



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

Máster en Ingeniería Industrial

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL
ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES
UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

TRABAJO FIN DE MÁSTER

**Desarrollo de nuevas terapias y evaluación del estado emocional en la
interacción física de una persona y el robot de rehabilitación
neuromotora PHYSIOBOT**

Autor: D. Borja Fernández Villar
Tutor: D. Javier Pérez Turiel

Valladolid, Julio, 2018

Resumen

Con el presente estudio de investigación se ha buscado la validación del uso de nuevas terapias virtuales desarrolladas para la plataforma robótica de neuro-rehabilitación PHYSIOBOT como etapa previa a su ensayo con pacientes. Se parte de un estudio realizado sobre 50 sujetos sanos siguiendo un novedoso protocolo de actuación, en el que se ha medido su estado psicofisiológico durante el desarrollo de una serie de terapias virtuales en las que se interactuó con PHYSIOBOT. En ellas se midió el grado de estrés mediante una batería de test auto evaluativos. Se monitorizaron tres señales fisiológicas: el electrocardiograma (ECG), la respuesta galvánica de la piel (GSR) y la temperatura de la piel (SKT). A continuación se realizó un procesamiento y análisis de los datos obtenidos en Matlab, obteniendo como resultado una relación entre el estado psicofisiológico asociado a la realización de las terapias, con las respuestas fisiológicas de los sujetos. Los resultados evidencian que pueda medirse la carga cognitiva que implican las actividades terapéuticas a través de las señales fisiológicas del paciente, lo que permitiría incluir al paciente en el lazo de control del robot, utilizando la realimentación basada en el valor de las señales fisiológicas del sujeto

Palabras clave

Rehabilitación robótica, terapias virtuales, bio-feedback, variables psicofisiológicas, respuesta galvanica de la piel, temperatura dérmica, electrocardiograma

Summary

With the present research study, the validation of the use of new virtual therapies developed for the PHYSIOBOT neuro-rehabilitation robotic platform and its use with patients has been sought. It is based on a study conducted on 50 healthy subjects following a novel protocol of action, in which their psychophysiological state has been measured during the development of a series of virtual therapies in which they interacted with PHYSIOBOT. In them, the degree of stress through a battery of self-evaluative tests. Three physiological signals were monitored: the electrocardiogram (ECG), the galvanic skin response (GSR) and the skin temperature (SKT). Next, a processing and analysis of the data obtained in Matlab was performed, obtaining as a result a relationship between the psychophysiological state associated with the realization of the therapies, with the physiological responses of the subjects. The results show that the cognitive load implied by therapeutic activities can be measured through the physiological signals of the patient, which would allow to include the patient in the robot control loop, using the feedback based on the value of the physiological signals of the subject

Keywords

Robotic rehabilitation, virtual therapies, bio-feedback, psychophysiological variables, galvanic response of the skin, dermal temperature, electrocardiogram

Contenido

1.	Introducción y objetivos	1
2.	Planteamiento del estudio: materiales y métodos	4
2.1.	Plataforma robótica	4
2.2.	Instrumentación de registro de señales fisiológicas	6
2.2.1.	Módulo GSR100C.....	7
2.2.2.	Módulo SKT100C	8
2.2.3.	Módulo ECG100C.....	9
2.3.	Test Valoración de la carga cognitiva: Test SAM	12
2.4.	Muestra poblacional	13
2.5.	Protocolo de experimentación.....	13
3.	Desarrollo de Nuevas Terapias Virtuales	17
3.1.	Terapias Convencionales	17
3.2.	Terapias AVD	17
3.2.1.	Colocar Libros	17
3.1.2	Terapia Marcar Número	21
3.3	Mejoras Generales de las Terapias Virtuales	22
3.3.1	Elaboración de un diseñador gráfico.....	22
3.3.2	Preparación de un sistema de puntuación	24
3.3.3	Instalación de sonidos y efectos musicales opcionales	24
4.	Procesamiento de las señales fisiológicas y obtención de indicadores	26
4.1.	Presentación de los datos	27
4.2.	Clasificación de los datos	29
4.3.	Pre procesamiento de las señales.....	30
4.4.	Señal GSR.....	31
4.4.1.	SCL.....	31
4.4.2.	SCRs	32
4.4.3.	Pre-procesamiento de GSR.....	33
4.4.4.	Software desarrollado	35
4.5.	Señal SKT	39
4.6.	Clasificación de las señales GSR y SKT.....	41
4.7.	Señal ECG	42
4.7.1.	Pre-procesamiento de la señal ECG.....	42

4.7.2. Características de los intervalos R-R.....	44
5. Procesado de datos y análisis de resultados.	46
5.1. Re-caracterización de la muestra	46
5.2. Índices.....	46
5.3. Test de SAM.....	47
5.4. Señal GSR	49
5.5. Señal SKT	52
6. Conclusiones	54
7. Trabajo futuro.....	56
Bibliografía	57
Bibliografía web.....	58
A. Documentos elaborados para el estudio	61
0. Información sobre los tiempos de ejecución	61
1. Documento informativo para participantes	62
2. Plantilla identificativa.....	66
B. Códigos en software Matlab 2013	67
0. Fragmentación de ficheros.....	67
1. Pre-procesamiento de las señales.....	69
2. Pre-procesamiento de la señal GSR	69
3. Procesamiento de la señal GSR.....	70
4. Procesamiento de la señal SKT	72
5. Programa principal y creación de ficheros	72
6. Cambio de la asistencia del robot.....	73

Lista de Figuras

Figura 1. Plataforma PHYSIOBOT	2
Figura 2. Flujo de control bio-cooperativo de PHYSIOBOT con biofeedback	3
Figura 3. Localización de PHYSIOBOT para la realización de las terapias de rehabilitación con sujetos sanos en Cartif	5
Figura 4. Terapia Virtual de rehabilitación en modo "Activo Asistido"	6
Figura 5. Hardware BIOPAC MP150	7
Figura 6. Configuración de la señal GSR en el AcqKnowledge	8
Figura 7. Disposición de los sensores de lectura GSR	8
Figura 8. Configuración de la señal SKT en el AcqKnowledge	9
Figura 9. Tipología del ECG	10
Figura 10. A) Triángulo de Einthoven [6w]. B) Representación de derivaciones cardiacas [4w]	11
Figura 11. A) Señal eléctrica de las derivaciones. B) Disposición de los sensores para lectura del ECG	11
Figura 12. Modelo de Estado Emocional PAD	12
Figura 13. Test SAM	13
Figura 14. Esquema del protocolo	15
Figura 15. Terapia Armario	19
Figura 16. Terapia Cocina	19
Figura 17. Terapia Huerto	20
Figura 18. Terapia Supermercado	20
Figura 19. Terapia Marcar Número	21
Figura 20. Diseñador Gráfico	22
Figura 21. Menú Guardar	23
Figura 22. Sistema de puntuación	24
Figura 23. Diagrama de flujo del procesamiento de datos	27
Figura 24. Señales fisiológicas registradas con AcqKnowledge durante la experimentación con pacientes	29
Figura 25. Sistema de jerarquía de archivos	30
Figura 26. Representación del SCR en un evento de GSR	32
Figura 27. Lectura de una señal GSR a 500 Hertz en 6 minutos	33
Figura 28. Señal GSR con ruido (rojo) y filtrada (azul)	34
Figura 29. Primera derivación GSR	35
Figura 30. Señal bruto (rojo) y filtrado (azul) de GSR	35
Figura 31. Tercera condición para detección del SCR	36
Figura 32. Algoritmo de detección de la señal GSR	37
Figura 33. Algoritmo de detección de eventos SCR	37
Figura 34. Aplicación algoritmo detección SCR sobre señal GSR	38
Figura 35. Representación eventos en señal GSR	38
Figura 36. Software GSR	39
Figura 37. Señal SKT durante una terapia de rehabilitación	40

Figura 38. Documento con lecturas de GSR y SKT	41
Figura 39. Señal del ECG en milivoltios, filtrada, y con los picos del RR marcados.	43
Figura 40. ECG procesado en Matlab y señal del RR obtenida.....	44
Figura 41. Flujo de estados para el procesado del ECG	45
Figura 42. Resultados de la medida de la Valencia	48
Figura 43. Resultados de la medida del Umbral	48
Figura 44. Resultados de la medida del Dominio	49
Figura 45. Resultados obtenidos de los eventos del SCR por terapia.....	50
Figura 46. Resultados de las amplitudes de los eventos del SCR.....	51
Figura 47. Resultados del SCL.....	52
Figura 48. Resultados del SKT por cada terapia	53

Lista de Tablas

Tabla 1. Señales fisiológicas medidas y sus respectivas unidades.....	7
Tabla 2. Índices obtenidos del procesamiento.....	26
Tabla 3. Índices analizados en el estudio	47
Tabla 4. Valores medidos en el test SAM.....	47
Tabla 5. Valores obtenidos en el GSR	49
Tabla 6. Resultados de las mediciones del SKT.....	52

1. Introducción y objetivos

La posibilidad de determinar los estados psico-emocionales en una interacción físico humano-robot (pHRI, physical Human-Robot Interaction) ofrece una interesante gama de oportunidades; por ejemplo, para conocer el estado emocional de un paciente en rehabilitación o para modular un escenario cooperativo de pHRI con el fin de mejorar la experiencia terapéutica de rehabilitación de un paciente.

El sistema nervioso autónomo (ANS: Autonomous Nervous System) es el medio por el cual las emociones se reflejan en términos de señales fisiológicas, como los parámetros de la frecuencia cardíaca, la respiración y la temperatura corporal. Por lo tanto, las respuestas fisiológicas del ANS a diferentes estímulos permiten determinar el estado psicoemocional instantáneo de una persona.[1w]. Otros enfoques para estudiar el estado psico-emocional incluyen el uso de baterías de prueba, un ejemplo es el Maniquí de autoevaluación (SAM), pero no todos son adecuados para caracterizar en línea los estados emocionales.

Por estas razones, las señales fisiológicas podrían ser adecuadas para caracterizar los estados emocionales de una manera más objetiva y menos invasiva. Hemos revisado diferentes trabajos en el campo de la psicofisiología para determinar qué señales fisiológicas se podrían utilizar para caracterizar los estados emocionales. La Tabla I muestra la prevalencia de estas señales; las más utilizadas son la variabilidad de la frecuencia cardíaca (HRV, Heart Rate Variability) y la segunda es la actividad electrodérmica (EDA, Electrodermal Activity).[2w].

El rendimiento, la velocidad y la variabilidad de la frecuencia cardíaca son susceptibles a estados emocionales [1]. Los estados mentales pueden ser formados por la percepción del rendimiento del sujeto en un momento dado. Nuestra hipótesis es que el "estado psicofisiológico humano" puede ser determinado en diferentes escenarios ofrecidos por nuestra plataforma robótica PHYSIOBOT.

Los trabajos iniciales en el campo de la pHRI evolucionaron desde el uso de una única señal (frecuencia cardíaca) hacia sistemas más complejos que incluyen frecuencia cardíaca (FC), frecuencia respiratoria (RR, Respiration Rate), respuesta galvánica de la piel (GSR, Galvanic Skin Resistance) y temperatura de la piel (SKT, Skin Temperature).

La plataforma robótica utilizada para la configuración experimental es el sistema PHYSIOBOT (como se muestra en la Fig. 1). Incluye un robot háptico de estructura cartesiana equipado con un sensor de fuerza / par JR3 montado en el efector final, que se utiliza como la plataforma central de hardware para el sistema.

Las señales fisiológicas se registraron mediante el uso de un sistema Biopac MP150. Toda la información en bruto y procesada de las señales se almacenó en un archivo codificado mientras tanto las cinemáticas y los datos dinámicos de la terapia se almacenaron en una base de datos relacional (SQL SERVER 2012).

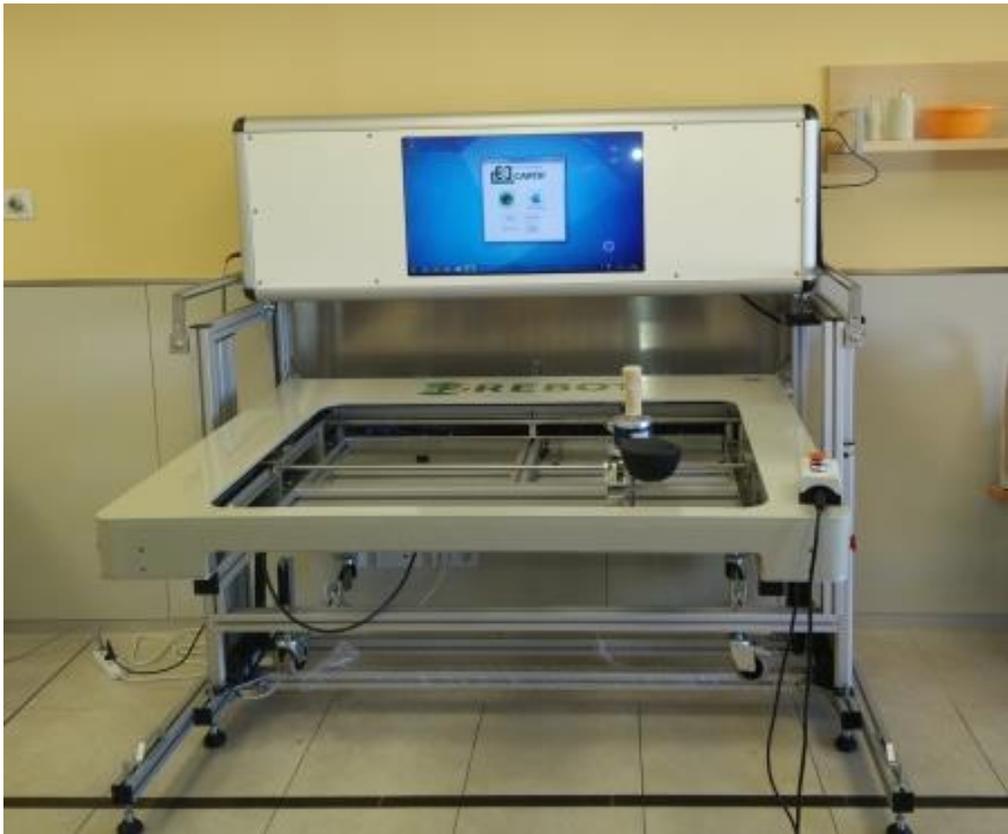


Figura 1. Plataforma PHYSIOBOT

El objetivo de la investigación se centra en poder controlar el nivel de asistencia del robot utilizado para las terapias. De este modo, parámetros como la velocidad o la dificultad de la terapia se podrían ir ajustando a las necesidades no sólo físicas de los pacientes, si no también psicológicas. Así, lo que se busca es que la tasa de abandono de las terapias sea la menor posible, y que al mismo tiempo la dependencia con los sanitarios disminuya para que no reste tiempo de otras ocupaciones.

Si el estudio revelase la suficiente precisión y fiabilidad de la conexión psico-fisiológica se podría controlar el nivel de asistencia que brinda el robot introduciendo a la persona afectada en el lazo de control – como observamos en la **Figura 2** – por tanto, el robot de rehabilitación sería totalmente flexible, teniendo en cuenta, no únicamente la realimentación de la fuerza física ejercida por el paciente, si no la presión psicológica que este experimenta durante la realización de la terapia. La terapia se adaptaría a cada caso sin necesidad de una evaluación constante de los profesionales sanitarios, sobre todo si tenemos en cuenta cómo el ánimo de los pacientes puede verse afectado negativamente si la terapia no es adecuada. De este modo, se trata de evitar que el paciente pierda la motivación y deje de atender a la tarea de rehabilitación, garantizando que se encuentra en un estado anímico adecuado. Este avance podría repercutir positivamente en las tasas de éxito de las terapias y reducir el abandono de las mismas.

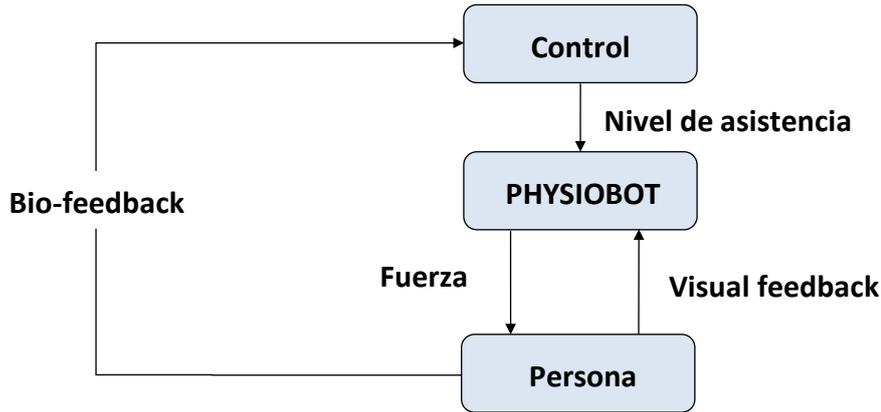


Figura 2. Flujo de control bio-cooperativo de PHYSIOBOT con biofeedback

Los objetivos del trabajo serían por tanto:

- Desarrollar nuevas terapias virtuales que permitan medir la carga cognitiva de los sujetos en diferentes entornos de rehabilitación
- Elaborar un protocolo de actuación para el registro y lectura de las señales fisiológicas durante las terapias y su posterior procesado y almacenamiento.
- Llevar a cabo un estudio sobre 50 sujetos sanos siguiendo el protocolo de actuación, en un entorno controlado y bajo las mismas directrices.
- Procesar todas las señales obtenidas haciendo uso tanto del software AcqKnowledge como de Matlab, para poder obtener posteriormente una serie de indicadores estadísticos que sirvan para el análisis de los resultados.
- Realizar una valoración preliminar de los resultados obtenidos y extraer conclusiones que sirvan de punto de partida para líneas de trabajo futuras.

2. Planteamiento del estudio: materiales y métodos

Durante el desarrollo de mis prácticas en empresa en el Centro Tecnológico Fundación CARTIF, entre Febrero y Septiembre del 2016, llevé a cabo el desarrollo de las terapias virtuales que se emplean en la plataforma PHYSIOBOT. Se llevaron a cabo diferentes tipos de terapias como se describe en puntos posteriores de esta memoria. Una vez terminadas, se elaboró un protocolo de actuación, teniendo en cuenta los de ejecución de las diferentes terapias (Anexo). Fue importante hacer la evaluación de los tiempos de las terapias para poder conformar un protocolo con una duración óptima para el registro de todas las señales.

Una vez se tuvo el protocolo listo, se empezó a trabajar con la plataforma de adquisición de señales fisiológicas BIOPAC MP150, que dispone de un software propio de adquisición de señales en tiempo real. Posteriormente la idea sería utilizar esta información en el algoritmo de control implantado en el controlador del robot PHYSIOBOT.

Para llevar a cabo la experimentación con sujetos, se habilitó una sala del Centro Tecnológico Fundación CARTIF. Todos los sujetos eran personas sanas trabajadores del Centro. Para la realización de las prácticas el autor de este trabajo hizo el papel de técnico encargado de la colocación de los sensores en los pacientes, la adquisición y lectura de los datos y preparación de las terapias virtuales con los pacientes. Las pruebas se llevaron a cabo de forma individual atendiendo a un estricto protocolo de actuación, que consistía en una información previa a los voluntarios sobre las características de la prueba, firma de consentimiento, correcta colocación de los sensores para toma de datos, y el control de la asistencia de los voluntarios a las terapias.

2.1. Plataforma robótica

La experimentación se llevó a cabo con la plataforma robótica PHYSIOBOT, que fue desarrollada en la Fundación Cartif en una colaboración con la Uva y otros centros empresariales: Aplifisa, IDECAL e IDES. Es un robot háptico, concebido para la neuro-rehabilitación de los miembros superiores de personas que sufren algún tipo de discapacidad neuromotora. De esta manera, a través de un entorno basado en juegos virtuales se aumenta la motivación a la hora del desempeño con las terapias de rehabilitación.

Este factor es clave en el proceso de reorganización neuronal, plasticidad, necesario para re-adquirir las capacidades motoras perdidas a raíz del accidente. En la **Figura 3** se observa la plataforma robótica una vez instalada en el lugar de la realización de las pruebas con voluntarios. Como se puede apreciar consta de dos partes diferenciadas: por un lado una pantalla en la que se visualizan los entornos terapéuticos virtuales, y por otro la mesa robotizada para la realización de los ejercicios de rehabilitación. En esta mesa, se disponía de un joystick, que representaba la posición de la mano real de paciente en un sistema cartesiano XY y lo escala al tamaño de la pantalla, para de esta manera tener una percepción real de la ubicación de la mano del propio paciente en los juegos.

Al desplazar el joystick por el espacio de trabajo, se registraban tanto los desplazamientos originados como la fuerza que el individuo es capaz de aportar, y mediante el paradigma de control conocido con el nombre de “asistencia a medida”, generaba la fuerza necesaria para completar el movimiento que la terapia está demandando. Así, la potencia prestada por el robot se regulaba en función del trabajo que realiza la persona, favoreciendo el control de los movimientos del paciente. El software del PHYSIOBOT permitía multitud de terapias que se basan en acciones cotidianas o en juegos. Disponía de un marcador con la puntuación obtenida, que proporcionaba al paciente información inmediata sobre su desempeño con el objetivo de aumentar su motivación [2].



