



industriales
etsii

Escuela Técnica
Superior
de Ingeniería
Industrial

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial

Sistema BCI basado en Emotiv Emoc para la detección de la intención de la marcha y aplicación a un exoesqueleto.

TRABAJO FIN DE MASTER

MASTER EN: Ingeniería Industrial

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



Universidad
Politécnica
de Cartagena

Cartagena, Diciembre 2020



Contenido

1. Introducción.....	9
1.1. Objetivos del proyecto.....	9
1.2. Trabajo a desarrollar.....	11
1.3. Conceptos previos.....	14
1.4. Dispositivo BCI empleado.....	16
1.5. Distribución de electrodos empleada.....	19
1.6. Exoesqueleto empleado.....	22
2. Investigación, desarrollo de una metodología y experimentación.....	23
2.1. Estudio del problema y búsqueda bibliográfica de formas de aplicación en el registro de señales EEG.....	23
2.2. Definición de los experimentos a desarrollar y metodología de los mismos.....	35
2.3. Experimentación práctica. Generación de la base de datos.....	40
2.4. Tratamiento de los datos.....	49
2.5. Comparación de los resultados.....	67
3. Ajuste y mejora del procedimiento de registro de señales EEG.....	75
3.1. Mejora del procedimiento y procesamiento de datos.....	75
3.2. Conclusiones y elección del método a emplear.....	105
4. Configuración e implementación.....	107
4.1. Configuración del módulo de generación de referencias.....	108
4.2. Modificación de la simulación gráfica 3D.....	112
4.3. Implementación del módulo de generación de referencias al exoesqueleto.....	114
5. Aplicación al exoesqueleto y testeo.....	118
5.1. Estudio de formas de aplicación.....	118
5.2. Implementación del código final.....	137
6. Discusión de resultados y conclusiones.....	145
6.1. Discusión de los resultados.....	145
6.2. Conclusiones finales.....	149
6.3. Valoración personal y trabajos futuros.....	150
7. Bibliografía.....	151
8. Anexos.....	153



Índice de Figuras

1. Introducción	9
1.3. Conceptos previos	14
Figura 1. Ejemplo de señal EEG	
1.4. Dispositivo BCI empleado	16
Figura 2. Malla	
Figura 3. Electrodo	
Figura 4. Encapsulado	
Figura 5. Bluetooth	
Figura 6. Bote gel conductivo	
Figura 7. Bote gel limpieza	
Figura 8. Jeringuilla	
Figura 9. Bastoncillos	
Figura 10. Gel empleado	
Figura 11. Cargador	
Figura 12. Ordenador	
1.5. Distribución de electrodos empleada	19
Figura 13. Sistema 10-20 de 21 electrodos	
Figura 14. Sistema 10-20 de 75 electrodos	
Figura 15. Distribución 1	
Figura 16. Distribución 2	
Figura 17. Distribución 3	
Figura 18. Distribución 1 con sensores de referencia	
1.6. Exoesqueleto empleado	22
Figura 19. Simulación gráfica 3D del exoesqueleto	
2. Investigación, desarrollo de una metodología y experimentación	23
2.1. Estudio del problema y búsqueda bibliográfica de formas de aplicación en el registro de señales EEG	23
Figura 20. Estados de marcha investigación UMH	
Figura 21. Disposición teclado experimento 2 investigación UMH	
Figura 22. Tipos de figuras experimento 3 investigación UMH	
Figura 23. Duración estados experimento 5	
Figura 24. Metodología experimento universidades turcas	
Figura 25. Actividad cerebral durante el uso de la eliminación Gaussiana y durante el uso del método de sustitución	
Figura 26. Metodología experimentación para videojuegos	
2.2. Definición de los experimentos a desarrollar y metodología de los mismos	35
Figura 27. Acción 1 y 3 pensar/ejecutar acción de andar	
Figura 28. Acción 2 y 4 pensar/ejecutar acción de parar	
Figura 29. Acción 5 calcular tabla de multiplicar	
Figura 30. Acción 6 relajarse	
Figura 31. Acción 7 Tararear una canción	
Figura 32. Acción 8 Pensar en un color determinado	
Figura 33. Acción 9 Ejecutar lanzar y recoger pelota	
Figura 34. Acción 10 Pensar en lanzar y recoger pelota	
Figura 35. Acción 11 Pensar en mover mano izquierda	
Figura 36. Acción 12 Pensar en palabras con inicial	



2.3.	Experimentación práctica. Generación de base de datos.....	40
	Figura 37. Dispositivo en funcionamiento.....	
	Figura 38. Dispositivo carga completa.....	
	Figura 39. Dispositivo batería baja.....	
	Figura 40. Correcta colocación de la malla sobre la cabeza.....	
	Figura 41. Pestaña Headset Setup Control Panel.....	
	Figura 42. Tipos de calidad de conexión.....	
	Figura 43. Conexión establecida.....	
	Figura 44. Posición correcta para realizar el experimento.....	
	Figura 45. Acción Andar.....	
	Figura 46. Acción Parar.....	
	Figura 47. Fin de sesión.....	
	Figura 48. Usuario realizando experimento.....	
	Figura 49. Formulario experimento Emoc.....	
2.4.	Tratamiento de los datos y comparación de los resultados	49
	Figura 50. Carpeta para la realización de los experimentos.....	
	Figura 51. Tararear una canción.....	
	Figura 52. Pensar en un color determinado.....	
	Figura 53. Archivo eeglogger_statusesBCIForms.....	
	Figura 54. Pantalla de configuración script “eeglogger_statusesBCIForms”.....	
	Figura 55. Carpeta con los archivos de los experimentos.....	
	Figura 56. Distintas acciones según experimentos.....	
	Figura 57. Bucle While.....	
	Figura 58. Bucle for.....	
	Figura 59. Matriz de datos.....	
	Figura 60. Líneas de código para exportar resultados a csv.....	
	Figura 61. Contenido fichero de datos.....	
	Figura 62. Carpeta contenido para preprocesado.....	
	Figura 63. Archivos destacado para preprocesado.....	
	Figura 64. Distribución de posición para los sensores.....	
	Figura 65. Carpeta de preprocesamiento.....	
	Figura 66. Código script Batch.....	
	Figura 67. Código preprocesado script Batch.....	
	Figura 68. Mensaje preprocesado acabado en ventana de resultados Matlab.....	
	Figura 69. Carpeta con archivos preprocesados.....	
	Figura 70. Código aprendizaje script Batch.....	
	Figura 71. Mensaje aprendizaje acabado en ventana de resultados.....	
	Figura 72. Código Optimización de parámetros en script Batch.....	
	Figura 73. Mensaje Optimización acabada en ventana de resultados.....	
	Figura 74. Código poda script Batch.....	
	Figura 75. Mensaje Poda acabada en ventana de resultados.....	
	Figura 76. Código resultados script Batch.....	
	Figura 77. Mensaje Resultados en ventana de resultados.....	
	Figura 78. Distintas acciones según experimentos.....	
	Figura 79. Carpeta con resultados finales.....	
	Figura 80. Gráfica modelo final.....	
3.	Ajuste y mejora del procedimiento de registro de señales EEG	75
3.1.	Mejora del procedimiento y procesado de datos	75
	Figura 81. Pantalla de configuración script “eeglogger_statusesBCIForms”.....	
	Figura 82. Código Aleatoriedad durante la experimentación.....	
	Figura 83. Código Aleatoriedad modificada.....	
	Figura 84. Carpeta con archivos antes de procesado.....	
	Figura 85. Carpeta con archivos tras el procesado.....	
	Figura 86. Archivo Copial.....	
	Figura 87. Variables existentes en Copial.....	
	Figura 88. Estados según posición para variable Real.....	
	Figura 89. Estados según posición para variable Predicción.....	
	Figura 90. Comparación de estados según posición para ambas variables.....	



Figura 91. Código de sustitución de valores de cambio de estado.....	
Figura 92. Código de eliminación de columnas con ceros.....	
Figura 93. Variables con tamaño reducido.....	
4. Configuración e implementación	107
4.1. Configuración del módulo de generación de referencias	108
Figura 94. Proceso de código para la configuración de referencias 1.....	
Figura 95. Proceso de código para la configuración de referencias 2.....	
Figura 96. Código para creación del archivo en Script Reconstrucción.....	
Figura 97. Valores angulares 1-2 para en el archivo Reconstrucción_sujeto_1_y_2.....	
Figura 98. Valores angulares 2-3 para en el archivo Reconstrucción_sujeto_1_y_2.....	
4.2. Modificación de la simulación gráfica 3D	112
Figura 99. Apariencia original simulación gráfica 3D.....	
Figura 100. Apariencia actual simulación gráfica 3D.....	
Figura 101. Apariencia precisa actual simulación gráfica 3D.....	
4.3. Implementación del módulo de generación de referencias al exoesqueleto.....	114
Figura 102. Código Matlab Simulación_3D.....	
Figura 103. Distintos códigos Matlab Simulación_3D.....	
Figura 104. Distintos códigos Matlab gráfica_ángulos_y_cuerpo.....	
5. Aplicación al exoesqueleto y testeo.....	118
5.1. Estudio de formas de aplicación.....	118
Figura 105. Líneas de código para el registro, script Simulacion_3D_Live.....	
Figura 106. Iniciación de valores de salida, script Simulacion_3D_Live.....	
Figura 107. Creación de los estados, script Simulacion_3D_Live.....	
Figura 108. Correcto conexionado de los electrodos.....	
Figura 109. Valores de grabación, script Simulacion_3D_Live.....	
Figura 110. Posiciones electrodos de registro final.....	
5.2. Implementación del código final.....	137
Figura 111. Inicialización del código final Simulación_3D_Live.....	
Figura 112. Líneas del código final para la iniciar el registro.....	
Figura 113. Entrenamientos del código final Simulación_3D_Live.....	
Figura 114. Comparación entre datos, código final Simulación_3D_Live.....	
Figura 115. Menú 1 fase de entrenamientos, Simulación_3D_Live.....	
Figura 116. Menú 2 fase de entrenamientos, Simulación_3D_Live.....	
Figura 117. Contenido carpeta código final, Simulación_3D_Live.....	
Figura 118. Menú 3 fase de experimentación, Simulación_3D_Live.....	
Figura 119. Bucle While código final, Simulación_3D_Live.....	
Figura 120. Líneas de código para el movimiento de la simulación, Simulación_3D_Live.....	
Figura 121. Comparación a tiempo real, Simulación_3D_Live.....	
Figura 122. Comando para la salida del bucle While, Simulación_3D_Live.....	
Figura 123. Finalización del experimento, Simulación_3D_Live.....	



Índice de tablas

2. Investigación, desarrollo de una metodología y experimentación	23
2.1. Estudio del problema y búsqueda bibliográfica de formas de aplicación en el registro de señales EEG	23
Tabla 1. Resultados investigación UMH.....	
Tabla 2. Resultados investigación UPCT.....	
Tabla 3. Resultados experimento 1 investigación UMH.....	
Tabla 4. Clasificación dificultad experimento 4 investigación UMH.....	
Tabla 5. Tipos de tareas experimento 5 investigación UMH.....	
Tabla 6. Resultados experimento Empleo de la memoria.....	
2.4. Tratamiento de los datos.....	49
Tabla 7. Ejemplo resultados parte Optimización.....	
Tabla 8. Ejemplo porcentaje de acierto.....	
Tabla 9. Ejemplo matriz de confusión.....	
Tabla 10. Distribución actividades según experimentos.....	
2.5. Comparación de los resultados	67
Tabla 11. Usuarios categorizados.....	
Tabla 12. Usuarios diferenciados y categorizados.....	
Tabla 13. Porcentajes usuario 1.....	
Tabla 14. Matriz de confusión usuario 1.....	
Tabla 15. Porcentajes usuario 2.....	
Tabla 16. Matriz de confusión usuario 2.....	
Tabla 17. Porcentajes usuario 3.....	
Tabla 18. Matriz de confusión usuario 3.....	
Tabla 19. Comparación resultados entre sujetos.....	
Tabla 20. Resultados para experimento 1.....	
Tabla 21. Resultados para experimento 2.....	
Tabla 22. Resultados para experimento 3.....	
Tabla 23. Resultados para experimento 4.....	
Tabla 24. Resultados para experimento 5.....	
Tabla 25. Resultados para experimento 6.....	
Tabla 26. Resultados de los experimentos.....	
Tabla 27. Resultados de las actividades.....	
Tabla 28. Resultado Global.....	
Tabla 29. Resultados globales reducidos.....	
3. Ajuste y mejora del procedimiento de registro de señales EEG	75
3.1. Mejora del procedimiento de registro de señales EEG	75
Tabla 30. Tipos de modos y sus características durante la experimentación.....	
Tabla 31. Porcentajes usuario 1 para 20 segundos.....	
Tabla 32. Matriz de confusión usuario 1 para 20 segundos.....	
Tabla 33. Porcentajes usuario 2 para 20 segundos.....	
Tabla 34. Matriz de confusión usuario 2 para 20 segundos.....	
Tabla 35. Porcentajes usuario 3 para 20 segundos.....	
Tabla 36. Matriz de confusión usuario 3 para 20 segundos.....	
Tabla 37. Comparación resultados entre sujetos para 20 segundos.....	
Tabla 38. Resultados para experimento 1 para 20 segundos.....	
Tabla 39. Resultados para experimento 2 para 20 segundos.....	
Tabla 40. Resultados para experimento 3 para 20 segundos.....	
Tabla 41. Resultados para experimento 4 para 20 segundos.....	
Tabla 42. Resultados para experimento 5 para 20 segundos.....	
Tabla 43. Resultados para experimento 6 para 20 segundos.....	



Tabla 44. Resultado actividades 20s.....	
Tabla 45. Resultado global 20s.....	
Tabla 46. Resultado experimentos para 20 segundos.....	
Tabla 47. Porcentajes usuario 1 para 5 segundos.....	
Tabla 48. Matriz de confusión usuario 1 para 5 segundos.....	
Tabla 49. Porcentajes usuario 2 para 5 segundos.....	
Tabla 50. Matriz de confusión usuario 2 para 5 segundos.....	
Tabla 51. Porcentajes usuario 3 para 5 segundos.....	
Tabla 52. Matriz de confusión usuario 3 para 5 segundos.....	
Tabla 53. Comparación resultados entre sujetos para 5 segundos.....	
Tabla 54. Resultados para experimento 1 para 5 segundos.....	
Tabla 55. Resultados para experimento 2 para 5 segundos.....	
Tabla 56. Resultados para experimento 3 para 5 segundos.....	
Tabla 57. Resultados para experimento 4 para 5 segundos.....	
Tabla 58. Resultados para experimento 5 para 5 segundos.....	
Tabla 59. Resultados para experimento 6 para 5 segundos.....	
Tabla 60. Resultado experimentos 5s.....	
Tabla 61. Resultados actividades 5s.....	
Tabla 62. Resultado global 5s.....	
Tabla 63. Resultados experimentos para 5 segundos.....	
Tabla 64. Comparación final resultados experimentos.....	
Tabla 65. Tamaño archivos.....	
Tabla 66. Estados asociados.....	
Tabla 67. Resultados tras la mejora según usuario y experimento.....	
Tabla 68. Resultados tras la mejora según usuario y experimento para 20s.....	
Tabla 69. Resultados tras la mejora según usuario y experimento para 5s.....	
Tabla 70. Resultados reducidos de los experimentos tras la mejora.....	
Tabla 71. Resultados reducidos de los experimentos tras la mejora para 20s.....	
Tabla 72. Resultados reducidos de los experimentos tras la mejora para 5s.....	
Tabla 73. Resultados finales según experimento.....	
Tabla 74. Resultados finales según actividad.....	
Tabla 75. Distribución actividades según experimentos mezclados.....	
Tabla 76. Comparación resultados finales con y sin mezclado de actividades.....	
Tabla 77. Resultados finales para las mejores dos actividades.....	
Tabla 79. Experimento final.....	
3.2. Mejora del procedimiento y procesamiento de los datos.....	105
Tabla 80. Experimento final mejorado.....	
Tabla 81. Resultados imaginación.....	
Tabla 82. Resultados Ejecución.....	
Tabla 83. Resultados mejor experimento.....	
Tabla 84. Resultados 2º mejor experimento.....	
Tabla 85. Comparación resultados experimento 6.....	
5. Aplicación al exoesqueleto y testeo.....	118
5.1. Estudio de formas de aplicación.....	118
Tabla 86. Resultados testeo registro a tiempo real.....	
Tabla 87. Valores medios actividad Multiplicar.....	
Tabla 88. Valores medios actividad Lanzar y recoger pelota.....	
Tabla 89. Valores experimentos para actividad Multiplicar.....	
Tabla 90. Actividades realizadas durante la experimentación.....	
Tabla 91. Resultados medios y rangos para las actividades del experimento.....	
Tabla 92. Resultados generales medios y rangos entre las actividades del experimento.....	
Tabla 93. Comparación resultados medios y rangos estados Quieto y Normal.....	
Tabla 94. Resultados medios para las actividades del experimento.....	
Tabla 95. Resultados rangos para las actividades del experimento.....	
Tabla 96. Actividades Gestos faciales del experimento.....	
Tabla 97. Resultados medios para las actividades Gestos Faciales.....	
Tabla 98. Resultados rangos para las actividades Gestos Faciales.....	
Tabla 99. Actividades Levantar las cejas para el experimento.....	
Tabla 100. Resultados medios para las actividades Levantar las cejas.....	



Tabla 101. Resultados rangos para las actividades Levantar las cejas.....
Tabla 102. Resultados experimento Levantar las cejas de forma continuada.....
Tabla 103. Resultados experimento Levantar las cejas de forma intermitente.....

6. Discusión de resultados y conclusiones..... 145

6.1. Discusión de los resultados..... 145

Tabla 104. Comparación resultados actividad final.....



1. Introducción

El presente trabajo de fin de máster surge de la continuación de una línea de investigación que se ha estado llevando a cabo en el departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática de la Universidad Politécnica de Cartagena. Como objeto de estudio en este trabajo se juntan dos investigaciones realizadas en años anteriores, por un lado se empleará un dispositivo BCI de bajo coste, denominado Emoc, desarrollado por el departamento [1], encargado del registro y tratamiento de señales EEG. Por otro lado investigadores y profesores de la universidad desarrollaron un prototipo de exoesqueleto dentro del proyecto europeo *Exolegs*, este segundo proyecto trata de la fabricación y posterior mejora del exoesqueleto [2][3].

Lo que se pretende en el presente trabajo es unir ambas líneas de investigación en una, a través de la aplicación del dispositivo BCI al exoesqueleto, tratando así de controlar las piernas biónicas con el casco sensorizado, denominado Emoc, sin otra interacción más que el uso de la mente a través de la señales de Electroencefalograma, EEG, recogidas por los sensores y transmitidas al exoesqueleto que será el encargado de llevar a cabo la órdenes recibidas.

*Debido a las circunstancias derivadas de la pandemia SARS Covid-19 el control del exoesqueleto mediante el dispositivo *Emoc* se ha visto alterado, dada la indisponibilidad de entrar al laboratorio del departamento para realizar los correspondientes ensayos, pasando así de ser un control físico de las piernas biónicas a un control digital a través de una simulación 3D en ordenador. Por lo que lo que se pretende en el presente trabajo fin de máster es el control de dicha simulación a través del dispositivo BCI.

1.1. Objetivos del proyecto

El objetivo principal del proyecto es el de integrar el dispositivo BCI *Emotiv Emoc* en un exoesqueleto, o en su defecto en un simulador que haga de exoesqueleto, pudiendo ser controlado mediante dicha interfaz a tiempo real. Para poder conseguir este objetivo será necesario llevar a cabo ciertos puntos a través de los cuales se irán completando cada una de las tareas que serán necesarias para alcanzar, el ya comentado, objetivo principal del proyecto.

A modo de resumen vamos a recopilar las fases que se llevarán a cabo en orden cronológico cuya consecución nos permitirá alcanzar el correcto control del exoesqueleto. Las fases a realizar se muestran a continuación:

- **Fase 1: Realizar una investigación sobre el éxito en la adquisición de las señales EEG para distintas actividades. Elaborar una metodología de aplicación y realizar los ensayos correspondientes. Crear base de datos.**

Se realizará una búsqueda bibliográfica sobre otras investigaciones científicas y proyectos relacionados con la adquisición de señales EEG mediante la cual se pretende encontrar formas de adquisición de dichas señales con un porcentaje de éxito alto para poder



aplicarlas a nuestros experimentos, cuyo objetivo es el de poner en marcha un exoesqueleto o simulación 3D del mismo, es decir que realice las acciones de *Andar* y *Parar*. Una vez seleccionadas las formas que se aplicarán durante los ensayos se deberá desarrollar una metodología para poder llevar a cabo los mismos. Finalmente se realizarán dichos experimentos creando así la base de datos del proyecto.

- **Fase 2: Realizar mejoras a los experimentos realizados. Volver a llevar a cabo los ensayos aplicando dichas mejoras y seleccionar el método final a emplear.**

Se estudiarán los resultados obtenidos en los experimentos y se tratará de mejorar el porcentaje de éxito con el que se han llevado a cabo los mismos aplicando ciertas reglas heurísticas. El objetivo de esta fase es el de obtener un modo de experimentación con un porcentaje de éxito alto para ejecutar el movimiento de andar y parar el exoesqueleto. Una vez configurada esta forma de aplicación será cuando se realice de nuevo la experimentación y se seleccione el método final para el control del exoesqueleto.

- **Fase 3: Configurar el módulo de generación de referencias e implementarlo al exoesqueleto.**

Se deberá configurar el módulo de generación de referencias, el cual establece qué movimientos debe realizar el exoesqueleto y en qué forma debe ejecutarlos. Se modificará para poder ser implementado en el exoesqueleto o en una simulación 3D del exoesqueleto con éxito. Además se configurarán distintos patrones de actuación para que la ejecución del BCI en el exoesqueleto sea lo más eficiente posible. Tras su configuración se llevará a cabo su correcta implementación final en la simulación 3D, dicha simulación debe ser desarrollada desde cero o modificada de versiones anteriores para su uso en la fase final de este trabajo de fin de máster.

- **Fase 4: Aplicación del BCI en el exoesqueleto o un simulador gráfico 3D que pueda hacer las veces de exoesqueleto. Obtención de conclusiones finales.**

Tras desarrollar o modificar un simulador gráfico 3D será momento de conseguir controlar la simulación del exoesqueleto mediante el BCI *Emoc*. Este control debe realizarse a tiempo real, es decir en directo, por lo que se debe encontrar una forma para llevar a cabo este control. La forma elegida debe ser estudiada, desarrollada y ejecutada con éxito para dar por alcanzado el objetivo principal del proyecto. Una vez conseguido se deberán obtener las conclusiones finales y establecer los trabajos futuros para la continuación de la línea de experimentación e investigación que se ha llevado a cabo en este trabajo de fin de máster.

Gracias a estas cuatro fases podremos llevar a cabo el proyecto y con ello lograr todos los objetivos comentados 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, esto será comentado en el siguiente apartado. Con ello se pretende establecer la línea de trabajo a seguir de forma que cada paso realizado en este proyecto pueda ser entendido y estudiado de la mejor forma posible.



1.2. Trabajo a desarrollar

Al comienzo del proyecto se establecieron 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 ha dividido en cuatro fases, cada actividad se enumera a continuación y posteriormente pueden encontrarse desarrolladas paso a paso de manera progresiva:

Fase 1: Investigación, desarrollo de una metodología y experimentación.

1. Estudio del problema y búsqueda bibliográfica de formas de aplicación.
2. Definición de experimentos a desarrollar y metodología para los mismos.
3. Experimentación práctica. Generación de la base de datos.
4. Tratamiento de los datos.
5. Comparación de los resultados.

Fase 2: Ajuste y mejora del procedimiento de registro de las señales EEG.

6. Mejora del procedimiento y procesamiento de datos.
7. Conclusiones y elección del método a emplear.

Fase 3: Configuración e implementación del módulo de generación de referencias.

8. Configuración del módulo de generación de referencias.
9. Modificación de la simulación gráfica 3D.
10. Implementación del módulo de generación de referencias a la simulación 3D.

Fase 4: Aplicación al exoesqueleto y testeo.

11. Estudio de formas de aplicación.
12. Implementación del código final.
13. Discusión de resultados y conclusiones.

Establecer los objetivos a conseguir y cada una de las fases a completar ha sido un proceso que se ha realizado en conjunto con el director y subdirector del proyecto mediante las correspondientes reuniones y conversaciones previas al inicio de presente trabajo de fin de máster. En estas reuniones se han fijado cada una de las tareas presentadas anteriormente y cuando todo estaba claro se ha comenzado con la ejecución progresiva de cada una de ellas. Se trata de un trabajo llevado a cabo fase a fase, en su correspondiente orden cronológico. Ejecutado tras una planificación en conjunto y desarrollado en concordancia con lo expuesto anteriormente.

A continuación se desarrolla con detalle el trabajo realizado en cada fase:



Fase 1: Investigación, desarrollo de una metodología y experimentación

En primer lugar ha sido necesario realizar una investigación y búsqueda bibliográfica de artículos científicos sobre los distintos tipos de ensayos realizados con exoesqueletos controlados mediante BCI. Lo que se busca con esta investigación es encontrar formas de operar y realizar los ensayos que nos ofrezcan un porcentaje de éxito bastante alto a la hora de llevar a cabo los comandos de andar y parar.

Se deben elegir las acciones que ocuparán nuestro ensayo. Dos formas han quedado ya preestablecidas desde el inicio del proyecto, la primera será realizar los ensayos a través de la *imaginación de movimiento*, es decir imaginar que se está realizando el movimiento pero sin ejecutarlo, y la segunda será la *ejecución del movimiento*, en la que sí se ejecute realmente dicho movimiento. Además de estas dos formas se elegirán otras dos como mínimo para obtener un espectro de posibilidades más amplio, pudiendo así realizar una investigación más completa.

Una vez seleccionadas las cuatro maneras de llevar a cabo el experimento se deben poner en práctica y realizar los ensayos correspondientes. Para ello es necesaria la elección de una metodología a la hora de realizar los ensayos. Se estudiarán diversas maneras y se aplicará la que en un principio se considere más adecuada.

Una vez fijada la metodología será el momento de llevar a cabo los experimentos. Cuando los resultados hayan sido obtenidos se estudiarán y compararán entre sí, dando por finalizada la primera fase.

Fase 2: Ajuste y mejora del procedimiento de registro de las señales EEG

Entramos a la segunda fase del proyecto, donde los resultados obtenidos deben tratar de ser mejorados. Para ello se aplicarán ciertas reglas heurísticas o patrones a la hora de ejecutar el experimento. Se variarán ciertos aspectos y se tratarán de filtrar los valores obtenidos intentando eliminar los factores que produzcan un empeoramiento del resultado final. Es decir que en esta fase se estudiará la forma de mejorar el resultado final de los experimentos. Las mejoras aplicadas pueden ser tanto al código de registro o código de procesado final como a la forma de llevar a cabo los experimentos. Se trata de alcanzar un porcentaje de acierto alto para un par de actividades de entre todas las estudiadas. Los resultados finales deseados deberían rondar valores del 80-90% de acierto.

Tras realizar esta búsqueda y mejora en la forma de operar, los cambios establecidos deben ser aplicados y se deben realizar de nuevo los ensayos. Una vez hayamos obtenido los resultados finales será cuando estemos en posesión, ahora sí, nuestra base de datos definitiva.

Fase 3: Configuración e implementación del módulo de generación de referencias

En esta tercera fase debemos trabajar con el módulo de generación de referencias, el cual se encarga de transmitir las ordenes al exoesqueleto de cómo debe ejecutar los comandos. Cada una de sus referencias serán implementadas en las piernas biónicas, ya sea de forma física o digital a través de una simulación 3D, diciendo a los 3 motores que forman cada pierna, 6 motores en total, cómo deben situarse mediante variables de ángulo de giro para la ejecución del movimiento de *Andar* y *Parar*. Además de estas variables de ángulo de giro existirán otro tipo de variables, como por ejemplo la variable velocidad que será la que indique con que rapidez debe realizarse el movimiento.



En esta fase también se modificará el módulo de generación de referencias de forma que se trate de establecer una serie de órdenes que favorezcan el correcto funcionamiento del exoesqueleto o simulación 3D del mismo. Ejemplo de ello puede ser el acabar de ejecutar un movimiento tras recibir la orden de parada para así no dejar una pierna en alto, es decir provocar que termine su ejecución finalizando así el ciclo de un movimiento concreto en el que una pierna se desplaza de su posición original hasta que regresa a la misma.

Tras la correcta configuración del módulo de generación de referencias mediante el cual se pueda dar un paso completo con total fluidez y sin problemas será momento de desarrollar o modificar una simulación gráfica sobre la que pueda volcarse este módulo de generación de referencias. La simulación debe ser una simulación gráfica 3D por ordenador, en ella se debe visualizar un exoesqueleto para su posterior control. Esta simulación puede ser desarrollada desde cero o modificada de versiones anteriores creadas por el departamento.

Una vez tengamos la simulación 3D del exoesqueleto debemos implementar el módulo de generación de referencias en ella. Esta implementación debe llevarse a cabo tras un control de la simulación por lo que se debe encontrar la forma para ejecutar dicho control. Este control será llevado a cabo mediante un código Matlab. Tras la creación de este código se habrán conseguido los objetivos para esta tercera fase, es decir configurar el módulo de generación de referencias y conseguir implementarlo correctamente en una simulación gráfica 3D del exoesqueleto.

Fase 4: Aplicación al exoesqueleto y testeo

Esta cuarta y última fase del proyecto trata de conseguir establecer una conexión exitosa entre el BCI y el exoesqueleto a tiempo real, aquí radica la diferencia con el control establecido en la fase anterior. En esta fase trataremos de poner en marcha la simulación de las piernas biónicas en un programa 3D, mediante el uso de *Emotiv Emoc*, para un control en directo. Para ello será necesario establecer una serie de configuraciones entre el dispositivo BCI y la simulación del exoesqueleto.

Se deberá realizar un testeo para conocer si las formas de control establecidas al final de la fase 2 pueden ser implementadas de forma exitosa en el control de la simulación 3D. En el caso de no poder ser ejecutadas conforme a lo previsto será necesario realizar un nuevo estudio para determinar nuevas formas de control de la simulación, en este caso para un tiempo real. Tras realizar el estudio se llevará a cabo una segunda fase de testeo y finalmente se completará el control de la simulación.

Una vez el control se produzca de forma exitosa habremos conseguido así alcanzar correctamente el objetivo principal de este trabajo de fin de máster, que trataba de establecer una correcta comunicación a tiempo real entre el exoesqueleto físico o una simulación gráfica 3D del mismo y *Emotiv Emoc*.

Finalmente las conclusiones finales de toda la investigación realizada serán escritas y se trazarán las líneas a seguir en trabajos futuros, dando así por finalizado este proyecto.

1.3. Conceptos previos

Una vez establecidos todos los puntos a realizar en esta investigación es conveniente hacer una introducción al mundo de las señales EEG y su registro mediante BCIs para una mejor comprensión del trabajo realizado en este proyecto.

Las señales EEG hacen abreviatura al termino conocido como señales de *ElectroEncefaloGramma* que son señales eléctricas provenientes del encéfalo, el cual está dividido en 3 partes: Tronco encefálico, cerebelo y cerebro. 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, dicha excitación eléctrica es lo que denominamos como señales EEG y es lo que tratamos de registrar.

Estas señales EEG al ser de origen eléctrico se pueden medir en términos de potencial eléctrico, es decir de voltaje, por lo que son cuantificables lo que nos permite poder registrar el diferencial de potencial eléctrico que poseen y por lo tanto saber que impulso o *Gap* contiene cada señal generada por las células nerviosas del encéfalo, tanto en reposo como en movimiento cuando se genera un pensamiento. 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. Se puede encontrar más información al respecto y en mayor profundidad en mi anterior trabajo "*Predicción del pensamiento motor mediante señales de Electroencefalograma*" [4].

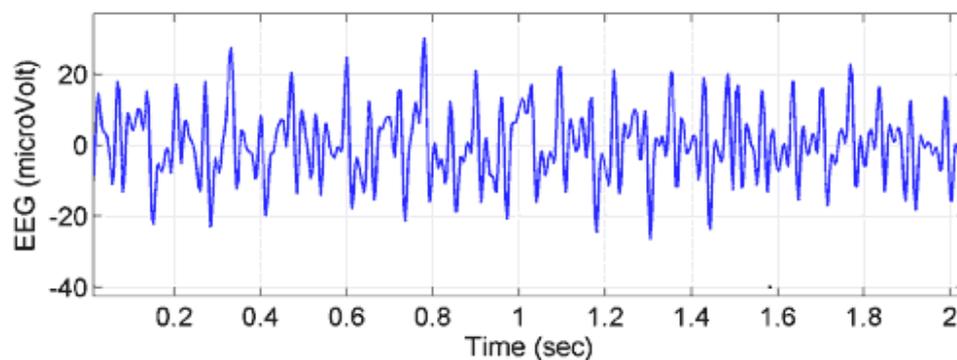


Figura 1. Ejemplo de señal EEG.

La forma de captar o registrar estas señales eléctricas provenientes del encéfalo es mediante los BCIs. Estas siglas hacen referencia al anglicismo *Brain Computer Interface*, que viene a ser una interfaz entre el cerebro y ordenador. Lo que hace esta interfaz es captar las señales eléctricas y pasarlas a un ordenador mediante el cual, a través de programas informáticos, podemos tratar, filtrar y obtener la información que necesitamos.

Estos BCIs están formados por varios elementos: En primer lugar tenemos los *electrodos* que poseen sensores encargados de registrar las señales EEG, estos sensores se colocan en el cuero cabelludo y pueden ser de diversos tipos con características diferentes, ya sea por el material de construcción: de oro, plata, cobre, etc., o por la necesidad de aplicar un lubricante que mejore la



conexión, es decir sensores secos o mojados. Estos sensores son sujetos a través de un casco, que puede tener diferentes estructuras, ya sea una malla elástica, con cabezales, diademas o arquitecturas poliédricas, donde la posición y el número de sensores variará según el fabricante, siendo 2 el número mínimo de electrodos a situar, el sensor de referencia que hará de tierra y sensor activo que será el que registre el impulso eléctrico, creando así el potencial eléctrico de cada pensamiento. Las señales EEG que captan los sensores son registradas por una placa base y esta es la encargada de transmitir los datos al ordenador a través de librerías o programas informáticos. Estos programas informáticos normalmente son facilitados por el fabricante y a través de ellos se pueden estudiar y manejar las señales eléctricas registradas, tratando la información de la forma que sea requerida. Al igual que con las señales EEG se puede encontrar más información en *“Predicción del pensamiento motor mediante señales de Electroencefalograma”* [4], donde se realizó un estudio de los distintos BCIs de bajo coste que actualmente se están usando en el mercado y sus principales funciones.

Una vez se haya entendido lo que son las señales EEG y su modo de captación mediante los BCIs hay que saber que el encéfalo genera estas señales eléctricas en todo momento a lo largo de nuestra vida, tanto si estamos en reposo como si estamos realizando cualquier tipo de actividad física o mental, y que estas señales eléctricas son completamente distintas unas de otras en cuanto a voltaje o potencia se refiere. Es decir que al pensar en algo en concreto generamos un impulso eléctrico determinado que es completamente distinto en cualquier otro pensamiento, cada pensamiento tiene su impulso eléctrico correspondiente.

Por lo tanto si registramos un impulso eléctrico determinado, que estará relacionado a un pensamiento concreto, la siguiente vez que registremos el mismo impulso eléctrico sabremos qué ha pensado el sujeto al que se le haya hecho la prueba ya que conocemos a que pensamiento está relacionado dicho impulso eléctrico.

Por lo tanto, se puede definir un BCI como un *“sistema que procesa la actividad cerebral de la persona y la traduce en información que puede ser empleada para generar comandos de control de un dispositivo externo sin necesidad de realizar ningún movimiento muscular”* [5].

Sabiendo todo lo anterior lo que se pretende con este proyecto es ver con qué pensamientos se consigue un porcentaje de éxito mayor al registrar las señales, es decir si somos capaces de repetir un pensamiento exactamente con el mismo impulso eléctrico que ha sido registrado.

Una vez conozcamos con qué pensamientos podemos repetir el mismo impulso eléctrico con mayor exactitud debemos modificar un módulo de referencias para asignárselo al exoesqueleto o simulación 3D del mismo para que así al generar las señales EEG, desde el encéfalo, el BCI las registre y las envíe al exoesqueleto el cual debe realizar unos movimientos predeterminados, que serán el de *Andar* y el de *Parar*, todo esto únicamente con el uso del BCI, las señales EEG y la simulación del exoesqueleto.

Habiendo hecho una introducción al mundo de las señales EEG y a su captación mediante BCIs se podrá entender mejor el trabajo realizado en este proyecto. A continuación podemos encontrar el material empleado durante la realización de este trabajo de fin de máster.

1.4. Dispositivo BCI empleado

El dispositivo empleado como BCI para la realización de este proyecto ha sido el *Emotiv Emoc*, un BCI modificado en el departamento al cargo de este trabajo de fin de máster. Se trata de un dispositivo que cuenta con una malla elástica como casco en la que se pueden alojar los electrodos cambiando a placer el número y posición de los mismos, acompañado de una placa base procedente del BCI Emotiv Epoc. Francisco Javier Muñoz Sánchez basó su trabajo final de grado [1] en modificar este BCI ya existente para dotarlo de una mayor flexibilidad a la hora de poder realizar un proyecto de investigación en el registro de señales EEG. Con este mismo dispositivo se realizó dicho trabajo de investigación y actualmente se va a emplear para establecer la conexión con un exoesqueleto o en este caso una simulación gráfica 3D del mismo.

Además de la malla, los electrodos y la placa base, se han empleado más elementos para el correcto registro de las señales EEG. Al comienzo del presente proyecto se me facilitó una caja que contenía todos estos instrumentos, su contenido se enumera a continuación:

- Malla para la colocación de los electrodos

Es una malla elástica de 60 cm 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. Posee una cinta de velcro en la zona de la barbilla para un mejor ajuste de la misma



Figura 2. Malla.

- Electrodos

Se trata de unos electrodos formados por cloruro de plata, al igual que los del dispositivo Epoc+ 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.



Figura 3. Electrodos.

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.

- Encapsulado

Fabricado por Francisco Javier Muñoz Sánchez, se trata de una caja que contiene la placa base 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 4. Encapsulado.

- Receptor Bluetooth



Figura 5. 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.

- 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 6. Bote gel conductivo.



Figura 7. 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 8. Jeringuilla.



Figura 9. Bastoncillos.

Este kit de elementos ha sido adquirido a través de la empresa “*Bionic Ibérica S.A.*” [6], 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 geles, los electrodos e incluso la malla para colocar dicho electrodos.

Debido a la falta de gel conductivo, ya que el mostrado en la figura 6 estaba agotado, se probó un gel de alta conductividad dedicado a señales EEG entre otras, desarrollado en Alemania por el laboratorio *axion GmbH*, al realizar un breve testeo se comprobó su eficacia y se decidió aplicar como gel conductivo en el presente proyecto. Tras haber empleado el gel durante la experimentación puedo conformar que se trata de un material de alta y muy buena calidad, es recomendable para futuras investigaciones.



Figura 10. Gel empleado.

- Cargador



Figura 11. Cargador.

Ha sido necesario el uso de un cargador para cargar la batería del dispositivo. Esta batería tiene una duración estimada de 9 horas de uso, siendo necesarias 11 horas para obtener una carga completa.

El cable de conexión es del tipo micro USB tipo B y se puede encontrar en cualquier tienda especializada en electrónica.

- Ordenador

Además de los elementos que forman el *Emotiv Emoc* es necesario comentar el uso de un ordenador que reciba las señales EEG y trate los resultados obtenidos.

Para este trabajo se ha empleado un Lenovo ideadpad 320-15IKB, con 4GB de RAM, SSD de 128GB de almacenamiento y un procesador Intel i5-7200U.



Figura 12. Ordenador.

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.

1.5. Distribución de electrodos empleada

Hemos comentado el dispositivo BCI empleado pero también es necesario citar que distribución han tomado los electrodos de todas las formas posibles existentes. Comentar antes de nada que de entre todas las posiciones conocidas 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:

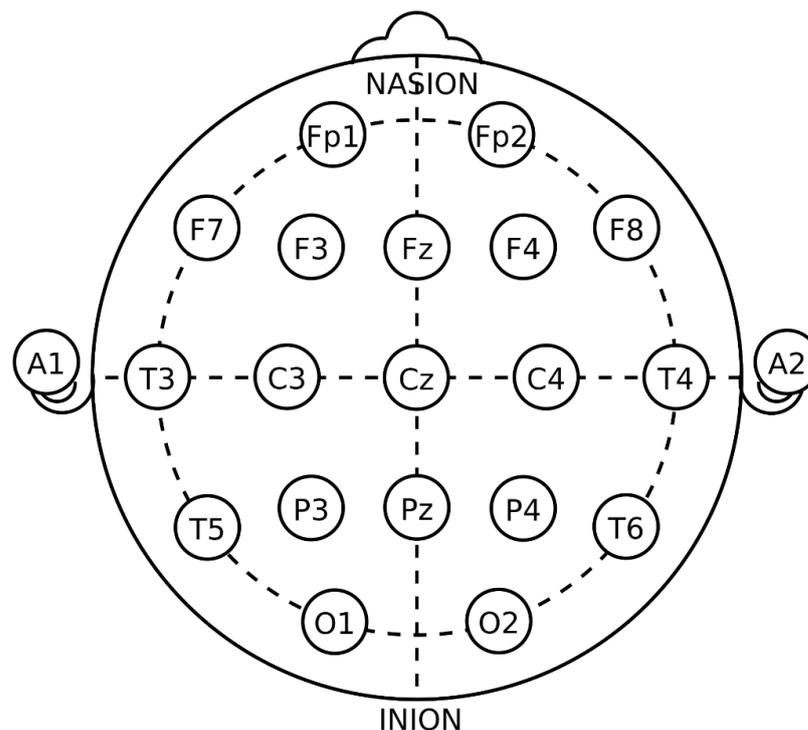


Figura 13. Sistema 10-20 de 21 electrodos.

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".

En investigaciones anteriores el código Matlab, a través de cual hemos podido realizar el procesado completo de los datos de cada usuario, recogía 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 son 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:

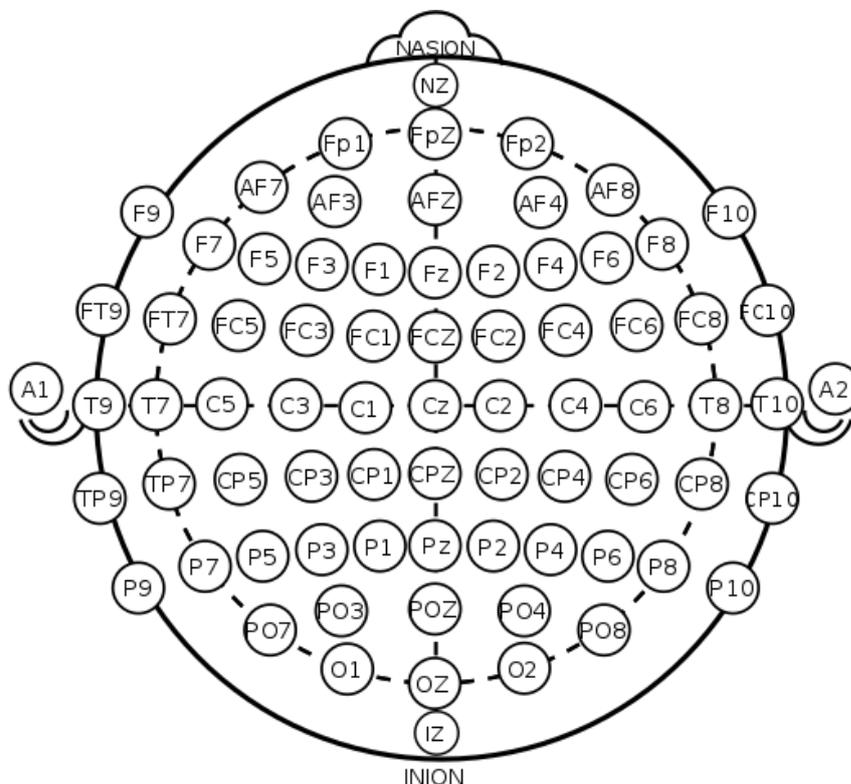


Figura 14. Sistema 10-20 de 75 electrodos.

A partir de ella podemos ilustrar las distribuciones con las que se ha trabajado en investigaciones pasadas en la UPCT:

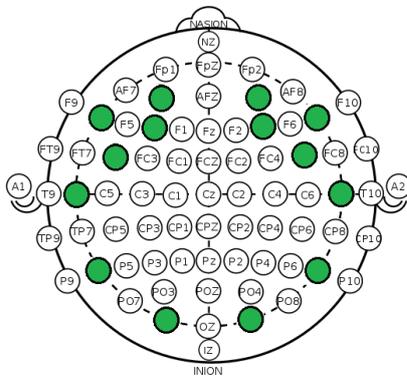


Figura 15. Distribución 1.

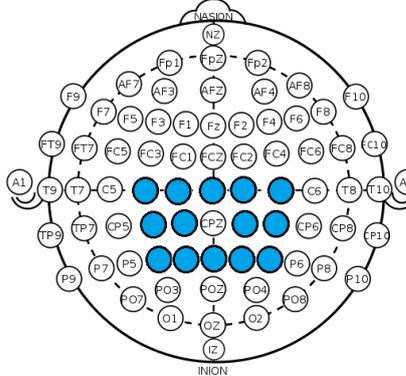


Figura 16. Distribución 2.

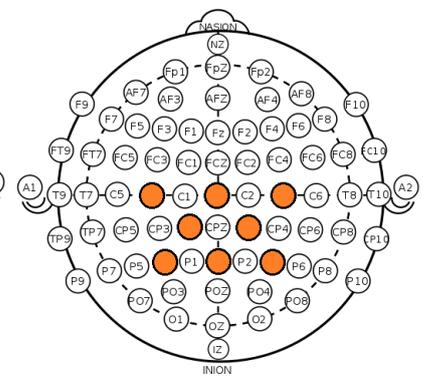


Figura 17. Distribución 3.

Para este trabajo de fin de máster los experimentos realizados se han llevado a cabo con la primera distribución, una distribución que reparte de una forma más lateral los electrodos, situando el número de sensores empleados en 14 activos más dos de referencia.

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

La disposición final de los electrodos quedaría como se puede observar a continuación:

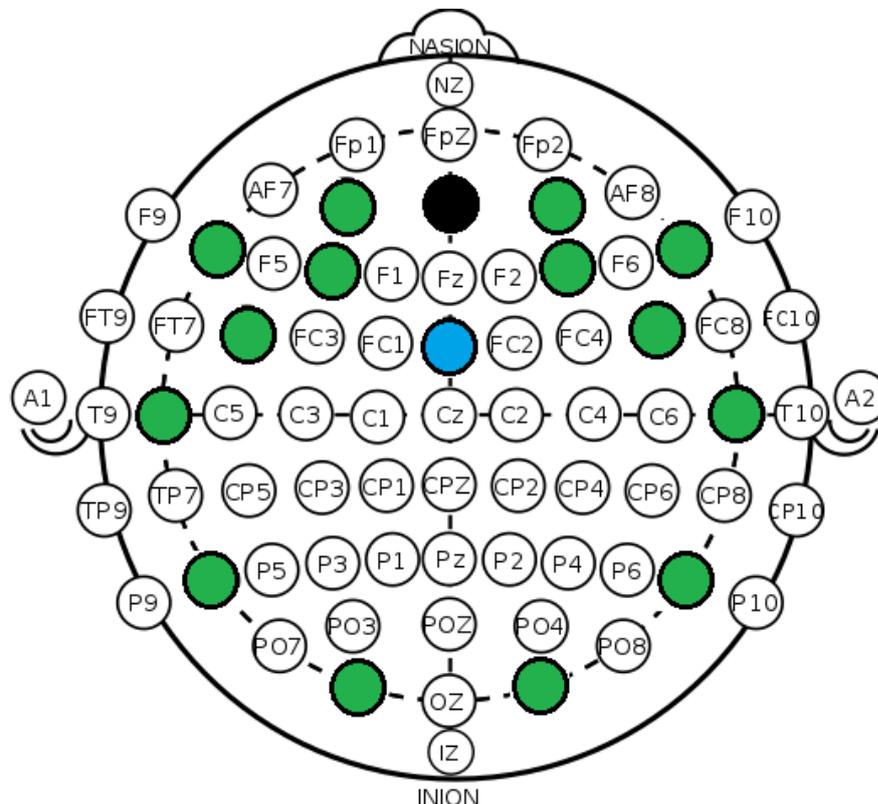


Figura 18. Distribución 1 con sensores de referencia.

1.6. Exoesqueleto empleado

El exoesqueleto que ha estado empleando el departamento en las investigaciones realizadas hasta el momento ha sido un exoesqueleto desarrollado a partir del proyecto europeo *Exolegs*. Esta estructura robótica tiene la posibilidad de realizar acciones de movimiento en la cadera, rodillas y tobillos, en total tres articulaciones por pierna por lo tanto posee 6 motores.

En este trabajo de fin de máster en un principio debería haberse empleado este prototipo pero debido a la situación provocada por la pandemia del Covid-19 la situación inicial se ha visto modificada y se acordó con los directores del proyecto emplear una simulación gráfica 3D que hiciera de exoesqueleto, por lo que el dispositivo empleado con el que se realizarán todas las actividades planificadas al inicio de esta investigación será un diseño 3D por ordenador.

Este diseño 3D trata de una simulación realizada mediante Matlab, la cual ha sido desarrollada por Diego José Ramos González en su trabajo de fin de grado "*Identificación de patrones de marcha mediante un análisis de movimiento para su aplicación a un exoesqueleto*" [3]. Esta simulación está formada por un diseño en el que el tronco superior simula el de una persona y se mantiene estático y el tronco inferior está formado por unos puntos que hacen de articulaciones unidos por unas líneas que hacen de piernas y se mueven en conjunto a través de valores angulares introducidos mediante distintos scripts informáticos.

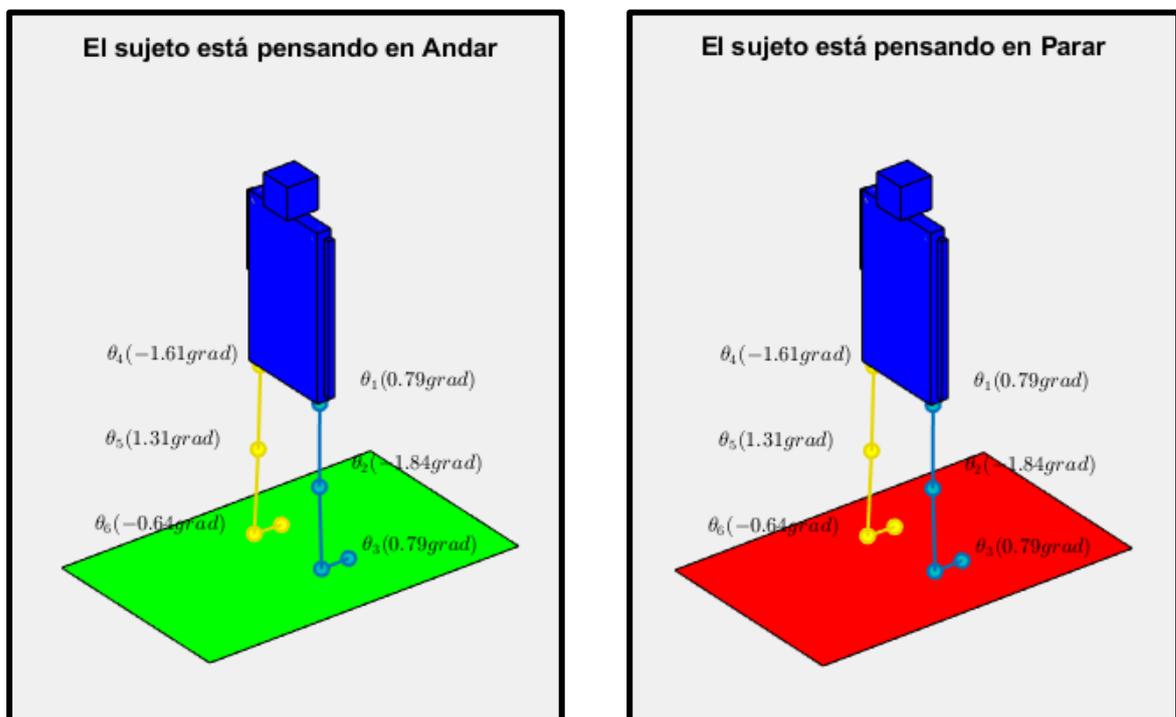


Figura 19. Simulación gráfica 3D del exoesqueleto.

