



**Proyecto Final de Carrera
Ingeniería Informática
Curso 2010-2011**

**Diseño de un Sistema de Gestión
para una Aplicación de Neurofeedback**

Daniel Sánchez-Rubio Alfaro

Febrero de 2011

Director: Javier Mínguez Zafra

Departamento de Informática e Ingeniería de Sistemas
Centro Politécnico Superior
Universidad de Zaragoza

A los dueños de las manos que me acariciaron.

Agradecimientos

A mis compañeros de carrera con los que tantas horas he pasado delante de apuntes y pantallas de ordenador.

A mis amigos, por ser ellos.

A los BCIs unizar del lab y a los que trabajan en la ONU, en especial a Carlicos, que prácticamente ha hecho de codirector.

A los BBTs, por hacer de una nave un lugar acogedor.

A toda la gente que conozco, por darme para arreglar desde una tostadora a un televisor. Gracias a ellos he aprendido más de lo que pensaba.

A la gente de guías, por formarme en más aspectos en la vida.

Al baloncesto y todo lo que lo rodea, por enseñarme valores de equipo y hacerme desconectar cuando nada más lo hace.

A María, por darme la oportunidad de estar en BBT.

A Javier, por dirigirme este PFC y descubrirme un mundo nuevo e interesante.

A mis padres, por demostrarme su apoyo incondicional.

A mis hermanas, por los momentos compartidos.

A mis abuelos, que prácticamente han sido unos segundos padres para mí.

Y por último a Celia, por estar siempre a mi lado, aguantar mis quebraderos de cabeza y saberme entender cuando nadie más sabe.

¡Gracias a todos!

Resumen

Diseño de un Sistema de Gestión para una Aplicación de Neurofeedback

El objetivo de este proyecto es analizar, diseñar e implementar un sistema de gestión genérico para aplicaciones de Neurofeedback (NFB) por medio de la tecnología de interfaces cerebro-computador (BCI, del inglés Brain Computer Interface), la cual se basa en medir la actividad cerebral, decodificar los procesos neurológicos de interés, y utilizarlos con una aplicación concreta.

El Neurofeedback [1] es una forma de Biofeedback [2] ligada a diferentes aspectos específicos de la actividad eléctrica del cerebro, que utiliza dispositivos de encefalografía y procesado en tiempo real para representar la actividad cerebral y, que tiene como objetivo, modificar esta actividad relacionada con aspectos cognitivos humanos, que son los que se tratan de potenciar. Actualmente la principal rama de uso de esta tecnología es la aplicación clínica, donde el Neurofeedback se ha utilizado satisfactoriamente para tratar patologías como el déficit de atención (TDA/TDAH)[3] y la epilepsia [4] entre otros.

En concreto los objetivos del proyecto son:

- Realizar el análisis, diseño e implementación de un sistema de configuración genérico de fácil manejo para sesiones de neurofeedback que permita al terapeuta definir todos los aspectos de una sesión.
- Realizar el análisis, diseño e implementación de un sistema de monitorización y control de sesiones de neurofeedback que de al terapeuta el control de la sesión, permitiéndole modificar parámetros durante la ejecución de la misma, así como observar características de su interés.
- Realizar la integración de ambos sistemas en una plataforma desarrollada.

Índice

1. Introducción	1
1.1. Alcance del proyecto	3
2. Contexto	5
2.1. Encefalografía	5
2.2. Conceptos de Neurofeedback	7
2.3. Plataforma BZI	11
3. Desarrollo	13
3.1. Fase de análisis	13
3.2. Fase de diseño	17
3.3. Fase de implementación	21
4. Plan de pruebas	27
5. Conclusiones y trabajo futuro	33
5.1. Conclusiones	33
5.2. Trabajo futuro	33
Bibliografía	35
A. Desarrollo	37
A.1. Distribución temporal y esfuerzo realizado	37

A.2. Documentos de análisis	38
A.2.1. Sistema de configuración	45
A.3. Documentos de diseño	45
A.3.1. Sistema de monitorización y control	47
B. Manual de usuario	67
B.1. Interfaz de configuración.	67
B.2. Interfaz de monitorización y control.	70
C. Pruebas	73

Índice de figuras

1.1. Esquema general de la aplicación.	3
2.1. Montaje según el sistema 10-20 con 16 canales y una traza de EEG adquirido.	6
2.2. Estructura desglosada de todas las partes de una terapia.	8
2.3. Estructura de una sesión.	9
2.4. Estructura de una fase.	9
2.5. Estructura de un trial.	10
2.6. Esquema que describe la arquitectura de la plataforma BZI.	11
3.1. Proceso Unificado.	13
3.2. Diagrama de casos de uso.	14
3.3. Diagrama de clases sin detalle del primer nivel del sistema de configuración de sesiones. La clase TherapyWindow se comunica con la plataforma BZI y encapsula el comportamiento de las otras 2 clases. QuickTherapy tiene como función dar soporte al lanzamiento de fases y AdvancedTherapy ofrece la posibilidad de crear, guardar y editar las sesiones. Para mayor detalle de las clases debe acudirse al anexo de desarrollo.	19
3.4. Diagrama de clases sin detalle del primer nivel del sistema de monitorización y control. La clase NFBOperatorWindow es la que realiza la comunicación con la plataforma BZI. Por debajo de esta se sitúan en una relación de composición la clase de control de flujo (ControlButtons), la de información relativa a un canal (InfoChannelWidget), la designada para ofrecer el EEG (EEGViewer), la que se ocupa de ofrecer información del feedback al terapeuta (ImageFeedback), y la designada para representar las gráficas de feedback (FeedbackHist), en el anexo de desarrollo se puede ver las clases con sus correspondientes métodos y atributos.	19

3.5. Diagrama de secuencia que muestra el caso de uso correspondiente a ejecutar una sesión ya cargada. En el diagrama aparece también la clase NFBOperatorDisplay. Esta es la clase de BZI encargada de la comunicación con nuestras aplicaciones.	20
3.6. Diagrama de estados que muestra el comportamiento dinámico de la clase AdvancedTherapy del sistema de configuración.	21
3.7. Estructura del fichero binario que alberga una sesión.	22
3.8. Esquema de comunicación entre el sistema de control y monitorización con el resto de la plataforma BZI.	23
3.9. Captura de pantalla del sistema de configuración de sesiones, pantalla de creación y edición. En ella se puede apreciar la zona de configuración de la sesión, en la que se puede definir el nombre de la sesión y la persona, así como cargar una sesión existente desde un fichero o establecer la sesión cargada como sesión predefinida. En la zona de configuración de fase el terapeuta introduce todos los parámetros propios de cada fase como son las duraciones de sus partes, selecciona los canales que intervienen en la sesión, así como las bandas dentro de cada canal. Por último en la zona de comentarios de sesión el usuario puede definir un comentario personal, siendo los botones de la zona inferior para guardar progresivamente cada fase.	24
3.10. Captura de pantalla del sistema de configuración de sesiones, pantalla de lanzamiento. En la zona superior el usuario puede observar los comentarios personales agregados a la sesión. En la zona media de la pantalla existe un cuadro con resúmenes explicativos acerca de cada fase generados automáticamente. Para cada fase, en la zona de la derecha existe un botón que permite lanzarla. La zona inferior da la posibilidad de cargar otra sesión desde el fichero.	25
3.11. Captura de pantalla del sistema de control de ejecución de la sesión (modo avanzado). La zona de control de flujo se encarga de ofrecer operaciones como iniciar y detener. La parte de información de sesión pretende dar la información del feedback que se le da al instantáneamente al paciente al operador. Los históricos de feedback muestran la evolución del feedback progresivo a lo largo del trial así como del feedback de evaluación a lo largo de la fase. El visor de EEG muestran los canales adquiridos en tiempo real. En la zona de información de cada canal se pueden observar los filtros de bandas, en los cuales se puede modificar el umbral de cada una de estas y por último la gráfica con la FFT de la señal en ese canal, donde cada color representa una banda de frecuencia habitual.	26

4.1.	Gráfica comparativa entre nuestro sistema gráfico con el sistema gráfico de BCI2000.	28
4.2.	Gráfica que muestra la media del grupo resultante para cada pregunta de semánticas diferenciales.	30
A.1.	Diagrama de gantt del proyecto	37
A.2.	Diagrama circular de esfuerzo realizado.	38
A.3.	Diagrama de casos de uso de toda la aplicación.	45
A.4.	Diagrama de clases de nivel 0, en el que se muestra la clase principal (NFBOperatorWindow.)	47
A.5.	Clase ControlButtons, diseñada para el control de flujo del sistema de monitorización, nivel 1.	49
A.6.	Clase EEGViewer, diseñada para monitorización del EEG, nivel 1.	50
A.7.	Diagrama de clases de EEGViewer, nivel 1.	51
A.8.	Diagrama de clases de feedbackHist, clase para los históricos de feedback, de nivel 1.	51
A.9.	Diagrama de clases de InfoChannelWidget, de nivel 1.	52
A.10.	Diagrama de clases de FFTViewer, clase para mostrar la FFT de la señal, de nivel 2.	53
A.11.	Diagrama de clases de PSDGui, clase para mostrar la potencia en cada banda, así como el umbral actual establecido, de nivel 2.	54
A.12.	Diagrama de clases de TherapyWindow, clase principal del sistema de configuración de sesiones, nivel 0.	55
A.13.	Diagrama de clases de QuickTherapy, clase del sistema de configuración de sesiones encargada del lanzamiento de las fases de una sesión, nivel 1.	56
A.14.	Diagrama de clases de AdvancedTherapy, clase del sistema de configuración de sesiones encargada de la creación y edición de las sesiones, nivel 1.	57
A.15.	Diagrama de secuencia correspondiente a crear una sesión.	58
A.16.	Diagrama de secuencia correspondiente a editar una sesión.	59
A.17.	Diagrama de secuencia que describe los casos de uso de ejecutar una sesión y cambiar elementos en ejecución.	60
A.18.	Diagrama de actividad de la clase NFBOperatorWindow del sistema de monitorización y control.	61

A.19.Diagrama de transición de estados de la clase QuickTherapy.	62
A.20.Diagrama de transición de estados de la clase AdvancedTherapy, encargada de la creación y edición de sesiones.	62
A.21.Prototipado de la ventana avanzada del sistema de control y monitorización.	63
A.22.Prototipado de la ventana sencilla del sistema de control y monitorización.	64
A.23.Prototipado de la ventana de edición del sistema de configuración	65
A.24.Prototipado de la ventana de lanzamiento del sistema de configuración. .	66
B.1. Aspecto de la pestaña QuickConfig.	68
B.2. Cuadro resumen de una fase de una sesión.	68
B.3. Aspecto de la pestaña AdvancedConfig.	69
B.4. Cuadro de selección de canales.	70
B.5. Cuadro de selección de bandas.	70
B.6. Pantalla sencilla de monitorización y control de la sesión.	71
B.7. Pantalla avanzada de monitorización y control de la sesión con desglose de sus elementos.	71

Índice de tablas

2.1. Frecuencias típicas de EEG	7
2.2. Parámetros configurables de una sesión.	10
2.3. Parámetros configurables de una fase.	10
2.4. Parámetros configurables de un trial.	11
3.1. Caso de uso 1.	15
3.2. Caso de uso 2.	15
3.3. Caso de uso 3.	16
3.4. Caso de uso 4.	16
3.5. Requisitos de toda la aplicación.	17
4.1. Resultados generales de la evaluación mediante semánticas diferenciales. . .	29
4.2. Resultados generales de la evaluación mediante heurísticas de Nielsen. . .	32
A.1. Porcentaje de tiempos empleados en cada tarea	38
A.2. Caso de uso 1.	39
A.3. Caso de uso 2.	39
A.4. Caso de uso 3.	40
A.5. Caso de uso 4.	40
A.6. Caso de uso 5.	41
A.7. Requisitos de toda la aplicación.	41
A.8. Requisitos del sistema de control y monitorización de la sesión.	42

A.9. Requisitos del widget de control de flujo del sistema de monitorización y control.	42
A.10. Requisitos del histórico de feedback.	43
A.11. Requisitos del indicador de feedback.	43
A.12. Requisitos del visor de EEG.	43
A.13. Requisitos del visor de potencia en las bandas.	44
A.14. Requisitos del visor de la FFT	44
A.15. Requisitos del sistema de configuración.	46
A.16. Requisitos de la ventana de lanzamiento de sesiones.	47
A.17. Requisitos de Advanced Config	48
C.1. Resultados del usuario 1 correspondientes a la evaluación mediante semánticas diferenciales.	74
C.2. Resultados del usuario 2 correspondientes a la evaluación mediante semánticas diferenciales.	74
C.3. Resultados del usuario 3 correspondientes a la evaluación mediante semánticas diferenciales.	75
C.4. Resultados del usuario 4 correspondientes a la evaluación mediante semánticas diferenciales.	75
C.5. Resultados del usuario 5 correspondientes a la evaluación mediante semánticas diferenciales.	76
C.6. Resultados del usuario 1 mediante la evaluación mediante heurísticas de Nielsen.	76
C.7. Resultados del usuario 2 mediante la evaluación mediante heurísticas de Nielsen.	77
C.8. Resultados del usuario 3 mediante la evaluación mediante heurísticas de Nielsen.	77
C.9. Resultados del usuario 4 mediante la evaluación mediante heurísticas de Nielsen.	77
C.10. Resultados del usuario 5 mediante la evaluación mediante heurísticas de Nielsen.	78

1. Introducción

El presente proyecto de fin de carrera se ha realizado dentro del Grupo de Robótica, Percepción y Tiempo Real del Departamento de Informática e Ingeniería de Sistemas del Centro Politécnico Superior de la Universidad de Zaragoza, dentro del equipo de investigación de Interfaces Cerebro-Computador.

