento

3.5. Formulario

Cuando finalice un experimento completamente cada usuario deberá rellenar un formulario en el que se reflejan las opiniones personales a ciertas preguntas relacionadas con la comodidad y complejidad del experimento, así como se deberá rellenar información personal.

La creación de este formulario fue un objetivo secundario que el director de este proyecto me sugirió. Con su creación lo que buscamos es poder categorizar los resultados, estudiarlos y con ello obtener unas conclusiones sobre el porcentaje de acierto obtenido que relacionen diferentes factores tales como el sexo de la persona, la edad o si conocía algo referente al mundo de las señales EEG antes de la realización del experimento.

Además se pretende encontrar qué factores han sido positivos durante la realización del experimento y cuales no en cuanto a la opinión de cada usuario para así poder fomentar las virtudes del experimento y mejorar los puntos flojos.

Por último existe una parte meramente informativa compuesta por una serie de preguntas que nos aporten información genérica que pueda ser añadida a esta memoria final.

El formulario tuvo sus etapas de proceso correspondiente a través de las que se fueron estableciendo objetivos para finalmente limar los pequeños detalles y conseguir así un documento completo y conciso, que resulte sencillo de rellenar y sea perfectamente entendible por el lector.

Desarrollé 4 versiones que, a través de los comentarios y recomendaciones de Jose, Julio y Juan Antonio, convergieron en una versión final que recoge toda la información e ideas que pretendíamos conseguir y que acabo de exponer.

La versión final que ha sido empleada en este experimento se puede ver a continuación:



Formulario Experimento con Emoc

Bloque 1. Información Personal

Nombre y Apellidos:

Sexo:

Fecha de nacimiento:

Zurdo o diestro:

¿Tiene algún conocimiento previo del mundo de las EEG?: Sí No

Bloque 2. Comodidad Emoc

¿Le ha parecido cómodo el procedimiento de colocación del dispositivo BCI?

1. Muy incómodo 2. Incómodo 3. Normal 4. Cómodo 5. Muy cómodo

¿Le ha resultado molesto realizar los experimentos con el casco puesto?

1. Muy molesto 2. Molesto 3. Normal 4. Cómodo 5. Muy cómodo

¿Se ha sentido a gusto y relajado en la posición en la que ha realizado el experimento?

1. Muy incómodo 2. Incómodo 3. Normal 4. Relajado 5. Muy Relajado

Bloque 3. Dificultad de los experimentos

¿Le ha parecido difícil realizar los experimentos?

1. Muy fácil 2. Fácil 3. Normal 4. Difícil 5. Muy difícil

¿Le ha generado cansancio la realización del experimento?

1. Ninguno 2. Muy poco 3. Un poco 4. Bastante 5. Excesivo

¿El tiempo de descanso entre cada sesión ha sido el correcto?

1. Demasiado corto 2. Corto 3. Adecuado 4. Largo 5. Demasiado largo

¿Considera que la realización del experimento ha sido satisfactoria en líneas generales?

1. Para nada 2. Un poco 3. Normal 4. Bastante 5. Completamente

¿En cuál de los tres experimentos le ha resultado más difícil concentrarse?

Mano derecha Mano izquierda Palabra

Para finalizar nos gustaría saber globalmente que le ha parecido la realización del experimento y qué aspectos podríamos mejorar de cara al futuro:

.....
.....

Figura 77. Formulario experimento Emoc

4. Tratamiento de datos

El código informático que ha hecho posible el registro de datos, su preprocesado y finalmente su procesado ha sido modificado por el Dr. Juan Antonio Martínez León, quién ha conseguido facilitar el estudio de los experimentos mediante un código escrito en Matlab que reduce a valores situados entre un 3% y un 5% las variables necesarias iniciales. Toda esta información puede verse recogida en su tesis doctoral [15].

4.1. Registro de datos

A continuación vamos a explicar a grandes rasgos cómo este código trabaja de forma que pueda ser entendido el proceso que los datos, que obtenemos a través de los electrodos, siguen desde su registro hasta su transformación en valores que puedan ser comparados para su estudio. Juan al comienzo del proyecto nos facilitó una carpeta en la se encontraban los ficheros Matlab que deben ser ejecutados para realizar cada sesión de experimentos. El contenido de esta carpeta lo podemos ver ilustrado en la siguiente figura:

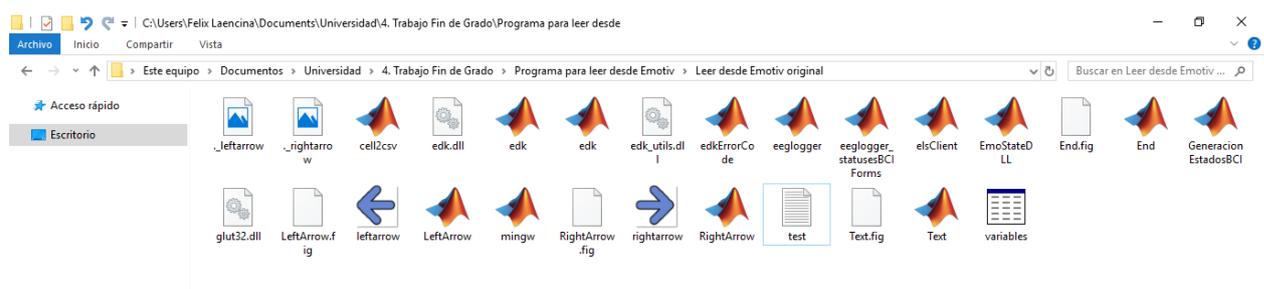


Figura 78. Carpeta para la realización de los experimentos.

En dicha carpeta podemos ver los diferentes archivos que serán empleados para hacer funcionar cada una de las partes del código. Podemos ver así las imágenes que serán mostradas en cada experimento, por ejemplo las acciones de mover mano izquierda y mano derecha serán representadas con las siguiente fechas:

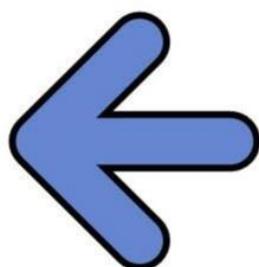


Figura 79. Mover la mano izquierda

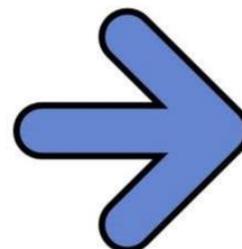


Figura 80. Mover la mano derecha

La tercera acción será compilada a través del fichero “Text” que podemos encontrar entre los ficheros de la carpeta anterior. Y cuya representación en pantalla tiene será del siguiente tipo:

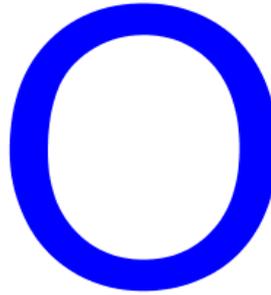


Figura 81. Letra de experimento

Pero sin lugar a dudas hay un fichero que contiene la información que hará que todo el programa realice su función principal, la cual es realizar el experimento de forma completa. Para ello debemos ejecutar el fichero Matlab denominado "eeglogger_statusesBCIForms". Este fichero cargará el código encargado de registrar la información que los electrodos capten de cada usuario, compilará cada una de las líneas hasta que el código termine de ejecutarse y finalice así el experimento con la creación de cada uno de los 4 archivos de texto que contienen los valores de la variables recogidas y descodificadas por el código.

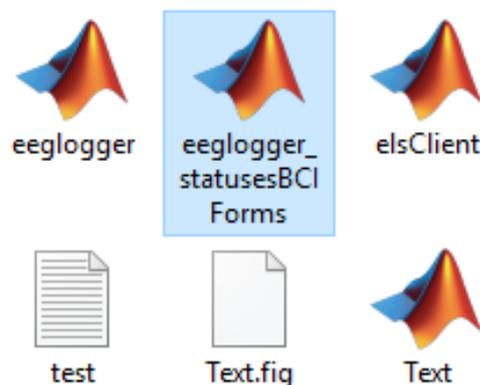


Figura 82. Archivo eelogger_statusesBCIForms

Al ejecutar este archivo tendremos acceso al código Matlab que realizará la captura de datos. Este código tiene una primera parte cuya función es la de cargar todos los ficheros y activar las librerías que son llamadas, así como cargar las imágenes que serán mostradas al usuario durante la realización de cada sesión, y una segunda parte que serán los bucles que ejecutarán las funciones encargadas de hacer correr cada línea del programa. Este código lo podemos explicar a grandes rasgos identificando las instrucciones y bucles más importantes que contiene. En primer lugar tras haber sido cargadas todas y cada una de las librerías debemos introducir las características con las que queremos que el código se ejecute, estos valores son los que definirán parte de la precisión, calidad y duración de cada experimento, por ello es una de las partes más importantes del código, la cual podremos modificar para realizar el experimento como creamos conveniente.

```
%optargin = size(varargin,2);
rectime = 1;
acqtime = 250; %Experiment time
lib_flag_popup = 1;
plot_popup = 1;

%(JML)
sampFreq = 128;
status_time = 15; % Time per status in seconds
total_samples = 240*sampFreq; % rectime is in minutes
status_samples = status_time*sampFreq;% status_time is in seconds
samples_taken = 0; % samples_taken is the number of samples stored from the headset
counter_status = 0;

status set matrix = [3 5 7 5 3 5 7 7 3 5 3 3 7 5 7 3; 3 7 3 5 7 5 5 3 7 5 5 7 3 7 3 5; 7 3 5 3 7 3 7 7 5 7 3 5 5 3 7 5;
experiment_number = 1;

status last = 0;
skipped characters = 'KXWYZUQ'; % Invalid characters
```

Figura 83. Pantalla de configuración script “eeglogger_statusesBCIForms”.

En la figura anterior podemos observar parte de la pantalla de configuración en la que se encuentran las líneas de código que nos permitirán modificar los valores ciertos valores. Entre los existentes vamos a hacer mención de algunos para ver el funcionamiento de esta parte del código del programa.

Podemos observar dentro del recuadro negro la variable *acqtime* cuyo valor es de 250 segundos, esta variable nos indicará el tiempo en el que un experimento completo será llevado a cabo, por lo que según este valor cada sesión tendrá una duración de 4.167 minutos, que sería la equivalencia de esos 250 segundos, aunque debemos aclarar que de esos 250 segundos, 10 serán para la preparación de la sesión y los otros 240 serán el tiempo que cada individuo estará realizando las acciones, es decir 4 minutos. En esos 240 segundos serán mostradas 16 veces las imágenes que indique qué acción debe realizar cada usuario, durante 15 segundos cada una que corresponderá al tiempo que cada imagen permanece en pantalla.

En segundo lugar podemos encontrarnos resaltado la variable *sampFreq* cuyo valor numérico es 128. Esta variable nos está indicando la frecuencia de muestreo del experimento por lo que indica el número de hercios con los que se llevarán a cabo cada una de la sesiones. Dicho número ha sido establecido por Emotiv.

La variable *Status_time* hace referencia al tiempo que tomará cada una de las tres acciones que el usuario debe realizar durante cada experimento. Está dada en segundos por lo que nos está indicando cada cuanto tiempo la imagen que nos muestre el código cambiará, en nuestro caso ha sido establecida para ir alternando cada 15 segundos.

La cuarta variable que queremos destacar es el número de experimento, que en el código de Matlab viene recogido por el nombre *experiment_number*. Esta variable nos indicará el número del experimento con el que será guardado el archivo al final de cada sesión. Es decir que cada vez que una sesión haya finalizado con éxito los resultados serán guardados en un archivo y el nombre de cada uno de ellos estará numerado. Este valor puede cambiarse mediante este comando o ya una vez se haya creado el archivo cambiando directamente el nombre. Al final de las cuatro sesiones nos encontraremos con 4 archivos denominados con la palabra “Exp”, abreviatura de experimento, seguido del número de cada una de las sesiones, por lo que al finalizar la prueba en un usuario deberíamos encontrar la carpeta que se ha mostrado antes en la figura, ya que la dirección establecida para guardar estos ficheros, los 4 archivos con los nombres “Exp1, Exp2, Exp3 y Exp4”.

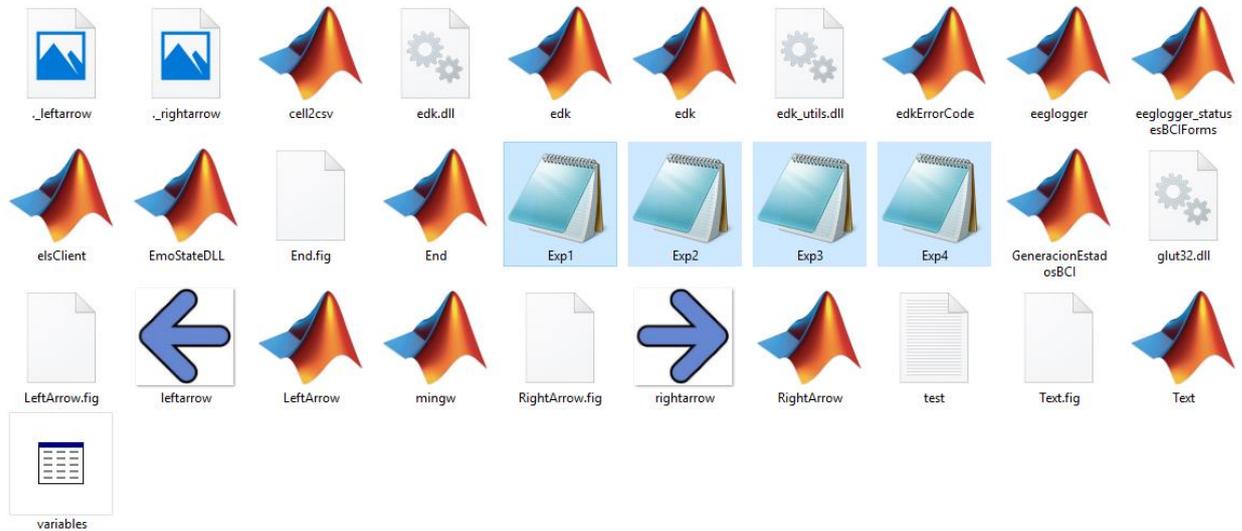


Figura 84. Carpeta con los archivos de los experimentos

Cabe comentar que esta parte es la única en la que deberemos hacer un cambio entre sesión y sesión ya que nos debemos asegurar que el número de experimento es cambiado antes de realizar la siguiente sesión ya que de lo contrario si realizamos una nueva sesión sin haber cambiado el número en el código Matlab o directamente en el archivo que ha sido creado lo que se producirá es que los resultados del nuevo experimento serán sobrescritos a los anteriores provocando así que el fichero anterior sea modificado por el nuevo, guardando dentro los valores de ambas sesiones y aumentando el tamaño del archivo de 3Kb a 6 Kb, lo que por consiguiente dará problemas en la etapa de preprocesado ya que el número de valores que residen en el fichero sería superior al establecido en el código de programación para su correcto funcionamiento.

Repetimos que este paso es único en el que debemos modificar algo durante la realización del experimento y es muy importante que se haga para que el resultado final de las 4 sesiones sea el correcto y esperado.

Por último, de esta primera parte del código vamos a comentar la última variable destacada, *skipped_caracteres*, que representa a las letras del abecedario que no serán mostradas durante el experimento a los usuarios en lo que a realizar la acción de pensar palabras que comiencen por dicha inicial se refiere. Estas letras serán las siguientes: 'KXWYZUQ'

El siguiente bloque del código Matlab que desarrollaremos, para que resulte más sencillo el entendimiento de la obtención de cada uno de los archivos que contienen los valores obtenidos a través de los electrodos, será el bucle principal *while*. Este bucle será el encargado de registrar cada una de las muestras del experimento y para ello en primer lugar necesita mostrar cada una de las 3 imágenes que serán las encargadas de transmitir al usuario qué acción debe pensar. Como ya se ha comentado estas imágenes serán una flecha que indique la dirección izquierda, otra la derecha y una tercera imagen que muestre una letra. Estas 3 imágenes serán mostradas de forma aleatoria e irán variando cada 15 segundos, para ello se hace uso de los comandos *if* y *else* de la siguiente forma:



```
while(samples_taken < total_samples)

    % Change status code to do the experiment
    if samples_taken >= counter_status*status_samples
        clc;
        status = status_set_matrix(experiment_number,counter_status+1);

        if (status == 3)
            disp(strcat(num2str(counter_status),'-Left'));
            if status ~= status_last
                if status_last == 7
                    delete(Text);
                else
                    delete(RightArrow);
                end
                LeftArrow;
            end
            status_last = 3;
        else
            if (status == 7)
                disp(strcat(num2str(counter_status),'-Neutral'));

                if status ~= status_last
                    if status_last == 3
                        delete(LeftArrow);
                    end
                end
            end
        end
    end
end
```

Figura 85. Bucle While

Como se ha comentado en primer lugar dentro del bucle *while* se decide qué imagen debe ser mostrada durante la realización del experimento. Una vez es mostrada se produce una llamada a la librería.

```
state = calllib('edk', 'EE_EngineGetNextEvent', eEvent); % state = 0 if everything's OK
eventType = calllib('edk', 'EE_EmoEngineEventGetType', eEvent);
%disp(eventType);
userID=libpointer('uint32Ptr',0);
calllib('edk', 'EE_EmoEngineEventGetUserId', eEvent, userID);

if strcmp(eventType, 'EE_UserAdded') == true
    User_added = 1;
    userID_value = get(userID, 'value');
    calllib('edk', 'EE_DataAcquisitionEnable', userID_value, true);
    readytocollect = true;
end

if (readytocollect)

    calllib('edk', 'EE_DataUpdateHandle', 0, hData);
    nSamples = libpointer('uint32Ptr',0);
    calllib('edk', 'EE_DataGetNumberOfSample', hData, nSamples);
    nSamplesTaken = get(nSamples, 'value') ;
    % (JML) -- Updates the number of samples since the beginning of the
    % experiment
    samples_taken = samples_taken + nSamplesTaken;
    if (nSamplesTaken ~= 0)
        data = libpointer('doublePtr', zeros(1, nSamplesTaken));
        %
        for sampleIdx=1:nSamplesTaken
            %
            for i = 1:length(fieldnames(enuminfo.EE_DataChannels_enum))
                calllib('edk', 'EE_DataGet', hData, DataChannels.([DataChannelsNames{i}]))
                data_value = get(data, 'value');
                %
                output_matrix(cnt+1,i) = data_value(sampleIdx);
                output_matrix(cnt+1:cnt+length(data_value),i) = data_value;
            end
            % (JML) - New column on output matrix for status
            output_matrix(cnt+1:cnt+length(data_value),i+1) = status;
            nS(cnt+1) = nSamplesTaken;
            %
            cnt = cnt + 1;
            cnt = cnt + length(data_value);
            %output_matrix(
        end
    end
end
end
%
pause(0.5); % haven't played with this much...
end
% extract sampling rate (should be 128)
sampRateOutPtr = libpointer('uint32Ptr',0);
calllib('edk', 'EE_DataGetSamplingRate', 0, sampRateOutPtr);
sampFreqOut = get(sampRateOutPtr, 'value'); % in Hz

calllib('edk', 'EE_DataFree', hData);
```

Figura 86. Bucle for

La librería llamada mediante la función *calllib* es la denominada “*edk*” y dentro de esta librería se invoca a la función “*EE_DataGet*” que usa una estructura de datos denominada “*data*”. Dentro de este bucle *for* en el que nos encontramos lo que el código realiza es la asignación de valor recogido ‘*value*’ el cual asignamos a una variable denominada *data_value* que guardará dicho

valor para ser finalmente volcado en una matriz de datos denominada `output_matrix` en cuyo interior se encontrará cada uno de los valores registrados durante el experimento.

```
% Saving samples
clc
disp('Finishing your session - creating output file');

DataChannelsNamesExported = {'STATUS','ED_AF3','ED_F7','ED_F3','ED_FC5'}
matrix_export = output_matrix(1:end_time,[26 4:17 21]);
```

Figura 87. Matriz de datos

Cuando todos los valores de cada electrodo han sido escritos en la matriz podremos considerar que tenemos una muestra completamente registrada en esa matriz, dicha muestra ha de repetirse el número de veces que se le haya asignado la variable `sampFreq` la cual, como ya se ha explicado anteriormente, establece la frecuencia de muestreo del experimento, que en nuestro caso ha sido de 128Hz.