Figura 3. Localización de PHYSIOBOT para la realización de las terapias de rehabilitación con sujetos sanos en Cartif

En la Figura 4 se observa una de las terapias de las que se disponía, incluida dentro del protocolo de actuación elaborado para las pruebas con sujetos sanos, denominado modo Activo Asistido, en la que el paciente tenía que desplazar la mano virtual por la pantalla intentando atrapar el ratón de ordenador que se va a intentar escapar de ella. Cuanto más tiempo pasase la mano encima del ratón, más puntuación obtendría el paciente. Superados ciertos niveles de puntuación, elegidos por el terapeuta, el paciente pasaría de nivel al haber progresado con sus ejercicios. Un paso a nivel superior implicaba una mayor dificultad en el juego, el ratón se movería más deprisa y el robot asistiría menos al paciente, que por lo tanto tendría que hacer un mayor esfuerzo para mover el joystick.

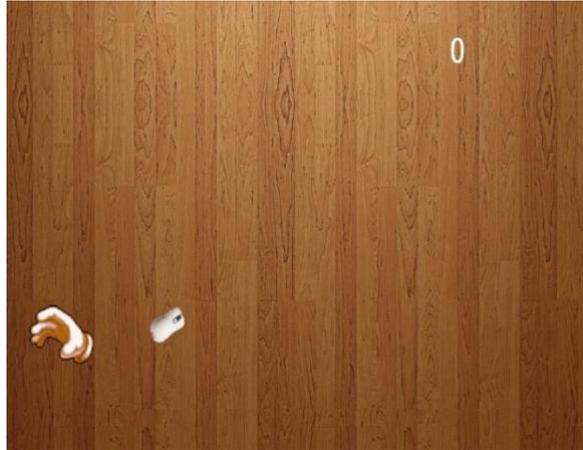


Figura 4. Terapia Virtual de rehabilitación en modo "Activo Asistido"

2.2. Instrumentación de registro de señales fisiológicas

Para llevar a cabo el estudio, el hardware biomédico utilizado ha sido el dispositivo BIOPAC MP150. Consta de un procesador central y otros módulos complementarios dependiendo de las señales fisiológicas que se quieren medir, como se muestra en la [Figura 5](#).

El módulo principal es aquel que utilizamos para conectar el pack a un PC, y de este modo es como visualizamos y gestionamos la información que se lee desde los módulos complementarios. Dispone de una toma de corriente y de los controles de encendido y apagado. De los módulos complementarios, disponíamos en primer lugar de del módulo de interfaz. Este módulo era indispensable para el correcto funcionamiento del BIOPAC, y es el que contaba con los puertos I/O para el control de la plataforma. El resto de módulos periféricos son los que gobernaban y gestionaban los sensores utilizados para registrar las señales. Eran convertidores de señal con filtros de frecuencia y ganancias que se podían configurar, tal y como se detalla a continuación [3].

Los módulos periféricos están conectados en serie al módulo principal. Como se ha dicho anteriormente, cada módulo complementario gestiona una señal fisiológica distinta. Dado que nosotros íbamos a medir tres (electrocardiograma, resistencia galvánica de la piel y temperatura de la piel) necesitábamos tres módulos. La frecuencia a la que se configura

el pack para la toma y procesamiento de las señales va en el rango desde los 1 Htz hasta los 2000 Htz. Nosotros lo registramos a 2000 Htz.

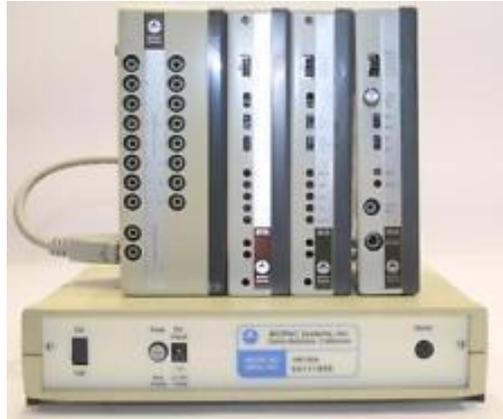


Figura 5. Hardware BIOPAC MP150

La empresa comercializadora del pack, BIOPAC Systems, proporciona a los clientes que adquieren los equipos, el software propio desarrollado por ellos para la gestión de la información, desde la lectura hasta el procesamiento. Este software se denomina AcqKnowledge. La configuración para cada una de las señales es la que se describe a continuación en la [Tabla 1](#). Se trataba de una adquisición off-line, ya que, aunque se puede observar la señal a tiempo real en la ventana de visualización del programa, los datos se guardaban al finalizar la prueba.

Señal	Unidades
Electrocardiograma	miliVoltios (mV)
Conductancia eléctrica de la piel	microSiemens (μ S)
Temperatura dérmica	Grados Celsius ($^{\circ}$ C)

Tabla 1. Señales fisiológicas medidas y sus respectivas unidades

2.2.1. Módulo GSR100C

Este módulo permite la lectura y registro de señales correspondientes a la resistencia galvánica de la piel, también llamada respuesta electrodérmica. Esta señal fisiológica se mide como la conductividad que varía conforme la sudoración de los sujetos. Las glándulas sudoríparas de los dedos son más sensibles a los cambios emocionales y a los pensamientos, por ello es donde se midió la actividad eléctrica para identificar las situaciones de estrés. Estas glándulas actúan como si se trataran de conductores eléctricos, que al llenarse de sudor aumentan su conductividad al disminuir su resistencia. Se configuró el módulo periférico como DC, para asegurarnos de que la respuesta en frecuencia fuera absoluta. Del mismo modo se fijó una ganancia a la entrada de 20 microSiemens por voltio, dentro de un rango de medidas de entre 0 y 200 microSiemens. Además de esto, es necesario hacer un escalado en la medida de las señales para tener

las unidades deseadas. Esto se hizo en la figura siguiente dentro del software AcqKnowledge:

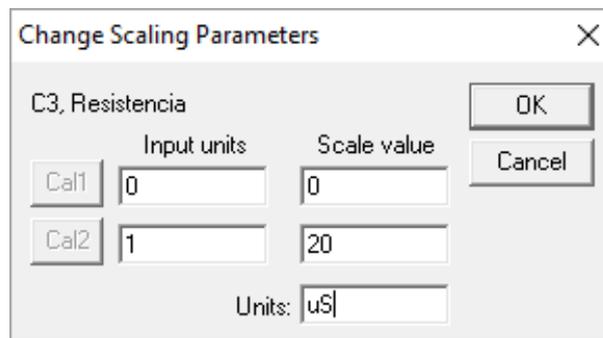


Figura 6. Configuración de la señal GSR en el AcqKnowledge

En cuanto al sensor, consta de dos electrodos no polarizados Ag-AgCl, es decir, plata y cloruro de plata, que miden el potencial generado. Respecto a los sensores que se utilizan, se corresponden con dos electrodos no polarizados de Ag-AgCl, encargados de medir el potencial que se genera. Los dedos en los que se colocan los sensores son los dedos índice y corazón de la mano no hábil, para que no interfiera con el agarre del joystick durante el desarrollo de las terapias de rehabilitación con el robot, como se aprecia en la [Figura 7](#).



Figura 7. Disposición de los sensores de lectura GSR

2.2.2. Módulo SKT100C

Este módulo permite realizar las lecturas de las señales fisiológicas asociadas a la temperatura corporal externa. La señal fisiológica asociada a la temperatura electrodérmica de la piel guarda relación con la resistencia galvánica de la misma, de ahí que se halla elegido para su monitorización. La configuración que requería en cuanto a hardware es similar al módulo anterior. Se configuró una ganancia inicial de 5 grados Fahrenheit, que es la máxima posible por cada voltio que tenemos a la entrada. Como la medida se tenía que hacer en grados Celsius, ya dentro del software del AcqKnowledge se podía configurar para escalar la medida y ajustarla. De nuevo como ocurría con la frecuencia, al desear una medida de temperatura que fuera absoluta, se ajustó al modo DC. La temperatura basal que se definió fue 32,22 °C, con una relación de un volt para una temperatura de entrada de 35 °C, como observamos en la [Figura 8](#). Estos datos son facilitados por BIOPAC Systems en su guía de configuración [3]. Con esta ganancia de 5

grados, el abanico de temperaturas del que se dispone para la medida con el sensor va de los 5 °C a los 60 °C.

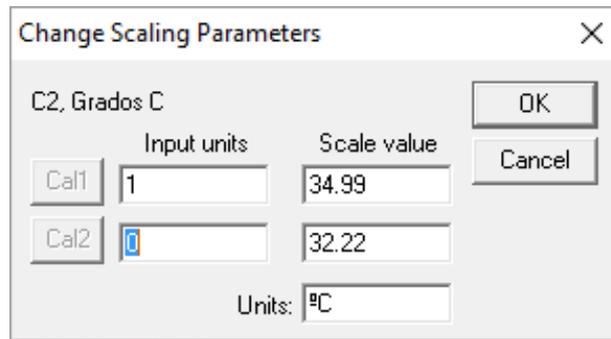


Figura 8. Configuración de la señal SKT en el AcqKnowledge

Este sensor era de apariencia similar a los anteriores, constaba de un termistor fijado en una cinta de Velcro que se sujetó al dedo anular de la mano libre del paciente, no siendo necesaria la utilización del gel. Este sensor medía la conductividad de la piel ya que la temperatura es directamente proporcional a esta.

2.2.3. Módulo ECG100C

El último módulo periférico era el ECG100C, que era un módulo asociado a la actividad cardíaca del corazón. Este módulo permitía registrar las señales eléctricas que emiten los cuerpos de los sujetos, imperceptibles de otra manera que no fuera a través de este equipo. Lo que ocurre es que se genera una diferencia de potencial entre dos partes diferentes del corazón, interior y exterior. Este tipo de señal difiere entre unas personas y otras, dependiendo de su anatomía y condición física aún estando en las mismas condiciones ambientales.

La configuración del ECG100C era algo más complicada que los módulos anteriores, puesto que necesitaba de un filtro para frecuencias que va a tener un valor de 0,5 Hertz. La función del filtro era la de filtrar la señal del electrocardiograma una vez monitorizada. Esta señal se podía descomponer en diferentes partes con distintas curvaturas, como mostramos en la Figura 9. El corazón en su actividad normal se contrae y se relaja debido a la polarización y a la despolarización del músculo cardiaco, respectivamente. Cada onda se asocia a una actividad del corazón, por lo que son secuenciales y cíclicas. La primera onda, la onda P está compuesta por la superposición de la actividad eléctrica de ambas aurículas que se produce cuando se despolariza el músculo auricular, músculo que controla la parte superior del corazón y las dos cavidades que lo conforman, las aurículas. El complejo QRS representa la despolarización de los ventrículos –las cavidades inferiores del miocardio – y está formado por tres ondas: la onda Q, despolarización del tabique interventricular, onda R despolarización de la masa ventricular, y la onda S, despolarización de las zonas basales ventriculares. La onda T, representa la repolarización de los ventrículos, y por último la onda U, de la cual se desconoce su origen y no siempre aparece [3w]. En este estudio se utilizó el filtro para reducir las ondas P, T y U, de esta forma el complejo QRS es más claro y de mayor utilidad para extraer las características

cardíacas que se estudiaron con posterioridad. Además, debido a que la señal eléctrica del corazón es del orden de 10^{-4} voltios, se aplicó una ganancia de 1000.

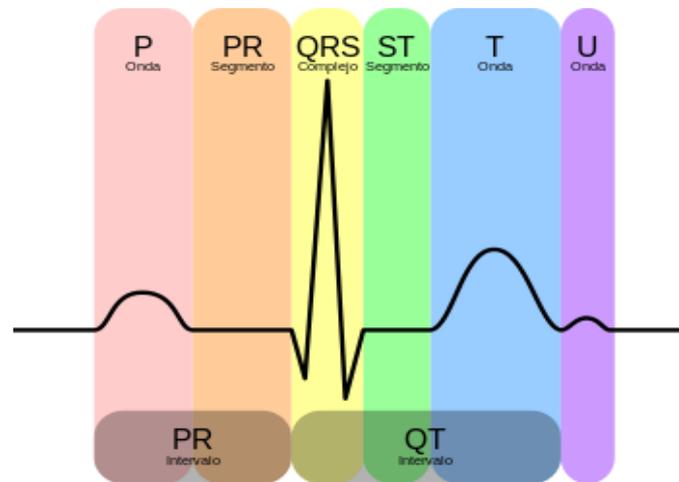


Figura 9. Tipología del ECG

Los sensores utilizados para medir el electrocardiograma constaban de tres componentes, denominados electrodos. Estos electrodos (positivo, negativo y tierra), se encontraban integrados en unos adhesivos que se debían de colocar en los sujetos a la altura de la clavícula y del abdomen. Era por tanto, un dispositivo de carácter no invasivo. Dependiendo de la anatomía de cada sujeto los sensores se colocaron de una u otra manera, y también dependía del tipo de derivación cardíaca que se deseaba registrar. Existen 12 derivaciones estándar: 3 bipolares y 3 unipolares del plano frontal, y 6 unipolares precordiales. En las precordiales, los electrodos son colocados sobre las costillas del sujeto, registrando así el potencial. Este tipo de configuración no fue el adoptado dado que es el utilizado para el diagnóstico médico de manera habitual. Si nos vamos a las derivaciones en el plano frontal, nos encontramos que no son suficientes para llevar a cabo un diagnóstico completo aunque sí que son fundamentales para conocer el ritmo cardíaco. Por este motivo se seleccionó una de las derivaciones estándar de Einthoven, las cuales se corresponden con las bipolares.

Si pensamos en el corazón del ser humano como un generador de corriente, y el cuerpo como un conductor, se puede construir un triángulo imaginario formado por los miembros de las extremidades. Sobre sus lados, se proyectan las señales eléctricas que salen del músculo cardíaco. Como el corazón está inclinado en el pecho hacia el lado izquierdo, y dado que los brazos y las piernas son prolongaciones, se emplea en la práctica los miembros superior e inferior para construir ese triángulo [4w]. Las derivaciones tienen su fundamento bioeléctrico en la teoría del dipolo, siendo así el brazo derecho el que conforma el polo negativo, cuando se proyecta sobre él la base del músculo cardíaco, siendo entonces tanto el brazo izquierdo como su respectiva pierna los polos positivos. Así se presenta el triángulo de Einthoven, en el que se pueden observar las derivaciones bipolares como una diferencia de potencial entre los miembros, Figura 10.A. En el caso de la derivación III la diferencia de potencial se da entre dos polos electropositivos, actuando el brazo izquierdo de polo negativo ya que posee menos carga positiva [5w]. Por otro lado,

las unipolares son las derivaciones vectoriales de cada miembro, como se observa en la **Figura 10.B.**

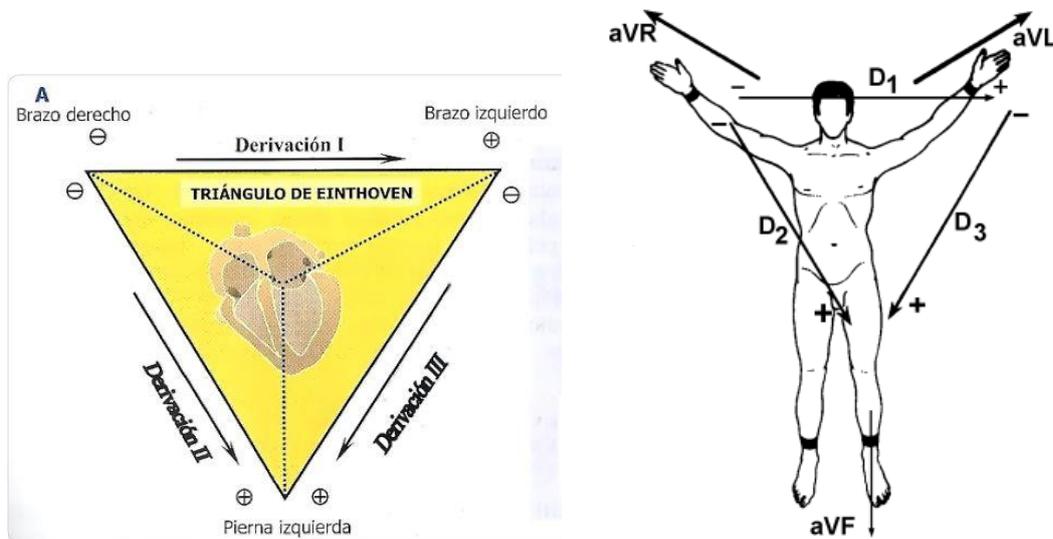


Figura 10. A) Triángulo de Einthoven [6w]. B) Representación de derivaciones cardíacas [4w]

Con el propósito de hallar una derivación que pueda maximizar el complejo QRS, se llevó a cabo la selección de la derivación II o en su defecto de la derivación III, tal y como se ve en la **Figura 11.A.** Como se deben de evitar las interferencias musculares que pueda haber en el resultado, finalmente se colocó el positivo en la zona baja izquierda del torso, el negativo en la zona superior izquierda y el negativo en la zona baja derecha (**Figura 11.B.**) Así, a pesar de no estar exactamente colocados en las extremidades, se siguen correspondiendo con las derivaciones de Einthoven. Además, esto se corresponde con la derivación bipolar III, la cual registra una diferencia de potencial entre la pierna y brazo izquierdos, o lo que es igual, la diferencia entre VF y VL.

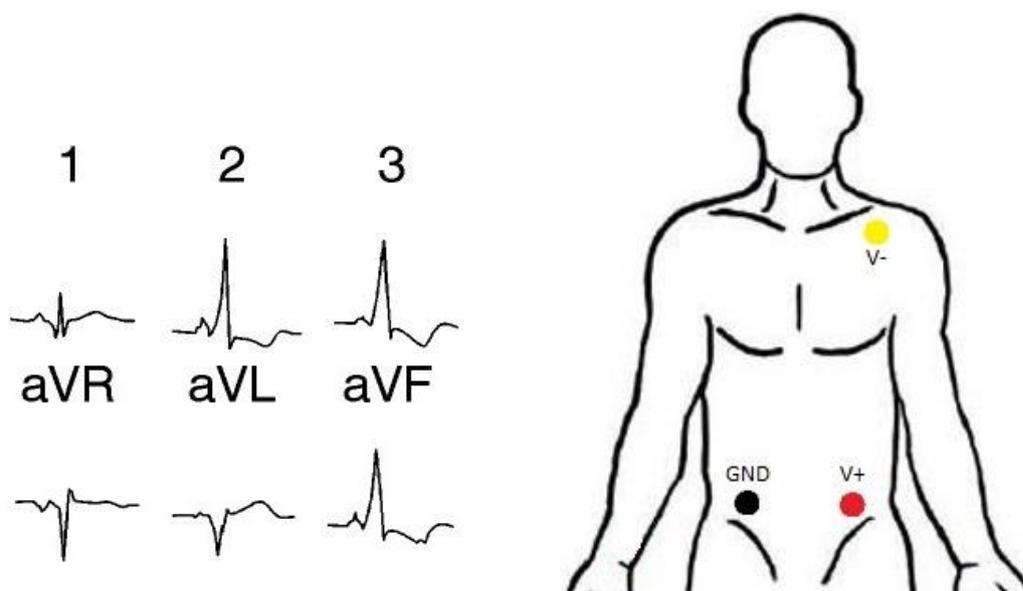


Figura 11. A) Señal eléctrica de las derivaciones. B) Disposición de los sensores para lectura del ECG

2.3. Test Valoración de la carga cognitiva: Test SAM

Este test se utiliza para poder evaluar el impacto psicológico al que se ven sometidos los pacientes durante el desarrollo de las terapias. Es un test que permite una evaluación off-line, basado en la propia percepción que tienen los pacientes sobre su estado emocional.

Estos estados son fácilmente medibles a través de tres variables: placer, dominio y grado de conexión. Con estas tres variables se pueden definir todos los estados emocionales frente a cualquier estímulo. Estas tres variables son de naturaleza bipolar y son independientes entre sí., conformando el llamado modelo de estado emocional PAD [4][5], **Figura 12.**

La primera de las variables, el placer, es llamada también valencia, en función del contexto en que se encuentre, y abarca desde el dolor o infelicidad hasta la felicidad plena o éxtasis. La segunda de las variables, la excitación, llamado en ocasiones umbral abarca desde la somnolencia hasta el júbilo. Permite la evaluación de una actividad asociada a un estímulo, de manera que se puede correlacionar con el estado de excitación. La última de las variables, el dominio, oscila desde la falta de control total hasta un control absoluto de lo que ocurre alrededor [4][3][5][6].

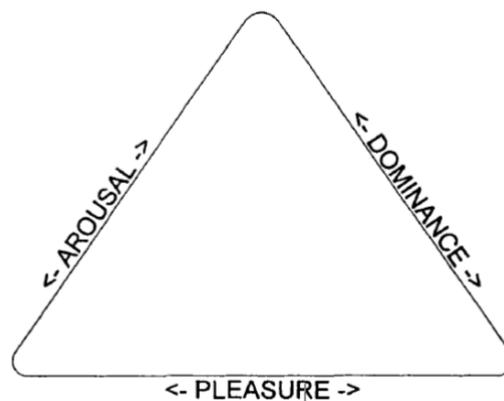


Figura 12. Modelo de Estado Emocional PAD

Además, se sabe que una respuesta emocional se puede medir en tres sistemas distintos: respuestas fisiológicas, informes afectivos y por último la manifestación de comportamientos. De esta manera, con el test SAM, se puede medir de una manera directa variables como el placer, excitación y dominio asociado a una reacción afectiva de una manera pictórica y no verbal frente a una amplia variedad de estímulos.[6].