El objetivo de este proyecto es realizar un análisis, diseño, implementación e integración de un sistema de gestión para una aplicación de Neurofeedback por medio de la tecnología de interfaces cerebro computador (BCI por sus siglas en inglés, Brain Computer Interface).

Una Interfaz Cerebro-Computador o BCI es un sistema basado en medir la actividad cerebral, decodificar los procesos neurológicos de interés, y utilizarlos con una aplicación concreta, como mover una silla de ruedas [5] o controlar un dispositivo de telepresencia [6]. Para la adquisición de actividad cerebral existen dos tipos de métodos: invasivos y no invasivos, dependiendo de si requieren o no de intervención quirúrgica. Los métodos no invasivos han adquirido especial interés en los últimos años dadas las fuertes barreras éticas que presentan los métodos invasivos. La técnica no invasiva más extendida es la de encefalográfía (EEG), la cual ha sido ampliamente estudiada dado que ha demostrado proporcionar suficiente información para controlar ciertos dispositivos de una manera voluntaria, proporcionando una complejidad de coste y tiempo de procesado menor comparado con el resto de técnicas de adquisición. Esto sitúa al EEG como la técnica más usada en sistemas BCI de tiempo real. Las primeras BCIs tenían como objetivo sustituir las funciones y/o canales de comunicación con el entorno en usuarios con algún tipo de discapacidad, normalmente motora, que habían visto gravemente limitadas o eliminadas dichas funciones, ya sea de forma permanente (BCI como tecnología de ayuda) o temporal (BCI como tecnología de rehabilitación). En este caso, la BCI permite puentejar el sistema nervioso humano con un sistema robótico o mecatrónico. En la actualidad, el uso de BCI se está extendiendo a aplicaciones como control de videojuegos, telepresencia, biométrica o neurofeedback.

El neurofeedback (NFB), también llamado neuroterapia, neurobiofeedback o EEG-biofeedback está basado en adquirir autocontrol sobre ciertos patrones manifestados en la actividad cerebral y su aplicación a la vida cotidiana, proporcionándole al usuario formas de controlar su propia actividad cerebral. Es un tipo de biofeedback que usa

1. Introducción

dispositivos en tiempo real de recogida y procesado de la actividad cerebral. En ejecución el proceso neuronal se decodifica y se informa al usuario de su estado (feedback) para que se gane el autocontrol del mismo (aprendizaje por refuerzo). Una aplicación concreta del neurofeedback es la neuroclínica, utilizándolo como terapia para el tratamiento del síndrome de déficit de atención.

El síndrome de déficit de atención (TDA/TDAH) puede entenderse como un déficit en la función reguladora del cerebro que se manifiesta en la atención y en el grado de activación fisiológica de quien lo padece. Se caracteriza por desarrollar niveles inusuales de desatención, impulsividad e hiperactividad. Es uno de los desórdenes psiquiátricos más comunes en niños y adolescentes y alrededor del 5-8 % de estos lo padecen [7]. Usualmente el TDA se ve acompañado de por una falta de aceptación social, problemas académicos y una alta probabilidad de que el diagnóstico psiquiátrico termine en problemas de adaptabilidad en la vida adulta [8]. Hasta el momento la medicación, usualmente metilfenidato, es la forma más efectiva de tratamiento, aunque tiene sus desventajas y limitaciones tales como el alto porcentaje de enfermos que no responde a ella (20-35 %) [9], así como efectos secundarios [10]. Las directrices de los centros clínicos europeos para los desórdenes de este tipo recomiendan un tratamiento en el que se combinan la medicación, el comportamiento cognitivo y los tratamientos familiares [10]. Sin embargo las estrategias cognitivas de mejora del comportamiento no han demostrado ser siempre efectivas, especialmente en términos de generalización y efectos a largo plazo [11]. Por lo tanto, existe la necesidad de descubrir nuevas estrategias para el tratamiento de dicho desorden en niños y adolescentes. El neurofeedback aparece como una de las alternativas más prometedoras en la búsqueda de opciones alternativas o adicionales para niños con TDA/TDAH [12], ya que se ha probado que el conseguir control de algunos ritmos cerebrales específicos (autorregulación) tiene efectos terapéuticos en estos pacientes. Recientes estudios científicos han demostrado que ha funcionado de forma experimental, eliminándoles la medicación al 80 % de los niños tratados, mejorando de forma significativa su comportamiento y consiguiendo unos efectos duraderos de hasta dos años en vistas al seguimiento que han tenido estos estudios [13]. Esto representa un gran paso en la mejora de la calidad de vida de estas personas que son medicadas de por vida y sufren frecuentes retrasos en el aprendizaje debido a su condición de inatención.

Los sistemas desarrollados en este PFC permiten gestionar los aspectos de una sesión de neurofeedback, relativos tanto a la configuración, como a la ejecución de la misma. El sistema desarrollado da soporte a las estrategias más extendidas de NFB y, en particular, todas aquellas relativas al tratamiento del TDA.

La manera de proceder en una terapia de NFB es la siguiente: un especialista diseña una sesión de Neurofeedback (NFB) para un usuario, durante la cual se conecta al usuario mediante un método no invasivo de electroencefalografía (EEG) a la aplicación. Esta aplicación monitoriza su actividad eléctrica, así como otra serie de información obtenida tras el procesamiento de esta que será relevante para el especialista. En función de la configuración de la sesión y de las características de la señal analizadas, el sistema producirá una salida, que será el feedback que se le dará al usuario acerca de la tarea que esté realizando

1. Introducción

1.1 Alcance del proyecto

en ese mismo momento. Para todo esto se ha diseñado en el grupo de BCI de la Universidad de Zaragoza una plataforma sobre la cual se ha desarrollado este PFC. En particular la plataforma está compuesta por tres grandes bloques, bloque de adquisición, bloque de procesado y bloque de aplicación. El bloque de adquisición se encarga de obtener la señal eléctrica procedente de los amplificadores y organizarla de acuerdo a un formato concreto. El bloque de procesado, cuyo propósito es realizar una serie de operaciones sobre la señal obtenida para obtener una serie de características de esta. Por último, el bloque de aplicación permite utilizar las características obtenidas de la señal para un propósito concreto. El presente PFC se ha desarrollado para ser integrado en el bloque de aplicación (Figura 1.1).

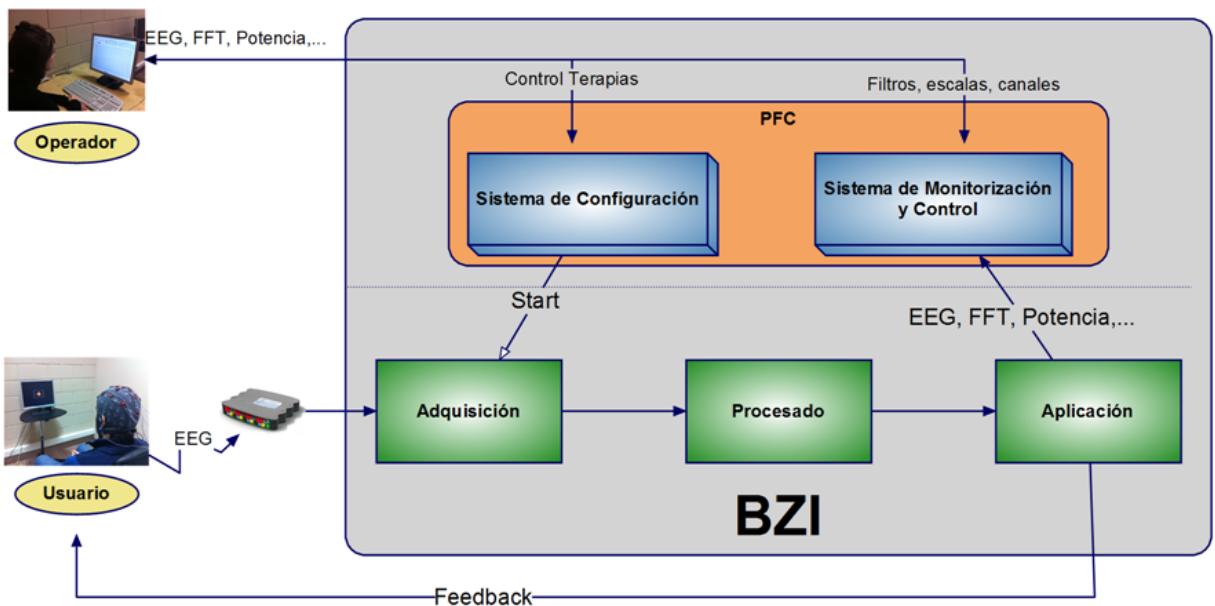


Figura 1.1: Esquema general de la aplicación.

1.1. Alcance del proyecto

La tarea desarrollada en este PFC comprende el análisis, diseño, implementación, integración y pruebas de dos sistemas, uno que dará soporte a la fase de definición y configuración de una sesión, así como a su control de lanzamiento; y otro que dará soporte durante la fase de ejecución para proporcionar la información necesaria al especialista. Dichos sistemas se integran en la plataforma BZI ya desarrollada por el grupo de BCI de la Universidad de Zaragoza. Más en concreto, el objetivo del PFC es el desarrollo de:

1. Sistema de configuración: pantalla de usuario para configuración de una sesión, en la que se escogen todos los parámetros del sistema que luego tendrán su efecto en la configuración del sistema gráfico.

2. Sistema de monitorización y control: sistema principal cuya labor es remitir al terapeuta información acerca del EEG del usuario durante la sesión y permitirle modificar parámetros de visualización, así como parámetros del feedback durante la ejecución de la sesión. Su apariencia dependerá de los parámetros establecidos en el sistema de configuración.

A continuación se exponen los puntos en que se ha estructurado el PFC. Para conocer su desarrollo temporal debe acudirse al diagrama de GANTT, en el anexo de desarrollo. Las tareas en concreto son:

1. **Documentación de sistemas de NFB existentes.** La primera tarea fue documentarse acerca de las interfaces que ya se encontraban disponibles, identificar los elementos que las componían, así como sus funciones.
2. **Análisis del sistema.** Fase para diseñar los casos de uso y a partir de estos elaborar unas tablas de requisitos.
3. **Diseño del sistema.** Fase durante la cual se diseñan los elementos necesarios y su comportamiento para satisfacer los requisitos.
4. **Implementación e integración del sistema.** Fase de programación ajustándose a la plataforma existente para su posterior integración con la misma.

La presente memoria se estructura en cinco capítulos, siendo el primero esta introducción; el capítulo dos expone una serie de conceptos y terminología necesaria para poder comprender el capítulo tres, el cual abarca el análisis, diseño e implementación de la aplicación; el capítulo cuarto presenta el plan de pruebas realizadas y, por último, en el capítulo final se presentan las conclusiones y el posible trabajo futuro.

2. Contexto

El presente capítulo describe conceptos y terminología propia del área de conocimiento, además expone en qué consiste una terapia de neurofeedback (NFB). Su correcto entendimiento es fundamental para poder comprender las fases posteriores.

2.1. Encefalografía

La electroencefalografía es una técnica de imagen médica que registra la actividad eléctrica generada por las estructuras cerebrales en el cuero cabelludo. Es una técnica no invasiva que se puede utilizar repetidamente en pacientes, adultos y niños, sin ningún riesgo directo o limitación. Cuando las neuronas se activan, se producen flujos de actividad eléctrica. La encefalografía mide las corrientes de flujo durante las excitaciones sinápticas de las neuronas en el córtex cerebral, aunque para poder medir estas excitaciones en la superficie se requiere un gran número de neuronas. Como resultado de este registro se obtiene el electroencefalograma (**EEG**), el cual ha probado ser una herramienta muy potente en el campo de la neurología y la neurofisiología clínica debido a su capacidad para reflejar tanto la actividad eléctrica cerebral normal como anómala.

Las señales eléctricas se registran por medio de electrodos colocados en zonas concretas de la superficie. Normalmente se miden de pico a pico y su amplitud varía entre los 0.5 y los 100 microvoltios. Estas señales son muy débiles y necesitan ser amplificadas, para ello se utilizan amplificadores, que adecúan la señal a niveles compatibles con otros dispositivos. Para determinar las zonas en las que se deben colocar los electrodos, se adoptó la estandarización de la colocación de los electrodos, dando de nombre al sistema de colocación 10-20. Este sistema divide la cabeza en distancias proporcionales, utilizando como referencia posiciones conocidas del cráneo, que permiten proporcionar una cobertura adecuada de todas las regiones del cerebro. El nombrado 10-20 designa la distancia en porcentaje entre las orejas y la nariz, de separación de los electrodos entre sí. Los electrodos se etiquetan de acuerdo a la zona del cerebro en la que están, F (frontal), C (central), T (temporal), P (posterior) y O (occipital) y se acompañan de números pares o impares dependiendo del hemisferio en el que se encuentren. Cada par de electrodos registra las variaciones de potencial eléctrico, definiendo un canal de la señal de EEG. En la Figura 2.1 se muestra un montaje de Neurofeedback con 16 electrodos siguiendo el sistema 10-20.