Una vez terminados ambos bucles será necesario volcar todos los datos que se encuentran en el interior de la matriz denominada `output_matrix` a otra estructura, en este caso el fichero final que será el que obtendremos una vez se haya completado cada sesión y será el que nos aparecerá en la carpeta principal en la que se encuentran todos los necesarios para llevar a cabo el registro de datos completo.

```
fname = strcat(strcat('Exp',num2str(experiment_number)),'.csv');
cell2csv(fname,DataChannelsNamesExported,',');
dlmwrite(fname, matrix_export,'-append');

pause(5);
delete(End);
```

Figura 88. Líneas de código para exportar resultados a csv

El fichero en el que se almacenen los valores obtenidos del experimento indicará en primer lugar el nombre de los canales de cada electrodo empleados en dicho experimento y a continuación todos y cada uno de los valores registrados en su sesión correspondiente.

A continuación mostramos la forma que tendrán los datos almacenados en cada uno de los ficheros denominados "Exp(Número de experimento)":



```

Exp1: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
STATUS,ED_AF3,ED_F7,ED_F3,ED_FCS,ED_T7,ED_P7,ED_O1,ED_O2,ED_P8,ED_T8,ED_FC6,ED_F4,ED_F8,ED_AF4,ED_ES_TIMESTAMP3,4501,4055.9,4532.8,4289.2,4264.6,4668.2,4501,4585.6,3651.9,985.6,4707.2,4298.5,4105.1,12.0183,4490.3,4031.8,4528.2,4273.3,4246.2,4656.9,4477.9,4569.2,3640,4109.7,3988.7,4710.3,4304.1,4112.3,12.0183,4489.7,4035.4,4531.3,4277.4,4565.6,3628.2,4117.4,3983.1,4697.4,4303.6,4102.6,12.0183,4492.3,4054.9,4526.2,4282.1,4262.6,4656.4,4476.4,4572.3,3631.8,4125.6,3989.2,4701,4307.2,4107.2,12.0183,4491.8,5,4256.9,4655.4,4490.3,4566.2,3634.9,4114.9,3979.5,4698.5,4308.2,4112.3,12.0183,4493.3,4053.8,4519.5,4277.9,4259.5,4663.6,4495.4,4572.3,3643.1,4124.1,3979.5,4699,4313,4491.8,4055.9,4525.6,4278.5,4260,4654.4,4487.7,4564.1,3628.7,4117.4,3982.6,4701,4311.3,4111.8,12.5193,4489.7,4059,4525.1,4282.1,4271.3,4665.1,4493.8,4568.2,3636.9,4127.95,4,4108.2,12.5193,4487.7,4047.2,4523.6,4277.9,4267.7,4665.6,4484.6,4565.6,3634.4,4114.4,3972.8,4693.3,4294.9,4101.5,12.5193,4487.7,4047.2,4527.7,4282.1,4267.7,4670.8,113.8,3974.9,4693.3,4296.9,4102.6,12.5193,4483.6,4037.4,4516.9,4269.7,4255.9,4654.4,4482.1,4569.2,3640,4119,3969.7,4690.3,4300.5,4104.6,12.5193,4486.7,4037.4,4519,4272.4257.9,4652.3,4492.3,4564.6,3645.1,4116.4,3967.7,4689.2,4288.2,4094.4,12.5193,4484.6,4039.5,4518.5,4270.3,4251.3,4653.3,4495.9,4566.7,3637.9,4113.3,3965.6,4683.6,4284.1,2.5193,4488.2,4039.5,4520.5,4267.2,4242.6,4638.5,4466.7,4551.8,3627.7,4119.5,3971.3,4695.9,4289.7,4102.1,12.5193,4487.7,4041.5,4523.1,4267.7,4240.5,4643.1,4476.4,4557.9,7.7,4687.7,4288.2,4100,12.5193,4487.2,4049.7,4519,4273.8,4251.3,4654.4,4467.7,4559.5,3636.4,4121,3973.8,4695.4,4293.3,4100,12.5193,4493.3,4050.8,4526.7,4276.9,4251.8,46563.6,3647.7,4136.4,3981,4702.1,4301,4115.9,12.5193,4487.2,4059.5,4521.5,4272.3,4248.2,4647.7,4475.4,4564.6,3647.2,4132.3,3981,4699,4299.5,4115.4,12.5193,4490.3,4060,4664.6,4494.4,4582.6,3655.4,4134.4,3989.7,4711.8,4308.2,4125.6,13.0193,4504.1,4069.7,4530.3,4279.5,4261,4666.7,4490.3,4580,3664.1,4132.3,3992.3,4713.3,4310.8,4130.3,13.4079.5,4531.8,4285.1,4268.7,4660.5,4481,4575.4,3656.4,4148.2,3999.5,4719.5,4317.4,4134.9,13.0193,4499.5,4072.3,4530.8,4277.9,4261.5,4652.3,4477.9,4569.2,3657.4,4141,3994129.7,13.0193,4499.5,4061.5,4528.2,4280,4252.8,4648.7,4475.4,4560.5,3643.6,4127.2,3982.6,4710.3,4302.6,4129.7,13.0193,4499,4067.2,4528.2,4283.1,4255.4,4657.9,4485.1,450.8,4130.3,3986.7,4709.2,4302.6,4132.3,13.0193,4521,4079.5,4536.9,4283.1,4255.4,4656.4,4480,4564.6,3644.6,4125.1,3983.1,4711.8,4300,4139.5,13.0193,4527.7,4082.1,4542.6,621,4438.5,4523.6,3602.6,4099,3966.2,4710.8,4299,4177.9,13.0193,4538.2,4105.6,4551.8,4275.9,4206.7,4623.1,4439,4524.1,3595.9,4095.4,3968.2,4714.4,4299,4184.1,13.0193,4514,4564.6,4288.2,4212.8,4621,4425.1,4514.4,3593.3,4081,3963.6,4712.8,4281,4191.8,13.0193,4553.3,4117.9,4563.6,4286.2,4209.2,4620.5,4426.7,4515.9,3596.4,4079.5,3963.6,47193,4538.5,4105.6,4557.4,4284.6,4217.9,4613.3,4418.5,4517.4,3587.7,4090.3,3962.6,4267.2,4162.1,13.5193,4545.6,4109.7,4561.5,4286.2,4223.1,4608.2,4419,4515.4,3595.1,4702.6,4258.5,4150.3,13.5193,4531.8,4089.2,4548.7,4284.6,4232.3,4626.2,4430.3,4527.7,3602.6,4095.9,3964.1,4702.1,4258.5,4150.8,13.5193,4529.7,4089.7,4551.3,4284.6,4224,4552.8,3616.4,4184.1,3964.6,4701,4263.6,4149.7,13.5193,4533.8,4062.6,4547.7,4284.1,4236.4,4635.9,4464.6,4554.4,3616.9,4097.4,3965.1,4702.1,4265.6,4153.8,13.5193,4534,553.8,4292.3,4250.3,4642.1,4465.1,4560,3646.7,4125.6,3984.6,4711.8,4293.3,4161.5,13.5193,4533.8,4093.3,4555.9,4291.8,4253.8,4646.2,4466.7,4570.8,3657.4,4130.3,3980,47113,4527.7,4082.1,4549.7,4289.2,4249.7,4652.8,4484.1,4583.1,3671.3,4123.1,3979.5,4711.3,4279.5,4150.8,13.773,4525.6,4075.9,4547.2,4285.1,4253.3,4652.3,4481.5,4577.9,3669,13.8953,4521,4078.5,4553.3,4289.7,4260.5,4660.5,4494.4,4588.7,3662.1,4119.5,3972.3,4705.1,4260,4135.9,13.8953,4516.9,4063.1,4549.2,4285.1,4252.8,4640.5,4456.9,4571.3,3967.7,4700.5,4256.4,4124.6,13.8953,4517.4,4058.5,4547.7,4283.1,4243.6,4644.6,4473.3,4574.4,3660,4127.2,3971.3,4703.1,4259,4130.3,13.8953,4515.4,4051.3,4547.7,4281.5,424.6,4586.2,3674.4,4128.2,3982.1,4709.2,4268.7,4121.14,023,4512.8,4056.4,4548.7,4290.3,4257.4,4669.2,4501,4584.6,3674.9,4128.7,3979.5,4711.8,4268.7,4126.7,14.023,4511.8,4.5,4650.8,4481,4589.2,3690.8,4141,3984.6,4708.2,4273.3,4121.14,023,4505.1,4060,4542.1,4284.6,4260.5,4663.1,4496.4,4590.8,3691.3,4137.4,3980,4701.5,4267.2,4117.9,14.1453,4536.4,4281.5,4253.3,4663.6,4508.2,4593.8,3670.3,4130.3,3981,4705.6,4275.4,4117.9,14.1453,4495.4,4045.6,4535.9,4283.1,4251.8,4665.6,4498.5,4593.8,3675.9,4135.9,3980.5,5,14.273,4504.1,4058.5,4534.4,4289.7,4262.1,4667.2,4503.1,4593.8,3669.2,4129.2,3981.5,4709.2,4274.9,4116.9,14.273,4509.7,4056.9,4539.5,4289.7,4257.9,4669.7,4509.7,4599,4271.8,4114.9,14.273,4512.8,4041.5,4541.5,4286.2,4248.2,4656.9,4480,4575.4,3664.6,4120,3973.3,4703.6,4267.7,4114.9,14.273,4509.2,4024.6,4542.6,4281,4239.5,4654.4,4481.4,3976.9,4711.8,4267.2,4121.14,3953,4505.6,4031.3,4540,4282.6,4238.5,4651.3,4480.5,4570.3,3653.8,4124.1,3975.9,4707.7,4266.7,4119.14,3953,4500,4025.6,4535.9,4277.4,4234.5,3661.5,4119,3975.9,4702.6,4262.1,4107.2,14.523,4501,4018.5,4540.5,4289.2,4259.5,4684.6,4516.4,4593.3,3662.1,4117.4,3975.4,4703.1,4259.5,4107.2,14.523,4499,4013.3,4541.4,67.7,4564.1,3649.7,4120,3983.6,4714.4,4271.8,4115.9,14.523,4492.3,4018.5,4541,4285.1,4244.6,4662.1,4492.3,4581,3660.5,4128.2,3983.6,4715.4,4274.9,4115.4,14.523,4487.7,4546,7.7,4563.6,3649.7,4123.1,3985.1,4712.8,4270.8,4113.3,14.523,4482.1,4025.6,4533.8,4277.9,4211.3,4646.7,4477.9,4575.9,3655.9,4125.6,3981,4710.3,4279,4110.3,14.523,44276.9,4227.2,4631.8,4449.7,4543.6,3614.4,4115.9,3982.1,4713.3,4281.5,4115.4,14.523,4485.6,4030.3,4535.9,4283.1,4223.6,4637.4,4467.2,4561.5,3635.4,4126.7,3984.6,4717.9,488.2,4040,4534.4,4284.6,4246.7,4662.1,4483.6,4569.2,3611.8,4129.7,3984.1,4712.8,4280.5,4115.9,14.7713,4482.6,4037.4,4531.3,4284.1,4237.4,4643.6,4471.3,4562.1,3613.8,4125.4,4101,14.8963,4485.1,4042.1,4532.3,4285.1,4241,4665.1,4497.4,4586.2,3640.5,4133.3,3985.6,4714.9,4281.5,4102.6,14.8963,4487.2,4039,4536.4,4288.2,4243.1,4667.7,4498.5,4136.9,3985.6,4702.1,4269.2,4085.6,14.8963,4464.6,4035.4,4524.6,4282.6,4239,4673.3,4509.7,4594.4,3654.4,4139.5,3989.7,4702.6,4277.9,4088.2,14.8963,4463.6,4038.5,4521,42

```

Figura 89. Contenido fichero de datos

Terminamos así la explicación a grandes rasgos del código encargado de registrar los valores correspondientes a los valores de los electrodos. Una vez ha sido aclarado el procedimiento de toma de datos, en lo que al código informático se refiere, podemos continuar con la narración de los pasos a seguir una vez se han obtenido los 4 ficheros necesarios.

4.2. Preprocesado de los ficheros

Una vez ha sido llevado a cabo el registro de datos es necesario preprocesarlos para preparar los ficheros obtenidos anteriormente de cara al procesado final que será el que nos dé la información que buscamos con todo este procedimiento.

Para realizar el preprocesado necesitamos hacer uso de diferentes scripts, es decir de diferentes archivos, de los que hemos hecho uso en la etapa anterior. En esta segunda etapa Juan Antonio Martínez León nos volvió a facilitar una carpeta con todo lo necesario para llevar a cabo el preprocesado de los 4 ficheros obtenidos de cada usuario. Esta carpeta contenía lo siguiente:

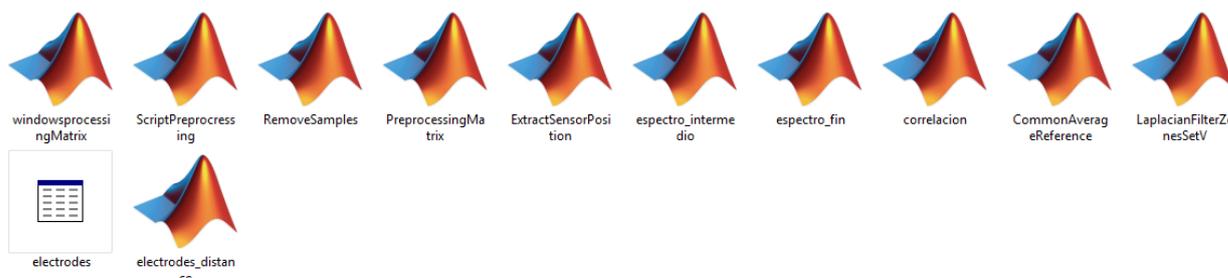


Figura 90. Carpeta contenido para preprocesado

De entre todos estos archivos hay 2 que son los que harán posible la configuración de proceso que tenemos que llevar a cabo para que los resultados obtenidos sean los deseados. Estos dos

ficheros son en primer lugar el archivo denominado “ScriptPreprocessing”, que será el encargado de correr el programa y realizar lo que es el preprocesado en sí, y en segundo lugar el script denominado “ExtractSensorPosition” a través del cual podremos configurar qué posiciones han sido las utilizadas durante la realización del cada experimento.

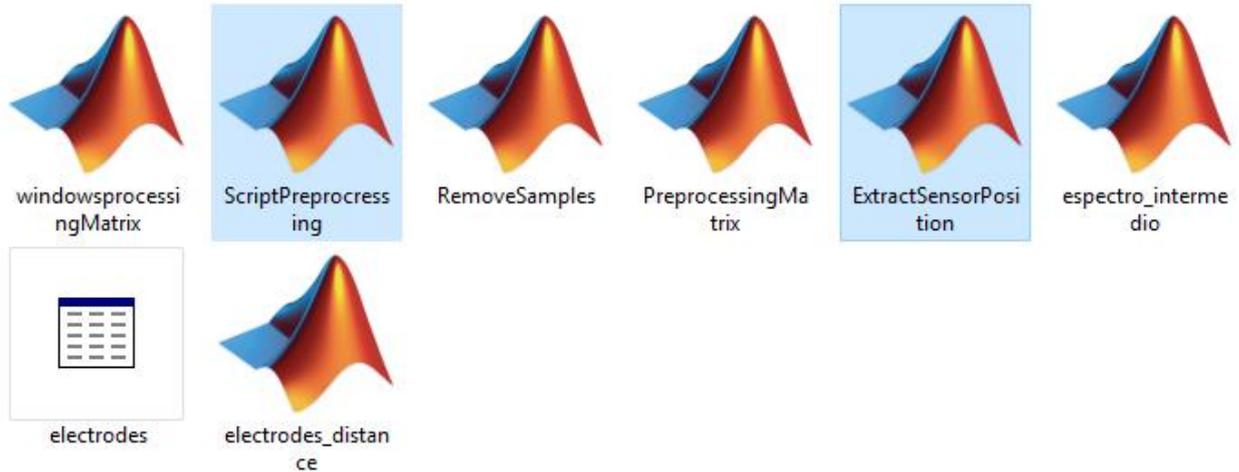


Figura 91. Archivos destacado para preprocesado

Para este segundo fichero explicar simplemente que existen 3 tipos de distribuciones de posición de los sensores recogidas en el código. Estas tres distribuciones pueden observarse remarcadas en la siguiente figura:

```
eeglogger_statusesBCIForms.m x ExtractSensorPosition.m x ScriptPreprocessing.m x ScriptFasArt.m x +
1 function [X,Y] = ExtractSensorPosition()
2 %***** Input Parameters *****
3 %
4 % M_Sensors = Vector of signals and sensors to calculate the
5 % Laplacian Surface.
6 %
7 %*****
8
9 current_sensors = {'AF3' 'F7' 'F3' 'FC5' 'T7' 'P7' 'O1' 'O2' 'P8' 'T8' 'FC6' 'F4' 'F8' 'AF4'};
10 % current_sensors = {'C3' 'CZ' 'C4' 'CP1' 'CP2' 'P3' 'P2' 'P4' 'C1' 'C2' 'CP3' 'CP4' 'P1' 'P2'};
11 %current_sensors = {'C3' 'CZ' 'C4' 'CP1' 'CP2' 'P3' 'P2' 'P4'};
12
13 load('electrodes.mat'); %Load the position of the electrodes to get the position of our electrodes
14
15 for i=1:size(current_sensors,2)
16     for j=1:size(names,2)
17         output = strcmp(current_sensors(i),names(j));
18         if output == 1
19             X(i) = x(j);
20             Y(i) = y(j);
21             continue;
22         end
23     end
24 end
```

Figura 92. Distribución de posición para los sensores.

En la imagen se encuentra activa la distribución de posiciones que ha sido la empleada en la gran mayoría de los experimentos y ha sido la que ha centrado nuestros objetivos. Cuando ha sido necesario se ha desactivado esta primera distribución y se ha activa cualquiera de las otras 2 para realizar sobre un usuario el mismo tipo de experimento pero cambiando la posición y número de electrodos utilizados.

Si nos centramos ahora en el primero de los 2 ficheros comentados anteriormente para realizar el preprocesado, es decir el archivo “ScriptPreprocessing”. Este archivo nos permitirá calcular la superficie Laplaciana para posteriormente hallar la PSD por ventana.

```
% EMOTIV
S = 128;      % In samples per window
Fs = 128;    % Sample frequency
Increment = 8; % Samples moved from the window

F1 = 8;      % Starts the processing in 8 Hz
Fn = 30;     % Ends the evaluation of the PSD in 14 Hz
N = 2;

numberOfExperiments = 4;

% Processing LAP Experiments
tic
for i = 1:numberOfExperiments
    %     Preprocessing(i,'LAP', S, F1, Fn, N, Fs, Increment);
    PreprocessingMatrix(i,'LAP', S, F1, Fn, N, Fs, Increment);
    close all;
end
toc
```

Figura 93. Fichero ScriptPreprocessing

Mediante este fichero podemos configurar los canales, el tamaño de las ventanas o el número de experimentos.

Hace una superficie Laplaciana y después calcula la PSD por ventana. El fichero que ejecuta todo es “ScriptPreprocessing” y ahí se puede configurar los canales, el tamaño de las ventanas o el número de sesiones, que como hemos remarcado en la figura anterior quedará configurado como 4 pues es el número total de ficheros que hemos obtenido para cada usuario.

Para el cálculo de la superficie Laplaciana se hace uso de la posición de los sensores por lo que debe ser revisado el script “ExtractSensorPosition” para asegurarnos que la posición que se están utilizando son las mismas que las que han sido empleadas con cada usuario.

Una vez descrito en funcionamiento de estos 2 ficheros, que son con los que deberemos interactuar para realizar un correcto preprocesado de los datos, simplemente mencionar que en la misma carpeta en la que se encuentran estos ficheros hay un Script que nos permitiría obtener la PSD de distinto modo al utilizado en el “ScriptPreprocessing”, este fichero es el denominado “windowsprocessingmatrix”.

Habiendo explicado el contenido de esta segunda carpeta y el funcionamiento de los archivos clave, junto con un desarrollo del funcionamiento de los código informáticos dedicados al preprocesado de los ficheros obtenido durante la realización de los experimentos es hora de realizar dicho preprocesado y obtener archivos ya preparados para poder ser procesados en última instancia.

Para realizar esta etapa de deben colocar los 4 archivos “Exp1, Exp2, Exp3 y Exp4” en esta segunda carpeta.