Mehrabian y Russell [6] idearon una escala que actualmente está considerado como un instrumento muy utilizado para la investigación de los estados emocionales dentro de una estructura tridimensional. Consiste en una tabla que comprende un total de 18 pares de adjetivos bipolares, **Figura 13.** Test SAM, los cuales son evaluados a lo largo de un abanico que va desde los 1 hasta los 9 puntos. En este abanico, 1 sería la menor puntuación que se le podría dar a cada uno de los parámetros evaluados, y 9 el valor más alto que se podría dar. En el protocolo que se siguió durante la experimentación con los sujetos, se puede ver la plantilla que se les entregaba al finalizar cada terapia virtual en la que podían

evaluar cómo se habían sentido durante el desarrollo de la misma, desde 1 hasta 9. Esta información servirá después para cotejarla con las señales fisiológicas medidas y se trata de buscar algún patrón de comportamiento [6].

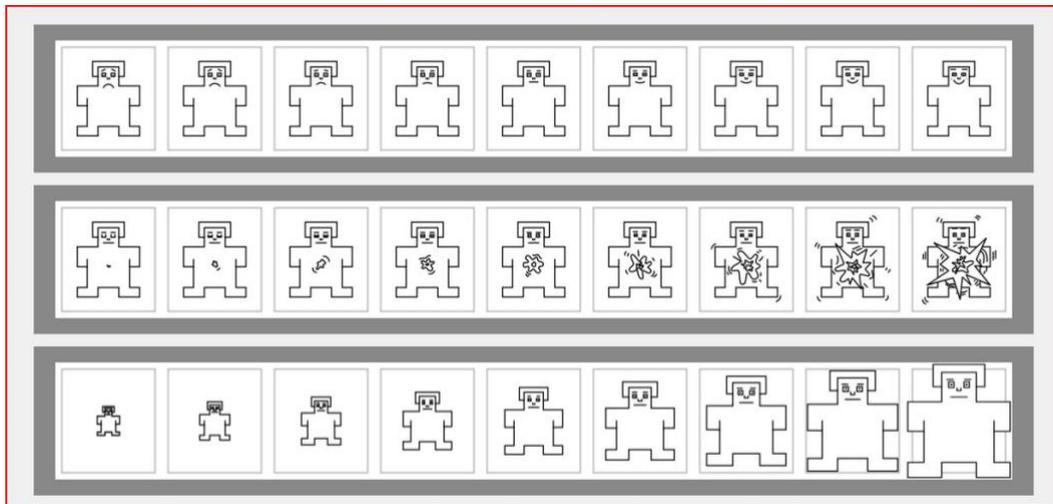


Figura 13. Test SAM

2.4. Muestra poblacional

El estudio se llevó a cabo con 52 personas voluntarias, siendo todos sujetos sanos, mayores de edad y trabajadores del Centro Tecnológico CARTIF en el que se desarrolló. Se contó con un total de 19 mujeres (36,54%) y 33 hombres (63,46%). Las pruebas se realizaron entre los meses de Julio y Agosto del 2016, en una sala habilitada en uno de los sótanos del centro, a una temperatura controlada de 25°C y con material sanitario para preservar la higiene del técnico de cara al trabajo con los voluntarios.

Los sujetos del estudio se encontraban entre los 21 y 52 años, por lo que todos eran sujetos jóvenes-adultos o adultos dentro de edades donde las dolencias de corazón son menos frecuentes. La media de edad era de 37,69 con una desviación estándar de 7,29 años, el peso medio era de 73,61 kilogramos con una desviación media de 16,16 kilogramos y la estatura media era de 173,15 centímetros con una desviación estándar de 9,04 centímetros

2.5. Protocolo de experimentación

Para llevar a cabo la experimentación con voluntarios, se elaboró un protocolo de actuación con diferentes etapas, diseñado y acordado por el equipo. El grafo orientativo puede verse en la [Figura 14](#). Se buscó con ello poder medir y registrar una cantidad óptima de datos procedentes de la interacción de las personas con el robot. Para ello se llevaron a cabo diferentes pruebas preliminares con PHYSIOBOT, en las que se midieron los tiempos óptimos de ejecución de las terapias. Dicha información fue recogida en un documento (A.0) y sirvió para la toma de decisiones sobre qué terapias convenía incluir/excluir del protocolo. Este protocolo fue respetado en todo momento con los voluntarios para disponer de una base de datos obtenidos en unas condiciones homogéneas. A continuación se pasan a describir las diferentes etapas del protocolo:

ETAPA 1: La recepción del sujeto. El lugar habilitado para la experimentación con la plataforma fue en la sala de lactancia de la *Fundación Cartif*, situada en el sótano. El ambiente era por tanto de relajación ante la ausencia de estímulos externos, una temperatura ambiente de 18°C y una humedad relativa baja. La sala estaba acondicionada con luminarias y un lavabo, botiquín y depósito para desechos. Tras saludar cordialmente al paciente, se le acomodaba en una silla frente a la mesa donde se le iba a explicar el proceso. Primeramente se le recordaba los criterios de exclusión y se le leía el documento informativo sobre la prueba (A.1) –previamente enviados por correo interno-.

ETAPA 2: Una vez entendido el procedimiento y tras la atención de las dudas y/o peticiones del voluntario se le hizo entrega de los documentos elaborados para el estudio, estos eran: el documento de consentimiento, la plantilla identificativa y los cinco test SAM que se rellenarían conforme las instrucciones del técnico. Posteriormente, se realizó la firma del documento de consentimiento (0) tras la lectura del mismo, quedando una copia en posesión de la técnica, y otra a disposición del paciente.

Una vez finalizada la explicación de la experimentación, se asignó un número identificativo a cada sujeto a fin de preservar la intimidad de los datos. Dicho número figuró en todos y cada uno de los documentos que realizados desde ese momento. A continuación se rellenó la dicha del paciente donde figuran todos los datos relativos a peso, sexo, edad, antecedentes... (A.3) por parte del técnico encargado. En caso de no ser conscientes del peso actual del paciente, disponían de una báscula para comprobarlo. Finalizada la ficha, se colocó a los sujetos en la silla frente a la plataforma robótica para dar comienzo con los ejercicios de rehabilitación. Se les colocaron los sensores en la mano conforme a lo explicado en el apartado 2.2, dejando siempre libre la mano hábil del voluntario para poder manejar el joystick del robot.

En el caso de las pacientes de sexo femenino que acudieron con ropa de difícil acceso para la colocación de los sensores del ECG, se les dio la privacidad necesaria y las explicaciones oportunas para que se los colocaran ellos mismos. Posteriormente se comprobó en la ETAPA 2 que la señal de los sensores era buena, para proceder a la recolocación en caso contrario.

ETAPA 3: Adquisición de datos con el registro basal. Durante esta adquisición el sujeto debía de estar en actitud/posición relajada. No existió interacción alguna con el robot, sirvió como base de interpretación para el resto de las señales. Con el fin de no alterar los registros, se procuró no interactuar con el voluntario a menos que fuera totalmente imprescindible. Al finalizar los 6 primeros minutos se facilitó el primer test SAM, se reprodujeron las instrucciones mediante una voz grabada en un ordenador y tras asegurarse de que el sujeto entendía las mismas se rellenó y entregó al técnico. El primer test analiza cómo la puesta en marcha del experimento ha afectado al sujeto, es decir, analiza cuál es la situación psicológica del sujeto ante la explicación recibida, la firma del documento de consentimiento, la colocación de los sensores, y la toma de datos basales.

ETAPA 4: Una vez terminado el registro basal se solicitó al sujeto que colocara la mano hábil en el robot y se lanzó la primera terapia. Esta terapia tenía una duración de seis minutos con un grado de dificultad “fácil” –dentro de 3 posibles grados-. La dinámica del

juego era la misma para desarrollar la terapia sin complicaciones, dependiendo de la destreza del voluntario. La terapia finalizaba automáticamente al alcanzar el reloj interno los 6 minutos de duración, obteniendo el paciente una puntuación determinada.

ETAPA 5: En la quinta etapa se producían tres minutos de descanso durante los cuales el voluntario estaba en reposo. Mientras tanto, se solicitó al sujeto que rellenase el segundo test SAM, con el objetivo de analizar cómo, la terapia ejecutada, ha afectado en el sujeto, es decir, analizar cuáles son las reacciones que el sujeto ha experimentado como consecuencia de realizar la terapia.

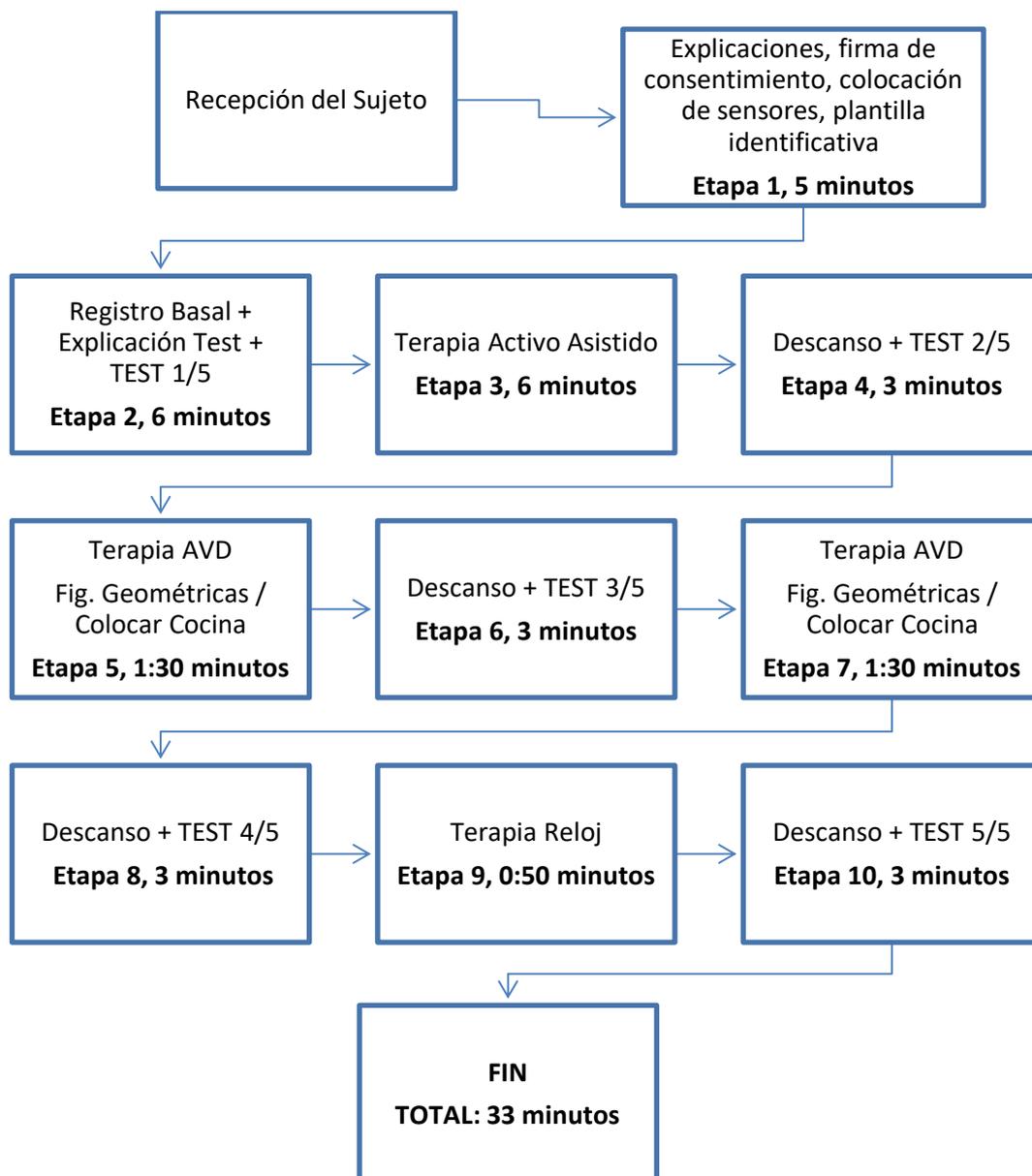


Figura 14. Esquema del protocolo

ETAPA 6: Al comienzo de la segunda terapia o sexta etapa, se solicitó al voluntario que se preparase para la interacción con el robot. La terapia sería ahora del tipo AVD –Actividades de la Vida Diaria-. El primer entorno con esta terapia fue el de las Figuras Geométricas, figuras negras sobre un fondo blanco. Se buscaba relacionar el efecto que pudiera causar en el sujeto un entorno gráfico carente de estímulos visuales y acústicos. La duración de la terapia dependía del propio sujeto, ya que finalizaba al completar los objetivos de desplazamiento. El grado de dificultad era “difícil”, lo cual implicaba la ausencia total de asistencia por parte del robot.

ETAPA 7: En la séptima etapa se producían tres minutos de descanso durante los cuales el voluntario estaba en reposo. Mientras tanto, se solicitó al sujeto que rellenase el tercer test SAM, con el objetivo de analizar cómo, la terapia ejecutada, ha afectado en el sujeto, es decir, analizar cuáles son las reacciones que el sujeto ha experimentado como consecuencia de realizar la terapia.

ETAPA 8: Al comienzo de la tercera terapia u octava etapa, se solicitó al voluntario que se preparase para la interacción con el robot. La terapia sería de nuevo del tipo AVD –Actividades de la Vida Diaria-. El segundo entorno con esta terapia fue el de la Cocina, donde se trataba de ordenar todo el menaje dentro de una cocina. Se buscaba relacionar el efecto que pudiera causar en el sujeto un entorno gráfico repleto de estímulos visuales y acústicos. La duración de la terapia dependía del propio sujeto, ya que finalizaba al completar los objetivos de desplazamiento. El grado de dificultad era “difícil”, lo cual implicaba la ausencia total de asistencia por parte del robot.

ETAPA 9: En la novena etapa se producían tres minutos de descanso durante los cuales el voluntario estaba en reposo. Mientras tanto, se solicitó al sujeto que rellenase el cuarto test SAM, con el objetivo de analizar cómo, la terapia ejecutada, ha afectado en el sujeto, es decir, analizar cuáles son las reacciones que el sujeto ha experimentado como consecuencia de realizar la terapia.

ETAPA 10: Al comienzo de la cuarta terapia o décima etapa, se solicitó al voluntario que se preparase para la interacción con el robot. La terapia sería de nuevo del tipo Reloj. Se trataba de que el paciente alcanzara mediante el desplazamiento del robot las diferentes horas que se marcaban en un reloj, en una secuencia horaria preestablecida. La duración de la terapia dependía del propio sujeto, ya que finalizaba al completar los objetivos de desplazamiento. El grado de dificultad era “difícil”, lo cual implicaba la ausencia total de asistencia por parte del robot.

ETAPA 11: En la undécima etapa se producían tres minutos de descanso durante los cuales el voluntario estaba en reposo. Mientras tanto, se solicitó al sujeto que rellenase el quinto y último test SAM, con el objetivo de analizar cómo, la terapia ejecutada, ha afectado en el sujeto, es decir, analizar cuáles son las reacciones que el sujeto ha experimentado como consecuencia de realizar la terapia. Al agotar el tiempo estipulado se finalizó de forma manual la adquisición de datos y se recogieron en un fichero cuyo identificador fue el número previamente asignado al voluntario. Por último, se retiraron los electrodos y sensores asistiendo al voluntario durante el proceso. Se agradeció su colaboración y se le despidió de forma cordial.

3. Desarrollo de Nuevas Terapias Virtuales

Previo a la experimentación con sujetos, es necesario desarrollar una serie de nuevas terapias con el objetivo de determinar la relación psico-emocional de un paciente con un entorno de rehabilitación de diferente carga visual, y de esta manera intentar determinar si el uso de un determinado tipo de “juego” puede incentivar o estimular el desarrollo de un buen ejercicio por parte del paciente durante la rehabilitación.

Para ello se han elaborado diferentes entornos gráficos, y se han añadido a los ya existentes. Podemos anticipar que se han modificado las terapias AVD, que se ha elaborado una nueva terapia tipo Reloj, y que se mejoró la terapia Activo Asistido.

Todas las terapias se han desarrollado en lenguaje de programación C#, en el entorno de programación .Net con el Framework 4.0 en Visual Studio. El periodo de desarrollo fue desde Febrero de 2016 hasta Julio de 2016.

3.1 Terapias Convencionales

Previo al desarrollo de las nuevas terapias, la plataforma PHYSIOBOT contaba con una serie de entornos gráficos que eran los utilizados hasta la fecha. Estos consistían en el modo “Activo Asistido” y “Pasivo Guiado”. Tal y como se describe en el apartado 2.1 de esta memoria, el Activo Asistido es un entorno de rehabilitación en el que el paciente debía tratar de mantener el máximo tiempo posible una mano virtual sobre un ratón, persiguiendo para ello al objetivo a lo largo de una pantalla, desplazándose al mismo tiempo sobre la mesa robótica en el plano horizontal. De esta manera se ejercitaban las extremidades superiores y los reflejos del sujeto. Cuanto mejor lo hiciera, menos asistencia proporcionaba el robot, buscando de esta manera un progreso en la rehabilitación.

En el modo “Pasivo Guiado” no existía asistencia por parte del robot, y era el paciente el que debía de realizar todo el esfuerzo para superar las diferentes terapias, que consistían por ejemplo en hacer pasar un personaje a lo largo de un túnel excavado en 2D sin que tocara las paredes del mismo.

3.2. Terapias AVD

Son las denominadas Actividades de la Vida Diaria. Tratan de simular situaciones de la vida real, en la que los pacientes tienen que desenvolverse en situaciones en las que se ven de manera cotidiana. Debido a la afección que sufre una persona con un accidente cerebro vascular, la complejidad no puede superar ciertos límites, por lo que la libertad de movimientos se encuentra acotada y nunca se le pedirá realizar grandes esfuerzos.

Inicialmente, la terapia disponía de tres variantes: Colocar Libros, Marcar Numero y Destapar Imágenes. Vamos a explicar los cambios que se llevaron a cabo en cada una de ellas.

3.2.1. Colocar Libros

Los nuevos entornos gráficos que se hicieron con un editor gráfico son los siguientes:

- Una habitación con mesita, armario y prendas de ropa
- Una cocina con mesa, estantes y menaje
- Un huerto con estantería, con una azada/cesta en lugar de una mano, y hortalizas
- Un supermercado con carro de compra, estantes y comida
- Un entorno de la famosa serie de niños Pokémon, con diferentes personajes colocados en nubes y una pokeball en lugar de una mano

La elección de los gráficos resultó de varios factores. El primero de ellos el acuerdo en la División, el segundo de las peticiones que llegaban de los centros en los que se trabaja con el robot, y el tercero por iniciativa propia.

Los diferentes entornos gráficos se llevaron a cabo con el software de Gimp para Linux. La estructura de los entornos es la siguiente: Un fondo, un destino inicial superpuesto y un destino final superpuesto.

A pesar de que para el fondo daría lo mismo el tipo de formato, ya fuera jpg o png, por regla general se ha considerado que todas las imágenes del juego tengan la extensión .png y de este modo podemos evitar posibles conflictos. Siendo todo igual, la posibilidad de llevar a equivocación es prácticamente nula. El motivo de la extensión .png, no es otra aparte de que este tipo de formato permite establecer un fondo transparente a la imagen que seleccionamos, y de este modo puede desplazarse libremente superponiéndose a otras dando el efecto querido.

A partir del entorno inicial, definido por el juego de la biblioteca, se obtuvieron las coordenadas donde se sitúan los objetivos inicial y final. Como el editor gráfico muestra las coordenadas al arrastrar el cursor sobre la pantalla, colocar los objetos fue sencillo.

Puesto que no podemos suponer que la sensibilidad cognitiva de los pacientes es la suficiente como para poder realizar terapias con entornos graficas muy saturados, se han preparado entornos con diferentes grados de dificultad. Esto es, fondos básicos unicolor, fondos con elementos como nubes, ventanas, hierba... y por ultimo para el mayor grado de dificultad visual, texturas de paredes con ladrillos y motivos florales.

Atendiendo a la posible necesidad de dar un servicio de rehabilitación infantil, se preparó el juego de Pokemon. Consta de unos personajes de dibujos, situados en unas nubes sobre un fondo que representa un espacio natural. Más adelante, se hizo otro más de la misma temática con personajes de la serie Dragon Ball, pensando en abarcar al menos dos generaciones.

A continuación se muestran unas capturas de las terapias virtuales de rehabilitación instaladas en PHYSIOBOT (*Figuras 15 a 18*).



Figura 15. Terapia Armario



Figura 16. Terapia Cocina

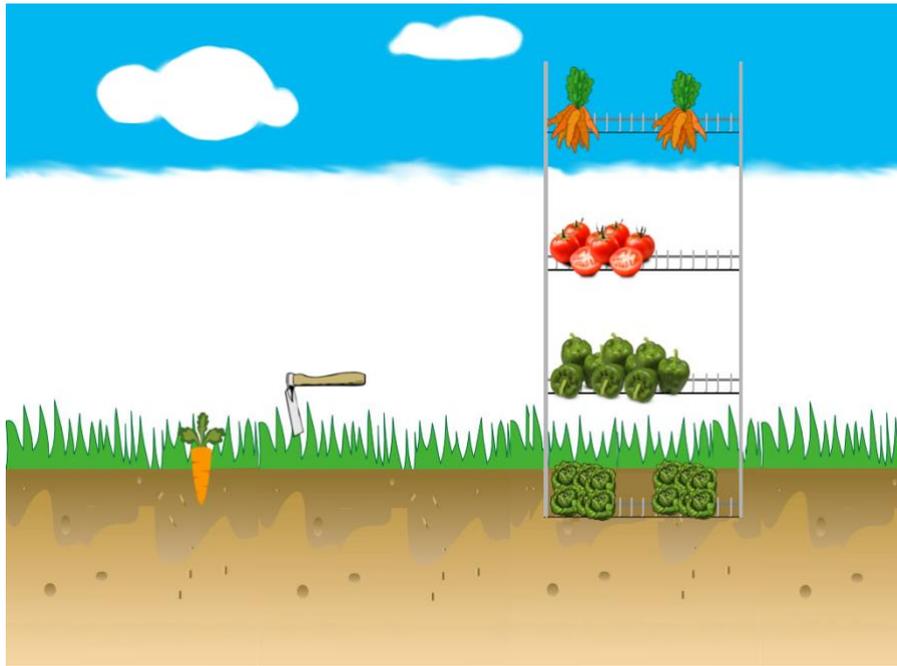


Figura 17. Terapia Huerto



Figura 18. Terapia Supermercado

3.1.2 Terapia Marcar Número

Del mismo modo que se planteó la idea de poder elaborar diferentes entornos para un mismo tipo de juego, simulando de este modo tener una mayor variedad de juegos y al mismo tiempo buscando abarcar diferentes estilos, se ha elaborado un diseñador para la terapia de Marcar Numero. Los gráficos abarcan 4 clases diferentes de teclados (Figura 19):

Animales, Letras, Frutas y Figuras Geométricas

En función de la persona y su capacidad para reconocer los objetos, se ha intentado abarcar desde lo más simple como pueden ser una simples figuras geométricas de colores hasta animales, intentando siempre que los gráficos y los dibujos resulten siempre lo más amigables posible para que no sean un elemento reticente a la hora de realizar la terapia, si no estimulante. En este caso las manos cambian, ya no tenemos el mismo tipo de manos que la terapia de Colocar Libros. Tenemos desde la mano original que simula un dedo pulsando un tecla, hasta manos orientativas con flechas.