2. Contexto

2.1 Encefalografía

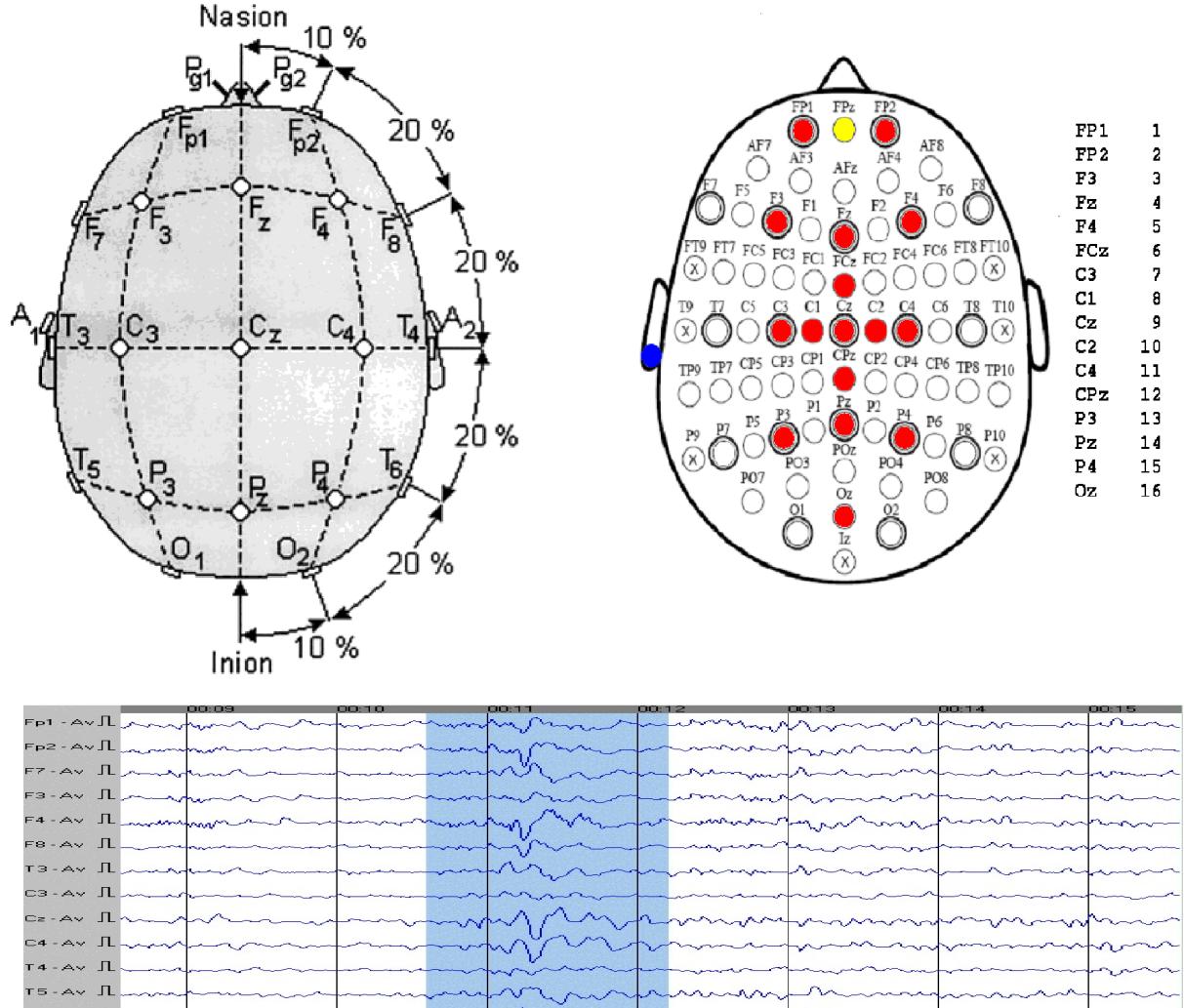


Figura 2.1: Montaje según el sistema 10-20 con 16 canales y una traza de EEG adquirido.

Tras adquirir y amplificar la señal, esta debe ser analizada para obtener las propiedades deseadas. El EEG posee propiedades características en el dominio del tiempo como son el análisis de la coherencia y la fase. También posee características extraíbles por medio de un análisis frecuencial, como es la distribución de la potencia en unas bandas determinadas, las cuales están asociadas a distintos estados mentales. El espectro frecuencial del EEG se descompone en cinco bandas de frecuencia básicas, que pueden variar según el autor, aunque se han adoptado las definidas en la tabla 2.1 [14]. La baja amplitud de la señal del EEG limita la adquisición, que es sensible a distorsiones, las cuales provocan interferencias en la información. Estas distorsiones se llaman artefactos y normalmente son una secuencia de ondas de alta amplitud y forma diferente a las señales sin contaminación. Los artefactos pueden estar relacionados con el usuario (movimientos corporales, movimiento de los ojos, sudor, etc), o técnicos (fluctuación de la impedancia, movimientos de cable, mal contacto, etc). La exclusión de secciones del EEG contaminadas debe ser llevada a cabo por expertos.

Nombre	Intervalo frecuencial
Delta	Hasta 4 Hz
Teta	[4-7] Hz
Alfa	[8-12] Hz
Beta	[12-30] Hz
Gama	A partir de 30 Hz

Tabla 2.1: Frecuencias típicas de EEG

El Neurofeedback (**NFB**) utiliza todo lo anterior para extraer características relevantes de la señal, como la potencia en unas bandas determinadas. Dichas bandas son las que están relacionadas con procesos neurofisiológicos y pretenden que el usuario reciba información mediante estímulos acerca de estas características, que son las que se desean modificar.

2.2. Conceptos de Neurofeedback

El objetivo de un entrenamiento o tratamiento de neurofeedback, **NFB** es conseguir que el usuario adquiera control sobre la potencia en unas bandas determinadas, siendo estas algunas de las definidas en la tabla 2.1 o una combinación específica de estas en unas posiciones específicas del cerebro (Figura 2.1) mediante un protocolo establecido.

Un aspecto central del NFB es el tipo de feedback proporcionado al paciente, que puede presentarse en alguna de las modalidades sensoriales, auditivo, somatosensorial o visual. El feedback auditivo persigue confirmar al usuario su progreso de forma auditiva, mientras que el feedback somatosensorial lo hace estimulando el sentido del tacto y el visual mediante el estímulo de la vista. El mayor número de fibras visuales que entran a estructuras límbicas que de otro tipo implica que el mejor feedback en términos de estimulación es el visual [15].

En todos los sistemas de NFB se contemplan 3 tipos distintos de feedback: de progreso, de evaluación y de transfer. El feedback de progreso pretende dar información cuantificada continuamente al usuario, expresando su mejoría o deterioro de acuerdo con el objetivo a alcanzar. El feedback de evaluación se da al final del proceso y su objetivo es hacer balance del feedback de progreso dado hasta el momento para determinar una mejora o empeoramiento general. Por último, en estudios previos y experimentos de neurofeedback realizados se introduce el concepto de feedback de transfer [13] [16], el cual tiene como objeto crear procesos de generalización para poder trasladar lo aprendido durante las terapias a la vida real. Este tipo de feedback consiste en no dar feedback continuo en ciertas ocasiones para conseguir que el paciente regule su actividad sin recibir ningún tipo de feedback mientras lo hace. Es decir, se pide que el propio paciente sea capaz de identificar el estado de su actividad cerebral sin que se le informe de si realmente

lo está consiguiendo o no. Todos estos conceptos se aplican de acuerdo a un protocolo establecido.

Un protocolo es un plan escrito y detallado de un experimento científico, un ensayo clínico o una actuación médica. El diseño de todos los aspectos de un protocolo de NFB genérico fue elaborado por un grupo de trabajo multidisciplinar y las decisiones tomadas son las que se justifican en la lista de requerimientos de la fase de análisis.

A continuación se describe la terminología utilizada en el desarrollo de un protocolo de NFB. Asimismo se debe elegir una nomenclatura, ya que en la documentación encontrada no hay un criterio unificado de protocolo ni de terminología.

En nuestro caso hablaremos de la unidad máxima de entrenamiento o tratamiento como una terapia, la cual se compone de varias sesiones, que se realizarán usualmente en días separados. Cada sesión tiene una duración de unos 35 minutos y consta de varias fases, las cuales serán independientes entre sí. Una fase consiste en el entreamiento o mejora de un aspecto concreto. Un ejemplo sería hacer dos fases dentro de una sesión en las que se entrenasen la capacidad de atención en la fase 1 y la de memoria en la fase 2. En la figura 2.2 se aprecia la estructura general y por niveles de una terapia, mientras que en la Figura 2.3 se puede ver claramente la estructura de una sesión, en la que se diferencian las partes que la componen.

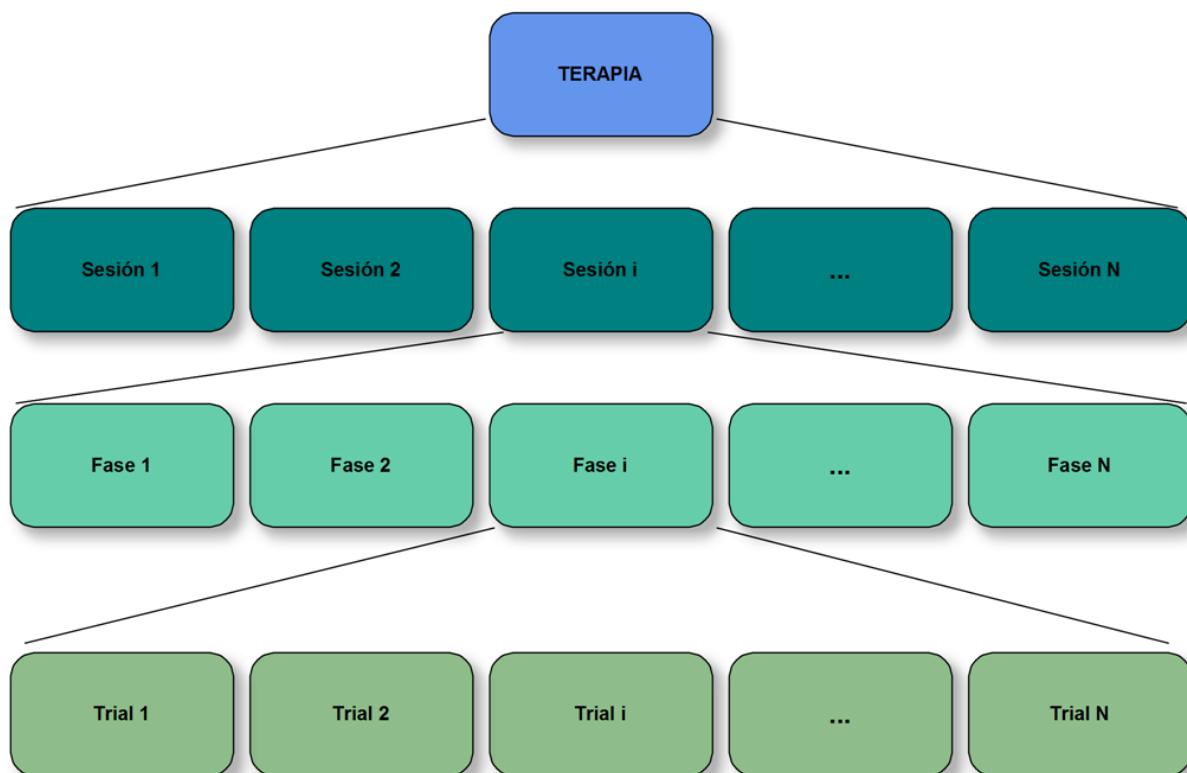


Figura 2.2: Estructura desglosada de todas las partes de una terapia.

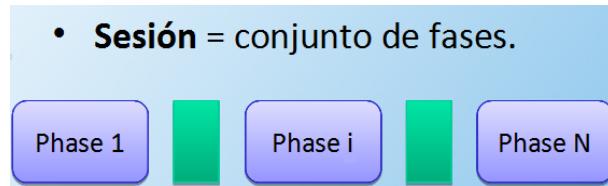


Figura 2.3: Estructura de una sesión.



Figura 2.4: Estructura de una fase.

La fases pueden tener una duración de unos 10 minutos, y se descomponen en distintas partes: fase de descanso(rest), cálculo del prebaseline, cálculo del baseline y serie de repeticiones (trials). Las partes en las que se divide una fase están diseñadas según el protocolo que se ha utilizado y se pueden apreciar en la figura 2.4. La parte de prebaseline es una fase de relajación cuyo propósito es que el EEG se estabilice y su duración es de unos 5 segundos, durante los cuales no se le permite parpadear al sujeto. La fase de baseline tiene unos 10 segundos de duración, en la que se media la actividad en las bandas que se van a ejercitar para calcular el estado del sujeto, lo cual posibilita autoregular los filtros de cada banda de frecuencia.

Todos los trials dentro de una fase son idénticos y su duración es de aproximadamente 17 segundos. La ejecución de una serie de trials es en esencia una repetición de una estructura definida. Un trial se descompone en una serie de partes: rest, pre-baseline, baseline, feedback progresivo y feedback de evaluación (Figura 2.5). Fase de reposo o descanso (rest), que se utiliza para que el usuario descance. Le está permitido parpadear, moverse, etc; fase de cálculo del (prebaseline), para que el usuario se relaje y su EEG se estabilice, aunque no debe parpadear ni realizar ningún movimiento voluntario; fase de cálculo de baseline o del nivel de actividad normal del usuario. Sirve como actualización del valor calculado al principio de la fase, haciendo una media entre los dos valores. Se deben evitar los artefactos en la medida de lo posible; fase de feedback progresivo, en la que se le va dando feedback al usuario continuamente. Es un feedback instantáneo y depende de si se cumplen las condiciones en cada banda de frecuencia. No hay problema con un nivel normal de parpadeos; fase de feedback de evaluación, se genera un feedback de evaluación dependiendo del tiempo en que el feedback progresivo haya sido positivo y negativo.

2. Contexto

2.2 Conceptos de Neurofeedback

Parámetros configurables de una sesión
Nombre de persona
Nombre de la sesión
Número de fases
Comentarios de sesión
Porcentaje de trials de activación
Porcentaje de trials de transfe
Tiempo de descanso
Canales del entrenamiento
Bandas del entrenamiento
Tipo de estímulo

Tabla 2.2: Parámetros configurables de una sesión.