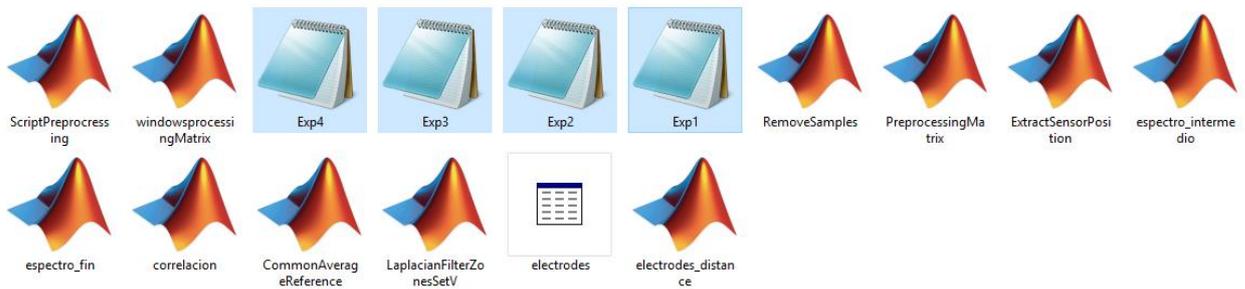


Figura 94. Carpeta de preprocesamiento.

A continuación ejecutaremos el fichero “ScriptPreprocessing”, lo configuraremos como creamos conveniente para obtener los resultados deseados y tras habernos asegurado de que la posición de los sensores es la correcta podremos ejecutar el código obteniendo así, tras periodos de tiempo alrededor de un minuto de ejecución, los ficheros preprocesados.

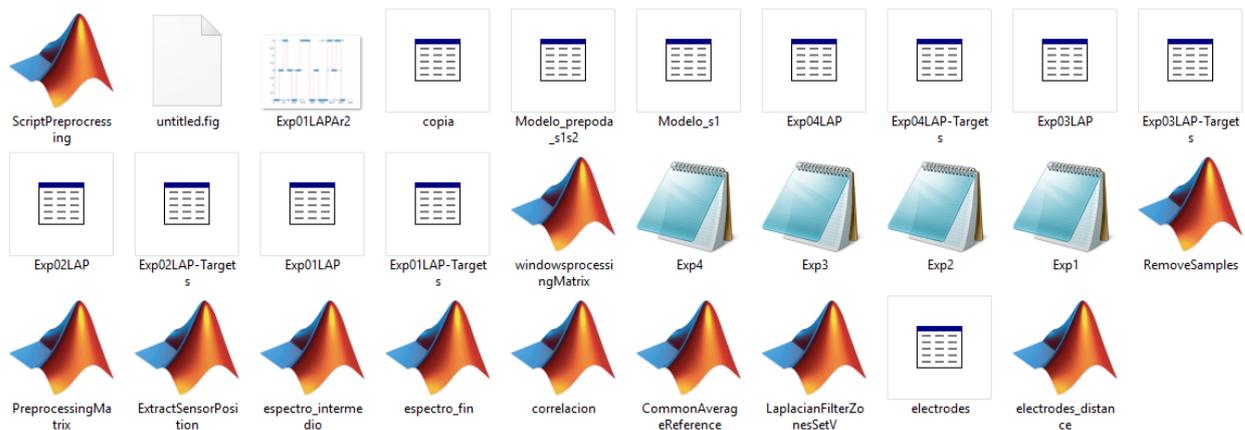


Figura 95. Carpeta con archivos preprocesados

Una vez terminada la ejecución del código obtendremos en la misma carpeta los ficheros preprocesados, por lo que daríamos por acaba esta segunda etapa de preprocesamiento y ya solo nos quedaría la última etapa para obtener la información que hemos estado buscando desde el principio y gracias a la cual conseguiremos los objetivos de esta investigación.

4.3. Procesado final de los ficheros

Para esta última fase haremos uso de una tercera carpeta la cual contiene los archivos necesarios para hacer correr el código y junto a los ficheros preprocesados terminar la parte de programación de este proyecto.

Esta carpeta ha sido también facilitada por Juan Antonio en una de las reuniones mantenidas durante el desarrollo del presente trabajo y en ella podemos encontrar el siguiente contenido:

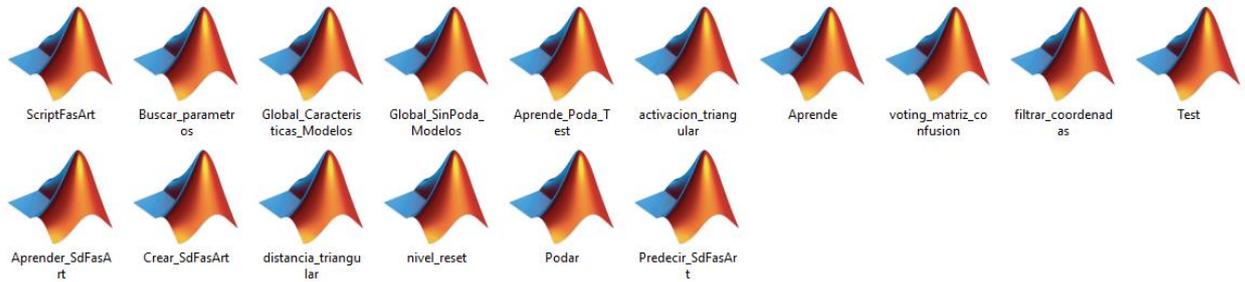


Figura 96. Contenido carpeta de procesado

De entre todos los archivos destacaremos uno en concreto, el fichero “ScriptFasArt”, éste será con el que interactuaremos durante esta etapa final y nos permitirá obtener el procesado de los ficheros ayudado del resto de Scripts, los cuales irá cargando y ejecutando según el programa principal lo solicite.

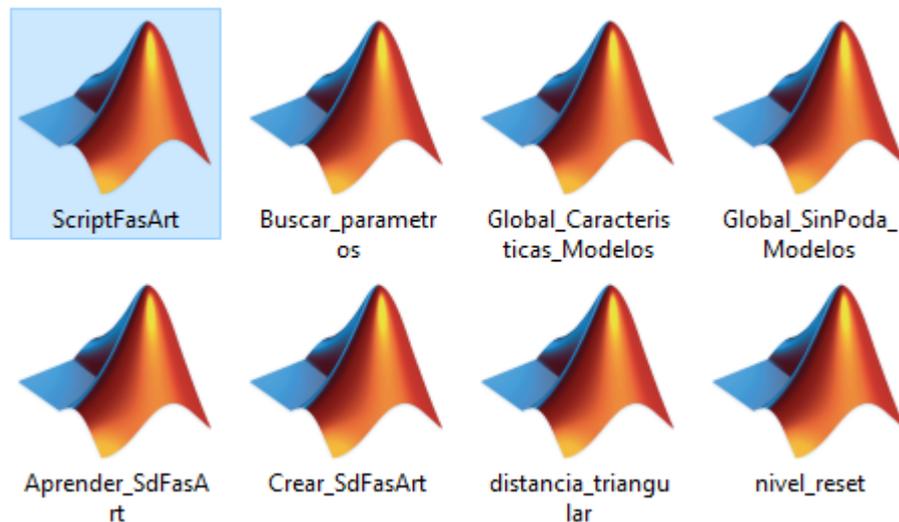


Figura 97. Fichero “ScriptFasArt”

Al ejecutarlo podremos visualizar su correspondiente código y que al igual que hemos hecho en las etapas anteriores explicaremos el funcionamiento de sus funciones principales para poder entender cómo se realiza todo el procedimiento hasta la obtención de los archivos finales. Este código tiene 3 secciones diferenciadas, la primera está dedicada a la introducción de los valores de configuración, entre ellos se encuentra la variable Ar que para nuestro experimento ha sido fijada con un valor de 0.002 habiendo sido acordado así con el director de este proyecto y Juan Antonio, ya que realizar el procesado variando este valor entre 0.001 y 0.003 habría supuesto un tiempo muy amplio para la obtención de todos los resultados, que como se verá más adelante en este trabajo el tiempo de procesamiento para cada usuario está en torno a las 7 horas.

```
preprocesamiento= 'LAP';  
h=1;  
Ar= 0.002;  
sesiones = [1 2; 1 3; 2 1; 2 3; 3 1; 3 2];  
sujeto = 1;  
%caracteristicas = 168; %Emotiv EPOC  
caracteristicas = 96; %EMOC sensores BCI  
  
%Matriz guarda datos  
resultados = [];
```

Figura 98. Primera parte código ScripFasArt

En la segunda sección nos encontramos un bucle *for*, dentro del cual se pueden diferenciar 2 partes, una primera encargada del aprendizaje y otra segunda dedicada a realizar el test.

- Parte de aprendizaje

```
26 - for i=1:6  
27 -  
28 -     %Parametros  
29 -     sesion1= sesiones(i,1);  
30 -     sesion2= sesiones(i,2);  
31 -  
32 -     %*****  
33 -     % Aprendizaje  
34 -     %*****  
35 -     if i == 1 || sesion1 ~= sesiones(i-1,1)  
36 -         clear Modelol;  
37 -         [Modelol, reglasPrePoda] = Aprende(h,Ar,sesion1,preprocesamiento,caracteristicas);  
38 -  
39 -         Fichero_Modelos= sprintf('Modelo_s%d',sesion1);  
40 -         save(Fichero_Modelos, 'Modelol');  
41 -     end  
42 -     %*****  
43 -     % Búsqueda de Parámetros  
44 -     %*****  
45 -     % modelo_calculado es el modelo final calculado. Se usa posteriormente  
46 -     tic  
47 -     [delta,At,modelo_calculado] = Buscar_parametros(Modelol,sesion2,preprocesamiento);  
48 -     Fichero_Modelos= sprintf('Modelo_prepoda_s%d_s%d',sesion1,sesion2);  
49 -     save(Fichero_Modelos, 'modelo_calculado');  
50 -     toc  
51 -     %*****
```

Figura 99. Parte aprendizaje código ScripFasArt

En esta primera parte el bucle *for* será el encargado de recorrer las instrucciones que hay en su interior 6 veces, eso se debe a que se crearán dos modelos para cada una de las 3 primeras sesiones que cada usuario realizó. Con estas 3 sesiones lo que se pretendía es crear una media de valores que sirvieran de aprendizaje para finalmente compararlos con la última sesión, es decir la sesión 4, y de ahí obtener los resultados.

Por lo tanto cada vez que el bucle *for* sea recorrido se creará un fichero denominado “Modelo_prepoda_sX_sY” siendo X e Y los valores que irán de 1 a 3 según la sesión que se esté recorriendo. Por lo que el conjunto de valores que finalmente darán lugar a los ficheros de los

modelos prepoada que acabamos de comentar estarán dados por las posibles configuraciones entre sesiones.

```
sesiones = [1 2; 1 3; 2 1; 2 3; 3 1; 3 2];
```

Los resultados al final de esta etapa de aprendizaje mostrados en la ventana de comandos de Matlab para un usuario cualquiera tendrá la siguiente forma:

```
resultados =
Columns 1 through 12
    1.0000    2.0000    1.0000    0.0020   171.0000    24.0000    0.0800    60.0000    71.3785    63.0429    49.4740    50.7418
    1.0000    3.0000    1.0000    0.0020   171.0000    22.0000    0.3000    60.0000    67.1972    50.5530    58.5109    51.2274
    2.0000    1.0000    1.0000    0.0020   173.0000    12.0000    0.0400    48.0000    69.1125    67.5749    46.1289    57.1351
    2.0000    3.0000    1.0000    0.0020   173.0000    19.0000    0.2000    54.0000    49.0154    62.0178    56.7035    56.3259
    3.0000    1.0000    1.0000    0.0020   174.0000    23.0000    0.0300    30.0000    65.3359    50.3642    56.7845    51.0116
    3.0000    2.0000    1.0000    0.0020   174.0000    3.0000    0.7000    77.0000    49.3661    60.5341    62.2066    53.6283

Column 13
    91.9881
    87.5641
    85.8646
    85.7297
    86.9436
    79.9299

Elapsed time is 52.766992 seconds.
```

Figura 100. Resultados mostrados por pantalla Matlab

Esta imagen lo que nos está mostrando son los resultados finales de un usuario cualquiera para cada uno de los 6 modelos prepoada que se han calculado con la configuración establecida al comienzo, $Ar=0,002$. Cada uno de estos resultados tiene su significado y aunque no son el objeto de estudio para este proyecto vamos a entablarlos para poder diferenciarlos brevemente. Estos valores ordenados en tablas quedarían de la siguiente forma:



Usuario Ejemplo		Ar = 0.002	
u12s1s2	N	24	171
	N_poda	0,08	60
	%		50,23
	%_poda		50,74
u12s1s3	N	22	171
	N_poda	0,03	60
	%		46,70
	%_poda		51,23
u12s2s1	N	12	173
	N_poda	0,04	48
	%		51,36
	%_poda		57,14
u12s2s3	N	19	173
	N_poda	0,2	54
	%		52,50
	%_poda		56,33
u12s3s1	N	23	174
	N_poda	0,03	30
	%		52,33
	%_poda		51,01
u12s3s2	N	3	174
	N_poda	0,7	77
	%		50,58
	%_poda		53,63
Media (SD)		50,62	
Media_poda(SD)		53,25	

Tabla 5. Ejemplo resultados parte aprendizaje

El formato de la *Tabla 5* al igual que el formato de la tabla con los valores finales del proceso ha sido facilitado por Juan Antonio. Aquí podemos ver los valores obtenidos en esta primera parte de la etapa de preprocesado, en ella se visualizan los valores ordenados que han sido obtenidos tras finalizar la parte de aprendizaje, y haremos también mención a que el hecho de que el código Matlab ofrece la posibilidad de conocer el tiempo empleado en el cálculo de cada proceso.

A la misma vez que se produce la creación de cada uno de los 6 modelos prepoda para cada par de sesiones se irá produciendo un fichero denominado "Modelo_Nºsesión", es decir que se crearán 3 ficheros; Modelo_1, Modelo_2 y Modelo_3, que al final del código su información será volcada a un fichero general que guardará la información de cada uno de ellos y será denominado como "Modelos". También comentar que para cada uno de estos 3 modelos se obtiene una figura al final de cada pareja de modelos preprocesados, consiguiendo así las 3 figuras siguientes:

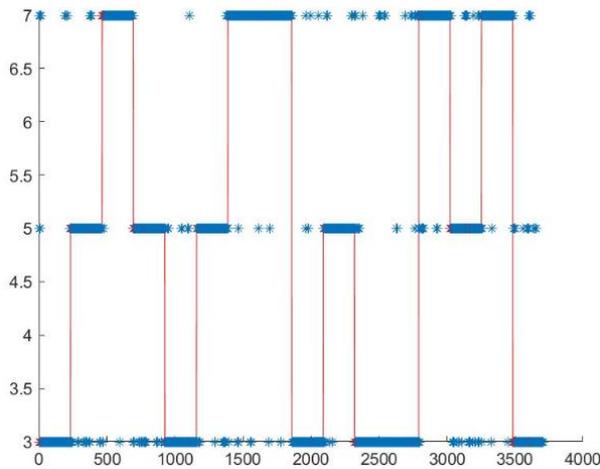


Figura 101. Gráfica Modelo 1

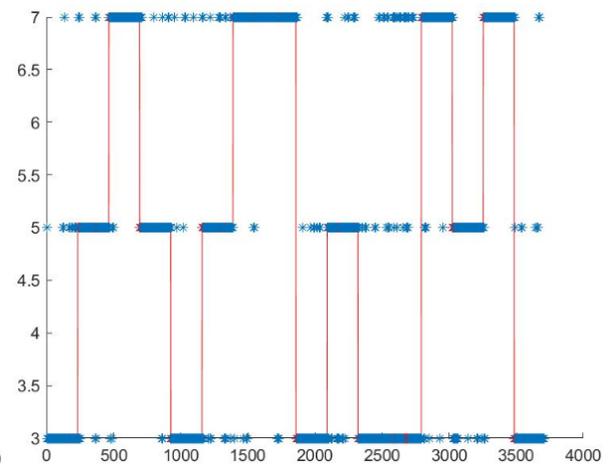


Figura 102. Gráfica Modelo 2

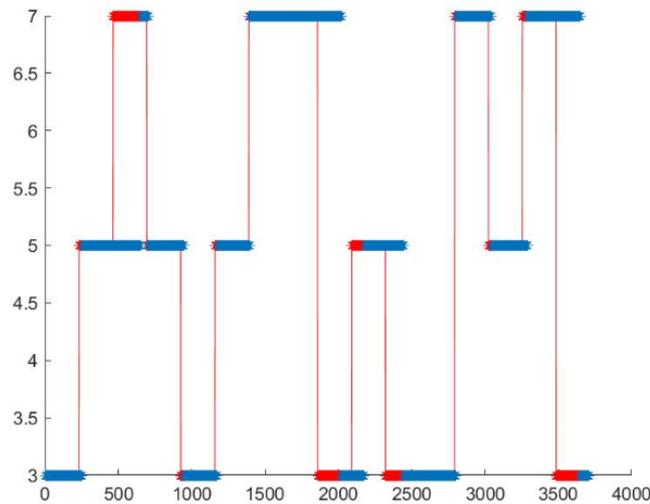


Figura 103. Gráfica Modelo 3

Cuando concluya la siguiente etapa aparecerá la *Figura 104* de un cuarto modelo que será el resultado de la comparación entre estos 3 primeros y la última sesión realizada durante el experimento, que a modo de ejemplo tendrá formas similares a la siguiente:

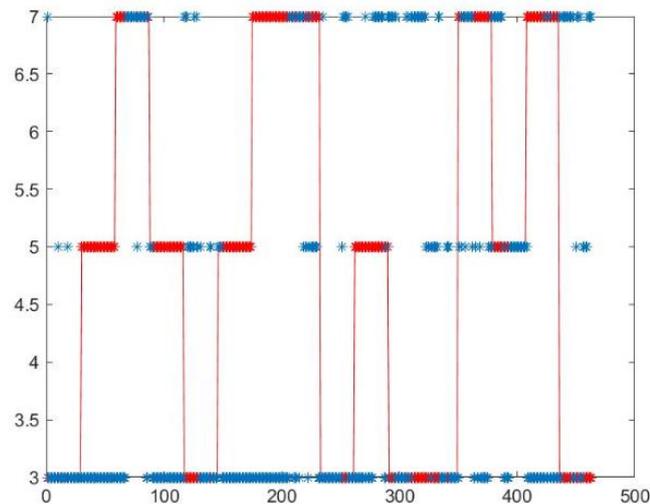


Figura 104. Gráfica modelo final

- Etapa de evaluación

Una vez concluida la creación de cada uno de los ficheros denominados “Modelo_prepoda_sX_sY”, aún dentro del bucle *for*, y ya una vez habiendo conseguido los resultados que acabamos de ver se producirá la comprobación en la precisión de cada sesión de aprendizaje:

```
% Aprende Poda Test
%
%*****
fprintf('\n Aprende Poda Test Modificado \n');
[reglas, aciertos1, aciertos2, aciertos3, aciertos4] = Aprende_Poda_Test(modelo_calculado, sesion1, sesion2, preprocesamiento, h, Ar, delta, At);
%*****
%
% Test. Comprobación de la precisión en la predicción de la sesión de
% aprendizaje
%
%*****
aciertos_propios = Test(preprocesamiento, sesion1, Modelol, delta, At, Ar);

resultados = [resultados; sesion1 sesion2 h Ar reglasPrePoda delta At reglas aciertos1 aciertos2 aciertos3 aciertos4 aciertos_propios]
```

Figura 105. Parte Test código ScriptFasArt

Se crearán 2 variables que serán empleadas en el cálculo de los porcentajes de acierto, “aciertos_propios” y “resultados”. En esta parte se evaluará la última sesión que cada usuario realizó durante su experimento, es decir se evaluará la sesión 4. Llegado el momento en el que se hayan obtenido los porcentajes de acierto de cada modelo, en base a la primera etapa de aprendizaje, se alcanzará una etapa posterior en la que los valores de las tres primeras sesiones y de la última sesión serán comparados para finalmente obtener el mejor de ellos, habiendo ya acabado con el bucle *for* que ha sido explicado anteriormente. La comparación de estos valores se muestra en la siguiente figura, la cual es mostrada por la ventana de comandos de Matlab una vez concluye su cálculo.

```
Test S1S2 S4: Vectores Clasificados: 3707
Test S1S2 S4: Aciertos: 1862 (50.229296%)
```

```
Test S1S3 S4: Vectores Clasificados: 3707
Test S1S3 S4: Aciertos: 1731 (46.695441%)
```

```
Test S2S1 S4: Vectores Clasificados: 3707
Test S2S1 S4: Aciertos: 1904 (51.362288%)
```

```
Test S2S3 S4: Vectores Clasificados: 3707
Test S2S3 S4: Aciertos: 1946 (52.495279%)
```

```
Test S3S1 S4: Vectores Clasificados: 3707
Test S3S1 S4: Aciertos: 1940 (52.333423%)
```

```
Test S3S2 S4: Vectores Procesados: 3707
Test S3S2 S4: Aciertos: 1875 (50.579984%)
```

Figura 106. Ejemplo comparación de sesiones (Sin Poda de reglas)