Figura 19. Terapia Marcar Número

Esta terapia virtual consiste en seguir un patrón de imágenes dispuestas al azar que conforman una serie. Se debe de desplazar por la pantalla una mano virtual utilizando el joystick de PHYSIOBOT. Cuando la mano alcanza una de los recuadros, se va dibujando un borde alrededor de la “tecla”. Si la tecla es la correcta en el orden de la serie, el recuadro se irá dibujando verde. Si por el contrario es errónea, el borde será rojo.

Una vez finalizada la secuencia se subirá de nivel si se consigue hacer dentro de unos límites de tiempo. Si no, se repetirá el nivel de dificultad manteniendo el nivel de asistencia.

3.3 Mejoras Generales de las Terapias Virtuales

3.3.1 Elaboración de un diseñador gráfico

Debido a la demanda surgida de nuevos entornos gráficos, surgió la posibilidad de desarrollar un configurador que permitiese a los médicos elegir sus propios diseños. De esta manera, el propósito original era que cualquier usuario capaz de buscar en Internet imágenes y de depositarlas en un directorio predeterminado, pudiera preparar a cada paciente un entorno personalizado.

Para ello se creó un nuevo Form, a la que se accede desde un botón colocado en el Form de AVD llamado “Elegir Gráficos”. Antes de poder acceder al diseñador, se ha de cumplir la condición de elegir la extremidad a rehabilitar, derecha o izquierda. En caso de intentar acceder sin haber realizado la elección, se mostrará por pantalla un aviso.

Ya en el configurador, nos encontramos con una ventana dividida en diferentes secciones (Figura 20). Pero todas ellas constan de lo mismo. Un combobox, que no es más que un desplegable en el que aparecen una serie de opciones predeterminadas en función de la demanda existente hasta la fecha, y un campo llamado Añadir Nuevo, que permite el ingreso de nuevas imágenes.

Para que la visualización del diseño general resulte más cómoda y efectiva, al lado de cada combobox, o desplegable de opciones, tenemos un PictureBox. Esto es simplemente un pequeño recuadro en el que aparece una imagen previa de la elección realizada en el combobox.



Figura 20. Diseñador Gráfico

De esta manera, podemos elegir:

- Fondo de juego
- Lugar del objetivo inicial
- Lugar del objetivo final
- Objetivos

Una vez elaborado, se puede guardar la configuración mediante un botón situado en la esquina inferior izquierda de la pantalla, con la leyenda “Guardar” (Figura 21). En caso de intentar guardar sin haber rellenado todos los campos, de nuevo un aviso emergente te avisará de que debes de terminar de diseñar por completo el entorno.

Si pulsamos el botón de “Atrás”, se cerrará la ventana del configurador y se nos abrirá de nuevo el Form de AVD, y podemos comprobar como a la lista de juegos que ya teníamos se nos ha añadido el nuevo juego diseñado, listo para usar como terapia.

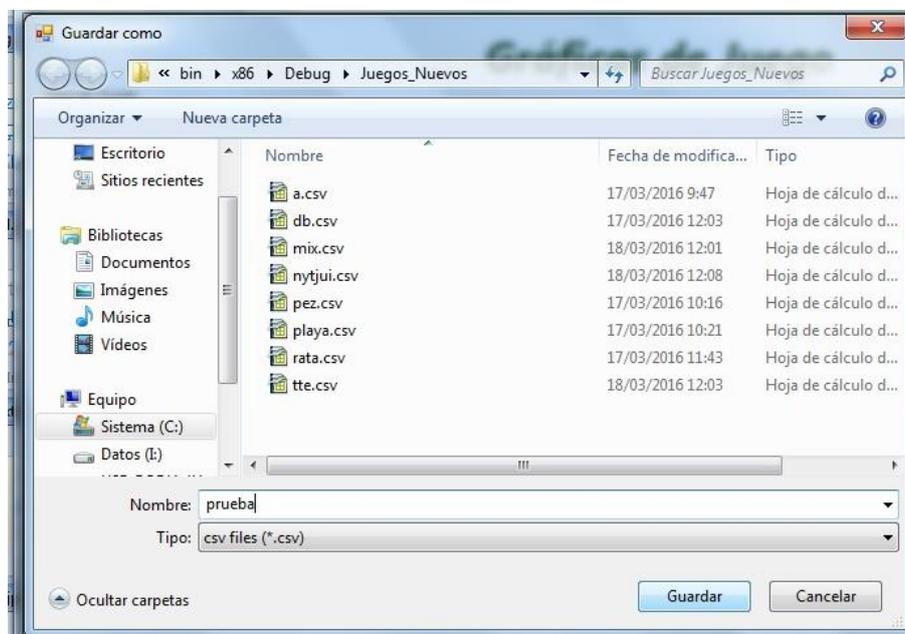


Figura 21. Menú Guardar

El único problema que se presentó a última hora, es que para poder usar las imágenes que se quiera una vez descargadas de Internet a un directorio, la aplicación de VisualStudio necesita obligatoriamente que dichas imágenes se arrastren dentro del código. Nosotros no podemos permitir que una persona sin conocimientos de programación acceda al código, ya que podría cometer algún error y hacer que todo dejara de funcionar. Por lo tanto, este punto queda pendiente de revisión para un futuro. No obstante, el abanico de posibilidades que se han añadido de forma predeterminada para poder usar con libre elección, es suficiente como para poder abarcar las necesidades o gustos de un gran porcentaje de pacientes. En caso de que se necesitaran, o pidiesen nuevos, la estructura con la que se ha dejado el código permite que se puedan añadir de forma sumamente sencilla por parte del equipo de mantenimiento del software.

3.3.2 Preparación de un sistema de puntuación

Del mismo modo que las terapias para el Activo Asistido y el Pasivo Guiado, surge la necesidad de establecer algún tipo de incentivo al paciente a la hora de realizar las terapias de rehabilitación. Dicha motivación pasa por realizar un sistema de puntuación de modo que el paciente sea consciente de sus progresos al finalizar una “partida”.

La puntuación consiste en una frase objetiva acorde a la realización de su ejercicio, y de un número que indica la puntuación. Dicho número no es más que una operación resultante de dividir un entero (establecido como 1000) entre el tiempo de ejecución de la terapia. La puntuación se muestra en una ventana nueva, ajustada a la pantalla, una vez que se cierra el juego. El método donde viene programa la Puntuación, se ejecuta de manera continuada en el método Update de GameAVD para obtener los puntos en real time.

El resultado final es el que aparece en la **Figura 22**. Lo que aparece es el Nivel en el que te encuentras, la cantidad de Puntos obtenidos, calculados como una relación entre un entero (int 1000) y el tiempo_total_terapia. Este resultado es acompañado de una frase de motivación, y del tiempo_total_terapia para tener consciencia de lo que realmente se ha trabajado. La última modificación excluye los decimales en el tiempo_total_terapia, lo que en la imagen anterior se traduciría como un simple entero 33.



Figura 22. Sistema de puntuación

3.3.3 Instalación de sonidos y efectos musicales opcionales

Con el objetivo de hacer más amena la terapia al paciente, pudiendo además introducir algún tipo de estímulo que ayude esforzarse más por conseguir los objetivos, se decidió introducir una serie de efectos sonoros en las terapias.

Con esto logramos además un efecto de juego más “profesional”, y conseguimos que los pacientes no lo vean solo como un remedio a un mal, sino como una distracción o un entretenimiento.

Los efectos sonoros son reproducidos cuando la mano intersecta con alguno de los objetivos, y en función de si el objetivo es correcto o erróneo tendremos un sonido u otro. Del mismo modo cuando la terapia termina, tenemos un hilo musical que indica que ha finalizado y que se va a mostrar en breves la puntuación. Si la puntuación a sido buena y vamos a subir de nivel, tendremos una música muy satisfactoria como recompensa, pero

si no se sube de nivel porque no se ha logrado una puntuación tan alta, la música no va a ser de perdedor, sino de motivación y superación para seguir luchando. En ningún momento se puede desanimar al paciente de ninguna manera. El juego a quedado preparado también para una “Cuenta Atrás” hablada, dado que hay pacientes que pueden no reconocer los números, y de esta manera es como tener el apoyo de un médico que les indica cuanto queda para comenzar la terapia. Por como esta programa la cuenta atrás es muy difícil que exista siempre una compenetración perfecta entre la voz y los números, por eso se ha dejado comentado en el código de momento. La eficacia de exactitud es más o menos del 90% de las veces. En el menú principal donde se eligen los juegos, se ha habilitado un botón para el sonido ON/OFF para mayor comodidad de los médicos.

4. Procesamiento de las señales fisiológicas y obtención de indicadores

Durante 2017 y 2018 se ha trabajado en un software que permita el procesamiento y análisis de las señales recogidas durante la etapa anterior. Por tanto se tienen dos etapas de trabajo diferenciadas aunque ligadas, el desarrollo de nuevas terapias virtuales de rehabilitación y la experimentación con sujetos, y por otra el análisis de las señales recogidas y la extracción y evaluación de los resultados. Este último proceso es largo y tedioso dada la gran cantidad de datos de la que se dispone, son más de 13 GB de datos en .txt por lo que se puede hablar de un trabajo de Big Data. Llegados a este punto, se cuenta con tres señales para procesar: la actividad cardíaca del corazón, la resistencia galvánica de la piel y la temperatura de la mano. Todos estos datos son datos en bruto, aún están por tratar. Para llevar a cabo este tratamiento y poder así empezar a trabajar con los datos, se detalla el proceso que se realizó para poder hacer una clasificación de esta información, y también de la estructura que se adoptó para la organización. Se explican los índices que se utilizaron para el desarrollo del estudio (Tabla 2). Así mismo, se explica el procedimiento seguido para el procesamiento de los datos.

Procedencia	Índice	Descripción
Señal GSR	SCR	Eventos de la respuesta de conductividad de la piel en una etapa (eventos/etapa)
	Frec_SCR	Frecuencia de ocurrencia de las respuestas SCR en una etapa (eventos/min)
	Amp_SCR	Amplitud promedio de las respuestas SCR en una etapa (μS)
	SCL	Valor medio de la señal GSR en una etapa (μS)
Señal SKT	TEMP	Valor medio de los 5 últimos segundos de la temperatura en una etapa ($^{\circ}\text{C}$)
Señal ECG	Med_RR	Valor medio de la variabilidad de la frecuencia cardíaca en una etapa (s)
	SDNN	Desviación estándar del tiempo entre latidos (s)
	RMSSD	Valor medio de la suma de las diferencias temporales entre intervalos adyacentes (s)
	pNN50	Porcentaje del número de diferencias temporales entre dos intervalos R-R consecutivos, mayores de 50 ms, en cada etapa (%)

Tabla 2. Índices obtenidos del procesamiento

Si nos fijamos en el esquema de la Figura 23, podemos ver el proceso que hubo que llevar a cabo, una vez que se partía de las tres señales fisiológicas en bruto tal y como se leyeron, hasta obtener los índices con los que se pretenden extraer los resultados.

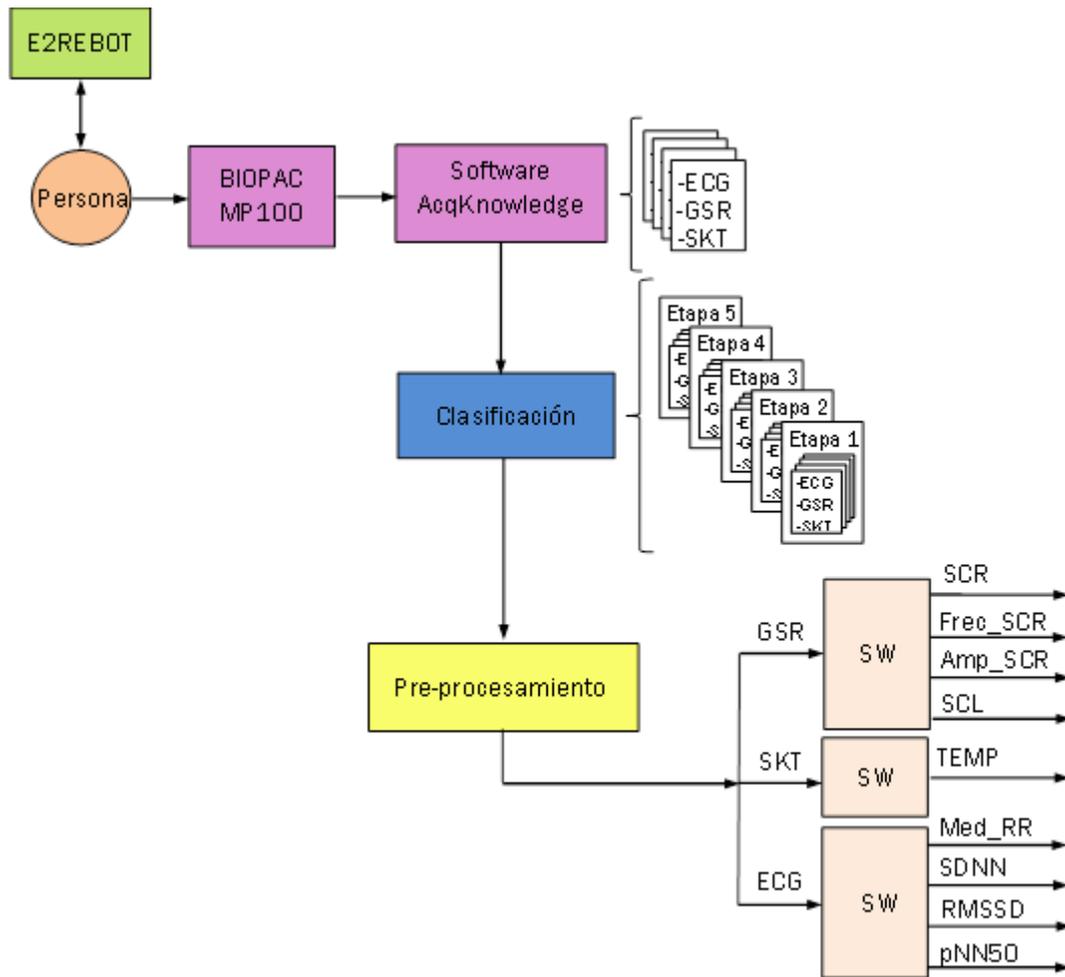


Figura 23. Diagrama de flujo del procesamiento de datos

4.1. Presentación de los datos

Lo primero que hubo que hacer para desarrollar el software fue disponer de una información bien clasificada. Así, se tenía información en un formato tradicional (papel) que no era más que el test SAM que cada sujeto tenía que cumplimentar tras cada terapia. Esto constituía la primera información en bruto, y se almacenó en un archivo con formato '.xls' de Excel nombrado como 'Datos_Estres_Instantáneo', en el que se puso la información extraída de cada voluntario tanto por filas como por columnas, en orden, siendo por tanto la primera fila la que correspondía al primer voluntario. El orden seguido en las columnas es el que sigue:

- identificación del paciente,
- edad,
- peso,
- altura,
- sexo (0: femenino, 1: masculino),
- mano hábil (0: diestro, 1: zurdo),
- utilización previa al estudio del robot (0: no, 1: sí),
- es jugador/a frecuente de videojuegos (0: no, 1: sí),

- y los datos de los tres índices de los tres test SAM entregados.

Para el orden de los datos en el archivo procedentes del test SAM, se dispusieron en columnas tanto por el número del test en el orden en que se realizaron, como por cada fila siguiendo un orden descendente:

- Test SAM 1: Valencia o placer,
- Test SAM 1: Umbral o excitación,
- Test SAM 1: Dominio,
- Test SAM 2: Valencia o placer,
- Test SAM 2: Umbral o excitación,
- Test SAM 2: Dominio,
- Test SAM 3: Valencia o placer,
- Test SAM 3: Umbral o excitación,
- Test SAM 3: Dominio

A parte de esto, durante el desarrollo de las terapias se llevaba a cabo la grabación de todas y cada una de las señales fisiológica de los pacientes con el software del BIOPACK AcqKnowledge, grabándose en un fichero con extensión .ACQ. Todas las señales se miden en unidades preseleccionadas con anterioridad, como ya se explicó también se eligieron milivoltios para el ECG, microsiemens para el GSR y $^{\circ}\text{C}$ para el skt. Estos otros ficheros que se generaban se guardaban bajo el nombre "Registros_Bruto". A cada voluntario se le asignaba un directorio con subcarpetas donde se almacenaba toda esta información, denominada como "P_X", siendo la X el número correspondiente al voluntario según a lista original utilizada para las terapias.

Como el procesamiento de las señales se hizo desde un software propio que se había editado previamente, hubo que pasar los ficheros que se generaban a otro de fichero de metadatos, dispuestos en filas y columnas. Cada columna representaba cada tipo de señal fisiológica, en el que además se incluyó la señal de ritmo cardíaco ya procesada desde el propio AcqKnowledge. Aunque esta señal no se utilizaba posteriormente en el resto del estudio, se almacenó por si fuera de utilidad en un futuro. El AcqKnowledge permite la exportación a .txt de los archivos que genera por defecto. Desde ese momento se contó con un total de 52 directorios. Tal y como se ve puede ver en la **Error! Reference source not found. 24**, es un tipo de archivo en el que se van guardando las gráficas que se registran sobre una base de tiempo con una frecuencia de lectura de 2.000 Htz, como ya se explicó anteriormente.

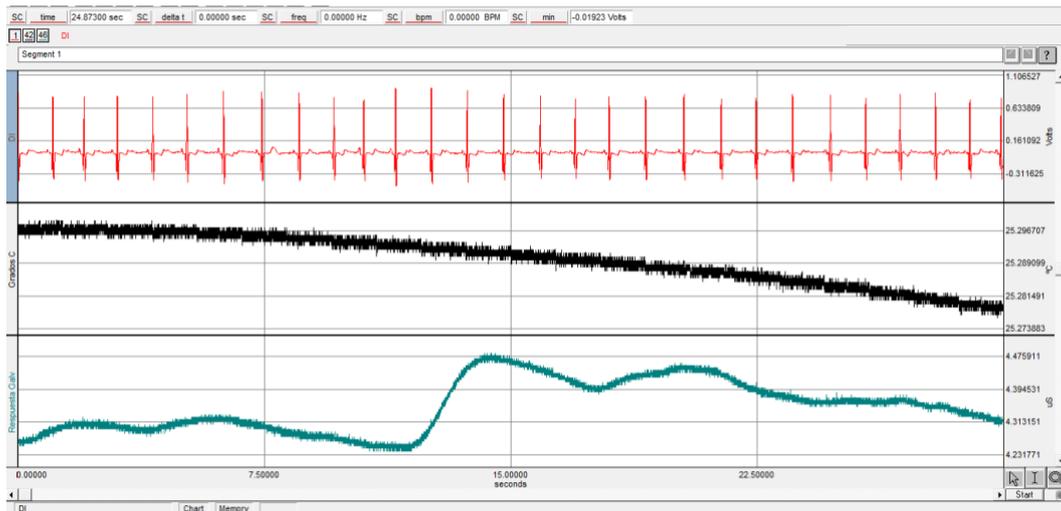


Figura 24. Señales fisiológicas registradas con AcqKnowledge durante la experimentación con pacientes

4.2. Clasificación de los datos

La clasificación de los datos se realizó dividiendo cada archivo en bruto en nueve archivos diferentes. Para esto, los indicadores recopilados durante el estudio se dividieron en cinco niveles que corresponden a los protocolos, para trabajar con secciones de diferentes niveles de estrés y para monitorearlos de manera independiente.

Para lograr un procesamiento más rápido de los archivos, el software se realizó en la plataforma Matlab 2013, lo que permitió descomponer el archivo principal de acuerdo con el período estimado del protocolo. Para una disposición más racional, se consideraron los retrasos llevados a cabo en las etapas 1, 3 y 5, ya que en los niveles 2 y 4 no se retrasó ningún retraso desde la finalización de la terapia.

Se almacenó en un directorio llamado 'Fractional_Registrations' dentro del directorio padre, proporcionando un paquete personalizado para cada sujeto, 'P_X'. Dentro de esta carpeta, cinco archivos deben llamarse 'P_X_E_Y', donde 'Y' es el número de la etapa. En la **Error! Reference source not found. 25**, se visualiza el esquema de la organización en carpetas en los registros en bruto y fraccionados.