La simulación 3D original ha sido modificada en este proyecto, mejorando el aspecto y la interacción con el usuario que percibe de una forma más gráfica si su pensamiento se corresponde con las ordenes enviadas. Dicha simulación será la empleada en las fases finales del presente trabajo, puede andar hacia delante y marcha atrás pero no posee la característica del giro.



2. Investigación, desarrollo de una metodología y experimentación

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 para según cada fase. Para comenzar debemos llevar a cabo la fase 1 que consta de varias partes:

1. Estudio del problema y búsqueda bibliográfica de formas de aplicación.
2. Definición de experimentos a desarrollar y metodología de los mismos.
3. Experimentación práctica. Generación de la base de datos.
4. Tratamiento de los datos.
5. Comparación de los resultados.

Se irán resolviendo en orden cronológico y detallando todo el procedimiento. A continuación se expone la realización de cada uno de ellos:

2.1. Estudio del problema y búsqueda bibliográfica de formas de aplicación en el registro de señales EEG

Se pretende conectar un BCI a la simulación 3D de un exoesqueleto para que dicho exoesqueleto realice físicamente los movimientos de *Andar* y *Parar* cuando el sujeto que lleve puesto el BCI así se lo indique.

El hecho de indicarle al exoesqueleto esta intención de marcha se hará mediante señales EEG procedentes del encéfalo, es decir realizando la acción de pensar en mover el exoesqueleto. Para poder realizar esta acción de pensar debemos decidir sobre qué pensamiento se obtiene un mayor porcentaje de éxito, que viene a ser qué pensamiento se puede repetir con la misma exactitud en distintas ocasiones. Por lo tanto debemos decidir de entre todos los pensamientos que podemos tener cuál va a ser el que nos proporcione un mayor porcentaje de acierto. Éste es el motivo real de esta primera investigación.

Además se tratará para este proyecto que el porcentaje de éxito en el registro de señales EEG sea elevado, se pretende alcanzar un 80-90% de acierto. Hemos visto que para ensayos con BCI de bajo coste, como es el caso del *Emotiv Epoc*, el porcentaje de éxito ronda el 50% por lo que supone una mejora evidente en la captación de señales de electroencefalograma.

Para subir este nivel de acierto es necesario cambiar ciertas variables a la hora de realizar los experimentos, una de ellas será la dificultad en cuanto a número de estados se refiere. En investigaciones anteriores llevadas a cabo por el departamento se han estudiado tres posibles estados:

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



Para disminuir la dificultad se reducirá a 2 el número de estados posibles, siendo éstas las dos formas que componen la intención de marcha del exoesqueleto:

- *Mover el exoesqueleto.*
- *Parar el exoesqueleto.*

Se pretende que al disminuir este número de estados la repetición de los mismos sea más sencilla y con ello se consiga aumentar el porcentaje de éxito en el registro de señales EEG.

De las cuatro formas de aplicación de la intención de marcha comentada, es decir *Andar* y *Parar*, dos de ellas han sido ya establecidas desde el inicio del proyecto. Dichas formas de aplicación son las siguientes:

1. *Intención/imaginación de movimiento*, es decir imaginar que vas a empezar a andar pero sin realizar el movimiento, solo imaginarlo. Lo mismo con el hecho de parar.
2. *Ejecución del movimiento*, es decir con el casco puesto realizar la acción físicamente, andar y parar, realizando realmente el movimiento.

Por lo tanto se realizará una investigación sobre cómo han funcionado estas dos formas aplicadas al exoesqueleto y además se buscarán otras dos formas de aplicación, es decir pensamientos, que puedan ser también aplicadas de la manera más eficaz posible.

Además se tratará de encontrar formas de aplicación que sean separables entre sí, es decir que sean diferenciables claramente una acción de la otra, tanto para el movimiento de andar con el exoesqueleto como para poder pararlo. El motivo se fundamenta en que si elegimos dos pensamientos parecidos a la hora de realizar los experimentos el usuario puede confundirlos, mezclarlos y provocar una disminución en la calidad de los resultados finales. Por lo tanto debemos estudiar si pensamientos que estén claramente separados entre sí aumentan el porcentaje de acierto al registrar la señales EEG en la realización de los experimentos.

Habremos así seleccionado cuatro formas de aplicación para mover el exoesqueleto, dos opciones ya establecidas que se centren en el método y otras dos formas, que son las que debemos elegir tras la investigación, que se centren en los resultados.

Investigación llevada a cabo.

Al realizar esta investigación se centró la búsqueda bibliográfica en artículos científicos que estuviesen relacionados con la captación de señales EEG mediante BCI, haciendo especial hincapié en investigaciones que realicen este registro de señales de cara a ser usadas en exoesqueletos.

Lo que se pretende con esta investigación es ampliar el espectro de posibilidades de aplicación a hora de realizar ensayos con BCI y encontrar formas de captación de las señales de electroencefalograma que nos aporten un alto porcentaje de acierto a la hora de llevar a cabo su registro. Con alto porcentaje de acierto no referimos a que pueda ser repetido el mismo pensamiento en diferentes ensayos, comparando así los valores registrados en todos los ensayos

viendo que el valor es lo más idéntico posible entre todos. Las formas elegidas serán aplicadas más tarde al exoesqueleto.

Diferentes instituciones dedicadas al mismo ámbito de estudio han realizado investigaciones para controlar exoesqueletos mediante dispositivos BCI. El número de estas investigaciones se ha incrementado con los años. Tras revisar distintos ensayos de universidades y centros de investigación de todo el mundo podemos exponer algunas de las siguientes informaciones recogidas:

- Método de aplicación más empleado:

A la hora de mover un exoesqueleto, normalmente formado por los miembros superiores o inferiores del cuerpo humano, mediante un BCI las investigaciones centran su estudio en la *imaginación de movimiento*. Tratan de mover el exoesqueleto imaginando que mueven dicho exoesqueleto.

La relación que conlleva la propia acción de mover algo con su pensamiento más directo hace que los experimentos realizados centren su investigación en esta práctica. Ejemplos de ellos los podemos encontrar a continuación:

Un estudio revela que el uso de BCI para el registro de señales EEG aplicadas al control de un exoesqueleto de bajo coste ofrece un porcentaje de acierto total del 68%. Esta investigación fue llevada a cabo por la Universidad Miguel Hernández de Elche (España) [7]. Se empleó el uso de un BCI para el control de un brazo biónico a través de la *imaginación de movimiento*, en dicho estudio se realizaron 3 ensayos con 2 estados posibles, el primero en el que el usuario debía imaginar mover el brazo pero sin realizar la acción mientras el exoesqueleto apoyaba al movimiento en tiempo real y un segundo estado en el que el usuario debía no mover el exoesqueleto a través de la relajación. Los resultados que se obtuvieron son los siguientes:

Sesión	Imaginación	Relax	Total
1	86.2	48.5	67.3
2	69.2	56.9	63.1
3	73.1	79.2	76.2
Total	76.2 ± 8.9	61.5 ± 15.9	68.8 ± 6.7

Tabla 1. Resultados investigación UMH.

En ellos se puede observar como el porcentaje de acierto total del experimento resulta ser de un 68,8%. Siendo el primer estado, imaginación del movimiento, el que posee una mayor tasa de éxito, alcanzando el 76,2%. Este es un claro ejemplo donde podemos observar como la imaginación de movimiento supone una muy buena posibilidad a la hora de registrar señales EEG y realizar experimentación con BCI para el control de exoesqueletos.

Dentro de dicha investigación son muchas las metodologías y formas de realizar los ensayos las que se pueden aplicar. En 2018 la UMH junto con la Universidad Politécnica de Cartagena (España) realizaron un estudio que determinaba la influencia que tiene un exoesqueleto de miembro inferior en señales EEG [8]. Para llevar a cabo dicha experimentación los investigadores aplicaron el siguiente protocolo:



Establecieron dos periodos de relajación (R1 y R2) de 7 segundos cada uno, separados por un periodo de imaginación de marcha (GMI) de 17 segundos.

Al comenzar la prueba se le indicaba al usuario el inicio de la misma con R1. Posteriormente, un pitido definía el comienzo de GMI. El fin de periodo GMI y comienzo de R2 era indicado mediante dos pitidos. Durante la relajación, el usuario tenía que concentrarse en la respiración mientras que durante GMI tenía que imaginar que estaba andando. El usuario realizó 20 repeticiones para cada escenario del protocolo experimental.

Este estudio no refleja ningún tipo de porcentaje de acierto en cuanto al registro de señales EEG, aunque nos sirve para visualizar los distintos tipos de protocolos a la hora de llevar a cabo los ensayos, tema que nos servirá de ayuda de cara a preparar nuestra metodología de experimentación para este trabajo de fin de master.

En 2014 fue llevado a cabo un proyecto en la Universidad Politécnica de Cartagena (España) en el que se estudió el porcentaje de acierto de un dispositivo BCI de bajo coste en el registro de señales EEG [9]. En dicho trabajo se modificó el dispositivo Emotiv Epoc y se construyó un nuevo dispositivo, denominado Emoc, al que dotaron de mayor libertad a la hora de realizar los ensayos. Dichos ensayos aplicaban la metodología de *imaginación de movimiento*, a partir de los cuales debía imaginar mover su mano derecha y su mano izquierda además de pensar en palabras que comenzaran por cierta letra del abecedario, por lo tanto el experimento contaba con tres estados distintos. Tras realizar la experimentación sobre 4 sujetos se estimó que el porcentaje de acierto del dispositivo se situaba en torno al 46%, frente al 51% que ofrecía Emotiv Epoc a partir de la misma metodología. Años más tarde en la misma universidad otro proyecto validó estos resultados con una experimentación sobre 15 sujetos, donde el porcentaje de acierto volvió a situarse en torno al 46% [4].

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 2. Resultados investigación UPCT.

Con este ejemplo podemos ver cómo no todos los dispositivos presentan los mismos resultados, ya que al comienzo de esta investigación hemos visto porcentajes de hasta 76% y en este apartado nos encontramos con un 46% de acierto. Esto dependerá en gran parte del código que procese los archivos generados, los instrumentos que se utilicen durante la experimentación así como de la metodología aplicada, de ahí radica una buena calidad del material empleado, ya sea por el BCI utilizado, los electrodos que emplee y sus sensores o la calidad del gel si dichos electrodos precisan de él para mejorar la conectividad, además obviamente de la calidad con la que finalmente se lleve a cabo el procedimiento durante la realización de los experimentos.

También existen investigaciones que realizan la ejecución del movimiento en lugar de imaginarlo a la hora de llevar a cabo el registro de señales EEG. En 2014 se realizó un estudio, también en la Universidad Miguel Hernández de Elche (España) sobre decodificación de la marcha humana mediante señales de encefalograma [10]. Según este estudio se afirma que existe una correlación directa entre señales EEG y parámetros cinemáticos de brazos y piernas.

Procesando la información cerebral obtenida de las señales EEG el objetivo era generar los parámetros necesarios para mover un exoesqueleto, piernas biónicas, y además saber en qué estado de la marcha humana se encontraba el sujeto y qué movimiento deseaba hacer a continuación.

En este estudio se analizó una metodología para decodificar y clasificar la fase de la marcha humana a partir de componentes EEG de baja frecuencia. Se distinguieron dos estados, apoyo y balanceo, separados en diferentes fases. Para obtener la fase de marcha, se decodificó el ángulo de rodilla y posteriormente se analizó la tendencia del ángulo para obtener cada uno de los estados de la marcha. La metodología llevada a cabo fue la siguiente:

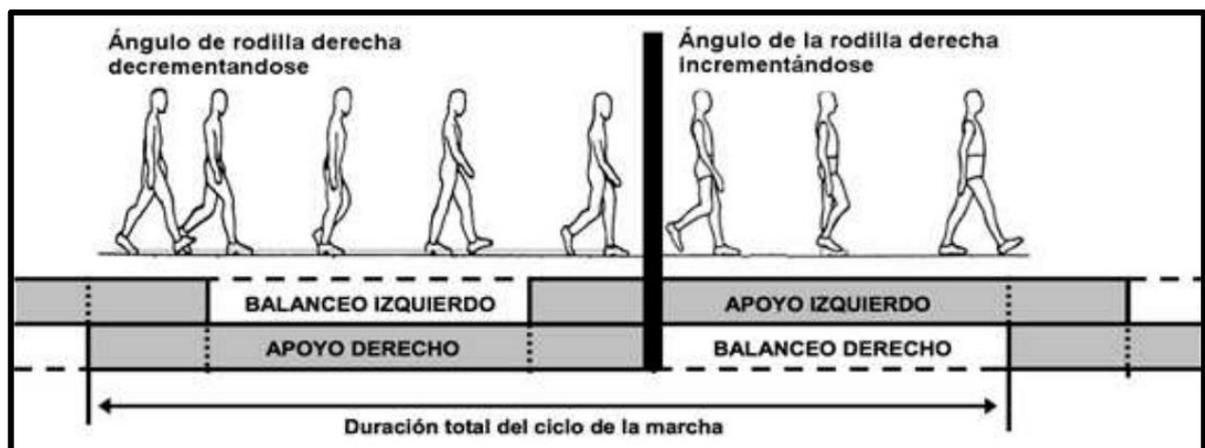


Figura 20. Estados de marcha investigación UMH.

3 usuarios caminaron a 2km/h en una cinta de andar mientras se registraban sus señales EEG y los ángulos de sus piernas simultáneamente durante rondas de 1 minuto, repitiendo dicha actividad 7 veces por cada sujeto y sesión, con una pequeña pausa entre repeticiones. Se realizó una sesión por usuario. Todas estas repeticiones se realizaron concentrándose en realizar una marcha normal y en una habitación en silencio.

Los resultados obtenidos muestran una gran correlación entre los ángulos decodificados y los ángulos reales de rodilla. La tasa de acierto en la clasificación de los estados de la marcha fue aproximadamente del 70%, lo que sugiere que esta metodología podría aplicarse en tiempo real durante procesos de rehabilitación con exoesqueletos. Estos resultados muestran que es posible diferenciar entre las fases de apoyo y balanceo de la marcha humana a través de las señales EEG. Estamos hablando de que lo que nuestro cerebro piensa que está haciendo se corresponde con lo que realmente está haciendo en un 70% de los casos.

- Otros métodos de aplicación:

La imaginación o ejecución del movimiento real son prácticamente los únicos métodos de aplicación en ensayos con dispositivos BCI y exoesqueletos, de largo son los más usados. Para encontrar investigaciones en las que se aplique otros métodos es necesario deshacernos del concepto de exoesqueleto de esta búsqueda bibliográfica ya que a día de hoy es muy baja la cantidad de experimentos con exoesqueletos que no empleen la metodología comentada anteriormente. Si no incluimos en la fórmula el concepto de exoesqueleto son muchas los métodos de aplicación en el estudio de señales EEG mediante BCI.

A continuación presentaremos algunos proyectos que han aplicado otros métodos de aplicación diferentes a la imaginación y ejecución real de movimiento:

Aplicación de distintas tareas. En 2017 en la universidad de Hong Kong (China) se llevó a cabo una investigación en la que se muestra como un dispositivo de un solo canal de adquisición de una señal EEG se puede utilizar para analizar los niveles de actividad cerebral en cuatro tareas cognitivas y motoras diferentes: *Operación aritmética, tecleo de dedos, rotación mental de figuras y tarea de elección léxica* [11]. Fueron programadas con Matlab y se pidió a los participantes que completaran tres niveles de dificultad en el orden: bajo, medio, alto para cada tarea. En cada nivel de dificultad, hay 25 pruebas agrupadas en 5 sesiones (es decir, 5 pruebas por sesión) donde cada experimento duró una hora.

1. Tarea de cálculo. *Operación aritmética*: Determinaran la exactitud de las ecuaciones aritméticas que se mostraban en la pantalla del ordenador presionando un botón: flecha izquierda para correcto y flecha derecha para incorrecto.

Low	Answer	Medium	Answer	High	Answer
$3 + 4 = 6$	F	$13 + 18 = 51$	F	$7 \times 3 - 12 = 19$	F
$4 + 2 = 6$	T	$61 - 12 = 49$	T	$63/3 - 32 = -19$	T
$2 + 7 = 4$	F	$52 - 67 = -8$	F	$78 + 11 \times 3 = 71$	F
$3 + 6 = 9$	T	$-11 + 28 = 17$	T	$(21 - 13) \times 4 = 32$	T
$5 + 2 = 8$	F	$-13 - 56 = -60$	F	$6 \times 6 - 79 = -23$	F

Tabla 3. Resultados experimento 1 investigación UMH.

2. Tarea de coordinación visión-motora. *Tecleo de dedos*: Seguir el patrón presentado en la pantalla del ordenador y realizar un patrón específico de tecleo en un teclado. Se establecieron tres niveles de dificultad en la tarea: bajo: dedo único de una mano, medio: dedos múltiples de una mano y alto: dedos múltiples de dos manos. Para las pruebas de nivel medio y alto, se indicó a los sujetos que presionasen todas las teclas al mismo tiempo en lugar de una por una.



Figura 21. Disposición teclado experimento 2 investigación UMH.

3. Tarea visual-espacial. *Rotación mental*: Comparar un par de figuras presentadas en la pantalla del ordenador y determinar si son el mismo objeto. El par de figuras podría ser el mismo objeto con diferente rotación, imágenes especulares u objetos diferentes. El nivel fácil contiene 6 cuadrados en el plano 2D, mientras que el nivel medio y alto están en el espacio 3D con 6 y 9 cubos respectivamente.

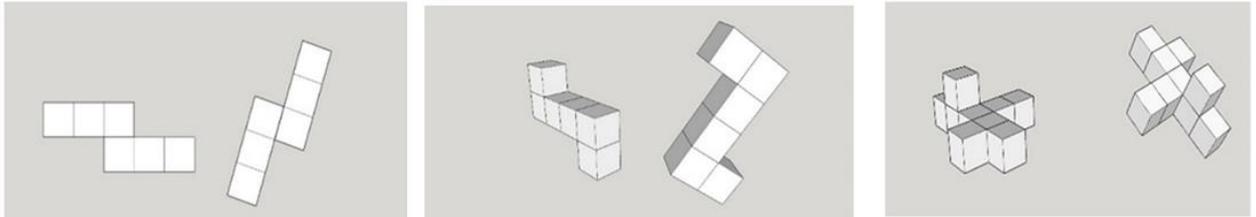


Figura 22. Tipos de figuras experimento 3 investigación UMH.

4. Tarea lingüística. *Elección léxica*: Identificar si el estímulo presentado es una palabra inglesa real o una pseudopalabra. Se aplican y crean diferentes niveles de dificultad variando la frecuencia de uso de las palabras, la longitud de la palabra y la parte del discurso.

Low		Medium		High	
Real Word	Pseodo Word	Real Word	Pseodo Word	Real Word	Pseodo Word
Butter		narrator		steadiness	
Bread		determined		anomalous	
Hair		dependency		supposition	
Pepper		forecast		expatriate	
	hlnnd	carriage	carround	erudition	erumition
	hnajl	moderate	motate	negligible	neffigible
	eiloul	rehearsal	reheandal	dehydrate	dehyflate
	phnqa	inhabit	inhobit	adjudication	aggudicaiton

Tabla 4. Clasificación dificultad experimento 4 investigación UMH.

Los autores concluyen que existe una alta correlación entre el nivel de dificultad de la tarea a desarrollar con los niveles de actividad cerebral. La precisión de la clasificación de la carga de trabajo mental podría alcanzar el 65-75%. Fundamentan sus buenos resultados frente a otros estudios en tres posibles factores: variación intraindividual, duración de la tarea y selección del canal EEG.

Estos rangos de valores se repiten en el trabajo de fin de master realizado por Fernando Flórez Revuelta en el que determina la viabilidad de la utilización del dispositivo Emotiv Eporc en un BCI [12]. En él cinco usuarios realizaron distintos experimentos de tres y cuatro tareas para más tarde utilizar Máquinas de Vector Soporte (SVM) como algoritmo de clasificación. Las tareas realizadas fueron:

Número	Tarea	Descripción
1	Reposo (R)	Cuenta atrás de 20 a 0
2	Brazo (B)	Imaginación de un movimiento circular pequeño repetitivo del brazo derecho
3	Canción (C)	Cantar mentalmente la canción «Cumpleaños feliz»
4	Matemáticas (M)	Calcular sucesivas sumas de la serie de Fibonacci
5	Objeto (O)	Rotación mental de un objeto

Tabla 5. Tipos de tareas experimento 5 investigación UMH

La metodología aplicada fue la siguiente:

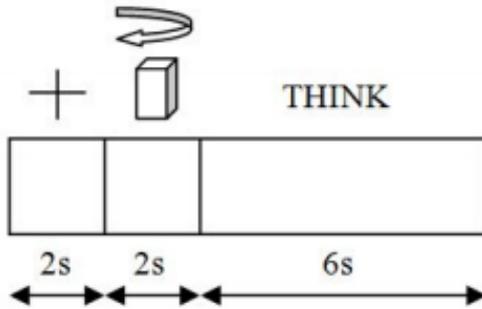


Figura 23. Duración estados experimento 5.

Cada prueba está compuesta por 25 tareas, con una duración total de 250 segundos, siendo repetida cada prueba 4 veces, las tres primeras son usadas como entrenamiento y la última es la usada para comparar sus resultados con la media de las tres primeras.

Entre cada una de las pruebas se realiza una pequeña pausa. Una vez que comienza la prueba, se muestra por pantalla la tarea mental que el usuario debe realizar. Cada una de las 5 tareas se muestra de forma aleatoria 5 veces, con una duración de 10 segundos.

En la clasificación de los resultados obtenidos en los experimentos realizados sin incertidumbre muestran que para 3 tareas podemos observar, para la mejor combinación estudiada, como la tarea *Reposo* presenta un porcentaje de acierto del 77.48 %, la tarea *Matemáticas* es reconocida correctamente el 68.53 % de las veces y la tarea *Objeto* tiene un porcentaje de éxito del 67.35 %. Realizando el análisis de esta combinación de 4 tareas, para la mejor combinación estudiada, podemos comprobar que la tarea *Reposo* presenta un porcentaje de acierto del 73.24 %, la tarea *Brazo* del 58.27 %, la tarea *Matemáticas* del 63.01 % y la tarea *Objeto* del 58.31%.

Los resultados obtenidos en la clasificación, con porcentajes de acierto mayores del 75 % para tres tareas y del 69 % para cuatro tareas, demuestran que el dispositivo Emotiv EPOC es adecuado para ser usado en una Interfaz Cerebro-Computador.

Abrir y cerrar los ojos. Investigadores de distintas universidades turcas han estudiado como pacientes con depresión respondían a experimentos en los que se registra el porcentaje de acierto obtenido a partir de señales EEG [13]. En esta investigación se realizaron las pruebas a 30 usuarios, en la que 2 estados formaban el experimento, el primero era cerrar los ojos de forma continuada durante un tiempo determinado y el segundo estado consistía en abrirlos durante el mismo espacio de tiempo. El sistema de experimentación era el siguiente:

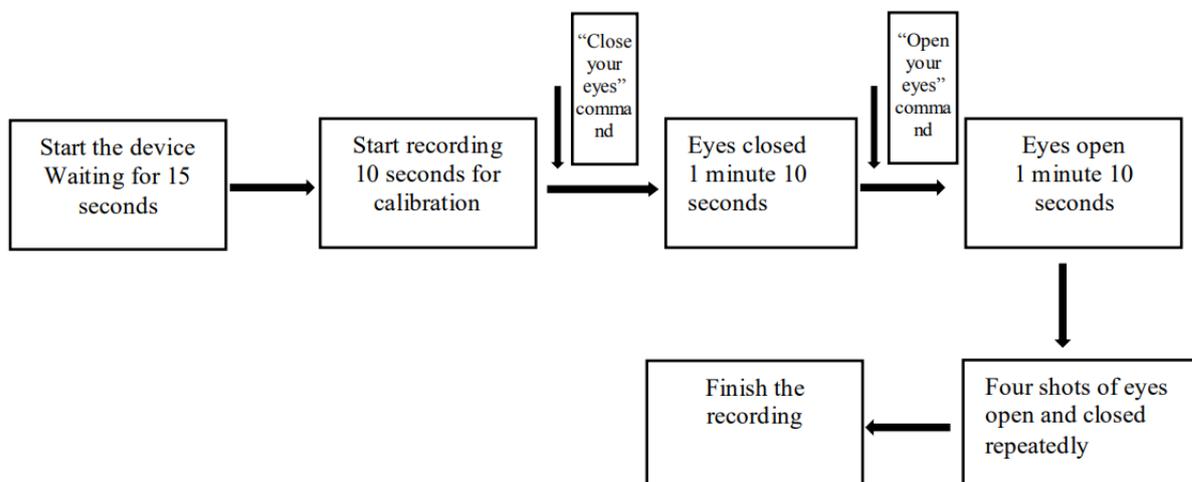


Figura 24. Metodología experimento universidades turcas.



Cada usuario debía realizar únicamente un ensayo cuya duración total era de 7 minutos y 10 segundos. Dicho ensayo comenzaba con la calibración del dispositivo durante 10 segundos, a continuación al usuario se le daba la orden de cerrar los ojos mediante una voz. Debía permanecer en esta posición de manera continuada durante 1 minuto y 10 segundos. A continuación se le daba la siguiente orden en la que debía abrir los ojos durante el mismo tiempo, una vez finalizado este estado se volvían a repetir los dos comandos cuyas ordenes eran las de cerrar y abrir los ojos. Así hasta completar 3 repeticiones para cada comando, momento en el cual se da por finalizado el experimento.

Los primeros y últimos 5 segundos de cada experimento se eliminaron para así descartar que el hecho de dar la orden de que acción deben realizar mediante una voz evitara la correcta y completa concentración de los usuarios a la hora de ejecutar dichos comandos, quedando así que cada estado tuviese 1 minuto de registro de cara a ser estudiado.

La experimentación se realizó mediante el BCI Emotiv EPOC y el procesamiento de datos se llevó a cabo mediante algoritmos de clasificación *kNN*. Las señales EEG fueron registradas y clasificadas obteniendo un porcentaje de acierto en la clasificación del 91,30%.

En principio el estudio no está completamente relacionado con el objetivo que estamos planteando en esta investigación pero podemos ver una metodología distinta a la que venimos empleando que podría ser usada en futuros ensayos.

Empleo de la memoria. En otros estudios del uso de BCI en señales EEG se han visto metodologías distintas donde centran su estudio en la memoria, por ejemplo en el *Kumoh National Institute of Technology* de Korea, han realizado un estudio comparativo en el que muestran a los usuarios 160 imágenes por ordenador y al finalizar el experimento, trascurridos 30 minutos, preguntan a los sujetos qué imágenes recuerdan y cuáles no [14]. Los resultados obtenidos se presentan en la siguiente tabla:

Domain	Feature	Target	Evaluation	Result
Text	EEG	Memorability classification	Accuracy	51.18
				61.9
				72.0
Image	EEG	Memorability score Memorability classification	SRCC Accuracy	0.71
				69.0

Tabla 6. Resultados experimento Empleo de la memoria.

En su estudio, basado en imágenes consiguen un acierto del 69% de acierto en la correcta memorización. Lo comparan con otros en los que consiguieron valores entre 51,18 % y 72% de acierto, pero en ese caso para el hecho de recordar textos. Los resultados experimentales validan que la predicción de memorias basada en señales EEG sigue siendo un desafío, pero un enfoque prometedor con varias oportunidades y potenciales.

Se podría barajar la posibilidad de emplear la memoria como modo de aplicación a la hora de hacer que un exoesqueleto comience a andar y se pare. Esto podría llevarse a cabo mediante la asociación de la orden andar a recordar una imagen o un texto mostrado por pantalla, o a cualquier texto o sonido recitado mediante un auricular, tras el cual el sujeto debiese realizar la acción de recordar para mover el exoesqueleto.

Aplicación modelo matemático. Otro método que se podría aplicar serían las operaciones matemáticas para el control de un exoesqueleto mediante BCI a través de las señales EEG. Hay ciertos estudios que han investigado sobre el tema. En la universidad *Tomas Bata* de la República Checa se realizó una investigación para detectar qué modelo matemático era el más óptimo y suponía menos esfuerzo a la hora de resolver ecuaciones diferenciales [15]. En dicho estudio pretendía demostrar si la resolución de un sistema lineal de ecuaciones era más sencilla mediante el método de eliminación Gaussiana o por el método de sustitución. En concreto el sistema lineal de ecuaciones fue el siguiente:

$$\begin{aligned}4x_1 + 3x_2 + 9x_3 &= 9 \\2x_1 + 5x_2 - 8x_3 &= 8 \\x_1 + 8x_2 - 7x_3 &= 12\end{aligned}$$

Cuya solución correcta y única era: $K = \{[3,2,1]\}$

Este estudio no muestra unos resultados de porcentaje de acierto respecto a la aplicación de modelos matemáticos en el registro de señales EEG, sino que únicamente recoge información sobre el esfuerzo a la hora de resolver el sistema de ecuaciones mostrando las dos siguientes imágenes:

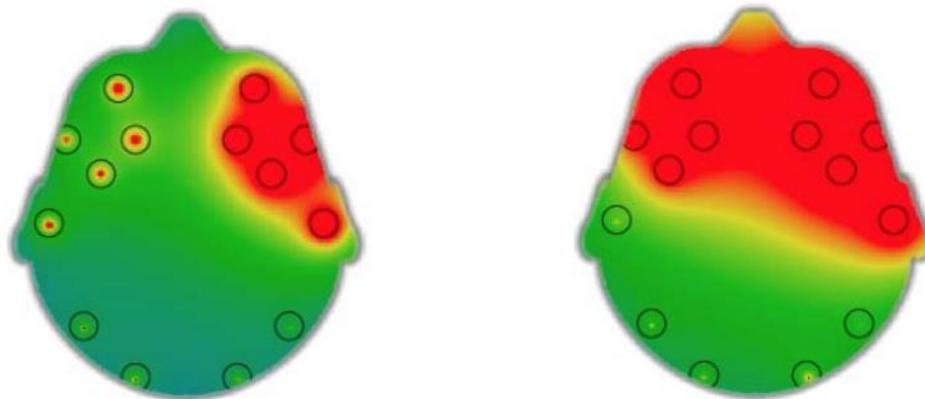


Figura 25. Actividad cerebral durante el uso de la eliminación Gaussiana y durante el uso del método de sustitución

Se puede observar como la actividad cerebral relacionada con operaciones matemáticas se localiza en el hemisferio derecho de la cabeza, siendo la eliminación Gaussiana un método más sencillo de aplicar en la resolución de sistemas de ecuaciones lineales.

Videojuegos. En las universidades sudamericanas de Chile, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, y Colombia, Universidad de San Buenaventura de Cali, además de en la Universidad de Zaragoza, España, se llevó a cabo un experimento en el que se estudió que influencia tenía jugar a videojuegos en registro de señales EEG y si el sonido de los videojuegos ayudaba a la concentración o no. Los videojuegos elegidos fueron Geometry Dash y Candy Crush [16]. La metodología de experimentación fue la siguiente:

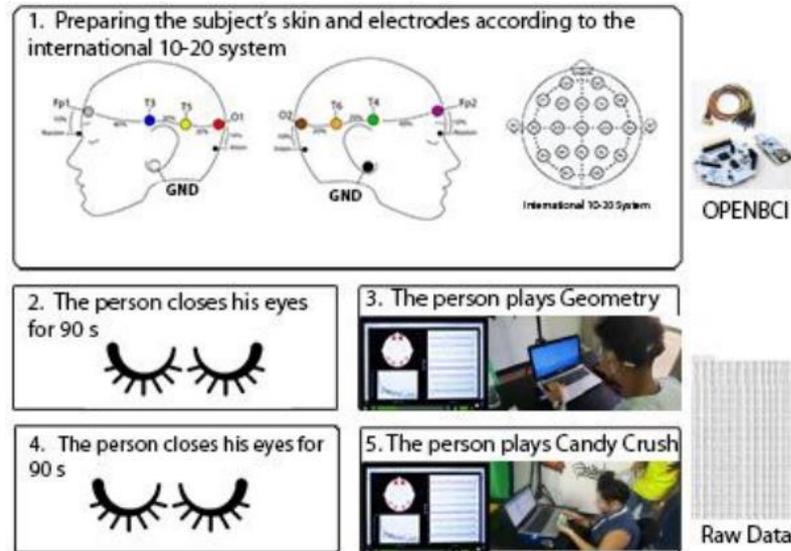


Figura 26. Metodología experimentación para videojuegos.

En primer lugar se preparó la colocación de los electrodos cuya distribución fue el sistema 10-20. El dispositivo empleado en los ensayos fue el *OPENBCI*. En segundo lugar, y para dar comienzo al registro, el usuario cerraba los ojos durante 90 segundos, para según ellos neutralizar las emociones, a continuación el sujeto jugaba al videojuego Geometry Dash durante 180 segundos, seguidamente volvía a cerrar los ojos para volver a relajarse, transcurrido el tiempo jugaba al Candy Crush durante 180 segundos y finalizaba el registro.

Los resultados finales mostraron que las pruebas en las que jugaron a los videojuegos con sonido provocaba un empeoramiento de la concentración frente a los experimentos realizados sin sonido en los que se encontraban más relajados. De esta investigación podríamos obtener información respecto a la metodología aplicada, en la que se introduce un periodo de relajación de 90 segundos entre distintos experimentos, lo cual provocó una mejora en la concentración de los usuarios.

Hay que tener en cuenta que varios estudios hacen especial mención a la variación de los resultados, señales EEG, registrados mediante el BCI debido a fenómenos externos como pueden ser el ruido y la cantidad de luz que entra por los ojos. En la realización de nuestros experimentos se han mantenido las mismas condiciones para cada uno de ellos, pudiendo así aislar los resultados a únicamente la dificultad del experimento, es decir la capacidad de concentración.

Conclusión investigación.

Tras llevar a cabo esta investigación bibliográfica en la que se han estudiado distintos trabajos y artículos científicos que estuviesen relacionados con la captación de señales EEG mediante BCI, poniendo especial atención a las investigaciones con exoesqueletos, se han podido sacar ciertas conclusiones.

A día de hoy la forma de aplicación e investigación de las señales de electroencefalograma más común es la *imaginación de movimiento*.



La gran mayoría de estudios centran su trabajo en utilizar la mente para obtener unos resultados concretos y en el caso de los exoesqueletos se utiliza la imaginación de movimiento para tratar de moverlos a través de un BCI.

Seguidamente se emplea la ejecución del movimiento, aunque no hay tantos estudios como en el caso anterior que hayan aplicado esta metodología.

No existen demasiadas investigaciones que tengan el mismo objeto de estudio que este trabajo de fin de máster pero sí hay diversos estudios relacionados con el tema principal.

Se han podido ver investigaciones que sitúan entre el 50% y 70% el acierto en la clasificación de señales EEG, es decir que lo que generamos a través del pensamiento tiene una buena correlación con lo que realmente sucede en el mundo real, lo hemos podido ver en el estudio de la *"Decodificación de la marcha humana mediante señales EEG"* [10].

Este sería un buen punto de partida para comenzar nuestra investigación en la que a priori pretendemos controlar unas piernas biónicas a través de la imaginación de movimiento, ya que casi la totalidad de estudios con exoesqueletos emplean esta metodología.

Además se han podido observar otras metodologías a la hora de llevar a cabo la experimentación. Son muchas las formas de llevar a cabo los ensayos, cada institución aplica distintos procedimientos a sus investigaciones, desde variar el tiempo de los experimentos, modificar el número de estados que tendrá el procedimiento, las fases de repetición que tendrá el ensayo en total, si es necesario un periodo de descanso o relajación entre estados o entre fases, etc. Por lo que la elección, desarrollo y mejora de la metodología de aplicación para la experimentación será un elemento fundamental en la consecución exitosa de nuestros objetivos.

También ha quedado claro que hay ciertos aspectos que sí parece que estén relacionados y así lo han demostrado los estudios, algunos de ellos presentes en este trabajo, como por ejemplo que un entorno tranquilo y sin ruido mejora la concentración de los ensayos, que las luces que intervengan en los experimentos provocan una reacción en los usuarios que modifica su concentración, por lo que la luz que entra por los ojos debe de ser estable y sin grandes cambios durante el registro de señales EEG, etc.

Aparte de la forma en la que se llevan a cabo los experimentos también hemos visto distintos tipos de ensayos en los que se estudian diversos métodos para registrar las imágenes EEG, desde imaginación o ejecución de movimiento, como ya hemos comentado, hasta la ejecución de movimientos como cerrar y abrir los ojos o a boca, mover la lengua, pestañear, jugar a videojuegos durante el registro de las señales, resolución de problemas matemáticos, empleo de la memoria durante dicho registro, focalizar sentimientos humanos para clasificar sus estados de ánimo, tratar de girar objetos, como es el caso que distintas compañías usan para ejercitar y mejorar la experiencia del usuario con las señales EEG, etc.

En los siguientes puntos de esta primera fase debemos emplear la información recopilada para formar una metodología y un modelo de aplicación lo más eficaz posible de cara a obtener resultados que se centren en el método a través de la imaginación y ejecución del movimiento y que se centren en los resultados a través del resto de posibles modelos de aplicación durante la experimentación.



2.2. Definición de los experimentos a desarrollar y metodología de los mismos

Selección de los experimentos.

Tras realizar la investigación expuesta en el punto anterior se deben elegir 4 formas de aplicación distintas para poner en marcha y parar el exoesqueleto. De estas cuatro formas de aplicación comentadas dos de ellas han sido ya establecidas desde el inicio del proyecto. Dichas formas de aplicación son las siguientes:

1. *Intención/imaginación de movimiento*, es decir imaginar que vas a empezar a andar pero sin realizar el movimiento, solo imaginarlo. Lo mismo con el hecho de parar.
2. *Ejecución del movimiento*, es decir con el casco puesto realizar la acción físicamente, andar y parar, realizando realmente el movimiento.

Para las dos formas restantes debemos decidir qué modo de aplicación escoger. Son muchas las posibilidades y lo que buscamos es establecer dos estados distintos, andar y parar, mediante dos pensamientos completamente diferenciados, para así evitar que el usuario pueda confundirlos, mezclarlos y provocar una disminución en la calidad de los resultados finales.

Como no hay demasiadas investigaciones respecto al control de un exoesqueleto mediante un BCI aplicando un modelo distinto a la imaginación o ejecución del movimiento, lo que haremos en este trabajo de final de máster será realizar un proceso de experimentación que sirva como base para este tipo de investigaciones.

La intención será experimentar con modelos completamente distintos entre sí que nos ayuden a elevar el porcentaje de acierto tras el registro de las señales EEG. Hemos recreado una lista de posibles modelos con diferentes ejemplos:

- Concepto matemático: Realizar una operación matemática aleatoria (sumas, restas, multiplicaciones o divisiones), recitar la tabla de un determinado número, resolver sistemas de ecuaciones.
- Concepto lingüístico: Tararear o silbar la melodía de una canción, pensar palabras que comiencen por una determinada letra.
- Concepto físico-motriz: Lanzar y recoger una pelota con la mano, mover un objeto o girar su posición, por ejemplo un cubo de Rubik, chasquear los dedos.
- Concepto visual: Pensar en un color determinado durante el proceso de experimentación.

De entre todos los casos anteriormente comentados y ya para formar nuestra lista final hay que diferenciar la formas de aplicación que estén directamente relacionadas con la intención de marcha que queremos ejecutar, es decir andar y parar, ya que no tendrá el mismo sentido a la hora de querer mover unas piernas que el mero hecho de pensar en mover esas piernas o tararear una canción, son dos actividades completamente distintas en la que una si se relaciona con el movimiento real y la otra no.



La lista final con las formas de aplicación resulta ser la siguiente:

Formas de aplicación directamente relacionadas con la intención de marcha:

1. *Intención/imaginación de movimiento*, es decir imaginar que vas a empezar a andar pero sin realizar el movimiento, solo imaginarlo. Lo mismo con el hecho de parar.
2. *Ejecución del movimiento*, es decir con el casco puesto realizar la acción físicamente, andar y parar, realizando realmente el movimiento.

Formas de aplicación que no tengan nada que ver con la intención de marcha:

3. Realizar una *multiplicación* para llevar a cabo el movimiento de andar, es decir recitar mentalmente la tabla de un número. Para parar el exoesqueleto el usuario debe *relajarse*, es decir dejar la mente en blanco y no pensar en nada o pensar en un ambiente tranquilo.
4. *Tararear una canción* para realizar el movimiento de andar y pensar en un color determinado para realizar el movimiento de parar.
5. *Lanzar y recoger una pelota* con la misma mano para realizar el movimiento de andar y *pensar en lanzar y recoger* esa misma pelota pero sin realizar el movimiento para parar el exoesqueleto.
6. *Pensar en mover la mano izquierda* para realizar el movimiento de andar y *pensar en palabras* que comiencen por una determinada letra para realizar el movimiento de parar.

Estas serán las actividades que se ejecutarán durante la experimentación. Como podemos ver son más de 4 experimentos los que se llevarán a cabo, esto se hará para abarcar un abanico más amplio en cuanto a encontrar las actividades que nos ofrezcan un porcentaje de acierto muy alto, en torno a un 80-90%. Lo que buscamos es probar distintas alternativas para que nos sea más probable encontrar las acciones idóneas a la hora de querer mover un exoesqueleto con porcentajes de acierto altos.

Metodología.

Necesitamos conocer 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 para cada uno de los 6 modos de aplicación vistos en el apartado anterior 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.

Cabe comentar que en cuanto a la segunda forma de aplicación, es decir la ejecución del movimiento de marcha, la posición deberá ser erguida en lugar de sentada en una silla ya que los usuarios necesitan realizar el movimiento de andar. Este movimiento de andar y parar se realizará a una velocidad lenta, en torno a los 2km/h de velocidad. Además por el mero hecho de tener que realizar esta posición erguida la imaginación de movimiento, la primera forma de aplicación, también se realizará del mismo modo, aunque parado en el mismo lugar, para así poder seguir una misma metodología a la hora de poder comparar las dos formas de aplicación que están completamente relacionadas con la marcha.

Una vez comenzada una sesión cada individuo deberá realizar 2 acciones por experimento, estas dos acciones serán interpretadas como llevar a cabo el movimiento de andar y parar. Dichas acciones para cada experimento son las siguientes:

- Experimento 1: *Imaginación de movimiento de andar y parar.*
- Experimento 2: *Ejecución del movimiento de andar y parar.*
- Experimento 3: *Cálculo mental de la tabla de un número para andar y relajarse para parar.*
- Experimento 4: *Tararear una canción para andar y pensar en un color para parar.*
- Experimento 5: *Lanzar y recoger una pelota con la mano para andar y pensar en lanzar y recoger una pelota para parar.*
- Experimento 6: *Pensar en mover mano izquierda para andar y pensar en palabra que comiencen por una determinada letra para parar.*

Estas acciones serán comunicadas al individuo que esté realizando la prueba a través de 2 imágenes distintas por experimento, una para cada estado de la marcha. Éstas 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.

Las imágenes que serán mostradas por pantalla serán las siguientes:



Figura 27. Acción 1 y 3 pensar/ejecutar acción de andar. Figura 28. Acción 2 y 4 pensar/ejecutar acción de parar.

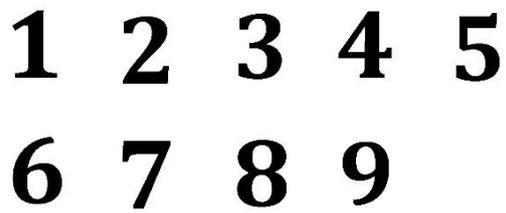


Figura 29. Acción 5 calcular tabla de multiplicar.



Figura 30. Acción 6 relajarse.



Figura 31. Acción 7 Tararear una canción.

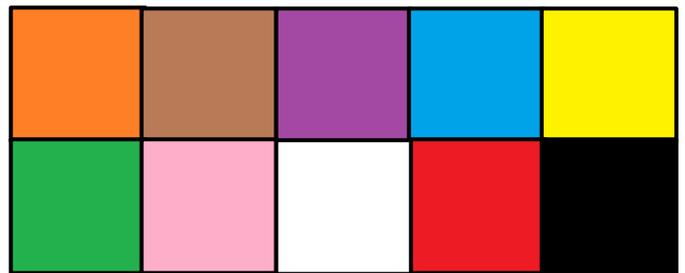


Figura 32. Acción 8 Pensar en un color determinado.



Figura 33. Acción 9 Ejecutar lanzar y recoger pelota.



Figura 34. Acción 10 Pensar en lanzar y recoger pelota.

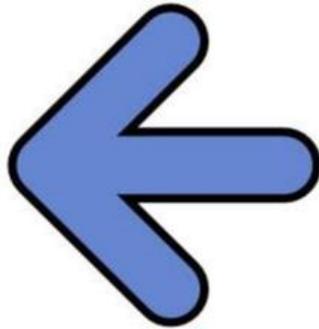


Figura 35. Acción 11 Pensar en mover mano izquierda.



Figura 36. Acción 12 Pensar en palabras con inicial.

Estas imágenes reflejan lo siguiente:

- Para el primer y segundo experimento nos encontramos la señal de un hombre simbolizando que debe comenzar a ejecutar/pensar la acción de andar, a su lado puede verse la señal de un hombre tachado simbolizando una prohibición en la que se debe dejar de andar, es decir se debe ejecutar/pensar la acción de parar.
- Para el tercer experimento nos encontramos una serie de números del 1 al 10 simbolizando que se debe ejecutar el cálculo mentalmente de la tabla de multiplicar del número seleccionado, a su lado puede verse la figura de un sujeto meditando lo que simboliza que se debe ejecutar la acción de relajación.
- Para el cuarto experimento nos encontramos la figura de una nota musical simbolizando que se debe ejecutar la acción de tararear una canción mentalmente sin producir ningún tipo de sonido, a su lado nos encontramos una serie de colores simbolizando que se debe ejecutar la acción de pensar en el color seleccionado.
- Para el quinto experimento nos encontramos una pelota de tenis simbolizando que se debe comenzar a ejecutar la acción de lanzar y recoger una pelota con la misma mano, a su lado puede verse la señal de la misma pelota tachada simbolizando una prohibición en la que el sujeto no debe ejecutar la acción sino que debe pensar en ejecutar la acción de lanzar y recoger.
- Para el sexto y último experimento nos encontramos una flecha señalizando la izquierda que simboliza que se debe comenzar a pensar en mover la mano izquierda pero sin ejecutar el movimiento, a su lado puede verse la imagen de una letra que simboliza que se deben pensar palabras que comiencen por la inicial de dicha letra.

La elección de esta metodología de completar 4 sesiones para cada experimento realizando cada una de ellas de la misma forma se fundamenta en el realizar los experimentos bajo un mismo marco normativo, que es el marco de la *BCI competition*. Podríamos haber añadido o quitado sesiones a cada experimento pero no estaríamos llevando a cabo una experimentación bajo un marco normativo con el que poder comparar nuestros resultados. Por ello situamos el número de

sesiones en 4, las tres primeras sesiones serán de base de estudio y la cuarta comparará sus valores con las 3 primeras para sacar un porcentaje de acierto final.

Cuando se completen todos los experimentos 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 de cada experimento. Además se deberá rellenar un apartado de información personal de cada sujeto que nos servirá para categorizar los resultados, estudiarlos y con ello obtener las conclusiones finales.

2.3. Experimentación práctica. Generación de la base de datos

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 37. Dispositivo en funcionamiento.



Figura 38. Dispositivo carga completa.



Figura 39. 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. Esta capacidad de carga y de utilización se ha visto reducida por el deterioro de la misma, necesitando solo 30 minutos para ser cargada, con únicamente 20 minutos de duración de uso lo que reduce mucho las posibilidades de aplicación en la experimentación, por lo que debido a este deterioro se ha decidido cambiarla. Para ello se han consultado distintas posibilidades, entre las opciones elegidas tenía que existir una seguridad en la batería que ofreciera garantías y además cumpliera con los requisitos de duración, por ello se acudió a una tienda especializada con la que la universidad ha colaborado en más de una ocasión, en este caso se trata de *Teditronic*, cuyos componentes son de muy buena calidad, tras consultarlo con especialistas se adquirió una batería que cumplía los requisitos, fue implementada y testeada con una perfecta funcionalidad, renovando así la batería anterior.

1. 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, éstos se encuentran numerados y etiquetados, 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 40. Correcta colocación de la malla sobre la cabeza.

2. 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.

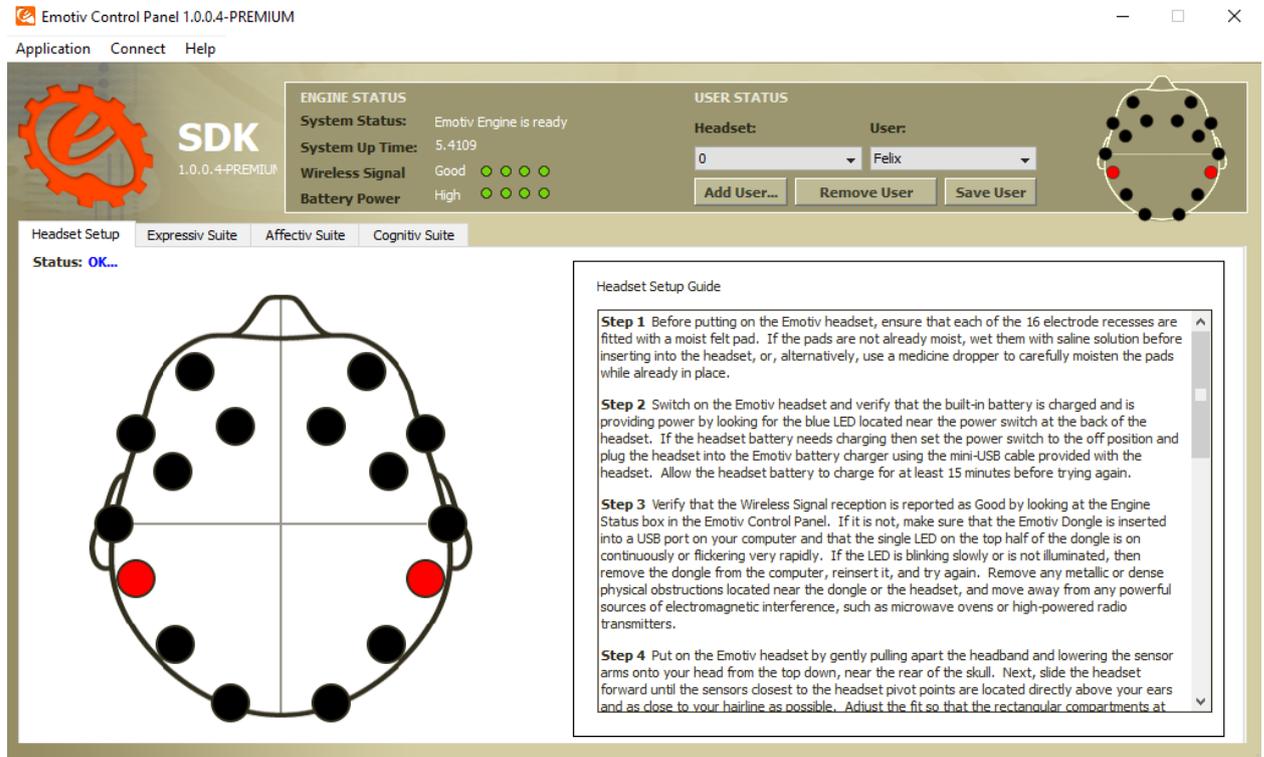


Figura 41. Pestaña Headset Setup Control Panel.