Parámetros configurables de una fase
Nombre de fase
Número de trials
Duración de la fase de pre baseline
Duración de la fase de baseline
Porcentaje de trials de activación
Porcentaje de trials de transfer
Tiempo de descanso
Canales del entrenamiento
Bandas del entrenamiento
Tipo de estímulo

Tabla 2.3: Parámetros configurables de una fase.

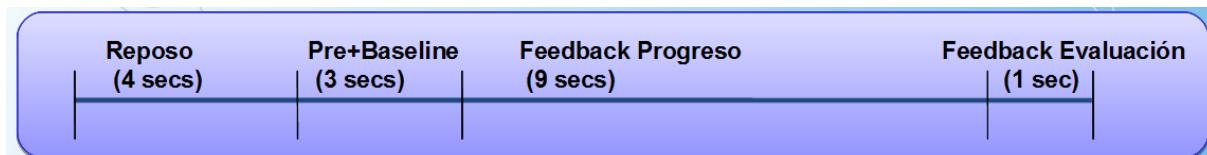


Figura 2.5: Estructura de un trial.

En las tablas 2.2, 2.3 y 2.4 se enumeran los parámetros que deberían ser configurados en la creación de una sesión.

Uno de los objetivos de este PFC es proporcionar una interfaz al terapeuta que le permita definir todos estos aspectos de una sesión.

Parámetros configurables de un trial
Tiempo de descanso
Tiempo de cálculo de pre-baseline
Duración del cálculo del baseline
Duración del feedback progresivo
Tiempo de feedback de evaluación

Tabla 2.4: Parámetros configurables de un trial.

2.3. Plataforma BZI

Esta sección proporciona una visión global de la plataforma en la que se integra este PFC, así como conocer las restricciones que esta impone. La plataforma BZI es un framework basado en eventos que permite la integración de aplicaciones basadas en BCIs, proporcionando funcionalidades comunes tales como la adquisición en tiempo real de dispositivos hardware, la integración de librerías de procesamiento de señal, y de elementos de visualización, que sirvan como feedback para el usuario y como monitorización del sistema.

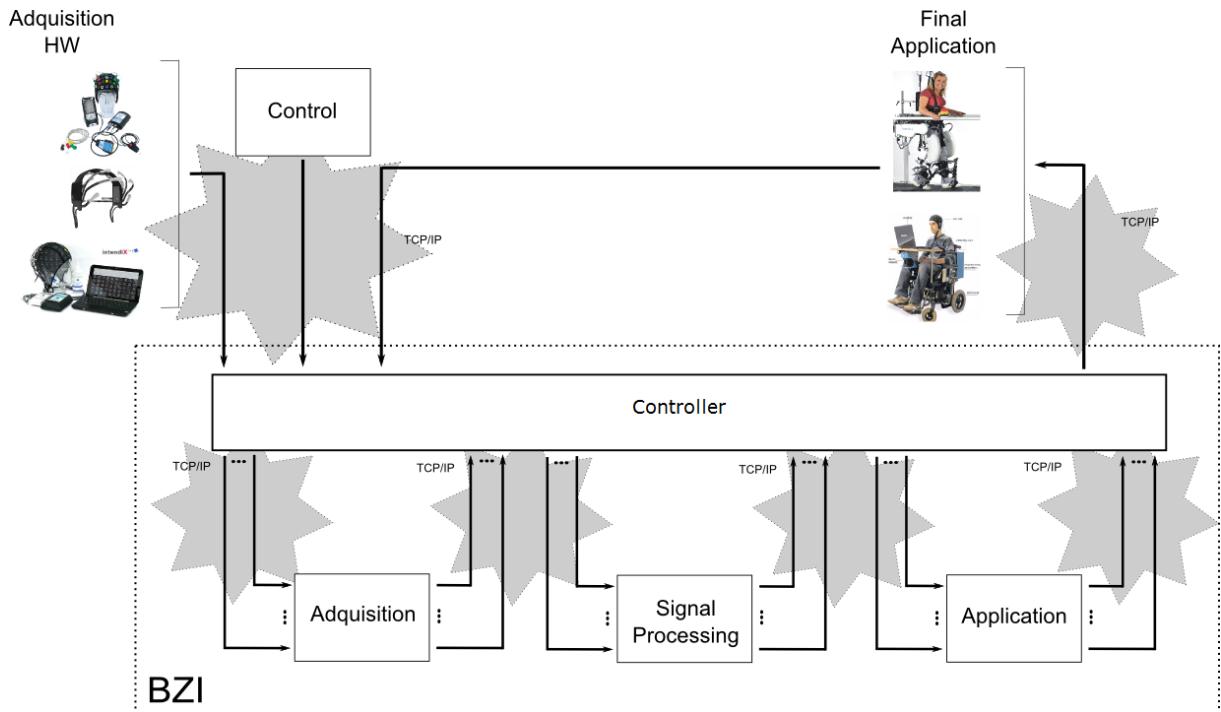


Figura 2.6: Esquema que describe la arquitectura de la plataforma BZI.

La arquitectura contiene una serie de componentes básicos: módulos y un controlador (Figura 2.6). Los módulos pueden ser de adquisición, procesamiento o aplicación final. El

módulo de adquisición se encarga de la interacción con los dispositivos hardware para la entrada de datos, los de procesamiento encapsulan los algoritmos de procesado de la señal necesarios para la aplicación concreta y la aplicación interpreta dichos resultados, como por ejemplo dar un feedback visual al usuario o interaccionar con elementos externos. El controlador centraliza el control de toda la arquitectura, implementa un mecanismo de suscripción/reexpedición para los módulos y actúa como una interfaz entre el terapeuta y el sistema, tanto para su configuración, como para su monitorización. Tiene acceso a los datos de entrada y resultados de salida de todos los módulos, actuando también como repositorio de información. Todos los módulos, así como el controlador están implementados mediante procesos, que realizan su comunicación mediante un protocolo TCP/IP y abstraen al programador. Además esto permite la distribución de los algoritmos en máquinas independientes. El funcionamiento de la arquitectura está sincronizado con la salida de datos de los dispositivos hardware, ejecutando secuencialmente los módulos de adquisición, procesado de la señal y aplicación. Los módulos definen una interfaz que permiten la integración de los algoritmos de una manera sencilla, abstrayendo al programador de los detalles de la arquitectura.

Para integrar una aplicación concreta dentro de toda la arquitectura fue necesario definir una interfaz, que medie entre la aplicación concreta y la plataforma. Para el sistema de configuración de sesiones de NFB hubo que definir una estructura común de datos que albergara toda la información relativa a una sesión. Para el sistema de monitorización y control hubo que implementar los métodos que diesen a la plataforma las funcionalidades necesarias para inicializar todos los elementos de dicho sistema de acuerdo a lo establecido en el sistema de configuración.

3. Desarrollo

En este capítulo se expone el análisis, diseño e implementación de los sistemas que integran el proyecto. El sistema utilizado durante esta fase de desarrollo ha sido el Proceso Unificado de Desarrollo Software [17], el cual es un marco de desarrollo de software que se caracteriza por estar dirigido por casos de uso, centrado en la arquitectura y por ser iterativo e incremental. Consta de al menos tres grandes fases, análisis, diseño e implementación, las cuales se recorren una y otra vez, creando así un producto resultante de refinamientos sucesivos. En la primera iteración se generará un primer prototipo, el cual se irá refinando en sucesivas iteraciones. El proceso se puede ver en la figura 3.1

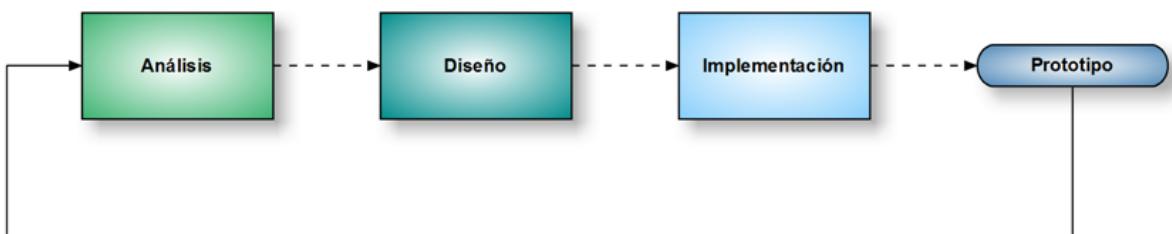


Figura 3.1: Proceso Unificado.

3.1. Fase de análisis

La fase de análisis del proceso de desarrollo tiene como objetivo producir tablas con los requisitos del sistema. Durante la primera iteración del análisis se generarán casos de uso, a partir de estos, todos los requisitos funcionales y algunos no funcionales y, en una segunda pasada, se incorporarán nuevos requisitos no funcionales. Los casos de uso son el mecanismo para que el analista se pueda poner en el lugar de usuario final y así comprender mejor los requisitos funcionales necesarios. Muchos de los requisitos no funcionales serán establecidos por el analista y no producirán ningún resultado para el actor del sistema. Este proceso consta de las siguientes partes: identificar los casos de uso de la aplicación, generar a partir de estos un diagrama de casos de uso, que permitirá al analista identificar y confeccionar los requisitos de la aplicación.

3. Desarrollo

3.1 Fase de análisis

Casos de uso. Un caso de uso es una secuencia de acciones que el sistema lleva a cabo para ofrecer algún resultado de valor para un actor. Cada actor representa un tipo de usuario del sistema. Por tanto, los actores utilizan el sistema interactuando con los casos de uso. Los casos de uso pueden definirse de varias maneras, aunque no existe una manera universalmente aceptada para hacerlo. Su necesidad descriptiva hace difícil elegir una herramienta demasiado formal para hacerlo, por lo que en muchos casos es recomendable hacer una definición completa y detallada mediante el lenguaje natural. La descripción de los casos de uso que aquí se presenta se compone de 4 partes concretas, una precondición, que se debe cumplir antes de iniciar el caso de uso, un iniciador del caso de uso, una secuencia de acciones a realizar, y producen un resultado al terminar. En nuestro caso existen dos actores del sistema claramente diferenciados, el usuario y el operador o terapeuta. En el sistema se identifican los siguientes casos de uso principales:

1. Crear y guardar una sesión.
2. Ejecutar una fase de una sesión.
3. Modificar elementos de visualización durante una sesión.
4. Modificar umbrales de bandas durante una fase de la sesión.

En las tablas A.2 A.3 A.4 A.5 se especifican con detalle los 4 casos de uso. El resto se pueden consultar en el anexo de desarrollo de la memoria.

Diagrama de casos de uso Definidos los actores del sistema y los casos de uso en los que toman parte, se elabora el diagrama de casos de uso de la figura A.3.

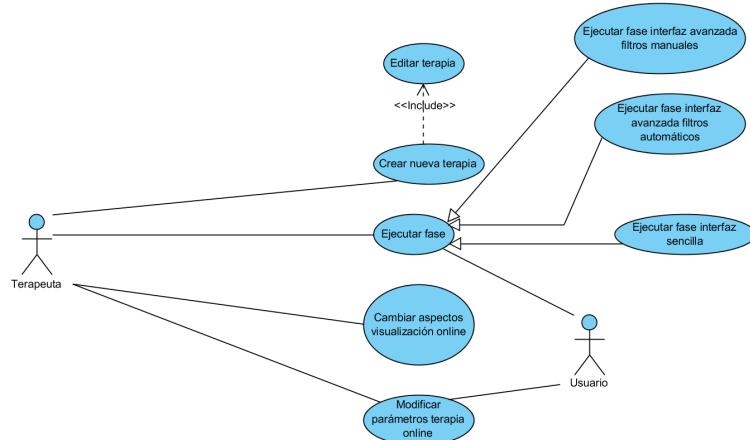


Figura 3.2: Diagrama de casos de uso.

3. Desarrollo

3.1 Fase de análisis

Nombre	Caso de uso 1
Actores que intervienen	Terapeuta
Descripción	Creación y guardado de una nueva sesión.
Precondición	El terapeuta se encuentra en el sistema de configuración.
Secuencia de acciones	<p>1. A través de una interfaz el terapeuta rellena el nombre del usuario y de la sesión.</p> <p>2. Rellena para cada fase el nombre de la fase, número de trials, duración del baseline, duración del feedback progresivo, duración del feedback de evaluación, porcentaje de trials de activación, porcentaje de trials de transfer, tiempo de descanso entre trials y el tipo de estímulo de feedback final: visual o auditivo.</p> <p>3. El operador selecciona el número de canales que intervienen en el feedback. Para cada canal selecciona las bandas que intervienen y si son bandas de inhibit o bandas de reward.</p> <p>4. Finalmente el terapeuta añade un comentario personal y guarda la sesión en un fichero.</p>
Resultados	Se ha guardado una sesión que se podrá ejecutar en cualquier momento.

Tabla 3.1: Caso de uso 1.

Nombre	Caso de uso 2
Actores que intervienen	Terapeuta
Descripción	Ejecución de una fase de una sesión.
Precondición	Fase creada y guardada.
Secuencia de acciones	<p>1. A través de una interfaz el terapeuta selecciona una sesión y la carga en el sistema.</p> <p>2. El operador lanza la fase deseada de la sesión</p> <p>3. El operador inicia la fase lanzada.</p>
Resultados	La fase seleccionada está en ejecución.

Tabla 3.2: Caso de uso 2.

3. Desarrollo

3.1 Fase de análisis

Nombre	Caso de uso 3
Actores que intervienen	Terapeuta
Descripción	Cambiar aspectos de visualización online.
Precondición	Fase de sesión en ejecución.
Secuencia de acciones	1. Mediante el ratón el terapeuta tiene la posibilidad de hacer cambios en las gráficas. en el EEG cambia los canales a visualizar, así como la escala, el número de segundos y la visualización de baselines; en la gráfica de la FFT modifica la escala en ambos ejes (frecuencia y potencia).
Resultados	Los elementos de visualización han sido modificados.