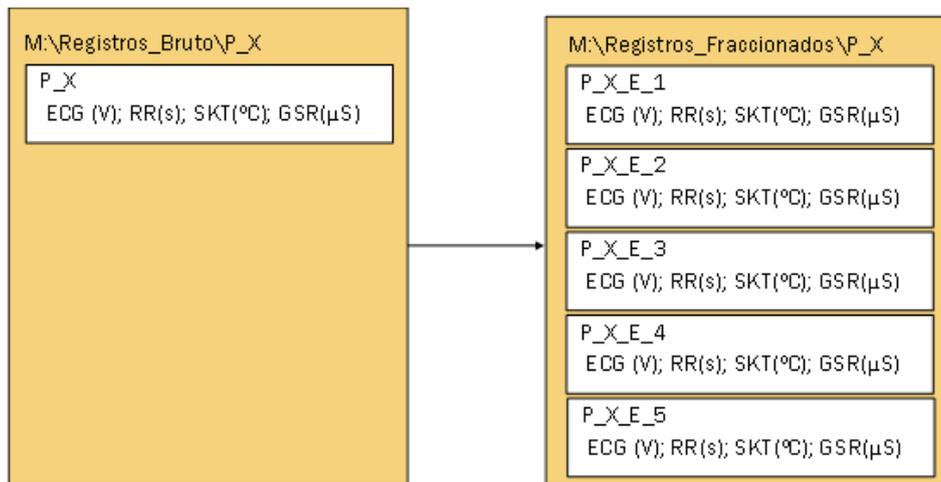


Figura 25. Sistema de jerarquía de archivos

Durante el procesamiento de los datos extraídos, la lectura de algunos de ellos los cuales se corresponden con diferentes voluntarios se hizo incorrectamente. Solo se registraron 23 minutos de prueba, por lo que se eliminaron dichos registro de estos voluntarios. Finalmente hubo 50 voluntarios con 9 archivos por cada uno procesado, es decir, al final se procesaron 450 archivos.

4.3. Pre procesamiento de las señales

Debido a que el procesamiento de datos es diferente según la señal, hubo que dividir las tres señales (actividad del corazón, comportamiento de la piel y la temperatura), que ya estaban divididas en etapas y posteriormente se almacenaron en las carpetas. El software desarrollado para esta tarea se encarga de leer el archivo y dividir las tres señales en un vector de datos de cada una, trabajando a partir de la señal que refleja el ritmo cardíaco del corazón ya que esta señal no era objeto de estudio como se ha explicado anteriormente. Por lo tanto, se crearon tres vectores de datos en cada una de las diferentes etapas con el objetivo de procesar cada uno de ellos

Además, en relación con la señal GSR, era necesario procesarla previamente, ya que la marca debería almacenarse en 500 Hertz. Este submuestreo se realizó para hacer los procesadores más rápidos, ya que obtuvo los datos de 2000 Hertzios, la cantidad de muestras que se procesaron fue muy alta y el procesamiento de cada señal muy complejo. Por lo tanto, para la adquisición de los datos se optó por una frecuencia de muestreo más baja que la frecuencia de adquisición. Con este muestreo, no se perdió ninguna información relevante, ya que la señal que mide la conductividad electrodérmica de la piel tiene unas variaciones lentas que se pueden captar con una frecuencia de 500 Hertz.

El software que se ha desarrollado se puede consultar en el anexo B.1. La función recibe el archivo de entrada y establece tres factores que corresponden a la marca ECG, GSR y SKT, con frecuencia de muestreo de 2000, 500 y 2000 hercios, por separado.

4.4. Señal GSR

El electrodo de la señal de la piel de la conductancia (GSR, por sus siglas en inglés) trata de crear un ambiente estimulante con eventos tales como el olor o el sonido que estimula el contacto con la piel, o permanecer en un programa de estrés. Esta respuesta se muestra con un retraso de aproximadamente un segundo, aumentando rápidamente a un punto y disminuyendo lentamente al alcance del estado inicial. Está vinculado a una operación emocional e inteligente independiente, se usa con sensibilidad para procesar y manipular sensiblemente el sistema nervioso confuso.

La actividad electrodérmica ayuda a una serie de características que recuerdan la respuesta de la persona a sus mentes. Por un lado, un grado de comportamiento de la piel (SCL), que se relaciona con una extensión relativamente grande de la piel. Se cree que los cambios de nivel de este índice son una reflexión sobre los cambios generales de la actividad de devolución. Por otro lado, las respuestas de conductividad de la piel (SCR, por sus siglas en inglés), que están relacionadas con el sistema nervioso confuso en la mayoría de los cambios rápidos, constituyen un evento mensurable para señalar. El objetivo es procesar la cura del asma de la piel para dibujar cuatro características dérmicas:

- **Los eventos SCR:** eventos de la respuesta de conductividad de la piel en una etapa (eventos/etapa)
- **La frecuencia SCR:** frecuencia de ocurrencia de las respuestas SCR en una etapa (eventos/min)
- **La amplitud de SCR:** valor medio de la amplitud de las respuestas SCR en una etapa (μS)
- **El nivel de SCL:** valor medio de la señal GSR en una etapa (μS)

La eliminación de las marcas complejas es el resultado de la cantidad de datos que componen la marca, a pesar de que se ha submuestreado en el proceso de antemano. Además, el folleto no muestra una forma clara y acordada de manejarlo, por lo que se ha desarrollado un software completamente nuevo de acuerdo con las pautas que se han seguido en estudios similares. [7][8][9].

4.4.1. SCL

El nivel electrodérmico tónico o SCL crea una línea base en el cambio regular, es decir, siempre está cambiando dentro de un individuo, y puede ser diferente de los individuos. Algunos investigadores han decidido que la propia SCL, solo, no es suficiente conocimiento para la toma de las mejores decisiones [10].

Por lo tanto, el promedio simple en la señal no sería suficiente como una medida de SCL, ya que el SCL puede haber sido muy apreciado, ya que también hay SCR que voluntariamente construyen el tramo. La medida promedio del SCL está entre 1 y 16 μS porque la medición ya está balanceada. Aunque la señal electrodérmica se puede encontrar entre 1 y 40 μS en respuestas específicas [11].

En ambos casos, las características del nivel de tono se aproximan al promedio de la señal, ya que los eventos SCR se analizaron en paralelo, incluido un análisis completo de la conductividad de la piel, teniendo en cuenta el alcance de cada característica y marco. En otras palabras, el nivel SCL no es el único resultado considerado para los resultados.

4.4.2. SCRs

En cuanto a la respuesta o eventos con SCR, proporcionamos información relevante en estudios similares que estudiamos. Para el estudio, se deben tener en cuenta dos características de señalización: latencia y umbral. Entre los eventos, es decir, las señales positivas y rápidas de la señal, ER-SCR y NS-SCR, se pueden distinguir de los eventos no relacionados, respectivamente. Son los primeros directamente relacionados con estímulos externos y los segundos no requieren estímulos concretos. Su diferencia principal es que un ES-SCR cuenta con un tiempo de latencia entre la aparición del estímulo y la primera desviación significativa de la señal (Figura 26), que suele ser de entre 1 y 3 segundos. Los episodios, por otro lado, son las características básicas que cumplen todos los eventos de la señal conductiva, para ser cuantificados como una respuesta conductiva. Este umbral está fijado en $0,05\mu\text{S}/5\text{s}$ [7][8][9]. Por tanto el aumento en la señal debe tener una amplitud de al menos $0,05\mu\text{S}$ en un máximo de 5 segundos de tiempo de pico (Figura 26). Las flexiones que no cumplen con este sitio no se contarán como SCR. La respuesta dérmica tiene una amplitud entre 0.3 y $1.3\mu\text{S}$ y puede alcanzar hasta 2 o $3\mu\text{S}$. Con una aceleración agresiva de alto estrés, puede alcanzar una amplitud de $8\mu\text{S}$, pero es poco probable que suceda. Es difícil calcular la frecuencia de los eventos, pero la frecuencia SCR es de 1 a 3 minutos por minuto, con 10 períodos de relajación y 20-25 minutos cada vez. gran emoción [10].

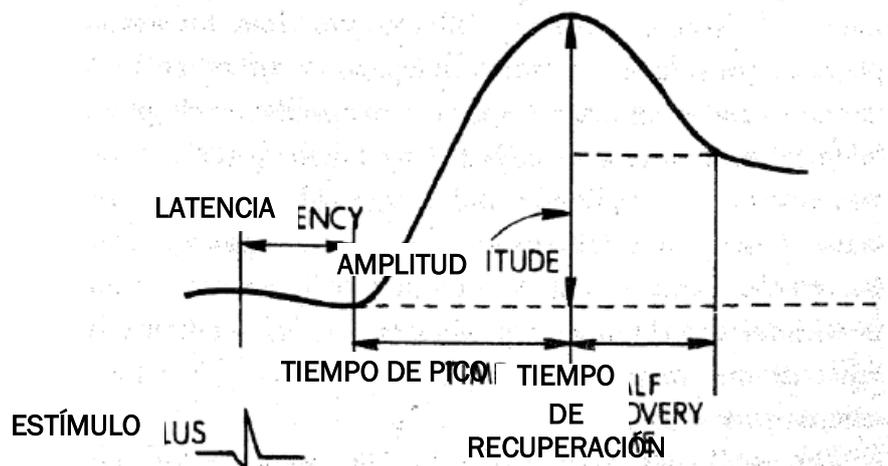


Figura 26. Representación del SCR en un evento de GSR

4.4.3. Pre-procesamiento de GSR

En la **Figura 27**, La señal GSR de los voluntarios se puede ver en la Fase 1, registro basal. Corresponde a la señal en bruto obtenida durante el estudio, que es una muestra de 500 Hz durante el preprocesamiento. En la señal GSR o actividad electromédica, el ruido de alta frecuencia siempre se superpone y no se puede alcanzar la señal para alcanzar los picos creados por aceleración de la señal. Por este motivo hubo que eliminar todo el ruido posible.

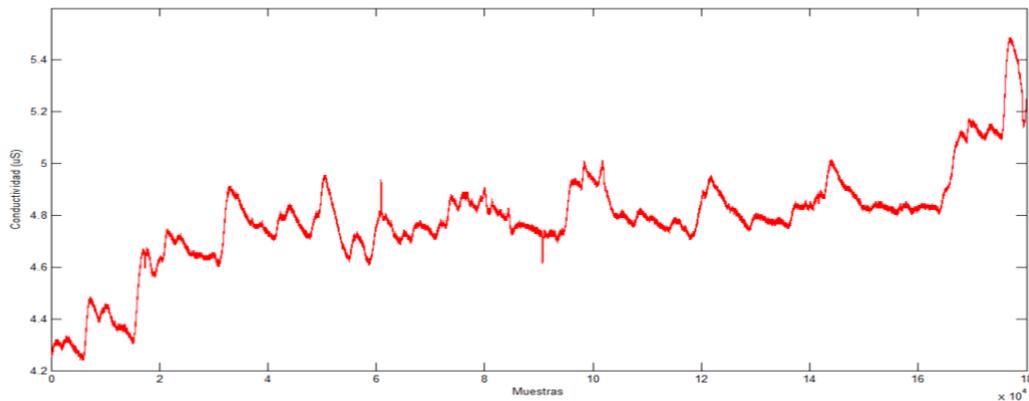


Figura 27. Lectura de una señal GSR a 500 Hertz en 6 minutos

El filtro de procesamiento de señal es un filtro digital del filtro de movimiento promedio que funciona de manera similar al filtro de filtro, para eliminar el ruido y mejorar la señal. El filtro está en la siguiente fórmula:

$$Y(n) = \sum_{k=n-\frac{m}{2}}^{n+\frac{m-1}{2}} \frac{X(k)}{m}$$

Donde 'Y' es la salida del filtro, 'X' son los datos de entrada de la señal, 'm' son las muestras por periodo y 'n' es el número de muestras a filtrar [12].

El filtro móvil promedio ha sido seleccionado por su manejo simple, debido a su carga de procesamiento de baja velocidad y la eliminación de ruido blanco, **Figura 27**. Su funcionamiento es la entrada promedio de la entrada 'm' para lograr una salida sin ruido. Se seleccionó el tamaño de muestra de 1100 muestras, un promedio de 1100 muestras, para filtrar la muestra de cada señal. Este número es de 2.2 segundos, considerando que la frecuencia de la señal es de 500 Hz. Se ha seleccionado el tiempo máximo sin evitar este evento, por menos tiempo para que ocurra, la latencia es menor que el tiempo y, por supuesto, la ocurrencia de un evento es menor que SCR.

Una vez que se filtra la señal, se puede alcanzar la señal para encontrar los puntos máximos. Para hacer esto, se ha realizado un acercamiento simple de la diferencia opuesta:

$$Y(n) = \frac{X(n) - X(n - 1)}{\delta T}$$

Este procedimiento ha sido seleccionado porque el primer método de aproximación derivada es un error menor. En la **Figura 28** se presenta el resultado de la aproximación a la derivada.

Para realizar el pre-procesado de la señal se desarrolló un software en Matlab el cual se presenta en el anexo **B.2**. Carlos Guerrero se basa en un software similar al desarrollado en su tesis [12]. La forma de señal de entrada de función es una señal GSR y las salidas son un filtro de señal y una señal de señal de filtro. Las variables, como la frecuencia, 500 Hz y las muestras, significan, deben ser 1100 para los cálculos.

En la **Figura 28**, se observa una señal de amplitud de 5 segundos. Representa el ruido presente en la señal GSR y el resultado del retorno de la filtración, presentando la aproximación realizada.

En la **Figura 29**, se observa la derivada de la señal filtrada, la derivada es de gran utilidad en el procesamiento puro de la señal.

En la **Figura 30** se observa la señal GSR y la señal filtrada de un voluntario durante la etapa 1.

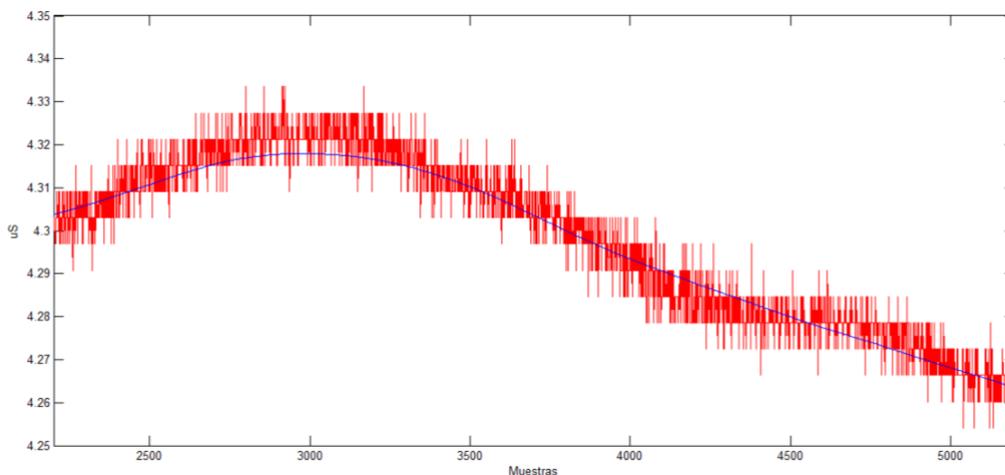


Figura 28. Señal GSR con ruido (rojo) y filtrada (azul)

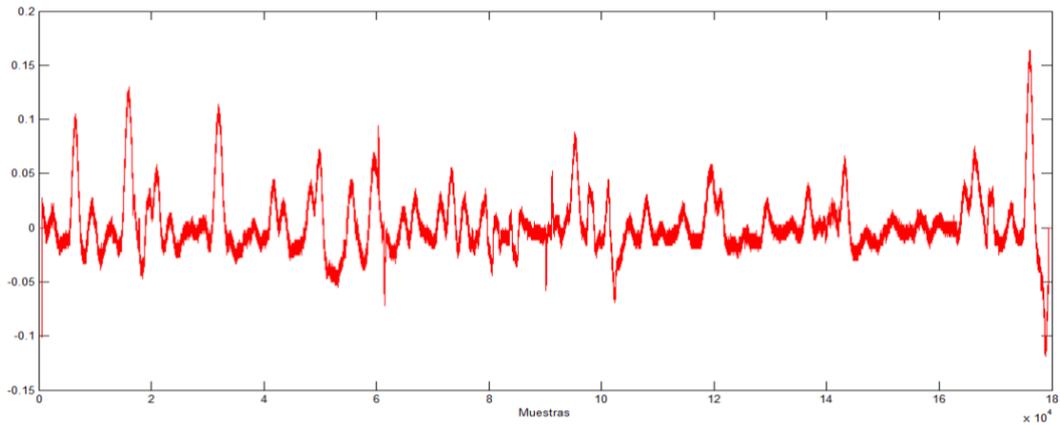


Figura 29. Primera derivación GSR

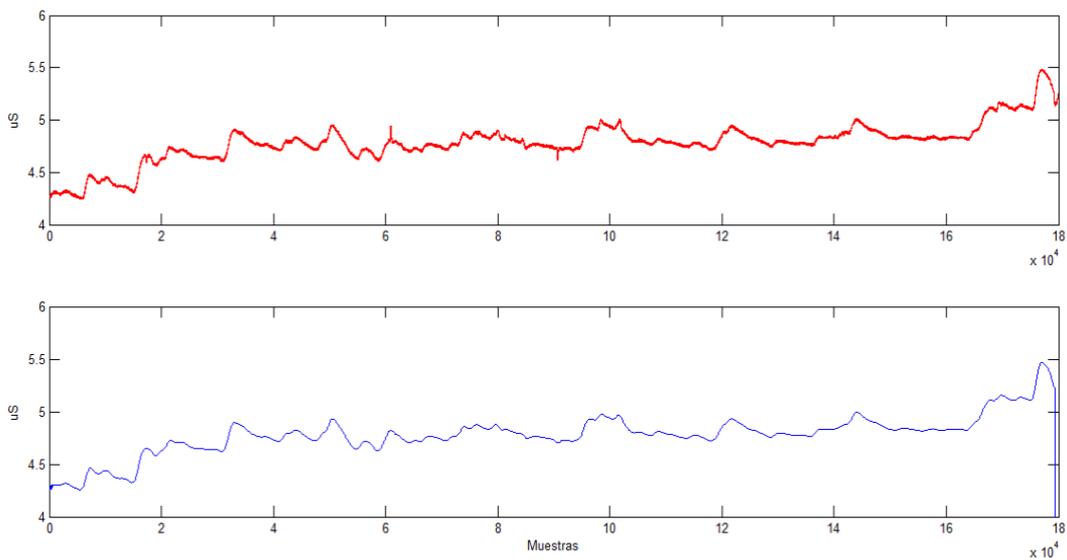


Figura 30. Señal bruto (rojo) y filtrado (azul) de GSR

4.4.4. Software desarrollado

El software detallado a continuación y ensamblado en el Apéndice B.4, es completamente original, funciona desde la señal GSR filtrada y se extrae para extraer eventos importantes en la señal. Se trata de encontrar eventos SCR que se puedan cuantificar y encontrar su amplitud.

Para registrar los eventos durante una fase, también se registran la medición absoluta de los eventos observados y una medida con respecto a los minutos de duración de fase, es decir, la frecuencia de eventos por minuto.

Para verificar la estabilidad de los eventos SCR, debe encontrar los consejos en la señal que elevan un mínimo de 0.5 microSiemens en 5 segundos, ya que es la única premisa clara en la literatura para este fenómeno. Sin embargo, está marcado como una guía esencial que, además del aumento de señal, hay una disminución a continuación, por lo

que un techo es en sí mismo un evento SCR si y solo si después de una inclinación positiva hay una pendiente negativa. Por lo tanto, para encontrar una respuesta cutánea SCR a la señal, se deben cumplir al menos tres pautas:

- Ser un máximo en la gráfica
- Que su pendiente positiva crezca como mínimo $0.5\mu\text{S}/5\text{s}$
- Que durante el tramo de crecimiento del máximo no haya deflexiones.

Si se cumplen estas tres directrices, el techo se toma como un evento de respuesta a los estímulos y, por lo tanto, se calcula. Para realizar la verificación, se desarrolló un programa en la plataforma Matlab 2013. En los esquemas representados en la [Figura 30](#) y la [Error! Reference source not found. 31](#), se presenta el diagrama de flujo del algoritmo que comprueba que se cumplen las siguientes condiciones, con las que se satisfacen las pautas señaladas anteriormente:

Condición 1: La derivada del punto origen (P_0) del SCR es nula.

Condición 2: Durante los 5 segundos previos a punto origen (P_0) hay al menos un punto (P_1) donde la diferencia de amplitud es de $0.05\ \mu\text{S}$.

Condición 3: Durante el crecimiento del evento no hay ningún punto (P_x) con pendiente negativa, si lo hay este se encuentra más alejado del punto origen (P_0) que el primer punto que cumple la condición 2 (P_1), [Figura 32](#). Matemáticamente:

$$\text{distancia}(P_x - P_0) > \text{distancia}(P_1 - P_0)$$

Condición 4: Entre el nuevo evento y el evento anterior hay algún punto de pendiente negativa – la pendiente entre dos eventos no puede ser siempre positiva.