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 42. 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 conductivo en los electrodos uno a uno. La apariencia que debe tener el Control Panel antes de comenzar el experimento es la siguiente:

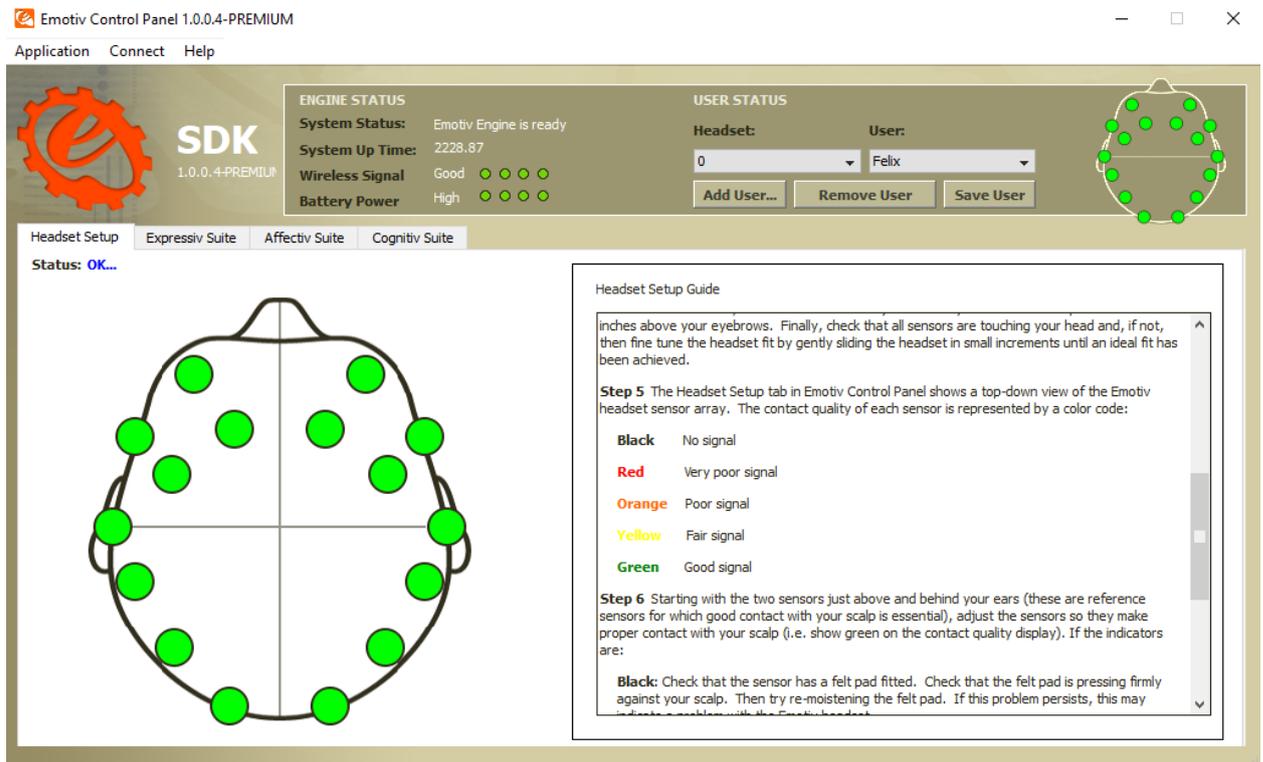


Figura 43. Conexión establecida.

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. Se puede encontrar más información acerca del panel de control empleado en “Predicción del pensamiento motor mediante señales de encefalograma” [4], donde se explican las demás funcionalidades de este desarrollador SDK.

Una vez vista la forma de utilización y manejo del 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.

Realización de los experimentos

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 posicionarse de dos formas distintas:

- Para los experimentos 1 y 2 donde se debe pensar y realizar la acción de andar y parar el sujeto debe situarse de pie frente al ordenador, espalda recta, brazos distendidos a cada lado y piernas separadas a la altura de los hombros, se ejecutará el pensamiento o movimiento de andar y parar conforme se vayan sucediendo las imágenes correspondientes en el ordenador.
- Para los experimentos 3, 4, 5 y 6 el sujeto 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.



Figura 44. Posición correcta para realizar el experimento.

Estas posiciones 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.

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 2 imágenes distintas de forma individual en intervalos de 15 segundos que harán relación a la acción que el individuo debe realizar. Por ejemplo para el experimento 2 mostrará:



Figura 45. Acción Andar.



Figura 46. Acción Parar.

Recordamos que las acciones a realizar durante cada experimento son:

- Experimento 1: Imaginación de movimiento de andar y parar.
- Experimento 2: Ejecución del movimiento de andar y parar.
- Experimento 3: Cálculo de la tabla de un número para andar y relajarse para parar.
- Experimento 4: Tararear una canción para andar y pensar en un color para parar.
- Experimento 5: Lanzar y recoger una pelota con la mano para andar y pensar en lanzar y recoger una pelota para parar.
- Experimento 6: Pensar en mover la mano izquierda para andar y pensar en un palabra que empiece por cierta inicial para parar.

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 47. 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 las sesiones restantes. 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, 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 las 4 sesiones correspondientes 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 y realizar el siguiente, así hasta completar los 6 experimentos.



Figura 48. Usuario realizando experimento

Formulario

Cuando finalicen los cinco experimentos cada usuario deberá rellenar un formulario en el que se reflejan las opiniones personales a ciertas preguntas relacionadas con la comodidad y complejidad de cada experimento, así como se deberá rellenar información personal.

La creación de este formulario fue un objetivo secundario ya que no forma parte directa de ninguno de los objetivos a cumplir. Con su creación lo que buscamos es poder categorizar las actividades para observar cuál ha resultado más difícil de llevar a cabo, así como las más sencilla. Además de estudiar la metodología empleada para conocer así como los tiempo de experimentación y descanso influyen sobre los sujetos

También 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 se tomó de un trabajo de investigación anterior y se modificó adaptándolo a este trabajo. 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. Dificultad de los experimentos

- Experimento 1: Imaginación de movimiento de la marcha

¿Le ha parecido difícil realizar el experimento?

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

¿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 dos estados le ha resultado más difícil concentrarse?

Imaginar andar Imaginar parar

- Experimento 2: Ejecución del movimiento de la marcha

¿Le ha parecido difícil realizar el experimento?

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

¿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 dos estados le ha resultado más difícil concentrarse?

Ejecutar andar Ejecutar parar



• **Experimento 3: Concepto matemático y relajación**

¿Le ha parecido difícil realizar el experimento?

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

¿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 dos estados le ha resultado más difícil concentrarse?

Cálculo mental Relajación

• **Experimento 4: Concepto lingüístico y visual**

¿Le ha parecido difícil realizar el experimento?

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

¿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 dos estados le ha resultado más difícil concentrarse?

Tararea canción Visualización color

• **Experimento 5: Concepto físico-motriz**

¿Le ha parecido difícil realizar el experimento?

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



¿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 dos estados le ha resultado más difícil concentrarse?

- Ejecutar lanzar y recoger pelota
- Pensar lanzar y recoger pelota

Experimento 6: Concepto Imaginación-lingüístico

¿Le ha parecido difícil realizar el experimento?

- 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

¿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 dos estados le ha resultado más difícil concentrarse?

- Pensar en mover la mano izquierda
- Pensar en una Palabra

Bloque 3. General

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

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

¿Ordene los seis experimentos de más complicado a más sencillo?

- Experimento 1
- Experimento 2
- Experimento 3
- Experimento 4
- Experimento 5
- Experimento 6

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

.....

.....

Figura 49. Formulario experimento Emoc

2.4. Tratamiento de los datos

Han sido varios códigos los que han hecho posible el registro y procesado de datos. Estos códigos han sido creados 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 [17]. Dichos códigos han sido modificados y facilitados posteriormente por el director de este proyecto permitiendo realizar experimentos para dos estados en lugar de tres como estaba configurado y más tarde han sido modificados por mí mismo permitiendo variar los experimentos realizados, cambiando el código para que al ser ejecutados realizaran los 6 experimentos comentados a lo largo de este trabajo.

A continuación se explican los pasos llevados a cabo desde que un usuario realiza el ensayo hasta que se obtienen sus resultados finales:

1. Registro de datos

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.

Al comienzo del proyecto se nos facilitó una carpeta en la se encontraban los ficheros Matlab que deben ser ejecutados para realizar el registro de cada sesión de experimentos. El contenido de esta carpeta lo podemos ver ilustrado en la siguiente figura:

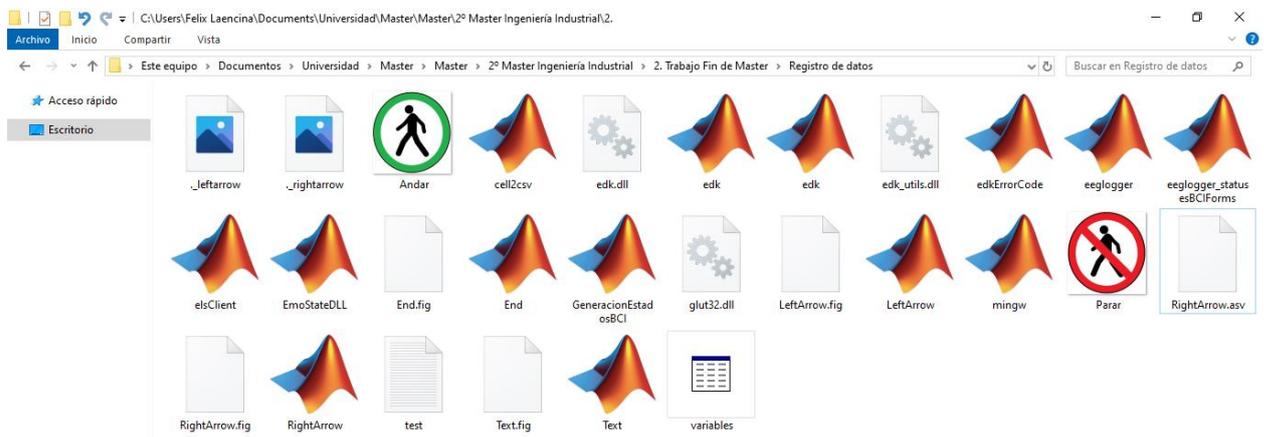


Figura 50. Carpeta para la realización de los experimentos.

En dicha carpeta podemos ver los diferentes archivos que serán empleados para hacer funcionar cada una de las partes del código, además de las imágenes que se incorporaron y que serán mostradas en cada experimento, por ejemplo la figura anterior hace referencia al primer experimento donde las acciones a ejecutar por el usuario son las de pensar en andar y parar, sin embargo para llevar a cabo el experimento número 4 donde las acciones son tararear una canción y pensar en un color determinado las imágenes que nos encontraríamos en su carpeta correspondiente serían las siguientes:



Figura 51. Tararear una canción.

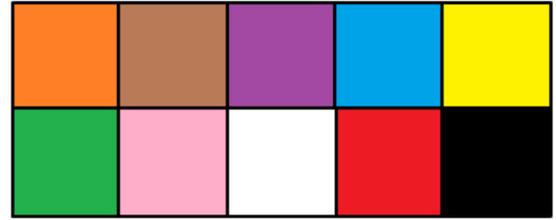


Figura 52. Pensar en un color determinado.

Si prestamos una mayor atención a cada fichero veremos que sin lugar a dudas hay uno que contiene la información que hará que todo el programa realice su función principal, la cual es realizar el experimento de forma completa. Este es el fichero Matlab denominado *eeglogger_statusesBCIForms*. Dicho fichero cargará el código encargado de registrar la información que los electrodos captan 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 decodificadas por el código.

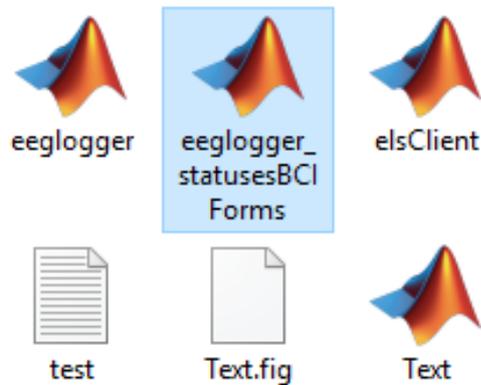


Figura 53. Archivo *eeglogger_statusesBCIForms*.

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 in seconds
samples_taken = 0;% number of samples stored from the headset
counter_status = 0;

status_set_matrix = [3 7 3 7 3 7 3 7 3 7 3 7 3 7 3 7];
experiment_number = 1;
status_last = 0;
```

Figura 54. 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 ciertos valores. Entre los existentes vamos a mencionar algunos para ver el funcionamiento de esta parte del código del programa.

Podemos observar dentro del primer 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.

También nos encontrarnos resaltada 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.

Status_set_matrix hace referencia a qué estados se ejecutarán y en qué orden progresivo lo harán. Para la primera fase de nuestro experimento vemos que solo nos encontramos dos valores, 3 y 7, estos hacen referencia a las acciones de marcha y paro correspondientemente. Esta sección ha sido modificada de anteriores proyectos donde existían tres estados, 3, 5 y 7. Para nuestro caso el estado 3 hace referencia a la acción que está enlazada a andar y el estado 7 a la acción de parar,

han sido elegidos los estados 3 y 7 ya que para el código de procesado que se ejecutará al finalizar este registro el estado número 7 debe haberse registrado ya que existe un bug en dicho código que no procesa correctamente los ficheros.csv si el estado 7 está ausente, por lo que en lugar de ser los estados 3 y 5 se han elegido los estados 3 y 7 para representar las dos acciones referentes a la marcha, andar y parar.

Experiment_number 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”.

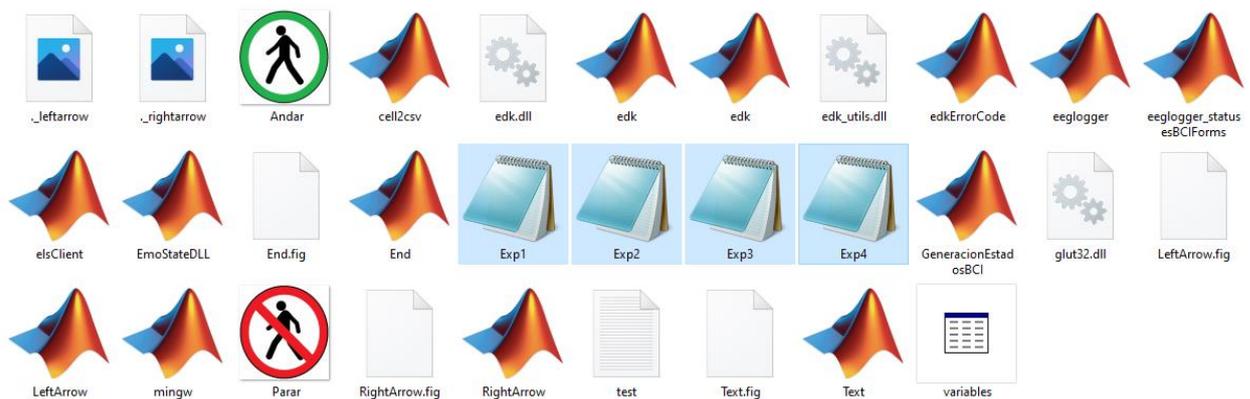


Figura 55. Carpeta con los archivos de los experimentos.

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, 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 de la nueva sesión del 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 procesado 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.

El siguiente bloque del código Matlab que desarrollaremos para que resulte más sencillo el entendimiento de procedimiento 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 2 imágenes por experimento que serán las encargadas de transmitir al usuario qué acción debe pensar. Como ya se ha comentado estas imágenes dependerán del experimento.

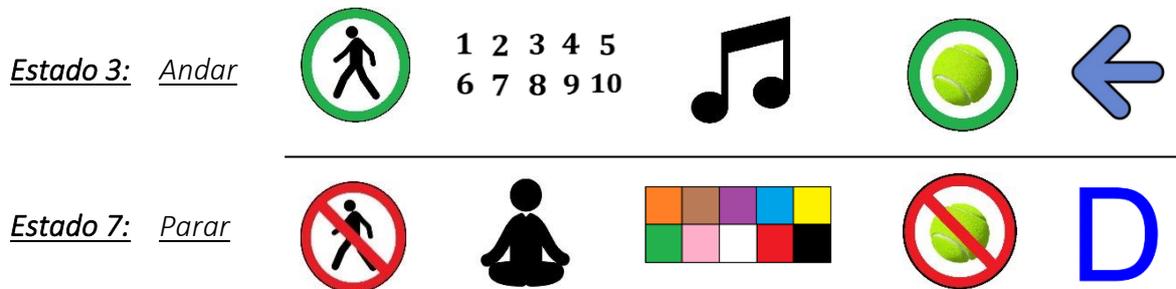


Figura 56. Distintas acciones según experimentos.

Los dos estados existentes son el 3 y el 7, cada uno de ellos hace referencia a una actividad distinta por lo que para cada experimento los estados siempre serán el 3 y el 7 pero las actividades no, variará en función del experimento. Por ejemplo para el caso del segundo experimento tendremos asociado al estado 3 la actividad de *Andar* y para el estado 7 la actividad de *Parar*. Cada vez que el código sea ejecutado se irán mostrando las dos imágenes asociadas a cada estado con una duración de 15 segundos cada una a través de los comandos *if* y *else*. Podemos ver esta parte del código a continuación:

```
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 == 7)
            disp(strcat(num2str(counter_status),'-Parar'));
            if status ~= status_last
                if status_last == 5
                    delete(Text);
                else
                    delete(RightArrow);
                end
                LeftArrow;
            end
            status_last = 7;
        else
```

```
        if (status == 3)
            disp(strcat(num2str(counter_status), '-Andar'));

        if status ~= status_last
            if status_last == 7
                delete(LeftArrow);
            else
                delete(Text);
            end
            RightArrow;
        end
        status_last = 3;

    end
end
end
counter_status = counter_status + 1;
end
```

Figura 57. 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 58. 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 59. 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');
```

Figura 60. 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. Podemos ver también como el primer número de cada fila hace referencia al respectivo estado en el que se han registrado los valores, ya sea el 3 o el 7.

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_FC5,ED_T7,ED_P7,ED_O1,ED_O2,ED_P8,ED_T8,ED_FC6,ED_F4,ED_F8,ED_AF4,ED_ES_TIMESTAMP
3,4542.1,4072.8,4528.7,4306.7,4212.3,4628.7,4466.2,4518.5,3679,4160.5,3994.9,4714.9,4396.4,4208.2,11.651
3,4540,4069.2,4526.7,4308.7,4211.8,4632.3,4461,4515.4,3676.4,4157.4,3995.4,4711.3,4397.4,4209.7,11.651
3,4541.5,4068.2,4525.1,4306.2,4208.7,4638.5,4462.6,4514.9,3674.9,4156.9,3993.8,4713.3,4400,4213.3,11.651
3,4545.1,4073.8,4530.8,4306.2,4212.8,4651.8,4465.6,4514.9,3673.3,4155.4,3994.9,4714.4,4403.6,4215.4,11.651
3,4544.6,4073.8,4530.3,4308.2,4219,4659,4465.1,4515.4,3674.9,4156.4,3998.5,4715.9,4404.6,4216.4,11.651
3,4543.1,4072.3,4524.1,4307.2,4220,4658.5,4467.2,4517.4,3680,4156.9,3998.5,4717.9,4405.6,4219,11.651
3,4544.6,4076.4,4525.6,4307.7,4224.1,4660.5,4472.3,4521.5,3685.6,4157.9,4000.5,4722.1,4409.7,4224.1,11.651
3,4546.2,4075.4,4526.7,4307.7,4224.6,4658.5,4471.8,4524.6,3688.2,4161,4004.6,4725.1,4409.7,4226.7,11.651
3,4549.2,4074.9,4526.2,4303.6,4220,4649.7,4471.8,4527.7,3693.3,4165.1,4009.2,4727.7,4409.7,4226.7,11.776
3,4549.2,4075.4,4523.6,4297.4,4217.4,4643.1,4472.3,4532.8,3696.9,4167.2,4007.2,4728.7,4408.7,4226.7,11.776
3,4550.8,4078.5,4526.2,4302.1,4223.1,4646.7,4472.3,4535.4,3694.4,4164.6,4006.2,4729.7,4408.2,4229.7,11.776
3,4555.4,4086.2,4533.8,4311.8,4231.3,4653.3,4479.5,4532.8,3690.3,4158.5,4007.7,4729.2,4404.6,4228.7,11.776
3,4554.4,4084.1,4532.3,4306.7,4228.2,4651.8,4479.5,4531.3,3688.7,4156.4,4000,4725.1,4398.5,4223.6,11.776
3,4555.9,4077.9,4533.3,4304.6,4230.3,4654.9,4476.9,4536.4,3692.3,4162.6,3996.9,4722.1,4402.1,4226.7,11.776
3,4558.5,4080,4537.4,4308.7,4240.5,4664.1,4484.1,4536.9,3692.8,4161.5,3999,4722.1,4400,4231.3,11.776
3,4559.5,4085.1,4539,4310.3,4243.6,4664.1,4488.7,4533.3,3688.2,4157.4,3997.4,4721.5,4394.4,4229.2,11.776
3,4564.6,4085.6,4545.1,4314.4,4242.6,4662.6,4481.5,4532.3,3689.2,4164.1,4003.6,4724.1,4404.6,4232.8,11.776
3,4564.6,4079.5,4545.1,4310.3,4240.5,4660,4471.8,4530.8,3689.7,4167.2,4009.7,4726.2,4404.1,4235.9,11.776
3,4559.5,4072.3,4537.9,4303.1,4236.4,4654.4,4472.8,4527.7,3690.3,4160,4005.1,4721.5,4389.2,4231.8,11.776
3,4557.9,4062.1,4536.9,4304.6,4226.2,4649.2,4473.3,4525.1,3688.7,4157.9,3997.4,4719,4385.1,4227.7,11.776
3,4557.9,4056.9,4541,4301,4220,4648.7,4470.3,4526.2,3686.7,4156.4,3992.8,4719,4380,4226.2,11.776
3,4556.9,4068.7,4539.5,4293.3,4225.6,4652.3,4473.3,4526.7,3686.7,4148.2,3990.3,4719,4364.6,4226.2,11.776
3,4553.8,4070.3,4533.3,4292.3,4225.6,4658.5,4474.4,4528.7,4146.2,3994.4,4720.5,4359.5,4225.1,11.776
3,4549.7,4065.6,4534.9,4292.8,4227.2,4667.7,4475.9,4535.4,3692.8,4156.9,4002.1,4724.6,4366.7,4226.7,11.776
3,4548.7,4070.8,4534.4,4283.1,4232.8,4667.7,4473.3,4536.4,3693.8,4164.6,4000.5,4724.6,4364.1,4229.7,11.776
3,4548.7,4071.8,4528.7,4279.5,4242.1,4667.7,4475.4,4537.4,3691.8,4164.1,3999,4722.1,4352.8,4227.7,11.776
3,4547.7,4056.4,4529.2,4283.1,4244.1,4674.9,4486.2,4541.5,3696.9,4168.2,4007.7,4722.1,4345.1,4225.1,11.776
3,4541.5,4035.9,4529.2,4270.8,4223.6,4668.2,4480,4540,3699,4173.8,4012.8,4723.1,4332.3,4225.6,11.776
3,4541,4032.8,4530.8,4266.7,4222.1,4655.4,4467.7,4535.9,3699.5,4177.9,4015.4,4724.6,4324.6,4229.7,11.776
3,4545.6,4039,4535.4,4275.9,4247.7,4652.8,4470.3,4534.9,3702.1,4184.1,4019,4726.7,4323.6,4231.3,11.776
3,4543.6,4029.7,4532.3,4269.7,4248.2,4653.3,4473.3,4534.9,3701.5,4183.1,4020,4728.2,4309.2,4228.2,11.776
3,4543.6,4017.4,4531.8,4261.5,4232.8,4656.4,4472.3,4532.8,3699,4174.4,4023.6,4727.2,4289.2,4228.7,11.776
3,4543.1,4010.8,4531.3,4257.4,4234.4,4659.5,4469.2,4530.3,3695.4,4171.3,4017.9,4721,4274.9,4225.1,11.776
3,4541,4003.6,4528.7,4251.3,4239,4663.1,4467.7,4528.2,3692.3,4172.3,4009.2,4718.5,4266.7,4219.5,11.776
3,4537.9,3998.5,4531.8,4250.3,4236.9,4670.3,4469.7,4527.2,3689.7,4169.2,4009.7,4720.5,4254.9,4220.5,11.776

Figura 61. Contenido fichero de datos.

Terminamos así la explicación a grandes rasgos del código encargado de registrar los valores correspondientes al conjunto 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 cuando ya se han obtenido los 4 ficheros necesarios.

2. Procesado de los ficheros

Una vez ha sido llevado a cabo el registro de datos es necesario procesarlos para obtener la información que buscamos con todo este procedimiento, es decir el porcentaje de acierto de cada actividad y del total del experimento.

En esta segunda etapa el director del proyecto me facilitó una carpeta con los diferentes archivos necesarios para llevar a cabo el procesado de los 4 ficheros obtenidos de cada usuario para cada experimento, siendo cada experimento de dos estados. Esta carpeta contenía lo siguiente:

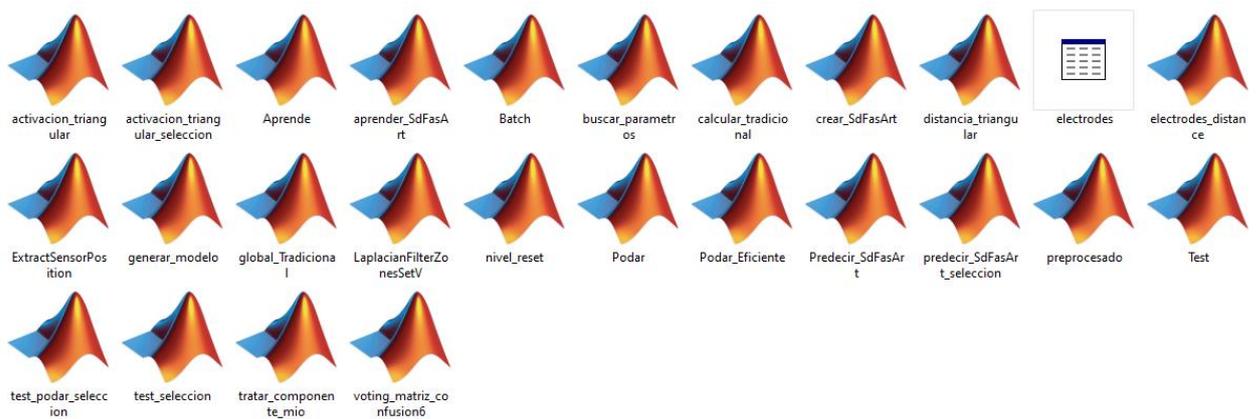


Figura 62. Carpeta contenido para preprocesado.

De entre todos estos archivos hay uno que ejecutará todo el código y hará posible la configuración del proceso que tenemos que llevar a cabo para que los resultados obtenidos sean los deseados. Este fichero es el archivo denominado *Batch* que será el encargado de hacer correr el programa y realizar lo que es el procesado en sí mismo.

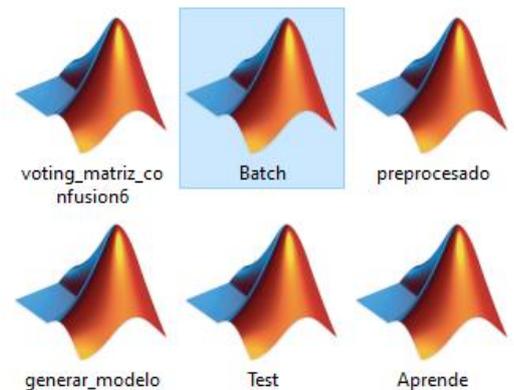


Figura 63. Archivos destacado para preprocesado.

Comentar también el script denominado “ExtractSensorPosition” a través del cual podremos configurar qué posiciones de los electrodos han sido las utilizadas durante la realización del cada experimento. 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:

```
current_sensors = {'AF3' 'F7' 'F3' 'FC5' 'T7' 'P7' 'O1' 'O2' 'P8' 'T8' 'FC6' 'F4' 'F8' 'AF4'};
%current_sensors = {'C3' 'CZ' 'C4' 'CP1' 'CP2' 'P3' 'P2' 'P4' 'C1' 'C2' 'CP3' 'CP4' 'P1' 'P2'};
%current_sensors = {'C3' 'CZ' 'C4' 'CB1' 'CP2' 'P3' 'P2' 'P4'};
```

Figura 64. Distribución de posición para los sensores.

En la imagen se encuentra activa la distribución de posiciones que ha sido la empleada en la totalidad de los experimentos.

Si nos centramos ahora en el fichero principal para realizar el procesamiento, es decir el archivo *Batch*, podemos comentar las principales funcionalidades de su código para poder entender cómo se realiza todo el procedimiento hasta la obtención de los archivos finales.

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

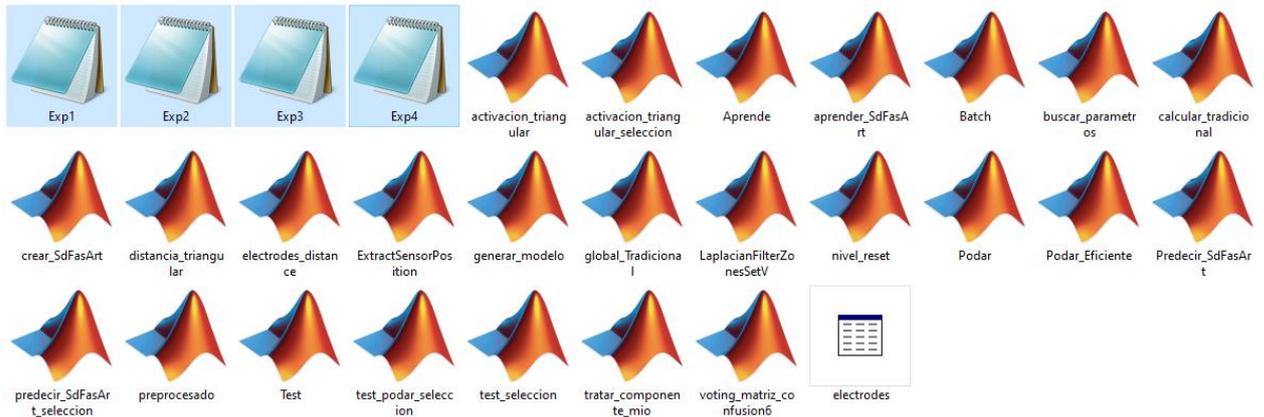


Figura 65. Carpeta de procesamiento.

Al ejecutar el script *Batch* visualizaremos lo siguiente:

```

% Preprocesamiento
for Sesion = 1 : 1 : 4
    file_in=sprintf('Exp%d.csv',Sesion)
    file_out=sprintf('U%dS%d.mat',Usuario,Sesion)
    preprocesado(file_in,file_out);
end

% Aprendizaje
Ar=0.002;
for Sesion = 1 : 1 : 3
    file_in=sprintf('U%dS%d.mat',Usuario,Sesion)
    Modelo(Sesion,1)=generar_modelo(file_in,Ar);
end

% Optimización de Parametros
At=zeros(3,3);
delta=zeros(3,3);
for Sesion_1 = 1 : 1 : 3
    for Sesion_2 = 1 : 1 : 3
        if Sesion_1 ~= Sesion_2
            file_in=sprintf('U%dS%d.mat',Usuario,Sesion_2)
            [At(Sesion_1,Sesion_2),delta(Sesion_1,Sesion_2)]
        end
    end
end
end

```

Figura 66. Código script Batch.

Podemos observar 3 fases perfectamente diferenciadas: Preprocesamiento, aprendizaje y optimización de parámetros. En primer lugar se realiza una etapa de preprocesado en la que los 4 archivos creados durante el registro, es decir durante la experimentación, se convierten de *archivos.csv* a *archivos.mat*, que estarán ahora sí preparados para ser procesados.

```
% Preprocesamiento
for Sesion = 1 : 1 : 4
    file_in=sprintf('Exp%d.csv',Sesion)
    file_out=sprintf('U%dS%d.mat',Usuario,Sesion)
    preprocesado(file_in,file_out);
end
```

Figura 67. Código preprocesado script Batch

En esta primera fase de preprocesado se generará un modelo que nos permitirá calcular la superficie Laplaciana para posteriormente hallar la PSD por ventana, recorriendo cada una de las 4 sesiones por experimento. 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. Tras haber compilado el código:

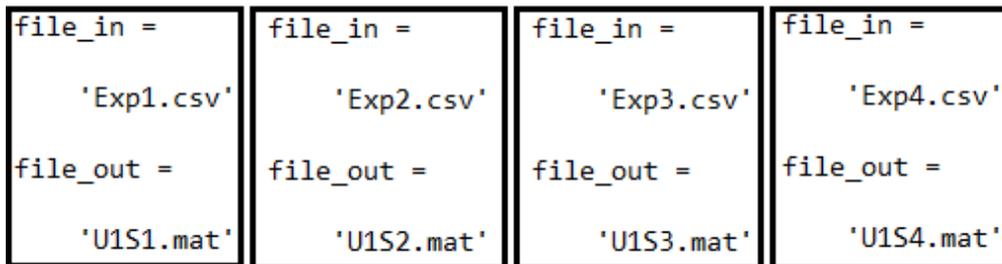


Figura 68. Mensaje preprocesado acabado en ventana de resultados Matlab.

Una vez terminado el preprocesamiento el cual toma un tiempo alrededor de un minuto de ejecución tendremos en la misma carpeta donde se encuentran todos los scripts 4 nuevos archivos denominados *U(Usuario)S(Sesión).mat*:

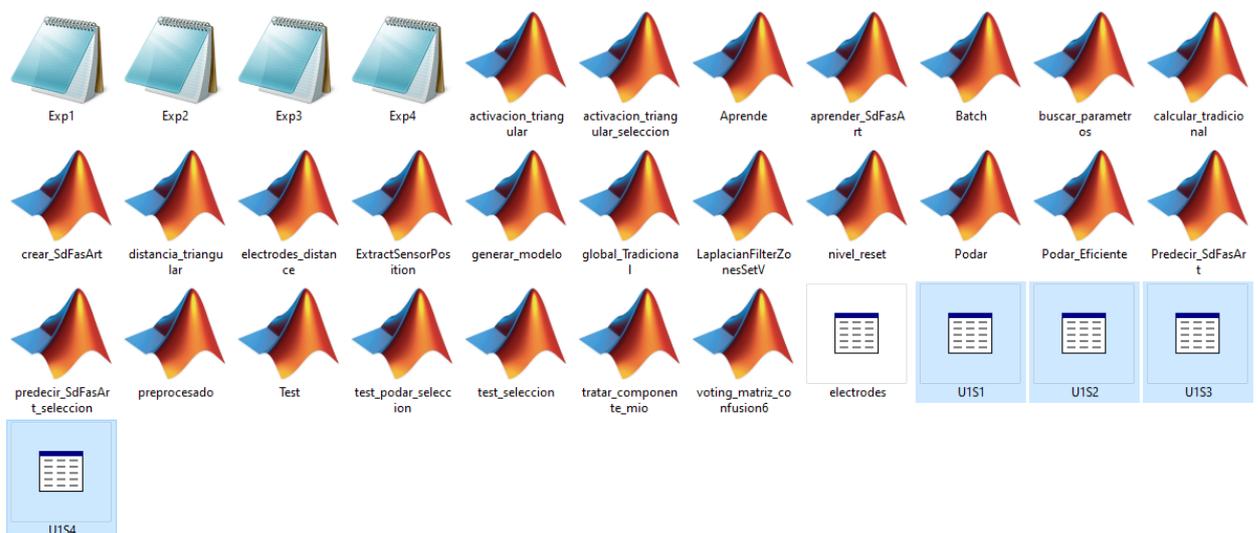


Figura 69. Carpeta con archivos preprocesados

Seguidamente a esta fase y sin necesidad de ejecutar otro archivo, como es el caso de investigaciones anteriores, comenzará la fase de aprendizaje:

```
% Aprendizaje
Ar=0.002;
for Sesion = 1 : 1 : 3
    file_in=sprintf('U%dS%d.mat',Usuario,Sesion)
    Modelo(Sesion,1)=generar_modelo(file_in,Ar);
end
```

Figura 70. Código aprendizaje script Batch.

En esta segunda parte se encuentra la variable *Ar* que para nuestro experimento ha sido fijada con un valor de 0.002 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. Una vez seleccionada la variable *Ar* entramos a un bucle *for* que 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 pretende es crear una fase de aprendizaje para el sujeto que realice el experimento donde la media de valores de las 3 primeras sesiones sean comparados con la última sesión y de ahí obtener los resultados.

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:

```
file_in =
    'U1S1.mat'
Aprendizaje U1S1.mat: Vectores Procesados: 3824
Aprendizaje: Unidades Utilizadas: 215

file_in =
    'U1S2.mat'
Aprendizaje U1S2.mat: Vectores Procesados: 3824
Aprendizaje: Unidades Utilizadas: 228

file_in =
    'U1S3.mat'
Aprendizaje U1S3.mat: Vectores Procesados: 3824
Aprendizaje: Unidades Utilizadas: 213
```

Figura 71. Mensaje aprendizaje acabado en ventana de resultados .

Podemos observar el número de vectores procesados para cada *archivo.mat*. Una vez terminada dicha fase de aprendizaje se ejecutará la fase de Optimización de parámetros:



```

% Optimización de Parametros
At=zeros(3,3);
delta=zeros(3,3);
for Sesion_1 = 1 : 1 : 3
    for Sesion_2 = 1 : 1 : 3
        if Sesion_1 ~= Sesion_2
            file_in=sprintf('U%dS%d.mat',Usuario,Sesion_2)
            [At(Sesion_1,Sesion_2),delta(Sesion_1,Sesion_2)]
        end
    end
end
end
end

```

Figura 72. Código Optimización de parámetros en script Batch.

En esta fase de código se recorrerán cada uno de los 6 modelos prepoada que se han calculado con la configuración establecida al comienzo, $Ar=0,002$. A continuación podemos ver uno de los modelos ya compilado:

```

file_in =
    'U1S2.mat'

Columna 1 delta=17.000000 At=0.080000 Acierto=0.720188
Columna 2 delta=20.000000 At=0.060000 Acierto=0.722542
Columna 3 delta=20.000000 At=0.400000 Acierto=0.686715
Parametros: delta=20.000000 At=0.060000 Acierto=0.722542

```

Figura 73. Mensaje Optimización acabada en ventana de resultados.

Podemos observar cómo en la última fila se encuentran los parámetros finalmente escogidos para este modelo, de las tres opciones se ha elegido la que mejor porcentaje de acierto tuviera y será la empleada en el resto del código. Como este modelo se crearán 6 en total.

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 para un usuario a modo de ejemplo quedarían de la siguiente forma:

Usuario Ejemplo		Ar = 0.002	Usuario Ejemplo		Ar = 0.002
S1S2S2	Delta Δ	20	S2S3S3	Delta Δ	14
	At	0,06		At	0,1
	%	72,25%		%	71,18%
S1S3S3	Delta Δ	28	S3S1S1	Delta Δ	8
	At	0,08		At	0,05
	%	75,34%		%	70,29%
S2S1S1	Delta Δ	13	S3S2S2	Delta Δ	2
	At	0,05		At	0,06
	%	73,88%		%	75,50%

Tabla 7. Ejemplo resultados parte Optimización

Podemos observar cada uno de los porcentajes prepoda obtenidos para cada modelo. Los modelos finales deben recorrer una última parte de código referente al fichero Batch. Será aquí cuando se realice la parte de evaluación de cada uno de los modelos creados:

```
poda=1;
for sa = 1 : 1 : 3
    for sb = 1 : 1 : 3
        if sa ~= sb
            for sc= 1 : 1 : 3
                if sa ~= sc && sb == sc
                    aciertos = calcular_tradicional
                end
            end
        end
    end
end
```

Figura 74. Código poda script Batch.

En esta parte se evaluará la última sesión que cada usuario realizó durante su experimento, es decir se evaluará la sesión 4. Los valores mostrados por la ventana de comandos una vez haya sido compilado esta parte de código Matlab se puede ver a continuación:

PODA: reglas= 98	PODA: reglas= 102
S1S2S2: TEST S4 Aciertos: (65.925732%)	S2S3S3: TEST S4 Aciertos: (71.077406%)
aciertos =	aciertos =
65.9257	71.0774
PODA: reglas= 95	PODA: reglas= 54
S1S3S3: TEST S4 Aciertos: (64.356695%)	S3S1S1: TEST S4 Aciertos: (68.985356%)
aciertos =	aciertos =
64.3567	68.9854
PODA: reglas= 61	PODA: reglas= 59
S2S1S1: TEST S4 Aciertos: (68.331590%)	S3S2S2: TEST S4 Aciertos: (64.408996%)
aciertos =	aciertos =
68.3316	64.4090

Figura 75. Mensaje Poda acabada en ventana de resultados.

Podemos observar en la *Figura 75* 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. Para ello a cada uno de los 6 casos se le aplica una “*Poda de reglas*” que lo que hará será ir eliminando reglas de la función *SdFasArt* 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.

Ya para terminar con el procesado de los ficheros, la última sección tiene como función la de obtener la resultados que será objeto de estudio de cada modelo, es decir el hallado con podas. Además de estos valores dados en valor unitario, nos calcula la matriz de confusión para el Ar con el que se ha realizado el procesado.

```
acierto
acierto_motor
acierto_paro
matriz_confusion

close all;
plot(real, 'r*-');
hold on;
plot(prediccion, '*');
```

Figura 76. Código resultados script Batch

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:

```
acierto =
    0.6967

acierto_motor =      matriz_confusion =
    0.5397           204    35
                   110   129

acierto_paro =
    0.8536
```

Figura 77. Mensaje Resultados en ventana de resultados

Comentar que los estados 3 y 7 hacen referencia al *acierto_motor* y al *acierto_paro* respectivamente. Por lo que dependiendo del experimento las actividades variarán pero la relación entre estados y aciertos no.

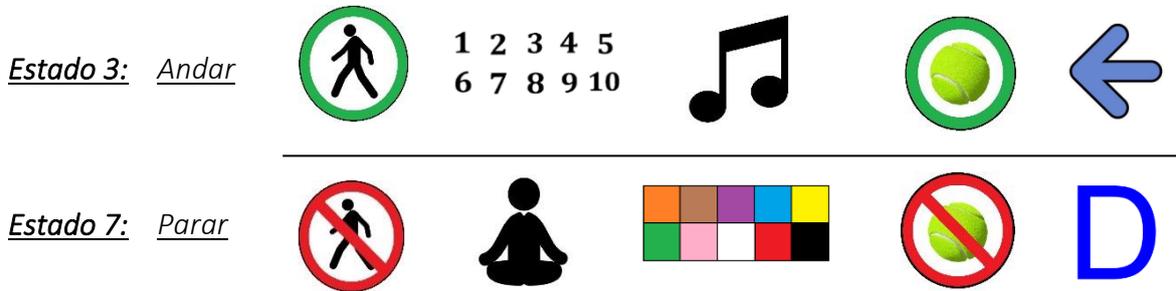


Figura 78. Distintas acciones según experimentos.

Esta viene a ser la explicación del procedimiento que siguen los datos hasta su procesado final. Una vez todo ha concluido en la carpeta donde se encontraban los archivos inicialmente se habrán generado los modelos para cada sesión y la comparación final:

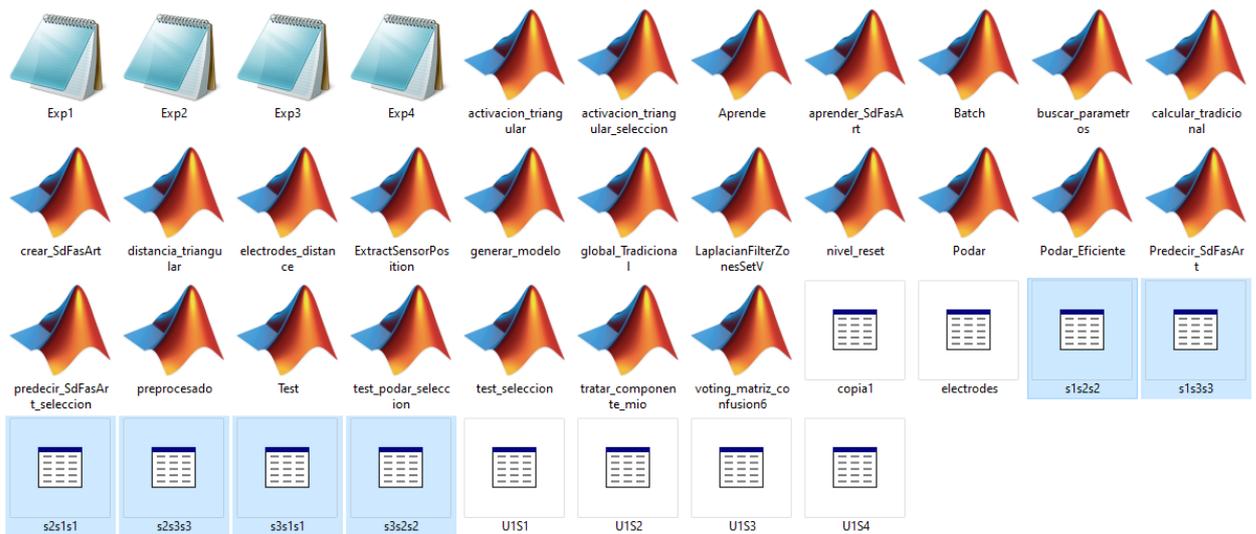


Figura 79. Carpeta con resultados finales.

Aquí concluye la fase de procesado.

Comentar que tras finalizar de compilarse el código se genera una figura que será el resultado de la comparación entre las 3 primeras y la última sesión realizada durante el experimento, que a modo de ejemplo tendrá formas similares a la siguiente:

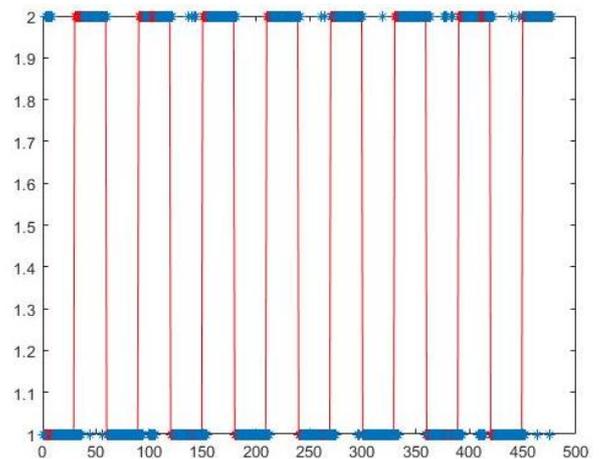


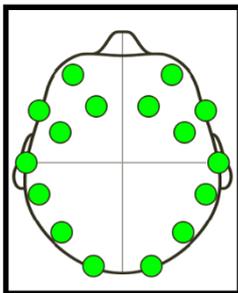
Figura 80. Gráfica modelo final.

3. Esquema del proceso completo.

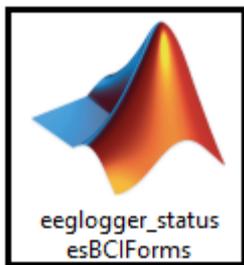
En este último apartado vamos a resumir de forma genérica en un esquemático los pasos del procedimiento que acabamos de ver para observar de una forma muy simplificada lo que el código informático Matlab que ha sido empleado en el presente proyecto realiza desde su inicio hasta la obtención de los resultados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

Etapa 1: Registro de datos

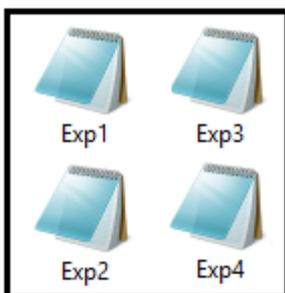
Se realizan los experimentos



Preparación Sistema Emotiv



Realización experimento



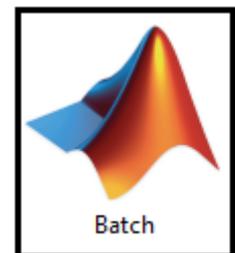
Obtención registro de datos

Etapa 2: Procesado de datos

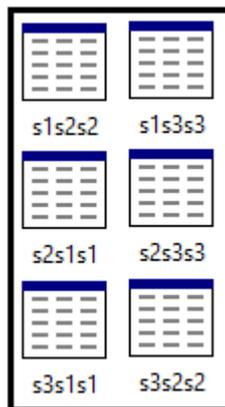
Se realiza el procesado de los archivos



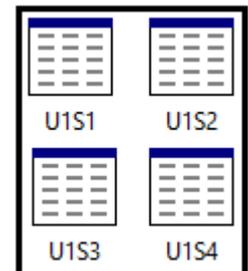
Ficheros listos para preprocesar



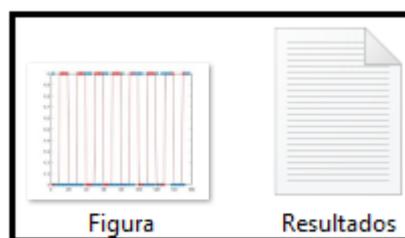
Realización Procesado



Obtención ficheros procesados



Obtención ficheros preprocesados



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 entre si y obtener las conclusiones oportunas, más tarde estos resultados tratarán de ser mejorados variando la metodología a la hora de realizar los experimentos. 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						
	Exp 1	Exp 2	Exp 3	Exp 4	Exp 5	Exp 6
Global	53%	71%	78%	71%	79%	71%
Motor	30%	69%	92%	67%	75%	92%
Paro	76%	73%	64%	75%	83%	49%

Tabla 8. Ejemplo porcentaje de acierto.

Matriz de confusión		Predicho Exp 1		Predicho Exp 2		Predicho Exp 3	
Real		Motor	Paro	Motor	Paro	Motor	Paro
	Motor	181	58	175	64	154	85
	Paro	167	72	74	165	19	220
Matriz de confusión		Predicho Exp 4		Predicho Exp 5		Predicho Exp 6	
Real		Motor	Paro	Motor	Paro	Motor	Paro
	Motor	180	59	199	40	117	122
	Paro	78	161	59	180	18	221

Tabla 9. 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, el contenido de la tabla variará según el experimento y según el sujeto. 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.

Para que resulte más sencilla la interpretación de los resultados se presenta a continuación una tabla que refleja qué actividades corresponden a cada experimento:

Resultados						
	Exp 1	Exp 2	Exp 3	Exp 4	Exp 5	Exp 6
Motor	Pensar andar	Andar	Multiplicación	Canción	Lanzar	Flecha izq
Paro	Pensar parar	Parar	Relajación	Colores	Pensar lanzar	Inicial palabra

Tabla 10. Distribución actividades según experimentos.