Tabla 3.3: Caso de uso 3.

Nombre	Caso de uso 4
Actores que intervienen	Terapeuta y Paciente
Descripción	Modificación de aspectos de la fase online.
Precondición	Fase de sesión en ejecución.
Secuencia de acciones	1. Mediante el ratón el terapeuta mueve los umbrales para el feedback las bandas que intervienen en la fase. Puede subirlos o bajarlos.
Resultados	Las condiciones del feedback para el paciente han sido modificadas.

Tabla 3.4: Caso de uso 4.

Código	Descripción
RF-0	La aplicación debe ofrecer un sistema que permita gestionar las sesiones. Debe ofrecer operaciones de creación, edición y ejecución.
RF-1	La aplicación debe ofrecer un sistema que le permita al terapeuta monitorizar y controlar la sesión durante la ejecución de la misma.
RNF-0	Debe tener un alto nivel de usabilidad.
RNF-1	Debe ser multiplataforma.

Tabla 3.5: Requisitos de toda la aplicación.

Extracción de requisitos. De acuerdo a las posibilidades que debe ofrecer el sistema, contempladas en cada caso de uso, se sintetizan los requisitos funcionales y algunos no funcionales y se estructuran en tablas.

En primer lugar se obtuvo una tabla con los requisitos generales de la aplicación. Al hacer esto observamos que la aplicación debe dar soporte tanto a la gestión de sesiones, como al control durante la ejecución de las mismas. Esto propició que los requisitos se dividieran dependiendo del tipo de la necesidad que cumplen, sintetizando 2 sistemas diferentes, **Sistema de Configuración** y **Sistema de Control y Monitorización**. Estos requisitos están en la tabla A.7, en la que los requisitos funcionales se nombran mediante el acrónimo RF y el número de requisito y los no funcionales mediante el acrónimo RNF seguido igualmente por el número de requisito. A continuación se identificaron los casos de uso en los que interviene cada sistema para poder elaborar tablas de requisitos independientes para cada uno de ellos, así como las tablas para cada elemento de cada sistema se pueden consultar en el anexo de desarrollo de la memoria.

3.2. Fase de diseño

A continuación comienza la fase de diseño, que consiste en presentar un modelo que permita satisfacer todos los requisitos recogidos durante la fase de análisis. Primero se presentan modelos estructurales o estáticos, para, a continuación, describir su comportamiento dinámico mediante diagramas de comportamiento. La estructura se modela con los diagramas de clases, mientras que el comportamiento dinámico se hace mediante diagramas de secuencia, actividad y diagramas de estados. Por último se elabora un prototipado de ventanas.

Diagrama de clases. Un diagrama de clases es un tipo de diagrama estático que describe la estructura de un sistema mostrando sus clases, atributos y las relaciones entre ellos. Cada clase modela un elemento que tiene significado por sí mismo, posee una serie de atributos y ofrece una serie de operaciones a otros. La primera fase de este proceso consiste en identificar las clases del modelo que intervienen en los casos de uso del análisis.

Una vez elegidas las clases hay que definir las operaciones que cada una posee, así como sus atributos. De esta manera las clases quedan definidas, es entonces cuando se diseña el diagrama que las relacione, estableciendo el tipo de relación entre las mismas.

El sistema de configuración de sesiones se divide en dos partes, creación, edición y guardado de sesiones por una parte y lanzamiento de las mismas por otra, por lo que esta división conceptual genera 2 grandes clases en ese sistema: AdvancedTherapy y QuickTherapy respectivamente. La descripción de estas clases principales, así como de la clase principal que las encapsula es la siguiente:

- **TherapyWindow:** es la clase principal que gestiona las dos clases que hay por debajo, creación y edición, y lanzamiento.
- **AdvancedTherapy:** cuyo propósito es ofrecer al terapeuta la opción de crear, editar y guardar sesiones.
- **QuickTherapy:** brinda al terapeuta la posibilidad de cargar y lanzar las fases de las sesiones.

En cuanto al sistema de control y monitorización poseemos elementos bien diferenciados que cumplen roles distintos. Esto nos permite identificar las clases principales que componen dicho sistema, así como definir las operaciones que deben ofrecer. Las funciones de cada clase del sistema de control y monitorización son los siguientes:

- **NFBOperatorWindow:** es la clase principal que gestiona todos los elementos. Proporciona acceso a configurar sus clases desde fuera y las gestiona.
- **ControlButtons:** cuyo propósito es proporcionar el control durante la ejecución de una fase de sesión, ofreciendo la posibilidad de detenerla, iniciarla, o volver al sistema de configuración.
- **InfoChannelWidget:** ofrece información de cada canal, potencia y umbral de bandas y la FFT.
- **EEGViewer:** gráfica que muestra el EEG adquirido en todos los canales. Posibilita cambiar la escala, los segundos mostrados y los canales que se visualizan.
- **ImageFeedback:** indicador para el terapeuta del feedback que se le da al usuario.
- **FeedbackHist:** histórico del feedback proporcionado.

Definidas las clases del diseño con sus métodos y atributos se definen las relaciones entre estas. Las relaciones más comunes son de composición, herencia y colaboración, aunque hay muchas otras. Las relaciones que se establezcan ahora nos definirán el flujo de información entre las clases.

El diagrama de clases para el sistema de configuración puede verse en la figura 3.3 y el diagrama del sistema de control y monitorización puede verse en la figura 3.4, aunque en el anexo de desarrollo se ofrecen con mayor detalle.

3. Desarrollo

3.2 Fase de diseño

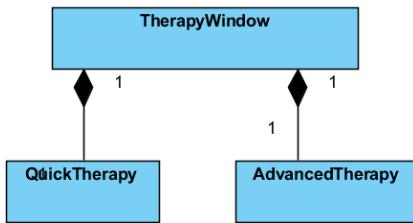


Figura 3.3: Diagrama de clases sin detalle del primer nivel del sistema de configuración de sesiones. La clase TherapyWindow se comunica con la plataforma BZI y encapsula el comportamiento de las otras 2 clases. QuickTherapy tiene como función dar soporte al lanzamiento de fases y AdvancedTherapy ofrece la posibilidad de crear, guardar y editar las sesiones. Para mayor detalle de las clases debe acudirse al anexo de desarrollo.

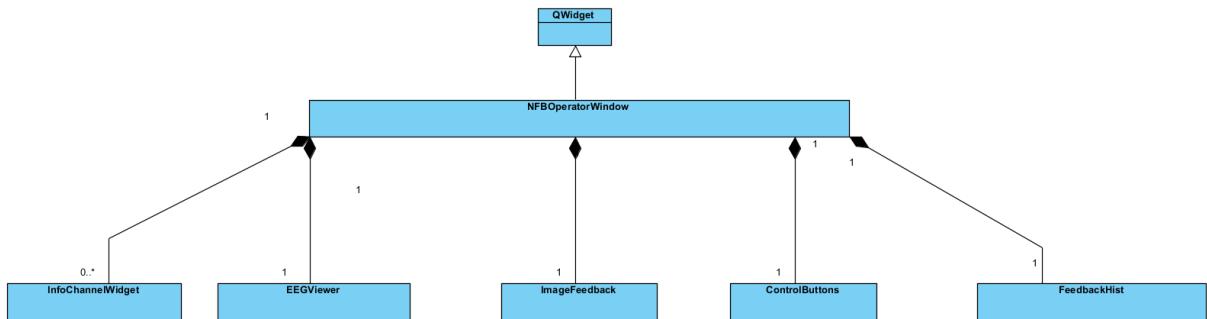


Figura 3.4: Diagrama de clases sin detalle del primer nivel del sistema de monitorización y control. La clase NFBOperatorWindow es la que realiza la comunicación con la plataforma BZI. Por debajo de esta se sitúan en una relación de composición la clase de control de flujo (ControlButtons), la de información relativa a un canal (InfoChannelWidget), la designada para ofrecer el EEG (EEGViewer), la que se ocupa de ofrecer información del feedback al terapeuta (ImageFeedback), y la designada para representar las gráficas de feedback (FeedbackHist), en el anexo de desarrollo se puede ver las clases con sus correspondientes métodos y atributos.

Diagramas de secuencia. La estructura de ambos sistemas se dio entonces por completa. El siguiente paso fue modelar el comportamiento dinámico de ambos sistemas. Para ello se analizó cada caso de uso con los actores que intervienen junto con los diagramas de clases. Así se pudieron elaborar los diagramas de secuencia, en los que se analizan todos los casos de uso y se genera una traza de actuación del sistema indicando los mensajes y llamadas que intercambian las instancias de las clases con los actores y entre sí. En la figura 3.5 se puede observar el diagrama de secuencia correspondiente al caso de uso 'Ejecutar una sesión'.

3. Desarrollo

3.2 Fase de diseño

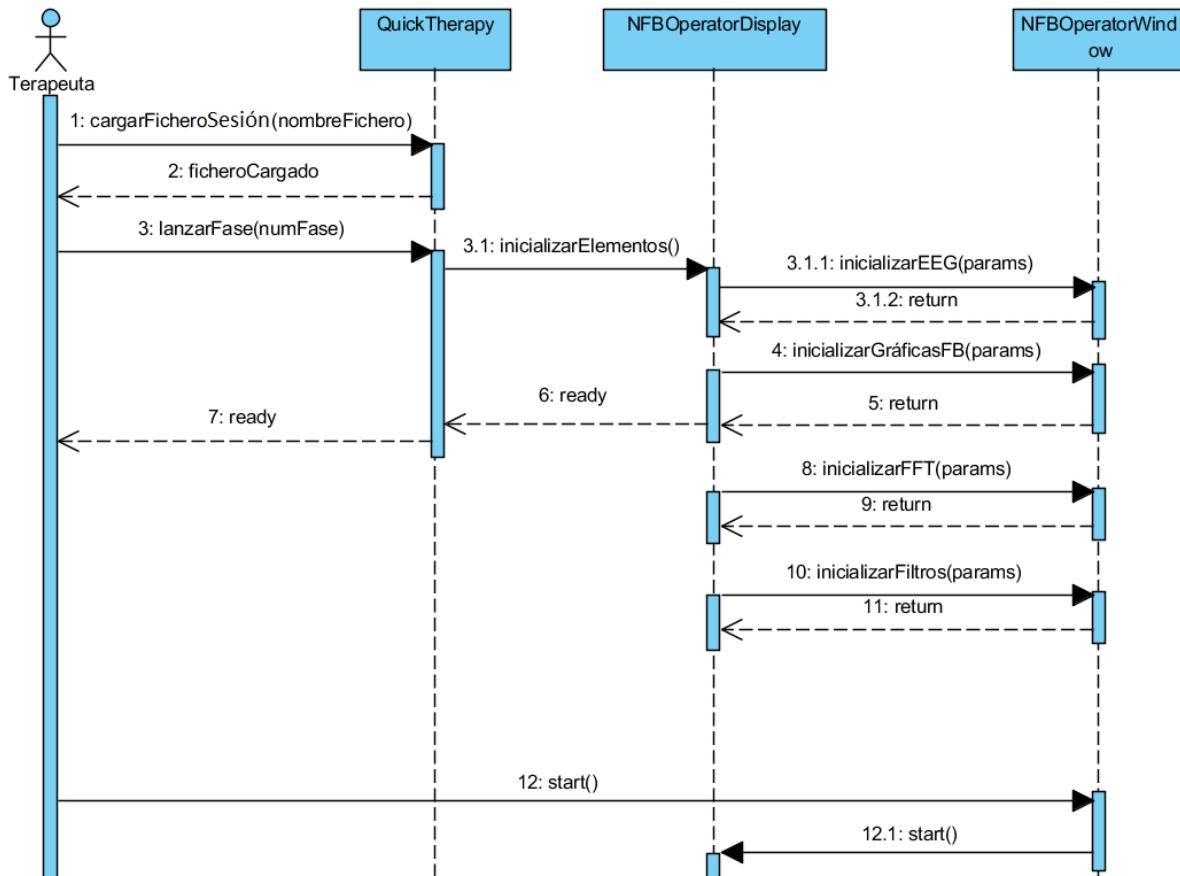


Figura 3.5: Diagrama de secuencia que muestra el caso de uso correspondiente a ejecutar una sesión ya cargada. En el diagrama aparece también la clase NFBOperatorDisplay. Esta es la clase de BZI encargada de la comunicación con nuestras aplicaciones.

La secuencia de acciones de este caso de uso que se puede observar en el diagrama es, cargar un fichero y lanzar una fase. En bloque 'alt' representa una acción alternativa, ya que se contempla la posibilidad de que se esté ejecutando el sistema avanzado o el sencillo respectivamente. El resto de diagramas de secuencia se pueden consultar en el anexo de desarrollo. La clase NFBOperatorDisplay es la que actúa de nexo de unión entre el sistema de monitorización y control y el resto de la plataforma BZI.

Diagramas de actividad y estados. El siguiente paso fue abordar la creación de diagramas de actividad y de estados. Ambos se utilizan para modelar el flujo dinámico de cada elemento que interviene en los diagramas de secuencia por separado y ver cómo responden dichos elementos a cada interacción con el resto de elementos. Si el comportamiento de un elemento es reactivo se utilizan los diagramas de estados, pero si por el contrario no lo es, los diagramas de actividad resultan más adecuados, aunque ambos diagramas realizan la misma labor. Para los diagramas de estados el proceso consiste en identificar una serie de estados por los cuales pasa el objeto analizado e identificar las

3. Desarrollo

3.3 Fase de implementación

transiciones que le hacen pasar del estado actual al siguiente. Cada transición tiene asociado un disparador, que es un método del objeto, el cual es invocado por otro objeto distinto. Las transiciones entre estados pueden llevar asociadas además invocaciones de métodos de otros objetos, ocasionando en estos otros cambios de estado.