Podemos observar en la *Figura 106* cómo los 6 modelos preopda obtenidos a raíz de las posibles combinaciones entre las 3 primeras sesiones son comparados con los resultados obtenidos para la cuarta sesión, lo que nos proporciona el número de vectores total del vectores que han sido procesados y el número de aciertos que se han producido, esto nos permite conocer el porcentaje de acierto de cada uno de ellos. Pero estos no son los resultados finales pues el programa mediante los script contenidos en la carpeta debe realizar el cálculo del "Test Final". Para ello a cada uno de los 6 casos se le aplica una "Poda de reglas" que lo que hará será ir eliminar reglas de la función dFasArt de forma reiterada, modificando así las reglas existentes para crear nuevo modelo, filtrando y eliminando las que considere y con ello mejorando así los valores obtenidos. Tras esta función se hallarán de nuevo los vectores clasificados con sus respectivos número de aciertos, ofreciéndonos así los valores finales en porcentaje de cada caso para el Ar que ha sido establecido, que como ya hemos dicho en nuestro proyecto se ha fijado en 0,002.

```
> In voting_matriz_confusion (line 140)
  In ScriptFasArt (line 91)
```

```
Caso=1
```

```
Podar: Reglas del nuevo Modelo: 60
```

```
Test Final: Vectores Procesados: 3707
```

```
Test Final: Aciertos:1881 50.741840
```

```
Caso=2
```

```
Podar: Reglas del nuevo Modelo: 60
```

```
Test Final: Vectores Procesados: 3707
```

```
Test Final: Aciertos:1899 51.227408
```

```
Caso=3
```

```
Podar: Reglas del nuevo Modelo: 48
```

```
Test Final: Vectores Procesados: 3707
```

```
Test Final: Aciertos:2118 57.135150
```

```
Caso=4
```

```
Podar: Reglas del nuevo Modelo: 54
```

```
Test Final: Vectores Procesados: 3707
```

```
Test Final: Aciertos:2088 56.325870
```

```
Caso=5
```

```
Podar: Reglas del nuevo Modelo: 30
```

```
Test Final: Vectores Procesados: 3707
```

```
Test Final: Aciertos:1891 51.011600
```

```
Caso=6
```

```
Podar: Reglas del nuevo Modelo: 77
```

```
Test Final: Vectores Procesados: 3707
```

```
Test Final: Aciertos:1988 53.628271
```

Figura 107. Ejemplo resultados Test Final (Con poda de reglas)

Ya para terminar con el procesado de los ficheros, la última sección tiene como función la de obtener los resultados que será objeto de estudio de cada modelo, es decir el hallado sin podas y con podas. Además de estos valores dados en valor unitario, no calcula la matriz de confusión para el Ar con el que se ha realizado el procesado.

```
Global_SinPoda_Modelos(resultados);
voting matriz_confusion(Ar);
delete u1s1s2.mat;
delete u1s1s3.mat;
delete u1s2s1.mat;
delete u1s2s3.mat;
delete u1s3s1.mat;
delete u1s3s2.mat;
Global_Caracteristicas_Modelos(resultados,Ar,caracteristicas);
voting matriz_confusion(Ar);
delete u1s1s2.mat;
delete u1s1s3.mat;
delete u1s2s1.mat;
delete u1s2s3.mat;
delete u1s3s1.mat;
delete u1s3s2.mat;
%Global(resultados,Ar);
```

Figura 108. Sección final ScripFasArt

En la ventana de comandos de Matlab podemos visualizar los resultados obtenidos y acceder a la información buscada desde el comienzo de todo este procedimiento. Estos resultados tendrán la siguiente forma:

```
aciertos =
    0.6091
aciertos_motor =
    0.7948
matriz_confusion =
acierto_D =
    0    0    0    0    0    0    0
    0    0    0    0    0    0    0
    0.4759    0    0    112    0    27    0    35
acierto_I =
    0    0    0    0    0    0    0
    0    0    59    0    69    0    17
    0.6437    0    0    0    0    0    0
acierto_W =
    0.7014    0    0    30    0    13    0    101
```

Figura 109. Resultados y matriz de confusión (con poda de reglas)

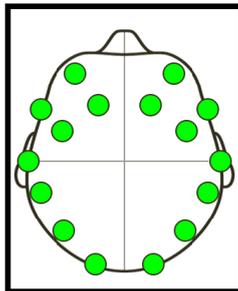
Aquí concluimos la explicación del procedimiento que siguen los datos una vez han sido preprocesados hasta su procesado final.

4.4. Esquema del proceso completo

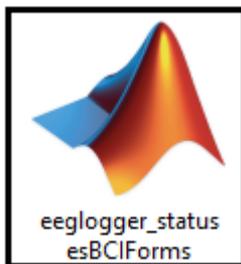
En este último apartado vamos a resumir de forma genérica en un esquemático los pasos del procedimiento que acabamos de ver para observar de una forma muy simplificada lo que el código informático Matlab que ha sido empleado en el presente proyecto realiza desde su inicio hasta la obtención de los resultados finales.

Etapa 1: Registro de datos

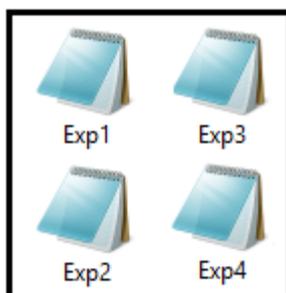
Se realizan los experimentos



Preparación Sistema Emotiv



Realización experimento



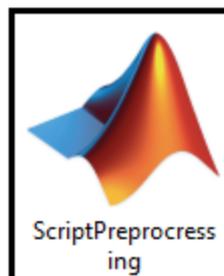
Obtención registro de datos

Etapa 2: Preprocesado de datos

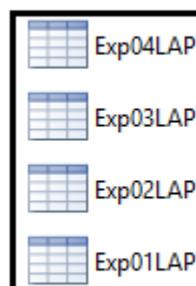
Se preprocesan los ficheros Exp



Ficheros listos para preprocesar



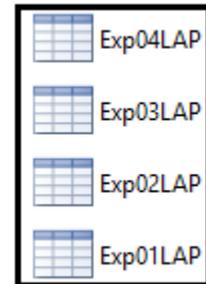
Realización preprocesado



Obtención ficheros preprocesados

Etapa 3: Procesado final

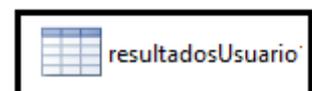
Se procesan los ficheros LAP



Preparación Sistema Emotiv



Realización Procesado



Obtención resultados finales

Una vez haya concluido la última etapa del procedimiento que acabamos de exponer se van a obtener los resultados con los que trabajaremos para ser comparados entres si y obtener las conclusiones oportunas. La forma en la que son obtenidos estos valores finales ya ha sido mostrada dentro del código Matlab pero a partir de ahora serán ordenados y colocados en tablas para una mejor visualización de los mismos, un mayor entendimiento y una mejor diferenciación para cada uno de los usuarios que ha realizado el experimento. La forma en la que serán presentados será la siguiente:

Resultados	
Global	60,91%
Motor	79,48%
Derecha	47,59%
Izquierda	64,37%
Palabra	70,14%

Tabla 6. Ejemplo porcentaje de acierto

Matriz de confusión		Predicho		
		Izquierda	Derecha	Palabra
Real	Izquierda	112	27	35
	Derecha	59	69	17
	Palabra	17	13	101

Tabla 7. Ejemplo matriz de confusión

De ambas tablas simplemente comentar que los porcentajes representan la cantidad de acierto conseguido para las acciones que cada usuario debía realizar durante el desarrollo de la etapa de registro de datos, es decir pensar en mover la mano izquierda, pensar en mover la mano derecha y pensar en palabras que comiencen por una letra determinada. Por último la variable *Global* representa el porcentaje total de acierto conseguido para cada usuario.

Así que estos serán los formatos en los que se encontrarán los valores obtenidos para cada usuario y a partir de ellos realizaremos lo que resta de trabajo.

5. Base de datos y resultados obtenidos.

Habiendo completado con éxito los pasos anteriores, que incluyen el registro de datos y el procesado completo de los mismos, llegamos a la sección de este proyecto en la que se mostrará la base de datos producida a partir de los resultados que han sido obtenidos en todos y cada uno de los experimentos.

Para el presente trabajo se establecieron una serie de aspectos que han sido comentados anteriormente. Entre ellos se encuentra la realización de una base de datos lo suficientemente grande para que las conclusiones finales a las que lleguemos estén perfectamente fundamentadas, y para llevar a cabo dicha base se concretó realizar el experimento a 20 sujetos. A lo largo del proceso de ejecución del proyecto se han encontrado ciertos problemas a la hora de realizar la prueba en algunas personas, entre dichos problemas se encuentran la baja calidad de señal de conexión conseguida en algunos sujetos producida por la cantidad de pelo que tenían. Más concretamente me estoy refiriendo a que se ha realizado el experimento a mujeres y hombres con el pelo largo y la óptima conexión de los electrodos no ha sido posible, llegando incluso al punto de no conectar algunos sensores ya que la cabeza del sujeto era mucho más pequeña que el tamaño de la malla del dispositivo y se hacía muy complicado establecer la conexión entre electrodo y cabeza.

Estos problemas han impedido poder concluir el experimento con éxito en varios sujetos y con ello se ha visto reducido el número de resultados obtenidos, ya que aunque el experimento finalmente se ha realizado a 20 personas en 5 de ellas, especialmente en el caso de chicas, no se ha podido completar. Por lo que finalmente el número de usuarios sobre el que se ha conseguido realizar las 4 sesiones necesarias para obtener los resultados se ha visto reducido a 15. Todos estos problemas serán comentados en las conclusiones con más detalle.

El resto de experimentos sobre los usuarios en los que sí se ha podido finalizar el experimento serán los que se muestren en esta sección y servirán de estudio para su correspondiente comparativa.

A continuación vamos a mostrar un grupo de tablas que reflejan el tipo de personas sobre las que se ha realizado la prueba y que nos permite ver el número de sujetos, de cierto grupo divididos por categorías en función de sus características, a los que se le ha conseguido realizar la prueba con éxito.

	NºUsuarios
Hombres	11
Mujeres	4

	NºUsuarios
Jovenes	9
Adultos	6

	NºUsuarios
Diestros	12
Zurdos	3

	NºUsuarios
Con estudios	9
Sin estudios	6

	NºUsuarios
Con conocimientos EEG previos	6
Sin conocimientos EEG previos	9

Tablas 8. Usuarios categorizados.

Al comienzo del presente proyecto se establecieron ciertos puntos para poder realizar una comparativa entre las distintas personas que realizaran la prueba con el dispositivo Emoc. Para esta comparativa era necesario encontrar grupos sociales diferenciados por alguna característica en concreto que nos permitiera comparar los porcentajes obtenidos para finalmente ver si esa característica era motivo de una variación en el porcentaje de acierto que cada sujeto obtuviera en la prueba. Tras realizar varias reuniones y desarrollar el formulario visto anteriormente se concretó en diferenciar a los individuos por al menos 4 grupos. Esta diferenciación se basaba en comparar a todos los sujetos por su sexo, por su edad, por su mano dominante y finalmente por sus conocimientos sobre las señales EEG.

Tras realizar los experimentos e ir procesando los datos, que más adelante veremos, me di cuenta de que había una tendencia entre un grupo social que no había sido recogido al comienzo del proyecto pero al que encontraba interesante establecer ya que veía que en el porcentaje de acierto empezaba a tener importancia esta diferenciación social. Por lo que además de los 4 grupos anteriores, ha sido añadido al proyecto el factor del nivel de estudios. Se hará una comparativa entre los sujetos que tienen estudios, más específicamente de nivel superior, y entre los que no tienen estudios o su nivel es bajo.

Antes de presentar los resultados individuales de cada usuario vamos a presentarlos en una tabla uno a uno diferenciando así cuales son las características recogidas en las tablas anteriores que definen a que grupo de personas pertenecen sus correspondientes porcentajes.

NºUsuario	Hombre	Mujer	Joven	Adulto	Diestro	Zurdo	Con estudios	Sin estudios	Con conocimientos EEG previos	Sin conocimientos EEG previos
Usuario 1	X		X		X		X		X	
Usuario 2	X		X			X	X		X	
Usuario 3	X		X		X		X		X	
Usuario 4	X		X		X		X		X	
Usuario 5		X	X				X		X	
Usuario 6		X	X			X	X		X	
Usuario 7	X			X	X			X		X
Usuario 8	X			X	X			X		X
Usuario 9	X		X		X		X		X	
Usuario 10	X			X	X			X		X
Usuario 11	X			X	X			X		X
Usuario 12	X		X		X		X		X	
Usuario 13	X			X	X			X		X
Usuario 14		X	X			X	X			X
Usuario 15		X		X	X			X	X	

Tabla 9. Usuarios diferenciados y categorizados

Una vez han sido agrupados y diferenciados cada uno de los usuarios vamos a proceder a exponer los resultados obtenidos y que han sido el objeto de investigación de nuestro trabajo de fin de grado.

5.1. Resultados de los experimentos

Se presentan uno a uno los resultados finales de todos los usuarios que realizaron la prueba sin hacer diferenciación entre las condiciones individuales de cada experimento.

Usuario 1

Resultados	
Global	54,86%
Motor	83,59%
Derecha	70,34%
Izquierda	10,92%
Palabra	92,36%

Tabla 10. Porcentajes usuario 1

Matriz de confusión		Predicho		
		Izquierda	Derecha	Palabra
Real	Izquierda	19	112	43
	Derecha	21	102	22
	Palabra	6	5	133

Tabla 11. Matriz de confusión usuario 1

Usuario 2

Resultados	
Global	60,91%
Motor	79,48%
Derecha	47,59%
Izquierda	64,37%
Palabra	70,14%

Tabla 12. Porcentajes usuario 2

Matriz de confusión		Predicho		
		Izquierda	Derecha	Palabra
Real	Izquierda	112	27	35
	Derecha	59	69	17
	Palabra	17	13	101

Tabla 13. Matriz de confusión usuario 2

Usuario 3

Resultados	
Global	40,60%
Motor	60,91%
Derecha	69,66%
Izquierda	19,54%
Palabra	36,81%

Tabla 14. Porcentajes usuario 3

Matriz de confusión		Predicho		
		Izquierda	Derecha	Palabra
Real	Izquierda	34	79	61
	Derecha	15	101	29
	Palabra	15	76	53

Tabla 15. Matriz de confusión usuario 3

Usuario 4

Resultados	
Global	45,36%
Motor	76,67%
Derecha	7,59%
Izquierda	91,95%
Palabra	27,08%

Tabla 16. Porcentajes usuario 4

Matriz de confusión		Predicho		
		Izquierda	Derecha	Palabra
Real	Izquierda	160	11	3
	Derecha	134	11	0
	Palabra	101	4	39

Tabla 17. Matriz de confusión usuario 4

Usuario 5

Resultados	
Global	58,96%
Motor	82,94%
Derecha	25,52%
Izquierda	58,62%
Palabra	93,06%

Tabla 18. Porcentajes usuario 5

Matriz de confusión		Predicho		
Real		Izquierda	Derecha	Palabra
	Izquierda	102	31	41
	Derecha	80	37	28
	Palabra	8	2	134

Tabla 19. Matriz de confusión usuario 5

Usuario 6

Resultados	
Global	19,44%
Motor	52,92%
Derecha	14,48%
Izquierda	12,07%
Palabra	33,33%

Tabla 20. Porcentajes usuario 6

Matriz de confusión		Predicho		
Real		Izquierda	Derecha	Palabra
	Izquierda	21	44	109
	Derecha	111	21	12
	Palabra	40	56	48

Tabla 21. Matriz de confusión usuario 6

Usuario 7

Resultados	
Global	30,45%
Motor	55,08%
Derecha	8,28%
Izquierda	67,82%
Palabra	7,64%

Tabla 22. Porcentajes usuario 7

Matriz de confusión		Predicho		
Real		Izquierda	Derecha	Palabra
	Izquierda	118	0	56
	Derecha	114	12	19
	Palabra	126	7	11

Tabla 23. Matriz de confusión usuario 7

Usuario 8

Resultados	
Global	31,75%
Motor	60,91%
Derecha	14,48%
Izquierda	51,72%
Palabra	25,00%

Tabla 24. Porcentajes usuario 8

Matriz de confusión		Predicho		
Real		Izquierda	Derecha	Palabra
	Izquierda	90	31	53
	Derecha	104	21	20
	Palabra	87	21	36

Tabla 25. Matriz de confusión usuario 8



Usuario 9

Resultados	
Global	59,61%
Motor	85,96%
Derecha	61,38%
Izquierda	28,16%
Palabra	95,83%

Tabla 26. Porcentajes usuario 9

Matriz de confusión		Predicho		
Real		Izquierda	Derecha	Palabra
	Izquierda	49	91	34
	Derecha	31	89	25
	Palabra	6	0	138

Tabla 27. Matriz de confusión usuario 9

Usuario 10

Resultados	
Global	37,58%
Motor	48,81%
Derecha	2,07%
Izquierda	21,84%
Palabra	92,36%

Tabla 28. Porcentajes usuario 10

Matriz de confusión		Predicho		
Real		Izquierda	Derecha	Palabra
	Izquierda	38	21	115
	Derecha	31	3	111
	Palabra	6	5	133

Tabla 29. Matriz de confusión usuario 10

Usuario 11

Resultados	
Global	44,28%
Motor	64,36%
Derecha	4,83%
Izquierda	77,59%
Palabra	43,75%

Tabla 30. Porcentajes usuario 11

Matriz de confusión		Predicho		
Real		Izquierda	Derecha	Palabra
	Izquierda	135	7	32
	Derecha	86	7	52
	Palabra	75	6	63

Tabla 31. Matriz de confusión usuario 11

Usuario 12

Resultados	
Global	30,24%
Motor	31,53%
Derecha	0,00%
Izquierda	0,00%
Palabra	97,22%

Tabla 32. Porcentajes usuario 12

Matriz de confusión		Predicho		
Real		Izquierda	Derecha	Palabra
	Izquierda	0	5	169
	Derecha	1	0	144
	Palabra	4	0	140

Tabla 33. Matriz de confusión usuario 12

Usuario 13

Resultados	
Global	39,74%
Motor	63,07%
Derecha	4,83%
Izquierda	71,84%
Palabra	36,11%

Tabla 34. Porcentajes usuario 13

Matriz de confusión		Predicho		
Real		Izquierda	Derecha	Palabra
	Izquierda	125	4	45
	Derecha	104	7	34
	Palabra	92	0	52

Tabla 35. Matriz de confusión usuario 13

Usuario 14

Resultados	
Global	37,58%
Motor	68,90%
Derecha	0,00%
Izquierda	1,00%
Palabra	0,00%

Tabla 36. Porcentajes usuario 14

Matriz de confusión		Predicho		
Real		Izquierda	Derecha	Palabra
	Izquierda	174	0	0
	Derecha	145	0	0
	Palabra	144	0	0

Tabla 37. Matriz de confusión usuario 14

Usuario 15

Resultados	
Global	50,32%
Motor	60,04%
Derecha	17,93%
Izquierda	36,78%
Palabra	99,31%

Tabla 38. Porcentajes usuario 15

Matriz de confusión		Predicho		
Real		Izquierda	Derecha	Palabra
	Izquierda	64	13	97
	Derecha	32	26	87
	Palabra	1	0	143

Tabla 39. Matriz de confusión usuario 15

Acaban de ser presentados todos los resultados. Sobre ellos es necesario comentar que la gran mayoría fueron realizados en las mismas condiciones aunque para algún sujeto se varió la distribución de los electrodos o el número de los mismos para así poder comprobar si cambiando estos 2 factores variaría el porcentaje de acierto de los resultados obtenidos.

También se realizaron las pruebas en repetidas ocasiones para un mismo sujeto con la finalidad de comprobar si tras la práctica y el conocimiento del funcionamiento del experimento se conseguían mejorar los resultados obtenidos, esta parte será comentada tras realizar la comparativa de los resultados.

Por último podemos observar como en algunos casos los valores pueden mostrar un resultado incoherente ya que en el caso de los usuarios 12 y 14 vemos que algo ha pasado con alguno de sus valores. Esto es debido a que los electrodos en estos casos no tuvieron una conexión óptima, llegando a fallar en alguna sesión, factor que ha podido suceder también aunque en menor medida para el usuario 6 en el que el tamaño de la cabeza y la cantidad de pelo dificultaron la correcta ejecución del experimento.

6. Comparación y discusión de resultados

6.1. Comparación de los resultados

En este apartado compararemos todos los resultados anteriores en función de los 5 grupos que se estableció diferenciar, es decir diferenciaremos los resultados en función del sexo de los sujetos, de su edad, de su mano dominante, de si tienen estudios o de si conocían el mundo de las señales EEG antes de realizar el experimento. Además se realizará una comparación general y una más específica de base de datos obtenida, sin olvidar la comparación de aspectos concretos y de las respuestas obtenidas en los formularios.