2.5. Comparación de los resultados

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 mostrarán los resultados obtenidos a partir de los experimentos que han sido realizados en todos y cada uno de los sujetos.

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 sobre 3 o 4 sujetos en los que finalmente se han conseguido realizar las 4 sesiones necesarias para obtener los resultados, siendo el tiempo de cada ensayo de 250 segundos, es decir 15 segundos por imagen más diez de preparación.

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	3
Mujeres	0

	NºUsuarios
Jovenes	2
Adultos	1

	NºUsuarios
Diestros	3
Zurdos	0

	NºUsuarios
Con estudios	2
Sin estudios	1

	NºUsuarios
Con conocimientos EEG previos	3
Sin conocimientos EEG previos	0

Tablas 11. Usuarios categorizados.

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	

Tabla 12. Usuarios diferenciados y categorizados

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



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						
	Exp 1	Exp 2	Exp 3	Exp 4	Exp 5	Exp 6
Global	53%	71%	78%	71%	79%	71%
Motor	30%	69%	92%	67%	75%	92%
Paro	76%	73%	64%	75%	83%	49%

Tabla 13. Porcentajes usuario 1.

Matriz de confusión		Predicho Exp 1		Predicho Exp 2		Predicho Exp 3	
Real		Motor	Paro	Motor	Paro	Motor	Paro
	Motor	181	58	175	64	154	85
	Paro	167	72	74	165	19	220
Matriz de confusión		Predicho Exp 4		Predicho Exp 5		Predicho Exp 6	
Real		Motor	Paro	Motor	Paro	Motor	Paro
	Motor	180	59	199	40	117	122
	Paro	78	161	59	180	18	221

Tabla 14. Matriz de confusión usuario 1.

Usuario 2

Resultados						
	Exp 1	Exp 2	Exp 3	Exp 4	Exp 5	Exp 6
Global	63%	64%	51%	62%	81%	76%
Motor	41%	68%	88%	64%	89%	75%
Paro	85%	60%	14%	59%	73%	76%

Tabla 15. Porcentajes usuario 2.

Matriz de confusión		Predicho Exp 1		Predicho Exp 2		Predicho Exp 3	
Real		Motor	Paro	Motor	Paro	Motor	Paro
	Motor	204	35	144	95	33	206
	Paro	140	99	77	162	28	211
Matriz de confusión		Predicho Exp 4		Predicho Exp 5		Predicho Exp 6	
Real		Motor	Paro	Motor	Paro	Motor	Paro
	Motor	142	97	174	65	182	57
	Paro	87	152	27	212	60	179

Tabla 16. Matriz de confusión usuario 2.

Usuario 3

Resultados						
	Exp 1	Exp 2	Exp 3	Exp 4	Exp 5	Exp 6
Global	51%	70%	73%	72%	70%	77%
Motor	13%	78%	81%	70%	85%	63%
Paro	88%	62%	64%	74%	54%	90%

Tabla 17. Porcentajes usuario 3.

Matriz de confusión		Predicho Exp 1		Predicho Exp 2		Predicho Exp 3	
		Motor	Paro	Motor	Paro	Motor	Paro
Real	Motor	211	28	148	91	154	85
	Paro	207	32	53	186	46	193
Matriz de confusión		Predicho Exp 4		Predicho Exp 5		Predicho Exp 6	
		Motor	Paro	Motor	Paro	Motor	Paro
Real	Motor	178	61	129	110	215	23
	Paro	71	168	35	204	88	152

Tabla 18. Matriz de confusión usuario 3.

Estos son los resultados de los 6 experimentos llevados a cabo para cada sujeto. Comentar que todos fueron realizados en las mismas condiciones, se aplicó la misma metodología y se llevó a cabo sin problemas. La conexión de los electrodos fue perfecta, todos en verde, y los resultados son completamente fiables.

2. Comparación y discusión de los resultados.

Si hacemos hincapié en los resultados presentados podemos sacar diversas conclusiones. En primer lugar vamos a realizar una comparación general entre sujetos. Presentamos una tabla en la que se comparan sus resultados totales a modo resumen.

Resultados Globales				
	Sujeto 1	Sujeto 2	Sujeto 3	Total
Global	71%	66%	69%	68%
Motor	71%	71%	65%	69%
Paro	70%	61%	72%	68%

Tabla 19. Comparación resultados entre sujetos.

Se puede ver como de manera general el sujeto número 1 ha obtenido un mejor porcentaje de acierto de manera global en los 6 experimentos realizados, seguido del sujeto 3 y en último lugar el sujeto 2. Si acudimos a la tabla 9 “Usuarios diferenciados y categorizados” vemos que el sujeto 2 es el sujeto de mayor edad y sin estudios. En investigaciones anteriores se demostró que distintos factores influían en el resultado final de los experimentos [4], dicha investigación afirmaba que el nivel de estudios y la edad son factores determinantes a la hora de obtener un porcentaje de acierto mayor, siendo así en sujetos jóvenes y con estudios. Dichas conclusiones obtenidas en esta investigación se repiten y verifican para este caso. También coincide que para este segundo sujeto el conocimiento del mundo de las señales EEG y su funcionamiento es

menor, a lo que habría que sumar otro concepto que ya ha sido estudiado en multitud de ocasiones y que recibe el nombre de *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, investigaciones científicas apuntan a que hasta un 30% de las usuarios pueden presentar este tipo de problema. Recurrir de nuevo al estudio anterior para conocer mejor como funciona este concepto [4].

En cuanto al porcentaje total de acierto de todo el proceso de experimentación vemos que se sitúa en el 68% lo que indica un resultado bueno para esta primera investigación, que será mejorado en la fase siguiente.

Si ahora comparamos los porcentajes de aciertos por tipo de experimento en lugar de por sujeto podemos observar lo siguiente:

Experimento 1

Motor	Pensar andar
Paro	Pensar parar

Exp 1	Sujeto 1	Sujeto 2	Sujeto 3	Total
Global	53%	63%	51%	56%
Motor	30%	41%	13%	28%
Paro	76%	85%	88%	83%

Tabla 20. Resultados para experimento 1.

En este primer experimento observamos dos polos completamente opuestos, por un lado podemos ver una actividad con muy bajo porcentaje de acierto, pensar en andar, y por otro lado vemos una actividad con un porcentaje de acierto muy bueno, pensar en parar.

En este primer experimento podemos ver el motivo por el que se realiza esta investigación, hemos comparado dos actividades que al parecer están relacionadas pero que en cuanto a porcentaje de éxito a la hora de repetir el mismo pensamiento distan mucho la una de la otra, y es esto mismo lo que pretendemos, probar distintas actividades para conocer el porcentaje de acierto que conllevan para así poder sacar conclusiones y obtener qué actividades nos ofrecen unos valores más altos.

Experimento 2

Motor	Andar
Paro	Parar

Exp 2	Sujeto 1	Sujeto 2	Sujeto 3	Total
Global	71%	64%	70%	68%
Motor	69%	68%	78%	72%
Paro	73%	60%	62%	65%

Tabla 21. Resultados para experimento 2.

En este caso podemos ver una ligera mejoría para la acción de andar físicamente frente a parar. Podríamos pensar que resulta más sencillo ejecutar un movimiento que no necesite un gran esfuerzo mental como es *andar*, sin embargo *parar* implica quedarse quieto durante 15 segundos,

por lo que es una acción instantánea que conlleva que no se realiza ningún movimiento durante ese periodo por lo que podría pasar que los sujetos desviarán su atención a otros pensamientos ya que no necesitan realizar ninguna acción el resto del tiempo.

Estas 2 acciones también están relacionadas entre sí por lo que podríamos pensar que al volver a realizar los experimentos dichos porcentajes se invirtieran, pues depende de cómo de concentrados estén los sujetos. Todo esto se resolverá más adelante, en la siguiente fase, donde se tratará de mejorar los resultados obtenidos en esta misma y se volverán a realizar las pruebas variando los periodos de tiempo.

Experimento 3

Motor	Multiplicación 			
Paro	Relajación 			
Exp 3	Sujeto 1	Sujeto 2	Sujeto 3	Total
Global	78%	51%	73%	67%
Motor	92%	88%	81%	87%
Paro	64%	14%	64%	48%

Tabla 22. Resultados para experimento 3.

Para este caso observamos a primera vista que la actividad *multiplicar* ha ofrecido un porcentaje de acierto medio entre todos los sujetos del 87%, llegando al 92% para el caso del primer sujeto. Se trata en general de un resultado muy alto y cumple con creces las expectativas que teníamos al comienzo del proyecto donde se busca desde un principio valores situados entre el 80 y 90% de acierto. Comprobamos así que los problemas y cálculos matemáticos ofrecen una muy buena respuesta por parte de los sujetos, podría deberse a que es un pensamiento que no necesita de la imaginación a la hora de pensar, simplemente del conocimiento, calcular la tabla de multiplicar sin más.

Por el contrario vemos como la actividad *relajación* ha obtenido un porcentaje bastante bajo. Podría deberse a que al ser una actividad que trata de imaginar entornos que produzcan relajación o simplemente dejar la mente en blanco hace que los sujetos no logren concentrarse al completo y generen pensamientos diferentes durante el periodo de tiempo de 15 segundos que dura cada estado.

Experimento 4

Motor	Canción 			
Paro	Colores 			
Exp 4	Sujeto 1	Sujeto 2	Sujeto 3	Total
Global	71%	62%	72%	68%
Motor	67%	64%	70%	67%
Paro	75%	59%	74%	70%

Tabla 23. Resultados para experimento 4.

Para el cuarto experimento se observan valores intermedios para ambas actividades. Se tratan de dos actividades que conllevan el uso de la imaginación, no son actividades que requieran un movimiento físico como podría ser el hecho de andar visto anteriormente.

Estas dos actividades tampoco tienen una relación entre sí. Los resultados obtenidos podrían alternarse según a qué sujeto se realice, tal y como reflejan los resultados. También podrían variar

de una vez a otra ya que son valores que se encuentran muy cercanos por lo que en la siguiente fase comprobaremos si estas tendencias se cumplen.

Experimento 5

Motor	Lanzar
Paro	Pensar lanzar

Exp 5	Sujeto 1	Sujeto 2	Sujeto 3	Total
Global	79%	81%	70%	77%
Motor	75%	89%	85%	83%
Paro	83%	73%	54%	70%

Tabla 24. Resultados para experimento 5.

Se observa un porcentaje de acierto global cercano al 80%, es el experimento que mayor éxito ha producido en un contexto general. La actividad *Lanzar y recoger una pelota* ha obtenido 83%, siendo éste un resultado muy bueno en líneas generales. En este experimento podemos volver a comparar dos actividades relacionadas entre sí donde una realiza un movimiento físico y la otra lo imagina. Podríamos compararlo con el hecho de *andar y pensar en andar*, y veríamos en ambas como la actividad física ha obtenido un porcentaje de acierto mayor ante la actividad que utiliza la imaginación.

Se podría pensar que las actividades físicas requieren de un menor esfuerzo mental frente a solamente imaginar realizar dichas actividades. Esto se podría deber a que ejecutarlas es algo sencillo que tenemos muy interiorizado y no genera mayor problema, sin embargo pensar en ello nos hace ejercitar el cerebelo de una forma distinta, siendo ésta un posible motivo para los resultados obtenidos. Se podrán verificar dichas conjeturas en la siguiente fase.

Experimento 6

Motor	Mano izq
Paro	Inicial palabra D

Exp 6	Sujeto 1	Sujeto 2	Sujeto 3	Total
Global	71%	76%	77%	74%
Motor	92%	75%	63%	77%
Paro	49%	76%	90%	72%

Tabla 25. Resultados para experimento 6.

Por último nos encontramos con dos actividades que ya se estudiaron en investigaciones pasadas por parte del departamento. En este caso, sólo con dos estados, los resultados han sido más que satisfactorios para esta primera fase, obteniendo un 77% de acierto para la actividad *Pensar en mover la mano izquierda* y un 72% de acierto para la actividad *Pensar en una palabra que comience por determinada letra*. Son valores medio altos que reflejan una buena actuación de ambas actividades. Más tarde se sacarán conclusiones con las investigaciones anteriormente mencionadas en la que se llevó a cabo este mismo estudio pero para 3 actividades.



En líneas generales podríamos comentar que los resultados de los experimentos realizados ha sido satisfactoria ya que nos estamos moviendo en valores en torno al 70% de acierto para la primera fase de la investigación, en la que estamos teniendo en cuenta 12 actividades o lo que es lo mismo 6 experimentos. Cuando descartemos las peores actividades y experimentos y se mejore la forma de experimentación entonces los resultados mejorarán. Para esta primera fase los experimentos con mejores porcentajes de acierto son el 5 y el 6, y los peores el 3 y el 1.

Experimento 5	77%
Experimento 6	74%
Experimento 4	68%
Experimento 2	68%
Experimento 3	67%
Experimento 1	56%

Tabla 26. Resultados de los experimentos.

Hemos comparado los resultados en función de los sujetos y de los experimentos, a continuación los compararemos en función de las actividades, estudiando individualmente cada una de ellas. Veremos así que actividades son las que mayor porcentaje de acierto ofrecen:

Multiplicar	87%
Lanzar y recoger pelota	83%
Pensar en parar	83%
Mover mano izquierda	77%
Pensar en palabras	72%
Andar	72%
Pensar en lanzar pelota	70%
Pensar en colores	70%
Tararear una canción	67%
Parar	65%
Relajación	48%
Pensar en andar	28%

Tabla 27. Resultados de las actividades.

Se puede observar cómo hay 3 actividades por encima del 80%. Siendo la primera la acción de *Multiplicar* que pertenece al experimento 3, cuyo resultado global ha sido de los más bajos, esto se debe a que se está teniendo en cuenta la actividad con casi el peor resultado de todas, *Relajación*. Más adelante veremos si de verdad se trata de una actividad a descartar debido a sus malos resultados.

Lanzar y recoger una pelota y *Pensar en parar* también ofrecen muy buenos resultados.

Mover la mano izquierda, *Pensar en palabras*, *Andar*, *Pensar en lanzar y recoger la pelota* y *Pensar en colores* ofrecen porcentajes de acierto por encima del 70% por lo que serán actividades a tener en cuenta en futuras fases.

Por el contrario se atisba que *Pensar en andar* y *Relajación* no son las actividades más idóneas para aplicar al exoesqueleto, ya que su éxito ha sido muy bajo, insuficiente para una correcta aplicación. *Tararear una canción* y *Parar* tampoco ofrecen los mejores resultados aunque habrá que esperar a la mejora de los resultados en la experimentación de la siguiente fase para poder afirmarlo.

En líneas generales podemos concluir para esta primera fase de experimentación que los resultados obtenidos son buenos. Situando en líneas generales en un 68,45% el porcentaje de acierto total teniendo en cuenta todas las actividades, experimentos y sujetos juntos.

Total	
Global	68,45%

Tabla 28. Resultado Global.

Estos resultados son más que aceptables pues se están teniendo en cuenta experimentos que empeoran la media y que al final se descartarán ya que lo que buscamos, entre otras cosas, es encontrar qué actividades nos ofrecen los mejores resultados para poder así ser aplicadas con éxito a un exoesqueleto real o simulación 3D.



Al comienzo del trabajo de fin de máster se me indicó que debía realizarse la investigación para 4 experimentos y finalmente se ha realizado para 6. Con este aumento se ha tratado de abarcar un rango mayor de actividades para así realizar un estudio más completo. Si descartamos los 2 experimentos que peor porcentaje de acierto han supuesto para así cumplir con los 4 experimentos que se nos pedía tenemos los siguiente:

Resultados Globales reducidos				
	Sujeto 1	Sujeto 2	Sujeto 3	Total
Global	75%	68%	72%	72%
Motor	82%	80%	77%	80%
Paro	67%	56%	68%	64%

En este caso vemos como la media global de todos los experimentos ha aumentado del 68 al 72%. Los 4 experimentos elegidos han sido el 2, 3, 5 y 6 pues ofrecían mejores resultados de manera global.

Tabla 29. Resultados globales reducidos.

Si cribamos ahora por actividades, para 4 experimentos corresponderían 8 actividades, eligiendo las que mejor porcentaje de acierto ofrecen de la tabla 27, tendríamos un porcentaje medio de acierto del 76,75%. Lo cual ya se empieza a acercar a los rangos del 80-90% que se pidió para este trabajo al inicio del proyecto.

Completamos ahora sí la primera fase en la que se ha estudiado el problema a resolver en este trabajo de fin de máster y se ha llevado a cabo una investigación sobre trabajos e investigaciones relacionadas con BCIs y exoesqueletos, para más tarde desarrollar una metodología de trabajo. Se han definido los experimentos que finalmente se han desarrollado, se ha explicado el código empleado para ello y en último lugar se han obtenido los resultados pertinentes y se han comparado, sacando así las conclusiones necesarias para poder continuar con la realización del proyecto. La valoración final del trabajo realizado en esta fase ha sido satisfactoria y se han cumplido todos los objetivos.



3. Ajuste y mejora del procedimiento de registro de señales EEG

Una vez concluida primera fase y obtenidos los resultados de los experimentos es momento de mejorar el porcentaje de éxito con el que se han llevado a cabo los mismos aplicando ciertas reglas heurísticas o patrones a la hora de ejecutar el experimento. Esta segunda fase consta de varias partes:

1. Mejora del procedimiento y procesamiento de datos
2. Conclusiones y elección del método a emplear.

El objetivo de esta fase es el de obtener un modo de experimentación con un porcentaje de éxito alto para ejecutar el movimiento de *Andar* y *Parar* el exoesqueleto. Una vez configurada esta forma de aplicación será cuando se realice de nuevo la experimentación y se cree la base de datos del proyecto. Se irán resolviendo cada punto establecido en orden cronológico y detallando todo el procedimiento. A continuación se expone la realización de cada uno de ellos:

3.1. Mejora del procedimiento y procesamiento de datos

La finalidad en esta fase es encontrar formas de actuación que mejoren los resultados finales de los experimentos. Este objetivo se puede llevar a cabo de distintas maneras, se podría modificar la metodología a la hora de realizar los ensayos, o se podría variar el número de ensayos o el tiempo de los mismos, también se podría modificar el código de registro o incluso el código de procesado final, por ejemplo filtrando valores que nos produzcan un empeoramiento de la señal. Al final lo que se pretende es aplicar ciertas reglas que mejoren los resultados finales, es decir que en esta fase de estudiará la forma de mejorar el resultado final de los experimentos.

Los cambios producidos en este apartado han sido los siguientes:

- Variación de tiempo de los experimentos.
- Modificación de la aleatoriedad de las imágenes mostradas por pantalla.
- Mejora del código de procesado.
- Variación de los experimentos.

A continuación explicamos cada uno de estos cambios implementados:

1. Variación del tiempo de los experimentos.

En la primera fase los experimentos han sido realizados para un tiempo total de 250 segundos por ensayo, 10 de preparación y 240 de realización, que vienen a ser 4 minutos. Podemos observar a continuación parte del código empleado para la modificación del parámetro tiempo:

```
%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;  
samples_taken = 0;  
counter_status = 0;
```

En este caso además del tiempo de experimentación hay que tener en cuenta las imágenes se alternaban en pantalla cada 15 segundos y el tiempo de descanso ha sido de alrededor de 5 minutos entre ensayo y ensayo haciendo que el tiempo total del cada experimento se haya situado en la media hora.

Figura 81. Pantalla de configuración script “eeglogger_statusesBCIForms”.

Tratando de mejorar los resultados se ha pensado que ampliando el tiempo por imagen se conseguiría una mayor concentración de los sujetos lo que se reflejaría en unos mejores resultados. Por este motivo se ha variado el tiempo por imagen que pasa de 15 a 20 segundos, provocando que el tiempo de realización sea de 320 segundos y el tiempo total de 330 segundos, que vienen a ser 5 minutos y medio de para cada uno de los 4 ensayos que componen cada experimento, siendo 6 los experimentos a realizar. Además para ayudar a los sujetos se ha ampliado el tiempo de descanso, pasando de 5 a 8-10 minutos, tratando así de combatir el cansancio generado por tener que estar 1 minuto y medio más realizando la prueba.

Más adelante serán presentados los resultados, ahora también se va a comentar otra variación producida en el tiempo de los ensayos. Además de realizar los ensayos con 20 segundos por imagen se ha realizado una nueva experimentación en la que el tiempo se ha reducido drásticamente para así comprobar cómo funcionan las mismas actividades frente a tiempos de actuación muy cortos. En este caso lo que se ha realizado ha sido una disminución de tiempo por imagen de 20 a 5 segundos y se ha eliminado el descanso entre ensayos, es decir que se han realizado 4 pruebas rápidas de 1 minuto y 20 segundos sin descanso entre medias.

Lo que se pretende con esta variación de tiempos es comprobar y ratificar los resultados obtenidos para periodos largos también en periodos cortos.

Se han realizado así dos variaciones en este primer intento de mejora de los resultados, ensayos de 20 segundos por imagen con descansos de 8-10 minutos y ensayos de 5 segundos por imagen sin descansos.

Tiempos	Modo 1	Modo 2	Modo 3
Imagen (seg)	15	20	5
Descanso (min)	5	8.10	0
Total (min)	4,17	5,5	1,5

Tabla 30. Tipos de modos y sus características durante la experimentación.



Comentar que durante la realización de todos los ensayos de cada experimento se han mantenido los mismos procedimientos y se ha aplicado la misma forma de actuación, la conexión de todos los sensores ha sido perfecta, todos con conexión verde. Además se ha variado el orden de realización de los experimentos según cada sujeto para que los cansancios generados durante la realización de las pruebas no afectara a un experimento en particular si no que se repartiese de manera equitativa. Por lo que se puede aceptar que toda la metodología es exactamente igual en el cómputo global de actuación.

Se presentan a continuación los resultados finales de todos los usuarios en función de los tiempos empleados:

- Tiempo de experimentación por imagen: **20 segundos**

Usuario 1

Resultados						
	Exp 1	Exp 2	Exp 3	Exp 4	Exp 5	Exp 6
Global	56%	72%	86%	69%	73%	71%
Motor	52%	82%	92%	71%	78%	88%
Paro	59%	62%	80%	68%	69%	54%

Tabla 31. Porcentajes usuario 1 para 20 segundos.

Matriz de confusión		Predicho Exp 1		Predicho Exp 2		Predicho Exp 3	
Real		Motor	Paro	Motor	Paro	Motor	Paro
	Motor	189	130	198	121	254	65
	Paro	153	166	56	263	24	295
Matriz de confusión		Predicho Exp 4		Predicho Exp 5		Predicho Exp 6	
Real		Motor	Paro	Motor	Paro	Motor	Paro
	Motor	216	103	219	100	172	147
	Paro	92	227	71	248	38	281

Tabla 32. Matriz de confusión usuario 1 para 20 segundos.

Usuario 2

Resultados						
	Exp 1	Exp 2	Exp 3	Exp 4	Exp 5	Exp 6
Global	50%	81%	76%	53%	78%	79%
Motor	51%	75%	82%	62%	92%	85%
Paro	50%	87%	71%	45%	63%	73%

Tabla 33. Porcentajes usuario 2 para 20 segundos.



Matriz de confusión		Predicho Exp 1		Predicho Exp 2		Predicho Exp 3	
Real		Motor	Paro	Motor	Paro	Motor	Paro
	Motor	159	160	279	40	227	92
	Paro	157	162	81	238	59	260
Matriz de confusión		Predicho Exp 4		Predicho Exp 5		Predicho Exp 6	
Real		Motor	Paro	Motor	Paro	Motor	Paro
	Motor	142	177	202	117	233	86
	Paro	120	199	25	294	48	271

Tabla 34. Matriz de confusión usuario 2 para 20 segundos.

Usuario 3

Resultados						
	Exp 1	Exp 2	Exp 3	Exp 4	Exp 5	Exp 6
Global	65%	86%	73%	67%	80%	72%
Motor	41%	80%	77%	64%	70%	71%
Paro	88%	92%	68%	70%	90%	72%

Tabla 35. Porcentajes usuario 3 para 20 segundos.

Matriz de confusión		Predicho Exp 1		Predicho Exp 2		Predicho Exp 3	
Real		Motor	Paro	Motor	Paro	Motor	Paro
	Motor	281	38	294	25	217	102
	Paro	187	132	63	256	72	247
Matriz de confusión		Predicho Exp 4		Predicho Exp 5		Predicho Exp 6	
Real		Motor	Paro	Motor	Paro	Motor	Paro
	Motor	224	95	288	31	231	88
	Paro	115	204	96	223	92	227

Tabla 36. Matriz de confusión usuario 3 para 20 segundos.

Estos son los resultados de los 6 experimentos llevados a cabo para cada sujeto siendo el tiempo por imagen de 20 segundos. Al final de esta fase se hará una comparación entre los tres distintos modos de actuación, 15, 20 y 5 segundos por imagen, ahora lo que se hará será centrar el estudio en este segundo modo de 20 segundos por imagen.

Comparación y discusión de los resultados: Modo 2

Al igual que para el caso de los 15 segundos por imagen, en este modo vamos a comparar los resultados obtenidos para sacar diversas conclusiones. En primer lugar vamos a realizar una comparación general entre sujetos. Presentamos una tabla en la que se comparan sus resultados totales a modo resumen.



Resultados Globales				
	Sujeto 1	Sujeto 2	Sujeto 3	Total
Global	71%	70%	74%	72%
Motor	77%	74%	67%	73%
Paro	65%	65%	80%	70%

Tabla 37. Comparación resultados entre sujetos para 20 segundos.

En este caso es el sujeto 3 el que ha obtenido un mejor porcentaje de acierto de manera global en los 6 experimentos realizados, seguido del sujeto 2 y en último lugar el sujeto 3, que vuelve a ser el último pero con menor diferencia, se podría deber a que al dar más tiempo se llega a producir una mejora en la concentración, disminuyendo así las posibles diferencias entre sujetos que pertenecen a un grupo de la sociedad o a otro, como pueden ser jóvenes y adultos o personas con estudios y sin estudios. Veremos si al reducir los tiempos por imagen a 5 segundos las distancias se mantienen o vuelven a aumentar como debería suceder si se cumplen las tendencias.

En cuanto al porcentaje total de acierto de todo el proceso de experimentación vemos que se sitúa en el 72%, esto indica que se ha mejorado el porcentaje de acierto total respecto a los resultados para 15 segundos que se ubicaba en un 68% por lo que a priori podríamos aceptar que al aumentar el tiempo entre imágenes mejorarían los resultados tal y como habíamos comentado que podría suceder. Una diferencia de 4 puntos porcentuales que refleja una mejoría global, habrá que ver si seguimos aumentando ese tiempo se seguirían aumentando el porcentaje de acierto, pero todo indica que el factor cansancio comenzaría a entrar en juego y no sería del todo viable realizar ensayos y experimentos completos muy largos ya que la concentración de los sujetos disminuiría debido a este cansancio que se ha comentado.

Si ahora comparamos los porcentajes de aciertos por tipo de experimento en lugar de por sujeto podemos observar lo siguiente:

Experimento 1

Motor	Pensar andar 
Paro	Pensar parar 

Exp 1	Sujeto 1	Sujeto 2	Sujeto 3	Total
Global	56%	50%	65%	57%
Motor	52%	51%	41%	48%
Paro	59%	50%	88%	66%

Tabla 38. Resultados para experimento 1 para 20 segundos.

Se produce una pequeña mejoría en general respecto a los 15 segundos por imagen, aunque al final de esta fase será cuando se realice una comparación completa entre los distintos modos aplicados.

Sí se observa de nuevo como la actividad de *pensar en parar* vuelve a obtener mejores resultados frente a la actividad de *pensar en andar*, por lo que ya definitivamente con el modo de los 5 segundos confirmaremos estos resultados, a priori parece ser que *pensar en parar* es un pensamiento más sencillo de repetir.

Experimento 2

Motor	Andar 
Paro	Parar 

Exp 2	Sujeto 1	Sujeto 2	Sujeto 3	Total
Global	72%	81%	86%	80%
Motor	82%	75%	80%	79%
Paro	62%	87%	92%	81%

Tabla 39. Resultados para experimento 2 para 20 segundos.

Para este caso si se observa una mejora drástica en los resultados, pasamos de un 68% de acierto global a un 80% por lo que se empieza confirmar la idea de que aumentar los tiempos de 15 a 20 segundos mejora los porcentajes de aciertos de los experimentos.

Para este segundo experimento podemos ver como la actividad Parar ha obtenido mejor resultado que la actividad Andar, al contrario que en el Modo 1 de 15 segundos por imagen. Se valoran los resultados de manera positiva y se entiende que pueden variar de una experimentación a otra, estos resultados entran dentro de lo que se podría prever.

Experimento 3

Motor	Multiplicación 
Paro	Relajación 

Exp 3	Sujeto 1	Sujeto 2	Sujeto 3	Total
Global	86%	76%	73%	78%
Motor	92%	82%	77%	84%
Paro	80%	71%	68%	73%

Tabla 40. Resultados para experimento 3 para 20 segundos.

En este tercer experimento también se mejoran el resultado global, que pasa de un 67 a un 78%. La actividad *multiplicar* vuelve a ofrecer un porcentaje de acierto medio entre todos los sujetos muy alto, del 84%, con un 92% de nuevo para el caso del primer sujeto.

Se empieza a contrasta lo buena actividad que resulta ser el cálculo matemático a la hora de ser reproducido de la misma manera, por lo que podría ser una muy buena actividad a implantar en el exoesqueleto.

Por otro lado vemos como la actividad *relajación* ha mejorado su porcentaje, situándose en un 73%, no es el mejor de todos pero supone una mejora importante en relación al obtenido para 15 segundos donde se obtuvo un 48%.

Experimento 4

Motor	Canción 
Paro	Colores 

Exp 4	Sujeto 1	Sujeto 2	Sujeto 3	Total
Global	69%	53%	67%	63%
Motor	71%	62%	64%	66%
Paro	68%	45%	70%	61%

Tabla 41. Resultados para experimento 4 para 20 segundos.

Vemos por primera vez una actividad que reduce el porcentaje de acierto con respecto a Modo 1 de 15 segundos, en este caso ambas actividades han reducido sus resultados. Esto es algo que podía suceder, lo que se pretende es ver la relación entre tiempos y porcentajes de acierto. En tres experimentos ha aumentado y en uno ha disminuido.

Específicamente para este caso las actividades han cambiado su orden y ahora es *Tararear una canción* la actividad que presenta mayor porcentaje frente a *Pensar en un color determinado*. Aun así siguen siendo porcentajes no muy altos por lo que podría ser uno de los experimentos a descartar.

Experimento 5

Motor	Lanzar 			
Paro	Pensar lanzar 			
Exp 5	Sujeto 1	Sujeto 2	Sujeto 3	Total
Global	73%	78%	80%	77%
Motor	78%	92%	70%	80%
Paro	69%	63%	90%	74%

Tabla 42. Resultados para experimento 5 para 20 segundos.

Se repiten los porcentajes de acierto con respecto al caso de los 15 segundos por imagen, vuelve a ser 77% de forma global aunque con pequeñas variaciones para las actividades de *Lanzar y recoger una pelota* frente a *Pensar en lanzar y recoger dicha pelota*. Eso sí, vuelve a cumplirse que la primera es mejor que la segunda, obteniendo de nuevo un porcentaje mayor al 80% por lo que podría ser otra de las actividades a tener en cuenta para la implementación en el exoesqueleto a la hora de querer moverlo.

Experimento 6

Motor	Mano izq 			
Paro	Inicial palabra 			
Exp 6	Sujeto 1	Sujeto 2	Sujeto 3	Total
Global	71%	79%	72%	74%
Motor	88%	85%	71%	81%
Paro	54%	73%	72%	66%

Tabla 43. Resultados para experimento 6 para 20 segundos.

De nuevo se vuelve a repetir el porcentaje de acierto global, que se sitúa en el 74%, por lo que tanto en el caso anterior como en éste variar el tiempo por imagen no ha influido en el acierto global del experimento. Donde sí lo ha hecho ha sido en los porcentajes particulares de cada actividad, donde *Pensar en mover la mano izquierda* ha aumentado su ventaja y *Pensar en una palabra que comience por una determinada letra* ha disminuido.

De forma general comentar que sí se aprecia una mejoría al aumentar el tiempo de 15 a 20 segundos por imagen. Los resultados particulares han mejorado en su gran mayoría y la relación entre actividades para un mismo experimento se ha mantenido, también han mejorado los experimentos.

Experimento 2	80%
Experimento 3	78%
Experimento 5	77%
Experimento 6	74%
Experimento 4	63%
Experimento 1	57%

Tabla 44. Resultado experimentos 20s.

En este caso las peores actividades han sido la 4 y la 1, con porcentajes de acierto muy bajos, y las mejores actividades han sido la 2 y de nuevo la 3, gracias a la actividad *Multiplicar* pese al mal rendimiento de la actividad *Relajación*.

Realizando la comparación de los resultados en función de las actividades podemos comentar lo siguiente:

Multiplicar	84%
Mover mano izquierda	81%
Parar	81%
Lanzar y recoger pelota	80%
Andar	79%
Pensar en lanzar pelota	74%
Relajación	73%
Pensar en palabras	66%
Tararear una canción	66%
Pensar en parar	66%
Pensar en colores	61%
Pensar en andar	28%

Tabla 44. Resultado actividades 20s.

Multiplicar vuelve a ser la actividad que ofrece una mayor tasa de acierto, que junto a las actividades *Mover la mano izquierda*, *Parar* y *Lanzar y recoger la Pelota* son las únicas que superan el 80% de acierto. Se puede observar cómo hay 3 actividades por encima del 80%.

Andar, *Pensar en lanzar y recoger la pelota* y *Relajación* superan el 70% de acierto, siendo esta última una actividad en cuestión debido al bajo rendimiento que había aportado en el Modo 1 de 15 segundos por imagen.

Se confirma que la acción pensar en andar es una actividad que ofrece mucha dificultad de ejecución mediante el pensamiento. Ha obtenido una 28% de acierto de media en 3 sujetos distintos.

En líneas generales podemos concluir para este segundo Modo de experimentación donde los ensayos eran más largos, eso sí con tiempos de descanso también más largos, los resultados ofrecen una mejoría respecto al Modo 1, de que se pasa de un 68,45% a un 72%, por lo que se podría aceptar que aumentando el tiempo de ejecución los usuarios mejoran su éxito en los experimentos.

Total reducido	
Global	72%

Tabla 45. Resultado global 20s.

Si descartamos de nuevo los 2 experimentos que peor porcentaje de acierto han supuesto para así cumplir con los 4 experimentos que se nos pedía tenemos los siguientes resultados:

Resultados Globales reducidos				
	Sujeto 1	Sujeto 2	Sujeto 3	Total
Global	77%	79%	78%	78%
Motor	85%	83%	75%	81%
Paro	70%	74%	81%	75%

Tabla 46. Resultado experimentos para 20 segundos.

La media global de todos los experimentos ha aumentado del 72 al 78%, ubicándose casi en el rango de 80-90% que se pretende alcanzar. Los 4 experimentos elegidos han sido el 2,3, 5 y 6 pues ofrecían mejores resultados de manera global.

Si cribamos ahora por actividades, para 4 experimentos corresponderían 8 actividades, eligiendo las que mejor porcentaje de acierto ofrecen de la *Tabla 44* tendríamos un porcentaje medio de acierto del 77,29%, que comparte resultado eligiendo los mejores 4 experimentos ya que vuelve a ser cercano al 78%.

Pasamos ahora a estudiar el Modo 3 donde las imágenes tenían una duración de 5 segundos:



- Tiempo de experimentación por imagen: 5 segundos

Usuario 1

Resultados						
	Exp 1	Exp 2	Exp 3	Exp 4	Exp 5	Exp 6
Global	44%	72%	72%	67%	58%	70%
Motor	28%	77%	90%	66%	65%	76%
Paro	61%	67%	53%	68%	52%	63%

Tabla 47. Porcentajes usuario 1 para 5 segundos.

Matríz de confusión		Predicho Exp 1		Predicho Exp 2		Predicho Exp 3	
		Motor	Paro	Motor	Paro	Motor	Paro
Real	Motor	48	31	53	26	42	37
	Paro	57	22	18	61	8	71
Matríz de confusión		Predicho Exp 4		Predicho Exp 5		Predicho Exp 6	
		Motor	Paro	Motor	Paro	Motor	Paro
Real	Motor	54	25	41	38	50	29
	Paro	27	52	28	51	19	60

Tabla 48. Matríz de confusión usuario 1 para 5 segundos.

Usuario 2

Resultados						
	Exp 1	Exp 2	Exp 3	Exp 4	Exp 5	Exp 6
Global	46%	69%	77%	45%	70%	62%
Motor	63%	65%	84%	19%	85%	68%
Paro	29%	73%	70%	72%	54%	56%

Tabla 49. Porcentajes usuario 2 para 5 segundos.

Matríz de confusión		Predicho Exp 1		Predicho Exp 2		Predicho Exp 3	
		Motor	Paro	Motor	Paro	Motor	Paro
Real	Motor	23	56	58	21	51	24
	Paro	29	50	28	51	13	54
Matríz de confusión		Predicho Exp 4		Predicho Exp 5		Predicho Exp 6	
		Motor	Paro	Motor	Paro	Motor	Paro
Real	Motor	57	22	43	36	44	35
	Paro	64	15	12	67	25	54

Tabla 50. Matríz de confusión usuario 2 para 5 segundos.

Usuario 3

Resultados						
	Exp 1	Exp 2	Exp 3	Exp 4	Exp 5	Exp 6
Global	61%	66%	65%	50%	84%	75%
Motor	39%	49%	91%	82%	87%	80%
Paro	84%	82%	38%	18%	80%	71%

Tabla 51. Porcentajes usuario 3 para 5 segundos.

Matriz de confusión		Predicho Exp 1		Predicho Exp 2		Predicho Exp 3	
Real		Motor	Paro	Motor	Paro	Motor	Paro
	Motor	66	31	65	14	30	49
	Paro	48	13	40	39	7	72
Matriz de confusión		Predicho Exp 4		Predicho Exp 5		Predicho Exp 6	
Real		Motor	Paro	Motor	Paro	Motor	Paro
	Motor	14	65	63	16	56	23
	Paro	14	65	10	69	16	63

Tabla 52. Matriz de confusión usuario 3 para 5 segundos.

Estos son los resultados de los 6 experimentos llevados a cabo para cada sujeto siendo los tiempo por imagen de 5 segundos.

Comparación y discusión de los resultados: Modo 3

Al igual que para el caso de los 15 y 20 segundos por imagen, en este modo vamos a comparar los resultados obtenidos para sacar diversas conclusiones. En primer lugar vamos a realizar una comparación general entre sujetos. Presentamos una tabla en la que se comparan sus resultados totales a modo resumen.

Resultados Globales				
	Sujeto 1	Sujeto 2	Sujeto 3	Total
Global	64%	61%	67%	64%
Motor	67%	64%	72%	67%
Paro	61%	59%	62%	61%

Tabla 53. Comparación resultados entre sujetos para 5 segundos.

A simple vista se observa una reducción de forma general en los resultados respecto al caso de 15 y 20 segundos por imagen. El porcentaje de acierto global se ha visto reducido de un 72 a un 64% si lo comparamos con el mejor de los casos. Por lo que podríamos aceptar de manera general que al reducir el tiempo de experimentación se reduce el porcentaje de acierto alcanzado por los sujetos, esto sucede tanto pasando de 20 a 15 segundos como de 15 a 5. Se confirma así que el tiempo de experimentación es un factor clave, siendo esta confirmación uno de los motivos por lo que se han realizado de nuevo los experimentos a sabiendas de que sería peor, ya que se quería contrastar la información y así se ha hecho.

En este tercer modo de nuevo el sujeto 2 vuelve a obtener los peores resultados, se sacarán conclusiones al final de esta sección. El sujeto 3 obtiene de nuevo un mejor porcentaje de acierto de manera global en los 6 experimentos realizados, seguido del sujeto 2.

Si ahora comparamos los porcentajes de aciertos por tipo de experimento en lugar de por sujeto podemos observar lo siguiente:

Experimento 1

Motor	Pensar andar 
Paro	Pensar parar 

Exp 1	Sujeto 1	Sujeto 2	Sujeto 3	Total
Global	44%	46%	61%	51%
Motor	28%	63%	39%	43%
Paro	61%	29%	84%	58%

Tabla 54. Resultados para experimento 1 para 5 segundos.

Se observa de nuevo como la actividad de *pensar en andar* genera el menor porcentaje de acierto por tercera vez en 3 modos distintos. La actividad de *pensar en parar* vuelve a mejorar a la actividad anterior, por lo que se puede afirmar que de ambas actividades Pensar en parar es una actividad más sencilla de repetir mentalmente.

En este caso en concreto el porcentaje de acierto global se ha visto disminuido de un 57% para 20 segundos a un 56% para 15 segundos y finalmente un 51% para 5 segundos. La tendencia decreciente en función del tiempo de experimento se confirma.

Experimento 2

Motor	Andar 
Paro	Parar 

Exp 2	Sujeto 1	Sujeto 2	Sujeto 3	Total
Global	72%	69%	66%	69%
Motor	77%	65%	49%	64%
Paro	67%	73%	82%	74%

Tabla 55. Resultados para experimento 2 para 5 segundos.

Para este caso si se observa que en comparación con el mejor de los casos los resultados se han reducido de un 80% para 20 segundos a un 69% para 5 segundos, aun así están en el orden del resultado obtenido para 15 segundos.

La actividad *Parar* ha obtenido al igual que en el Modo 2 de 20 segundos un mejor resultado que la actividad *Andar*, al contrario que en el Modo 1 de 15 segundos por imagen. Prevé que es más sencillo realizar el movimiento de *Parar* que el de *Andar*. En las conclusiones finales de esta segunda fase se discutirán los resultados obtenidos para estos 3 Modos.

Experimento 3

Motor	Multiplicación 
Paro	Relajación 

Exp 3	Sujeto 1	Sujeto 2	Sujeto 3	Total
Global	72%	77%	65%	71%
Motor	90%	84%	91%	88%
Paro	53%	70%	38%	54%

Tabla 56. Resultados para experimento 3 para 5 segundos.

Al igual que en el experimento anterior, se obtienen peores resultados comparándolo con el segundo modo de 20 segundos, pasando de 78 a 71% de acierto, pero muy similares a los obtenidos en el modo 1 de 15 segundos.

La actividad *multiplicar* vuelve a ofrecer un porcentaje de acierto medio entre todos los sujetos muy alto, del 88%, siendo el más alto en los 3 modos estudiados. Se contrasta así lo buena actividad que resulta ser el cálculo matemático.

Por otro lado vemos como la actividad *relajación* vuelve a ofrecer resultados muy bajos situándose en un 54% por lo que se aprecia que no es una actividad que reporte un porcentaje de éxito alto, sería recomendable descartarla.

Experimento 4

Motor	Canción
Paro	Colores

Exp 4	Sujeto 1	Sujeto 2	Sujeto 3	Total
Global	67%	45%	50%	54%
Motor	66%	19%	82%	56%
Paro	68%	72%	18%	53%

Tabla 57. Resultados para experimento 4 para 5 segundos.

Volvemos a obtener porcentajes de acierto muy bajos, esto se debe en parte a que se ha realizado en el tercer modo, es decir de 5 segundos por imagen, y además que este experimento es uno de los que ofrecen peores resultados por lo que juntando ambos factores obtenemos un resultado total medio para los tres sujetos del 54%, es decir el segundo más bajo de entre todos los experimentos justo detrás del primer experimento. Ambos se confirman como los dos peores experimentos y muy posiblemente sean descartados.

Experimento 5

Motor	Lanzar
Paro	Pensar lanzar

Exp 5	Sujeto 1	Sujeto 2	Sujeto 3	Total
Global	58%	70%	84%	70%
Motor	65%	85%	87%	79%
Paro	52%	54%	80%	62%

Tabla 58. Resultados para experimento 5 para 5 segundos.

Resulta curioso observar como a pesar de reducir el tiempo por imagen los resultados de la actividad Lanzar y recoger la pelota siguen siendo muy buenos, del orden del 80%. Aunque si es cierto comentar que los porcentajes en general se han visto reducidos, pasando de un 77% en ambos modos anteriores a un 70% en este tercer modo.

Vuelve a cumplirse que la primera actividad es mejor que la segunda, erigiéndose así como una de las dos mejores actividades registradas de todos los experimentos junto a la *Multiplicación*.

Experimento 6

Motor	Mano izq ←
Paro	Inicial palabra D

Exp 6	Sujeto 1	Sujeto 2	Sujeto 3	Total
Global	70%	62%	75%	69%
Motor	76%	68%	80%	75%
Paro	63%	56%	71%	63%

Tabla 59. Resultados para experimento 6 para 5 segundos.

De manera global los resultados han empeorado con respecto a los modos de 15 y 20 segundos por lo que se ha cumplido la tendencia decreciente en todos los experimentos en función del tiempo de experimentación. Para este caso pasamos de un 74% en ambos modos anteriores a un 69%, obteniendo eso sí un resultado más que aceptable en la prueba de *Mover la mano izquierda*, alcanzando un 75%.

De forma general comentar que se han empeorado los resultados al reducir los tiempos de 20 a 15 y a 15 segundos por imagen. En este caso las peores actividades han vuelto a ser la 4 y la 1, con porcentajes de acierto muy bajos, y las mejores actividades han sido la 3, por tercera vez consecutiva y la 5, que repite por segunda vez, siendo las únicas que superan el 70% de acierto gracias a las actividades *Multiplicar* y *Lanzar y recoger la pelota*.

Experimento 3	71%
Experimento 5	70%
Experimento 6	69%
Experimento 2	69%
Experimento 4	54%
Experimento 1	51%

Tabla 60. Resultado experimentos 5s.

Realizando la comparación de los resultados en función de las actividades podemos comentar lo siguiente:

Multiplicar	88%
Lanzar y recoger pelota	79%
Mover mano izquierda	75%
Parar	74%
Andar	64%
Pensar en palabras	63%
Pensar en lanzar pelota	62%
Pensar en parar	58%
Tararear una canción	56%
Relajación	54%
Pensar en colores	53%
Pensar en andar	43%

Tabla 61. Resultados actividades 5s.

Multiplicar vuelve a ser la actividad que ofrece una mayor tasa de acierto, obteniendo un 88% que viene a ser la más alta de todos los experimentos. Estamos hablando de que este resultado es fruto de la media de 3 sujetos, por lo que tiene una buena base científica.

En segundo lugar se encuentra *Lanzar y recoger la Pelota* con un 79%, muy buen porcentaje también. Seguida del resto de actividades, que empeoran en su gran mayoría en comparación con los 2 modos anteriores.

En último lugar vuelve a situarse la acción *pensar en andar*, que ofrece un porcentaje de acierto muy bajo y se confirma como la actividad con peores resultados de todas en los tres modos estudiados, 5, 15 y 20 segundos por imagen.

En líneas generales podemos concluir para este tercer y último modo de experimentación, donde los ensayos eran muy cortos y los tiempos de descanso se han eliminado, que los resultados ofrecen un empeoramiento respecto a los dos modos anteriores, donde se llega a pasar de un 72% de acierto global en el mejor de los casos a un 64%.

Total	
Global	64%

Tabla 62. Resultado global 5s.



Motivos de este empeoramiento pueden radicar en la falta de descanso pero todo apunta a la reducción de los tiempos para cada imagen, ya que realizar un cambio de pensamiento cada 5 segundos complica el hecho de poder concentrarse en dicho pensamiento, es decir que una vez se alcanza dicha concentración es cuando se cambia la imagen y se necesita de nuevo comenzar de cero para conseguir la concentración, lo que provoca un estado de confusión en los sujetos que finalmente se ve reflejado en los resultados.

Hemos visto que los experimentos 1 y 4 son de nuevo los peores por lo que si descartamos otra vez los 2 experimentos que peor porcentaje de acierto han supuesto para así cumplir con los 4 experimentos que se nos pedía tenemos los siguientes resultados:

Resultados Globales reducidos				
	Sujeto 1	Sujeto 2	Sujeto 3	Total
Global	68%	69%	72%	70%
Motor	77%	75%	77%	76%
Paro	59%	63%	68%	63%

La media global de todos los experimentos aumenta de un 64 a un 70% pero aun así sigue siendo inferior a los 72 y 70% de los otros dos modos. Los 4 experimentos elegidos han sido el 2,3, 5 y 6.

Tabla 63. Resultados experimentos para 5 segundos.

Si cribamos ahora por actividades, para 4 experimentos corresponderían 8 actividades, eligiendo las que mejor porcentaje de acierto ofrecen de la tabla 63 tendríamos un porcentaje medio de acierto del 70,36%, que vuelve a ser similar al caso de cribar según experimentos.

Comparación final

Una vez han sido presentados todos los resultados será pertinente comparar todos los resultados entre sí. Se ha realizado un exhaustivo estudio para 3 modos diferentes y a continuación se resumen los resultados recogidos:

Exp 1	5	15	20	Total	Exp 4	5	15	20	Total
Global	51%	56%	57%	54%	Global	54%	68%	63%	62%
Motor	43%	28%	48%	40%	Motor	56%	67%	66%	63%
Paro	58%	83%	66%	69%	Paro	53%	70%	61%	61%
Exp 2	5	15	20	Total	Exp 5	5	15	20	Total
Global	69%	68%	80%	72%	Global	70%	77%	77%	75%
Motor	64%	72%	79%	71%	Motor	79%	83%	80%	81%
Paro	74%	65%	81%	73%	Paro	62%	70%	74%	69%
Exp 3	5	15	20	Total	Exp 6	5	15	20	Total
Global	71%	67%	78%	72%	Global	69%	74%	74%	72%
Motor	88%	87%	84%	86%	Motor	75%	77%	81%	78%
Paro	54%	48%	73%	58%	Paro	63%	72%	66%	67%

Tabla 64. Comparación final resultados experimentos.

Varias cosas han quedado claras, en primer lugar se puede afirmar que en la gran mayoría los experimentos realizados para 5 segundos por imagen ofrecen peores resultados frente al resto, al igual pero en sentido opuesto los experimentos realizados para 20 segundos ofrecen mejores resultados frente al resto. Esto nos indica que el tiempo es un factor fundamental a la hora de obtener buenos o malos resultados. Aumentar el tiempo de 5 a 15 segundos nos garantiza una



mejora en el porcentaje de aciertos, así como aumentarlo de 15 a 20, siendo este último caso el que ofrece los mejores resultados de entre todos los estudiados.

También es necesario comentar que el tiempo de descanso debe ir acorde al tiempo de experimentación, siendo necesario aumentar el intervalo para experimentos más largos con la única intención de evitar el cansancio que pueda generarse por la propia realización de los ensayos.

En cuantos a resultados se debe, las únicas actividades que ofrecen un porcentaje de acierto mayor al 80% son la *Multiplicación* y *Lanzar y recoger una pelota*, siendo la primera la actividad que mejor resultados ofrece de todas las estudiadas situándose en un 86% el porcentaje de acierto global. El experimento 5 es el que mejor a resultado de manera general alcanzando un 75% entre ambas actividades, *Lanzar y recoger una pelota* y *Pensar en lanzar y recoger una pelota*. Por el contrario la peor actividad pertenece también al peor experimento, siendo éste el primero y la actividad la de *Pensar en andar*.

Por lo tanto ya con todos los experimentos realizados para los tres modos estudiados podemos establecer los resultados hasta ahora presentados como la *base de datos* del trabajo de fin de máster. Más adelante se presentan mejoras en los resultados aplicando distintas técnicas, será ahí cuando se presenten los mejores resultados y se elijan las actividades seleccionadas para ser implementadas en el exoesqueleto o una simulación 3D del mismo.