En la figura 3.6 se presenta un diagrama de estados que ilustra el comportamiento de una instancia de la clase AdvancedTherapy del sistema de configuración, no obstante, el resto de diagramas de estados y de actividad se encuentran en el anexo de desarrollo.

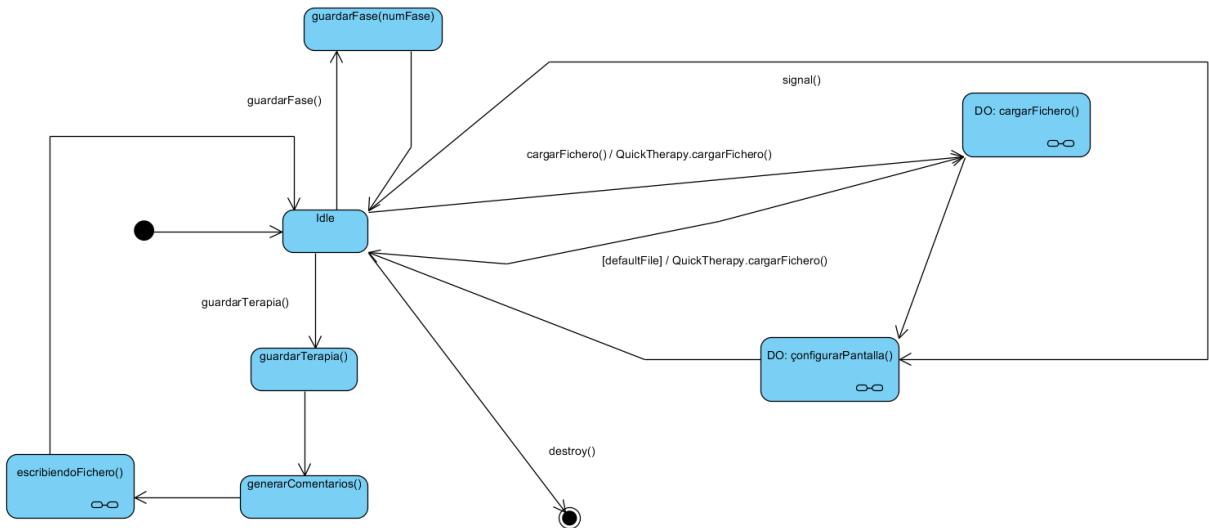


Figura 3.6: Diagrama de estados que muestra el comportamiento dinámico de la clase AdvancedTherapy del sistema de configuración.

Por último y para finalizar el proceso de diseño de los sistemas se preparó un prototipado de las ventanas para los sistemas. Estos prototipos consisten en una serie de bocetos muy sencillos que pretenden dar una idea básica del aspecto que tendrán las pantallas finales. Para consultar las ventanas diseñadas debe acudirse al anexo de desarrollo.

3.3. Fase de implementación

Proceso de implementación. La fase de implementación se dividió en cuatro fases: implementación pura, pruebas unitarias, integración y pruebas generales. Todo esto se hizo para ambos sistemas, ya que se integraron por separado en la plataforma. La razón de esta secuencia de acciones es que permite aislar los fallos de cada módulo por separado y solucionarlos antes de realizar la integración, evitando que estos fallos se propaguen. Tras la implementación, integración y las pruebas se obtuvo un primer prototipo, en el que se detectaron nuevos requisitos, se incorporaron nuevas funcionalidades al diseño y, finalmente se implementaron.

Lenguaje utilizado. Hasta este punto todo lo definido es independiente de la implementación que se decida realizar, a condición de que esta sea orientada a objetos. Finalmente el lenguaje de programación elegido para ambos sistemas fue C++, haciendo uso de las librerías Qt[18] y Qwt[19] y utilizando como entorno de programación Visual Studio. Existen varias razones para justificar estas elecciones.

1. C++ es un lenguaje orientado a objetos mucho más eficiente que Java.
2. C++ es un lenguaje con compiladores para las principales plataformas.
3. Las librerías Qt y Qwt proporcionan una opción gratuita en el lenguaje elegido.
4. La plataforma en la que se integran ambos sistemas está implementada usando las mismas librerías, lo cual permite compartir conocimiento y aumentar la compatibilidad.
5. Las librerías Qt tienen licencia LGPL [20], lo cual supone una opción gratuita de implementación.
6. Las librerías Qt ofrecen un sistema de comunicación y sincronización basado en eventos disparadores.

Sistema de información. La información que define una sesión se crea en el sistema de configuración. Este sistema ofrece la posibilidad de guardar una sesión definida para ejecutarla en otro momento, así pues se ofrece persistencia de los datos a través de fichero. Cada sesión se guarda en un fichero en binario según la estructura de información decidida. Esta estructura está definida de forma anidada tal y como se puede apreciar en la figura 3.7.

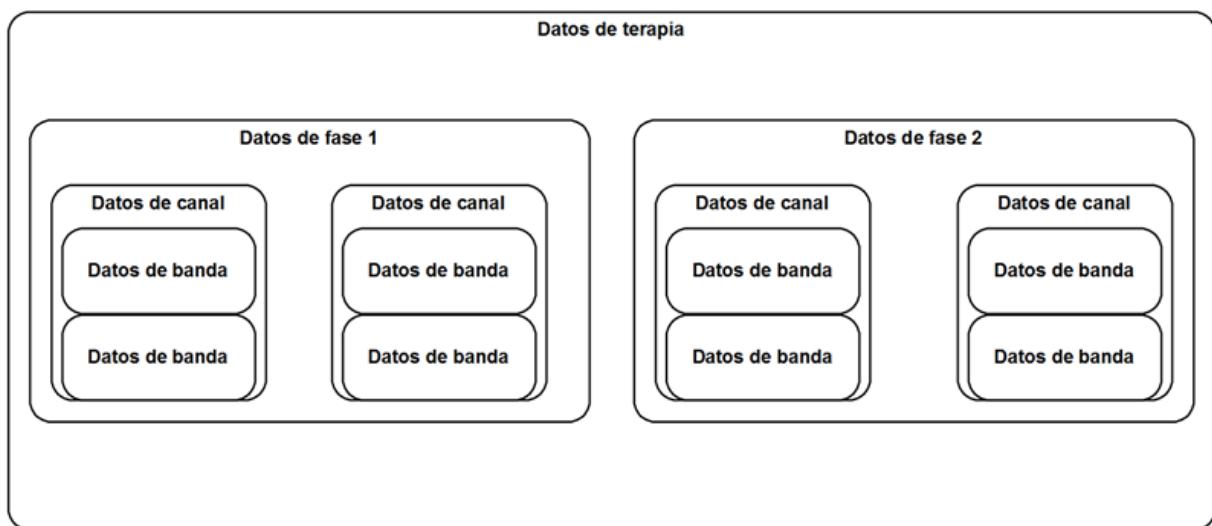


Figura 3.7: Estructura del fichero binario que alberga una sesión.

Comunicaciones. Ambos sistemas se encuentran integrados dentro de la plataforma BZI. Con el objetivo de proporcionar más facilidad de la hora de la integración, sólo una clase es la encargada de hacer de mediador entre los dos sistemas que nos ocupan y la plataforma BZI. Esta clase es la ya mencionada 'NFBOperatorDisplay', que se encuentra dentro de la unidad 'DisplayUnit'. Esta unidad se encuentra en el módulo controller (controlador). Por lo tanto nuestros sistemas se encuentran dentro de este módulo. En el caso del sistema de monitorización y control la información fluye según el esquema 3.8.

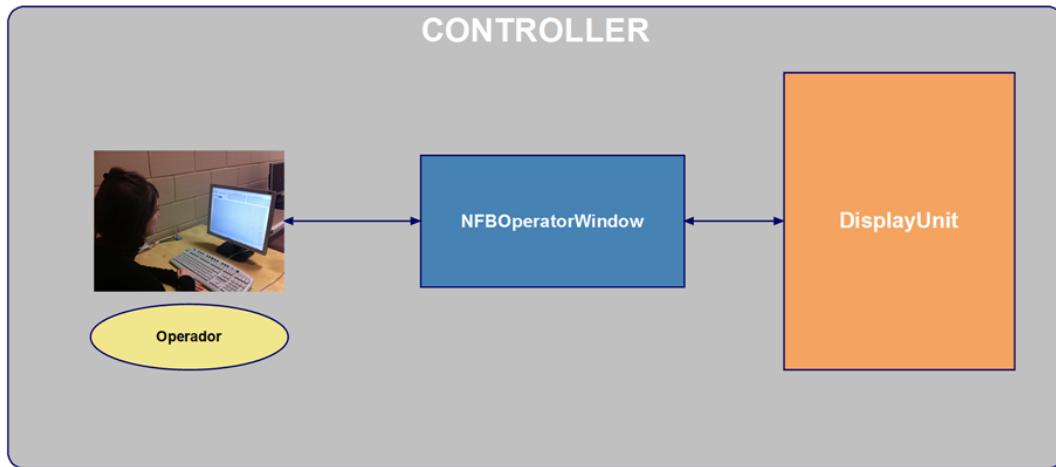


Figura 3.8: Esquema de comunicación entre el sistema de control y monitorización con el resto de la plataforma BZI.

En cuanto a las comunicaciones dentro de ambos sistemas desarrollados en este PFC el mecanismo de comunicación implementado se ha realizado haciendo uso de las señales de las librerías Qt, que permiten no sólo funcionar como sistema de comunicación, sino de sincronización, ya que están basadas en eventos y, por tanto dependen del momento en el que sean producidos.

Eficiencia. La eficiencia es un factor muy importante a tener en cuenta en el sistema de monitorización y control. Toda la plataforma debe garantizar el poder cumplir un tiempo de ciclo muy estricto y las funciones que manipulan elementos gráficos son muy pesadas, así que una estrategia de implementación apropiada es fundamental. En el módulo controller de BZI se ejecutan dos hilos paralelos, uno para el procesado de datos y otro para las funciones gráficas, así que la estrategia consiste en desacoplar todas las operaciones de datos de las funciones que contengan la manipulación de algún elemento gráfico, así pues cada elemento gráfico tiene dos métodos o funciones principales, process y paint, encargadas del procesado de datos y de la actualización de elementos gráficos respectivamente. Además los datos a los que tiene acceso nuestro sistema de monitorización y control están en una única zona de memoria. De este modo BZI indica su referencia, ya que así se evita la copia de datos, que es mucho más pesada. Adicionalmente las librerías Qwt utilizadas fueron modificadas ya que aunque con este modelo el rendimiento era satisfactorio, cuanto

3. Desarrollo

3.3 Fase de implementación

más ligero fuera, más portable sería también a arquitecturas con un rendimiento menor. A tenor de este rendimiento se adjunta en el capítulo de pruebas una comparativa de rendimiento.

Interfaces finales. Finalmente se adjuntan dos imágenes, del sistema de configuración (figuras 3.10 y 3.9) y otra del sistema de control y monitorización (figura 3.11), en las que se identifican y explican cada una de las partes del sistema. Si se quiere conocer sus funcionalidades con más detalle, deberá acudirse al anexo de manual de usuario.

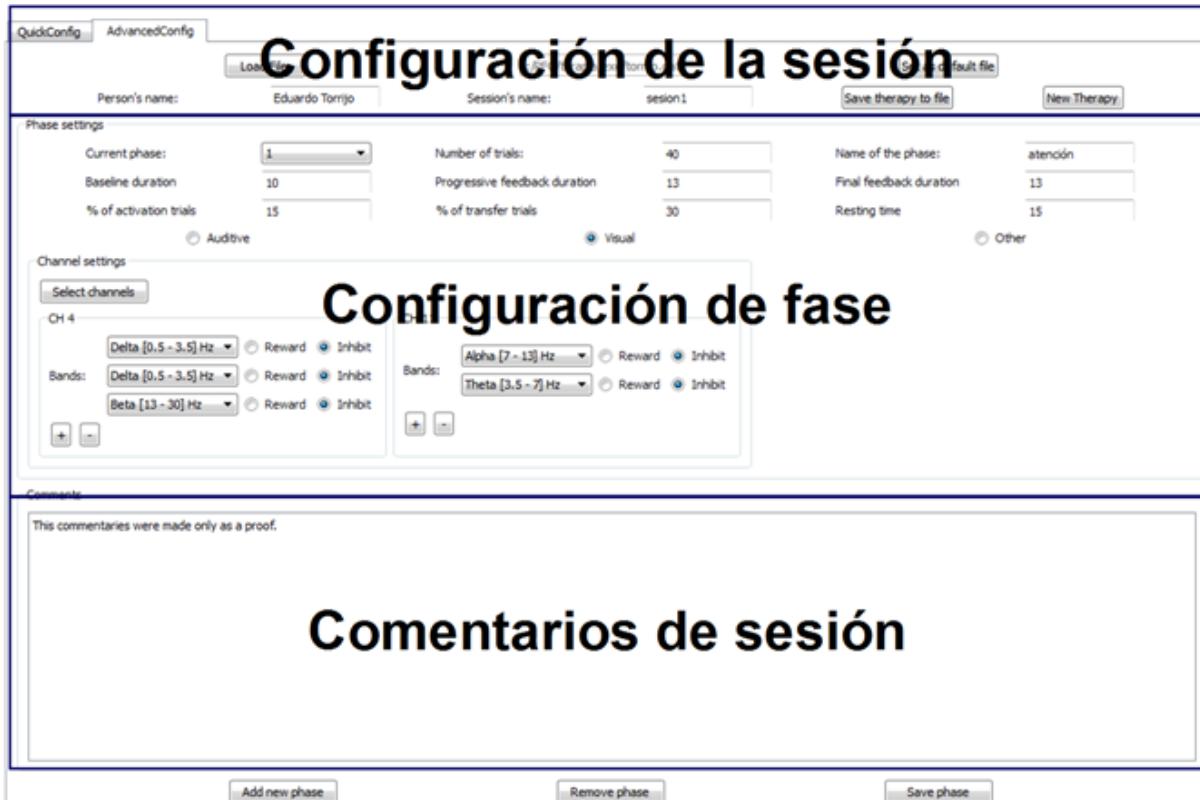


Figura 3.9: Captura de pantalla del sistema de configuración de sesiones, pantalla de creación y edición. En ella se puede apreciar la zona de configuración de la sesión, en la que se puede definir el nombre de la sesión y la persona, así como cargar una sesión existente desde un fichero o establecer la sesión cargada como sesión predefinida. En la zona de configuración de fase el terapeuta introduce todos los parámetros propios de cada fase como son las duraciones de sus partes, selecciona los canales que intervienen en la sesión, así como las bandas dentro de cada canal. Por último en la zona de comentarios de sesión el usuario puede definir un comentario personal, siendo los botones de la zona inferior para guardar progresivamente cada fase.