6.1.1. Comparativa general por grupos

Esta primera comparación de forma genérica para todos los experimentos simplemente será mostrada en valor numérico y no será comentada ya que los porcentajes están dados sin tener en cuenta las condiciones individuales de cada experimento, además de haber tenido en cuenta a los sujetos cuyos experimentos son susceptibles de haber tenido algún fallo durante el registro de datos y aquellos en los que se han utilizado distribuciones diferentes. En resumen, mostraremos los porcentajes obtenidos teniendo en cuenta todos los experimentos realizados.

En el siguiente punto de este apartado, es decir el 6.1.2, se ha realizado una comparación más exhaustiva y crítica de los resultados comparando, ahí sí, los porcentajes de acierto de los usuarios que realmente deben formar parte de cada grupo, ya que hay sujetos cuyos resultados no deben ser incluidos en las tablas por motivos que ya han sido comentados. De todas formas aunque los resultados que comentemos sean los que entendemos que han sido los obtenidos de forma completamente correcta, tras la realización del proyecto y en conocimiento del proceso de obtención de cada uno, ambos son considerados como experimentos similares y perfectamente ejecutados por lo que las tendencias que muestran ambos apartados son parecidas y por lo tanto las conclusiones finales serán aplicables tanto al siguiente apartado como a este.

A continuación mostramos los valores representados mediante porcentajes de acierto conseguido tanto globalmente como específicamente en cada una de las acciones realizadas para los 5 grupos diferenciados por una característica concreta cada uno de ellos:

Grupo 1: Sexo de los sujetos

	Hombres	Mujeres
Global	43,22%	41,58%
Motor	64,58%	66,20%
Derecha	26,46%	14,48%
Izquierda	45,98%	51,87%
Palabra	56,75%	56,43%

Tabla 40. Comparación promedio Sexo

Grupo 2: Edad de los sujetos

	Jovenes	Adultos
Global	45,28%	39,02%
Motor	69,21%	58,71%
Derecha	32,95%	8,74%
Izquierda	42,85%	54,60%
Palabra	60,65%	50,70%

Tabla 41. Comparación promedio Edad

Grupo 3: Mano predominante de los sujetos

	Diestros	Zurdos
Global	43,65%	40,18%
Motor	64,49%	66,20%
Derecha	23,91%	31,04%
Izquierda	44,73%	38,22%
Palabra	62,21%	51,74%

Tabla 42. Comparación promedio Mano predominante

Grupo 4: Edad de los sujetos

	Con estudios	Sin estudios
Global	45,28%	39,02%
Motor	69,21%	58,71%
Derecha	32,95%	8,74%
Izquierda	42,85%	54,60%
Palabra	60,65%	50,70%

Tabla 43. Comparación promedio Estudios

Grupo 5: Conocimientos señales EEG

	Con EEG	Sin EEG
Global	46,70%	38,01%
Motor	68,23%	57,83%
Derecha	34,94%	5,00%
Izquierda	35,82%	59,77%
Palabra	71,68%	44,97%

Tabla 44. Comparación promedio Señales EEG

6.1.2. Comparativa real por grupos

En este segundo punto se comparan y comentan los resultados que realmente muestran con exactitud la realización de los experimentos para cada grupo de sujetos. Estos resultados han sido calculados a partir de la distribución 1, es decir a partir de las posiciones:

'AF3' 'F7' 'F3' 'FC5' 'T7' 'P7' 'O1' 'O2' 'P8' 'T8' 'FC6' 'F4' 'F8' 'AF4'

De estos valores se sacarán las conclusiones finales del trabajo fin de grado. Podemos comentar con seguridad que los valores expresados a continuación reflejan resultados reales y con suficiente base científica, pues se han filtrados los posibles errores que hayan podido surgir durante la realización de los experimentos en ciertos sujetos asegurando aun con esta criba una base de datos lo suficientemente amplia como para poder afirmar con certeza que los resultados obtenidos son fiables.

A continuación mostramos la comparación a través de tablas con sus gráficas correspondientes de cada uno de los grupos establecidos anteriormente:

• **Grupo 1: Sexo de los sujetos**

	Hombres	Mujeres
Global	45,83%	43,95%
Motor	69,25%	64,47%
Derecha	28,78%	8,97%
Izquierda	51,31%	68,39%
Palabra	56,38%	49,66%

Tabla 45. Comparación promedio Sexo

Podemos observar que tanto hombres como mujeres muestran un porcentaje global de acierto muy parecido, lo cual era esperado. Hay que comentar sin embargo que esta comparación se ha hecho con las medias de un número mucho mayor de hombres que el número de mujeres que realizaron el experimento. En cuanto al resto de valores, podemos comentar que la acción que más ha costado en ambos ha sido la de realizar el movimiento con la mano derecha y sin embargo los porcentajes obtenidos en las otras dos acciones aunque difieren entre sí muestran un porcentaje de acierto bueno para cada uno.



Figura 110. Gráfica de comparación promedio Sexo

• **Grupo 2: Edad de los sujetos**

	Jóvenes	Adultos
Global	53,38%	38,88%
Motor	78,26%	57,84%
Derecha	47,01%	9,52%
Izquierda	45,59%	51,15%
Palabra	69,21%	53,61%

Tabla 46. Comparación promedio Edad

Para este segundo grupo mediante la *Tabla 46* y la *Figura 111* comparamos a los sujetos por el grupo de edad al que pertenecen. Las personas que hemos considerado añadir en el grupo de jóvenes son aquellas menores de 30 años, por lo tanto como adultos se considerarían a los mayores de 30 años.

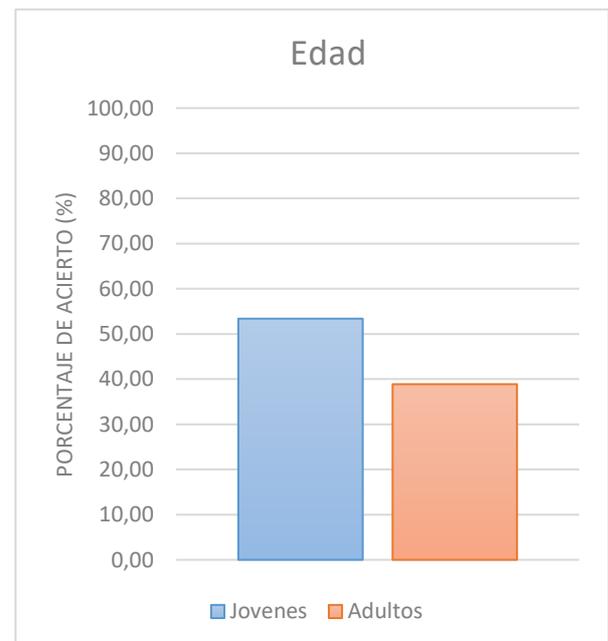


Figura 111. Gráfica de comparación promedio Edad

Tras estudiar los resultados expuestos en el formulario de cada sujeto hemos podido calcular la edad media de cada grupo, siendo la edad media del grupo de jóvenes estudiado de 25,33 años y de 51,83 para el grupo de adultos.

En esta gráfica podemos ver que los jóvenes obtienen un mayor porcentaje de acierto que los adultos, habiendo una diferencia de casi 15 puntos porcentuales lo que se traduce en una gran variación en el porcentaje de acierto de ambos grupos. Si nos fijamos en las acciones podemos observar que el grupo de adultos obtiene un porcentaje muy bajo en la acción de pensar en mover la mano derecha, lo que ha provocado tal diferencia global ya que en la otras dos acciones ambos porcentajes son mantenidos, siendo mayor en el caso del grupo de los jóvenes.

Como se comenta más adelante, estos resultados están influenciados por el resto de características ya que para alguno de los demás grupos se repite la misma tendencia, indicando que es la suma de las diferencias entre las 5 características estudiadas la que hace que la variación de cada uno de estos valores se vea incrementada. Dicho de otra forma, el hecho de que la mayoría de jóvenes sean los que tienen estudios y sea a quién se les ha explicado con más detenimiento el mundo de la EEG ha provocado que esta diferencia se acentúe debido a la suma de las diferencias de estos 3 conjuntos. Pero lo que está claro es que según los resultados obtenidos en esta investigación hay una relación entre la edad de los sujetos y el porcentaje de acierto del experimento.

- **Grupo 3: Mano predominante de los sujetos**

	Diestros	Zurdos
Global	44,86%	40,18%
Motor	67,49%	66,20%
Derecha	26,08%	31,04%
Izquierda	48,80%	38,22%
Palabra	59,03%	51,74%

Tabla 47. Comparación promedio Mano predominante

En este aspecto vemos que apenas hay diferencia de porcentaje de acierto entre diestros y zurdos, viendo que aunque podía sospecharse el hecho de tener un mayor acierto para un grupo de sujetos en una de sus manos y para el otro en la mano opuesta por el hecho de ser contrarios, podemos confirmar que no funciona de ese modo. Aunque se hayan comparados más diestros que zurdos podemos afirmar que no hay diferencia entre ambos.



Figura 112. Gráfica de comparación promedio Mano

Resulta curioso ver que tanto para diestros como para zurdos hay una acción cuyo porcentaje de acierto es mucho menor en comparación con las otras dos. La acción de pensar en mover la mano derecha en general supone una mayor dificultad para todo el mundo sin hacer distinciones a su mano dominante.

- **Grupo 4: Nivel de estudios de los sujetos**

	Con estudios	Sin estudios
Global	53,38%	39,02%
Motor	78,26%	58,71%
Derecha	47,01%	8,74%
Izquierda	45,59%	54,60%
Palabra	69,21%	50,70%

Tabla 48. Comparación promedio Estudios

Este grupo ha sido añadido una vez se han comenzado a ver los resultados ya procesados. Al estudiar los experimentos nos dimos cuenta de que los sujetos que los habían realizado podían diferenciarse muy fácilmente en 2 grupos que justamente estaban provocando la variación de los resultados entre sí. El resto de grupos han visto variadas sus diferencias, no tanto por el motivo que los diferencia sino porque tienen en común que repiten el mismo patrón que este grupo, es decir que los mismos sujetos que son jóvenes y que tienen conocimientos previos de las señales EEG son casualmente los que poseen estudios. Esta coincidencia ha sido la que ha provocado que tanto el grupo 1, como el presente grupo junto con el siguiente tengan tendencias muy parecidas y la diferenciación entre cuál de ellos ha sido el que ha provocado estas coincidencias reside en esta característica. Es decir que la experiencia que me ha dado este proyecto me permite afirmar según los estudios que he realizado que hay una diferencia clara del porcentaje de acierto del experimento entre sujetos que tienen estudios y los que no.



Figura 113. Gráfica de comparación nivel de estudios

- **Grupo 5: Señales EEG**

	Con EEG	Sin EEG
Global	52,95%	38,01%
Motor	75,66%	57,83%
Derecha	42,86%	5,00%
Izquierda	44,33%	59,77%
Palabra	73,51%	44,97%

Tabla 49. Comparación promedio Señales EEG

Siguiendo la lógica descrita en el grupo anterior, vemos una clara diferencia entre los sujetos que han tomado contacto con el mundo de las señales EEG antes de realizar el experimento y los que lo han realizado sin ningún conocimiento.

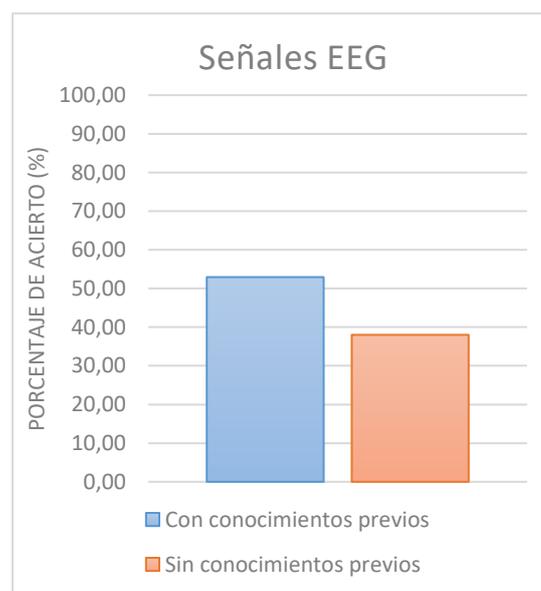


Figura 114. Gráfica de comparación promedio señales EEG

Por experiencia durante la realización de los experimentos es necesario comentar que tal variación de porcentajes está influenciada por la coincidencia de los sujetos pertenecientes a este grupo y al anterior, que en parte ha sido el que ha producido tal variación. Pero para explicar completamente este aspecto es necesario introducir un nuevo concepto que ha sido objeto de estudio en el mundo de las señales de electroencefalograma desde hace ya unos años, este concepto se conoce como *BCI illiteracy*, que en español se podría traducir como “analfabetismo de BCI”. Lo que viene a decir este concepto es que una parte de los usuarios no logran un control adecuado de los dispositivos BCI, es decir que existe una dificultad de aprendizaje en ciertos sujetos que no radica en ninguna característica singular, simplemente hay personas a las que les resulta más complicado la aplicación y control de este tipo de dispositivos, dentro del cual pueden haber diferentes modalidades como pueden ser Selective Sensation (SS) o Motor Imagery (MI). Hoy en día investigaciones científicas [15][16][17] apuntan a que hasta un 30% de las usuarios pueden presentar este tipo de problema.

Sin nos fijamos en los resultados de este quinto grupo, en el que hemos tratado de introducir el mundo de las señales EEG a cierto número de sujetos, se aprecia que tal diferencia entre personas con y sin conocimientos previos de señales EEG se debe en parte a lo comentado al principio y también al concepto BCI illiteracy, que puede ser causante de un aumento de dichas diferencias tal y como apuntan los resultados obtenidos.

Resultados promedio TFG

	Total
Global	46,20%
Motor	68,49%
Derecha	27,88%
Izquierda	50,10%
Palabra	59,95%

Tabla 50. Resultados promedio TFG

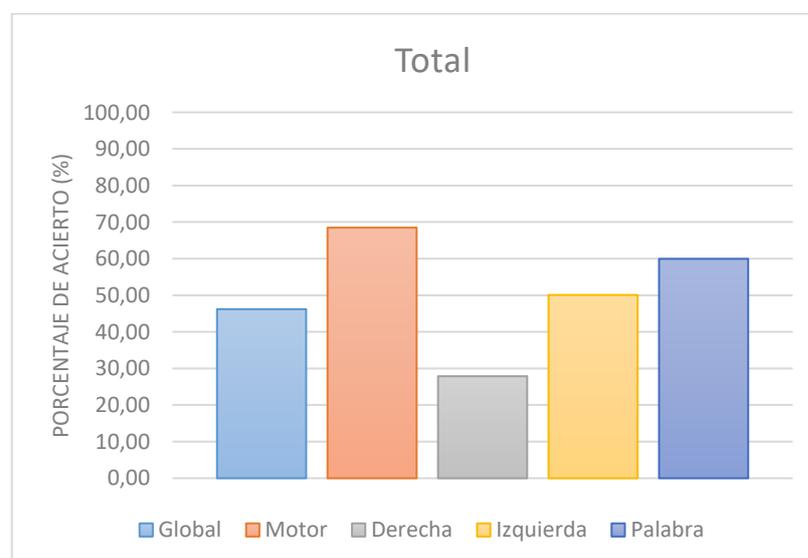


Figura 115. Gráfica de comparación promedio señales EEG

Finalmente podemos comentar los resultados que han sido obtenidos en líneas generales en el presente trabajo de fin de grado. El porcentaje de acierto medio de los experimentos ha sido del 46,20% lo que nos indica un valor bastante aceptable dentro del rango de valores que habíamos visto en otros proyectos relacionados con este tipo de registro de señales EEG.

De entre las 3 acciones posibles se ve una claro descenso en el porcentaje de acierto del pensamiento de mover la mano derecha. Ha sido muy habitual encontrar resultados referidos a esta acción muy bajos en general, por lo que un factor a estudiar en futuras investigaciones es el motivo de este descenso en comparación con el porcentaje de la mano izquierda, puesto que el problema no se encuentra en ambas manos ya que en este segundo caso si se ha obtenido un buen valor. Finalmente vemos que la acción que mejores resultados ha dado ha sido el pensamiento de una palabra. Tendremos que observar que relación tienen estos resultados con los esperados por cada usuario. Esto se puede ver gracias a los formularios que rellenaron al concluir sus respectivos experimentos. Estos resultados los podemos ver en el último apartado de este sexto punto.

Por último, y para concluir este bloque, vamos a comparar los resultados finales obtenidos en nuestro proyecto con los resultados finales obtenidos en otro proyecto de la UPCT en el que también se ha utilizado el dispositivo Emoc. Si recuperamos los valores obtenidos en dicho trabajo final de carrera [1] tenemos que para los 4 experimentos que se realizaron con el mismo dispositivo Emoc, estando los electrodos colocados con la misma disposición, se obtuvieron los siguientes resultados:

Resultados					
Usuario	1	2	3	4	Total
Global	56,47%	44,18%	44,83%	42,03%	46,88%
Motor	84,70%	70,91%	52,37%	75,00%	70,75%
Derecha	18,62%	21,38%	4,83%	82,76%	31,90%
Izquierda	91,95%	55,17%	41,95%	21,26%	52,58%
Palabra	51,72%	53,79%	88,28%	26,21%	55,00%

Tabla 51. Resultados promedio TFG antiguo

Estos resultados fueron obtenidos para una base de datos de 4 personas mientras que los resultados obtenidos en este trabajo han sido desde una base de datos de 15 personas, de las cuales finalmente 12 han sido las incluidas en la comparación para que las características de los experimentos fueran realmente las mismas, siendo estas características tales como la distribución de los electrodos empleada y el número de electrodos utilizado.

Si comparamos el resultado total de este anterior proyecto con los resultados totales que he obtenidos en el presente trabajo de fin de grado tenemos lo siguiente:

Resultados		
TFG	Antiguo	Presente
Global	46,88%	46,20%
Motor	70,75%	68,49%
Derecha	31,90%	27,88%
Izquierda	52,58%	50,10%
Palabra	55,00%	59,95%

Tabla 52. Resultados promedio TFGs

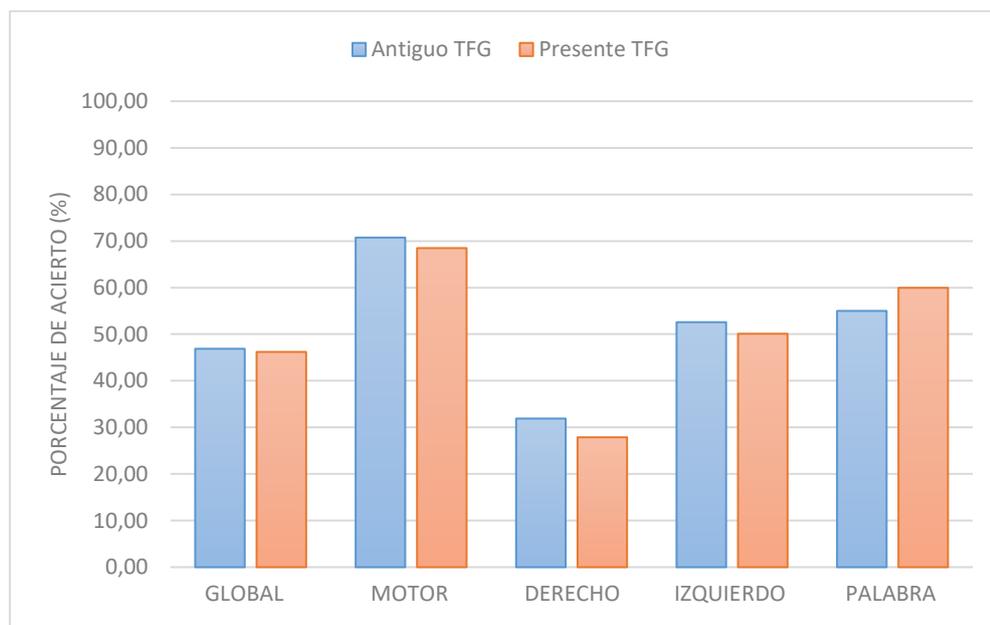


Figura 116. Gráfica de comparación promedio resultados TFGs

Podemos observar como cada uno de los resultados coincide prácticamente en cuanto al rango del valores en los que se encuentra. Las tendencias de cada proyecto son idénticas entre sí y las diferencias entre cada una de las acciones se mantiene, siendo el pensamiento de mover la mano derecha el peor en cada proyecto, le seguiría la mano izquierda y finalmente tendríamos la acción de pensar en una palabra.