2. Aleatoriedad durante la experimentación.

En investigaciones anteriores llevadas a cabo por el departamento se realizaron experimentos en los que las imágenes mostradas por pantalla se sucedían de forma aleatoria. A continuación se puede ver un fragmento de código en el que se elegía de forma aleatoria una de las posibles combinaciones para experimentos de tres estados:

```
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; 5 3 3 7 7 5 3 7 5 7 5 7 3 5 3 3; 7 3 7 3 5 3 7 5 7 3 5 7 3 5 3 5];
```

Figura 82. Código Aleatoriedad durante la experimentación.

De esta manera el sujeto que realizaba los ensayos desconocía el orden en el que aparecerían las imágenes así como el número de repeticiones seguidas que tendría, siendo posible que una misma imagen se mostrara dos veces seguidas.

Esta aleatoriedad se aplicó al código pero se modificó para dos estados, siendo el código creado el siguiente:

```
status_aleatory=randi([1,2],1,1);  
disp(status_aleatory);  
if status_aleatory==1  
    status_set_matrix = [7 3 7 3 7 3 7 3 7 3 7 3 7 3 7 3];  
else  
    status_set_matrix = [3 7 3 7 3 7 3 7 3 7 3 7 3 7 3 7];  
end
```

Figura 83. Código Aleatoriedad modificada.

En este código se generaba un estado que era el que decidía que orden se mostraría en las imágenes, evitando eso sí la aleatoriedad una vez comenzado ya que una misma imagen no se podría repetir dos veces seguidas si no que se iría alternando, provocando así que los sujetos supieran que actividad es la siguiente a realizar.

Este código fue aplicado a la experimentación por lo que todos los resultados anteriormente presentados se han llevado a cabo sin aleatoriedad, lo que ha supuesto una mejora en el porcentaje de acierto, pues conocer de antemano cual será el orden de actuación predispone y prepara a los sujetos para realizar los ensayos desde mucho antes.

3. Variación del código de procesamiento de los experimentos.

Al inicio del proyecto se comentó con los directores que sería interesante ver si hay alguna regla o norma que se cumpla en los resultados en los que eliminando cierto patrón se consiga una mejoría de los resultados. Al estar trabajando con los ficheros Matlab quise hacer hincapié en la búsqueda de algún tipo de elemento que estuviera provocando un deterioro en los resultados, tras analizar los scripts que componen los archivos Matlab me di cuenta que hay un archivo Matlab esencial a la hora de realizar el procesamiento de un experimento, este archivo es el denominado *Copia1*.

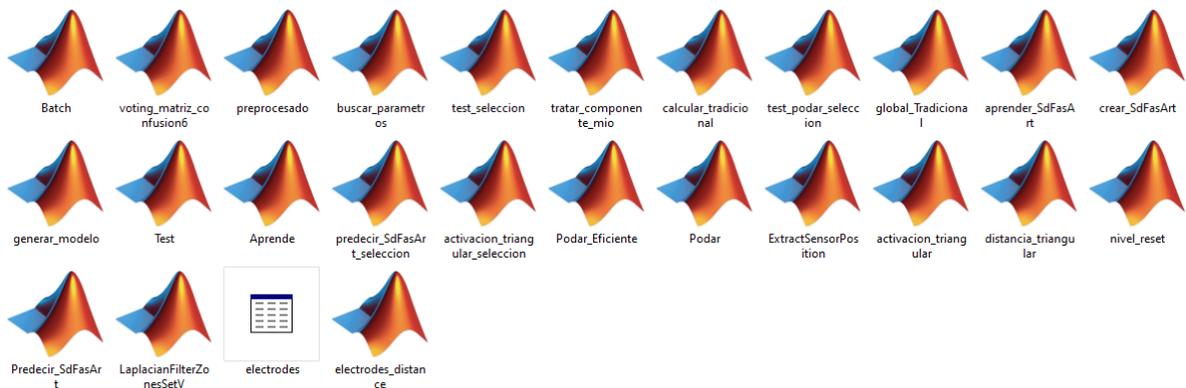


Figura 84. Carpeta con archivos antes de procesado.

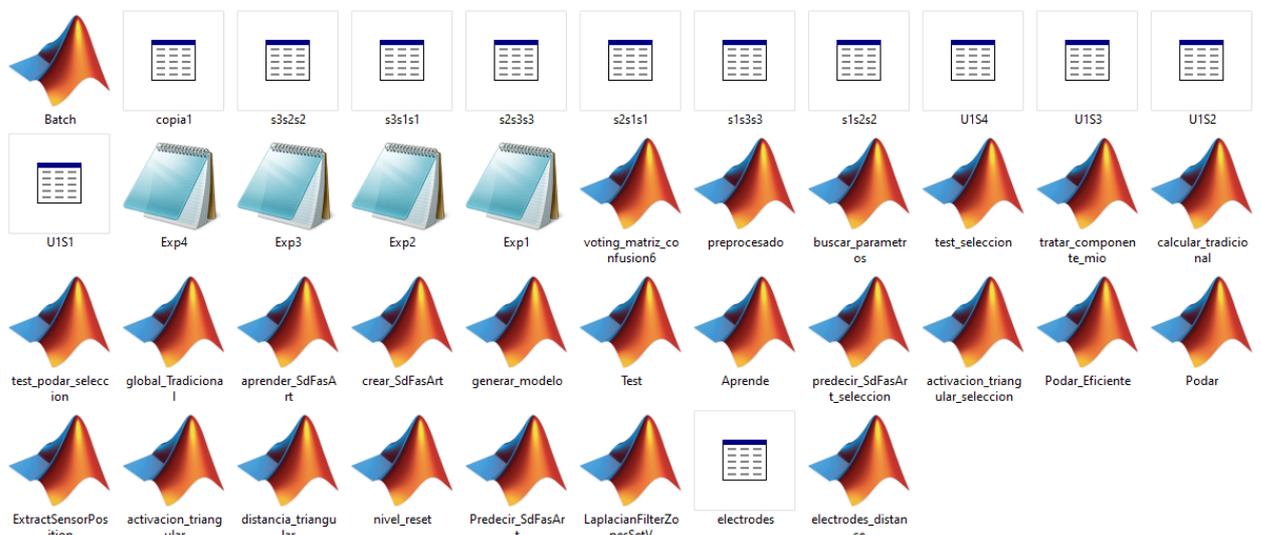


Figura 85. Carpeta con archivos tras el procesado.

Tras realizar el procesado se genera un script, *Copia1*, que es el que nos ofrece los resultados finales:

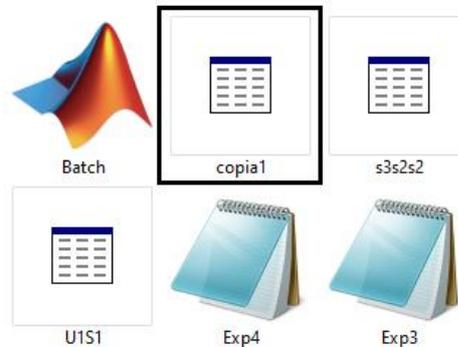


Figura 86. Archivo Copia1.

Lo interesante no es el archivo en sí, sino dos variables que forman parte de él. Cargando dicho script en Matlab podemos visualizar de entre todas las variables las dos siguientes:

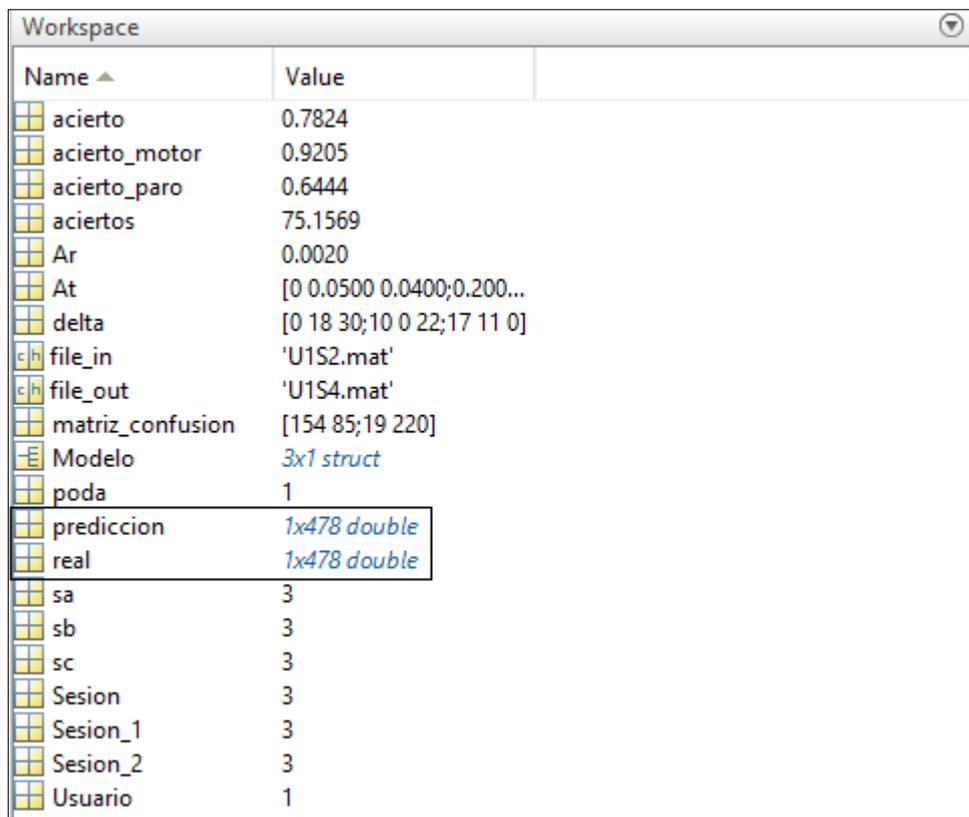


Figura 87. Variables existentes en Copia1.

Estas variables son las denominadas *predicción* y *real*. Su tamaño dependerá del tiempo que dure el cada experimento, siendo el tamaño de 158 unidades para el modo de 5 segundos por imagen, de 478 para el modo de 15 segundos por imagen y de 638 para el modo de 20 segundos por imagen.



Estas variables contienen los valores para cada estado ejecutado en los experimentos. Hay 16 estados ya que las imágenes se muestran 16 veces en total, por lo que habiendo 10 unidades por cada 5 segundos tendremos que para el modo de 5 segundos por imagen el total de unidades será 10 por el número de estados, que al ser 16 vienen a ser 160 unidades. Lo que sucede es que el código de registro no es perfecto y se pierden 2 unidades por el camino, por ello para 5 segundos estas variables poseen un tamaño de 158 en lugar de 160.

En el caso de 15 segundos se multiplican por 3 los 5 segundos, es decir que ahora en lugar de 10 unidades por estado tendremos 30, que siendo 16 estados tenemos 480, de las que se pierden 2 unidades como ya hemos comentado por lo que para 15 segundos tenemos un tamaño de archivo de 478. En último lugar para el modo de 20 segundos por imagen tenemos 40 unidades por estado, que al ser 16 estados nos da un tamaño de 640, menos 2 unidades perdidas deja un total de 638 unidades.

Tiempos	Tamaño
5 seg	158
15 seg	478
20 seg	638

Tabla 65. Tamaño archivos.

Si ejecutamos cada variable nos encontramos con lo siguiente:

Para el caso de 5 segundos, las variables poseen 158 unidades, siendo 16 estados se cambia de estado a las 10 unidades:

- Variable real

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2
2													
3													

Figura 88. Estados según posición para variable Real.

En esta variable se almacena qué actividad se ejecuta para cada estado. En nuestra investigación estamos llevando a cabo experimentos de 2 actividades, por lo que cada 10 unidades irá variando de la actividad 1 a la actividad 2. Así hasta completar las 16 imágenes que corresponden a 158 unidades, es decir 16 por 10 (Sabido que se pierden dos valores).

Para nuestros experimentos se estableció que el número 1 corresponde para la actividad *Paro*, y el número 2 corresponde para la actividad *Motor*, dependiendo de qué experimento se lleve a cabo las actividades *Motor* y *Paro* estarán referidas a sus respectivas acciones, que por ejemplo para el experimento 3, el número 2 se referirá a la actividad de *Multiplicación*

Actividad	Estado
Paro	1
Marcha	2

ya que es la que está asociada al *Motor* y el número 1 se referirá a la actividad *Relajación* que es la que está asociada al *Paro*, de igual forma para el resto de experimentos. Así es como se nos facilitó el código y así lo hemos mantenido.

Tabla 66. Estados asociados.

Por lo tanto la variable *real* refleja lo que debería suceder para obtener un resultado perfecto, es decir muestra cuando se debe ejecutar la actividad asociada al número 1 y cuando al número 2. Si cuando el sujeto realice la experimentación logra repetir el mismo valor, 1 o 2, para cada posición será cuando se consiga un acierto del 100%.

- Variable predicción

prediccion													
1x158 double													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2													
3													

Figura 89. Estados según posición para variable Predicción.

La variable *predicción* lo que muestra son las unidades que realmente el sujeto a conseguido generar, si en la posición 7 la variable *real* dice que debe haber un 1, el sujeto debe repetir ese 1 en la posición 7 porque de lo contrario se tratará de un error que empeorará el porcentaje de acierto total del experimento. Este porcentaje final se halla realizando la comparación de las 158 unidades para el caso de experimentos de 5 segundos por imagen, en el caso de 15 será la comparación de 478 unidades y en el caso de 20 segundos será la de 638.

Para conseguir el resultado perfecto la variable *predicción* debe ser idéntica a la variable *real*, conteniendo en su interior los mismos valores para todas las posiciones. Una vez explicado todo lo anterior y estando en conocimiento de cómo funcionan ambas variables es momento de indicar como se ha variado el código.

Tras observar detenidamente la información que proporcionan las variables del fichero *Copia1*, hubo un patrón que se repetía continuamente en todos los experimentos, el patrón en cuestión es un error que provoca un deterioro del resultado final y tiene que ver con el momento en el que se cambia de imagen, es decir el momento en el que se cambia de 1 a 2 y viceversa. Para el caso del modo de 5 segundos por imagen se produce en la posición de múltiplos de 10 de las variables *real* y *predicción*, es decir en las posiciones 10, 20, 30... y así sucesivamente hasta recorre todas las posiciones. Para el caso del modo de 15 segundos se produce en la posición de múltiplos de 30 y para el caso del modo de 20 segundos se produce en la posición de múltiplos de 40. Es decir que cuando se cambia de estado la unidad situada en la posición de cambio suele ser errónea.

A continuación mostramos un ejemplo para un modo de 5 segundos por imagen:

	10	20	30	40	50	60	70
real	2	1	2	1	2	1	2
prediccion	1	1	1	2	1	2	1
80	90	100	110	120	130	140	150
1	2	1	2	1	2	1	2
1	1	2	1	2	2	1	1

Figura 90. Comparación de estados según posición para ambas variables.

Se puede observar cómo las posiciones en los que se cambia de estado, de 1 a 2 o viceversa, los resultados de la variable *real* y la *variable* predicción son distintos, esto indica un error que supondrá un deterioro a la hora de realizar el cálculo del porcentaje de acierto.

Hay que admitir que no en todas las posiciones de cambio se produce este error pero en su gran mayoría se cumple el patrón de ser valores distintos en posiciones de cambio.

En este punto los experimentos ya han sido llevados a cabo por los sujetos por lo que sus resultados no se pueden variar pero lo que si se puede hacer es modificar el código de procesado para evitar ciertos patrones, filtrando así errores y mejorando por lo tanto los porcentajes de acierto para un mismo experimento. Esta práctica es completamente justa ya que no evita únicamente los errores sino que actúa sobre un patrón, aplica una regla heurística al código por lo que podría afectar tanto a resultados positivos como negativos, en este caso nos hemos encargado de que mejore dichos resultados.

Explicado y ubicado el problema se procede a exponer como se ha solventado. En primer lugar era necesario evitar estos errores sin falsear los datos por lo que directamente se aplicó un filtrado a los resultados, pudiendo afectar tanto positiva como negativamente. El filtrado consiste en no tener en cuenta los valores ubicados en posiciones de cambio de estado, es decir las posiciones 10, 20, 30... para el caso de 5 segundos por imagen, 30, 60, 90... para el caso de 15 segundos por imagen y 40, 80, 120... para el caso de 20 segundos por imagen.

Para ello se escribió un código que sustituía por ceros los valores de estas columnas, para más tarde, mediante una serie de bucles, eliminar las columnas que poseían ceros y finalmente reordenarlas. Mostramos a continuación el código que realiza el filtrado para el caso de un experimento de 5 segundos por imagen, donde el tamaño es de 158 unidades:

```
% Sustitución de los valores donde cambia de estado por ceros
if length(final)==158
for i=1:15
    j=i*10;
    final(1,j)=0;
end
end
```

Figura 91. Código de sustitución de valores de cambio de estado.

```
% Se eliminan las columnas con ceros
if length(final)==158
clear final
clear prediccion
clear real
for j=1:158
    if final(1,j)==0
        for h=j:157
            final(1,h)=final(1,h+1);
        end
    end
end
for s=1:143
    final2(1,s)=final(1,s);
    prediccion2(1,s)=prediccion(1,s);
    real2(1,s)=real(1,s);
end
for s=1:143
    final(1,s)=final2(1,s);
    prediccion(1,s)=prediccion2(1,s);
    real(1,s)=real2(1,s);
end
end
```

Figura 92. Código de eliminación de columnas con ceros.

Quedando al final del proceso los archivos iniciales con 15 posiciones menos, dichas posiciones son en las que se producía un cambio del estado 1 a 2 y viceversa. Por lo que aplicando este código a los archivos de 5 segundos por imagen pasaríamos de tener un tamaño de 158 unidades a 143, para el caso de 15 segundos pasaría de 478 a 463 y para el caso de 20 segundos pasaría de 638 a 623.

matriz_confusion	[48 31;57 22]
Modelo	3x1 struct
poda	1
prediccion	1x143 double
prediccion2	1x143 double
real	1x143 double
real2	1x143 double
resultado	0.4615
s	143
sa	3

Figura 93. Variables con tamaño reducido.

Tras realizar el filtrado se vuelve a realizar un cálculo de los porcentajes de acierto, este cálculo se realiza mediante contadores que van recorriendo el fichero y sumando aciertos y fallos para finalmente calcular un resultado total. A continuación se presentarán los resultados de todos los experimentos al ser recalculado su porcentaje de acierto tras haber aplicado el filtrado anteriormente mencionado:

Se muestran en colores verdes los valores que han mejorados su resultado, en rojo los valores que lo han empeorado y en negro lo valores que no han variado.

- Para 15 segundos

Resultados						
Usuario 1	Exp 1	Exp 2	Exp 3	Exp 4	Exp 5	Exp 6
Global	53%	73%	79%	72%	82%	72%
Motor	32%	74%	95%	70%	80%	97%
Paro	74%	73%	64%	74%	83%	48%
Usuario 2	Exp 1	Exp 2	Exp 3	Exp 4	Exp 5	Exp 6
Global	65%	66%	51%	62%	83%	77%
Motor	44%	72%	91%	66%	95%	79%
Paro	84%	60%	14%	58%	73%	75%
Usuario 3	Exp 1	Exp 2	Exp 3	Exp 4	Exp 5	Exp 6
Global	51%	71%	74%	74%	72%	78%
Motor	13%	77%	84%	69%	86%	63%
Paro	92%	65%	64%	79%	58%	95%

Tabla 67. Resultados tras la mejora según usuario y experimento.

Podemos observar como todos los experimentos mejoran sus resultados de manera global, no hay ni uno solo que empeore. En cuanto a actividades particulares se refiere si existen ciertos casos en los que el código de filtrado perjudica los resultados de una actividad, ya que como se había comentado anteriormente se está aplicando un filtrado tras ver un patrón en las variables que no siempre implica una mejora en los resultados. Aun así se da por bueno dicho filtrado pues mejora de forma global y aumenta el porcentaje de acierto de todos los experimentos.

- Para 20 segundos

Resultados						
Usuario 1	Exp 1	Exp 2	Exp 3	Exp 4	Exp 5	Exp 6
Global	56%	74%	88%	71%	75%	72%
Motor	54%	87%	97%	74%	81%	92%
Paro	59%	62%	80%	68%	68%	54%
Usuario 2	Exp 1	Exp 2	Exp 3	Exp 4	Exp 5	Exp 6
Global	51%	83%	78%	53%	79%	80%
Motor	52%	78%	85%	63%	96%	88%
Paro	49%	87%	71%	44%	63%	72%
Usuario 3	Exp 1	Exp 2	Exp 3	Exp 4	Exp 5	Exp 6
Global	65%	88%	74%	67%	82%	73%
Motor	43%	84%	80%	66%	73%	74%
Paro	86%	91%	67%	69%	90%	71%

Tabla 68. Resultados tras la mejora según usuario y experimento para 20s.

Para el caso de 20 segundos por imagen pasa algo parecido al caso de 15 segundos y es que prácticamente todos los experimentos mejoran sus resultados, a excepción del experimento 4 en el sujeto 2 que ha sido el único en empeorar, pasando de un 53,45 a un 53,13%. Es decir que prácticamente se mantiene igual.

Volvemos a mejorar prácticamente la totalidad de los experimentos por lo que a priori parece que el filtrado funciona.

- Para 5 segundos

Resultados						
Usuario 1	Exp 1	Exp 2	Exp 3	Exp 4	Exp 5	Exp 6
Global	46%	77%	76%	71%	59%	73%
Motor	30%	81%	96%	70%	67%	83%
Paro	62%	73%	56%	71%	52%	64%
Usuario 2	Exp 1	Exp 2	Exp 3	Exp 4	Exp 5	Exp 6
Global	47%	73%	81%	48%	76%	65%
Motor	64%	70%	90%	20%	94%	73%
Paro	30%	75%	73%	75%	58%	58%
Usuario 3	Exp 1	Exp 2	Exp 3	Exp 4	Exp 5	Exp 6
Global	64%	68%	68%	50%	89%	80%
Motor	41%	51%	96%	79%	90%	87%
Paro	87%	86%	41%	20%	87%	73%

Tabla 69. Resultados tras la mejora según usuario y experimento para 5s.

Para el caso de 5 segundos por imagen las pruebas son mucho más evidentes y es que a excepción de un valor, que pasa de 82,28 a 79,45%, todo el resto de valores mejora sus resultados. Parece que el filtrado se comporta mejor en pruebas más cortas debido al constante cambio de estado que influye en la concentración de los sujetos y provoca un fallo justo al cambio de imagen, pues es muy seguido y por lo tanto resulta más difícil concentrarse.



Comparación final

Al igual que para los datos sin filtrar se realizará una comparación de los mejores experimentos y actividades y se realizará una comparación entre los resultados antes y después del filtrado.

Para los 4 mejores experimentos, que vienen a ser el 2, 3, 5 y 6, los resultados serían:

- Para 15 segundos

Resultados Globales reducidos					Resultados Globales reducidos sin filtrar				
	Usuario 1	Usuario 2	Usuario 3	Total		Usuario 1	Usuario 2	Usuario 3	Total
Global	77%	69%	74%	73%	Global	75%	68%	72%	72%
Motor	86%	84%	78%	83%	Motor	82%	80%	77%	80%
Paro	67%	55%	70%	64%	Paro	67%	56%	68%	64%

Tabla 70. Resultados reducidos de los experimentos tras la mejora.

Observamos una pequeña mejora de forma global.

- Para 20 segundos

Resultados Globales reducidos filtrados					Resultados Globales reducidos sin filtrar				
	Usuario 1	Usuario 2	Usuario 3	Total		Usuario 1	Usuario 2	Usuario 3	Total
Global	77%	80%	79%	79%	Global	77%	79%	78%	78%
Motor	89%	87%	78%	85%	Motor	85%	83%	75%	81%
Paro	66%	73%	80%	73%	Paro	70%	74%	81%	75%

Tabla 71. Resultados reducidos de los experimentos tras la mejora para 20s.

De nuevo se observa una pequeña mejora de los resultados de manera global.

- Para 5 segundos

Resultados Globales reducidos filtrados					Resultados Globales reducidos				
	Usuario 1	Usuario 2	Usuario 3	Total		Usuario 1	Usuario 2	Usuario 3	Total
Global	71%	74%	76%	74%	Global	68%	69%	72%	70%
Motor	82%	82%	81%	82%	Motor	77%	75%	77%	76%
Paro	61%	66%	72%	66%	Paro	59%	63%	68%	63%

Tabla 72. Resultados reducidos de los experimentos tras la mejora para 5s.

En este caso también se mejoran los resultados, pasando de un 70 a un 74% por lo que se puede afirmar que existe una mejora en los resultados de los experimentos al ser aplicado el filtrado. Hay que comentar que en estos tres casos se están teniendo en cuenta resultados que al final de esta fase se eliminarán, por lo que todas las medias de los porcentajes de acierto subirán.

Otra comparación que podemos hacer en lugar de por sujetos en por experimentos:

	15 segundos		20 segundos		5 segundos	
	Sin filtrado	Con filtrado	Sin filtrado	Con filtrado	Sin filtrado	Con filtrado
Experimento 5	77%	79%	80%	81%	71%	75%
Experimento 6	74%	76%	78%	80%	70%	75%
Experimento 4	68%	70%	77%	79%	69%	73%
Experimento 2	68%	69%	74%	75%	69%	72%
Experimento 3	67%	68%	63%	64%	54%	56%
Experimento 1	56%	56%	57%	57%	51%	52%

Tabla 73. Resultados finales según experimento.

Haciendo una distinción entre los resultados sin filtrado y con filtrado se observa una mejora tras aplicar el código de filtrado, no es muy grande pero evidencia que esta modificación en el código de procesado mejora los porcentajes de acierto de los resultados.

Por último realizaremos la comparación en función de cada actividad en particular:

Actividades	15 segundos		20 segundos		5 segundos	
	Sin filtrado	Con filtrado	Sin filtrado	Con filtrado	Sin filtrado	Con filtrado
Multiplicar	87%	90%	84%	87%	88%	94%
Lanzar y recoger pelota	83%	87%	81%	85%	79%	84%
Pensar en parar	83%	83%	81%	84%	75%	81%
Mover mano izquierda	77%	79%	80%	83%	74%	78%
Pensar en palabras	72%	74%	79%	80%	64%	67%
Andar	72%	73%	74%	74%	63%	66%
Pensar en lanzar pelota	70%	71%	73%	73%	62%	65%
Pensar en colores	70%	70%	66%	68%	58%	60%
Tararear una canción	67%	68%	66%	66%	56%	57%
Parar	65%	66%	66%	65%	54%	56%
Relajación	48%	47%	61%	60%	53%	56%
Pensar en andar	28%	30%	28%	50%	43%	45%

Tabla 74. Resultados finales según actividad.

En este caso sí se observa a simple vista una gran mejoría de todas las actividades, en particular de las que mejores porcentajes de acierto presentaban. Es decir las 8 actividades que mejor resultados presentaban son las que en general más han aumentado sus valores, que ya se empiezan a situar en torno al 80% de media.

Acabamos aquí la implementación de la tercera variación que ha supuesto una mejoría en los resultados.

4. Mezclado de las actividades entre experimentos.

Se han realizado 54 experimentos, 6 por sujeto para 3 modos distintos de duración para un total de 3 sujetos. Tras el trabajo realizado hemos sabido que hay ciertos experimentos que funcionan mejores que otros y, dentro de cada experimento, actividades que funcionan mejor que otras por lo que sería conveniente desechar las actividades y experimentos que se ha comprobado que no ofrecen buenos resultados para seguir únicamente con aquellas que sí ofrecen resultados óptimos.

En este apartado se ha llevado a cabo un testeo para uno de los sujetos, dicho testeo consistía en mezclar las actividades entre experimentos para conocer si dichas actividades reducían su valor, lo mejoraban o se mantenían. Lo que se pretende comprobar es si dependiendo de qué actividad acompañe a otra los resultados varían. Si los valores se mantienen se podrían desechar los experimentos que no han ofrecido buenos porcentajes teniendo la seguridad de que es factible y viable mezclar las actividades restantes, ya que lo que buscamos es únicamente un par de actividades para implementar en el exoesqueleto.

Al sujeto número 1 se le realizaron de nuevos los 6 experimentos mezclando las actividades entre sí para uno de los modos, en este caso se trata del modo de 5 segundos por imagen. Los experimentos estarán formados ahora por la siguiente pareja de actividades:

Resultados experimentos mezclados						
	Exp 1	Exp 2	Exp 3	Exp 4	Exp 5	Exp 6
Motor	Colores 	Andar 	Mano izq 	Canción 	Andar 	Multiplicación 
Paro	Pensar parar 	Lanzar 	Relajación 	Pensar andar 	Pensar lanzar 	Inicial palabra 

Tabla 75. Distribución actividades según experimentos mezclados.

A continuación se muestran los resultados ordenados según la forma original para así mantener el formato y poder visualizar la comparación de los resultados de una forma más sencilla:

Resultados							
Mezcladas	Exp 1	Exp 2	Exp 3	Exp 4	Exp 5	Exp 6	Total
Global	62%	68%	77%	53%	53%	66%	63%
Motor	61%	72%	84%	62%	62%	68%	68%
Paro	63%	65%	70%	44%	44%	65%	58%
Sin mezclar	Exp 1	Exp 2	Exp 3	Exp 4	Exp 5	Exp 6	Total
Global	44%	72%	72%	67%	58%	70%	64%
Motor	28%	77%	90%	66%	65%	76%	67%
Paro	61%	67%	53%	68%	52%	63%	61%

Tabla 76. Comparación resultados finales con y sin mezclado de actividades.

Se puede observar como de las 12 actividades hay 8 cuyos valores son muy similares, sabiendo que de un intento a otro los valores pueden variar sin aparente motivo, ya que la concentración o las distracciones exteriores del momento pueden provocar un empeoramiento de los resultados, sin embargo la gran mayoría de actividades consiguen aproximar sus valores.



Si nos fijamos en el cómputo global de un caso y de otro los valores son muy parejos por lo que esta experimentación nos da a entender que variando las actividades de los experimentos y mezclándolas entre sí no se observan cambios aparentemente importantes en los resultados.

Sería bueno destacar que la actividad *Multiplicación* sigue marcando diferencias con el resto y manteniendo su buen porcentaje de acierto, situándose en un 84%. También para la actividad de *Lanzar y recoger la pelota* para este sujeto en concreto se repiten sus valores, 62 y 65%. Por otro lado se sigue apreciando que en la gran mayoría de ocasiones siempre suele haber una actividad que ofrece un resultado mayor que la otra, y normalmente no suelen ser altos en ambas actividades.

Para verificar un último resultado se quiere comparar si realizando un experimento con dos actividades que sabemos que ofrecen altos porcentajes de acierto mantendrán dichos porcentajes o si por el contrario al estar formando parte del mismo experimento una o ambas reducirán su acierto. Lo que se ha hecho ha sido combinar las dos mejores actividades de toda la investigación en un solo experimento, estamos hablando de la actividad *Multiplicación* y la actividad *Lanzar y recoger la pelota* cuyos porcentajes medios de acierto han sido 86 y 81% respectivamente.

Actividad	5	15	20	Total
Lanzar pelota	83%	80%	79%	81%
Multiplicación	87%	84%	88%	86%

Tabla 77. Resultados finales para las mejores dos actividades.

Estos resultados han sido calculados entre los 3 sujetos para los tres modos de experimentación diferentes, es decir que cada valor es la media de 9 experimentos, siendo los resultados mayores al 80%. Si realizamos el experimento juntando estas dos actividades para uno de los sujetos, tenemos que para el modo de 5 segundos por imagen los resultados obtenidos son:

Experimento final	
Global	87%
Lanzar pelota	86%
Multiplicación	89%

Tabla 79. Experimento final.

Es decir que los resultados confirman nuestras estimaciones, ya que mezclar actividades entre sí no afecta a los resultados de las propias actividades. Si han resultado ser buenas entonces serán buenas y sin ha resultado ser malas entonces serán malas.

Comparando los resultados para el modo de 5 segundos por imagen vemos que la media de los experimentos realizados nos indica un 83% para la actividad de *Lanzar y recoger la pelota* mientras que en la prueba mezclando actividades se obtiene un 86%, es decir muy similar. Al igual sucede con la actividad *Multiplicación* que de media ha obtenido un 87% y para esta última prueba un 89%.

Si aplicamos el filtrado a este experimento obtenemos que los resultados serían los representados en la tabla. Se observa un porcentaje de acierto altísimo. Aclarar que los resultados son completamente fiables y el experimento se ha realizado exactamente en las mismas condiciones que el resto.

Experimento final mejorado	
Global	95%
Lanzar pelota	97%
Multiplicación	93%

Tabla 80. Experimento final mejorado.



Las conclusiones que sacamos de toda esta última experimentación es que las actividades mantienen sus porcentajes de acierto sin importar con qué actividad vayan acompañada. Esto nos va a permitir hacer una criba de los experimentos que han resultado menos eficientes para así quedarnos únicamente con los que nos interese para una futura aplicación al exoesqueleto o simulación 3D del mismo.

Comparación resultados formularios

Antes de presentar las conclusiones finales de toda la experimentación se van a mostrar la media de los resultados recogidos en los formularios para los 3 sujetos. 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 promedio de respuesta elegida de cada una. La primera parte de información personal no es necesario mostrarla, simplemente se recopilan datos generales de cada individuo. En cuanto al segundo bloque de preguntas el conjunto de sujetos que ha realizado el experimento ha mostrado su opinión sobre dificultad de cada uno de los experimentos. Las respuestas más votadas a cada pregunta han sido, en niveles de porcentaje:

Bloque 2. Dificultad de los experimentos

- **Experimento 1: Imaginación de movimiento de la marcha**

¿Le ha parecido difícil realizar el experimento?

1. Muy fácil **0%** 2. Fácil **33%** 3. Normal **67%** 4. Difícil **0%** 5. Muy difícil **0%**

¿Le ha generado cansancio la realización del experimento?

1. Ninguno **0%** 2. Muy poco **33%** 3. Un poco **67%** 4. Bastante **0%** 5. Excesivo **0%**

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

1. Para nada **0%** 2. Un poco **0%** 3. Normal **33%** 4. Bastante **67%** 5. Completamente **0%**

¿En cuál de dos estados le ha resultado más difícil concentrarse?

Imaginar andar **50%** Imaginar parar **50%**



- **Experimento 2: Ejecución del movimiento de la marcha**

¿Le ha parecido difícil realizar el experimento?

1. Muy fácil **67%** 2. Fácil **33%** 3. Normal **0%** 4. Difícil **0%** 5. Muy difícil **0%**

¿Le ha generado cansancio la realización del experimento?

1. Ninguno **100%** 2. Muy poco **0%** 3. Un poco **0%** 4. Bastante **0%** 5. Excesivo **0%**

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

1. Para nada **0%** 2. Un poco **0%** 3. Normal **33%** 4. Bastante **67%** 5. Completamente **0%**

¿En cuál de dos estados le ha resultado más difícil concentrarse?

Ejecutar andar **33%** Ejecutar parar **67%**

- **Experimento 3: Concepto matemático y relajación**

¿Le ha parecido difícil realizar el experimento?

1. Muy fácil **33%** 2. Fácil **67%** 3. Normal **0%** 4. Difícil **0%** 5. Muy difícil **0%**

¿Le ha generado cansancio la realización del experimento?

1. Ninguno **33%** 2. Muy poco **33%** 3. Un poco **33%** 4. Bastante **0%** 5. Excesivo **0%**

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

1. Para nada **0%** 2. Un poco **0%** 3. Normal **0%** 4. Bastante **100%** 5. Completamente **0%**

¿En cuál de dos estados le ha resultado más difícil concentrarse?

Cálculo mental **0%** Relajación **100%**

- **Experimento 4: Concepto lingüístico y visual**

¿Le ha parecido difícil realizar el experimento?

1. Muy fácil **0%** 2. Fácil **33%** 3. Normal **67%** 4. Difícil **0%** 5. Muy difícil **0%**

¿Le ha generado cansancio la realización del experimento?

1. Ninguno **0%** 2. Muy poco **67%** 3. Un poco **33%** 4. Bastante **0%** 5. Excesivo **0%**



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

1. Para nada **0%** 2. Un poco **0%** 3. Normal **33%** 4. Bastante **67%** 5. Completamente **0%**

¿En cuál de dos estados le ha resultado más difícil concentrarse?

Tararea canción **67%** Visualización color **33%**

- **Experimento 5: Concepto físico-motriz**

¿Le ha parecido difícil realizar el experimento?

1. Muy fácil **33%** 2. Fácil **67%** 3. Normal **0%** 4. Difícil **0%** 5. Muy difícil **0%**

¿Le ha generado cansancio la realización del experimento?

1. Ninguno **0%** 2. Muy poco **33%** 3. Un poco **67%** 4. Bastante **0%** 5. Excesivo **0%**

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

1. Para nada **0%** 2. Un poco **0%** 3. Normal **0%** 4. Bastante **67%** 5. Completamente **33%**

¿En cuál de dos estados le ha resultado más difícil concentrarse?

Ejecutar lanzar y recoger pelota **0%** Pensar lanzar y recoger pelota **100%**

- **Experimento 6: Concepto Imaginación-lingüístico**

¿Le ha parecido difícil realizar el experimento?

1. Muy fácil **0%** 2. Fácil **33%** 3. Normal **67%** 4. Difícil **0%** 5. Muy difícil **0%**

¿Le ha generado cansancio la realización del experimento?

1. Ninguno **0%** 2. Muy poco **67%** 3. Un poco **33%** 4. Bastante **0%** 5. Excesivo **0%**

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

1. Para nada **0%** 2. Un poco **0%** 3. Normal **0%** 4. Bastante **67%** 5. Completamente **0%**

¿En cuál de dos estados le ha resultado más difícil concentrarse?

Pensar en mover la mano izquierda **67%** Pensar en una Palabra **33%**



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

Bloque 3. General

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

1. Demasiado corto **0%** 2. Corto **0%** 3. Adecuado **67%** 4. Largo **33%** 5. Demasiado largo **0%**

¿Ordene los seis experimentos de más complicado a más sencillo?

Experimento 1	Experimento 2	Experimento 3	Experimento 4	Experimento 5	Experimento 6
1	6	4	3	5	2

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

.....
.....

Tras presentar los resultados medios a las preguntas del formulario podemos ver que en líneas generales las respuestas dejan ver que la dificultad de los experimentos es baja, la gran mayoría contesta que le ha resultado *fácil* realizar los experimentos. Respecto al cansancio ocurre algo parecido, la mayoría ha contestado que genera muy poco cansancio el realizar los experimentos, siendo el segundo experimento *Ejecución de la marcha*, el que menos cansancio ha generado. En cuanto a la satisfacción general, la respuesta más contestada ha sido *Bastante*, lo que nos indica que los sujetos han terminado los experimentos con buenas sensaciones. Por último se les preguntaba sobre cuál de las dos actividades para cada experimento le ha resultado más complicada a la hora de concentrarse, las respuestas particulares pueden verse anteriormente presentadas.

En el tercer y último bloque se ha querido conocer la opinión respecto al tiempo de descanso para cada modo de experimentación, ya que para el primer modo ha sido de 5 minutos, para el segundo modo ha sido de 8-10 minutos y para el último modo donde las imágenes se repetían cada 5 segundos directamente no se les ha dejado descanso. En este apartado los usuarios han contestado que el tiempo ha sido *Adecuado*, por lo que nos aporta seguridad a la hora de seguir realizando la experimentación mediante la metodología aplicada.

Como última pregunta se les ha pedido que ordenaran los experimentos por orden de dificultad a la hora de ser realizados de mayor a menor, los resultados han sido los siguientes:

Experimento 1 > Experimento 6 > Experimento 4 > Experimento 3 > Experimento 5 > Experimento 2

Siendo el experimento *Imaginación de movimiento* el más complicado y el de *Ejecución de movimiento* el más sencillo.

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. Algunos de los comentarios en los que coincidían los sujetos eran:

- “Cambiar la tela de la malla ya que no sujeta bien los electrodos y al poco movimiento se caen, es necesario renovarla”.
- “Cambiar los electrodos a unos tipo secos ya que mejoraría la facilidad de realizar los experimentos y no sería necesario lavarse la cabeza al finalizar el proceso”.

3.2. Conclusiones y elección del método a emplear

A lo largo de toda esta segunda fase se obtenido la base de datos de todo el proyecto y se han llevado a cabo diversas formas de aplicación que pudieran mejorar los porcentajes de acierto de los resultados obtenidos. Se han expuesto una por una, se ha detallado todos los contenidos y procedimientos llevados a cabo. En esta parte final se ha reunido toda la información obtenida y se han presentado los resultados a emplear en lo que resta de investigación.

Para este trabajo de fin de master los directores me pidieron estudiar 4 experimentos, 2 de ellos debían ser los experimentos relacionados con la *imaginación de movimiento y ejecución de movimiento*. Los otros dos experimentos debían ser experimentos que tuvieran actividades que estuvieran completamente diferenciadas entre sí para los que se debía obtener un 80-90% de acierto.

Las actividades que hacen referencia a la *imaginación de movimiento* han obtenido los siguientes resultados:

Resultados	
Pensar en andar	42%
Pensar en parar	69%

Se puede observar que no son los mejores porcentajes de acierto. Estos resultados están formados por una media de 9 resultados en cada actividad para tiempos de realización distintos por lo que poseen una base de datos bastante amplia. Con estos valores se

Tabla 81. Resultados *imaginación*. demuestra que pensar en realizar el movimiento de andar resulta ser un pensamiento complicado de ejecutar para ser implementado en un exoesqueleto. La dificultad que supone tener que visualizar un movimiento de las piernas en el que se imagine que se están realizando la acción de andar ha obtenido un porcentaje de éxito bajo, en cambio para la actividad de pensar en parar si se obtienen resultados aceptables, entorno al 70%.

Las actividades que hacen referencia a la *ejecución de movimiento* han obtenido los siguientes resultados:

Al igual que el caso anterior y los siguientes, con una base de 9 experimentos para cada actividad y para distintos tiempos de realización se obtienen unos porcentajes del 73% de acierto para la actividad de *Andar* y un 76% de acierto para la actividad de *Parar*. Estos resultados son bastante buenos ya se trata de un resultado que se acerca al 80% y la media se ha obtenido para una base de datos amplia.

Resultados	
Andar	73%
Parar	76%

Tabla 82. Resultados *Ejecución*.

A continuación se presentan las 4 actividades que formarían los otros dos experimentos que se pedían al inicio del trabajo de fin de máster:

Resultados	
Multiplicar	90%
Lanzar y recoger pelota	86%

Tabla 83. Resultados mejor experimento.

Se trata del experimento final, el formado por las dos actividades que mejor resultado han obtenido. Con una base de datos muy amplia ofrece una garantía en los valores presentados.

La actividad *Multiplicar* ha sido la mejor de toda la experimentación, cuyo valor medio obtenido ha sido del 90% de acierto seguido de la actividad *Lanzar y recoger una pelota con la mano* que ofrece un 86% de acierto de media. Son porcentaje muy altos y que se encuentran dentro del rango de 80-90% de acierto que se pedía al inicio de este proyecto, por lo que este objetivo ha sido alcanzado y contrastado.

Resultados	
Pensar mover mano izq	82%
Pensar en lanzar pelota	70%

Tabla 84. Resultados 2º mejor experimento.

Para completar la presentación de los 4 experimentos se ofrecen un último formado por las 2 siguientes mejores actividades, sin contar las actividades *Andar* y *Parar* que ya forman el segundo experimento. En este caso resultan ser

la actividad de *Pensar en mover la mano izquierda*, que ha obtenido un 82% de acierto, seguida de la actividad de *Pensar en lanzar y recoger una pelota con la mano*, que ha obtenido un 70%. En el caso de la primera se obtiene de nuevo muy buen resultado, superando la barrera del 80% y cabe comentar que esta actividad fue estudiada por el departamento junto a la actividad de *Pensar en palabras* en investigaciones pasadas en las que se realizaron experimentos para 3 estados sobre 15 sujetos.

Si realizamos una comparación entre los resultados obtenidos en esta experimentación para dichas actividades y los obtenidos en las investigaciones antiguas, manteniendo las mismas condiciones tenemos la tabla comparativa siguiente:

Resultados	Presente	Antiguo
Pensar mover mano izq	79,46%	50,10%
Pensar en palabras	74,32%	59,95%

Tabla 85. Comparación resultados experimento 6.

Los resultados del trabajo presente son los obtenidos únicamente en los ensayos de 15 segundos por imagen para así mantener la igualdad de condiciones. Comparando ambos resultados se observa una amplia mejoría en el porcentaje de acierto, situándose la media del trabajo antiguo en el 55% de acierto y en el trabajo actual en el 75% lo que refleja un incremento importante. Hay varios motivos de esta mejoría, el primero es que en el trabajo actual el experimento era más sencillo, solo de dos actividades, *Pensar en mover la mano izquierda* y *Pensar en palabra que comenzaran por una determinada letra*, mientras que el experimento antiguo tenía en cuenta además de estas dos una tercera actividad, *Pensar en mover la mano derecha*, por lo que la dificultad del experimento era mayor. El segundo cambio reside en el código de procesado ya que éste ha sido cambiado, además dicho código ha sido también mejorado en este proyecto.

Han sido presentados así todos los resultados finales de la fase de experimentación en la que se han cumplido todos los objetivos. Estos resultados serán empleados en las fases siguientes, en las que se tratará de mover un exoesqueleto o simulación 3D del mismo a partir de señales EEG.



4. Configuración e implementación

Una vez finalizada la segunda fase podemos dar por concluida la experimentación con *Emoc* de cara a generar nuestra base de datos ya que llegados a este punto disponemos de ella. Hemos conocido qué experimento es el más adecuado a la hora de ser implementado en el exoesqueleto y también conocemos los porcentajes de acierto para los experimentos de *imaginación* y *ejecución del movimiento*. Lo que pretendemos ahora es configurar el módulo de generación de referencias e implementarlo en el exoesqueleto.

1. Configuración del módulo de generación de referencias.
2. Modificación de la simulación gráfica 3D.
3. Implementación del módulo de generación de referencias al exoesqueleto.

El módulo de generación de referencias es el que establece qué movimientos debe realizar el exoesqueleto y en qué forma debe ejecutarlos. Este módulo ya fue modificado en investigaciones anteriores, en primer lugar Antonio Hernández Díaz en su proyecto final de carrera "*Configuración de un banco de pruebas para la evaluación del funcionamiento de un exoesqueleto de miembros inferiores*" [2] donde desarrolló un código Matlab mediante el cual dicha programación conseguía accionar un exoesqueleto. Años más tarde en el trabajo de fin de grado realizado por Diego José Ramos González "*Identificación de patrones de marcha mediante un análisis de movimiento para su aplicación a exoesqueleto*" [3] se modificaron distintos scripts del código Matlab para asignar a los 6 motores de exoesqueleto, 3 por pierna, cómo deben situarse mediante variables de ángulo de giro para la ejecución del movimiento de andar y parar.

Dada la situación originada por la pandemia del Corona Virus se acordó con los directores de esta investigación que se diseñara o modificara una simulación gráfica 3D de un exoesqueleto para que las 2 tareas mencionadas, configurar e implementar, se apliquen a dicha simulación en lugar del exoesqueleto físico debido a la imposibilidad de entrar al laboratorio del departamento durante los meses en los que se está realizando el trabajo de fin de máster.

Los directores me comentaron que existía una simulación ya diseñada en proyectos anteriores. Dicha simulación está programada en código Matlab por lo que puede ser perfectamente implementada y modificada en este proyecto. Finalmente se ha tomado este código Matlab y se ha configurado para ser empleado.

A continuación se detallan los pasos de la configuración, mejora e implementación del código. Por lo que se modificará dicho código de generación de referencias para que pueda ser implementado correctamente en dicha simulación 3D, es decir realizaremos una mejora en la configuración para así asegurarnos de que todos los ángulos son los correctos y la forma en la que se ejecutan es la más idónea, tanto en posición como en tiempo variando así la velocidad de movimiento de la simulación del exoesqueleto.

4.1. Configuración del módulo de generación de referencias

En primer lugar Diego José Ramos González me facilitó un paquete de scripts que contienen el código Matlab que ejecuta todos los comandos que hacen posible la asignación de los variables angulares a los motores del exoesqueleto. El primer objetivo trata de modificar este módulo de generación de referencias, lo que se busca es eliminar los errores en la asignación de las variables angulares.

El código de generación de referencias funciona de la siguiente manera:

En el trabajo de fin de grado "*Identificación de patrones de marcha mediante un análisis de movimiento para su aplicación a exoesqueleto*" [3] se realizó una experimentación con 2 sujetos en los que a través de un exoesqueleto se midieron las posiciones que cada uno de los motores que formaban las 6 articulaciones: Cadera, rodilla y tobillo para cada pierna. Estos motores median voltajes provocados por los giros de cada articulación para 3 escenarios posibles:

- 1: *Sentarse y levantarse*
- 2: *Andar y*
- 3: *Paso inicio y paso fin.*

Para poder llevar a cabo las pruebas a cada sujeto era necesario seguir una serie de pasos. En primer lugar se debía configurar la tarjeta de registro entre exoesqueleto y ordenador en Matlab. Una vez configurada se deben calibrar los potenciómetros para saber qué valor de voltaje van a tener cada uno de ellos en cada momento del movimiento. Se graban los sonidos que serán reproducidos durante las pruebas y éstas mismas se llevan a cabo a través del script denominado "*Muestreo*" formado por 3 partes, el muestreo de las pruebas que da los valores en voltaje que recogía cada potenciómetro, un filtrado para eliminar el ruido de dichos valores y una transformación en la que se pasan todos los valores de voltios a ángulos.

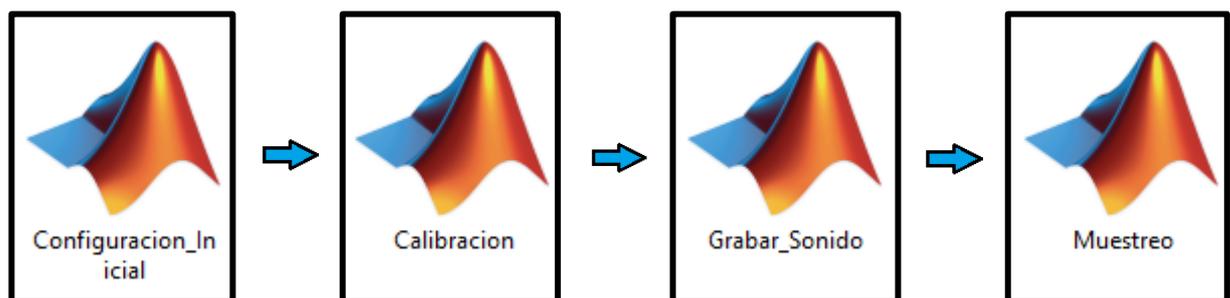


Figura 94. Proceso de código para la configuración de referencias 1.

Una vez han sido obtenidos los archivos que recogen los valores en ángulos de las pruebas realizadas por los sujetos se realiza una eliminación de un posible *offset* y se separan los valores angulares en secuencias.

Llegados a este punto y ya con todos los resultados debidamente obtenidos se han las medias para cada sujeto y se comparan los resultados entre ambos sujetos calculando ahora sí las medias totales de cada experimento. Los archivos que se obtienen serán los usados en este trabajo de fin de máster. Como último paso si se quiere se pueden mezclar los 3 escenarios posibles comentados anteriormente a través del script *Reconstrucción*.