3. Desarrollo

3.3 Fase de implementación

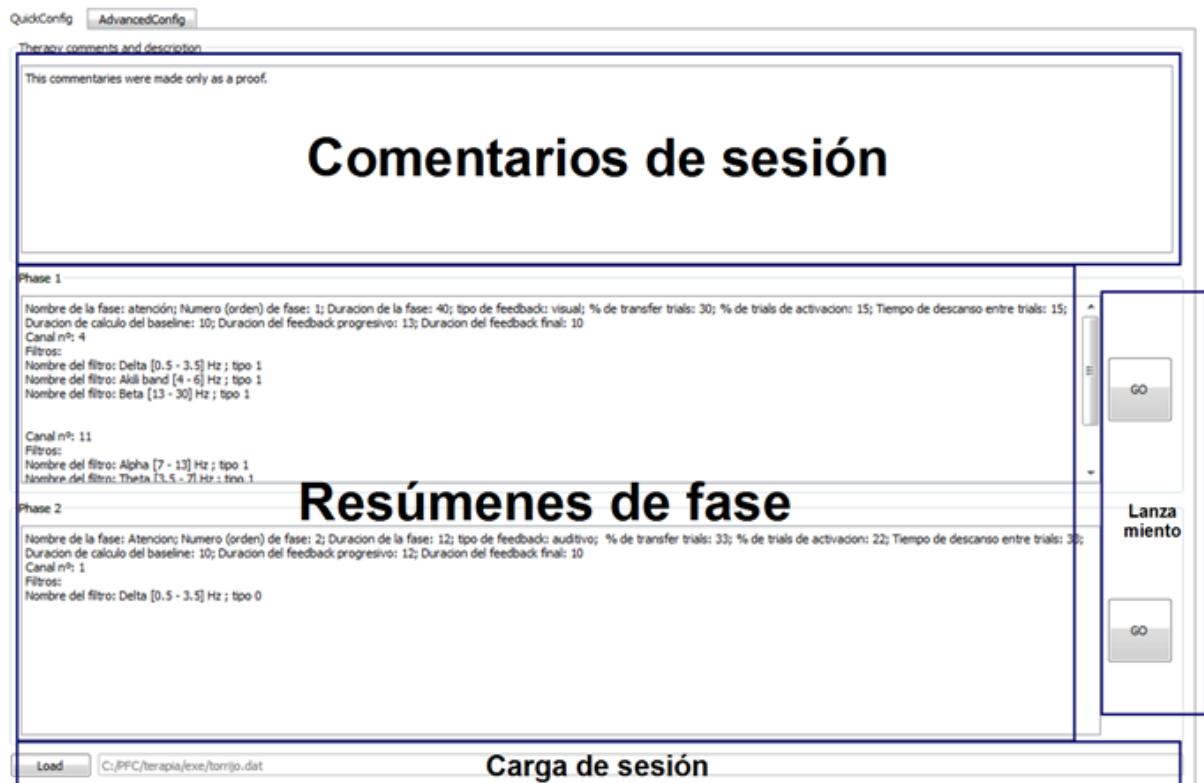


Figura 3.10: Captura de pantalla del sistema de configuración de sesiones, pantalla de lanzamiento. En la zona superior el usuario puede observar los comentarios personales agregados a la sesión. En la zona media de la pantalla existe un cuadro con resúmenes explicativos acerca de cada fase generados automáticamente. Para cada fase, en la zona de la derecha existe un botón que permite lanzarla. La zona inferior da la posibilidad de cargar otra sesión desde el fichero.

3. Desarrollo

3.3 Fase de implementación

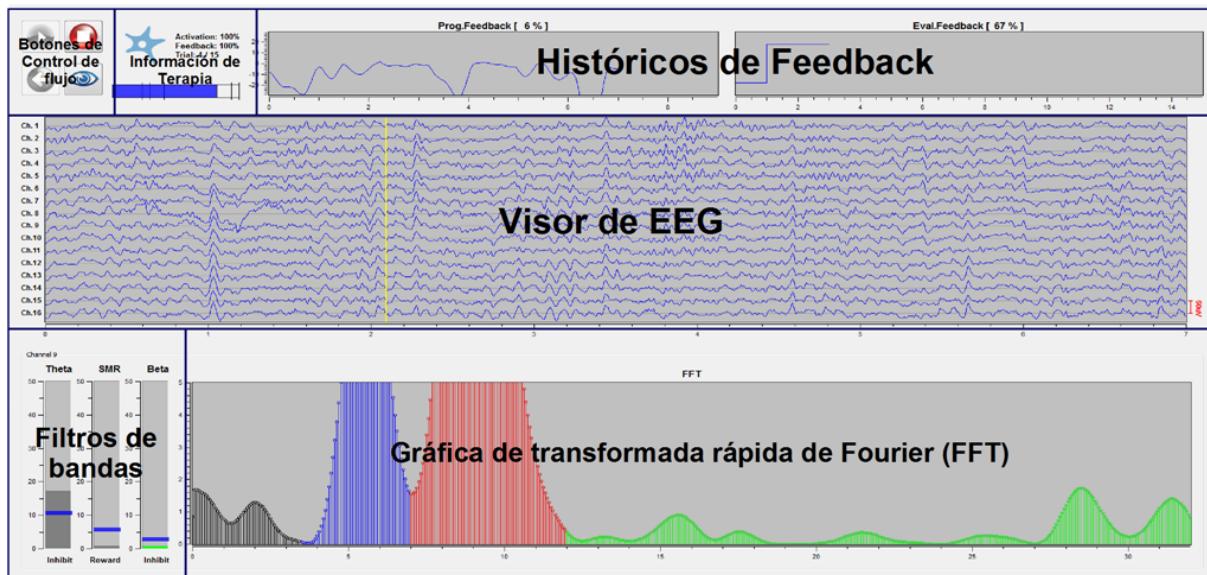


Figura 3.11: Captura de pantalla del sistema de control de ejecución de la sesión (modo avanzado). La zona de control de flujo se encarga de ofrecer operaciones como iniciar y detener. La parte de información de sesión pretende dar la información del feedback que se le da al instantáneamente al paciente al operador. Los históricos de feedback muestran la evolución del feedback progresivo a lo largo del trial así como del feedback de evaluación a lo largo de la fase. El visor de EEG muestran los canales adquiridos en tiempo real. En la zona de información de cada canal se pueden observar los filtros de bandas, en los cuales se puede modificar el umbral de cada una de estas y por último la gráfica con la FFT de la señal en ese canal, donde cada color representa una banda de frecuencia habitual.

4. Plan de pruebas

El objetivo de este capítulo es detallar un plan de pruebas que garantice la calidad del desarrollo realizado. Se realizarán pruebas de rendimiento y de usabilidad.

Motivación de las pruebas. Los casos de prueba técnicos descritos tienen como objetivo probar el sistema de monitorización y control en términos de rendimiento, mientras que las pruebas de usabilidad tienen como objetivo medir la facilidad con que las personas pueden utilizar la aplicación con el fin de alcanzar un objetivo concreto. Adicionalmente servirán como pruebas funcionales, las cuales tienen como objetivo definir un proceso de ejecución de pruebas sobre los distintos elementos del sistema para comprobar que sea una ejecución sin fallos. Algunas de las razones que motivan la ejecución de este manual de pruebas son: comprobar la eficiencia de nuestro sistema, minimizar riesgos que afecten a determinados aspectos de la calidad, minimizar el riesgo de fallo en determinados casos de uso, asegurar el correcto funcionamiento del desarrollo bajo cada escenario y situación posible, y asegurar un nivel de usabilidad para el usuario final.

Pruebas de rendimiento. Estas pruebas consisten en ejecutar una comparativa del sistema gráfico con una herramienta referencia para la comunidad científica de BCIs, BCI2000[21]. Las pruebas se realizaron en un computador con las siguientes características:

- Procesador Pentium Dual-Core E6700 @ 3.2 GHz
- 4 GB de memoria RAM
- Sistema Operativo: Windows 7 Ultimate 64 bits

La medida que se va a dar de rendimiento es el porcentaje de trabajo medio de CPU durante 2 minutos de ejecución. Se realizaron con un usuario real y consistieron en visualizar 2 segundos de 16 canales de EEG variando el número de datos a actualizar en pantalla, ya que así se prueba únicamente la herramienta gráfica y no toda la plataforma. La tendencia de consumo medio de CPU entre los los sistemas se muestra en la gráfica 4.1. En la gráfica 4.1 se aprecia la diferencia de rendimiento entre ambos sistemas, así como

4. Plan de pruebas

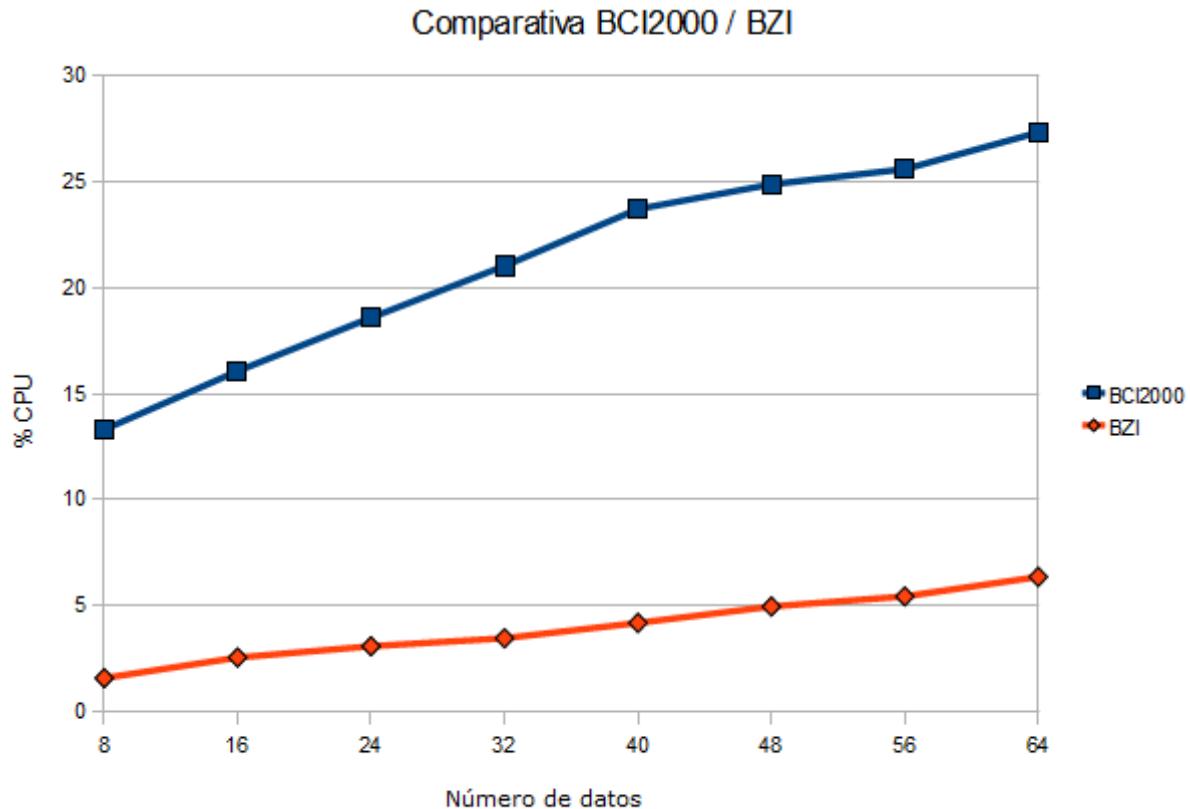


Figura 4.1: Gráfica comparativa entre nuestro sistema gráfico con el sistema gráfico de BCI2000.

un aumento menor de las prestaciones conforme aumenta la carga, representado por una pendiente ligeramente menor en nuestro sistema.

Pruebas de usabilidad. Las pruebas de usabilidad se realizaron usando dos enfoques: pruebas con usuarios y evaluación de heurísticas de Nielsen. Más adelante se verá el plan de pruebas que se preparó.