Todo esto lo que nos aporta es una seguridad en los resultados obtenidos que gracias a la realización de este proyecto en el que la base de datos se ha ampliado lo suficiente como para entender que los valores obtenidos son representativos de la sociedad ya que albergan a sujetos de todo tipo, ya sean hombres o mujeres, jóvenes o adultos, diestros o zurdos, con estudios sin estudios, etc. Por lo que con este proyecto al comparar los resultados con antiguos proyectos se puede confirmar que los resultados obtenidos son los valores promedio de porcentaje de acierto reales con los que cuenta el dispositivo Emoc. Es decir que para este tipo de distribución los resultados obtenidos, tanto para cada una de las 3 acciones como de forma global, son los que el dispositivo es capaz de registrar, **estableciéndose el porcentaje de acierto general del dispositivo en torno al 46,5%.**

6.1.3. Comparación resultados de aspectos concretos

Para continuar con la comparativa de los resultados obtenidos vamos a estudiar 3 aspectos más que aunque no fueron establecidos como un objetivo principal del proyecto resultará interesante descubrir si influyen a la hora de obtener el porcentaje de acierto en un experimento. Los aspectos a comprobar serían:

- *¿La repetición del experimento en las mismas condiciones por un mismo usuario a lo largo del tiempo hace variar el éxito de los resultados de la prueba?*
- *¿El cambio de distribución de la posición de los electrodos en la malla o la variación en el número de electrodos totales utilizados produce un cambio en el porcentaje de acierto?*
- *¿Realizar el experimento con la batería del dispositivo completamente cargada influye de alguna manera en la tasa de acierto?*

Para contestar a estas cuestiones se realiza cada una de las comparativas punto a punto.

Comparación de resultados para un mismo usuario.

Uno de los aspectos que hemos querido tratar de comprobar de manera práctica es la idea de poder mejorar los resultados con la experiencia del sujeto que los realice, es decir que se ha tratado de comprobar si practicando la ejecución de la prueba y realizando el experimento en repetidas ocasiones por un mismo individuo a lo largo de un periodo de tiempo suficientemente largo como pueden ser semanas se consigue mejorar el éxito de los resultados y obtener así un aumento del porcentaje de acierto.

Para llevar a la práctica y verificar este concepto se ha elegido a un sujeto para que realice la prueba 3 veces, repartidas cada una por un periodo de tiempo de 2 semanas entre sí. El sujeto en cuestión ha sido el usuario número 1 cuyos resultados expuestos en apartados anteriores hacen referencia únicamente a la primera de sus pruebas. Este individuo ha sido sometido al experimento en 3 ocasiones, todas ellas bajo las mismas condiciones, hablamos del mismo modus operandi, la misma distribución en la posición de los electrodos, el mismo número de electrodos empleados y la batería del dispositivo Emoc completamente cargada.

Los resultados obtenidos se muestran a continuación:

Usuario 1

Resultados			
Número	Primero	Segundo	Tercero
Global	54,86%	58,96%	59,84%
Motor	83,59%	83,13%	85,32%
Derecha	70,34%	25,36%	60,84%
Izquierda	10,92%	58,93%	29,27%
Palabra	92,36%	93,11%	95,71%

Tabla 53. Porcentajes Usuario 1

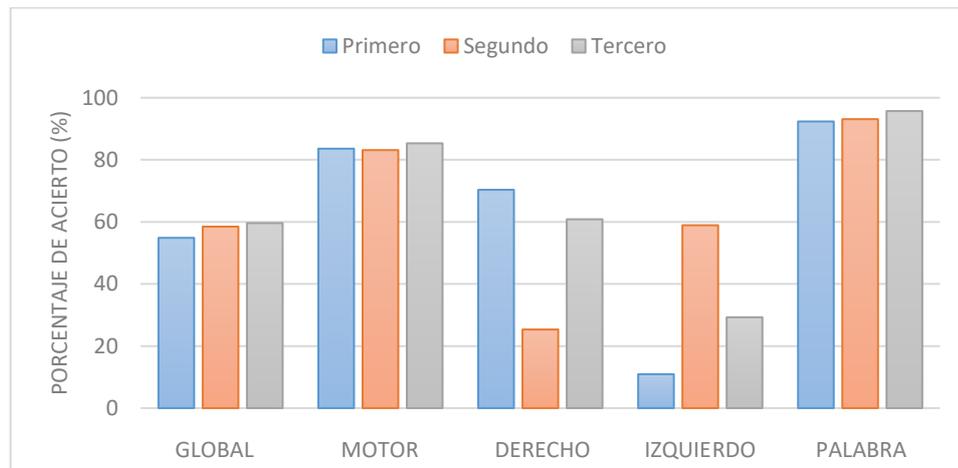


Figura 117. Gráfica de comparación promedio señales EEG

Si estudiamos la comparación a través de los valores obtenidos en la tabla y su representación gráfica hay una clara evidencia de mejora tras repetir la prueba, por lo que en líneas generales estaríamos afirmando que cuanto más se practique el experimento mejores resultados obtendremos puesto que el conocimiento de cómo funcionamiento del prueba y la forma en la que se obtiene un porcentaje de acierto alto favorece la mejora de los resultados.

Si nos fijamos con más detalle podemos ver que tanto el valor global como el de la palabra tienen la misma tendencia, y más concretamente para esta acción vemos que los porcentajes de acierto se afianzan, es decir que un sujeto que realice bien la acción de pensar en una palabra si la sigue practicando seguirá consiguiendo buenos resultados y encima superiores al inicial.

Las acciones de mover las manos por el contrario no muestran ni la misma tendencia ni tampoco un patrón de repetición ya que los porcentajes de acierto de ambas acciones varían según los experimentos. Por lo que a priori no podemos afirmar con estos resultados que exista una relación entre la mejora de los resultados de las acciones de pensar en mover las manos y la práctica del experimento.

Lo interesante de esta comparación es el hecho de poder extrapolar estas deducciones a acciones que necesiten de un movimiento físico además del ejercicio de pensar. Las acciones que requieran mover alguna parte del cuerpo, en nuestro caso las manos, necesitarán de un movimiento motor además del propio pensamiento que transmita la acción al músculo. Esto producirá que el dispositivo Emoc no sea capaz de mejorar el porcentaje de acierto de ese pensamiento en el registro de la señal aunque el individuo practique esa pensamiento en concreto en varias ocasiones, ya que al llevar asociado un movimiento motor las señales de electroencefalografía transmitidas no tendrán los mismos potenciales en cada momento debido a la intensidad con la que se deba realizar dicha acción, lo que producirá un empobrecimiento del éxito con el que un pensamiento es atribuido a una acción motora.

Sin embargo si el pensamiento producido no requiere de un movimiento físico sí que será posible en este caso mejorar el porcentaje de éxito con el que se realice el registro de las señales neuronales ya que como muestran los valores obtenidos para el usuario 1 cuanto más se practica el experimento mejor es el porcentaje de acierto del pensamiento en el caso de la palabra, que además para ese sujeto es muy alto, por lo que la ejecución de la acción requerida será llevada a cabo con éxito.

Otro factor al que hacer mención cuando hablamos de un empobrecimiento de la señal en las acciones que requieren pensar mover las manos es el debido a que estas acciones son controladas principalmente por las zonas centrales del cerebro. Para nuestro experimento la mayoría de electrodos, según la distribución 1, son situados en los lados de la cabeza y no tanto en la zona central por ello el registro de las señales en las zonas encargadas de mover las extremidades es peor, lo que provoca que aunque se practiquen en repetidas ocasiones el experimento el registro de las señales no es tan preciso para las acciones de mover las manos, muestra de ello son los resultados reflejados en la *Tabla 53* y la *Figura 117*.

Estos resultados podrían generalizarse, en el caso de ser comprobados en futuras investigaciones y validar los que se han dado en este proyecto, a otras acciones que no requieran movimientos motores como por ejemplo cambiar los canales de la televisión, apagar las luces de casa, jugar a videojuegos, etc. Ya que de cumplirse esta generalización estaríamos diciendo que las acciones que no requieran un movimiento motor, si no que únicamente requieran el hecho de pensar en la acción a realizar, podrían llevarse a cabo con porcentajes de éxito cercanos al 100%. Además podrían ser entrenados para mejorar dichos porcentajes lo que supondría un completo triunfo para la capacidad de aplicar esta tecnología a un sinfín de posibilidades.

Comparación de resultados en función de la distribución y número de los electrodos empleados.

Al comienzo del presente trabajo se introdujeron los 3 tipos de distribuciones que el código Matlab de Emotiv modificado por Juan Antonio nos permitía emplear para calcular los porcentajes de acierto de un experimento. Estas 3 distribuciones como se explicó eran:

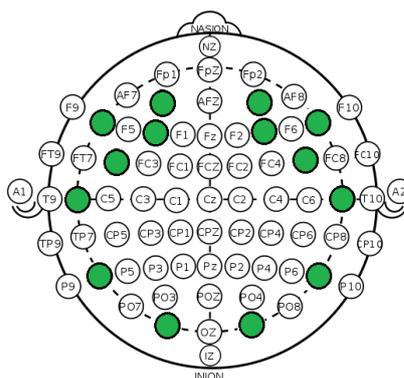


Figura 118. Distribución 1

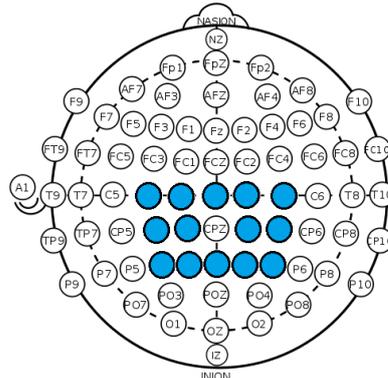


Figura 119. Distribución 2

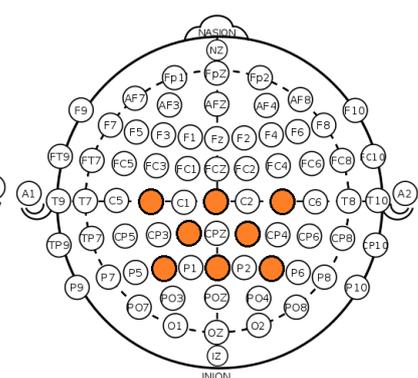


Figura 120. Distribución 3

Las *Figuras 118, 119* y *120* muestran las posibles posiciones de los electrodos, que en cuanto a numeración han sido las siguientes:

- Posición 1
'AF3' 'F7' 'F3' 'FC5' 'T7' 'P7' 'O1' 'O2' 'P8' 'T8' 'FC6' 'F4' 'F8' 'AF4'
- Posición 2
'C3' 'CZ' 'C4' 'CP1' 'CP2' 'P3' 'PZ' 'P4' 'C1' 'C2' 'CP3' 'CP4' 'P1' 'P2'
- Posición 3
'C3' 'CZ' 'C4' 'CP1' 'CP2' 'P3' 'PZ' 'P4'

Al comienzo del proyecto, durante las primeras reuniones, se estableció emplear la distribución 1, siendo ésta además la que estaba activada y cuyas condiciones estaban implementadas para hacer funcionar el código Matlab desde un principio, por lo que a la hora de realizar los experimentos el 80% se han realizado con esta distribución.

Para los casos en los que costaba establecer la conexión entre electrodo y cabeza se prefirió cambiar la distribución para al menos registrar valores con ella y así poder realizar en un futuro la comparativa que se está realizando en este instante, o si finalmente algún electrodo no conseguía conectarse realizar el experimento teniéndolo en cuenta para la comparativa de los resultados en base al número de electrodos utilizados.

Los resultados mostrados en el punto anterior, es decir los resultados “reales del proyecto”, han sido calculados a partir de la distribución 1 y los resultados calculados a continuación son mostrados a partir de la distribución 2 y en base al número de electrodos empleados.

- Experimentos realizados con menor número de electrodos

Los usuarios sobre los que encontramos problemas para la correcta conexión de todos los electrodos fueron los usuarios 6 y 12. A continuación recuperamos los resultados obtenidos para cada uno:

Resultados	
Global	19,44%
Motor	52,92%
Derecha	14,48%
Izquierda	12,07%
Palabra	33,33%

Tabla 54. Porcentajes usuario 6

Matriz de confusión		Predicho		
		Izquierda	Derecha	Palabra
Real	Izquierda	21	44	109
	Derecha	111	21	12
	Palabra	40	56	48

Tabla 55. Matriz de confusión usuario 6

Resultados	
Global	30,24%
Motor	31,53%
Derecha	0,00%
Izquierda	0,00%
Palabra	97,22%

Tabla 56. Porcentajes usuario 12

Matriz de confusión		Predicho		
		Izquierda	Derecha	Palabra
Real	Izquierda	0	5	169
	Derecha	1	0	144
	Palabra	4	0	140

Tabla 57. Matriz de confusión usuario 12

Podemos observar a simple vista que ambos experimentos han sufrido una disminución importante en el porcentaje de acierto del experimento. En concreto para el caso del usuario 12 cabría pensar que durante el procesado de los valores aún parámetro no ha sido introducido correctamente o simplemente no ha sido ejecutado como debía y ha producido una variación impropia de los valores que veníamos viendo en el resto de resultados.

Si realizamos la comparación entre los valores reales medio y éstos podremos ver más claramente esta disminución de la que hablamos:

Resultados		
Electrodos	Más	Menos
Global	46,20%	24,84%
Motor	68,49%	42,23%
Derecha	27,88%	7,24%
Izquierda	50,10%	6,04%
Palabra	59,95%	65,28%

Tabla 58. Comparación porcentajes del número de electrodos.

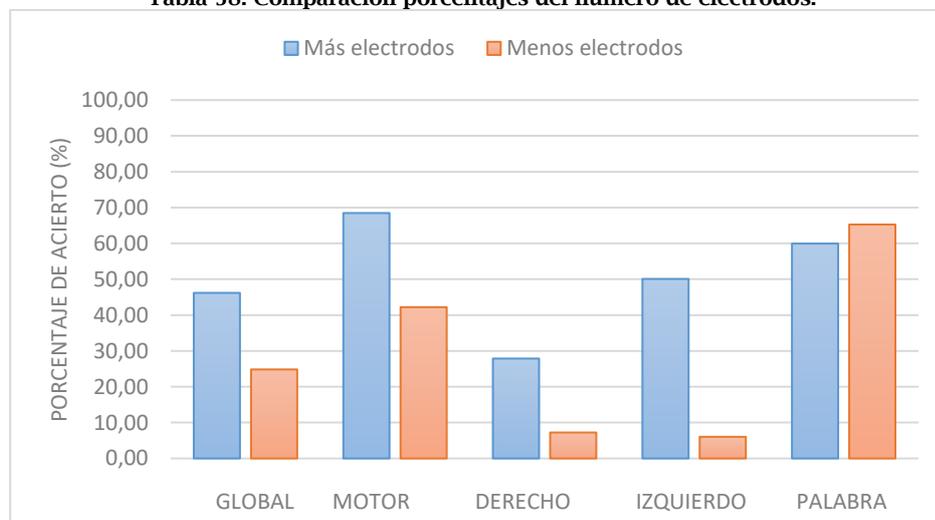


Figura 121. Gráfica de comparación promedio número de electrodos

No podemos confirmar que el porcentaje de acierto disminuya al quitar electrodos a la hora de realizar el experimento ya que esta para esta comparación, aunque sean ciertos los valores que estamos presentando, no sabemos a ciencia cierta si la ejecución o el ajuste erróneo del código Matlab ha provocado que se modifiquen los resultados. Aunque dando respuesta a esta cuestión según nuestra experiencia podemos decir que sí se produce una pérdida en el porcentaje de acierto registrado de un experimento si este experimento es llevado a cabo con menor número de electrodos en el actual dispositivo Emoc.

- Experimentos realizados con la distribución 2.

El único usuario sobre el que se aplicó una distribución distinta a la 1 fue el usuario 14. Sus resultados se muestran a continuación:

Resultados	
Global	37,58%
Motor	68,90%
Derecha	0,00%
Izquierda	1,00%
Palabra	0,00%

Tabla 59. Porcentajes usuario 14

Matriz de confusión		Predicho		
		Izquierda	Derecha	Palabra
Real	Izquierda	174	0	0
	Derecha	145	0	0
	Palabra	144	0	0

Tabla 60. Matriz de confusión usuario 14

No hay que estudiar demasiado dichos valores para ver que de algún modo el procesado de los valores ha fallado puesto que si miramos la matriz de confusión final podemos darnos cuenta en seguida de que presenta resultados que podemos dar por erróneos. Esto lo podemos asegurar ya que el código Matlab referido al procesado así nos lo hizo saber a través de sentencias que mostró casi al final de su ejecución. Estas sentencias fueron mostradas por la ventana de comandos:

“ERROR: Dimensión del vector a aprender”

Tras esto los valores mostrados por pantalla fueron los recogidos en las 2 tablas anteriores. Para la aplicación de dicho procesado se modificó el código desactivando los comandos que hacían referencia a las características de la distribución 1 para activar los de la distribución 2.

```
%current_sensors = {'AF3' 'F7' 'F3' 'FC5' 'T7' 'P7' 'O1' 'O2' 'P8' 'T8' 'FC6' 'F4' 'F8' 'AF4'};
current_sensors = {'C3' 'CZ' 'C4' 'CP1' 'CP2' 'P3' 'PZ' 'P4' 'C1' 'C2' 'CP3' 'CP4' 'P1' 'P2'};
%current_sensors = {'C3' 'CZ' 'C4' 'CP1' 'CP2' 'P3' 'PZ' 'P4'};
```

No podemos hacer una valoración sobre la comparativa de los porcentajes de acierto de los resultados variando la distribución utilizada ya que para la distribución 2 estos porcentajes no han sido correctamente obtenidos. De todos modos hubiera servido para visualizar a groso modo las diferencias ya que se trataba de una comparación de número de usuarios 12 a 1, por lo que no le damos más importancia.

Comparación de resultados en función del nivel de batería del dispositivo.

En una de las reuniones iniciales del presente trabajo Juan Antonio me comentó que cabía la posibilidad de que los experimentos obtuvieran mejores porcentajes de acierto si se realizaban con la batería completamente cargada. Me comentaba que esta posibilidad surgía de algunas publicaciones que había leído sobre la materia, por lo que aunque no se estableció como objetivo me pareció interesante comprobar si eran ciertas estas afirmaciones desde mi experiencia personal una vez obtuviera los resultados de todos los usuarios. Este estudio se llevado a cabo y a continuación mostramos los resultados con su respectiva comparación:

Nivel carga	Usuarios
Alto	1-2-5-7-9-12-15
Bajo	3-4-6-8-10-11-13-14

Tabla 61. Nivel de carga de los usuarios.

Descartando del promedio los experimentos cuyos resultados fueron realizados en diferentes condiciones entre sí y quedándonos con el 80% de ellos, es decir con los que a ciencia cierta se realizaron de forma óptima con las mismas características, obtenemos que los porcentajes de acierto para el nivel alto y bajo de la carga de la batería son:

Resultados		
Nivel carga	Alto	Bajo
Global	52,52%	39,89%
Motor	74,52%	62,46%
Derecha	38,51%	17,24%
Izquierda	44,45%	55,75%
Palabra	76,39%	43,52%

Tabla 62. Comparación porcentajes nivel de batería.

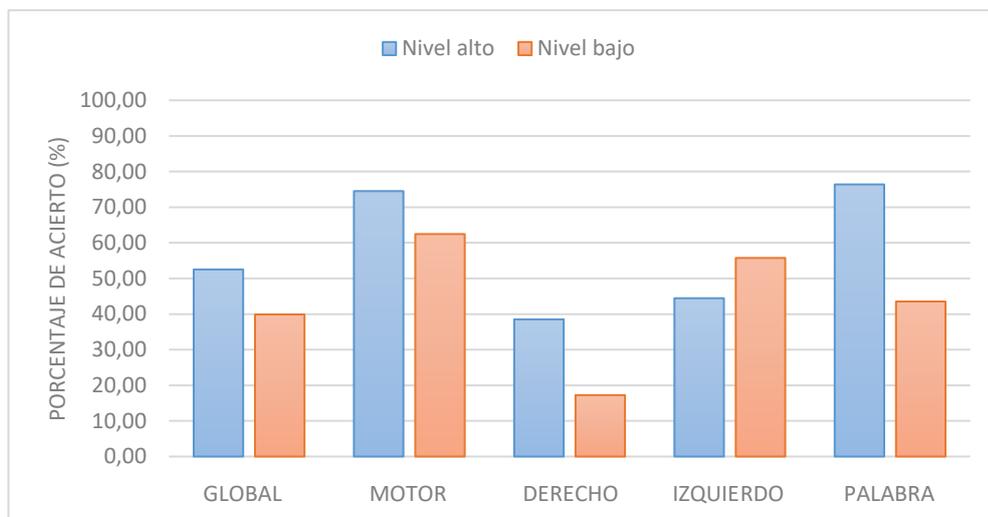


Figura 122. Gráfica de comparación promedio nivel de batería.