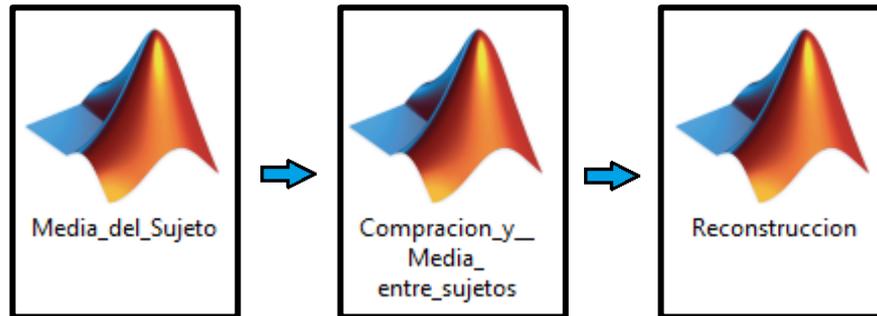


Figura 95. Proceso de código para la configuración de referencias 2.

Este código de generación de referencias lo que hace es transmitir 6 variables angulares a través de un *archivo.mat*, en dicho archivo se almacenan todas las posiciones en las que un exoesqueleto debería accionar los motores situados en las 6 articulaciones que forman parte de él. Estas posiciones van variando estado a estado según se recorre el fichero que posee los valores angulares.

Lo que necesitamos hacer en esta primera parte de la tercera fase es configurar este módulo de generación de referencias para que los valores angulares sean transmitidos sin fallo alguno a cada articulación del exoesqueleto, provocando una realización del movimiento andar lo más perfecta posible. Para ello hacemos uso del archivo generado al finalizar la *media entre sujetos* o el archivo *reconstrucción*.

1. Creación del archivo con los valores angulares.

Necesitamos tomar los valores que forman la siguiente secuencia:

Paso inicio – Andar – Paso fin

Para ello acudimos al script *Reconstrucción*. En el código de dicho script encontramos una parte de formación del paso. En ella debemos escribir unas líneas de código para que nos forme un paso que contenga los datos de *Paso inicio*, *Andar* y *Paso fin*, siendo además éste el orden en el que se escriban los comandos en el código. A continuación se muestran las líneas de código correctas para formar dicho archivo:

```
%Ejemplo: Paso inicial + Paso completo + Paso final

der_cad=[paso_inicio_d_c;media_der_cad_tot;paso_fin_d_c];
der_rod=[paso_inicio_d_r;media_der_rod_tot;paso_fin_d_r];
der_tob=[paso_inicio_d_t;media_der_tob_tot;paso_fin_d_t];

izq_cad=[paso_inicio_i_c;media_izq_cad_tot;paso_fin_i_c];
izq_rod=[paso_inicio_i_r;media_izq_rod_tot;paso_fin_i_r];
izq_tob=[paso_inicio_i_t;media_izq_tob_tot;paso_fin_i_t];
```

Figura 96. Código para creación del archivo en Script *Reconstrucción*.

Como podemos ver se trata de seis líneas de código que hacen referencia a cada uno de los motores que moverán el exoesqueleto, tanto la simulación 3D como en la realidad. Dichos motores son encargados de mover la cadera, rodilla y tobillo de ambas piernas. Para crear el archivo es necesario incluir los comandos que nos aportan los valores angulares de cada una de las posiciones al iniciar un paso, al realizar un paso completo y al terminar dicho paso.

Una vez compilemos el Script se creará un archivo denominado *Reconstrucción_sujeto_1_y_2* que contiene cada uno de los valores angulares del movimiento *Andar* y *Parar*. Este archivo no es perfecto, ya que debe ser configurado para su correcta ejecución debido a que los valores angulares en los cambios de posición son distintos, por lo que al pasar de *Inicio del Paso* a *Andar* la simulación pega un salto ya que dichos valores angulares asignados no poseen los correctos números para realizar un paso fluido. A continuación se muestra dicho problema:

	1	2	3	4	5	6
67	15.9404	0.3336	10.7725	-9.3857	6.6705	-6.4797
68	15.9613	0.2998	11.0207	-9.5113	6.9958	-5.9200
69	15.9680	0.3801	11.1672	-9.6180	7.2989	-5.3882
70	15.9807	0.5419	11.2738	-9.7373	7.7263	-4.7207
71	15.9955	0.6517	11.3629	-9.8413	8.1312	-4.1004
72	16.0039	0.9304	11.3729	-9.8923	8.5467	-3.4672
73	15.0047	0.7195	10.2999	-4.3642	7.0901	-7.1868
74	14.9814	0.4386	10.3263	-4.4982	7.2322	-7.1145
75	14.9327	0.2833	10.3641	-4.6404	7.4842	-6.9742
76	14.8812	0.1814	10.3531	-4.7671	7.7272	-6.8250
77	14.8332	0.1129	10.3569	-4.8818	8.0239	-6.6602
78	14.7844	0.1201	10.3496	-5.0117	8.3211	-6.4680
79	14.7001	0.1920	10.2920	-5.1325	8.7387	-6.1698

Figura 97. Valores angulares 1-2 para en el archivo *Reconstrucción_sujeto_1_y_2*.

En la figura anterior se muestra como para la posición 73 los valores angulares de las 6 articulaciones cambian notablemente respecto a la posición 72, ya que el *Inicio del paso* está formado por 72 posiciones, siendo la cifra 73 el momento en el que la siguiente acción tiene lugar, en este caso *Andar*. Lo mismo sucede cuando dicha acción *Andar* concluye y comienza la última acción que ha sido guardada en el archivo que recientemente acabamos de crear con todos los valores angulares de los movimientos *Inicio del paso – Andar – Fin del paso*. El cambio de *Andar* a *Fin del paso* se produce en la posición 243.

	1	2	3	4	5	6
235	15.0644	7.6038	8.2591	-2.4034	7.2655	-6.1627
236	15.1451	6.4616	8.4998	-2.5825	7.3906	-6.2724
237	15.2046	5.4986	8.6966	-2.7660	7.5180	-6.3221
238	15.2704	4.6112	8.8849	-2.9919	7.6620	-6.3469
239	15.3193	3.8323	9.0230	-3.1709	7.8059	-6.3488
240	15.3702	3.2279	9.1590	-3.3288	7.9605	-6.3218
241	15.3914	2.7033	9.2659	-3.5014	8.1544	-6.2864
242	15.4063	2.0651	9.4142	-3.7865	8.4811	-6.0815
243	15.9804	1.2239	11.2808	-9.9201	9.0329	-2.7395
244	15.9808	1.5473	11.1676	-9.9455	9.5795	-2.0281
245	15.9932	1.8279	11.0271	-9.9199	10.2133	-1.3043
246	15.9527	2.1042	10.8302	-9.8877	10.8890	-0.5969
247	15.9145	2.3309	10.6207	-9.7979	11.5407	0.1209
248	15.8739	2.5445	10.3677	-9.6847	12.2917	0.9168
249	15.7953	2.7326	10.1165	-9.5162	13.1200	1.6615

Figura 98. Valores angulares 2-3 para en el archivo *Reconstrucción_sujeto_1_y_2*.

Se puede observar cómo al pasar de la posición 242 a la 243 se produce un cambio en los ángulos de las articulaciones.

2. Modificación y suavizado del archivo.

Para evitar estos cambios tan drásticos y así suavizar el movimiento se ha creado un script de Matlab denominado *Suavizado*. Este script filtra y suaviza los valores angulares de los cambios de acción para provocar así que el movimiento sea completamente fluido. Además mejora el movimiento filtrando los valores angulares completamente necesarios para que se lleve a cabo la acción de *Andar* y *Parar* de la forma más eficiente posible. Al ejecutarlo se crea un archivo denominado *Reconstrucción_final* que posee todos los valores angulares para llevar a cabo el movimiento completo, desde el inicio hasta el final, siendo así 316 las posiciones totales de un movimiento completo.

4.2. Modificación de la simulación gráfica 3D

En este apartado tomaremos la simulación creada por Diego José Ramos González en un proyecto anterior [3], en la que se muestra un diseño de una persona diferenciando dos partes en dicho diseño. Una primera parte formada por la cabeza, los brazos y el tronco superior, siendo este último diseñado a partir del script *BoxPlot3*, y una segunda parte formada por las articulaciones del tronco inferior, es decir cadera, rodillas y tobillos formando así las piernas del exoesqueleto.

La correcta y completa funcionalidad de esta simulación se encuentra recogida en el script *grafica_angulos_y_cuerpo*. En dicho script se detalla la colocación de cada parte del exoesqueleto y la relación entre los ángulos procedentes del archivo *Reconstrucción_final*, visto en el punto anterior, y las articulaciones inferiores del diseño 3D.

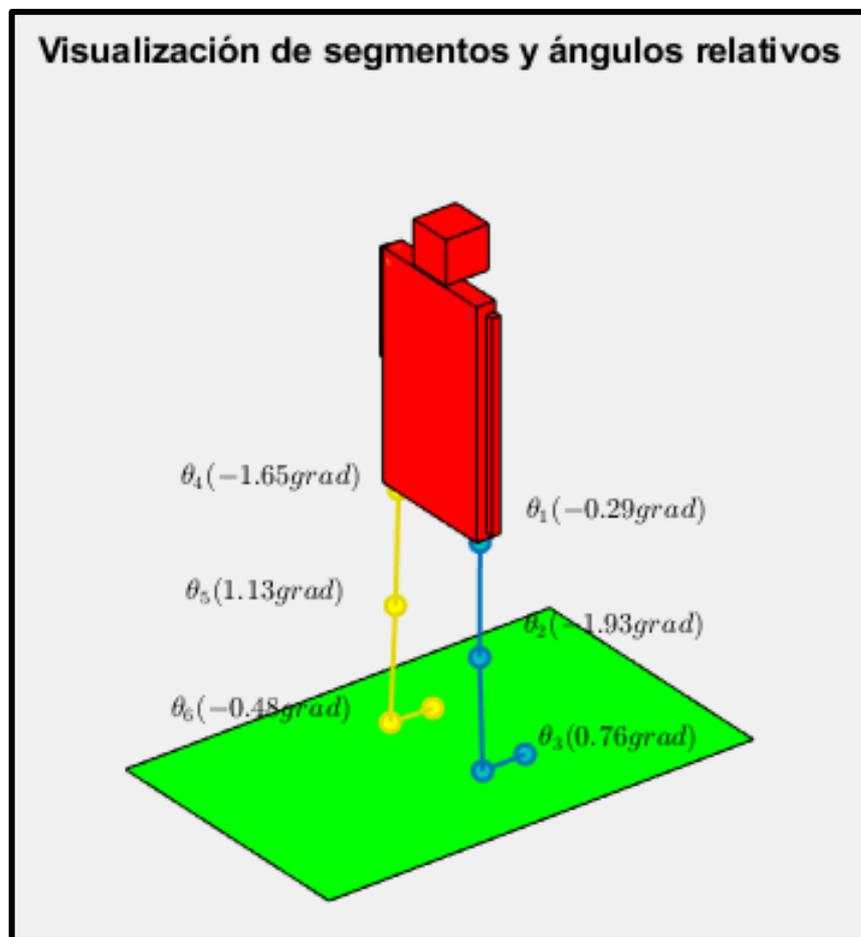


Figura 99. Apariencia original simulación gráfica 3D.

En la simulación se pueden observar los valores angulares de cada posición para cada articulación, además de un rectángulo de color verde que hace de suelo. Según se vayan sucediendo las posiciones angulares cada una de las articulaciones irá cambiando de lugar.

Ésta es la simulación original creada en el proyecto anterior a éste llevado a cabo por el departamento.

Este código se ha modificado en ciertas partes para hacer más eficiente la simulación. Una de las mejoras reside en la creación de dos estados distintos para la simulación, uno que nos comunica cuando el sujeto está pensando en *Andar* y otra que nos comunica cuando decide *Parar*.

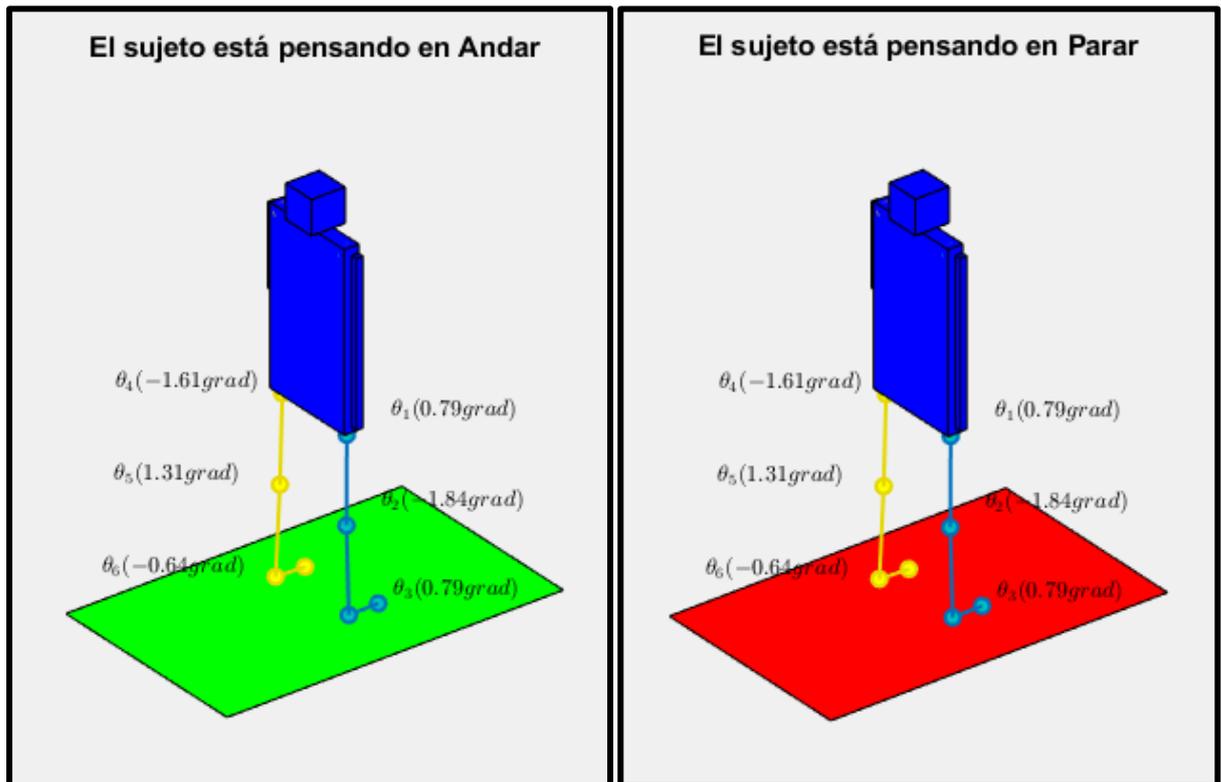


Figura 100. Apariencia actual simulación gráfica 3D.

Se ha cambiado la apariencia de sujeto pasando de ser color rojo a color azul, un color más neutro que nos facilitará la visualización del suelo, que será el gran indicativo de qué movimiento se está realizando. Además de la apariencia se ha cambiado el texto superior que nos comunicará de una forma más eficaz cuando el sujeto se mueve o cuando se para, sabiendo así en todo momento el movimiento real de la simulación.

Además también se puede visualizar la posición exacta en la que se encuentra el movimiento, aportando así una información precisa en cada momento, algo que puede ser útil para el sujeto. Para mostrar la posición actual para cada intervalo de tiempo es necesario escribirlo en la primera línea del código Matlab. El cambio implementado se mostrará de la siguiente forma:

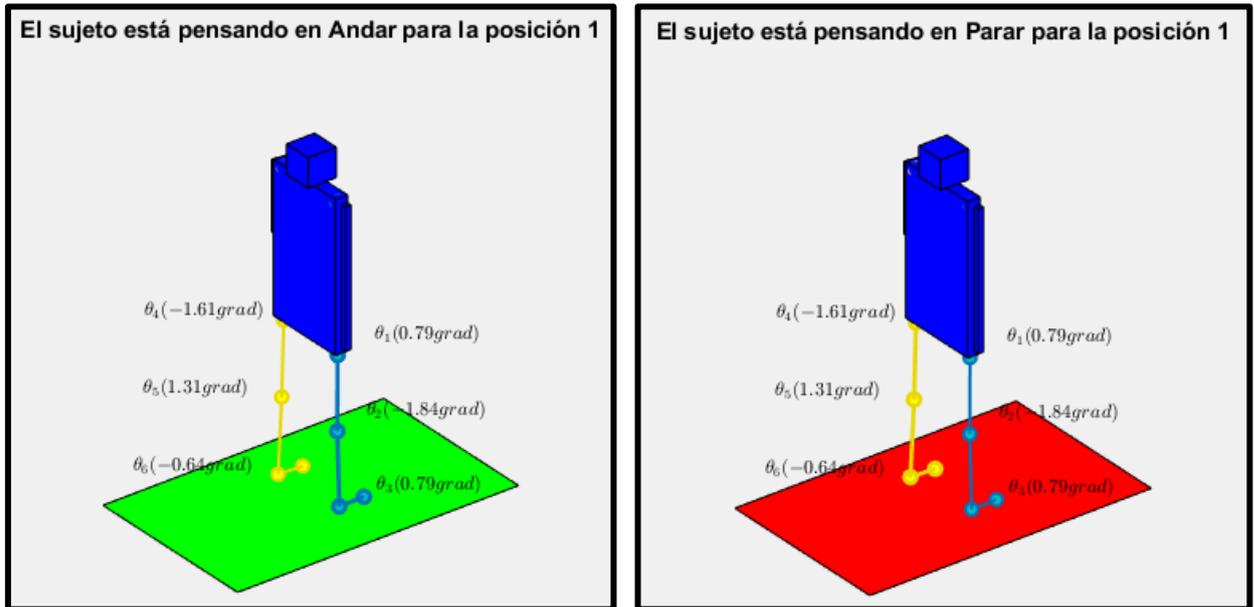


Figura 101. Apariencia precisa actual simulación gráfica 3D.

El texto nos sirve de indicar para conocer la posición específica en cada instante de tiempo. Ésta será la simulación gráfica 3D empleada en este proyecto.

Además de estos cambios visuales es necesario comentar que el código Matlab se ha modificado internamente, favoreciendo una mejor usabilidad del mismo. Dicho código junto al archivo de datos que contiene los valores angulares de cada posición será el material utilizado para llevar a cabo esta última fase.

4.3. Implementación del módulo de generación de referencias al exoesqueleto

Llegados a este punto es necesario implementar la configuración del módulo de generación de referencias al exoesqueleto. Esta implementación implica que el módulo de generación de referencias funcione correctamente en la simulación. Para ello disponemos de un código Matlab denominado *Simulación_3D* facilitado por Diego, autor del trabajo "Identificación de patrones de marcha mediante un análisis de movimiento para su aplicación a un exoesqueleto" [3].

Este código no ha sido el utilizado en este proyecto pero ha servido de base para la creación de un nuevo código. Dicho nuevo código será mostrado a continuación:



```
load copial %Se cargan los resultados de experimentación de un sujeto
final(1,:) = real(1,:) + prediccion(1,:);

%Simular Señal Reconstruida:
load Reconstrucción_final
frame = length(Ang);

%Pasar de grados a radianes.
AngRad(1:frame, 1:6) = [Ang(1:frame, 1:6)] * pi / 180;

fl = figure('Name', 'Simulación');
Angulo(1:frame, 1) = AngRad(1:frame, 3);
Angulo(1:frame, 2) = AngRad(1:frame, 2);
Angulo(1:frame, 3) = AngRad(1:frame, 1);
Angulo(1:frame, 4) = AngRad(1:frame, 6);
Angulo(1:frame, 5) = AngRad(1:frame, 5);
Angulo(1:frame, 6) = AngRad(1:frame, 4);

%Graba los fotogramas
k = 158;
s = 1;
for k = 159:336
    final(1, k) = final(1, s);
    prediccion(1, k) = prediccion(1, s);
    s = s + 1;
end
j = 3;
i = 1;
for i = 1:336
    if final(1, i) == 2 || final(1, i) == 4 %El sujeto acierta
        if final(1, i) == 2 %El sujeto piensa en andar
            grafica_angulos_y_cuerpo_andar(Angulo(j, 1:6), j, frame);
            j = j + 1;
        end
        if final(1, i) == 4 %El sujeto piensa en parar
            grafica_angulos_y_cuerpo_parar(Angulo(j-1, 1:6), j, frame);
        end
    else %El sujeto falla
        if prediccion(1, i) == 1 %Se debe parar
            grafica_angulos_y_cuerpo_parar_error(Angulo(j-1, 1:6), j, frame);
            j = j + 1;
        end
        if prediccion(1, i) == 2 %Se debe mover
            grafica_angulos_y_cuerpo_andar_error(Angulo(j, 1:6), j, frame);
        end
    end
    Mo(i) = getframe;
end
```

Figura 102. Código Matlab *Simulación_3D*.

Este nuevo código lo que hace es tomar los valores de la fase de experimentación con sujetos, estos valores están recogidos en el archivo *copia1*. Una vez cargados compara las variables *Predicción* con la variable *Real*, es decir lo que debería suceder con lo que de verdad sucede. Ésto fue explicado durante el filtrado de los resultados en la fase de experimentación 2, figuras 88 y 89.

El código recogido en la figura anterior, figura 102, lo que pretende es mostrar la correcta implementación de la configuración del módulo de referencias. Al compilar el código se puede ver como una a una las posiciones angulares se van sucediendo a la par que la simulación gráfica 3D realiza una correcta ejecución, por lo que se puede dar por conseguida dicha implementación.

Aunque no es objetivo del proyecto, llegados a este punto con este nuevo código ya escrito se pretende adaptarlo para que cualquier experimento realizado durante la fase de experimentación sea posible emplearlo para mover el exoesqueleto y ver de una forma gráfica y visual el acierto de cada ensayo, no solo con números de porcentajes.

Para ello los experimentos ya preprocesados y procesados nos ofrecen un archivo que almacena los valores de cada estado. Estos valores están recogidos en las variables *Real* y *Predicción*, como ya se ha explicado. A partir del código modificado anterior *Simulación_3D* se han escrito otros 7 códigos que reflejan 7 situaciones distintas de procesado.

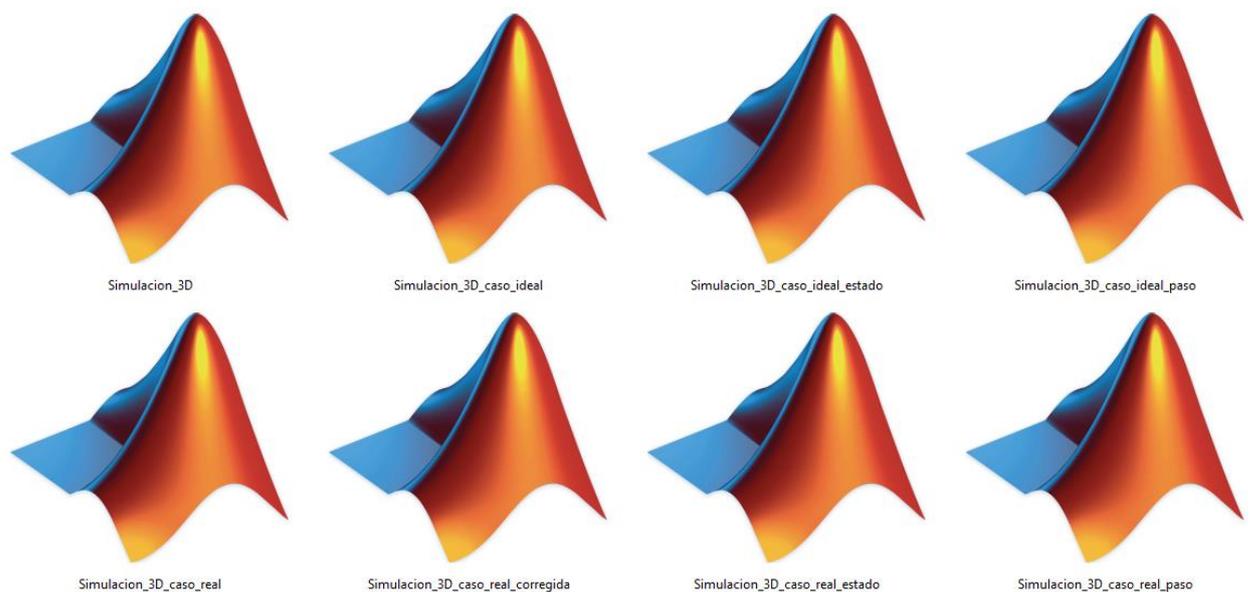


Figura 103. Distintos códigos Matlab *Simulación_3D*.

Se tratan de códigos a través de los cuales se puede mover la simulación gráfica 3D mostrada en la figura 100 a partir de los ensayos con 2 estados realizados en la fase de experimentación. Es decir que podríamos mover la simulación 3D a partir de cualquier pensamiento. Aquí hay que aclarar que también dependerá del porcentaje de acierto en cada experimento, ya que de eso tratan estos códigos. El funcionamiento de los 8 códigos es el mismo, ya ha sido explicado en este apartado. Lo que hace que sean diferentes unos de otros es el error.

En primero lugar tenemos 3 códigos denominados *ideal* y 4 denominados *real*. La diferencia entre ellos es que las simulaciones *ideales* mueven el exoesqueleto a partir de los resultados de la experimentación pero solo mostrando lo que debería suceder en el mejor de los casos, es decir que se acertará en el 100% de las veces que se piensa. Los códigos *reales* muestran además los fallos, es decir que la simulación muestra cuando acierta y cuando falla un sujeto.

Dentro de los códigos *ideales* existen 3 tipos:

- Caso ideal
- Caso ideal estado
- Caso ideal paso

El *Caso_ideal* hace que cada posición angular se corresponda con una iteración del código, así hasta completar un paso completo. Por su parte el *Caso_ideal_estado* lo que hace es que por cada uno de los 2 estados que hay en el experimento y que se va alternando durante el código mueve el exoesqueleto un paso completo, es decir que al haber 16 estados en cada uno de los ensayos la simulación dará 16 pasos completos. Por último el *Caso_ideal_paso* lo que hace es dar un paso completo por cada iteración del código, que al ser *Copia1* el archivo que contiene los datos de cada ensayo dependerá de su tamaño.

Por otro lado tenemos los códigos *reales*, con los tres mismos tipos que el caso anterior:

- Caso real
- Caso real estado
- Caso real paso

Cada uno de estos códigos tienen la misma función que su homónimo del caso anterior, con la única diferencia que en este caso se muestran también las situaciones en las que el usuario falla. Para ellos además de las dos opciones mostradas en la figura 100 se añaden otras dos que serán mostradas en los momentos de fallo.

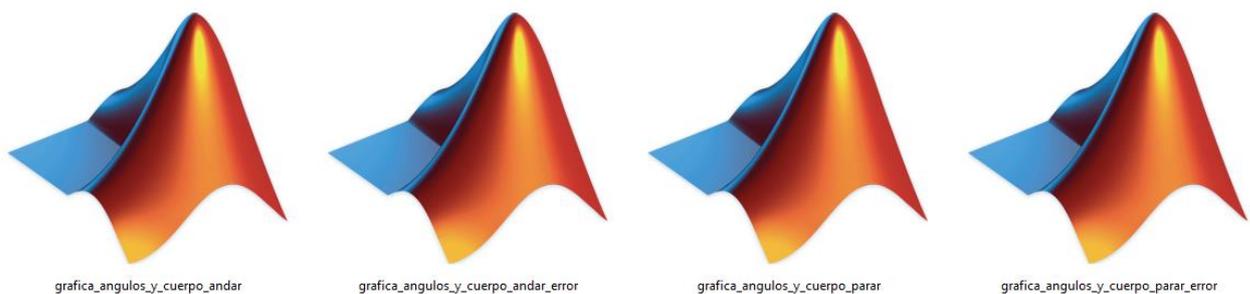


Figura 104. Distintos códigos Matlab *gráfica_ángulos_y_cuerpo*.

Finalmente se ha realizado un último código que permite simular los ensayos en los que se mejoren los resultados filtrando los errores. Este código se denomina *Caso_real_corregido*.

Estos códigos no han sido escritos con la intención de cumplir ningún objetivo en concreto de este trabajo de fin de master, simplemente, además de mostrar de una forma visual el éxito de los ensayos, se está tratando de describir todo el proceso desde el comienzo hasta el código final que será presentado a continuación en la siguiente y última fase. Se completa así esta cuarta fase en la que se ha configurado el módulo de generación de referencias e implementado correctamente en la simulación gráfica 3D del exoesqueleto.

5. Aplicación al exoesqueleto y testeo

En la fase final se pretende aplicar todo lo recogido en las fases anteriores para conseguir controlar la simulación 3D con el dispositivo BCI *Emoc* a tiempo real, siendo éste el objetivo principal del trabajo de fin de máster. Para conseguir este control se deben llevar a cabo los siguientes tres puntos que nos facilitarán la consecución de dicho objetivo. Estos puntos son:

1. Estudio de formas de aplicación.
2. Implementación del código final.

A continuación se detallan paso a paso cada uno de los puntos mencionados.

5.1. Estudio de formas de aplicación

Al inicio del proyecto se realizó un estudio sobre qué actividad ofrece mejores resultados a la hora de realizar los experimentos. Todos los resultados referentes a este estudio se recogen en las fases 2 y 3 del presente trabajo. En ellas se ha podido estudiar hasta 6 experimentos de 2 estados cada uno, lo que vienen a ser 12 actividades distintas. Tras realizar dicha experimentación, a la que siguió una mejora de los resultados, finalmente se obtuvieron los valores de éxito finales de cada actividad. Estos valores quedaron recogidos en la tabla 74, que recuperamos y mostramos a continuación:

Actividades	15 segundos		20 segundos		5 segundos	
	Sin filtrado	Con filtrado	Sin filtrado	Con filtrado	Sin filtrado	Con filtrado
Multiplicar	87%	90%	84%	87%	88%	94%
Lanzar y recoger pelota	83%	87%	81%	85%	79%	84%
Pensar en parar	83%	83%	81%	84%	75%	81%
Mover mano izquierda	77%	79%	80%	83%	74%	78%
Pensar en palabras	72%	74%	79%	80%	64%	67%
Andar	72%	73%	74%	74%	63%	66%
Pensar en lanzar pelota	70%	71%	73%	73%	62%	65%
Pensar en colores	70%	70%	66%	68%	58%	60%
Tararear una canción	67%	68%	66%	66%	56%	57%
Parar	65%	66%	66%	65%	54%	56%
Relajación	48%	47%	61%	60%	53%	56%
Pensar en andar	28%	30%	28%	50%	43%	45%

Tabla 74. Resultados finales según actividad.

En ella se puede observar cómo los mejores resultados se obtienen para las actividades de *Multiplicar* y *Lanzar y recoger una pelota*. Por lo que éstas son las dos actividades elegidas a la hora de ser aplicadas de forma práctica en un primer intento de mover el exoesqueleto a tiempo real.

Para llevar a cabo este procedimiento es necesario crear un nuevo código Matlab que será el código final de este trabajo. Este código ha sido denominado *Simulación_3D_Live*, haciendo referencia al control en directo que debe ejecutar. En dicho código es necesario que se reciban los datos a través de los 16 sensores que forman el BCI *Emoc* y estos valores sean transmitidos de forma correcta y eficaz a la simulación 3D para producir su perfecta ejecución. La escritura de dicho código ha necesitado de varias fases para ser completado, a continuación se detalla el proceso de creación del código final:

1. Escritura de la arquitectura base del código final.

Comenzamos escribiendo un código que cargue la librerías necesarias para la lectura y registro de los valores recogidos por cada uno de los sensores. Estas líneas de código son muy sencillas y no variarán durante todo el proceso ya que necesitamos del registro de los valores que generamos al realizar la acción de pensar.

```
%-----Información de registro-----%
structs.InputSensorDescriptor_struct.members=struct('channelId', 'EE_InputChannels_enum', 'fExists', 'int3
enuminfo.EE_DataChannels_enum=struct('ED_COUNTER',0,'ED_INTERPOLATED',1,'ED_RAW_CQ',2,'ED_AF3',3,'ED_F7',4
enuminfo.EE_CognitivTrainingControl_enum=struct('COG_NONE',0,'COG_START',1,'COG_ACCEPT',2,'COG_REJECT',3,'
enuminfo.EE_ExpressivAlgo_enum=struct('EXP_NEUTRAL',1,'EXP_BLINK',2,'EXP_WINK_LEFT',4,'EXP_WINK_RIGHT',8,'
enuminfo.EE_ExpressivTrainingControl_enum=struct('EXP_NONE',0,'EXP_START',1,'EXP_ACCEPT',2,'EXP_REJECT',3,
enuminfo.EE_ExpressivThreshold_enum=struct('EXP_SENSITIVITY',0);
enuminfo.EE_CognitivEvent_enum=struct('EE_CognitivNoEvent',0,'EE_CognitivTrainingStarted',1,'EE_CognitivTr
enuminfo.EE_EmotivSuite_enum=struct('EE_EXPRESSIV',0,'EE_AFFECTIV',1,'EE_COGNITIV',2);
enuminfo.EE_ExpressivEvent_enum=struct('EE_ExpressivNoEvent',0,'EE_ExpressivTrainingStarted',1,'EE_Express
enuminfo.EE_CognitivAction_enum=struct('COG_NEUTRAL',1,'COG_PUSH',2,'COG_PULL',4,'COG_LIFT',8,'COG_DROP',1
enuminfo.EE_InputChannels_enum=struct('EE_CHAN_CMS',0,'EE_CHAN_DRL',1,'EE_CHAN_FP1',2,'EE_CHAN_AF3',3,'EE_
enuminfo.EE_ExpressivSignature_enum=struct('EXP_SIG_UNIVERSAL',0,'EXP_SIG_TRAINED',1);
enuminfo.EE_Event_enum=struct('EE_UnknownEvent',0,'EE_EmulatorError',1,'EE_ReservedEvent',2,'EE_UserAdded'
enuminfo.EE_AffectivAlgo_enum=struct('AFF_EXCITEMENT',1,'AFF_MEDITATION',2,'AFF_FRUSTRATION',4,'AFF_ENGAGE

DataChannels = enuminfo.EE_DataChannels_enum;
DataChannelsNames = {'ED_COUNTER','ED_INTERPOLATED','ED_RAW_CQ','ED_AF3','ED_F7','ED_F3','ED_FC5','ED_T7',
```

Figura 105. Líneas de código para el registro, script *Simulacion_3D_Live*.

Necesitamos además de la creación de variables para los valores de salida que nos muestren los dicho valores una vez son registrados.

```
%Inicialización de valores de salida
output_matrix = zeros(acqtime*sampFreq,length(DataChannelsNames));
nS = zeros(acqtime*sampFreq,1);
```

Figura 106. Iniciación de valores de salida, script *Simulacion_3D_Live*.

En la variable *output_matrix* se almacenarán todos los valores registrados por los sensores. Además será necesaria la creación de estados que vayan cambiando con el tiempo para que se registren los valores recogidos a través de *Emoc* en distintos instantes de tiempo. Ésto lo hacemos creando dos estados distintos que se van alternando cada cierto tiempo y que nos permiten obtener valores de registro distintos.

```
%-----Creación de los estados-----%
status_aleatory=randi([1,2]);
if status_aleatory==1 && status_last==0 || status_aleatory==1 && status_last==3
    status_set_matrix=7;
end
if status_aleatory==2 && status_last==0 || status_aleatory==2 && status_last==7
    status_set_matrix=3;
end
status=status_set_matrix;

if (status == 7)
    status_last = 7;
elseif (status == 3)
    status_last = 3;
end
```

Figura 107. Creación de los estados, script *Simulacion_3D_Live*.

Justamente ésto será lo que nos permita ejecutar el código Matlab y obtener un control a tiempo real, ya que los sensores recogerán los valores eléctricos generados al pensar en un instante e inmediatamente los mostrarán por pantalla mediante la llamada de la variables *output_matrix* que ha sido mencionada anteriormente.

Prácticamente con éstos tres conceptos se puede crear un código que registre valores a tiempo real y los muestre por pantalla. Evidentemente conceptos van acompañados de una serie de funciones y líneas de código que hacen posible su correcta implementación. El código completo será mostrado más adelante, en este primer punto lo que se pretende es entender el funcionamiento básico del mismo de una forma muy superficial.

2. Testeo de la capacidad del BCI para registrar señales a tiempo real.

Llegados a este punto debemos realizar un testeo del dispositivo Emoc para conocer más detalles de su funcionamiento a tiempo real, ya que siempre ha sido utilizado para un registro de datos que son preprocesados, procesados e incluso postprocesados. Lo que se pretende ahora es emplear el casco para una ejecución en vivo. Tras hacer la pertinentes correcciones en el código se inicia una primera prueba que muestre los valores de registro en cada instante por pantalla durante 16 estados. Se ordenan los sensores y se filtran los valores no deseados provocando así unos resultados mostrados por pantalla como los siguientes:

Estados	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	4545	4101	4531	4301	4255	4688	4512	4582	3686	4202	3976	4714	4330	4188
2	4544	4096	4529	4300	4262	4693	4508	4580	3686	4192	3978	4718	4373	4185
3	4546	4092	4529	4300	4262	4672	4511	4588	3694	4198	3986	4725	4378	4193
4	4539	4092	4527	4293	4264	4686	4499	4576	3684	4189	3982	4714	4409	4189
5	4537	4095	4529	4291	4259	4698	4494	4574	3683	4190	3981	4710	4297	4192
6	4543	4091	4534	4295	4252	4708	4495	4575	3684	4191	3976	4711	4393	4191
7	4542	4092	4539	4295	4249	4717	4498	4579	3687	4187	3980	4704	4402	4187
8	4547	4104	4548	4304	4265	4731	4501	4580	3693	4194	3989	4713	4300	4195
10	4550	4096	4548	4300	4258	4734	4499	4578	3691	4198	3988	4718	4340	4198
10	4544	4096	4544	4298	4251	4750	4499	4575	3689	4198	3987	4718	4426	4196
11	4540	4097	4537	4304	4247	4752	4503	4578	3696	4212	3987	4718	4400	4190
12	4557	4093	4548	4306	4242	4734	4487	4563	3679	4203	3984	4736	4289	4205
13	4542	4094	4524	4303	4271	4760	4521	4593	3699	4225	3992	4725	4433	4192
14	4547	4094	4525	4300	4269	4775	4514	4580	3690	4208	3985	4724	4386	4192
15	4556	4087	4529	4292	4262	4766	4497	4565	3674	4196	3978	4728	4290	4199
Media	4545	4095	4535	4299	4258	4724	4502	4578	3688	4199	3983	4718	4363	4193

Tabla 86. Resultados testeo registro a tiempo real.

En la columna de ordenadas se muestran los 16 estados, omitiendo el primero en el que la variable *output_matrix*, encargada de recoger estos valores, se rellena con ceros para inicializar el proceso. En la columna de abscisas se muestran los 14 electrodos encargados de registrar los valores, los dos restantes se utilizan como tierra y estabilizador para generar las diferencias de potencial recogidas en la tabla anterior. Esto se explicó en la fase de introducción del presente trabajo, en la que la distribución de los electrodos a lo largo y ancho de la cabeza estaba ilustrada en la figura 18 y su correcta conexión en las figuras 41 y 42. Recordamos dicha distribución y su conexionado a continuación:

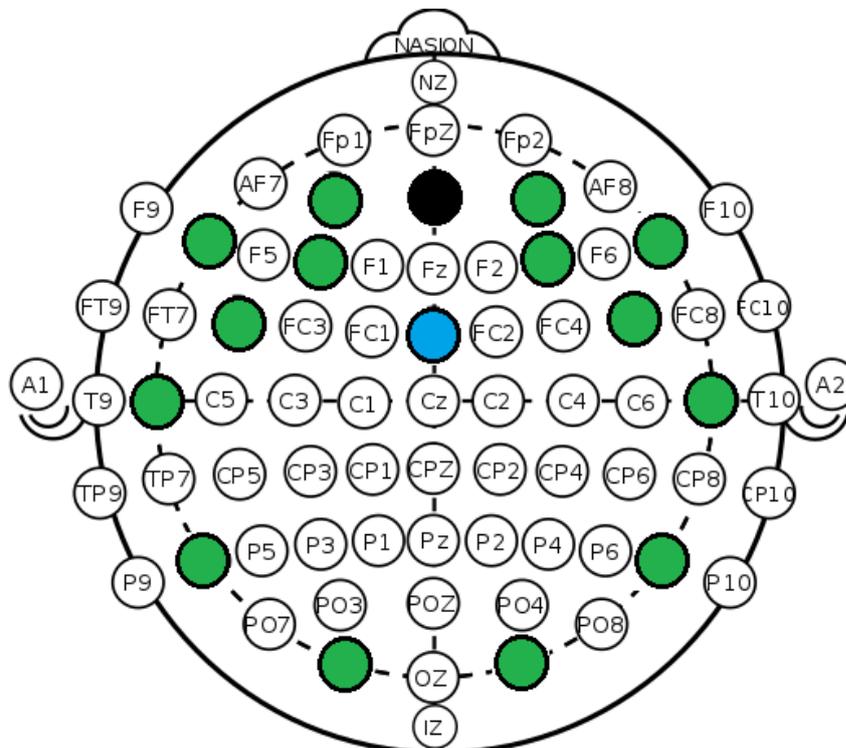


Figura 18. Distribución 1 con sensores de referencia.

El correcto conexionado de los 16 electrodos se consigue de la siguiente manera a través de la aplicación de *Control Panel*, que resulta ser la librería de *Emotiv*:

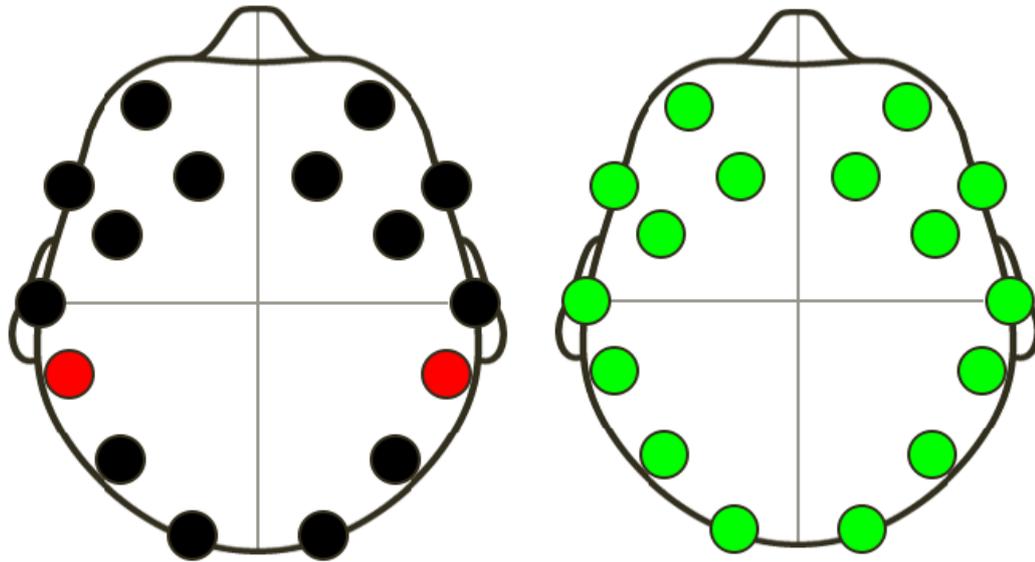


Figura 108. Correcto conexionado de los electrodos.

La frecuencia de muestreo es de 128 Hz, eso indica que para cada estado se generarán 128 valores. El tiempo de alternancia de cada estado puede ser cambiado manualmente por lo que los valores ofrecidos por segundo dependen de la configuración de esta variable de duración de estado. Todas las variables de grabación son establecidas al inicio del código:

```
%Valores de grabación
rectime = 1;
acqtime = 400;%Tiempo de experimentación
sampFreq = 128; %Frecuencia de muestreo
status_time = 0.1; %Tiempo por estado
status_samples = status_time*sampFreq; %Tamaño de cada estado
samples_taken = 0; %Número de muestras almacenadas
counter_status = 0; %Contador de estados
status_last = 0; %Último estado
```

Figura 109. Valores de grabación, script *Simulacion_3D_Live*.

La variable *acqtime* nos muestra el tiempo que el código se estará ejecutando como máximo. La variable *status_time* indicará el tiempo que cada estado dura. Este tiempo puede ser aumentado haciendo que la duración que tome la simulación en dar un paso completo sea mayor o por el contrario puede ser reducido provocando un aumento en la velocidad de movimiento.



3. Aplicación de las actividades escogidas en el proyecto.

No hay que olvidar que se eligieron 2 actividades para ser aplicadas en la fase final, es decir la fase en la que nos encontramos actualmente. Con estas actividades lo que pretendemos es asignar una al movimiento *Andar* y otra al movimiento *Parar*. Las actividades escogidas fueron recogidas en la tabla 83 y estas son:

Resultados	
Multiplicar	90%
Lanzar y recoger pelota	86%

Tabla 83. Resultados mejor experimento.

Por lo tanto debemos realizar un testeo de estas actividades sobre el código final que estamos escribiendo para conocer los resultados que ofrecen durante la experimentación a tiempo real. Una vez conocidos dichos resultados se aplicará esta información al código para establecer el correcto funcionamiento escribiendo así los comandos necesarios para que al pensar en multiplicar un número se active la simulación gráfica 3D del exoesqueleto y comience a andar y que cuando se lance y recoja una pelota se pare dicha simulación.

Realizamos la experimentación y testeo para dichas actividades. Los valores medios obtenidos para cada una son mostrados a continuación:

- Multiplicar

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
4547	4108	4545	4291	4277	4683	4486	4580	3678	4171	3992	4713	4359	4203

Tabla 87. Valores medios actividad *Multiplicar*.

- Lanzar y recoger pelota

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
4542	4098	4536	4299	4290	4677	4495	4581	3710	4190	4003	4710	4363	4204

Tabla 88. Valores medios actividad *Lanzar y recoger pelota*.

Llegados a este punto nos encontramos con un problema que no había surgido antes. Los resultados son muy similares, por lo que al realizar ambas acciones será difícil diferenciar cuando se está pensando en una acción y cuando se está pensando en otra. Podríamos pensar por ejemplo que para el electrodo número 9 al recibir un impulso inferior a un valor de 3700 signifique que el usuario está pensando en *Multiplicar*, es decir en *Andar*, lo que sucede es que los valores mostrados anteriormente están formados por la media de multitud de experimentos realizados para cada acción y si observamos todos estos experimentos vemos que para la acción *Multiplicar* en los distintos estados no siempre se mantiene un valor inferior al 3700 por lo que no funcionaría correctamente el código ya que fallaría en estos casos:



- Multiplicar

Experimento	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	4565	4106	4566	4292	4288	4691	4511	4567	3707	4196	3998	4721	4364	4201
2	4542	4092	4544	4300	4302	4685	4498	4584	3690	4169	3996	4714	4356	4200
3	4546	4098	4537	4295	4271	4674	4452	4572	3680	4170	3993	4717	4348	4203
4	4540	4113	4548	4287	4250	4684	4479	4597	3574	4154	3972	4703	4359	4209
5	4545	4109	4540	4287	4268	4683	4468	4566	3728	4169	3988	4717	4373	4200
6	4545	4128	4532	4283	4282	4680	4512	4597	3688	4170	4005	4706	4356	4205

Tabla 89. Valores experimentos para actividad *Multiplicar*.

A su vez cada experimento está formado por 15 estados distintos en los que los valores anteriores para cada experimento son la media de los 15 estados, por lo que para cada estado podrán ser distintos, lo que implica que no se puede diferenciar entre uno y otro ya que resultan ser muy similares los rangos de actuación de cada electrodo según la actividad. Con rangos de actuación nos referimos a los valores entre los que se suelen encontrar los resultados para cada sensor en cada acción.

4. Búsqueda de una solución.

Surge así la necesidad de conocer si la coincidencia entre los valores medios se debe a las acciones estudiadas, es decir los dos casos planteados de *Multiplicar* y *Lanzar y recoger una pelota* y si existen de verdad otras acciones que ofrecen resultados para cada sensor completamente diferentes o simplemente el dispositivo *Emoc* no es capaz de diferenciar entre pensamientos.

Para resolver esta problemática se ha llevado a cabo un estudio de 20 actividades completamente distintas entre sí, entre las cuales se encuentran las 12 estudiadas en las fases 2 y 3.

A continuación presentamos una tabla recogiendo las distintas actividades estudiadas:

1	Quieto	Quedarse completamente quieto	11	P_Cantar	Pensar en tararear o cantar
2	Normal	Actuar normal	12	Lanzar	Lanzar y recoger una pelota
3	Gest.Facial	Realizar gestos faciales	13	P_Lanzar	Pensar en lanzar y recoger una pelota
4	P_Andar	Pensar en andar	14	P_Palabra	Pensar en una palabra concreta
5	P_Parar	Pensar en parar	15	P_Mov.man	Pensar en mover la mano izquierda
6	Andar	Realizar la acción de andar	16	Cantar	Realizar la acción de cantar
7	Parar	Realizar la acción de parar	17	Bailar	Realizar la acción de bailar
8	Multiplicar	Realizar cálculos matemáticos	18	Apretar	Apretar las manos
9	Relajación	Relajarse	19	Hablar	Hablar de forma normal
10	P_Colores	Pensar en un color determinado	20	Saltar	Realizar la acción de saltar

Tabla 90. Actividades realizadas durante la experimentación.

Este estudio es completamente necesario de cara a conocer qué actividad nos ofrece unos resultados distintos al resto para así poder ser aplicada en el código que ejecute la simulación 3D a tiempo real y ésta es la gran diferencia con todo lo estudiado anteriormente, la ejecución a tiempo real.



Hemos visto qué actividades nos ofrecían un mejor porcentaje de acierto tras ser procesados sus valores, *Multiplicar* y *Lanzar y recoger una pelota*, pero al trabajar a tiempo real lo que obtenemos son unos valores en crudo que no pueden ser procesados porque la ejecución del procesado toma mucho tiempo, dependiendo del tamaño del archivo final puede tomar hasta 12 horas en un ordenador con buenas características para una experimentación de 20 segundos por imagen, en el caso de 15 segundos tomaría 6-7 horas y en el caso de 5 segundos solo toma 1-2 horas. Lo que se pretende en esta fase final es mover la simulación a tiempo real y para ello los valores no se pueden procesar para ejecutar el código visto en la fase anterior, donde toda pensamiento podía mover la simulación dependiendo del éxito de cada experimento. Lo que se pretende aquí es trabajar con los valores en crudo para cada electrodo, por ellos debemos realizar un nuevo estudio.

Los valores medios tienden a no mostrar la realidad de los resultados ya que si para una misma actividad en concreto un resultado de un experimento tiene un valor de 5 y más tarde para el mismo sujeto otro experimento es de 9 la media me mostrará un valor de 7 lo que no refleja fielmente ni a un experimento ni otro. En este caso si trabajamos con rangos de actuación podremos acotar sobre qué valores se suele encontrar un pensamiento o actividad y en ese caso si decimos que dicha actividad presenta unos rangos de 5 a 9 estaremos incluyendo ambos experimentos y se reflejará de una forma más fiel a la realidad en lo referente a dicha actividad.