Estas pruebas están orientadas a medir la usabilidad del sistema. Adicionalmente servirán como pruebas funcionales, ya que se probarán ambos sistemas por distintos usuarios, debiéndose realizar todas las operaciones posibles. En nuestro caso los objetivos principales serán: determinar si un usuario puede utilizar nuestra aplicación completando satisfactoriamente el proceso de creación y lanzamiento de una terapia y determinar si la interfaz de usuario es lo suficientemente intuitiva para los usuarios. Las pruebas de usabilidad se realizaron con cinco participantes del grupo de interfaces cerebro-computador. La razón de elegir cinco usuarios es porque la razón de coste/beneficio de la prueba es mayor cuando se utilizan entre tres y cinco usuarios [22], mientras que el motivo por el cual estos participantes debían ser del grupo de interfaces cerebro-computador es debido a que la

4. Plan de pruebas

Pregunta	Respuesta Media
En general el sistema	agradó 2.4
Los textos de los botones	representan su acción 2.2
La interacción con el sistema es	intuitiva 1.6
Los mensajes del sistema	sirvieron 2.2
El propósito del sistema me parece	útil 3
Las opciones que brinda el sistema son	demasiadas 1.8
En términos generales el funcionamiento del sistema me parece	bueno 2.4

Tabla 4.1: Resultados generales de la evaluación mediante semánticas diferenciales.

terminología y conceptos empleados deben conocerse antes de evaluar la herramienta.

Descripción de las pruebas. La tarea a realizar comprende todo lo que un usuario debe hacer y engloba varios casos de uso. Los métricas utilizadas en la evaluación de la tarea fueron: tiempo necesario para completar la tarea, número de errores y número de preguntas hechas para solucionar un error o duda. Antes de comenzar, a cada usuario se le explicó cuál sería su tarea a realizar y se le dio una pequeña instrucción acerca del propósito del sistema. Una vez iniciada la prueba no se brindó ayuda a los usuarios a excepción de que ellos la solicitaran o llevaran mucho tiempo sin resolver un problema. Después de las tareas los usuarios contestaron un breve cuestionario para complementar la evaluación. Esta se compone de preguntas con un enfoque de semánticas diferenciales. Una escala de este tipo muestra dos términos separados por una escala. El usuario debe marcar en la escala el grado con el cual coincide su opinión. La escala utilizada fue la siguiente: 3 = mucho, 2 = regular, 1 = poco, 0 = indiferente. Adicionalmente contiene dos preguntas abiertas mediante las cuales el usuario podía dar sugerencias acerca de cambios en la interfaz y opciones que brinda el sistema.

Resultados de evaluación con usuarios. La tabla 4.1 presenta los resultados medios de acuerdo a los cuestionarios de evaluación mediante semánticas diferenciales y la gráfica 4.2 representa dichos resultados. Todos los resultados de las medidas de las tareas de cada usuario y los resultados de los cuestionarios se encuentran en el anexo de pruebas para su consulta.

Al interpretar la tabla se puede concluir lo siguiente:

- El sistema agrado bastante en general.
- Los textos de los botones representan de manera normal su función.
- La interacción con el sistema es en general intuitiva.
- Los mensajes del sistema sirvieron bastante en general.

4. Plan de pruebas

- El propósito del sistema parece muy útil.
- Las opciones que brinda el sistema son muchas.
- En términos generales el sistema parece bastante bueno.

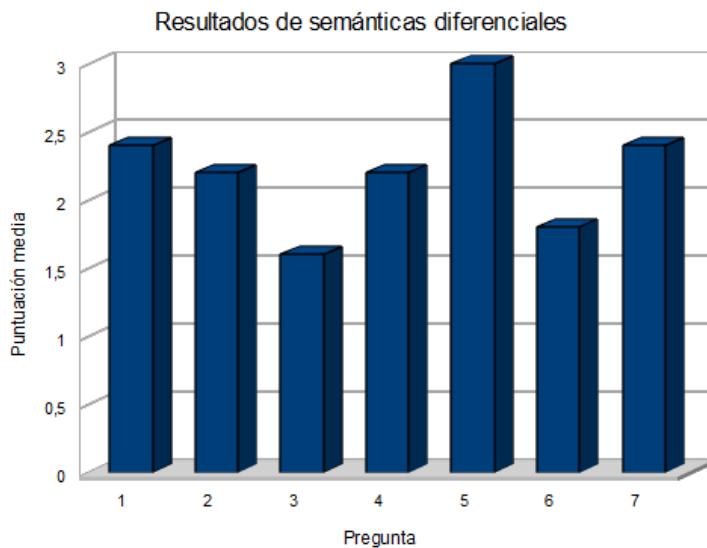


Figura 4.2: Gráfica que muestra la media del grupo resultante para cada pregunta de semánticas diferenciales.

No obstante durante la ejecución de las tareas por parte de los usuarios se detectaron pequeñas deficiencias en la manera en la que se presentan algunas cosas como la disposición de los botones podría cambiarse un poco para ser más acordes al orden en que deben clickearse y que la caja de selección de canales debería advertir al cerrar de si únicamente se quiere seleccionar un canal o más.

Heurísticas de Nielsen. En todas las disciplinas existen pautas para realizar procesos de manera correcta y eficiente. Dichas pautas no siempre son reglas estrictas y en ocasiones su cumplimiento queda a criterio de aquel que las aplica. Para la usabilidad de interfaces hay referencias que contienen un número exagerado de pautas y reglas. No obstante Nielsen [23] las reduce a 10 para facilitar la evaluación. Su objetivo es guiar a los desarrolladores en la creación de interfaces amigables y fáciles de usar, ayudándoles a encontrar errores de usabilidad. Aun cuando se sigan al pie de la letra no se garantiza que todos los errores sean eliminados, pero su relación coste/beneficio es muy atractiva [22]. A continuación se citan los 10 principios mencionados:

1. Diálogo simple y natural.
2. Hablar el idioma del usuario.

4. Plan de pruebas

3. Minimizar la carga de memoria al usuario
4. Consistencia
5. Retroalimentación
6. Salidas claramente marcadas
7. Atajos
8. Buenos mensajes de error
9. Prevenir errores
10. Ayuda y documentación

Evaluación de las heurísticas. Para la evaluación de los principios de usabilidad se les pide a los usuarios que analicen cuidadosamente la interfaz y traten de señalar aquellas partes cuyo funcionamiento vaya en contra de algún principio de la lista. Cada evaluador tendrá una sesión por separado en la cual revisará cuidadosamente todos los elementos y opciones del sistema e intentará señalar aquellos que no cumplen con los principios de usabilidad antes mencionados.

Resultados de evaluación de heurísticas. La tabla 4.2 contiene los resultados de las pruebas. Por razones prácticas todos los resultados se han integrado en una sola tabla, aunque si se desean conocer los resultados presentados por cada usuario puede hacerse en el anexo de pruebas. De acuerdo con esta tabla podemos encontrar 4 elementos del sistema que no cumplen con alguna de las heurísticas. No obstante, en cuanto al idioma se realizó en inglés, ya que es el idioma más entendido y hablado por la gente hoy en día. Estos errores encontrados por los usuarios, así como sus sugerencias sirven para aplicar futuras correcciones en la interfaz de la aplicación de configuración.

4. Plan de pruebas

Heurística	Errores encontrados
Diálogo simple y natural	Ninguno.
Habla el idioma del usuario	La aplicación está en inglés.
Minimizar la carga de memoria al usuario	Ninguno.
Consistencia	Ninguno.
Retroalimentación	Ninguno.
Salidas claramente marcadas	Costó encontrar algún botón.
Atajos	No hay atajos.
Buenos mensajes de error	Ninguno.
Prevenir errores	Poco clara la selección simultánea de canales.
Ayuda y documentación	Se echa en falta una ayuda del tipo help.

Tabla 4.2: Resultados generales de la evaluación mediante heurísticas de Nielsen.

5. Conclusiones y trabajo futuro

En este capítulo se presentan las conclusiones finales, así como un posible trabajo futuro.

5.1. Conclusiones

Podemos concluir que se ha desarrollado un sistema para posibilitar la configuración de terapias de neurofeedback a terapeutas sin conocimientos informáticos y se ha desarrollado un sistema de monitorización y control para las sesiones de neurofeedback con los usuarios. Además, este último sistema ha probado ser muy eficiente, mientras que el sistema de configuración ha demostrado tener un nivel de usabilidad bueno. Ambos sistemas se han integrado con éxito dentro de una plataforma en desarrollo que ya poseía una estructura determinada. En definitiva, podemos afirmar que hemos desarrollado unos sistemas de propósito general para neurofeedback que funcionan como prototipo para, integrados dentro de una plataforma concreta, actuar como medio para que un especialista sin experiencia informática diseñe y ejecute una terapia de neurofeedback con cualquier propósito concreto.

5.2. Trabajo futuro

Al encontrarnos en un campo de investigación pionero es muy poco lo que se sabe acerca de este tipo de aplicaciones, ya que la gran mayoría de tratamientos actuales consisten en medicación. En este sentido el trabajo que hay por delante es mucho, empezando por el mantenimiento de este software, así como futuras revisiones y mejorasn como puede ser en el sistema de gestión, añadiendo nuevas funcionalidades que den más flexibilidad al sistema. Además, su prueba en situaciones reales seguramente llevará a plantearse aspectos que ahora no se hayan tenido en cuenta. Una aplicación inmediata sería su utilización para el tratamiento del TDA. Esto nos permitiría probar la herramienta en situaciones reales. Es posible que nuevas investigaciones en el área de la neurología acerca de los procesos neurofisiológicos lleven a utilizar otras métricas y procesos distintos a las utilizadas

5. Conclusiones y trabajo futuro

5.2 Trabajo futuro

hoy en día. Si esto ocurre habría sido imprescindible modificar los elementos de ambos sistemas.

Bibliografía

- [1] J.R.Wolpaw, N.Birbaumer, D.J.McFarland, G.Pfurtscheller, and T.M.Vaughan. Brain-computer interfaces for communication and control. *Clinical Neurophysiology.*, 113(6), 2002.
- [2] J.N. Demos. *Getting started with neurofeedback*. WW Norton, 2005.
- [3] H.Gevensleben, B.Holl, and B.Albrecht. Is neurofeedback an efficacious treatment for ADHD? A randomised controlled clinical trial. *Journal of Child Psychology and Psychiatry and Allied Disciplines.*, 50(7), 2009.
- [4] T.Elbert, N.Birbaumer, P.Wolf, A.Duchting-Roth, M.Reker, I.Daum, W.Lutzenberger, and J.Dichgans. Cortical self-regulation in patients with epilepsies. *Epilepsy res*, 14:63–72, 1993.
- [5] I.Iturrate, J.Antelis, A.Kübler, and J.Mínguez. Non-Invasive Brain-Actuated Wheelchair based on a P300 Neurophysiological Protocol and Automated Navigation. *IEEE Transaction on Robotics*, June 2009.
- [6] C.Escalano, J.Antelis, and J.Mínguez. Human Brain-Teleoperated Robot between Remote Places. *IEEE International Conference on Robotics and Automation.*, September 2009.
- [7] Rothenberger, Döpfner, Sergeant, and Steinhausen. *ADHD beyond core symptoms - not only a European perspective*. H.C., 2004.
- [8] C.Gilberg, I.C. Gillberg, P.Rasmussen, B.Kadesjö, H. Söderström, M.Rastam, M. Johnson, A.Rothenberger, and L.Niklasson. Co-existing disorders in ADHD - implications for diagnosis and intervention. *European Chind and Adolescent Psychiatry.*, 2004.
- [9] M.Loro-López, J.Quintero, N.García-Campos, B.Jiménez-Gómez, F.Pando, P.Varela-Casal, J.A. Campos, and J.Correas-Lauffer. Actualización en el tratamiento del trastorno por déficit de atención/hiperactividad. *Revista de neurología*, 49:257–264, 2009.

- [10] E.Taylor, M.Döpfner, J.Sergeant, P.Asherson, T.Banascheswski, J.Buitelaar, D.Coghill, M.Danckaerts, A.Rothenberger, E.Sonuga-Barke, H.C. Steinhausen, and A. Zuddas. European clinical guidelines for hyperkinetic disorder - first upgrade. *European Child and Adolescent Psychiatry*, pages 17–30, 2004.
- [11] M.Abikoff. Cognitive training in ADHD children: less to it than meets the eye. *Journal of Learning Disabilities*, 24:205–209, 1991.
- [12] H.Heinrich, H.Gevensleben, and U.Strehl. Neurofeedback - train your brain to train behaviour. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 48:3–16, 2007.
- [13] U.Strehl. Self-regulation of Slow Cortical Potentials: A New Treatment for Children With Attention-Deficit/Hyperactivity Disorder. *Pediatrics*, 2006.
- [14] T.H.Budzynski, H.K.Budzynski, J.R.Evans, and A.Abarbanel. *Introduction to Quantitative EEG and Neurofeedback, Second Edition: Advanced Theory and Applications*. Academic Press, 1999.
- [15] T.Hinterberger, N.Neumann, M.Pahm, A.Kübler, A.Grether, N.Hofmayer, B.Wilhelm, H.Flor, and N.Birbaumer. A multimodal brain-based feedback and communication system. *Brain Res*, 154:521–526, 2004.
- [16] U. Leins, G. Goth, T. Hinterberger, C.Klinger, N.Rumpf, and U.Strehl. Neurofeedback for Children with ADHD: A Comparison of SCP and Theta/Beta Protocols. *Springer Science*, 2007.
- [17] I.Jacobson, G.Booch, and J.Rumbaugh. *El proceso unificado de desarrollo software*. Addison Wesley, 2000.
- [18] Nokia. Qt libraries. <http://qt.nokia.com>, 1992.
- [19] Uwe Rathmann. Qwt libraries. <http://qwt.sourceforge.net/>, 1997.
- [20] Free Software Foundation. Gnu lesser general public license. <http://www.gnu.org/copyleft/lesser.html>, 2007.
- [21] D.J. McFarland, T.Hinterberger, N.Birbaumer, and J.R.Wolpaw. BCI2000: A General-Purpose Brain-Computer Interface (BCI) System. *IEEE Transactions on biomedical engineering*, 51(6), 2004.
- [22] J.Nielsen. *Usability Engineering*. 1993.
- [23] J.Nielsen. *Usability inspection methods*. 1994.