A través de la tabla podemos ver como existe una diferencia real entre los experimentos realizados con la batería completamente cargada y los que no. Por lo que efectivamente Juan Antonio estaba en lo cierto, en cuanto a mis resultados, al comentarme que se obtenía un porcentaje de acierto mayor si los experimentos son realizados con la batería cargada.

Diferenciando cada pareja de columnas en el gráfico podemos observar como únicamente para la acción de mover la mano izquierda se obtiene un porcentaje mayor pero como ya hemos comentado en el punto anterior, las acciones que conllevan un movimiento físico varían mucho más y son más difíciles de registrar en cuanto al mismo patrón. De forma un poco más general podemos ver como **el porcentaje global medio de los experimentos realizados con la batería cargada es del 52,52% frente al 39,89% de los experimento con la batería baja**. Es decir que el nivel de carga de la batería es un factor a tener en cuenta a la hora de realizar los experimentos

Una vez hemos concluido la comparación de todos los resultados y aspectos que habíamos considerado desde un inicio estudiar vamos a conocer si todos estos valores y deducciones a las que hemos llegado a través de estas comparativas se ven reflejados en las opiniones que los sujetos dejaron sobre los experimentos realizados a través del formulario que se les entregó tras finalizar su correspondiente prueba.

6.1.4. Comparación resultados formularios

A continuación vamos a mostrar el porcentaje de elección de las respuestas de los usuarios que realizaron el experimento. Con estas respuestas buscamos ver si hay relación entre los valores reales obtenidos y las opiniones de los usuarios, además de conocer la satisfacción y las recomendaciones de los sujetos en relación al experimento para así conocer tanto los puntos débiles como los fuertes de cara a una futura optimización de los pasos a realizar.

Recuperamos las respuestas de cada usuario a todas las preguntas y sacamos el prometido de respuesta elegida de cada una. La primera parte de información personal no es necesario mostrarla, simplemente ha servido para categorizar a los sujetos y conocer las características personales de los mismos de cara a poder obtener conclusiones de cada uno de los 5 grupos que se han establecido al comienzo de este sexto apartado. En cuanto al segundo bloque de preguntas el conjunto de sujetos que ha realizado el experimento ha mostrado su opinión sobre la comodidad del experimento. Las respuestas más votadas a cada pregunta han sido, en niveles de porcentaje:

Bloque 2. Comodidad Emoc

¿Le ha parecido cómodo el procedimiento de colocación del dispositivo BCI?

1. Muy incómodo **0%** 2. Incómodo **7%** 3. Normal **60%** 4. Cómodo **33%** 5. Muy cómodo **0%**

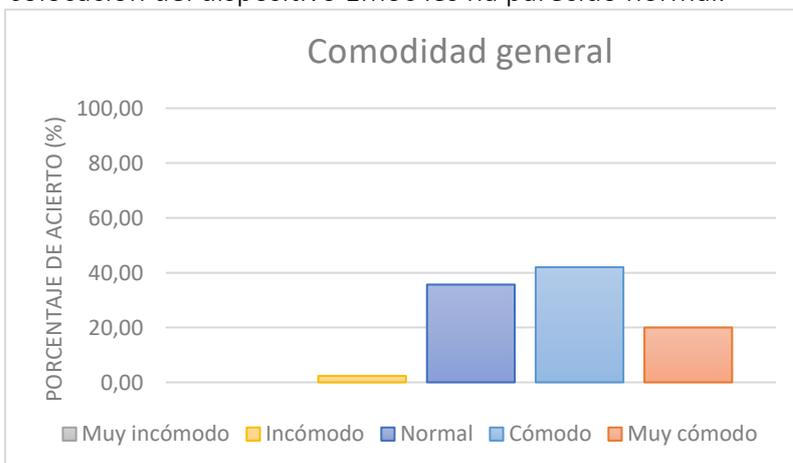
¿Le ha resultado molesto realizar los experimentos con el casco puesto?

1. Muy molesto **0%** 2. Molesto **0%** 3. Normal **40%** 4. Cómodo **40%** 5. Muy cómodo **20%**

¿Se ha sentido a gusto y relajado en la posición en la que ha realizado el experimento?

1. Muy incómodo **0%** 2. Incómodo **0%** 3. Normal **7%** 4. Cómodo **53%** 5. Muy cómodo **40%**

Podemos observar que, en lo que a la comodidad durante la realización de la prueba, se refiere la mayoría de los usuarios ha encontrado el experimento cómodo en líneas generales. La colocación del dispositivo Emoc les ha parecido normal.



Realizar el experimento con el casco no ha supuesto ningún tipo de problema y casi la totalidad de las personas han encontrado cómodo o muy cómodo realizar el experimento en la postura elegida para ello, es decir sentado, con la espalda apoyada en el respaldo y las manos descansando cada una sobre sus correspondientes piernas.

Figura 123. Gráfica de comparación comodidad Emoc

Si evaluamos en líneas generales los resultados obtenidos por los usuarios podemos deducir que la comodidad del experimento es satisfactoria y por lo tanto mantener este modus operandi para futuras investigaciones, con este u otro dispositivo que sea utilizado para el estudio de señales EEG.

En cuanto a la dificultad de los experimentos los sujetos que realizaron la prueba contestaron lo siguiente:

Bloque 3. Dificultad de los experimentos

¿Le ha parecido difícil realizar los experimentos?

1. Muy fácil **7%** 2. **Fácil** **73%** 3. Normal **20%** 4. Difícil **0%** 5. Muy difícil **0%**

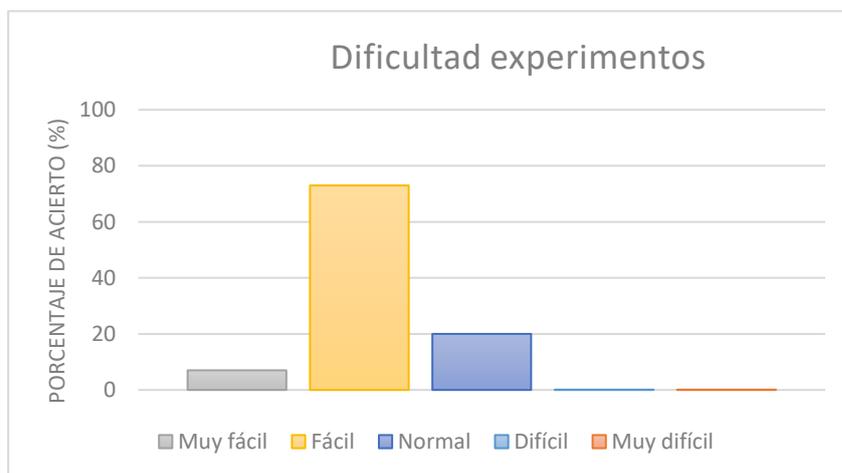


Figura 124. Gráfica dificultad experimentos

¿Le ha generado cansancio la realización del experimento?

1. Ninguno **20%** 2. Muy poco **7%** 3. **Un poco** **66%** 4. Bastante **7%** 5. Excesivo **0%**

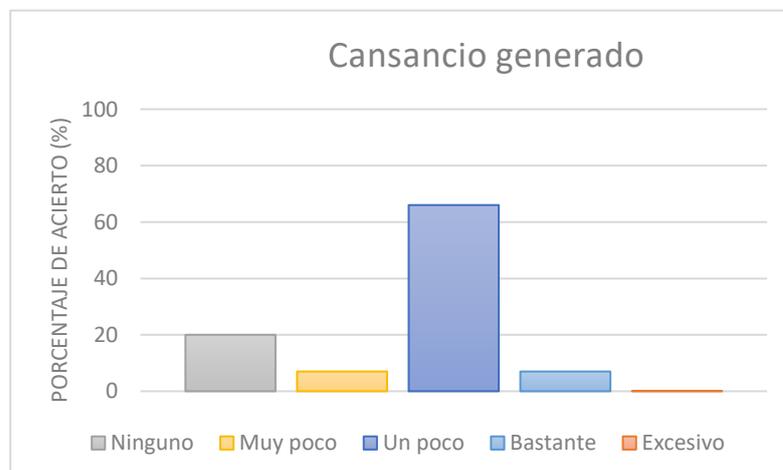


Figura 125. Gráfica cansancio general

¿El tiempo de descanso entre cada sesión ha sido el correcto?

1. Demasiado corto **0%** 2. Corto **0%** 3. **Adecuado** **80%** 4. Largo **20%** 5. Demasiado largo **0%**

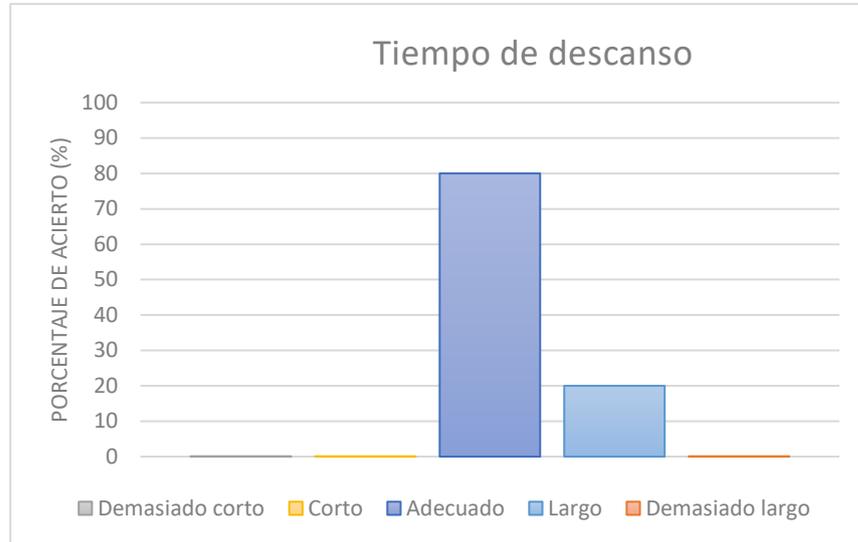


Figura 126. Gráfica tiempo de descanso

¿Considera que la realización del experimento ha sido satisfactoria en líneas generales?

1. Para nada **7%** 2. Un poco **0%** 3. Normal **40%** 4. **Bastante** **53%** 5. Completamente **0%**

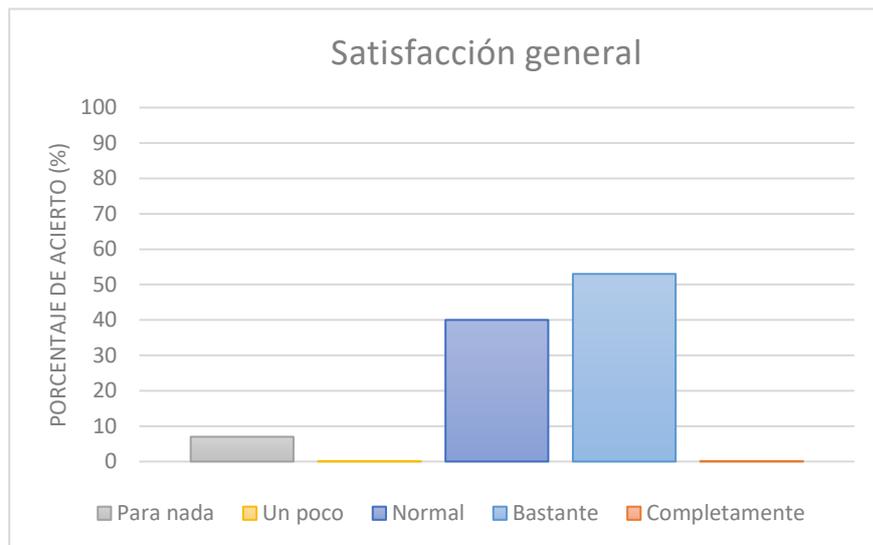


Figura 127. Gráfica satisfacción general

¿En cuál de los tres experimentos le ha resultado más difícil concentrarse?

Mano derecha 40%

Mano izquierda 40%

Palabra 20%



Figura 128. Gráfica dificultad acción

En líneas generales las respuestas dejan ver que la dificultad del experimento es baja, siendo para la gran mayoría de los encuestados sencillo realizar las 3 acciones propuestas. A parte del hecho de encontrar fácil la realización del experimento los usuarios han sentido un poco de cansancio a la hora de llevar a cabo las 4 sesiones, por este motivo entre sesión y sesión se propuso un tiempo de 5-10 minutos, estableciéndose en 5 para la totalidad del grupo. Este tiempo de descanso en su gran mayoría ha sido evaluado como adecuado en cuanto a duración por lo que podríamos decir que 5 minutos es el tiempo idóneo para cada descanso si extrapolamos los resultados a la realidad.

Concluyendo ya con las respuestas de los encuestados, la mayoría consideró la realización del experimento como bastante satisfactoria por lo que podemos entender que se alcanzó una buena preparación y ejecución de la prueba, siendo el entorno en el que se realizaron el adecuado, con el silencio adecuado y sin demasiadas distracciones externas.

Por último se les preguntó por la acción en la que habían encontrado más dificultad para concentrarse, de todas las respuestas recogidas se ve una clara evidencia en el hecho de pensar en mover una mano, pues sin realizar ninguna distinción entre mano derecha o mano izquierda, el 80% de los encuestados eligió esta opción. Si tratamos de deducir el motivo de esta respuesta veremos que está relacionada con el hecho de tener que realizar una acción que requiera el movimiento real de alguna parte del cuerpo, ya que por el contrario la acción pensar en una palabra que comience por determinada letra no requiere de ningún esfuerzo físico si no que únicamente requiere un esfuerzo mental y ha sido la menos votada.

En la parte inferior de este cuestionario se ofreció la posibilidad a cada persona que realizó el experimento de dejar algún comentario personal o de comentar qué aspectos podríamos mejorar según ellos de cara al futuro. La forma en la que se presento está parte fue la siguiente:

“Para finalizar nos gustaría saber globalmente qué le ha parecido la realización del experimento y qué aspectos podríamos mejorar de cara al futuro:

.....



La gran mayoría no vió la necesidad o prefirió no escribir nada pero entre aquellos que si lo hicieron y entre los que compartieron su opinión conmigo una vez acabado el experimento dejaron comentarios en su gran mayoría que se pueden resumir como los siguientes:

- *“Se debería mejorar el dispositivo para que sea capaz de realizar el experimento sobre sujetos con el pelo largo sin tanta dificultad.”*
- *“Mejorar la conexión entre cabeza y casco ya que cuesta que los sensores se pongan en verde todos.”*
- *“Cambiar la tela de la malla por una más resistente y que se fije mejor a distintos tamaños de cabeza, ya que a personas con la cabeza pequeña resulta muy difícil conseguir conectar todos los electrodos.”*
- *“Colocar electrodos secos que no necesiten de aplicación de geles para que el experimento se realice más rápido, sea más sencillo prepararlo y cuando termine no sea necesario tener que lavarse la cabeza para quitarse bien el gel.”*

Hay ciertos factores que podemos deducir al observar las ideas generales que los encuestados realizaron al acabar los experimentos. Entre estas ideas se encuentra el hecho de mejorar la malla para adaptarla a todas las cabezas ya que no es coherente que una única malla tenga que ser usada en sujetos con tamaños de cabezas completamente distintos, es el caso de chicas jóvenes y hombres adultos, donde se encuentra la mayor diferencia. A parte de cambiar la malla por el motivo que acabamos de exponer también se debería de cambiar el material del que está hecha debido a que en los bordes la tela tiende a estirarse y al no ser completamente elásticas ésta pierde fijación a la cabeza y capacidad de sujeción de los electrodos. Debido a las sobretensiones sobre la misma que se ejercen para ajustarla a la forma de cada cabeza se provoca que con el paso del tiempo y del uso el material del que está hecho sobrepase su módulo elástico, provocando un camino de no retorno a su posición inicial.

Otro aspecto que ha sido más que comentado ha sido el hecho de tener que utilizar geles en la cabeza. Varios usuarios han comentado que no utilizarían el casco si tuvieran que aplicarse un gel cada vez que necesitasen usar el dispositivo y otro grupo de usuarios directamente ha rechazado realizar el experimento simplemente por el hecho de necesitar de la aplicación de dicho ge. Por lo que entendemos que es más que necesario hacer el cambio a sensores secos, ya que se mejoraría la usabilidad del dispositivo y comodidad con la malla puesta.

El último comentario al que haremos referencia ha sido el repetido por personas con el pelo largo de buscar una solución a los sensores para que éstos logren conectar cabeza y electrodos en casos como el suyo ya que la dificultad de aplicación de la prueba es mucho mayor en este tipo de usuarios.

6.2. Discusión del trabajo realizado

Una vez comparados entre sí todos los resultados obtenidos en la base de datos generada en este proyecto vamos a discutir el trabajo realizado y la relación que tiene éste con los resultados y comparaciones finalmente obtenidas, y con ello se verá la relación que tienen los resultados obtenidos con el trabajo realizado durante todo el proyecto.

6.2.1. Discusión de las tareas principales

Primera tarea: Búsqueda bibliográfica

Se han llevado a cabo dos búsquedas bibliográficas en este proyecto. En ellas se ha tratado de comparar los dispositivos utilizados para el registro e investigación de señales EEG sin exceder un precio superior a los 1000€. Además se ha tratado de comparar los distintos tipos de electrodos secos que las empresas dedicadas a este mundo de la electroencefalografía ofertan.

Realizadas ambas comparativas y teniendo en cuenta todas las características estudiadas referentes a cada dispositivo, de forma personal y con la experiencia que me ha dado esta investigación, recomendaría adquirir el dispositivo *Emotiv Insight* dado su bajo coste, unido a su capacidad y facilidad de uso, gracias a sensores secos que no necesitan aplicación de ningún gel que mejore la conexión y que junto a la calidad de las señales registradas y la posibilidad del uso de los SDK de los que dispone Emotiv hacen de este dispositivo una de las mejores opciones para el uso que la Universidad Politécnica de Cartagena le quiere dar, es decir la investigación de las señales EEG.

En cuanto a los sensores, de entre todos los ejemplos estudiados hay uno cuyas prestaciones ya destacan entre los demás, motivo por el cual es de los más conocidos en el uso de electrodos para la captación de señales de encefalograma. Este electrodo es del tipo *Dry sensor*, es decir de tipo seco, y es conocido con el nombre de *g.Sahara*.

Segunda tarea: Desarrollo metodología.

Se ha llevado a cabo el desarrollo del procedimiento empleado en cada uno de los experimentos de modo que todos los resultados obtenidos fueran bajo las mismas condiciones. Ésto nos ha permitido realizar el proyecto con la certeza de que los valores finales han podido ser comparados entre sí de forma directa y sin la posibilidad de que éstos estuvieran alterados por el modo operandi llevado a cabo durante la realización y obtención de la base de datos.

También merece una mención especial el hecho de haber podido comprobar, con el éxito de los resultados finales y los formularios empleados, que la metodología utilizada es correcta ya que tanto los porcentajes generales de cada acción así como las características del experimento han obtenido muy buenos resultados en lo que a valores finales y opinión de los usuarios se refiere. Por lo que podría establecerse esta metodología para futuras investigaciones.



Tercera tarea: Realización de la base de datos

Desde un principio se estableció en 20 el número de experimentos a realizar sobre diferentes sujetos para conseguir así una base de datos lo suficientemente amplia que nos dotara de la seguridad en los resultados que finalmente obtendríamos. Todos estos experimentos fueron realizados pero finalmente solo 15 de ellos consiguieron terminarse con éxito, ya que debido a diferentes factores como son el tamaño de la cabeza y la cantidad de pelo de un individuo provocaron que los electrodos no establecieran la conexión correctamente y todo ello terminó provocando un fallo en la calidad de conexión de los sensores, siendo comprobado todo esto a través de una aplicación de *Emotiv* denominada *Panel Control*.

El resto de los 15 experimentos consiguió realizarse sin más complicaciones y la ejecución de proceso para llevar a cabo lo que es la prueba en sí no dio ningún problema. Es un experimento bastante sencillo de preparar una vez se ha realizado en varias ocasiones. El tiempo de preparación ha estado en torno a los 20 minutos, lo que es la realización en sí sobre los 40 minutos y la limpieza del dispositivo en torno a unos 20 minutos si se hace cuidadosamente, que ha sido como se ha realizado. Por lo que es un proceso, desde el inicio hasta su final, bastante largo y ello implica que se necesiten conocer los pasos para no alargarlo.