Por lo que se ha realizado un estudio para un mismo sujeto en el que se le han realizado las 20 actividades en diferentes ocasiones, obteniendo así resultados de distintos experimentos para una misma actividad. Algunos de estos experimentos también se han llevado a cabo con diferentes condiciones de registro para observar si se produce algún cambio al variar por ejemplo la velocidad de registro o la duración del experimento. También se han llevado a cabo en diferentes periodos de tiempo para observar si existe alguna diferencia para un mismo sujeto en función de su estado actual en el momento de realizar un experimento u otro. Los resultados obtenidos se pueden encontrar de una forma completa en los anexos, a continuación se presentan los valores estimados para la media de cada actividad y también los rangos mínimo y máximo en los que se suelen situar dichos valores en función de los electrodos 14 electrodos que registran las señales eléctricas:

Quieto	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Rangos	4534	4069	4522	4282	4221	4659	4475	4550	3668	4159	3984	4698	4340	4189
	4565	4114	4557	4313	4303	4706	4516	4611	3718	4202	4010	4730	4383	4217
Media	4548	4095	4539	4296	4279	4683	4496	4582	3695	4183	3998	4713	4362	4203
Normal	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Rangos	4524	4080	4509	4249	4220	4653	4471	4543	3662	4127	3975	4672	4329	4163
	4570	4147	4587	4320	4324	4708	4536	4595	3721	4201	4023	4742	4414	4229
Media	4546	4115	4540	4289	4273	4680	4504	4570	3694	4169	3998	4705	4367	4197
Gest.Facial	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Rangos	4457	3925	4390	4243	4136	4581	4425	4471	3595	4040	3878	4546	4089	4046
	4651	4463	4911	4428	4438	4779	4599	4638	3782	4368	4090	5020	4714	4379
Media	4545	4127	4551	4326	4266	4672	4503	4550	3670	4175	3992	4727	4355	4198



P_Andar	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Rangos	4543	4090	4534	4297	4267	4690	4425	4569	3636	4178	3989	4695	4348	4183
	4584	4225	4606	4368	4328	4743	4508	4621	3711	4281	4042	4766	4446	4286
Media	4558	4130	4567	4329	4292	4713	4462	4590	3679	4206	4013	4727	4392	4239
P_Parar	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Rangos	4542	4039	4546	4304	4253	4683	4478	4564	3702	4175	3993	4706	4356	4203
	4569	4101	4589	4353	4309	4718	4527	4603	3751	4254	4025	4743	4410	4241
Media	4555	4074	4564	4329	4276	4703	4503	4584	3726	4202	4009	4725	4378	4221
Andar	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Rangos	4519	3973	4492	4288	4216	4651	4430	4531	3612	4171	3964	4673	4269	4185
	4588	4178	4612	4379	4340	4731	4542	4617	3781	4329	4042	4765	4415	4266
Media	4550	4093	4553	4335	4280	4696	4488	4583	3703	4255	3999	4713	4349	4222
Parar	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Rangos	4526	4078	4524	4299	4246	4667	4447	4554	3623	4200	3976	4685	4287	4183
	4571	4142	4577	4366	4315	4717	4505	4606	3717	4245	4034	4745	4366	4245
Media	4549	4113	4553	4334	4278	4688	4485	4581	3681	4222	4007	4715	4331	4212
Multiplicar	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Rangos	4530	4086	4523	4267	4249	4660	4468	4558	3648	4150	3977	4694	4337	4187
	4568	4131	4565	4305	4303	4700	4505	4607	3707	4200	4009	4731	4379	4221
Media	4547	4108	4545	4291	4277	4683	4486	4580	3678	4171	3992	4713	4359	4203
Relajación	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Rangos	4526	4073	4511	4261	4216	4649	4449	4545	3593	4112	3965	4679	4329	4182
	4561	4119	4544	4341	4288	4699	4508	4603	3737	4164	4005	4728	4371	4230
Media	4544	4099	4528	4318	4261	4672	4478	4572	3664	4140	3984	4698	4350	4205
P_Colores	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Rangos	4528	4058	4512	4320	4219	4657	4462	4504	3675	4118	3963	4677	4344	4177
	4561	4105	4548	4371	4287	4698	4506	4551	3730	4170	3999	4717	4373	4231
Media	4540	4088	4529	4344	4257	4681	4482	4528	3705	4149	3982	4695	4359	4202
P_Cantar	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Rangos	4522	4052	4498	4277	4214	4646	4447	4552	3623	4117	3976	4666	4344	4161
	4564	4120	4554	4314	4324	4713	4525	4645	3731	4196	4011	4735	4426	4229
Media	4543	4086	4528	4296	4267	4676	4484	4603	3681	4156	3990	4703	4379	4190
Lanzar	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Rangos	4531	4072	4520	4283	4252	4635	4480	4563	3674	4165	3989	4684	4342	4189
	4557	4119	4558	4314	4349	4706	4513	4602	3739	4223	4021	4739	4386	4221
Media	4542	4098	4536	4299	4290	4677	4495	4581	3710	4190	4003	4710	4363	4204
P_Lanzar	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Rangos	4513	4084	4516	4237	4252	4662	4463	4578	3525	4130	3969	4672	4320	4207
	4544	4134	4567	4321	4318	4707	4512	4634	3742	4230	4007	4737	4459	4252
Media	4530	4108	4538	4296	4280	4682	4489	4603	3689	4164	3987	4700	4353	4231
P_Palabra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Rangos	4518	4082	4514	4266	4207	4658	4446	4550	3612	4137	3970	4676	4351	4205
	4558	4119	4556	4317	4286	4704	4532	4590	3719	4203	4007	4728	4401	4249
Media	4536	4104	4536	4291	4259	4680	4479	4568	3686	4179	3985	4697	4372	4223
P_Mov.man	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Rangos	4523	4099	4516	4205	4226	4653	4457	4561	3600	4134	3971	4678	4335	4181
	4558	4187	4554	4392	4328	4715	4531	4612	3703	4218	4012	4726	4418	4240
Media	4541	4144	4535	4294	4291	4684	4490	4582	3651	4170	3991	4702	4374	4210



Cantar	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Rangos	4500	4063	4506	4297	4229	4647	4414	4481	3652	4103	3965	4663	4307	4140
	4542	4121	4587	4342	4312	4721	4512	4555	3732	4187	3990	4709	4371	4212
Media	4525	4087	4529	4331	4269	4690	4469	4495	3705	4145	3968	4675	4321	4176
Bailar	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Rangos	4534	4070	4516	4294	4107	4680	4454	4572	3670	4167	3975	4698	4322	4185
	4567	4153	4558	4325	4258	4783	4525	4604	3715	4228	4012	4750	4415	4210
Media	4550	4099	4537	4308	4194	4719	4527	4589	3698	4200	3992	4723	4365	4196
Apretar	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Rangos	4511	4033	4502	4272	4226	4663	4456	4559	3659	4163	3987	4682	4301	4173
	4565	4126	4570	4324	4329	4721	4518	4627	3725	4242	4271	4751	4371	4228
Media	4539	4095	4536	4302	4281	4685	4475	4588	3693	4184	4032	4705	4344	4194
Saltar	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Rangos	4483	4000	4432	4234	4025	4615	4367	4495	3479	4073	3604	4610	4205	4108
	4558	4182	4575	4427	4407	4728	4534	4697	3824	4219	4314	4800	4425	4228
Media	4524	4085	4504	4322	4233	4679	4452	4591	3650	4160	3937	4704	4327	4173
Hablar	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Rangos	4519	4065	4481	4288	4221	4649	4461	4529	3660	4129	3983	4684	4297	4175
	4564	4143	4612	4381	4320	4708	4584	4628	3718	4203	4024	4747	4381	4231
Media	4541	4103	4519	4322	4280	4678	4522	4576	3688	4166	4002	4709	4340	4193

Tabla 91. Resultados medios y rangos para las actividades del experimento.

Las actividades que más nos pueden interesar son las dos primeras en las que se miden los valores para cuando un usuario se encuentra *Quieto* sin pensar en nada y para cuando se encuentra *Normal*, es decir interactuando con el entorno de la forma más común posible. Estas dos actividades nos interesan ya que debemos conocer qué valores ofrecen para no repetirlos a la hora de querer mover la simulación 3D ya que si asignamos estos valores al movimiento de *Andar* y *Parar* el exoesqueleto no diferenciaría jamás cuando existe intención y cuando no.

Para visualizar de una forma más clarificadora toda esta cantidad de información se han calculado los valores de los rangos mínimo y máximo además de los valores medios de cada actividad de una forma global, por lo que a continuación se presentan los valores sobre los que la mayoría de actividades se encuentran:

General	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Rangos	4522	4063	4513	4273	4231	4659	4440	4543	3637	4144	3976	4682	4323	4177
	4568	4138	4576	4335	4315	4721	4526	4604	3731	4226	4035	4738	4400	4243
Media	4544	4104	4540	4310	4272	4687	4489	4572	3692	4180	3995	4707	4360	4206

Tabla 92. Resultados generales medios y rangos entre las actividades del experimento.

Estos valores representan los valores genéricos que forman todas las pruebas. Al comparar cada actividad en particular será recomendable hacerlo, además de unas entre otras, también de cada actividad entre los valores generales.

Si realizamos una comparación entre los valores generales y los de las actividades de *Andar* y *Parar* podemos observar que tanto para los valores medios como para ambos rangos todos se encuentran en los mismos niveles.



Quieto	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Rangos	4534	4069	4522	4282	4221	4659	4475	4550	3668	4159	3984	4698	4340	4189
	4565	4114	4557	4313	4303	4706	4516	4611	3718	4202	4010	4730	4383	4217
Media	4548	4095	4539	4296	4279	4683	4496	4582	3695	4183	3998	4713	4362	4203
Normal	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Rangos	4524	4080	4509	4249	4220	4653	4471	4543	3662	4127	3975	4672	4329	4163
	4570	4147	4587	4320	4324	4708	4536	4595	3721	4201	4023	4742	4414	4229
Media	4546	4115	4540	4289	4273	4680	4504	4570	3694	4169	3998	4705	4367	4197
General	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Rangos	4522	4063	4513	4273	4231	4659	4440	4543	3637	4144	3976	4682	4323	4177
	4568	4138	4576	4335	4315	4721	4526	4604	3731	4226	4035	4738	4400	4243
Media	4544	4104	4540	4310	4272	4687	4489	4572	3692	4180	3995	4707	4360	4206

Tabla 93. Comparación resultados medios y rangos estados *Quieto* y *Normal*.

Realizando la comparación simplemente entre los valores medios tenemos que:

Actividad	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Quieto	4548	4095	4539	4296	4279	4683	4496	4582	3695	4183	3998	4713	4362	4203
Normal	4546	4115	4540	4289	4273	4680	4504	4570	3694	4169	3998	4705	4367	4197
Gest.Facial	4545	4127	4551	4326	4266	4672	4503	4550	3670	4175	3992	4727	4355	4198
P_Andar	4558	4130	4567	4329	4292	4713	4462	4590	3679	4206	4013	4727	4392	4239
P_Parar	4555	4074	4564	4329	4276	4703	4503	4584	3726	4202	4009	4725	4378	4221
Andar	4550	4093	4553	4335	4280	4696	4488	4583	3703	4255	3999	4713	4349	4222
Parar	4549	4113	4553	4334	4278	4688	4485	4581	3681	4222	4007	4715	4331	4212
Multiplicar	4547	4108	4545	4291	4277	4683	4486	4580	3678	4171	3992	4713	4359	4203
Relajación	4544	4099	4528	4318	4261	4672	4478	4572	3664	4140	3984	4698	4350	4205
P_Colores	4540	4088	4529	4344	4257	4681	4482	4528	3705	4149	3982	4695	4359	4202
P_Cantar	4543	4086	4528	4296	4267	4676	4484	4603	3681	4156	3990	4703	4379	4190
Lanzar	4542	4098	4536	4299	4290	4677	4495	4581	3710	4190	4003	4710	4363	4204
P_Lanzar	4530	4108	4538	4296	4280	4682	4489	4603	3689	4164	3987	4700	4353	4231
P_Palabra	4536	4104	4536	4291	4259	4680	4479	4568	3686	4179	3985	4697	4372	4223
P_Mov.man	4541	4144	4535	4294	4291	4684	4490	4582	3651	4170	3991	4702	4374	4210
Cantar	4525	4087	4529	4331	4269	4690	4469	4495	3705	4145	3968	4675	4321	4176
Bailar	4550	4099	4537	4308	4194	4719	4527	4589	3698	4200	3992	4723	4365	4196
Apretar	4539	4095	4536	4302	4281	4685	4475	4588	3693	4184	4032	4705	4344	4194
Saltar	4524	4085	4504	4322	4233	4679	4452	4591	3650	4160	3937	4704	4327	4173
Hablar	4541	4103	4519	4322	4280	4678	4522	4576	3688	4166	4002	4709	4340	4193
General	4544	4104	4540	4310	4272	4687	4489	4572	3692	4180	3995	4707	4360	4206

Tabla 94. Resultados medios para las actividades del experimento.

Marcados en rojo se encuentran los valores que parece que distan más de los valores medios que por norma general se obtienen, sobre todo si además de compararlos con la media total los comparamos con las actividades *Normal* y *Quieto*.



Se observa que las 3 actividades que más parecen variar son actividades que necesitan de un movimiento para ser llevadas a cabo, *Cantar*, *Bailar* y *Saltar*, por lo que a priori simplemente pensar no nos muestra una diferencia entre distintos pensamientos solo teniendo en cuenta los valores medios. Como hemos comentado anteriormente no debemos trabajar con estos valores medios de los experimentos ya que no muestran fielmente la realidad. Necesitamos hacerlo con los rangos mínimo y máximo sobre los que se sitúan cada actividad.

A continuación se muestran los valores mínimo y máximo recogidos de media entre todos los experimentos realizados para cada una de las actividades estudiadas:

Rangos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Quieto	4534	4069	4522	4282	4221	4659	4475	4550	3668	4159	3984	4698	4340	4189
	4565	4114	4557	4313	4303	4706	4516	4611	3718	4202	4010	4730	4383	4217
Normal	4524	4080	4509	4249	4220	4653	4471	4543	3662	4127	3975	4672	4329	4163
	4570	4147	4587	4320	4324	4708	4536	4595	3721	4201	4023	4742	4414	4229
Gest.Facial	4457	3925	4390	4243	4136	4581	4425	4471	3595	4040	3878	4546	4089	4046
	4651	4463	4911	4428	4438	4779	4599	4638	3782	4368	4090	5020	4714	4379
P_Andar	4543	4090	4534	4297	4267	4690	4425	4569	3636	4178	3989	4695	4348	4183
	4584	4225	4606	4368	4328	4743	4508	4621	3711	4281	4042	4766	4446	4286
P_Parar	4542	4039	4546	4304	4253	4683	4478	4564	3702	4175	3993	4706	4356	4203
	4569	4101	4589	4353	4309	4718	4527	4603	3751	4254	4025	4743	4410	4241
Andar	4519	3973	4492	4288	4216	4651	4430	4531	3612	4171	3964	4673	4269	4185
	4588	4178	4612	4379	4340	4731	4542	4617	3781	4329	4042	4765	4415	4266
Parar	4526	4078	4524	4299	4246	4667	4447	4554	3623	4200	3976	4685	4287	4183
	4571	4142	4577	4366	4315	4717	4505	4606	3717	4245	4034	4745	4366	4245
Multiplicar	4530	4086	4523	4267	4249	4660	4468	4558	3648	4150	3977	4694	4337	4187
	4568	4131	4565	4305	4303	4700	4505	4607	3707	4200	4009	4731	4379	4221
Relajación	4526	4073	4511	4261	4216	4649	4449	4545	3593	4112	3965	4679	4329	4182
	4561	4119	4544	4341	4288	4699	4508	4603	3737	4164	4005	4728	4371	4230
P_Colores	4528	4058	4512	4320	4219	4657	4462	4504	3675	4118	3963	4677	4344	4177
	4561	4105	4548	4371	4287	4698	4506	4551	3730	4170	3999	4717	4373	4231
P_Cantar	4522	4052	4498	4277	4214	4646	4447	4552	3623	4117	3976	4666	4344	4161
	4564	4120	4554	4314	4324	4713	4525	4645	3731	4196	4011	4735	4426	4229
Lanzar	4531	4072	4520	4283	4252	4635	4480	4563	3674	4165	3989	4684	4342	4189
	4557	4119	4558	4314	4349	4706	4513	4602	3739	4223	4021	4739	4386	4221
P_Lanzar	4513	4084	4516	4237	4252	4662	4463	4578	3525	4130	3969	4672	4320	4207
	4544	4134	4567	4321	4318	4707	4512	4634	3742	4230	4007	4737	4459	4252
P_Palabra	4518	4082	4514	4266	4207	4658	4446	4550	3612	4137	3970	4676	4351	4205
	4558	4119	4556	4317	4286	4704	4532	4590	3719	4203	4007	4728	4401	4249
P_Mov.man	4523	4099	4516	4205	4226	4653	4457	4561	3600	4134	3971	4678	4335	4181
	4558	4187	4554	4392	4328	4715	4531	4612	3703	4218	4012	4726	4418	4240
Cantar	4500	4063	4506	4297	4229	4647	4414	4481	3652	4103	3965	4663	4307	4140
	4542	4121	4587	4342	4312	4721	4512	4555	3732	4187	3990	4709	4371	4212
Bailar	4534	4070	4516	4294	4107	4680	4454	4572	3670	4167	3975	4698	4322	4185
	4567	4153	4558	4325	4258	4783	4525	4604	3715	4228	4012	4750	4415	4210



Apretar	4511	4033	4502	4272	4226	4663	4456	4559	3659	4163	3987	4682	4301	4173
	4565	4126	4570	4324	4329	4721	4518	4627	3725	4242	4271	4751	4371	4228
Hablar	4519	4065	4481	4288	4221	4649	4461	4529	3660	4129	3983	4684	4297	4175
	4564	4143	4612	4381	4320	4708	4584	4628	3718	4203	4024	4747	4381	4231
Saltar	4483	4000	4432	4234	4025	4615	4367	4495	3479	4073	3604	4610	4205	4108
	4558	4182	4575	4427	4407	4728	4534	4697	3824	4219	4314	4800	4425	4228
Rangos	4522	4063	4513	4273	4231	4659	4440	4543	3637	4144	3976	4682	4323	4177
	4568	4138	4576	4335	4315	4721	4526	4604	3731	4226	4035	4738	4400	4243

Tabla 95. Resultados rangos para las actividades del experimento.

Estos valores son los valores medios para los rangos mínimo y máximo de cada actividad. Se han seleccionado los valores mínimo y máximo para cada experimento de entre los 15 estados que tiene cada uno. Tras haberlos seleccionado se ha hallado la media entre ellos para conocer los rangos entre los que se encontrarán la gran mayoría de los valores registrados mediante *Emoc* según se realice una actividad u otra.

En esta tabla podemos observar como la gran mayoría de actividades ofrecen unos rangos de valores más o menos idéntica, por lo que sería muy difícil discernir entre cuando el usuario está pensando en una cosa u otra. Sin embargo los valores destacados muestran una diferencia notable para esos electrodos, siendo muy evidente dicha diferencia en el caso de que el color del valor esté destacado en rojo. Las dos actividades que más valores en rojo ofrecen son *Realizar gestos faciales* y *Saltar*. La segunda no es una actividad sencilla de ejecutar y además requiere del uso de las piernas por lo que no va a ser estudiada el porqué de sus diferencias en los resultados. Por otro lado tenemos la primera actividad, *Realizar gestos faciales*, que resulta muy interesante pues nos ofrece la posibilidad de poder controlar una simulación 3D o mejor aún un exoesqueleto real simplemente con las expresiones faciales.

5. Estudio de la solución propuesta.

Se ha encontrado una actividad que ofrece resultados distintos a la gran mayoría, por lo que será necesario estudiarla a fondo para conocer en qué forma se puede implementar al código Matlab para que a través de él podamos controlar la simulación 3D.

Dentro de *Realizar gestos faciales* es necesario conocer qué gestos faciales influyen en tal variación de los resultados como la que hemos visto en la tabla anterior. Para ello se vuelve a realizar un estudio centrado en esta actividad, cuyo número era el 3 de las 20 actividades estudiadas. En dicho estudio se llevarán a cabo nuevas actividades dentro de los gestos faciales. Se han incluido actividades referidas a la boca, la nariz, los ojos y las cejas.

Las actividades estudiadas se muestran en la tabla que podemos encontrar a la derecha.

3.1	Lev.cejas	Levantar las cejas
3.2	Frun.ceño	Fruncir el ceño
3.3	Parpadear	Parpadear
3.4	Mov.nariz	Mover la nariz
3.5	Apre.Mand	Apretar la mandíbula
3.6	Abrir boca	Abrir mucho la boca
3.7	Sacar lengua	Sacar la lengua
3.8	Sonreir	Sonreir

Tabla 96. Actividades *Gestos faciales* del experimento.

Buscamos localizar a qué se debe la variación de resultados obtenidos en la actividad *Realizar gestos faciales*. En primer lugar volvemos a comparar las medias totales de los experimentos, aunque como ya hemos dicho anteriormente no debemos centrarnos en ellas, se presentan sus resultados simplemente para observar de una forma más completa la información obtenida:

Actividad	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Lev. Cejas	4547	4099	4539	4295	4272	4695	4486	4556	3695	4176	3983	4692	4352	4198
Fruncir ceño	4540	4085	4521	4285	4264	4669	4500	4545	3688	4163	3989	4689	4323	4178
Papadear	4536	4097	4536	4296	4276	4719	4466	4547	3686	4164	3991	4710	4311	4194
Mover nariz	4555	4102	4532	4289	4277	4676	4462	4570	3705	4177	4006	4711	4361	4200
Apret. Mand	4530	4091	4538	4289	4271	4679	4610	4572	3706	4173	4009	4713	4339	4199
Abrir boca	4549	4073	4533	4296	4216	4674	4506	4553	3693	4198	4006	4710	4362	4205
Sacar lengua	4480	4119	4527	4285	4265	4628	4497	4600	3703	4193	3993	4712	4317	4200
Sonreir	4546	4122	4523	4291	4291	4679	4498	4564	3737	4173	3990	4709	4375	4195
General	4544	4104	4540	4310	4272	4687	4489	4572	3692	4180	3995	4707	4360	4206

Tabla 97. Resultados medios para las actividades *Gestos Faciales*.

No se observa ninguna actividad dentro de *Realizar gestos faciales* que presente una clara diferencia con respecto al resto.

Si nos olvidamos de los valores medios y nos centramos en los rangos de actuación, mínimos y máximos, entre los que se encuentra casi la totalidad de resultados nos encontramos con los siguientes resultados:

Rangos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Lev. Cejas	4495	4025	4014	4246	4205	4622	4417	4448	3641	4103	3821	3984	4312	4106
	4617	4183	5563	4338	4342	4760	4578	4687	3757	4236	4089	5706	4394	4316
Fruncir ceño	4530	4066	4446	4268	4240	4637	4443	4520	3674	4133	3972	4545	4287	4162
	4556	4095	4562	4300	4285	4690	4589	4580	3708	4183	4016	4766	4347	4203
Papadear	4530	4079	4501	4285	4257	4708	4443	4523	3668	4147	3983	4688	4326	4182
	4576	4116	4554	4312	4295	4742	4490	4566	3701	4182	4007	4717	4351	4207
Mover nariz	4495	4072	4497	4270	4243	4648	4311	4539	3678	4152	3983	4686	4329	4168
	4608	4139	4584	4308	4316	4705	4539	4607	3738	4221	4032	4748	4411	4263
Apretar mandíbula	4501	4040	4502	4267	4225	4613	4482	4541	3677	4117	3983	4684	4301	4178
	4557	4144	4579	4316	4313	4709	4540	4604	3736	4219	4036	4750	4387	4224
Abrir boca	4519	4015	4435	4260	4145	4607	4509	4509	3667	4121	3988	4610	4253	4153
	4590	4175	4730	4321	4282	4833	4512	4587	3719	4286	4018	4832	4483	4314
Sacar lengua	4397	4036	4492	4270	4234	4603	4462	4550	3671	4150	3974	4683	4219	4173
	4541	4187	4630	4307	4291	4658	4534	4691	3720	4249	4008	4734	4371	4226
Sonreir	4500	4047	4462	4265	4233	4642	4238	4526	3676	4136	3971	4674	4256	4170
	4582	4212	4676	4325	4361	4725	4582	4591	3726	4288	4009	4742	4512	4229
General	4522	4063	4513	4273	4231	4659	4440	4543	3637	4144	3976	4682	4323	4177
	4568	4138	4576	4335	4315	4721	4526	4604	3731	4226	4035	4738	4400	4243

Tabla 98. Resultados rangos para las actividades *Gestos Faciales*.

Como hemos explicado anteriormente los valores destacados muestran una diferencia notable para esos electrodos en relación con la media, siendo muy evidente dicha diferencia en el caso de que el color del valor esté destacado en rojo. Para estas actividades surge un factor que no había surgido en los casos anteriores y es que para una actividad se ha producido una diferencia muy abrupta en relación con la media, estos casos han sido destacados en un rojo más oscuro y con un mayor tamaño.

Respecto a los datos presentados anteriormente encontramos ciertas actividades que presentan diferencias aisladas en algunos electrodos para alguno de los rangos pero en la gran mayoría son diferencias que no puede ser consideradas de gran dimensión. Sin embargo existe una actividad que muestra síntomas de ser la causante de que la actividad *Realizar gestos faciales* haya ofrecido los resultados tan diferenciados que habíamos observado durante la búsqueda de una solución en el punto anterior. Dicha actividad viene a ser *Levantar las cejas*, sus resultados para ciertos electrodos son completamente diversos a la media de las actividades por lo que cabe pensar que esta actividad puede ser una muy posible forma de conseguir controlar el exoesqueleto.

Si nos fijamos detenidamente podemos observar que en 5 de los 14 electrodos se presenta una diferencia respecto a la media pero en 2 electrodos en concreto esta diferencia es muy destacada, de hecho se produce tanto para el rango inferior como para el superior por lo que parece ser que tan solo con 2 electrodos podríamos implementar un código que permitiera controlar una simulación gráfica, pero antes de ello será necesario estudiar este caso en profundidad.

6. Ajustes para solución propuesta.

A continuación lo que se ha llevado a cabo ha sido una investigación en profundidad para la actividad *Levantar las cejas*. En primer lugar necesitamos conocer qué electrodos han provocado la mayor diferencia de valores entre los 14 sensores que registran. Los dos electrodos causantes de dichas diferencias son los electrodos F3 y F4, situados en la parte frontal. Podemos observar su localización en la siguiente figura:

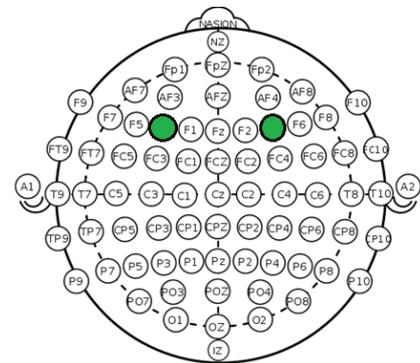


Figura 110. Posiciones electrodos de registro final.

Conocida la posición de dichos electrodos se han estudiado diferentes movimientos para la actividad *Levantar las cejas* con la intención de conocer de una forma más exacta el funcionamiento de los resultados obtenidos en la tabla anterior. Entre los movimientos en los que se ha profundizado se encuentran:

1	Lev.2.cej.cont	Levantar ambas cejas de forma continua
2	Lev.2.cej.int	Levantar ambas cejas de forma intermitente
3	Lev.1.cej.cont	Levantar solo una ceja de forma continua
4	Lev.1.cej.int	Levantar solo una ceja de forma intermitente

Tabla 99. Actividades *Levantar las cejas* para el experimento.



Si mostramos los valores medios obtenidos en las 4 actividades tenemos que:

Actividad	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Lev.2.cej.cont	4537	4136	4506	4291	4272	4700	4431	4558	3701	4172	3994	4672	4340	4190
Lev.2.cej.int	4548	4096	4534	4296	4273	4692	4480	4557	3697	4181	4004	4720	4349	4197
Lev.1.cej.cont	4548	4106	4532	4269	4273	4689	4439	4530	3691	4173	3996	4629	4314	4183
Lev.1.cej.int	4548	4095	4503	4296	4349	4702	4419	4523	3683	4174	4020	4613	4301	4179
General	4544	4104	4540	4310	4272	4687	4489	4572	3692	4180	3995	4707	4360	4206

Tabla 100. Resultados medios para las actividades *Levantar las cejas*.

Una vez más se observa como los valores medios no son el objeto que debemos investigar ya que hemos demostrado que existe una diferencia para esta actividad al ser comparada con el resto y sin embargo los valores medios de la media de los experimentos no muestran tal diferencia, en pocas palabras no muestran la realidad.

Si acudimos a los rangos mínimo y máximos obtenemos los siguientes resultados:

Rangos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Lev.2 cejas continuada	4501	4074	4322	4269	4209	4638	4223	4445	3664	4143	3970	4290	4305	4161
	4579	4181	5160	4311	4323	4736	4514	4613	3729	4205	4070	6128	4361	4273
Lev. 2 cejas intermitente	4492	4034	4115	4269	4202	4646	4428	4489	3664	4103	3954	4078	4316	4091
	4620	4165	5563	4332	4335	4736	4539	4636	3725	4231	4089	5656	4382	4318
Lev. 1 ceja continuada	4532	4080	4496	4238	4208	4668	4391	4512	3676	4151	3979	4322	4298	4150
	4567	4128	4553	4291	4308	4723	4484	4582	3709	4195	4018	5072	4326	4230
Lev. 1 ceja intermitente	4526	4061	4459	4273	4302	4664	4355	4475	3655	4140	3970	4208	4249	4148
	4569	4114	4542	4322	4413	4737	4453	4568	3706	4208	4070	4938	4331	4238
General	4522	4063	4513	4273	4231	4659	4440	4543	3637	4144	3976	4682	4323	4177
	4568	4138	4576	4335	4315	4721	4526	4604	3731	4226	4035	4738	4400	4243

Tabla 101. Resultados rangos para las actividades *Levantar las cejas*.

Observamos varias cosas, en primer lugar es evidente que se confirma los resultados obtenidos en toda la experimentación anterior, Levantar las cejas produce un movimiento de los electrodos situados en las posiciones F3 y F4.

En segundo lugar podemos ver como al variar la actividad de levantar dos cejas a solo una, el electrodo situado en la parte de la cabeza en la que se ha levantado la ceja es el que produce tal diferencia mientras que la otra ceja al quedarse quieta no produce tal valor. En este caso la ceja levantada ha sido la derecha y el electrodo activado ha sido el F4, es decir el situado en la parte derecha.

Lo siguiente que podemos deducir es que tanto para el caso de *Levantar las cejas de forma continuada* y como para el caso de *Levantar las cejas de forma intermitente* se produce la activación de los electrodos, siendo del mismo orden los valores para uno u otro. Por lo que a priori podríamos pensar que no existe diferencia entre ambos casos pero sí se da tal diferencia. Para encontrarla es necesario estudiar los datos de todos los estados según cada experimento y ver cómo se comportan para cada uno según la actividad. A continuación vamos a poner un ejemplo de un experimento realizando la acción de *Levantar las cejas de forma continuada* y de forma seguida mostraremos un ejemplo para la actividad de *Levantar las cejas de forma intermitente*:



• *Levantar las cejas de forma continuada*

Estados	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	4519	4172	4847	4305	4236	4745	4555	4568	3715	4207	4067	5837	4368	4242
2	4554	4126	4868	4307	4232	4694	4548	4510	3702	4193	4040	5730	4359	4254
3	4548	4105	4733	4313	4231	4673	4517	4540	3714	4196	4026	5435	4360	4236
4	4552	4089	4660	4314	4225	4649	4474	4525	3693	4182	4010	5221	4356	4233
5	4530	4098	4582	4319	4254	4660	4492	4559	3713	4193	3998	5000	4357	4207
6	4518	4089	4516	4314	4256	4649	4500	4558	3705	4181	3988	4818	4348	4188
7	4523	4092	4513	4304	4250	4637	4461	4539	3684	4156	3967	4702	4334	4179
8	4511	4127	4466	4310	4285	4668	4488	4572	3707	4184	3967	4578	4347	4160
10	4513	4122	4424	4309	4270	4664	4476	4564	3701	4173	3974	4491	4342	4160
10	4516	4087	4387	4295	4254	4656	4477	4558	3694	4166	3985	4477	4352	4181
11	4515	4113	4367	4307	4297	4682	4501	4580	3714	4184	3991	4423	4363	4175
12	4515	4112	4354	4312	4274	4680	4494	4574	3713	4180	3992	4385	4362	4179
13	4539	4121	4389	4323	4284	4672	4488	4569	3703	4176	3984	4383	4354	4190
14	4518	4143	4388	4328	4308	4700	4526	4602	3729	4204	3976	4379	4361	4166
15	4523	4100	4391	4320	4264	4675	4508	4581	3708	4188	3979	4468	4357	4184
16	4532	4083	4412	4316	4259	4656	4494	4570	3704	4187	3985	4530	4355	4191
17	4523	4112	4422	4323	4275	4672	4501	4578	3708	4190	3986	4542	4352	4179
18	4518	4115	4424	4313	4270	4663	4497	4573	3703	4185	3977	4550	4346	4167
19	4512	4111	4430	4316	4274	4675	4505	4574	3704	4187	3977	4564	4349	4167
20	4525	4110	4457	4311	4253	4664	4486	4550	3683	4164	3967	4589	4332	4180
21	4519	4136	4460	4320	4273	4682	4501	4566	3699	4170	3972	4564	4329	4166
22	4521	4148	4491	4322	4267	4693	4503	4574	3706	4174	3970	4630	4326	4169
23	4533	4113	4492	4308	4251	4688	4509	4579	3710	4180	3982	4661	4354	4193
24	4527	4065	4463	4288	4218	4660	4489	4563	3698	4173	3987	4666	4360	4200
25	4514	4085	4456	4303	4242	4681	4509	4580	3707	4181	3986	4623	4356	4187
26	4525	4083	4469	4315	4255	4680	4507	4585	3707	4180	3995	4609	4356	4189
27	4539	4066	4497	4324	4260	4675	4501	4603	3698	4172	3992	4543	4357	4219
28	4465	4090	4482	4319	4277	4674	4504	4625	3699	4177	3971	4550	4351	4208
29	4467	4122	4454	4326	4284	4685	4517	4620	3706	4192	3980	4552	4357	4187
30	4482	4145	4479	4334	4298	4703	4527	4622	3720	4211	3981	4572	4359	4177
31	4500	4139	4488	4332	4279	4697	4514	4599	3709	4200	3980	4601	4354	4178
32	4500	4125	4495	4314	4272	4696	4508	4589	3705	4192	3982	4625	4353	4174
33	4501	4109	4493	4309	4270	4703	4498	4574	3700	4185	3982	4638	4349	4179
34	4515	4050	4490	4293	4209	4694	4472	4553	3681	4160	3984	4674	4336	4198
35	4515	4077	4484	4305	4257	4739	4500	4574	3702	4168	3987	4650	4340	4182
36	4534	4073	4507	4306	4259	4709	4486	4556	3689	4153	3987	4682	4340	4198
37	4530	4078	4507	4312	4267	4696	4490	4563	3696	4160	3984	4693	4345	4192
Media	4519	4106	4493	4313	4262	4681	4501	4572	3703	4181	3988	4693	4351	4190

Tabla 102. Resultados experimento Levantar las cejas de forma continuada.

Se trata de un experimento con 38 estados, eliminando el primero en el que la matriz que ofrece los valores por pantalla se rellena con 0. Se ha aumentado la duración del experimento para así poder observar la diferencia. Dicha diferencia se encuentra al realizar el movimiento de levantar las cejas, produciéndose la variación de los resultados para ambos electrodos. Sin embargo al mantener la cejas levantadas valores registrados comienzan a decaer hasta estabilizarse.



- *Levantar las cejas de forma intermitente*

Estados	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	4504	4092	5892	4310	4295	4734	4452	4606	3692	4200	4060	5808	4356	4300
2	4514	4102	4722	4306	4201	4728	4473	4592	3731	4200	4043	5291	4377	4273
3	4516	4101	4781	4318	4214	4711	4474	4555	3732	4186	4030	5125	4364	4235
4	4498	4086	4472	4305	4207	4678	4474	4538	3707	4177	3992	4694	4374	4239
5	4496	4085	4411	4308	4179	4641	4472	4554	3693	4174	3971	4229	4359	4163
6	4471	4075	4446	4308	4219	4659	4469	4558	3698	4192	3969	4406	4350	4131
7	4482	4062	4182	4309	4253	4626	4460	4530	3677	4169	3948	4341	4325	4179
8	4485	4090	4556	4344	4308	4649	4473	4558	3693	4181	3977	4578	4329	4157
10	4517	4063	4362	4340	3927	4646	4450	4548	3696	4184	3984	4819	4358	4188
10	4512	4099	4401	4352	4021	4659	4476	4557	3713	4188	3975	4641	4347	4178
11	4498	4060	4539	4336	4119	4650	4483	4545	3701	4176	3983	4469	4354	4191
12	4478	4076	4470	4343	4202	4641	4485	4523	3690	4162	3980	4424	4346	4193
13	4464	4100	4524	4343	4212	4703	4501	4580	3724	4189	4006	4637	4355	4198
14	4485	4083	4253	4327	4173	4683	4505	4553	3713	4187	3988	4550	4351	4218
15	4477	4099	4805	4342	4166	4675	4473	4556	3699	4182	4002	4759	4359	4192
16	4504	4092	4516	4327	4166	4697	4459	4569	3694	4174	3996	4880	4347	4210
17	4492	4089	4519	4343	4298	4672	4464	4559	3690	4187	3973	4714	4349	4161
18	4494	4102	4412	4344	4348	4683	4485	4570	3705	4207	3977	4676	4364	4164
19	4554	4045	4420	4325	4304	4630	4464	4514	3679	4216	3962	4612	4366	4177
20	4608	4061	4471	4338	4316	4658	4478	4556	3701	4178	3983	4605	4344	4164
21	4599	4040	4935	4338	4270	4607	4457	4516	3684	4140	3986	4677	4335	4200
22	4561	4048	4378	4323	4251	4663	4478	4544	3696	4149	3995	4613	4348	4203
23	4539	4040	4495	4330	4287	4679	4489	4558	3710	4169	3992	4606	4358	4199
24	4516	4033	4462	4327	4270	4679	4481	4557	3700	4169	3985	4618	4352	4196
25	4552	4049	4586	4330	4269	4644	4488	4527	3693	4164	3987	4594	4345	4212
26	4520	4063	4386	4318	4247	4673	4491	4565	3706	4184	3997	4694	4360	4215
27	4515	4069	4843	4334	4221	4680	4478	4597	3703	4184	4010	4966	4345	4210
28	4544	4103	4690	4330	4221	4702	4473	4623	3716	4188	4027	5327	4347	4223
29	4512	4096	4487	4316	4216	4697	4457	4593	3709	4181	3988	4900	4344	4205
30	4522	4079	4545	4316	4204	4671	4449	4565	3696	4168	3978	4760	4339	4206
31	4511	4046	4547	4307	4224	4651	4466	4548	3692	4171	3958	4438	4355	4199
32	4502	4128	4442	4342	4292	4688	4509	4598	3727	4207	3977	4676	4356	4159
33	4501	4104	4332	4329	4289	4682	4488	4573	3715	4197	3986	4680	4358	4175
34	4514	4090	4376	4328	4266	4686	4492	4574	3716	4195	3991	4656	4356	4188
35	4527	4032	4465	4315	4235	4638	4483	4519	3689	4168	3972	4499	4350	4203
36	4517	4055	4657	4331	4262	4659	4494	4550	3699	4189	3982	4584	4348	4178
37	4532	4041	4400	4337	4292	4639	4473	4533	3677	4163	3977	4590	4335	4191
Media	4514	4075	4545	4327	4228	4669	4476	4558	3702	4181	3989	4706	4352	4197

Tabla 103. Resultados experimento Levantar las cejas de forma intermitente.

Lo que sucede en el caso de estar levantando las cejas intermitentemente es que los valores cambian según estemos realizando la acción, mientras que en el caso anterior solo cambian al inicio.



La conclusión de todo esto viene a ser que lo que produce las diferencias en los resultados es el movimiento de levantar las cejas, no que las cejas se mantengan en alto, algo que nos aporta mucha información de cara a poder controlar el exoesqueleto de la manera más eficiente. Alcanzado este punto podemos dar por finalizada la búsqueda de una solución con sus correspondientes ajustes.

7. Definición de la solución.

Antes de pasar al siguiente punto dentro de esta última fase se va a exponer cual es la solución elegida para el control de la simulación gráfica 3D del exoesqueleto. Con este último paso se busca sentar las bases de cómo se debe operar de cara a conseguir un mejor control, algo que ayudará también a la hora de escribir el código Matlab para realizar dicho control. A continuación se enumeran dichas bases.

1. El exoesqueleto o simulación 3D será controlado a partir del movimiento de las cejas. Se adaptará el código para ambas cejas de forma que cuando los sensores registren movimiento en al menos una ceja esto sea suficiente para controlar todo el mecanismo.

2. La forma de ejecutar el movimiento será Levantar las cejas, en ese determinado momento el exoesqueleto comenzará a realizar la acción de *Andar* de forma continuada. Es decir no será necesario estar levantando las cejas a cada momento para producir un movimiento sino que será mucho más sencillo, al ser activado una vez será transmitida la orden de *Andar* ininterrumpidamente. Este comando solo dejará de ser ejecutado cuando una nueva orden se active, es decir cuando las cejas se vuelvan a levantar, en ese mismo instante la acción *Parar* el exoesqueleto tomará control de la situación y detendrá el movimiento. De esta forma ambas acciones, *Andar* y *Parar*, estarán controladas por una misma actividad, *Levantar las cejas*.

3. Cuando la ejecución de un paso sea interrumpida, es decir que el sujeto transmita la orden *Parar*, el exoesqueleto finalizará dicha paso hasta que el exoesqueleto se encuentre con las dos piernas apoyadas en el suelo, descansando en una posición normal como la mostrada en la figura 100. Esta ejecución tendrá dos vertientes:

- Si la orden *Parar* se ejecuta antes de la mitad de un paso completo el exoesqueleto volverá hacia atrás siendo el último paso dado la posición de descanso que tomará.
- Si la orden *Parar* se ejecuta después de la mitad de un paso completo el exoesqueleto acabará dicho paso hacia delante hasta alcanzar la posición de descanso comentada.

3. El exoesqueleto puede llegar a ser controlado con 1 o 2 electrodos de los 14 que registran valores, por lo que el código obviarán los 12 restantes que no necesitarán ser conectados. Simplificando así la preparación para el uso del BCI.

5.2. Implementación del código final

Se ha conseguido encontrar una forma para controlar la simulación gráfica 3D de un exoesqueleto y también se ha conseguido implementar el módulo de generación de referencias para dotar de los ángulos correctos a cada articulación de la piernas de dicha simulación. Toda esta información ha sido volcada en el código final para adaptarlo a las necesidades y requisitos establecidos en los apartados anteriores. Fruto del trabajo realizado se ha conseguido finalizar un código Matlab completo que ofrece buenos resultados de cara a controlar la simulación 3D con el BCI *Emoc*.

El código final se divide en 4 partes. En los anexos se puede encontrar presentado todo el código. A continuación se va a explicar de una forma sencilla el funcionamiento de cada una de las partes:

1. Inicialización

En este primer bloque lo primero que se hace es cargar los ángulos que las articulaciones tomarán según se produzca el movimiento de la marcha.

```
%-----Señal Reconstruida-----%
load Reconstrucción_final %Se cargan los valores de movimiento
frame=length(Ang); %Tamaño de la reconstrucción
AngRad(1:frame,1:6)=(Ang(1:frame,1:6))*pi/180; %Pasar de grados a radianes

%Conversión a ángulos
Angulo(1:frame,1)=AngRad(1:frame,3);
Angulo(1:frame,2)=AngRad(1:frame,2);
Angulo(1:frame,3)=AngRad(1:frame,1);
Angulo(1:frame,4)=AngRad(1:frame,6);
Angulo(1:frame,5)=AngRad(1:frame,5);
Angulo(1:frame,6)=AngRad(1:frame,4);
```

Figura 111. Inicialización del código final *Simulación_3D_Live*.

Seguidamente se cargan las librerías que harán posible registrar los valores a tiempo real mediante cada uno de los electrodos empleados:



```
§-----Información de registro-----§
structs.InputSensorDescriptor_struct.members=struct('channelId', 'EE_Inpu
enuminfo.EE_DataChannels_enum=struct('ED_COUNTER',0,'ED_INTERPOLATED',1,'
enuminfo.EE_CognitivTrainingControl_enum=struct('COG_NONE',0,'COG_START',
enuminfo.EE_ExpressivAlgo_enum=struct('EXP_NEUTRAL',1,'EXP_BLINK',2,'EXP_
enuminfo.EE_ExpressivTrainingControl_enum=struct('EXP_NONE',0,'EXP_START'
enuminfo.EE_ExpressivThreshold_enum=struct('EXP_SENSITIVITY',0);
enuminfo.EE_CognitivEvent_enum=struct('EE_CognitivNoEvent',0,'EE_Cognitiv
enuminfo.EE_EmotivSuite_enum=struct('EE_EXPRESSIV',0,'EE_AFFECTIV',1,'EE_
enuminfo.EE_ExpressivEvent_enum=struct('EE_ExpressivNoEvent',0,'EE_Expres
enuminfo.EE_CognitivAction_enum=struct('COG_NEUTRAL',1,'COG_PUSH',2,'COG_
enuminfo.EE_InputChannels_enum=struct('EE_CHAN_CMS',0,'EE_CHAN_DRL',1,'EE
enuminfo.EE_ExpressivSignature_enum=struct('EXP_SIG_UNIVERSAL',0,'EXP_SIG
enuminfo.EE_Event_enum=struct('EE_UnknownEvent',0,'EE_EmulatorError',1,'E
enuminfo.EE_AffectivAlgo_enum=struct('AFF_EXCITEMENT',1,'AFF_MEDITATION',

DataChannels = enuminfo.EE_DataChannels_enum;
DataChannelsNames = {'ED_COUNTER','ED_INTERPOLATED','ED_RAW_CQ','ED_AF3',
```

Figura 112. Líneas del código final para la iniciar el registro.

Una vez inicializado el proceso y cargados todos los archivos necesarios será momento de comenzar el proceso de ejecución.

2. Proceso de ejecución

La forma en la que la simulación 3D se mueve es tras comparar los valores registrados por los sensores F3 y F4 con un valor predeterminado. Lo que se hace es tomar un valor medio para cada sensor, cuando se inicie el proceso si los valores registrados a tiempo real para ese sensor distan un valor superior al valor predeterminado será ahí cuando se ejecute el comando de *Andar* o *Parar*.

Explicado de otra forma. Tras realizar un testeo del código ha sido necesario establecer un valor medio para los sensores según el sujeto que vaya a controlar la simulación. Este valor medio se calcula realizando un entrenamiento de 4 ensayos muy cortos, tras los que se realiza el cálculo de la media entre ellos. El motivo por el que se ejecuta dicho entrenamiento es debido a que los órdenes de magnitud de los resultados registrados por los sensores cambia según el sujeto que trate de controlar la simulación 3D e incluso puede cambiar según sea el estado emocional para un mismo sujeto, según el momento que controle la simulación. Esto quiere decir que antes de ejecutar este control es necesario realizar un breve entrenamiento con el que se hallan los valores medios que los sensores suelen registrar en ese momento para un estado *Normal* de un sujeto en particular.

Este entrenamiento está formado por 4 ensayos de 8 segundos cada uno en los que el sujeto no debe hacer nada, debe comportarse normal, de forma natural para así fijar los valores medios de los sensores para ese sujeto. Es decir que no tiene ninguna dificultad. La base de datos creada es suficientemente amplia, formada por 16 estado por ensayo, siendo cada ensayo formado por 128 valores. Esto nos ofrece una seguridad en los valores medios obtenidos.

El código del entrenamiento no tiene demasiada complicación por lo que podrá encontrarse en los anexos, a continuación mostraremos únicamente una primera parte para observar su configuración:

```
%-----Aquí comienzan los entrenamientos-----%
elseif Entrenamiento==2
    Experimento=menu('¿Qué número de experimento quieres realizar?')
    if Experimento==1
        experiment_number = 1;
    elseif Experimento==2
        experiment_number = 2;
    elseif Experimento==3
        experiment_number = 3;
    elseif Experimento==4
        experiment_number = 4;
    end
    status_set_matrix = [3 7 3 7 3 7 3 7 3 7 3 7 3 7 3 7];

    %valores de grabación
    rectime = 1;
    acqtime = 9; %Tiempo de experimentación
    sampFreq = 128; %Frecuencia de muestreo
    status_time = 0.5; %Tiempo por estatus
    total_samples = 8*sampFreq; %Muestras totales
    status_samples = status_time*sampFreq; %Tiempo por estado
    samples_taken = 0; %Número de muestras almacenadas
    counter_status = 0; %Contador de estados
    status_last = 0; %Último estado
```

Figura 113. Entrenamientos del código final *Simulación_3D_Live*.

Tras realizar los entrenamientos se han obtenido los valores medios que los sensores registran para cada sujeto estando este en un estado natural. Dichos valores se encuentran recogidos y almacenados en la variable *Media_experimento*. Conocido este valor el funcionamiento del control del exoesqueleto es el siguiente:

El sujeto se pone el casco BCI *Emoc*, se inicia el código Matlab y en ese momento los electrodos registran los valores para cada estado, por ejemplo cada segundo si así ha sido configurada la constante *Status_time* que es la encargada de la duración de cada estado. Es decir que cada segundo los electrodos estarán registrando valores y almacenándolos en la variable *Media_actual*. Dichos valores se irán actualizando segundo a segundo conforme se sucedan los estados.

Para cada estado las variables *Media_experimento* y *Media_actual* se compararán. La primera indicará cómo deben ser los valores cuando el sujeto se encuentra en un estado Normal, ya que ha sido calculado durante el entrenamiento, con la segunda estaremos comprobando cómo deben ser los valores del sujeto a tiempo real. Si la diferencia entre ambas variables, para cada electrodo, son mayores que una constante *d*, de *diferencia*, entonces se ejecutará el comando *Andar* o Parar.

```
%Comparación entre datos a tiempo real y medios
d=600;
contador=0;
for j=2:15
    if Media_experimento(1,j)-Media_actual(1,j)<0 %Si es negativo
        f=(Media_experimento(1,j)-Media_actual(1,j))*(-1);
        if f>d
            contador=contador+1;
        end
    end
    if Media_experimento(1,j)-Media_actual(1,j)>0 %Si es positivo
        g=(Media_experimento(1,j)-Media_actual(1,j));
        if g>d
            contador=contador+1;
        end
    end
end
```

Figura 114. Comparación entre datos, código final *Simulación_3D_Live*.

En nuestro código el valor de la constante d debe ser establecido por nosotros. Tras las pruebas realizadas se ha estimado que lo más eficaz es darle un valor de $d=600$. Si comenzamos la grabación a tiempo real y nuestro estado es *Normal* entonces la diferencia entre *Media_experimento* y *Media_actual* será muy pequeña ya que los valores serán muy similares y por lo tanto la simulación se mantendrá inmóvil. Sin embargo si en un determinado momento realizamos la acción *Levantar las cejas* entonces para los electrodos F3 y F4 se producirá un cambio en los valores registrados, si la diferencia entre este nuevo valor, que es almacenado en la variable *Media_actual*, y el valor registrado en *Media_experimento* es mayor que la constante d , entonces se activa la marcha, es decir la simulación comenzará a *Andar* o *Parar*.

Este procedimiento ha sido escrito en el código Matlab de forma que el usuario pueda interactuar de una forma más sencilla con la simulación a través de un menú, de cara a seleccionar sus preferencias. Es decir nada más iniciar el código éste se asegura de que hayas realizado previamente las 4 sesiones de entrenamientos:

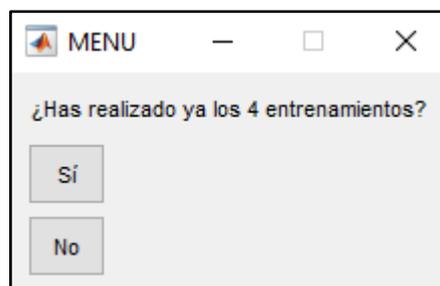


Figura 115. Menú 1 fase de entrenamientos, *Simulación_3D_Live*.