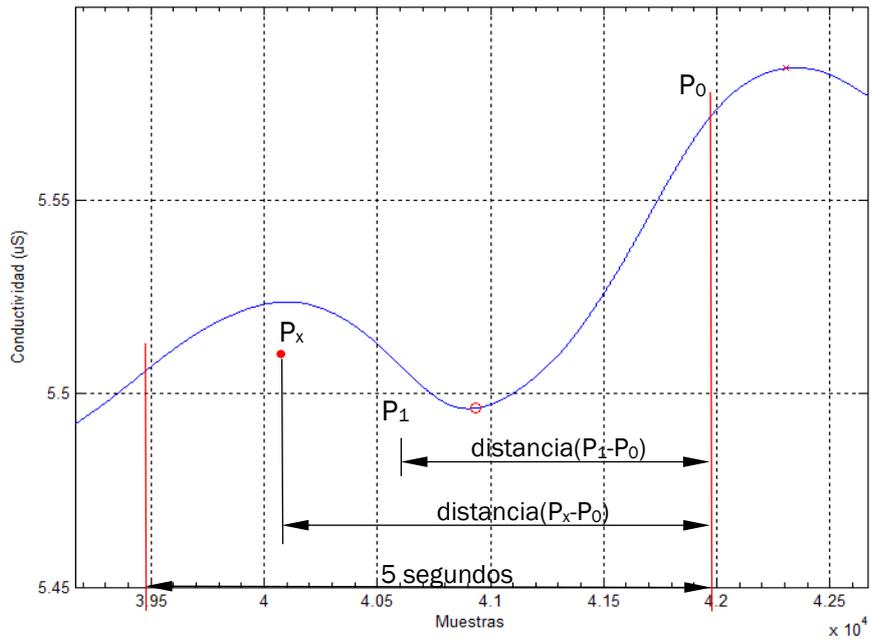


Figura 31. Tercera condición para detección del SCR

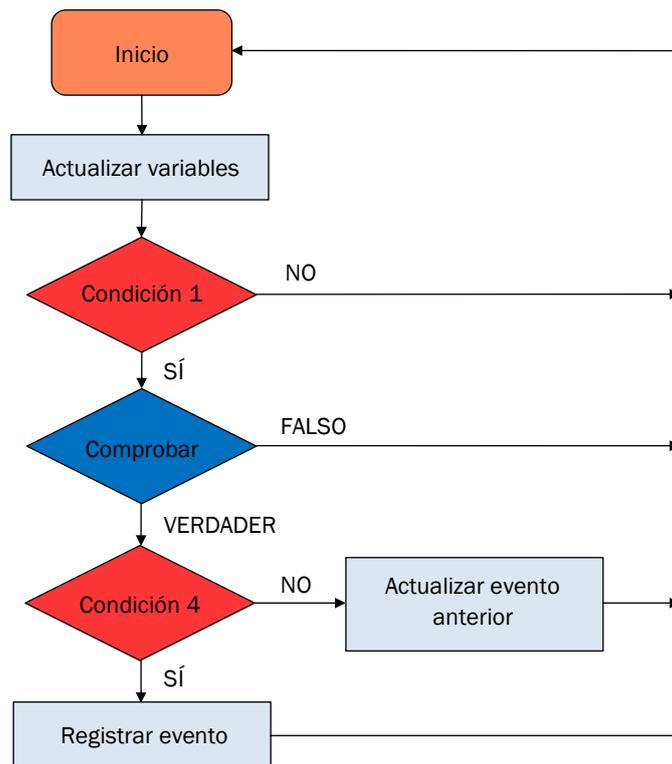


Figura 32. Algoritmo de detección de la señal GSR

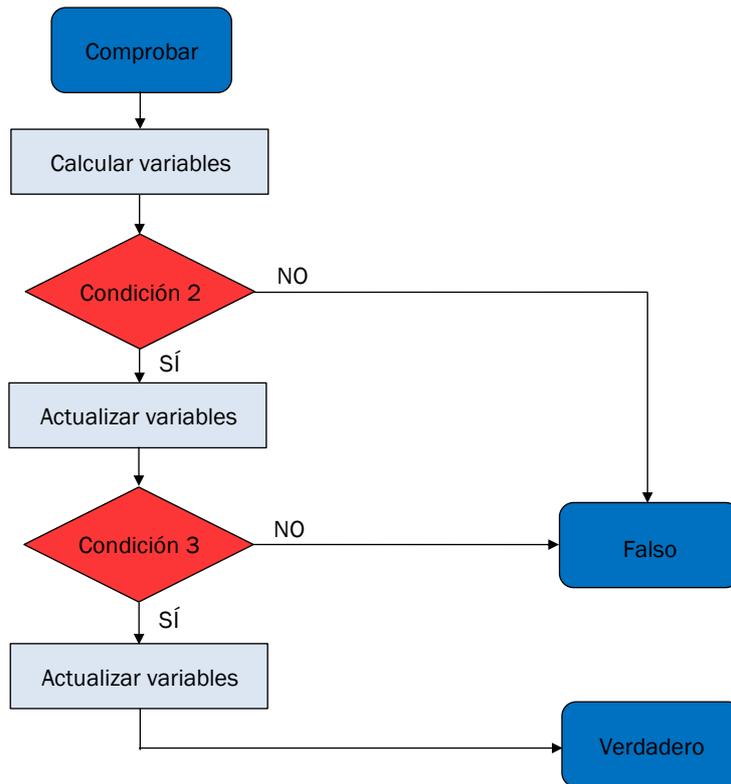


Figura 33. Algoritmo de detección de eventos SCR

Durante el desarrollo de este programa, se encontraron casos excepcionales que se tuvieron en cuenta y que formaron las condiciones que conforman la estructura del programa. Específicamente, a continuación hay un error frecuente que puede modificar por completo los resultados del estudio. En la Figura 34 se visualiza el mismo tramo de la señal GSR durante la etapa 1, dos veces. En la primera imagen a la izquierda, se registran dos eventos SCR, ya que ambas ondas aumentan $0.5\mu\text{S} / \text{s}$, pero el punto más alto del primero no es el máximo, sino un punto de inflexión. Por lo tanto, la cuarta condición no se cumple. En la segunda imagen, este error ha sido corregido y está comprobado que son parte del mismo evento SCR. Por lo tanto, este es un evento único con una amplitud doble

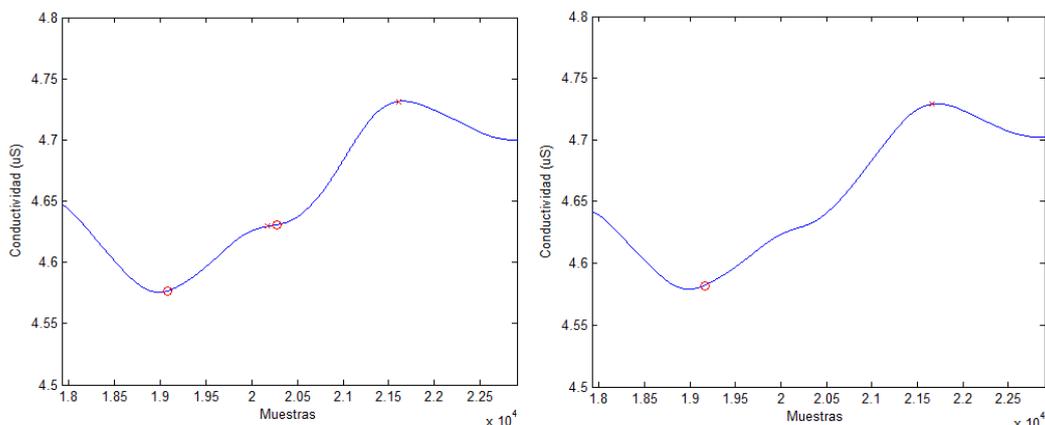


Figura 34. Aplicación algoritmo detección SCR sobre señal GSR

El resultado final del procesamiento se visualiza en la **Error! Reference source not found.**, donde puedes ver la señal filtrada al inicio y al final de cada evento grabado. Tanto el número de eventos como sus amplitudes se conservan.

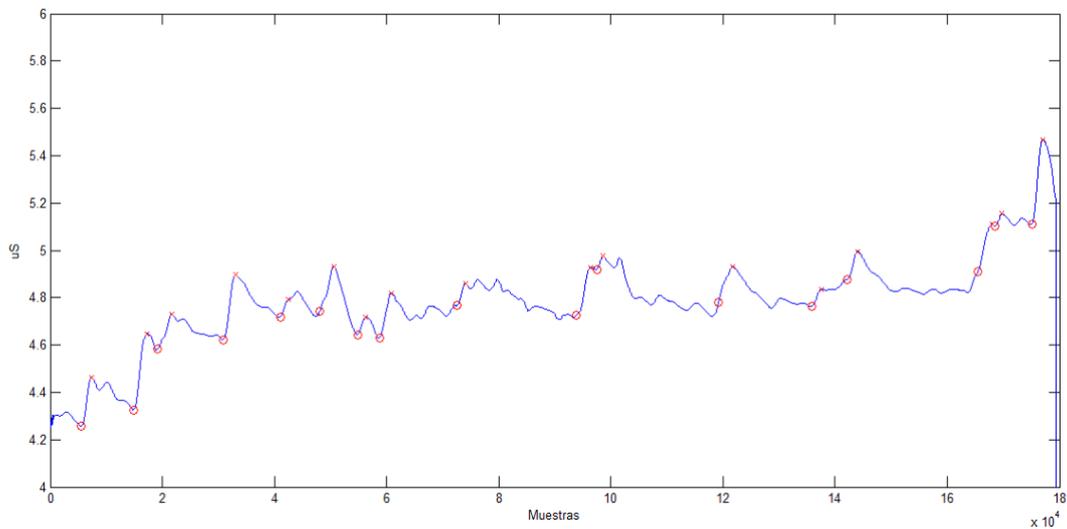


Figura 35. Representación eventos en señal GSR

Con respecto al índice SCL, el procesamiento es simple, solo el valor promedio de la señal GSR original se calcula durante la fase, por lo que el procesamiento preliminar no fue necesario para calcular este parámetro. Para facilitar la organización de la información de archivos, el cálculo de este índice se incluye en el programa descrito anteriormente, como se puede ver al consultar el código en el anexo **B.3**.

Por tanto, el software para el procesamiento de la señal GSR quedaría completamente descrito en la **Figura 36**.

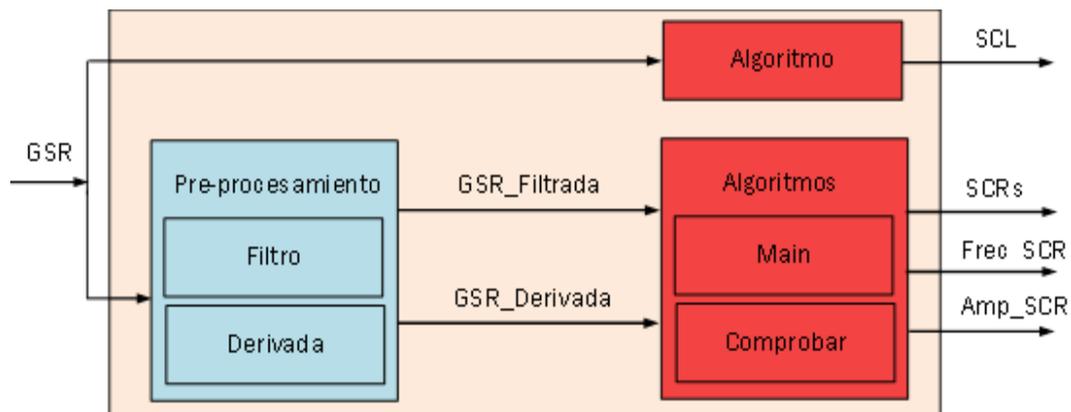


Figura 36. Software GSR

4.5. Señal SKT

La señal de temperatura de la piel (SKT) se refiere en todo momento a la temperatura de la piel de los dedos, especialmente el anular. La temperatura de la piel varía

considerablemente debido a factores externos, se deben considerar dos factores principales: el sexo del sujeto y el estado térmico de la persona al comienzo del anexo [13]. Por lo tanto, no tiene la intención de verificar que la temperatura de los sujetos sea similar a menos que usted verifique la variabilidad de esto durante el estudio. Los cambios de temperatura que ocurren en los dedos están relacionados con el volumen de sangre en la extremidad, cuya variación depende del sistema nervioso simpático y la actividad física.

La microcirculación de la piel se controla principalmente mediante una actividad simpática y, a menudo, se usa experimentalmente como una medida de esto, especialmente la de la piel de los dedos, porque contiene solo el neurotransmisor simpático. Los cambios en el flujo sanguíneo de la piel y la temperatura de la extremidad se utilizan como indicadores de los cambios reflejos simpáticos en respuesta a diversos factores, incluidos el estrés y los factores mentales o emocionales. [16][15].

En general, la disminución en la microcirculación causada por factores de estrés u otros estímulos que actúan sobre el sistema nervioso simpático se refleja por la caída en la temperatura de la punta del dedo. Por lo tanto, los cambios en la temperatura de la piel del dedo son útiles para evaluar los cambios psicofisiológicos, lo que hace que las extremidades de la temperatura sean un parámetro simple y conveniente para monitorear los cambios en la actividad del simpático [16].

Aunque la mayoría de los académicos y doctores argumentan que una situación psicológica estresante producirá una caída en la temperatura de la mano o de los dedos y que aumenta en una situación de relax, los datos no están claros. [13]. La señal de temperatura es relativamente lenta en comparación con otras medidas psicofisiológicas, como la conductividad electrodérmica, que es una indicación de los cambios en el estado emocional de la técnica en tiempo real. Estos datos han llevado a resultados contradictorios en algunos estudios como Baker y Taylor [17], en el cuál la temperatura aumentaba con la carga cognitiva. La actividad física del individuo también puede alterar la medida de temperatura. En un estudio llevado a cabo por Wenger [18], los individuos sostenían el elemento de medición ejerciendo presión sobre él, aumentando la temperatura registrada. La temperatura en los dedos es el índice psicofisiológico más sensible para la evaluación del estrés, ya que muestra la hiperactividad del sistema nervioso simpático debido a la transición de un nivel de estrés normal o bajo a un alto grado de estrés [19]. Sin embargo, es necesario un tiempo de latencia para su correcta interpretación.

En este caso, la mano está en el medio de la noche, si se encuentra, y el sensor se fija con el dedo no hay necesidad de más subordinación de la persona. Antes de que la temperatura incluya la temperatura ambiente cuando la temperatura promedio de la temperatura se alcanza durante los últimos 5 segundos del ciclo, como en el caso de los estudios similares [7][8][9]. De esta manera, la diferencia con respecto al estrés o la falta de estrés se habrá manifestado y se podrá medir. Por lo tanto, la característica medible que se extrajo de la señal de temperatura de la piel y que se almacenó es la temperatura promedio al final de la fase, definida como 'TEMP'. En la **Figura 37** se visualiza la señal de

temperatura de un voluntario durante la etapa 4, como se puede observar su tendencia es descendente.

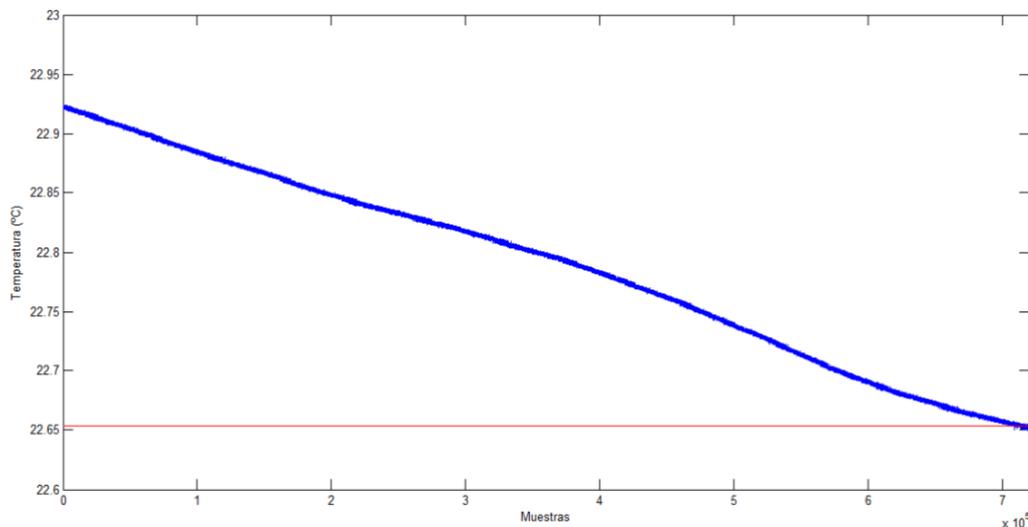


Figura 37. Señal SKT durante una terapia de rehabilitación

El software desarrollado para extraer el índice de señal SKT se encuentra en el anexo B.4, esta es una función única en Matlab 2013. La función recibe como entrada de señal SKT, que calcula el tiempo total del registro según las muestras almacenadas y la frecuencia de adquisición, 2000Hz. Calcule el promedio de los últimos 5 segundos registrados, es decir su salida, un valor de temperatura en grados Celsius que corresponde al índice TEMP.

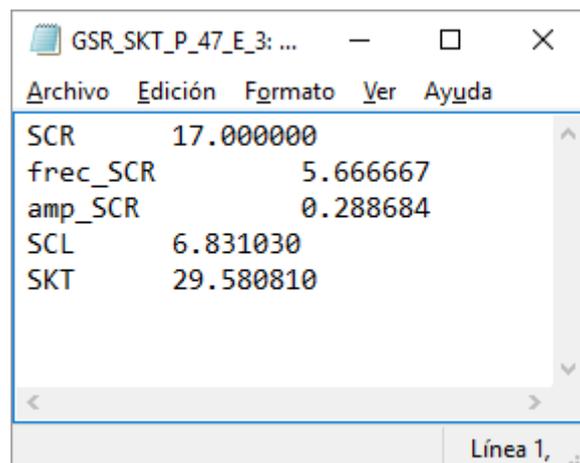
4.6. Clasificación de las señales GSR y SKT

Durante las dos secciones anteriores, hemos detallado el software desarrollado para extraer las características fisiológicas de los eventos SCR, la frecuencia de eventos SCR, la amplitud promedio de eventos SCR, el valor SCL y el valor TEMP. Es necesario preservar todos estos valores para un análisis posterior. Para esto, una escritura simple tuvo lugar en Matlab presente en el anexo B.5, que almacena todos los índices y los escribe en un nuevo archivo llamado 'GSR_SKT_P_X_E_Y', este archivo se encuentra en el archivo voluntario personal dentro de la carpeta 'Registros_Fraccionadas'. En la carpeta de datos se registraron por filas y columnas, la primera columna era el nombre del índice y el segundo valor correspondiente. En cuanto a las filas se registran en orden:

- **SCR:** los eventos SCR durante la etapa.
- **frec_SCR:** los eventos SCR en un minuto.
- **amp_SCR:** la amplitud promedio de todos los eventos SCR ocurridos durante la etapa en microSiemens.
- **SCL:** el valor SCL en microSiemens.
- **TEMP:** la temperatura en grados centígrados.

En la Figura 38 se observa un fichero GSR_SKT perteneciente a la etapa 3 del voluntario P_47.

Índice TEMP →



The screenshot shows a text editor window titled 'GSR_SKT_P_47_E_3: ...'. The window contains the following text:

SCR	17.000000
frec_SCR	5.666667
amp_SCR	0.288684
SCL	6.831030
SKT	29.580810

The status bar at the bottom right of the window indicates 'Línea 1, ...'.

Figura 38. Documento con lecturas de GSR y SKT

Se decidió introducir datos de señales de GSR y SKT en un único archivo para reducir el volumen de archivos que se trataron durante el estudio. Además, el manejo de dos señales se realiza en paralelo. Una vez que se extrajeron los datos, se agregaron al archivo Excel 'Datos_Estrés_Instantáneo' en una nueva hoja, donde se almacenaron los datos de la experimentación. Su incorporación está hecha por los índices, es decir, se incluyen los datos de las cinco fases de un solo índice, por lo que tenemos una columna por cinco índices de sub-columna que corresponde a las cinco fases. Elegimos esta configuración para visualizar la variabilidad entre las diferentes etapas del estudio, de cada índice.

4.7. Señal ECG

El corazón eléctrico o la señal del electrocardiograma detecta información relevante sobre el nivel general de actividad de un individuo. Por ejemplo, las aceleraciones de la frecuencia cardíaca ocurren como una respuesta al ejercicio, estados emocionales, sonido fuerte, excitación sexual y tensión mental [20]. Una frecuencia cardíaca más baja se asocia generalmente con un estado relajado o con la exposición de estímulos agradables [21].

La variabilidad de la frecuencia cardíaca o la variabilidad de la frecuencia cardíaca (VFC), recoge cambios cardíacos en el ritmo cardíaco y es una característica clave de la actividad cardíaca. Si la persona está en un estado de relajación, la frecuencia cardíaca es más baja, por lo que se altera, sería necesario que actuara el sistema nervioso autónomo (SNA). La HRV está influenciada por los incentivos como resultado del desempeño del SNA. Si en la actividad de SNA, la actividad simpática se impone a la actividad parasimpática, la variabilidad disminuye, es decir, las palizas son más regulares, aunque la frecuencia cardíaca aumenta [22][23]. Por lo tanto, el grado de variabilidad de la frecuencia cardíaca no está directamente relacionado con el grado de corazón. La frecuencia cardíaca es la cantidad de latidos en un momento dado. La variabilidad de la frecuencia cardíaca es la diferencia de tiempo entre estas palizas. Mientras que la actividad encantadora reduce la variabilidad, la frecuencia aumenta. Sin embargo, la actividad parasimpática reduce la frecuencia y aumenta la variabilidad.

Hay muchos factores que afectan la VFC como el estrés físico y mental, la temperatura o la altura, la edad, la cafeína o el alcohol, así como un componente genético [23]. El

propósito de procesar la señal de ECG es tratar de aislar el estrés mental generado por el VFC al correlacionar la señal psicofisiológica con el cambio en la actividad cardíaca.