La disposición de electrodos que no necesitasen de la aplicación de ningún gel provocaría que el tiempo se redujera drásticamente, evitando apenas la preparación y limpieza, lo que supondría una reducción del tiempo en la mitad del actual.

A la conclusión de los experimentos hay que comentar que los geles que fueron facilitados junto con el dispositivo, tanto para su uso en la mejora de la conexión como para la limpieza de los electrodos, han sido agotados durante la realización de las pruebas por lo que de cara a futuras investigaciones con electrodos que precisen de geles de este tipo sería necesario que se volvieran a adquirir.

También es necesario comentar que debido al uso de la malla en todos y cada uno de los sujetos tras todo el tiempo, el ajuste personal para cada cabeza y la correspondiente limpieza al final de cada experimento, ha provocado un pequeño estiramiento de la parte delantera de la malla que ha hecho que pierda fijación, fruto del uso repetido que se le ha dado.

Cuarta tarea: Procesamiento de los ficheros

Todos los ficheros de datos obtenidos en los experimentos han sido preprocesados y procesados sin problemas y con ello se han obtenido los porcentajes de acierto y la matriz de confusión de cada sujeto. Este objetivo se ha llevado a cabo sin contratiempos gracias a las reuniones pertinentes en las que Juan Antonio Martínez León y la dirección de este proyecto han mostrado su ayuda con las dudas que iban surgiendo, por lo que se ha podido completar cada paso y con ello obtener finalmente los resultados buscados.

El tiempo de preprocesamiento ha estado de media en torno al minuto para cada grupo de archivos de cada sujeto y una vez preprocesados dichos ficheros el tiempo de procesamiento final ha estado en torno a las 6 horas que ha necesitado cada experimento para ejecutarse correcta y completamente.

Quinta tarea: Estudio y comparación de los resultados.

Una vez hemos dispuesto de todos los resultados de los experimentos realizados en este proyecto hemos hecho una diferenciación en ellos ya que en primer lugar hemos sacado la media de los porcentajes de acierto teniendo en cuenta todos los experimentos realizados y en segundo lugar hemos descartado aquellos que consideramos que han podido sufrir un error, ya sea por los valores finales mostrados o directamente porque el código Matlab nos ha comunicado un posible error.

Para este segundo caso ha sido para el que hemos desarrollado todas las comparaciones ya que hemos entendido que la base de datos sigue siendo suficientemente grande, situándose en 12 personas, como para obtener resultados que realmente muestren la diferenciación de las características que realmente queremos mostrar.

Estas características que diferencian a los sujetos que han realizado el experimento se han establecido en 5 tipos: Tipo de sexo, edad, mano predominante, nivel de estudios y conocimiento previo de las señales EEG. Las conclusiones a las que hemos llegado en cada uno de estos 5 grupos ha sido la siguiente:

- En función del sexo: ***No existe diferencia alguna entre el porcentaje de acierto obtenido entre hombres y mujeres.*** El promedio de los resultados muestra un porcentaje global de acierto del 45,83% en hombres frente al 43,95% en mujeres por lo que podemos concluir en que no existe diferencia entre unos y otros.
- En función de la edad: Existe una diferencia en los resultados entre jóvenes y adultos que está influenciada por otra de las características estudiadas ya que las personas que son catalogadas dentro del grupo jóvenes también presentan estudios universitarios mientras que los adultos carecen de ellos. Esta coincidencia ha provocado que la variación que existe entre ambos se acentúe, situándose en un porcentaje de acierto global para el caso de los jóvenes del 53,38% frente al 38,88% en adultos. ***En conclusión, sí existe diferencia entre jóvenes y adultos pero los valores están acentuados además por el nivel de estudios.***
- En función de la mano dominante: De los experimentos realizados se puede obtener la evidencia de que ***no existe diferencia entre diestros y zurdos*** ya que sus resultados muestran un porcentaje de acierto del 44,86% en las personas cuya mano dominante es la derecha y un 40,18% para la izquierda. La pequeña diferencia que existe puede haberse visto agrandada por el número de personas diestras estudiadas en comparación con las zurdas. Para este caso podía sospecharse el hecho de tener un mayor porcentaje de acierto para un grupo de sujetos en una de sus manos y para el otro en la mano opuesta por el hecho de ser contrarios, pero podemos confirmar que no funciona de ese modo ya que ambos tienen un porcentaje de acierto superior en la misma mano.



- En función del nivel de estudios: Queda demostrado que para aquellas personas con estudios el porcentaje de acierto que presentan es mayor que las que carecen de ellos, situándose ambos valores en un 53,38% para el primer grupo y un 39,02% para el segundo. ***Por lo tanto podemos concluir que el nivel de estudios es un factor que afecta directamente al éxito de los resultados obtenidos.***
- En función del conocimiento previo de las señales EEG: Al igual que sucede con el factor de la edad, este grupo presenta una diferencia en los valores de las personas que no tienen conocimientos previos del mundo de la encefalografía y las que sí, pero estos valores están directamente influenciados por el nivel de estudios de cada sujeto ya que en la mayoría de los casos coinciden ambas características, además de ello el concepto *BCI illiteracy*, que ha sido explicado anteriormente también produce una variación en los resultados. En valores numéricos, se ha obtenido un porcentaje del 52,95% de acierto para aquellas personas con conocimientos previos de las señales EEG y un 38,01% para las que no presenta dichos conocimientos. Por lo que ***en base a los resultados sí existe diferencia entre un grupo y otro pero la experiencia personal tras haber preparado todos los experimentos nos que realmente que los valores están acentuados por el factor del nivel de estudios de cada sujeto y el concepto BCI illiteracy.***

Conclusiones generales

Finalmente podemos evaluar todos los experimentos realizados de una forma global gracias a los valores promedio obtenidos. Estos valores nos indican un porcentaje de acierto global de la media de experimentos realizados del 46,20%. No es un porcentaje de acierto extremadamente alto pero para este tipo de dispositivos no suelen encontrarse valores muy elevados por lo que podemos decir que se cumplen las expectativas del dispositivo.

Respecto a las acciones que se han realizado en cada experimento se ha obtenido un 27,88% de porcentaje de acierto para la acción de pensar en mover la mano derecha, un 50,10% para la mano izquierda y un 59,95% para la acción de pensar en una palabra. Estos valores muestran 2 claras evidencias, la primera es que ***las acciones que requieren un movimiento motor, además de la propia acción de pensar, conllevan una pérdida del porcentaje de acierto*** ya que como podemos ver, las acciones que implican mover las manos poseen un porcentaje inferior al caso de la palabra donde solo se requiere de producir el pensamiento en sí, y la segunda evidencia reside en que ***el porcentaje de acierto de la acción de pensar en mover la mano derecha es claramente inferior al de la mano izquierda y aún más si lo comparamos con la acción de pensar una palabra.*** Esto implica que hay un factor que hace que el porcentaje de acierto de la mano derecha sea mucho menor al resto, este motivo podría ser simplemente la forma en la que nuestro encéfalo trabaja o algún fallo en la construcción del dispositivo Emoc, cosa poco probable ya que en anteriores trabajos en la UPCT sobre las señales EEG se demostró que tanto para Emoc como para Epoc+ el porcentaje de acierto de la derecha se ve reducido drásticamente si lo comparamos con la otra mano. Por lo que de cara a futuras investigaciones sería interesante descubrir cuál es el motivo por el que la acción de pensar en mover la mano derecha es muy inferior al pensamiento de mover la mano izquierda y al de pensar una palabra.

Estas conclusiones a las que hemos llegado están fundamentadas por la investigación realizada en este proyecto sobre una base de datos amplia por lo que podemos sentir la seguridad de que las conclusiones obtenidas son correctas. Pero si pudiera pensarse que no es el caso y que están mal tenemos la certeza del éxito de este estudio al haberlas comparado con otros estudios realizados por compañeros de la UPCT en el que se han obtenido resultados finales prácticamente idénticos en todos y cada uno de los puntos estudiados en este trabajo de fin de grado por lo que, ya para finalizar, la experiencia en este ámbito nos da cierta garantía.

6.2.2. Discusión de subobjetivos

Una vez cumplidos los objetivos principales del proyecto se ha tratado de ampliar la investigación a través de la comparación de información que nos ha permitido obtener varias conclusiones más que, aunque no se habían exigido al comienzo del trabajo de fin de grado, han resultado ser interesantes de verificar y comprobar.

1. *Comprobación de la mejora en el porcentaje de acierto tras la continuada práctica del experimento en un mismo usuario.*

Se ha querido comprobar si realizando el mismo experimento sobre un usuario en repetidas ocasiones el porcentaje de acierto del experimento mejoraba o no. Tras realizar la comparación de resultado podemos confirmar que ***sí se produce una mejora conforme se practica el experimento***. Aunque hay que hacer una diferenciación entre las diferentes acciones ya que para aquellos pensamientos que se centren en acciones que requieran un movimiento motor de alguna parte del cuerpo, como en nuestro caso las manos, el porcentaje de acierto no conlleva una mejora con la práctica y sin embargo si la acción solo requiere del pensamiento para llevarse a cabo, como por ejemplo el pensamiento de una palabra, que no conlleva ningún movimiento de algún músculo, entonces sí que se puede mejorar el porcentaje de acierto de ese pensamiento.

2. *Comprobación de la mejora del porcentaje de acierto variando la distribución de la posición y el número de electrodos utilizados en un estudio.*

Aunque se ha tratado de comprobar este aspecto en el proyecto ***no se ha podido concluir la existencia de una relación directa entre ambos aspectos y el porcentaje de acierto de las respuestas***, ya que para los sujetos en los que se ha variado la disposición de los electrodos en la cabeza y en los que se ha reducido el número de los mismos utilizados en el experimento se han obtenido resultados que han podido sufrir una alteración en sus valores, fruto de los diferentes problemas expuestos a lo largo del proyecto.

3. *Comprobación de la mejora del porcentaje de acierto dependiendo del nivel de batería con el que se realice el experimento.*

Este ha sido otro aspecto que se ha querido comprobar ya que se había comentado que el nivel de batería del dispositivo podía influir en el éxito que un usuario tenía durante la realización del experimento. Tras haber realizado los estudios y comparado los valores obtenidos se ha llegado a la conclusión de que efectivamente ***existe una mejora del porcentaje de acierto que los usuarios***

que ha realizado la prueba con la batería cargada completamente han registrado frente a los que lo han hecho un nivel de batería medio-bajo, siendo los resultados promedio de ambos de un 52,52% para el primer grupo frente a un 39,89% para el segundo. Por lo que podemos concluir con que sí existe una relación entre el porcentaje de aciertos obtenidos y el nivel de batería del dispositivo con el que se realicen los experimentos

- 4. Realización de un formulario que nos aporte información referente a la comodidad y dificultad durante la realización de la prueba.*

Por último, con el formulario se ha podido estudiar la opinión de los usuarios que han realizado la prueba y se han determinado ciertos aspectos. En primer lugar podemos concluir que la comodidad del experimento, teniendo en cuenta tanto colocación y realización, es correcta, habiendo sido valorada en líneas generales como “cómoda”. En cuanto a la dificultad de experimento podemos concluir que resulta sencillo realizar la prueba, generando un poco de cansancio. El tiempo de descanso entre sesión y sesión ha quedado establecido en 5 minutos y ha sido considerado por los encuestados como el tiempo idóneo, por lo que tras valorar estos 3 aspectos y la comodidad **podemos afirmar que el *modus operandi* en el que se realiza la prueba es muy bueno y debería seguir aplicándose ya que ha sido valorado muy positivamente.**

A través de la experiencia simplemente comentar que la forma en la que se realizan los experimentos es la adecuada, cosa que se ha visto en los resultados, pero el material con el que se realizan tiene un amplio margen de mejora. En lo que se refiere al dispositivo Emoc ha quedado más que comprobadas las prestaciones que tiene y el porcentaje de éxito que es capaz de conseguir, una vez conseguido ésto se debería mejorar su usabilidad, es necesario la eliminación del gel conductivo y con ello la sustitución de los electrodos actuales por electrodos secos, los cuales ya están bastante avanzados y normalizados en los dispositivo de EEG usados hoy en día pues la gran mayoría emplean este tipo de sensores. Con esta mejora la malla que alberga los electrodos podría seguir reutilizándose ya que sus propiedades son buenas pero ha de adquirirse una que permita su uso en distintos tamaños de cabeza, ya que limita la capacidad de uso en personas con una tamaño pequeño de cabeza.

7. Conclusiones.

7.1. Conclusión final

Para concluir con el presente trabajo fin de grado vamos a establecer las conclusiones finales a las que hemos llegado tras todo el trabajo realizado. Desde un principio el objetivo principal del proyecto ha sido el de realizar una base de datos a través del dispositivo *Emoc* para así poder estudiar y comparar los resultados de modo que se pudieran obtener unas conclusiones sólidas sobre las características del dispositivo. Llegados a este punto podemos confirmar que la base de datos que se pretendía crear desde un comienzo ha sido obtenida y las características y prestaciones del dispositivo *Emoc* han sido descritas con detalle, por lo que el objetivo principal del proyecto se ha conseguido cumplir.

Para poder llevar a cabo este objetivo ha sido necesario cumplir ciertas tareas a través de las cuales se pudiera ir completando paso a paso el trabajo necesario a desarrollar para la consecución del objetivo principal. Estas tareas eran las siguientes:

1. Búsqueda bibliográfica de sistemas de registro de señales EEG actuales y tipos de electrodos.

Se han realizado ambas búsquedas con éxito, la primera se puede visualizar a través de la *Tabla 1* que representa una comparativa bastante amplia de los actuales dispositivos BCI de bajo coste dedicados al registro de señales EEG. Además de esta tabla se ha presentado una lista de electrodos de tipo “seco” entre los que se encuentra alguno con muy buenas características como es el g. Sahara [13]. Finalmente y con ayuda de la búsqueda bibliográfica presentada en este proyecto se terminó adquiriendo el dispositivo *Emotiv Insight* [2], aunque el proyecto ha sido realizado íntegramente con el dispositivo BCI denominado *Emoc*.

2. Desarrollo de la metodología llevada a cabo durante la realización de los experimentos.

Se ha desarrollado una metodología que ha sido empleada durante la obtención de la base de datos del trabajo. A través de esta metodología se ha aplicado el mismo procedimiento en todos los experimentos y éste ha sido valorado positivamente por los usuarios, por lo que se concluye que la metodología desarrollada en este proyecto es correcta y puede ser usada de aquí en adelante en futuras investigaciones.

3. Creación de la base de datos.

Se ha obtenido una base de datos lo suficientemente amplia para dar validez y seguridad a los resultados promedio presentados, aunque hay que mencionar que el tamaño final de la base de datos ha sido de 15 sujetos, habiéndose establecido en un principio en 20, por lo que en lo que respecta al número final de experimentos no se llegó al número acordado. A raíz de este valor inferior se han introducido al trabajo 4 experimentos realizados en proyectos anteriores [1] para su comparación con la base de datos realizada en el presente trabajo.

4. Preprocesado y preprocesado archivos.

Se ha realizado con éxito el completo procedimiento de procesado de los archivos obtenidos en la base de datos y se han facilitado los resultados finales para su posterior estudio, por lo que se ha conseguido realizar correctamente este aspecto.

5. Estudio, comparación y discusión de resultados.

Se han estudiado los resultados obtenidos a partir de la base de datos y se han comparado sus valores de diferentes formas y con diferentes aspectos. Gracias a esta amplia comparativa se ha conseguido determinar con éxito las características del dispositivo *Emoc*, lo cual era parte del objetivo principal del proyecto. Además se ha obtenido mucha información referente a las características de la sociedad, así como de la existencia de conceptos como *BCI Illiteracy* y factores referentes a las características físicas o mentales de los sujetos. Finalmente se han discutido los resultados y se han relacionado dichos valores finales con el trabajo desarrollado.

Por lo que finalmente podemos decir que los objetivos que se pretendían cumplir a través de este trabajo fin de grado han sido completados y alcanzados con éxito, poniendo así punto y final al proyecto.

7.2. Valoración personal y trabajos futuros

Realizar el presente trabajo de fin de grado ha requerido tiempo y esfuerzo para alcanzar los objetivos esperados. Tras cada una de las investigaciones realizadas hemos llegado a unas conclusiones interesantes y, lo más importante, hemos conseguido alcanzar los objetivos principales que se plantearon al comienzo del proyecto.

A parte se ha tratado de cumplir no solo con lo básico si no ampliar el estudio y las comparaciones de los resultados obtenidos para poder obtener todas las conclusiones posibles con la información que manejamos.

De cara al futuro se podría realizar una investigación sobre el mismo número de sujetos que en este proyecto pero centrado en distintas distribuciones en lo que a posición de sensores se refiere, ya que para este trabajo fin de grado nos hemos centrado en la distribución 1, la cual ha sido completamente cubierta, desarrollada y estudiada. También se podrían verificar las indicaciones dadas en el proyecto referentes al número de electrodos usados ya que aunque se han realizado comparaciones, al no ser tantos los experimentos llevados a cabo de este tipo, no se ha podido obtener conclusiones firmes en este aspecto.

Para terminar solamente comentar que ha sido muy interesante entrar en contacto con el mundo de las señales de encefalograma y el registro de las mismas a través de este estudio. Se ha visto como, en función de distintas características en las personas, se obtienen resultados diferentes según sea el sexo de un individuo, la edad, si es diestro o zurdo, si tiene estudios o si tiene conocimientos previos del mundo de las señales EEG. Se han conseguido cumplir los objetivos establecidos y la valoración personal del trabajo realizado ha sido muy satisfactoria. Por último quiero mencionar el trato recibido por parte de la dirección del proyecto, el cual quiero agradecer enormemente por su comprensión y apoyo durante todo el proyecto.



8. Bibliografía

[1] Francisco Javier Muñoz Sánchez, “Construcción de una nueva interfaz cerebro-computador a partir de una de bajo coste (Emotiv EPOC)”, octubre 2014.

[2] Página web oficial de los sistemas Emotiv EPOC y Emotiv Insight además de su desarrollador propio:

<https://www.emotiv.com>

[3] Página web oficial de los sistemas de OPEN BCI además de su desarrollador propio:

<https://shop.openbci.com/collections/frontpage>

[4] Página web oficial del sistema de Neurosky además de su desarrollador propio:

<https://store.neurosky.com/pages/mindwave>

[5] Página web oficial del sistema Muse además de su desarrollador propio:

<https://choosemuse.com/>

[6] Página web oficial del sistema Versus:

<https://shop.getversus.com>

[7] Página web oficial del sistema Spark:

<https://personalneuro.com>

[8] Página web oficial del sistema Brainlink:

<http://o.macrotellect.com>

[9] Página web oficial de los sistemas de Brain Rhythm Inc:

<http://www.bri.com.tw/>

[10] Página web oficial del sistema Imec:

<https://www.imec-int.com/en/eeg#contact>

[11] Página web oficial de Neuroelectrics para sus electrodos secos Drytrode y Foretrode:

<https://www.neuroelectrics.com/>

[12] Página web oficial de Cognionics para sus electrodos secos Flex sensor y Dry Pad:

<https://www.cognionics.net/>

[13] Página web oficial de gtec para su electrodo seco g.Sahara:

<http://www.gtec.at/>

[14] Página web oficial de Bionic Ibérica S.A. y su kit denominado *EASYCAP*:

<http://www.bionic.es/?portfolio=easycap>



[15] Juan Antonio Martínez León, José Manuel Cano y Julio José Ibarrola. “Sistemas de interfaz cerebro-ordenador basados en dispositivos EEG de bajo coste y modelos neurodifusos aplicados a la imaginación de movimiento”, 2019.

[16] Pagina web Pubfacts con información sobre el concepto BCI illiteracy:
<https://www.pubfacts.com/search/BCI+illiteracy>

[17] Pagina web ncbi con información en artículos que tratan el concepto BCI illiteracy:
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2874052/>

[18] Blog de información sobre BCI a partir de EEG:
<http://bci.pedromorais.pt/>

[19] Página web *Sapien Labs* con información sobre BCI a partir de EEG:
<http://sapienlabs.co/rd-commercially-available-eeeg-headsets/>

[20] Página web *Syngli* con información sobre BCI a partir de EEG:
<https://www.syngli.com/neurotech.php>

[21] Información sobre electroencefalografía.
<https://educalingo.com/es/dic-es/electroencefalografia>

[22] Juan Antonio Martínez León, José Manuel Cano y Julio José Ibarrola “Are low cost Brain Computer Interface headsets ready for motor imagery applications?”, 2015

[23] José Manuel Cano, Julio José Ibarrola y Miguel Almoncid. “Improving Motor Imagery Classification With a New BCI Design Using Neuro-Fuzzy SdFasArt”, Enero 2012.