Si no se han realizado estas sesiones el código procederá a realizarlas, para ello será necesario llevar a cabo las 4 y para ello se asegura de que las realices todas:

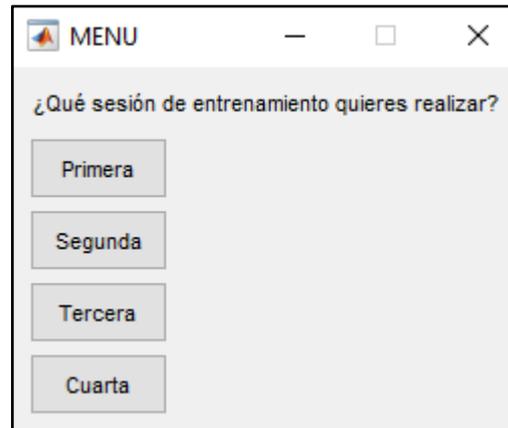


Figura 116. Menú 2 fase de entrenamientos, *Simulación_3D_Live*.

Una vez las hayas realizado todas las sesiones de entrenamiento se deben haber creado cuatro archivos tipo csv denominados *Exp.csv* almacenados numéricamente en la carpeta en la que se encuentre el código Matlab.

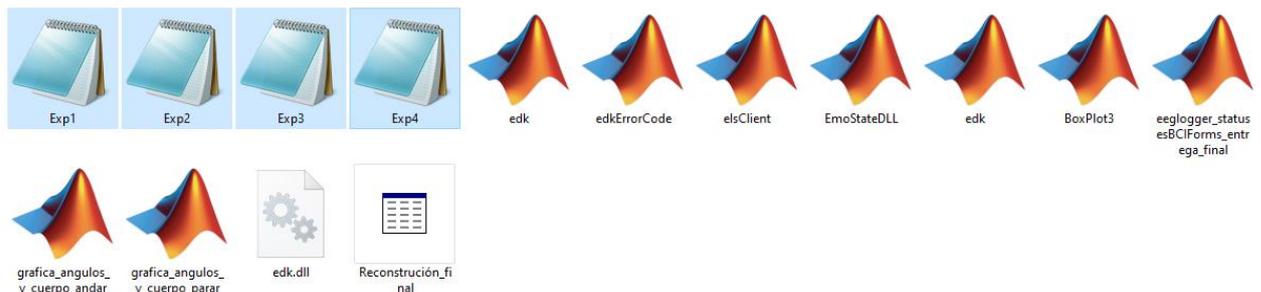


Figura 117. Contenido carpeta código final, *Simulación_3D_Live*.

Llegados a este punto estamos listos para realizar la experimentación del control de la simulación gráfica 3D de un exoesqueleto a tiempo real a través del dispositivo BCI. Para ello volvemos a ejecutar el código Matlab y cuando nos pregunte si hemos realizado los 4 entrenamientos, figura 115, contestamos que sí. En ese momento nos aparecerá el último cuadro que nos avisa del inicio del experimento.

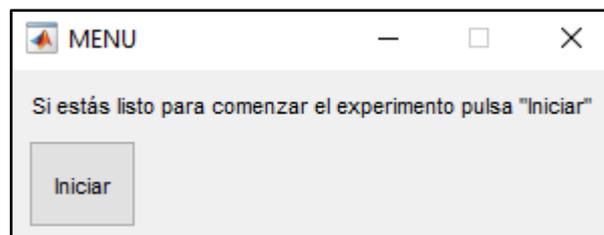


Figura 118. Menú 3 fase de experimentación, *Simulación_3D_Live*.

Cuando estemos listos pulsamos *Iniciar* y todo el código del control a tiempo real comenzará a ejecutarse.



En este segundo bloque las partes principales han sido explicadas. Todo el código se puede encontrar en los anexos, a continuación lo que haremos será explicar brevemente ciertas partes de la parte de experimentación para un mejor entendimiento del funcionamiento a niveles más profundos y específicos.

Todo el control a tiempo real está controlado por un bucle *while* que se estará ejecutando mientras un contador de la simulación no alcance el valor de 316 que se refiere a la última posición del archivo donde se encuentran almacenados los ángulos, cuyo tamaño es de 316. Este valor solo puede darse si es el final de toda la experimentación.

```
while in~=316
    %-----Creación de los estados-----%
    status_aleatory=randi([1,2]);
    if status_aleatory==1 && status_last==0 || status_aleatory
        status_set_matrix=7;
    end
    if status_aleatory==2 && status_last==0 || status_aleatory
        status_set_matrix=3;
    end
    status=status_set_matrix;

    if (status == 7)
        status_last = 7;
    elseif (status == 3)
        status_last = 3;
    end

    %Comparación de variables y ejecución de la simulación
    counter_status=counter_status+1;
    Coolcounter=end_time;
    end_time=find(output_matrix(:,20)==0,1)-1;
    if counter_status>1
        output_matrix(Coolcounter+1:end_time,[25 4:17 21]);
        for j=4:17
            i2=end_time-Coolcounter;
            Suma_actual=0;
            for im=Coolcounter+1:end_time
                Suma_actual=Suma_actual+output_matrix(im,j);
            end
            Media_intermedio(1,j)=Suma_actual/i2;
            Media_actual(1,j-2)=Media_intermedio(1,j);
        end
    end
end
```

Figura 119. Bucle *While* código final, *Simulación_3D_Live*.

Lo primero que se lleva a cabo es la creación de los estados que se irán alternando en el tiempo variando a sí los valores almacenados en cada uno a tiempo real.

A continuación se suceden los estados donde la variables *Media_actual* acaba almacenando los valores de los 14 electrodos estado a estado.

Seguidamente comienza el movimiento de la simulación:

```
%----Comienza el movimiento de la simulación----%
counter_pause=counter_status;
Mo(in)=getframe;
if estado>=1
    if ((-1)^estado)==-1 && in<=225
        grafica_angulos_y_cuerpo_andar(Angulo(in,1:6),in,frame);
    end
end
```

Figura 120. Líneas de código para el movimiento de la simulación, *Simulación_3D_Live*.

Si la variable *estado* es igual a 0 la simulación se queda quieta. Si es mayor a 0 la simulación se mueve. En este segundo caso si la variable *estado* tiene un valor impar la simulación estará controlada por el comando *Andar* y si tiene un valor par estará controlada por el comando *Parar*.

La forma de cambiar el valor de la variable *estado* es a través de si la diferencia entre los valores almacenados en *Media_experimento* y *Media_actual* son mayores que una constante *d*. Esto ya ha sido explicado anteriormente.

```
%Comparación entre datos a tiempo real y medios
d=600;
contador=0;
for j=2:15
    if Media_experimento(1,j)-Media_actual(1,j)<0 %Si es negativo
        f=(Media_experimento(1,j)-Media_actual(1,j))*(-1);
        if f>d
            contador=contador+1;
        end
    end
    if Media_experimento(1,j)-Media_actual(1,j)>0 %Si es positivo
        g=(Media_experimento(1,j)-Media_actual(1,j));
        if g>d
            contador=contador+1;
        end
    end
end
if j==15
    if counter_pause==counter_status
        if contador>=1
            estado=estado+1;
            ccc=0;
        end
    end
    counter_pause=counter_status+1;
end
end
```

Figura 121. Comparación a tiempo real, *Simulación_3D_Live*.

Este segundo bloque finalizará cuando la compilación del código salga del bucle *while* comentado anteriormente y para ello solo hay una forma de hacerlo, no utilizando el exoesqueleto durante 200 estados, dependiendo de la duración de la variable *status_time* este periodo de tiempo será mayor o menor, en el caso de ser de 1 segundo por estado tendremos que si durante la experimentación el exoesqueleto no ha sido utilizado durante 200 segundos estado éste parado, es decir siendo la variable estado igual a 0, la variable que controla el bucle tomará un valor de 316 y provocará la salida del bucle.

```
if estado==0 && ccc>=200 %Para terminar el experimento
    in=316;
end
```

Figura 122. Comando para la salida del bucle *While*, *Simulación_3D_Live*.

A grandes rasgos este es el funcionamiento principal del bloque de ejecución del proceso, formado por un entrenamiento de 4 sesiones y el control de la simulación a tiempo real. A continuación se explicará el siguiente y último bloque del código.

3. Finalización y guardado

Lo que sucede es que los valores registrados durante todo el experimento para todos los electrodos son guardados en un quito archivo tipo Exp.csv por si el contenido quiere ser utilizado.

```
%-----Finalización del experimento-----%
end_time = find(output_matrix(:,20)==0,1) - 1;
disp('Su sesión ha terminado');

%Guardado de datos
matrix_export = output_matrix(1:end_time,[26 4:17 21]);
fname = strcat(strcat('Exp',num2str(experiment_number)),'.csv');
dlmwrite(fname, matrix_export,'-append');
pause(1); %Espera de un segundo antes de acabar

%Grabado de la simulación.
f2=figure('Name','Movie');
FPS=166.66;
movie (Mo,1,FPS);
```

Figura 123. Finalización del experimento, *Simulación_3D_Live*.

Para finalizar se muestra una película que ofrece los movimientos llevados a cabo durante la simulación para un paso completo. Con esta última línea termina la experimentación y concluye así la compilación del código Matlab.

6. Discusión de resultados y conclusiones

Una vez han sido presentados y comparados todos los resultados referentes a las investigaciones que conciernen este proyecto es momento de discutir los resultados de cada bloque, haciendo un repaso a cada sección de la presente memoria. Posteriormente se han desarrollado las conclusiones de todo el trabajo realizado y para finalizar el mismo se ha llevado a cabo una valoración personal seguida de los trabajos futuros que siguen a todo lo desarrollado en el presente documento.

6.1. Discusión de los resultados

Desde el inicio del trabajo de fin de máster que se ha desarrollado han sido varios los objetivos que debían alcanzarse. Para lograr los mismos se ha dividido la investigación en distintos puntos para facilitar el correcto desarrollo de todo el proyecto. Llegados a este punto se ha realizado una recapitulación de todos los resultados obtenidos:

1. Investigación, desarrollo de una metodología y experimentación

En primer lugar fue necesario llevar a cabo una investigación sobre distintas formas de aplicación para conseguir mover el exoesqueleto o una simulación gráfica del mismo. Se debían escoger los pensamientos o actividades que serían aplicados a la experimentación. Tras realizar dicha investigación se concluyó que la *Imaginación de movimiento* es la actividad más empleada en este tipo de experimentos. Tras encontrar distintas formas de aplicación se decidió realizar una investigación más amplia de lo acordado para que la base de datos fuera más sólida.

Se realizó una primera fase de experimentación con 12 actividades formando 6 experimentos distintos a 3 sujetos diferentes, es decir que los experimentos estaban formados por 2 estados cada uno. Las actividades estudiadas pueden verse recogidas en la tabla 10, que presentamos a continuación:

Resultados						
	Exp 1	Exp 2	Exp 3	Exp 4	Exp 5	Exp 6
Motor	Pensar andar	Andar	Multiplicación	Canción	Lanzar	Flecha izq
Paro	Pensar parar	Parar	Relajación	Colores	Pensar lanzar	Inicial palabra

Tabla 10. Distribución actividades según experimentos.

Tras llevar a cabo la experimentación se obtuvieron los resultados recogidos en la tabla 26. Volvemos a mostrar dicha tabla a continuación:

Experimento 5	77%
Experimento 6	74%
Experimento 4	68%
Experimento 2	68%
Experimento 3	67%
Experimento 1	56%

En líneas generales los resultados fueron satisfactorios ya que desde un primer momento se movían en torno al 70% de acierto para la primera fase de la investigación.

Tabla 26. Resultados de los experimentos.



Si mostramos los resultados para cada actividad en particular vemos como hay ciertas actividades con muy buen porcentaje de acierto. Los valores de cada par de actividades se pueden encontrar en la tabla 27, que recogemos a continuación:

Multiplicar	87%
Lanzar y recoger pelota	83%
Pensar en parar	83%
Mover mano izquierda	77%
Pensar en palabras	72%
Andar	72%
Pensar en lanzar pelota	70%
Pensar en colores	70%
Tararear una canción	67%
Parar	65%
Relajación	48%
Pensar en andar	28%

La 2 actividades que finalmente han sido elegidas para el testeo sobre la simulación 3D del exoesqueleto eran las que desde un principio se situaban con mejores porcentajes de acierto, es decir *Multiplicar* y *Lanzar y recoger una pelota*, por lo que desde el inicio de esta investigación ya se comenzaba a vislumbrar cuales serían las mejores formas para una aplicación final.

Tabla 27. Resultados de las actividades.

De forma general se concluyó para esta primera fase de experimentación que los resultados obtenidos eran buenos. Situando en líneas generales en un 68,45% el porcentaje de acierto total teniendo en cuenta todas las actividades, experimentos y sujetos juntos.

Total	
Global	68,45%

Tabla 28. Resultado Global.

2. Ajuste y mejora del procedimiento de registro de las señales EEG

Obtenida la base de datos llegó el momento de mejorar los resultados ya que lo que se pretendía era encontrar un experimento que nos aportase actividades con porcentajes de acierto de entre el 80 y el 90% de acierto. Para mejorar estos resultados fue necesario aplicar ciertas reglas heurísticas que nos aportaran una mejora en el acierto. Se llevaron a cabo 4 formas de aplicación que nos proporcionaran las mejoras buscadas, los cambios aplicados fueron:

- Variación de tiempo de los experimentos.
- Modificación de la aleatoriedad de las imágenes mostradas por pantalla.
- Mejora del código de procesado.
- Variación de los experimentos.

Con la primera se testeó si aumentar o disminuir los tiempos de experimentación mejoraba los resultados. En total se probaron los tiempos de 20, 15 y 5 segundos por imagen según cada experimento. Los resultados mostraron una mejora general al aumentar el tiempo de experimentación ya que los sujetos podían dedicar más tiempo concentrados en una imagen sin tener que estar variando dicha concentración entre dos pensamientos distintos, aunque es necesario comentar que aumentar más de 15 segundos no implica una mejora segura.

El segundo cambio se aplicó desde el inicio, era algo que en investigaciones pasadas no se incorporó y para llevar a cabo ésta sí se introdujo en el código. Lo que provoca la eliminación de la aleatoriedad es una mejora en los resultados debido a que el sujeto puede anticipar mejor la imagen que está por aparecer mejorando así su acierto final.



Con el tercer cambio se introdujo un filtrado en el código de procesado, mediante dicho filtrado se eliminaba el primer valor almacenado justo tras realizar el cambio de una imagen a otra. Este cambio provocó una mejora en todos los experimentos realizados.

Con el cuarto y último cambio se observó que variar las actividades que formaban los experimentos entre sí no cambiaba los porcentajes de acierto por lo que las peores actividades se podían desechar y formar así experimentos con las mejores actividades.

Finalmente tras aplicar todos los cambios se obtuvieron los resultados presentados en la tabla 74. Recogemos dicha tabla a continuación:

Actividades	15 segundos		20 segundos		5 segundos	
	Sin filtrado	Con filtrado	Sin filtrado	Con filtrado	Sin filtrado	Con filtrado
Multiplicar	87%	90%	84%	87%	88%	94%
Lanzar y recoger pelota	83%	87%	81%	85%	79%	84%
Pensar en parar	83%	83%	81%	84%	75%	81%
Mover mano izquierda	77%	79%	80%	83%	74%	78%
Pensar en palabras	72%	74%	79%	80%	64%	67%
Andar	72%	73%	74%	74%	63%	66%
Pensar en lanzar pelota	70%	71%	73%	73%	62%	65%
Pensar en colores	70%	70%	66%	68%	58%	60%
Tararear una canción	67%	68%	66%	66%	56%	57%
Parar	65%	66%	66%	65%	54%	56%
Relajación	48%	47%	61%	60%	53%	56%
Pensar en andar	28%	30%	28%	50%	43%	45%

Tabla 74. Resultados finales según actividad.

Tras obtener todos los resultados antes y después de realizar los cambios propuestos se observa una mejora evidente en los resultados. Por lo que las actividades que fueron propuestas para la experimentación final con la simulación 3D del exoesqueleto fueron las 2 con mejores resultados, es decir *Multiplicación* y *Lanzar y recoger una pelota*, cuyos resultados generales se recogen en la tabla 83:

Resultados	
Multiplicar	90%
Lanzar y recoger pelota	86%

Tabla 83. Resultados mejor experimento.

3. Configuración e implementación del módulo de generación de referencias

Una vez fue conocido el experimento que sería aplicado en la investigación final fue necesario configurar el módulo de generación de referencias, lo que nos permitiría así hacer uso de la simulación 3D de forma correcta.

Para llevar a cabo dicha configuración se creó un código Matlab que nos permitía crear un paso completo asignando los valores angulares a cada posición del exoesqueleto de forma correcta.



Tras obtener el archivo con los valores angulares se realizó un suavizado para mejorar la transición entre posición y posición dando así lugar a la creación de un archivo Matlab que contiene todos los valores necesarios para ejecutar eficazmente las acciones de Andar y Parar para la simulación gráfica de un exoesqueleto.

Esta simulación gráfica fue modificada para la posterior implementación del módulo de generación de referencias en la misma. Esta implementación se llevó a cabo de forma satisfactoria a través de la creación de una serie de códigos Matlab mediante los cuales se testearon diferentes situaciones de ejecución para el control de la simulación 3D a través de cualquier pensamiento, dando así lugar a la conclusión de esta tercera fase.

4. Aplicación al exoesqueleto y testeo

En la última fase, ya con el módulo de generación de referencias correctamente configurado e implementado a la simulación, se llevó a cabo el testeo para el control de dicha simulación mediante las dos actividades elegidas en la segunda fase, es decir *Multiplicación* para poner a andar la simulación 3D y *Lanzar y recoger una pelota* para pararla.

Este control debía realizarse a tiempo real, es decir un control instantáneo, para ello se escribió un código Matlab denominado *Simulación_3D_Live* y se llevó a cabo el testeo. Los resultados fueron desfavorables ya que no se consiguió alcanzar dicho control por lo que se llevó a cabo la búsqueda de una solución.

Tras esta búsqueda se concluyó que el dispositivo BCI empleado en este proyecto no discierne entre pensamientos de una forma sencilla a la hora de querer controlar el exoesqueleto a tiempo real, sí lo hace tras un procesado pero no de forma instantánea. Por lo que se llevó a cabo una nueva investigación para conocer qué forma es la más adecuada y se concluyó que el movimiento de *Levantar las cejas* presentaba unos resultados esperanzadores de cara a conseguir este control a tiempo real. Esta acción permite controlar la simulación únicamente con 3 electrodos.

Rangos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Lev. 2 cejas intermitente	4492	4034	4115	4269	4202	4646	4428	4489	3664	4103	3954	4078	4316	4091
	4620	4165	5563	4332	4335	4736	4539	4636	3725	4231	4089	5656	4382	4318
General	4522	4063	4513	4273	4231	4659	4440	4543	3637	4144	3976	4682	4323	4177
	4568	4138	4576	4335	4315	4721	4526	4604	3731	4226	4035	4738	4400	4243

Tabla 104. Comparación resultados actividad final.

Los electrodos F3 (3) y F4 (12) presentan una diferencia sustancial con respecto a los valores eléctricos que se suelen registrar al pensar para el resto de actividades.

Se realizó una mejora en la configuración del código *Simulación_3D_Live* para que pudiera ser aplicada esta actividad y finalmente se llevó a cabo dicho control de forma eficaz. Se puede observar dicho control en el siguiente video:

Control Simulación 3D mediante BCI : <https://youtu.be/3bV-c0ifj3A>



6.2. Conclusiones finales

Tras haber presentados todos los resultados y haber discutido el trabajo realizado vamos a llevar a cabo las conclusiones finales de este trabajo de fin de máster. Desde un principio el objetivo principal del proyecto ha sido el de conseguir controlar un exoesqueleto con el dispositivo BCI *Emoc* a tiempo real. Debido a las circunstancias ocasionadas por la pandemia mundial provocada por el virus *SARS-CoV-2*, comúnmente conocido como *COVID-19*, este objetivo se ha visto modificado para en lugar de realizar el control de un exoesqueleto físico se haga sobre la simulación gráfica 3D de dicho exoesqueleto. Llegados a este punto podemos confirmar que el control se ha llevado a cabo de forma satisfactoria 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. Investigación, desarrollo de una metodología y experimentación.

Se ha realizado con éxito la investigación sobre distintas formas para el control de la simulación gráfica, ofreciendo así las actividades a testear durante la experimentación. Ha quedado establecida la metodología para la experimentación y se ha llevado a cabo con éxito la misma.

2. Ajuste y mejora del procedimiento de registro de las señales EEG.

Era necesario obtener formas de aplicación con porcentajes de acierto situados entre el 80 y 90% de acierto, tras aplicar las mejoras pertinentes a todo el proceso se han obtenido experimentos con valores de acierto del 86 y 90% para las mejores actividades que componen dicho experimento, por lo que se ha alcanzado el objetivo principal de toda esta primera fase de experimentación.

3. Configuración e implementación del módulo de generación de referencias.

El módulo de generación de referencias ha sido correctamente configurado, obteniendo un archivo que posee los valores angulares para cada una de las posiciones que componen un paso completo del exoesqueleto. Se ha testeado sobre una simulación gráfica 3D perfectamente configurada y ha sido posible una correcta implementación del módulo de generación de referencias sobre dicha simulación, por lo que se consigue también este objetivo establecido al inicio del proyecto.

4. Aplicación al exoesqueleto y testeo.

Se ha realizado con éxito la correcta aplicación del código Matlab final, denominado *Simulación_3D_Live*, sobre la simulación del exoesqueleto. La actividad encargada de dicho control ha sido *Levantar las cejas*, permitiendo así un control completo de la simulación de forma instantánea, es decir a tiempo real, siendo éste el objetivo principal a cumplir desde un inicio.

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



6.3. Valoración personal y trabajos futuros

Tras realizar el presente trabajo de fin de máster me gustaría comentar que ha sido un proceso laborioso. He tratado de completar cada fase, cada tarea de la mejor forma posible. Las investigaciones y los experimentos llevados a cabo han requerido de tiempo y esfuerzo para ser completados con éxito. Se han presentado todo tipo de dificultades a lo largo del trabajo pero con paciencia y dedicación se han superado una a una hasta conseguir alcanzar los objetivos que se plantearon al comienzo del proyecto.

Se ha tratado de cumplir no solo con lo básico si no de ampliar los estudios y las comparaciones que debían llevarse a cabo. La base de datos generada es mucho más completa de la que se me indicó conseguir desde un inicio y los resultados alcanzados son esperanzadores de cara a una futura implementación total en un exoesqueleto físico.

Las conclusiones alcanzadas son muy interesantes pues se han estudiado distintas formas de control del exoesqueleto nunca antes estudiadas. Se ha llevado a cabo la creación de un código que permite el control a tiempo real de una simulación, se ha testeado y se ha comprobado que funciona correctamente, además realizando dicho control con únicamente 3 electrodos, por lo que resulta asombroso ver cómo, a través del trabajo diario, cosas que parecen imposibles o muy difíciles de alcanzar en un principio se vuelven realidad con esfuerzo y dedicación. Las sensaciones que me quedan al completar este trabajo son muy buenas.

De cara al futuro se podría realizar una investigación sobre el registro de señales a tiempo real. El código que he creado en este proyecto puede ser usado para ello, centrandolo en la búsqueda de observar diferencias en las señales eléctricas recogidas por los electrodos al realizar distintos pensamientos. Buscar nuevas formas de control instantáneo del exoesqueleto, formas diferentes a *Levantar las cejas*, sumergirse en los datos obtenidos durante el registro para encontrar una diferencia que consiga discernir entre pensamientos usando el dispositivo *Emoc*. También se puede emplear un dispositivo BCI con mejores características que posibiliten el control del exoesqueleto a través de otros pensamientos.

Llegado el momento y cuando la situación lo permita se podría aplicar el código escrito en este trabajo, *Simulación_3D_Live*, sobre un exoesqueleto físico ya que es compatible con el mismo, siendo necesario eso sí una adaptación que cambie la simulación gráfica por la versión física.

Antes de dar por concluido el presente trabajo de fin de máster me gustaría agradecer a mi director y codirector del proyecto el trato recibido durante todo el proyecto, ya que me han dado completa libertad a la hora de trabajar. También han sabido adaptar los objetivos que se pretendían alcanzar desde un inicio cuando la situación cambió debido a la pandemia del Coronavirus, adaptando el objetivo principal de este trabajo, pasando de tratar de conseguir un control real de un exoesqueleto físico al control de una simulación gráfica debido a la imposibilidad de entrar al laboratorio de la universidad, dándome así la opción de poder continuar con este trabajo. Por lo que ya para finalizar me gustaría agradecer enormemente su comprensión y apoyo durante todo el proyecto.



7. Bibliografía

- [1] Francisco Javier Muñoz Sánchez “Construcción de una nueva interfaz cerebro-computador a partir de una de bajo coste (Emotiv Epoc)”, Octubre de 2014.
- [2] Antonio Hernández Díaz “Configuración de un banco de pruebas para la evaluación del funcionamiento de un exoesqueleto de miembros inferiores”, Octubre de 2015.
- [3] Diego José Ramos González “Identificación de patrones de marcha mediante un análisis de movimiento para su aplicación a un exoesqueleto”, Mayo de 2020.
- [4] Félix Laencina Escobar “Predicción del pensamiento motor mediante señales EEG”, Abril de 2019.
- [5] Wilms, C., Rodríguez-Ugarte, M., Ibáñez, E., & José María Azorín Poveda. “Exoesqueleto de mano impreso en 3D de bajo coste controlado por BCI”. Actas de las XXXIX Jornadas de Automática, Badajoz, 5-7 de septiembre de 2018.
- [6] Página web oficial de Bionic Ibérica S.A. y su kit denominado *EASYCAP*:
<http://www.bionic.es/?portfolio=easycap>
- [7] Óscar Fernández-Ballesteros, Javier Belmar, José María Azorín Poveda, Eduardo Ibáñez “Exoesqueleto de bajo coste controlado por señales EMG y EEG orientado a terapias de rehabilitación” 2019.
- [8] María Rodríguez-Ugarte, Eduardo Ibáñez, M. Ortiz, José Manuel Cano, J. A. Flores, José María Azorín Poveda, “Influencia del exoesqueleto de miembro inferior en señales EEG” Septiembre 2018.
- [9] Francisco Javier Muñoz Sánchez “Construcción de una nueva interfaz Cerebro-Computador a partir de una de bajo coste”, Octubre de 2014.
- [10] Joaquín Alcázar, Andrés Úbeda, Álvaro Costa, Eduardo Ibáñez y José María Azorín Poveda “Decodificación de la marcha humana mediante señales EEG” Septiembre de 2014
- [11] Winnie K. Y. So, Savio W. H. Wong, Joseph N. Mak, Rosa H. M. Chan “An evaluation of mental workload with frontal EEG” Abril de 2017.
- [12] Fernando Flórez Revuelta “Desarrollo de un BCI de bajo coste basado en máquinas de vector soporte” Junio de 2011.
- [13] S. G. Eraldemir, Ü. Kiliç, M. Keles, M. E. Demirkol, E. Yildirim, L. Tamam “Classification of EEG signals in depressed patients” Enero de 2020.



[14] Sang-Yeong Jo and Jin-Woo Jeong “Prediction of visual memorability with EEG signals” Mayo de 2020.

[15] Martin Strmiska & Zuzana Koudelkova “Analysing EEG signals for mathematical computation” 2019.

[16] Sandra Cano, Nelson Araujo, Cristian Guzmán, Cristian Rusu and Sergio Albiol Pérez “Low cost assessment of user experience through EEG” 2017.

[17] 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.



8. Anexos

En esta última sección se puede encontrar recogido el código completo para el control de la simulación gráfica 3D del exoesqueleto a tiempo real. Sus principales funciones han sido detalladas a lo largo de esta memoria por lo que únicamente se adjunta el código para una recopilación completa del mismo.

A continuación se puede observar el código Matlab *Simulación_3D_Live*:

```
%Autor del código: Félix Laencina Escobar.

%clear all;
close all;

%-----Señal Reconstruida-----%
load Reconstrucción_final %Se cargan los valores de movimiento
frame=length(Ang); %Tamaño de la reconstrucción
AngRad(1:frame,1:6)=(Ang(1:frame,1:6))*pi/180; %Pasar de grados a radianes

%Conversión a ángulos
Angulo(1:frame,1)=AngRad(1:frame,3);
Angulo(1:frame,2)=AngRad(1:frame,2);
Angulo(1:frame,3)=AngRad(1:frame,1);
Angulo(1:frame,4)=AngRad(1:frame,6);
Angulo(1:frame,5)=AngRad(1:frame,5);
Angulo(1:frame,6)=AngRad(1:frame,4);

%-----Información de registro-----%
structs.InputSensorDescriptor_struct.members=struct('channelId', 'EE_InputC
enuminfo.EE_DataChannels_enum=struct('ED_COUNTER',0,'ED_INTERPOLATED',1,'ED
enuminfo.EE_CognitivTrainingControl_enum=struct('COG_NONE',0,'COG_START',1,
enuminfo.EE_ExpressivAlgo_enum=struct('EXP_NEUTRAL',1,'EXP_BLINK',2,'EXP_WI
enuminfo.EE_ExpressivTrainingControl_enum=struct('EXP_NONE',0,'EXP_START',1
enuminfo.EE_ExpressivThreshold_enum=struct('EXP_SENSITIVITY',0);
enuminfo.EE_CognitivEvent_enum=struct('EE_CognitivNoEvent',0,'EE_CognitivTr
enuminfo.EE_EmotivSuite_enum=struct('EE_EXPRESSIV',0,'EE_AFFECTIV',1,'EE_CC
enuminfo.EE_ExpressivEvent_enum=struct('EE_ExpressivNoEvent',0,'EE_Expressi
enuminfo.EE_CognitivAction_enum=struct('COG_NEUTRAL',1,'COG_PUSH',2,'COG_PU
enuminfo.EE_InputChannels_enum=struct('EE_CHAN_CMS',0,'EE_CHAN_DRL',1,'EE_C
enuminfo.EE_ExpressivSignature_enum=struct('EXP_SIG_UNIVERSAL',0,'EXP_SIG_T
enuminfo.EE_Event_enum=struct('EE_UnknownEvent',0,'EE_EmulatorError',1,'EE_
enuminfo.EE_AffectivAlgo_enum=struct('AFF_EXCITEMENT',1,'AFF_MEDITATION',2,

DataChannels = enuminfo.EE_DataChannels_enum;
DataChannelsNames = {'ED_COUNTER','ED_INTERPOLATED','ED_RAW_CQ','ED_AF3','E
```



```
%-----Comienza el proceso-----%
Entrenamiento=menu('¿Has realizado ya los 4 entrenamientos?','Sí','No');
if Entrenamiento==1
    Iniciar=menu('Si estás listo para comenzar el experimento pulsa "Inicia
    if Iniciar==1
        for Calculador_de_precision=1
            load Exp1.csv
            load Exp2.csv
            load Exp3.csv
            load Exp4.csv
            a1=1;
            x=length(Exp1)/16;
            a2=x;
            a3=x*2;
            a4=x*3;
            a5=x*4;
            a6=x*5;
            a7=x*6;
            a8=x*7;
            a9=x*8;
            a10=x*9;
            a11=x*10;
            a12=x*11;
            a13=x*12;
            a14=x*13;
            a15=x*14;
            a16=x*15;
            a17=x*16;

            for columna=2:15
                Suma1=0;
                Suma2=0;
                Suma3=0;
                Suma4=0;
                for linea=a1:a2
                    Suma1=Suma1+Exp1(linea,columna);
                    Medial=Suma1/a2;

                    Suma2=Suma2+Exp2(linea,columna);
                    Media2=Suma2/a2;

                    Suma3=Suma3+Exp3(linea,columna);
                    Media3=Suma3/a2;

                    Suma4=Suma4+Exp4(linea,columna);
                    Media4=Suma4/a2;
                end
                Media_1=(Medial+Media2+Media3+Media4)/4;
            end
        end
    end
end
```



```
%Segundo estado
Suma1=0;
Suma2=0;
Suma3=0;
Suma4=0;
for linea=a2+1:a3
    Suma1=Suma1+Exp1(linea,columna);
    Media1=Suma1/a2;

    Suma2=Suma2+Exp2(linea,columna);
    Media2=Suma2/a2;

    Suma3=Suma3+Exp3(linea,columna);
    Media3=Suma3/a2;

    Suma4=Suma4+Exp4(linea,columna);
    Media4=Suma4/a2;
end
Media_2=(Media1+Media2+Media3+Media4)/4;

%Tercer estado
Suma1=0;
Suma2=0;
Suma3=0;
Suma4=0;
for linea=a3+1:a4
    Suma1=Suma1+Exp1(linea,columna);
    Media1=Suma1/a2;

    Suma2=Suma2+Exp2(linea,columna);
    Media2=Suma2/a2;

    Suma3=Suma3+Exp3(linea,columna);
    Media3=Suma3/a2;

    Suma4=Suma4+Exp4(linea,columna);
    Media4=Suma4/a2;
end
Media_3=(Media1+Media2+Media3+Media4)/4;

%Cuarto estado
Suma1=0;
Suma2=0;
Suma3=0;
Suma4=0;
```



```
for linea=a4+1:a5
    Suma1=Suma1+Exp1(linea,columna);
    Media1=Suma1/a2;

    Suma2=Suma2+Exp2(linea,columna);
    Media2=Suma2/a2;

    Suma3=Suma3+Exp3(linea,columna);
    Media3=Suma3/a2;

    Suma4=Suma4+Exp4(linea,columna);
    Media4=Suma4/a2;
end
Media_4=(Media1+Media2+Media3+Media4)/4;

%Quinto estado
Suma1=0;
Suma2=0;
Suma3=0;
Suma4=0;
for linea=a5+1:a6
    Suma1=Suma1+Exp1(linea,columna);
    Media1=Suma1/a2;

    Suma2=Suma2+Exp2(linea,columna);
    Media2=Suma2/a2;

    Suma3=Suma3+Exp3(linea,columna);
    Media3=Suma3/a2;

    Suma4=Suma4+Exp4(linea,columna);
    Media4=Suma4/a2;
end
Media_5=(Media1+Media2+Media3+Media4)/4;

%Sexto estado
Suma1=0;
Suma2=0;
Suma3=0;
Suma4=0;
for linea=a6+1:a7
    Suma1=Suma1+Exp1(linea,columna);
    Media1=Suma1/a2;

    Suma2=Suma2+Exp2(linea,columna);
    Media2=Suma2/a2;

    Suma3=Suma3+Exp3(linea,columna);
    Media3=Suma3/a2;
```



```
        Suma4=Suma4+Exp4 (linea, columna) ;
        Media4=Suma4/a2;
    end
    Media_6=(Medial+Media2+Media3+Media4)/4;

    %Séptimo estado
    Suma1=0;
    Suma2=0;
    Suma3=0;
    Suma4=0;
    for linea=a7+1:a8
        Suma1=Suma1+Exp1 (linea, columna) ;
        Medial=Suma1/a2;

        Suma2=Suma2+Exp2 (linea, columna) ;
        Media2=Suma2/a2;

        Suma3=Suma3+Exp3 (linea, columna) ;
        Media3=Suma3/a2;

        Suma4=Suma4+Exp4 (linea, columna) ;
        Media4=Suma4/a2;
    end
    Media_7=(Medial+Media2+Media3+Media4)/4;

    %Octavo estado
    Suma1=0;
    Suma2=0;
    Suma3=0;
    Suma4=0;
    for linea=a8+1:a9
        Suma1=Suma1+Exp1 (linea, columna) ;
        Medial=Suma1/a2;

        Suma2=Suma2+Exp2 (linea, columna) ;
        Media2=Suma2/a2;

        Suma3=Suma3+Exp3 (linea, columna) ;
        Media3=Suma3/a2;

        Suma4=Suma4+Exp4 (linea, columna) ;
        Media4=Suma4/a2;
    end
    Media_8=(Medial+Media2+Media3+Media4)/4;

    %Noveno estado
    Suma1=0;
    Suma2=0;
    Suma3=0;
    Suma4=0;
    for linea=a9+1:a10
```



```
        Suma1=Suma1+Exp1 (linea, columna);
        Media1=Suma1/a2;

        Suma2=Suma2+Exp2 (linea, columna);
        Media2=Suma2/a2;

        Suma3=Suma3+Exp3 (linea, columna);
        Media3=Suma3/a2;

        Suma4=Suma4+Exp4 (linea, columna);
        Media4=Suma4/a2;
    end
    Media_9=(Media1+Media2+Media3+Media4)/4;
    %Décimo estado
    Suma1=0;
    Suma2=0;
    Suma3=0;
    Suma4=0;
    for linea=a10+1:a11
        Suma1=Suma1+Exp1 (linea, columna);
        Media1=Suma1/a2;

        Suma2=Suma2+Exp2 (linea, columna);
        Media2=Suma2/a2;
        Suma3=Suma3+Exp3 (linea, columna);
        Media3=Suma3/a2;

        Suma4=Suma4+Exp4 (linea, columna);
        Media4=Suma4/a2;
    end
    Media_10=(Media1+Media2+Media3+Media4)/4;
    %Undécimo estado
    Suma1=0;
    Suma2=0;
    Suma3=0;
    Suma4=0;
    for linea=a11+1:a12
        Suma1=Suma1+Exp1 (linea, columna);
        Media1=Suma1/a2;

        Suma2=Suma2+Exp2 (linea, columna);
        Media2=Suma2/a2;

        Suma3=Suma3+Exp3 (linea, columna);
        Media3=Suma3/a2;

        Suma4=Suma4+Exp4 (linea, columna);
        Media4=Suma4/a2;
    end
end
```



```
Media_11=(Medial+Media2+Media3+Media4)/4;

%Decimo segundo estado
Suma1=0;
Suma2=0;
Suma3=0;
Suma4=0;
for linea=a12+1:a13
    Suma1=Suma1+Exp1(linea,columna);
    Medial=Suma1/a2;

    Suma2=Suma2+Exp2(linea,columna);
    Media2=Suma2/a2;

    Suma3=Suma3+Exp3(linea,columna);
    Media3=Suma3/a2;

    Suma4=Suma4+Exp4(linea,columna);
    Media4=Suma4/a2;
end
Media_12=(Medial+Media2+Media3+Media4)/4;

%Decimo tercero estado
Suma1=0;
Suma2=0;
Suma3=0;
Suma4=0;
for linea=a13+1:a14
    Suma1=Suma1+Exp1(linea,columna);
    Medial=Suma1/a2;

    Suma2=Suma2+Exp2(linea,columna);
    Media2=Suma2/a2;

    Suma3=Suma3+Exp3(linea,columna);
    Media3=Suma3/a2;

    Suma4=Suma4+Exp4(linea,columna);
    Media4=Suma4/a2;
end
Media_13=(Medial+Media2+Media3+Media4)/4;

%Decimo cuarto estado
Suma1=0;
Suma2=0;
Suma3=0;
Suma4=0;
for linea=a14+1:a15
    Suma1=Suma1+Exp1(linea,columna);
    Medial=Suma1/a2;
```



```
        Suma2=Suma2+Exp2 (linea, columna);
        Media2=Suma2/a2;

        Suma3=Suma3+Exp3 (linea, columna);
        Media3=Suma3/a2;

        Suma4=Suma4+Exp4 (linea, columna);
        Media4=Suma4/a2;
    end
    Media_l4= (Medial+Media2+Media3+Media4)/4;
    %Decimo quinto estado
    Suma1=0;
    Suma2=0;
    Suma3=0;
    Suma4=0;
    for linea=a15+1:a16
        Suma1=Suma1+Exp1 (linea, columna);
        Medial=Suma1/a2;

        Suma2=Suma2+Exp2 (linea, columna);
        Media2=Suma2/a2;

        Suma3=Suma3+Exp3 (linea, columna);
        Media3=Suma3/a2;
        Suma4=Suma4+Exp4 (linea, columna);
        Media4=Suma4/a2;
    end
    Media_l5= (Medial+Media2+Media3+Media4)/4;
    %Decimo sexto estado
    Suma1=0;
    Suma2=0;
    Suma3=0;
    Suma4=0;
    for linea=a16+1:a17
        Suma1=Suma1+Exp1 (linea, columna);
        Medial=Suma1/a2;

        Suma2=Suma2+Exp2 (linea, columna);
        Media2=Suma2/a2;

        Suma3=Suma3+Exp3 (linea, columna);
        Media3=Suma3/a2;

        Suma4=Suma4+Exp4 (linea, columna);
        Media4=Suma4/a2;
    end
    Media_l6= (Medial+Media2+Media3+Media4)/4;
    Media_final=(Media_l+Media_2+Media_3+Media_4+Media_5+Media_6+Media_
    Media_experimento(1,1)=3;
    Media_experimento(1,columna)=Media final;
```



```
end
end
experiment_number = 0;

%Valores de grabación
rectime = 1;
acqtime = 1000; %Tiempo de experimentación
sampFreq = 128; %Frecuencia de muestreo
status_time = 0.1; %Tiempo por estado
status_samples = status_time*sampFreq; %Tamaño de cada estado
samples_taken = 0; %Número de muestras almacenadas
counter_status = 0; %Contador de estados
status_last = 0; %Último estado

%Comprobación de que la librería ha sido cargada
if ~libisloaded('edk')
    [nf, w] = loadlibrary('edk','edk','addheader', 'EmoStateDLI');
    disp('EDK library loaded');
    libfunctionsview('edk');
else
    disp('EDK library already loaded');
end

default = int8(['Emotiv Systems-5' 0]);
AllOK = calllib('edk','EE_EngineConnect','Emotiv Systems-5');

eEvent = calllib('edk','EE_EmoEngineEventCreate');
eState = calllib('edk','EE_EmoStateCreate');

hData = calllib('edk','EE_DataCreate');
calllib('edk','EE_DataSetBufferSizeInSec',rectime);

readytocollect = false;

%Inicialización de contadores
cnt = 0;
Coolcounter=0;
end_time=0;
in=1; %Debe ser 1
estado=0;
ccc=0;
jjj=0;

%Se muestra la simulación
grafica_angulos_y_cuerpo_parar(Angulo(in,1:6),in,frame);
Mo(in)=getframe;

%Inicialización de valores de salida
output_matrix = zeros(acqtime*sampFreq,length(DataChannelsNames));
nS = zeros(acqtime*sampFreq,1);
```



```
%-----Comienza el registro-----%
disp('Prepárate para grabar tu sesión')
pause(1) %Espera de 1 segundo
while in~=316
    %-----Creación de los estados-----%
    status_aleatory=randi([1,2]);
    if status_aleatory==1 && status_last==0 || status_aleatory=
        status_set_matrix=7;
    end
    if status_aleatory==2 && status_last==0 || status_aleatory=
        status_set_matrix=3;
    end
    status=status_set_matrix;

    if (status == 7)
        status_last = 7;
    elseif (status == 3)
        status_last = 3;
    end

    %Comparación de variables y ejecución de la simulación
    counter_status=counter_status+1;
    Coolcounter=end_time;
    end_time=find(output_matrix(:,20)==0,1)-1;
    if counter_status>1
        output_matrix(Coolcounter+1:end_time,[25 4:17 21]);
        for j=4:17
            i2=end_time-Coolcounter;
            Suma_actual=0;
            for im=Coolcounter+1:end_time
                Suma_actual=Suma_actual+output_matrix(im,j);
            end
            Media_intermedio(1,j)=Suma_actual/i2;
            Media_actual(1,j-2)=Media_intermedio(1,j);
        end
        %Recogemos los valores en tiempo real para cada estado
        for nn=2:15
            resultados_final(counter_status,nn)=Media_actual(1,
        end
        %----Comienza el movimiento de la simulación----%
        counter_pause=counter_status;
        Mo(in)=getframe;
        if estado>=1
            if ((-1)^estado)==-1 && in<=225
                grafica_angulos_y_cuerpo_andar(Angulo(in,1:6),i
            if in==225
                Ang(72,1)=Ang(225,1)-1;
                Ang(72,2)=Ang(225,2)-4;
                Ang(72,3)=Ang(225,3)+1;
                Ang(72,4)=Ang(225,4);
```



```
    Ang(72,5)=Ang(225,5)+3;
    Ang(72,6)=Ang(225,6)-0.5;

    AngRad(1:frame,1:6)=(Ang(1:frame,1:6))*pi/1

    Angulo(1:frame,1)=AngRad(1:frame,3);
    Angulo(1:frame,2)=AngRad(1:frame,2);
    Angulo(1:frame,3)=AngRad(1:frame,1);
    Angulo(1:frame,4)=AngRad(1:frame,6);
    Angulo(1:frame,5)=AngRad(1:frame,5);
    Angulo(1:frame,6)=AngRad(1:frame,4);

    in=71;
end
in=in+1;
if in==73 %Hace que el 72 vuelva a sus valores
    Ang(72,1)=(14.1886791421337);
    Ang(72,2)=(1.13085686582181);
    Ang(72,3)=(9.87212150503456);
    Ang(72,4)=(-5.5553681532934);
    Ang(72,5)=(10.8634405519089);
    Ang(72,6)=(-4.52266171740668);
end
end
if ((-1)^estado)==-1 && in>225 %En el caso de que e
grafica_angulos_y_cuerpo_parar(Angulo(in,1:6),i
in=in+1;
if in==315
    in=1;
    estado=0;
    ccc=7;
end
end
if ((-1)^estado)==1
grafica_angulos_y_cuerpo_parar(Angulo(in,1:6),i
    if in<=157 && in~=1
        in=in-1;
        if in==1
            estado=0;
            ccc=7;
        end
    end
end
if in>=158 && in~=316
    in=in+1;
    if in==315
        in=1;
        estado=0;
        ccc=7;
    end
end
```



```
        end
    end
    counter_pause=counter_status+1;
end

if estado==0 && ccc>=200 %Para terminar el experimento
    in=316;
end

%estado
%counter_status
ccc=ccc+1;

if ccc>=7 %debe ser 7
    counter_pause=counter_status;
end

%Comparación entre datos a tiempo real y medios
d=900;
contador=0;
for j=2:15
    if Media_experimento(1,j)-Media_actual(1,j)<0 %Si e
        f=(Media_experimento(1,j)-Media_actual(1,j))*(-
        if f>d
            contador=contador+1;
        end
    end
    if Media_experimento(1,j)-Media_actual(1,j)>0 %Si e
        g=(Media_experimento(1,j)-Media_actual(1,j));
        if g>d
            contador=contador+1;
        end
    end
end

if j==15
    if counter_pause==counter_status
        if contador>=1
            estado=estado+1;
            ccc=0;
        end
    end
    counter_pause=counter_status+1;
end
end
Media_experimento(1,4)-Media_actual(1,4)
Media_experimento(1,13)-Media_actual(1,13)
end

state = calllib('edk','EE_EngineGetNextEvent',eEvent);
eventType = calllib('edk','EE_EmoEngineEventGetType',eEvent
```



```
        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,t
            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') ;
            %Actualización del número de muestras desde el comiezc
            samples_taken = samples_taken + nSamplesTaken;
            if (nSamplesTaken ~= 0)
                data = libpointer('doublePtr',zeros(1,nSamplesTaken
                for i = 1:length(fieldnames(enuminfo.EE_DataChannel
                    calllib('edk','EE_DataGet',hData, DataChannels.
                    data_value = get(data,'value');
                    output_matrix(cnt+1:cnt+length(data_value),i) =
                end
                %Nueva columna para la matriz de salida según el es
                output_matrix(cnt+1:cnt+length(data_value),i+1) = s
                nS(cnt+1) = nSamplesTaken;
                cnt = cnt + length(data_value);
            end
        end
    end
end

%-----Aquí comienzan los entrenamientos-----%
elseif Entrenamiento==2
    Experimento=menu('¿Qué sesión de entrenamiento quieres realizar?','Prim
    if Experimento==1
        experiment_number = 1;
    elseif Experimento==2
        experiment_number = 2;
    elseif Experimento==3
        experiment_number = 3;
    elseif Experimento==4
        experiment_number = 4;
    end
    status_set_matrix = [3 7 3 7 3 7 3 7 3 7 3 7 3 7 3 7];

    %valores de grabación
    rectime = 1;
    acqtime = 9; %Tiempo de experimentación
    sampFreq = 128; %Frecuencia de muestreo
    status_time = 0.5; %Tiempo por estatus
```



```
total_samples = 8*sampFreq; %Muestras totales
status_samples = status_time*sampFreq; %Tiempo por estado
samples_taken = 0; %Número de muestras almacenadas
counter_status = 0; %Contador de estados
status_last = 0; %Último estado

%Comprobación de que la librería ha sido cargada
if ~libisloaded('edk')
    [nf, w] = loadlibrary('edk','edk','addheader', 'EmoStateDLI');
    disp('EDK library loaded');
    libfunctionsview('edk');
else
    disp('EDK library already loaded');
end

default = int8(['Emotiv Systems-5' 0]);
AllOK = calllib('edk','EE_EngineConnect','Emotiv Systems-5'); %

eEvent = calllib('edk','EE_EmoEngineEventCreate');
eState = calllib('edk','EE_EmoStateCreate');

hData = calllib('edk','EE_DataCreate');
calllib('edk','EE_DataSetBufferSizeInSec',rectime);

readytocollect = false;

%Inicialización de contadores
cnt = 0;
Coolcounter=0;
end_time=0;

%Inicialización de valores de salida
output_matrix = zeros(acqtime*sampFreq,length(DataChannelsNames));
nS = zeros(acqtime*sampFreq,1);

%-----Comienza el registro-----%
disp('Prepárate para grabar tu sesión')
pause(1) %Espera de 1 segundo
disp('Grabando sesión');
while(samples_taken < total_samples)

    if samples_taken >= counter_status*status_samples
        status = status_set_matrix(1,counter_status+1);

        if (status == 7)
            status_last = 7;
        end
        if (status == 3)
            status_last = 3;
        end
    end
end
```



```
        counter_status = counter_status + 1;
        Coolcounter=end_time;
        end_time = find(output_matrix(:,20)==0,1)-1;

        if counter_status>=1
            output_matrix(Coolcounter+1:end_time,[25 4:17 21]);
        end
    end
    state = calllib('edk','EE_EngineGetNextEvent',eEvent); % st
    eventType = calllib('edk','EE_EmoEngineEventGetType',eEvent
    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,t
        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') ;
        %Actualización del número de muestras desde el comiezc
        samples_taken = samples_taken + nSamplesTaken;
        if (nSamplesTaken ~= 0)
            data = libpointer('doublePtr',zeros(1,nSamplesTaken
                for i = 1:length(fieldnames(enuminfo.EE_DataCha
                    calllib('edk','EE_DataGet',hData, DataChann
                    data_value = get(data,'value');
                    output_matrix(cnt+1:cnt+length(data_value),
                end
                %Nueva columna para la matriz de salida según e
                output_matrix(cnt+1:cnt+length(data_value),i+1)
                nS(cnt+1) = nSamplesTaken;
                cnt = cnt + length(data_value);

            end

        end

    end

end
```



```
%-----Aquí acaban los entrenamientos y experimentación-----%

%-----Finalización del experimento-----%
end_time = find(output_matrix(:,20)==0,1) - 1;
disp('Su sesión ha terminado');

%Guardado de datos
matrix_export = output_matrix(1:end_time,[26 4:17 21]);
fname = strcat(strcat('Exp',num2str(experiment_number)),'.csv');
dlmwrite(fname, matrix_export,'-append');
pause(1); %Espera de un segundo antes de acabar

%Grabado de la simulación.
f2=figure('Name','Movie');
FPS=166.66;
movie (Mo,1,FPS);
```