4.7.1. Pre-procesamiento de la señal ECG

El primer paso en el procesamiento fue calcular los intervalos R-R de la señal, es decir, el tiempo entre una onda R y la otra, recogiendo la variabilidad en cada latido en segundos. Para extraer esta información de la señal, el software desarrollado en la plataforma Matlab 2013 por Pablo Viñas [24], que detecta automáticamente los R-picos y calcula el tiempo entre dos picos consecutivos. Este software filtra la señal para maximizar la onda R y hace que sea más fácil reconocerla desde el programa, (Figura 39). Para encontrar los puntajes R, promediando el tiempo haciendo estimaciones del rango en el que se debe encontrar otro pico. El registro del programa es la dirección y el nombre del archivo que se manejará. En este estudio fueron los archivos que llevan datos experimentales durante una fase a una frecuencia de 2000 Hertz. La salida es la retroalimentación visual de los picos y la detección de la señal VFC.

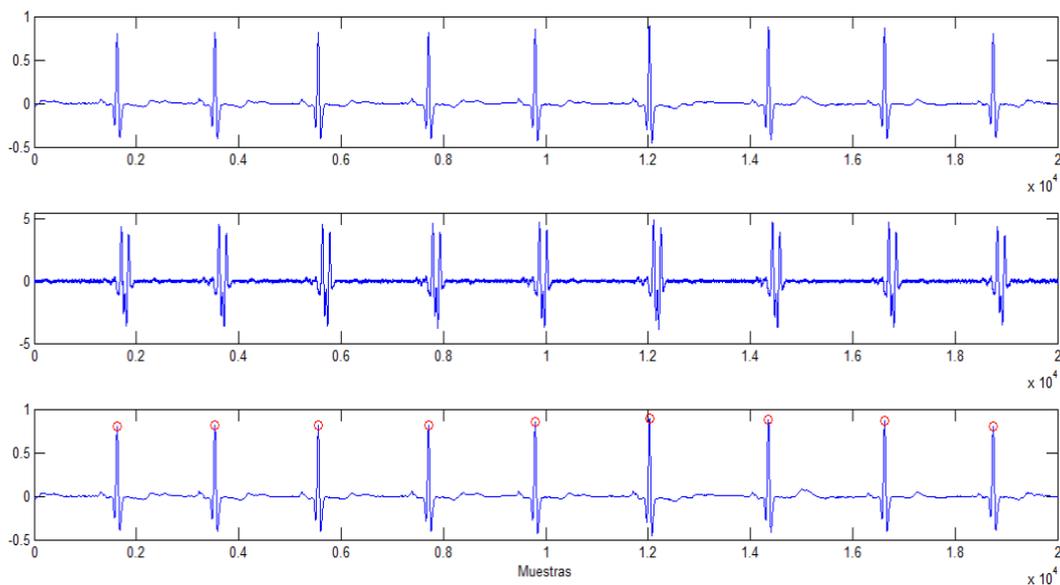


Figura 39. Señal del ECG en milivoltios, filtrada, y con los picos del RR marcados.

Aunque el programa funcionaba correctamente, se necesitaba una inspección visual para controlar el rendimiento del software, así como la reparación manual de los errores debidos a anomalías o ruido en el registro. Para hacer esto, el programa tiene herramientas de corrección manual que le permiten desplazarse por el gráfico y eliminar o dibujar en la parte superior de los gráficos R. El programa atrae nuevos picos y requiere un nuevo vértice alrededor del punto que el usuario elija a mano. Cuando se verifica la señal, se puede calcular la señal VFC y, si es compatible, se puede almacenar en un archivo. Los archivos que crean el software se definen como 'RR_P_X_E_Y' y se almacenan en la carpeta 'P_X' en 'Registros fraccionados'. La señal procesada, la señal de variabilidad

RR o la señal VFC, **Figura 40**, se mide en segundos entre picos, de forma que se extrae el periodo entre latidos del sujeto.

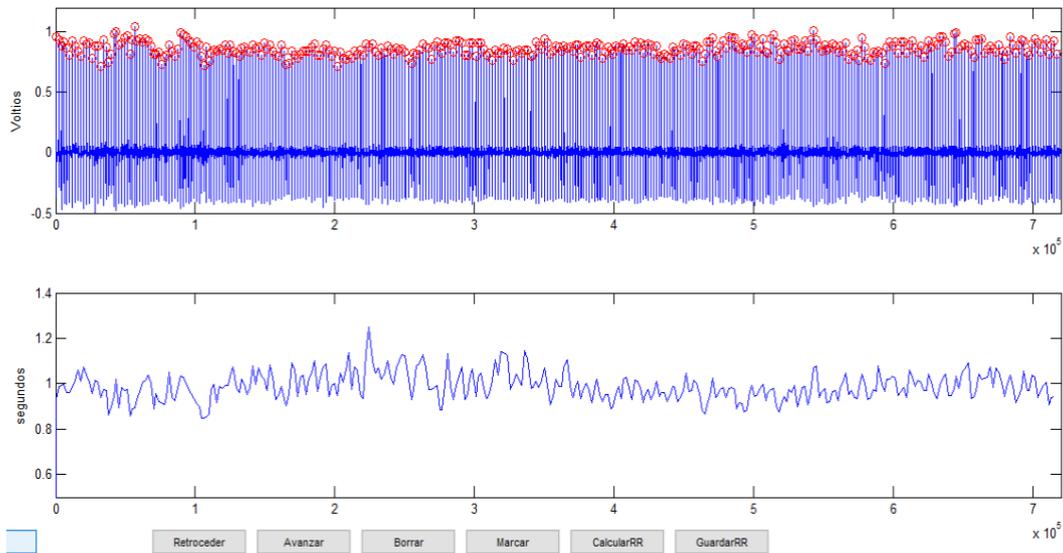


Figura 40. ECG procesado en Matlab y señal del RR obtenida.

Durante el procesamiento de las señales, se encontraron cinco señales inválidas. En la primera señal fallida, se asoció un ruido con la señal del ECG, probablemente debido a alguna anomalía cardíaca. El resto de las señales se descartaron debido a errores cometidos durante el censo, debido al ruido muscular excesivo o la caída de sensores adhesivos durante la prueba.

4.7.2. Características de los intervalos R-R

Para llevar a cabo un estudio completo de la actividad cardíaca, es necesario elaborar la señal para producir los indicadores característicos más importantes para el estudio del ritmo cardíaco y la variabilidad. Hay dos pruebas posibles: análisis en el campo del tiempo y análisis en el dominio de la frecuencia. En este estudio, como en otros similares [7][8][9], se optó por el estudio en el dominio del tiempo. Es un análisis conceptual muy simple, que lo hace óptimo para estudiar.

Además, se detalla la base de la teoría necesaria para comprender el análisis y el reconocimiento de los índices extraídos de la señal eléctrica del corazón. Estos índices se incluyen en el análisis de datos para formar parte de la misma investigación, pero su procesamiento no es detallado y no es un tema de estudio en este trabajo. En el trabajo de investigación se llevó a cabo en paralelo con Pablo F. Viñas realizando estudios complementarios. Su estudio incluye este procesamiento [24], y desde donde han sido facilitados todos los índices incluyéndose en el documento de Excel 'Datos_Estres_Instantáneo'. El análisis en el campo del tiempo describe el comportamiento de la variabilidad de la frecuencia cardíaca a lo largo del tiempo. Hay dos métodos para extraer el índice: métodos estadísticos y métodos geométricos. El análisis del estudio se realiza por métodos estadísticos debido al volumen de datos a procesar, realizar un análisis geométrico en cada etapa de cada paciente parecerá infinito, es

también un análisis que proporciona muy poca información sobre la señal. La señal que se analiza es la señal de la variación del ritmo cardíaco de preprocesamiento, es decir, la señal del intervalo R-R expresada en segundos. El índice de extracción directa de esta señal es su valor promedio, pero a partir de la señal de variabilidad se pueden derivar algunas medidas estadísticas que cumplen con el valor promedio y finalizan el estudio. A partir de la medición directa de los intervalos R-R, tenemos el parámetro SDNN. A partir de la medición directa de los intervalos R-R, tenemos los índices: RMSSD y pNN50. Por lo tanto, se han extraído cuatro índices de este procesamiento:

- **Med_RR**: medida promedio del tiempo entre latidos en cada etapa.
- **SDNN**: desviación estándar de todos los intervalos R-R.
- **RMSSD**: corresponde a la raíz cuadrada promediada de la suma de diferencias al cuadrado de dos intervalos R-R consecutivos medida en segundos.
- **pNN50**: porcentaje del total de intervalos cuya diferencia con el intervalo R-R adyacente sea mayor de 50 ms.

Estas cuatro medidas corresponden a los índices que se utilizaron para caracterizar la actividad cardíaca durante el estudio y cuyos valores se analizaron. En la [Figura 41](#) se puede visualizar un esquema con el procedimiento seguido para la extracción de los índices de la señal ECG.

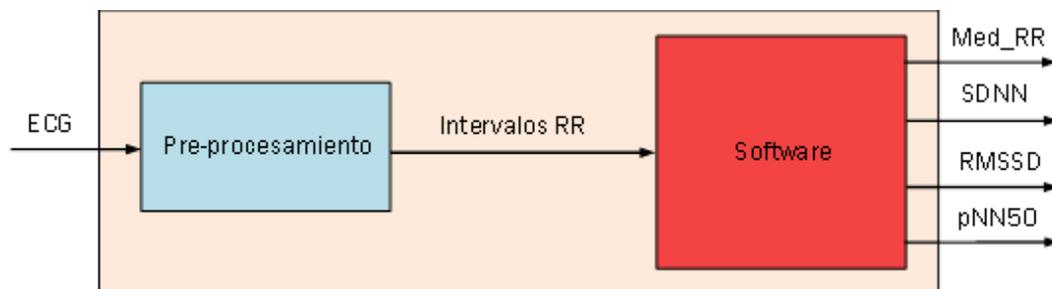


Figura 41. Flujo de estados para el procesado del ECG

5. Procesado de datos y análisis de resultados.

Los datos se analizaron para obtener resultados preliminares, y para confirmar el alcance y la viabilidad del estudio. Se decidió llevar a cabo un análisis estadístico básico, basado en los valores promedio y las desviaciones estándar de cada índice. Este es un análisis simple que nos permitió verificar la variabilidad de los datos en toda la muestra y obtener los primeros resultados.

5.1. Re-caracterización de la muestra

Para comenzar el análisis de los datos se re-caracterizó la muestra, puesto que esta había variado levemente. Tras eliminar los registros pertenecientes a aquellos voluntarios cuyas señales no habían sido válidas en alguno de los procesamientos, quedó un total de 52 voluntarios, de los cuales 19 son mujeres (36,54%) y 33 hombres (63,46%).

La edad media de la muestra es de 37,69 años con una desviación estándar de 7,29 años, el peso medio es de 73,61 kilogramos con una desviación estándar de 16,16 kilogramos y una estatura media de 173,15 centímetros con 9,04 cm de desviación estándar.

5.2. Índices

Los datos que se han analizado son los índices obtenidos durante el estudio, ya sea desde el experimento en sí o desde el procesamiento de señales fisiológicas.

De la experimentación son los índices de las pruebas con los testSAM. Como se explicó anteriormente, la prueba SAM se dividió en tres filas, valencia o placer, umbral o excitación y campo. Cada fila tenía nueve recuadros, por lo que los tres índices variaban de 1 a 9, de menos a más, o de negativo a positivo.

Del tratamiento, se obtuvieron los índices extraídos de las señales de GSR, SKT y ECG. Las unidades en que se expresaron son las adoptadas durante el resto del estudio.

Cada uno de ellos agrega un total de doce índices, que analizaremos individualmente para ver si se pueden considerar como contadores de estrés óptimos. En la [Tabla 3](#) se puede observar una compilación de todos los índices según su origen, indicando el nombre del índice, una breve descripción y las unidades en las que se presentarán sus valores.

Procedencia	Índice	Descripción
Test SAM	Valencia	Estado anímico de la persona
	Umbral	Grado de excitación mental de la persona
	Dominio	Dominio de la situación por parte de la persona
Señal GSR	SCR	Eventos de la respuesta de conductividad de la piel en una etapa (eventos/etapa)
	Frec_SCR	Frecuencia de ocurrencia de las respuestas SCR en una etapa (eventos/min)

	Amp_SCR	Amplitud promedio de las respuestas SCR en una etapa (μ S)
	SCL	Valor medio de la señal GSR en una etapa (μ S)
Señal SKT	TEMP	Valor medio de los 5 últimos segundos de la temperatura en una etapa ($^{\circ}$ C)
Señal ECG	Med_RR	Valor medio de la variabilidad de la frecuencia cardiaca en una etapa(s)
	SDNN	Desviación estándar del tiempo entre latidos (s)
	RMSSD	Valor medio de la suma de las diferencias temporales entre intervalos adyacentes (s)
	pNN50	Porcentaje del número de diferencias temporales entre dos intervalos R-R consecutivos, mayores de 50 ms, en cada etapa (%)

Tabla 3. Índices analizados en el estudio

Todos estos datos y valores se recopilaron en el archivo de Excel, 'Stress_Data_Instantaneous'. En Excel, se separaron en filas y columnas, con las líneas y columnas de cada voluntario indexadas en un solo paso. Para el logro de los valores medios y de desviación estándar, se utilizó la misma plataforma. Por lo tanto, solo se obtuvo un valor que corresponde al valor promedio de un índice en un solo paso para todos los voluntarios. Por lo tanto, cada índice corresponde a cinco valores, uno para cada paso. De esta forma, el volumen de 41 valores se ha reducido por índice y por paso, a solo 4 parámetros.

5.3. Test de SAM

A continuación, se evaluaron los datos psicológicos facilitados por los voluntarios a través de los test SAM. En la [Tabla 4](#) se han recogido las tres características que lo componen en cinco etapas distintas, correspondientes a cada una de las terapias de rehabilitación ejercitadas del protocolo.

	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5
Valencia	6,88 \pm 1,498	7,14 \pm 1,449	7,11 \pm 1,449	7,40 \pm 1,149	8,66 \pm 1,20
Umbral	2,77 \pm 1,627	2,85 \pm 1,484	2,29 \pm 1,498	2,03 \pm 1,996	2,33 \pm 1,996
Dominio	6,51 \pm 1,854	7,05 \pm 1,361	7,46 \pm 1,20	7,85 \pm 1,642	7,40 \pm 1,361

Tabla 4. Valores medidos en el test SAM

Se puede observar que durante la Etapa 1, la sensación de valencia y dominio es alta, y el grado de activación o umbral es bajo, por lo que se puede considerar que los voluntarios han dominado la situación y estaban tranquilos. Durante el desarrollo de la primera terapia, la seguridad de los voluntarios ha aumentado. El sujeto sintió que él controlaba la situación. Finalmente, en la terapia "difícil", el grado de activación mental aumentó y el campo disminuyó, lo que varió la comodidad de los sujetos. Estos datos corresponden a la situación de estrés creada para el estudio. La valencia, o lo que es lo mismo, el estado de ánimo de las personas durante el estudio, no ha cambiado significativamente, aunque aumenta con la interacción con el robot, lo que podría provocar una reacción a la actividad

de las terapias frente a la inactividad de la primera etapa. En las figuras: **Figura 44**, **Figura 44** y **Figura 44**, se representan los datos de valencia, umbral y dominio durante las etapas.

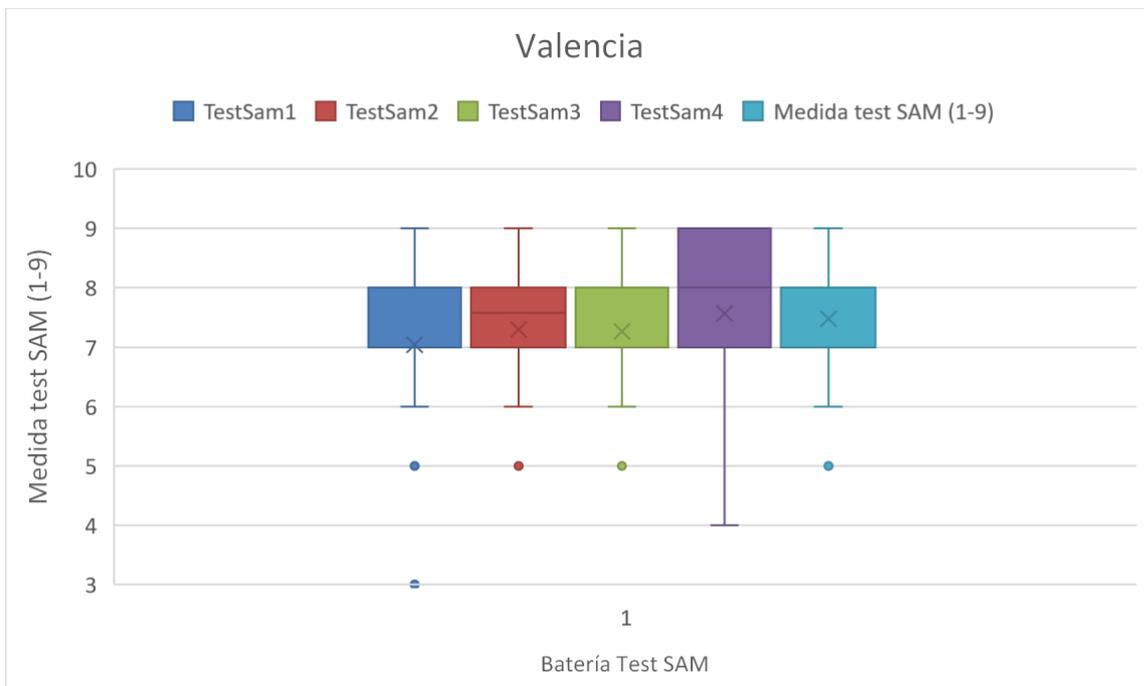


Figura 42. Resultados de la medida de la Valencia

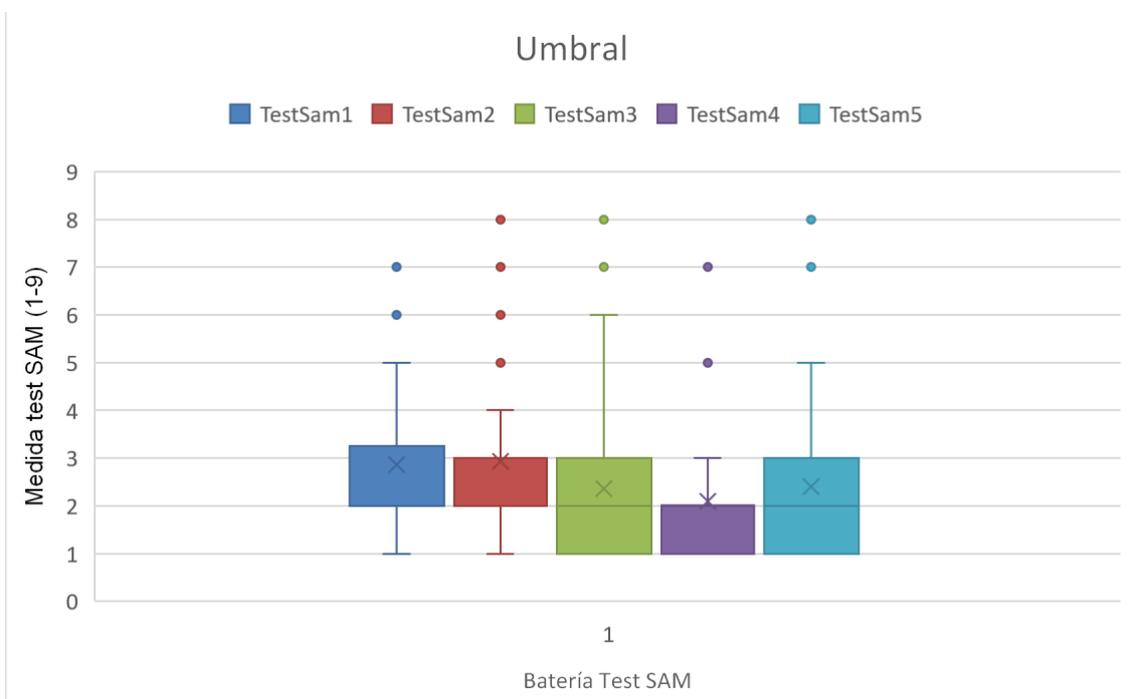


Figura 43. Resultados de la medida del Umbral

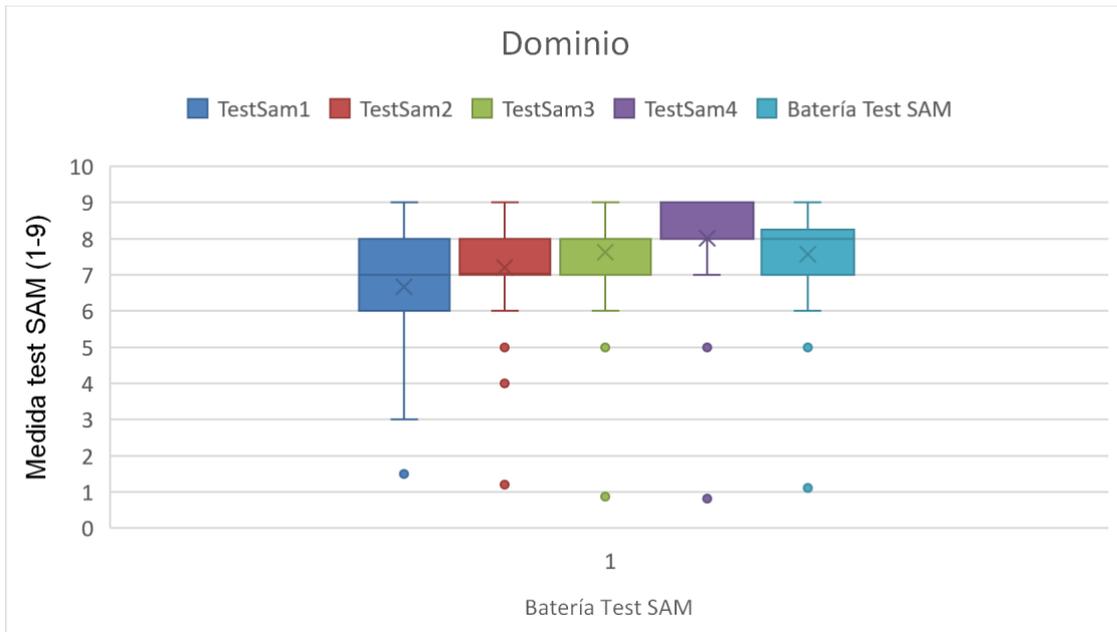


Figura 44. Resultados de la medida del Dominio

Recordando el formato que tienen los test SAM, los sujetos pueden evaluar su estado emocional del 1 al 9 en cada momento. Lo que se refleja en las figuras anteriores es para test realizado después de cada una de las terapias, los valores medios de la población y su intervalo de confianza. Podemos ver que algunos valores quedan fuera del rango, representados con puntos fuera de los intervalos de confianza. Es importante reflejar que esos valores, al ser un número pequeño y no representativo de las muestras, podrían ser desechables en un estudio posterior con el resto de la población media que comparte el mismo estado emocional.

5.4. Señal GSR

De la señal GSR se extraían cuatro índices, en la

		RESULTADOS								
		E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
SCR (events)	desv_ST	7,327	8,521	5,468	3,119	4,275	2,807	3,574	2,046	3,307
	media	10,275	12,392	6,941	4,098	5,353	3,627	5,157	2,118	3,941
	MAX	26,000	33,000	25,000	12,000	20,000	11,000	15,000	8,000	11,000
	MIN	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
frec_SCR(event/min)	desv_ST	1,282	1,496	1,357	1,610	1,298	1,722	1,249	1,906	1,305
	media	1,879	2,130	2,053	2,037	1,824	2,157	1,878	1,917	1,646
	MAX	4,596	5,854	4,592	5,950	5,185	6,429	5,581	8,727	4,978
	MIN	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
SCL (uS)	desv_ST	49,808	40,204	108,503	36,531	35,324	37,156	34,868	35,097	33,558
	media	28,676	24,816	39,675	23,376	22,694	25,231	22,579	22,033	20,413
	MAX	186,927	188,864	726,314	184,034	186,283	188,198	188,663	189,233	187,696
	MIN	5,110	5,101	5,132	5,140	5,140	5,135	5,189	5,139	5,139
SKT (°C)	desv_ST	5,499	6,081	5,822	5,759	5,671	5,589	5,430	5,358	5,349
	media	31,007	32,033	32,842	32,912	33,467	33,519	33,969	33,969	34,111
	MAX	38,285	39,118	39,947	40,641	40,673	40,258	39,716	39,341	39,825
	MIN	20,203	19,559	19,767	19,545	19,387	19,289	19,234	19,217	19,335
AMP_SCR (uS)	desv_ST	0,267	0,455	0,471	1,257	0,820	0,814	0,790	0,433	1,700
	media	0,198	0,304	0,400	0,573	0,472	0,452	0,476	0,237	0,541
	MAX	1,510	2,200	2,040	7,180	5,060	3,640	4,470	2,800	11,570
	MIN	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Tabla 5 se puede consultar sus valores. En primer lugar, se ha presentado el número de eventos SCR en cada etapa. Se halló el índice de frecuencia de las respuestas SCR (frec_SCR), el cual indica el número de eventos a lo largo de un minuto de la etapa.

		RESULTADOS								
		E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
SCR (events)	desv_ST	7,327	8,521	5,468	3,119	4,275	2,807	3,574	2,046	3,307
	media	10,275	12,392	6,941	4,098	5,353	3,627	5,157	2,118	3,941
	MAX	26,000	33,000	25,000	12,000	20,000	11,000	15,000	8,000	11,000
	MIN	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
frec_SCR(event/min)	desv_ST	1,282	1,496	1,357	1,610	1,298	1,722	1,249	1,906	1,305
	media	1,879	2,130	2,053	2,037	1,824	2,157	1,878	1,917	1,646
	MAX	4,596	5,854	4,592	5,950	5,185	6,429	5,581	8,727	4,978
	MIN	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
SCL (uS)	desv_ST	49,808	40,204	108,503	36,531	35,324	37,156	34,868	35,097	33,558
	media	28,676	24,816	39,675	23,376	22,694	25,231	22,579	22,033	20,413
	MAX	186,927	188,864	726,314	184,034	186,283	188,198	188,663	189,233	187,696
	MIN	5,110	5,101	5,132	5,140	5,140	5,135	5,189	5,139	5,139
SKT (°C)	desv_ST	5,499	6,081	5,822	5,759	5,671	5,589	5,430	5,358	5,349
	media	31,007	32,033	32,842	32,912	33,467	33,519	33,969	33,969	34,111
	MAX	38,285	39,118	39,947	40,641	40,673	40,258	39,716	39,341	39,825
	MIN	20,203	19,559	19,767	19,545	19,387	19,289	19,234	19,217	19,335
AMP_SCR (uS)	desv_ST	0,267	0,455	0,471	1,257	0,820	0,814	0,790	0,433	1,700
	media	0,198	0,304	0,400	0,573	0,472	0,452	0,476	0,237	0,541
	MAX	1,510	2,200	2,040	7,180	5,060	3,640	4,470	2,800	11,570
	MIN	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Tabla 5. Valores obtenidos en el GSR

Teniendo en cuenta el número de eventos por minuto, se observa que en las primeras etapas hay un mayor de eventos y a medida que avanzan las terapias estos eventos disminuyen de manera gradual. Estos resultados se observan con más claridad en la gráfica presentada en la **Error! Reference source not found.**. Este aumento está relacionado con el estrés que desarrollaba el voluntario en las terapias. Los estudios señalan que entre 1 y 3 eventos por minuto se considera que la persona está relajada. Se observa que en las etapas pares, es decir, mientras se están desarrollando las terapias de rehabilitación, efectivamente existe un aumento del número de eventos, lo que se asocia a un ligero nivel de estrés. Durante los descansos el nivel de estrés disminuye, lo que equivale a un menor número de eventos como puede verse en las etapas impares de la tabla.

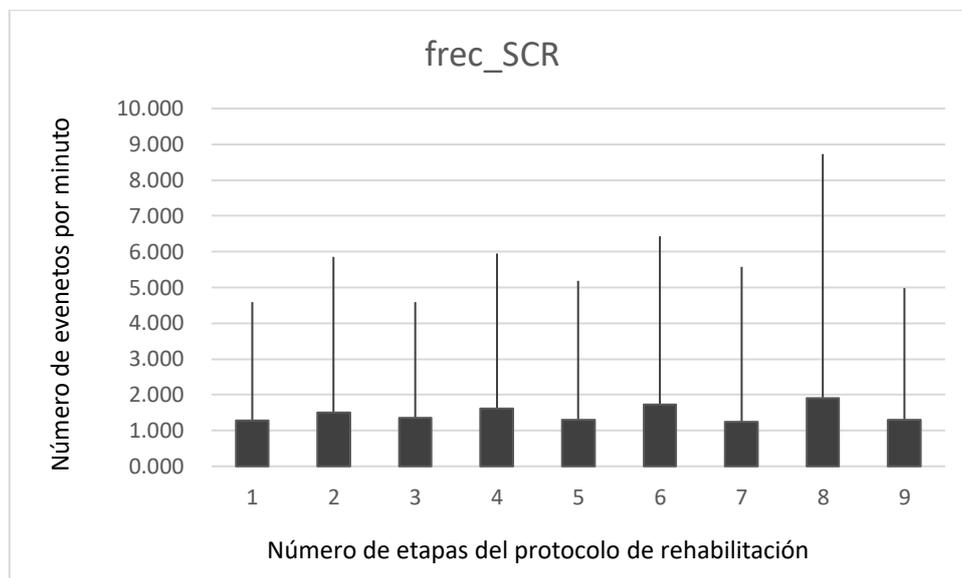


Figura 45. Resultados obtenidos de los eventos del SCR por terapia

En cuanto a la amplitud promedio de las respuestas SCR (amp_SCR), se ha obtenido una variabilidad más acusada. Podemos observar que la amplitud del SCR es mucho menor en la etapas que se corresponden con la realización de las terapias virtuales, esto es así porque las respuestas frente a los estímulos exteriores son más rápidas. Con lo cual los resultados tienen sentido, sobre todo cuando los comparamos con la frec_SCR.

Además, podemos ver un hecho. Los sujetos se habían enfrentado con anterioridad a la primera terapia virtual, no les era desconocida. Sin embargo el resto sí, y por eso la amplitud es mucho menor. Las terapias 4 y 6 eran nuevas para los sujetos, e iguales entre ellas, solo que con diferentes elementos gráficos. De esta manera podemos ver que el impacto en la segunda de ellas es mucho menor, consistía en unos gráficos mucho más sencillos que la 4.

Por último, la 8 era nueva también, pero con una dinámica muy sencilla y unos gráficos muy simples. Este fenómeno queda reflejado en la **Figura 46**.

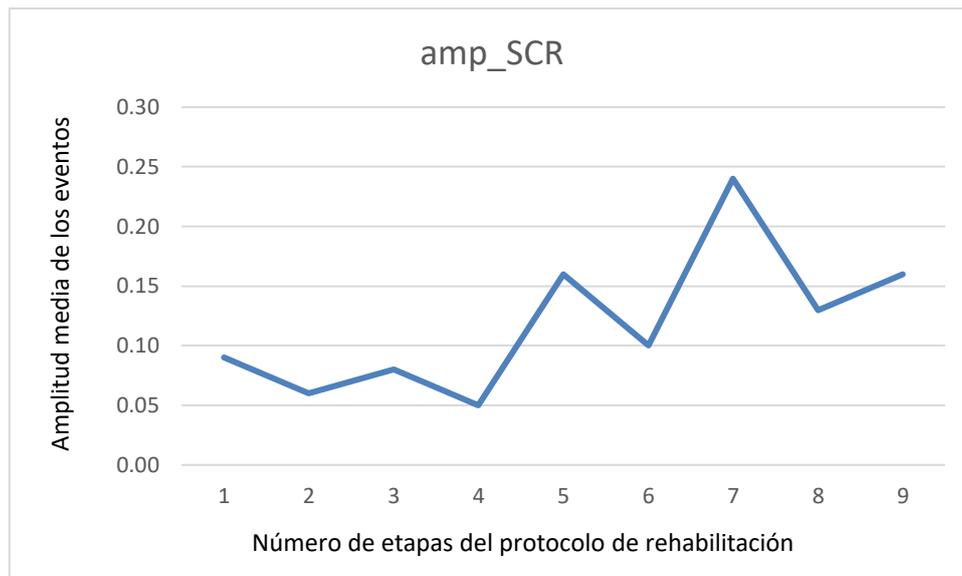


Figura 46. Resultados de las amplitudes de los eventos del SCR

Finalmente, se presentó el índice correspondiente al nivel tónico de la piel (SCL). Este valor, como se explica en la Sección 3.4.1, puede ser confuso. El índice de nivel tónico se ha calculado promediando la señal fisiológica de conductividad cutánea, sin embargo, se debe tener en cuenta que los eventos SCR interfieren en su cálculo.

Se observa que el nivel tónico de la piel aumenta continuamente durante el experimento, siendo más pronunciado el aumento en la etapa 2 y en la etapa 4 (**Figura 47**). Es una respuesta lenta que no disminuye, solo ralentiza su crecimiento. Además, el nivel tónico varía de manera similar independientemente de la amplitud del estímulo, ya que no fue más pronunciada en la etapa 4 que en la etapa 2. Como ya hemos observado en el caso de La amplitud SCR, y como se muestra en la Figura 39, el valor del paso 5 con respecto a 4 no imita la relación entre los pasos 3 y 2, de hecho, no tiene relación. Es posible que el tiempo haya estado involucrado en el estudio al disminuir el valor del índice durante la última etapa debido a la relajación del sujeto durante una duración excesivamente larga.

Por otro lado, si se tienen en cuenta los eventos SCR que ocurren durante los pasos y su amplitud promedio, en las dos últimas etapas el nivel SCL se incrementaría artificialmente debido a un mayor número de eventos y / o de mayor amplitud. Por lo tanto, y para este estudio, el nivel de SCL es un mejor indicador del estrés instantáneo si se incluyen eventos

SCR en su cálculo, porque si se eliminaran, el aumento que ocurriría en el paso 4 no sería acusado.

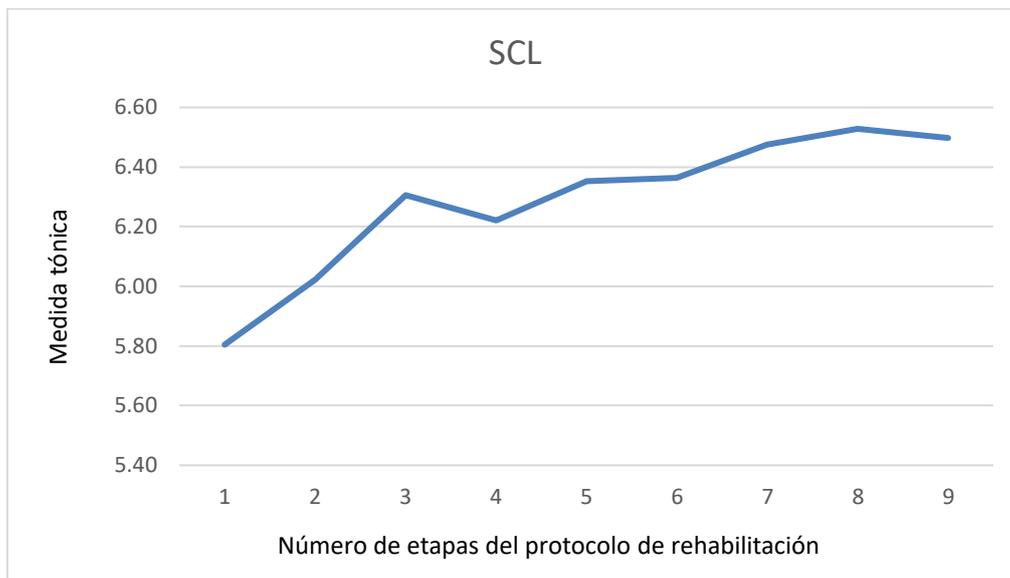


Figura 47. Resultados del SCL

En conclusión, se puede argumentar que los índices de frecuencia de los eventos y su magnitud fueron los factores estresantes más claros y sensibles, creando patrones claros de respuesta al estímulo provocado por las terapias, y con una clara diferenciación entre ellos. Sin embargo, el índice de SCL no fue del todo concluyente. Aunque ha aumentado con las terapias, no es proporcional al estímulo generado, es un índice con menos sensibilidad que las anteriores.

5.5. Señal SKT

Solo se extrajo un índice de la señal de temperatura de la piel que almacenó la temperatura final de cada paso. En la

SKT (°C)	desv ST	5,499	6,081	5,822	5,759	5,671	5,589	5,430	5,358	5,349
	media	31,007	32,033	32,842	32,912	33,467	33,519	33,969	33,969	34,111
	MAX	38,285	39,118	39,947	40,641	40,673	40,258	39,716	39,341	39,825
	MIN	20,203	19,559	19,767	19,545	19,387	19,289	19,234	19,217	19,335

Tabla 6 se visualizan los valores promedio y las desviaciones estándar de este índice en todas las etapas.

SKT (°C)	desv ST	5,499	6,081	5,822	5,759	5,671	5,589	5,430	5,358	5,349
	media	31,007	32,033	32,842	32,912	33,467	33,519	33,969	33,969	34,111
	MAX	38,285	39,118	39,947	40,641	40,673	40,258	39,716	39,341	39,825
	MIN	20,203	19,559	19,767	19,545	19,387	19,289	19,234	19,217	19,335

Tabla 6. Resultados de las mediciones del SKT

La única conclusión clara de este análisis, es que en las etapas siguientes a las cargas cognitivas la temperatura aumentó. Es decir, se produjo un aumento de temperatura constante a medida que se iban realizando terapias y rellenando los test SAM (Figura 48). Tal vez no se trate de una disminución clara en las etapas en las que se desarrollaron terapias, sino en un aumento de la temperatura proporcional al estrés generado durante el tiempo posterior a su desarrollo.

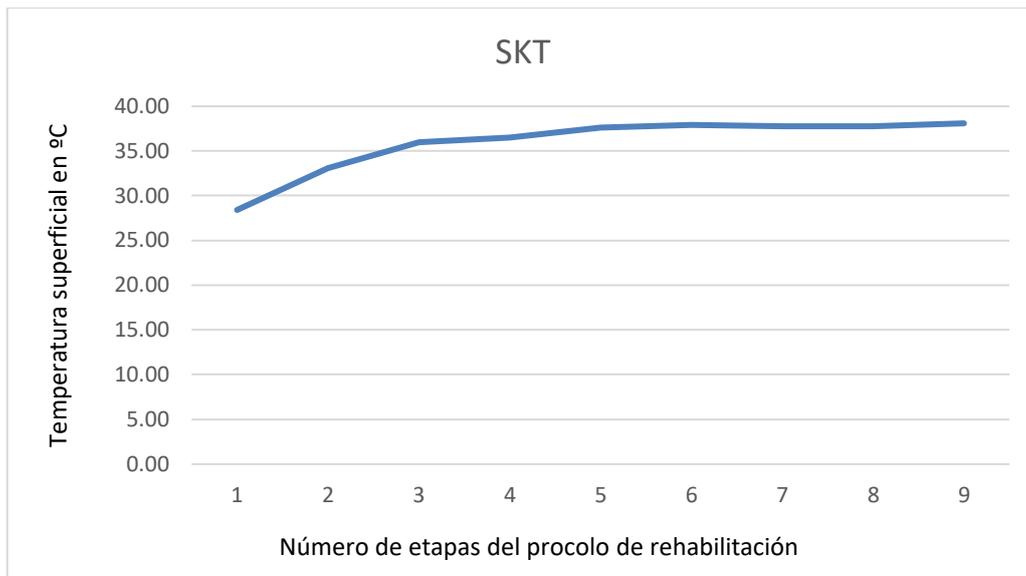


Figura 48. Resultados del SKT por cada terapia

Es importante recalcar que las señales representadas arriba en las figuras 46 a 49 no son representativas de la media de la población, sino de unas mediciones concretas sobre un paciente que presenta las mediciones ideales.

Esto es así porque dentro de la población existen sujetos con unas medidas anormales que falsean el resultado final, obteniendo una gráfica irreal y que puede llevar a confusión. Si bien el número de sujetos que presenta algún tipo de medida anormal es bastante bajo, los datos leídos por los sensores se alejan demasiado de la media como no tener que obviarlos.

En cualquiera de los casos, las conclusiones que se han presentado a partir de lo que se observa en las señales se aplica a toda la población que no ha presentado algún error en la medición, coincidiendo en todos ellos.

6. Conclusiones

En el presente trabajo, se ha descrito el protocolo de actuación para realizar pruebas experimentales con la plataforma robótica PHYSIOBOT y se han presentado los resultados obtenidos del análisis de los datos recopilados. Este estudio experimental tuvo como objetivo caracterizar el estado psicofisiológico de los 52 voluntarios a través de las señales fisiológicas medidas: electrocardiograma, respuesta galvánica de la piel y temperatura dérmica. El estudio mostró que existe un cierto vínculo entre la carga cognitiva que surge de la realización de las tareas de rehabilitación y los parámetros fisiológicos de los voluntarios. Por lo tanto, existe una respuesta psicofisiológica que parece estar determinada, al menos en parte, por los estímulos controlados en el estudio. Estos estímulos consistieron en terapias de rehabilitación de diversos grados de dificultad, que produjeron cierto grado de estrés en los voluntarios.

Sin embargo, no todos los parámetros o índices fisiológicos estudiados revelaron el mismo grado de respuesta al estrés, siendo los signos de sudoración y frecuencia cardíaca, que respondieron de forma más inmediata a las terapias. Entre los índices que se han distinguido por su adaptación a los estímulos generados están: la frecuencia de los eventos SCR (frec_SCR) y el valor promedio de la amplitud de los eventos SCR (amp_SCR). En el caso de eventos SCR de la respuesta galvánica de la piel, su frecuencia y amplitud están relacionadas con la dificultad de la terapia, aumentando la frecuencia y disminuyendo la amplitud frente a tareas más difíciles. Los eventos SCR son más numerosos y más rápidos cuando se recrea una situación de estrés. Son, por lo tanto, la medida más clara del estrés experimentado por los voluntarios. Por otro lado, hay dos parámetros en los que se han apreciado las respuestas esperadas, aunque con desviaciones o con menos sensibilidad que las anteriores, estas son: el nivel tónico de la piel y el valor promedio de su temperatura final. Si se tienen en cuenta todos los índices mencionados anteriormente, el grado de estrés de la persona que interactúa con la plataforma robótica podría conocerse aproximadamente.

Estos resultados nos llevan a pensar que es posible introducir señales fisiológicas, como las estudiadas en este trabajo, en el ciclo de control del robot de rehabilitación durante el desarrollo de terapias. Gracias a esto, el rendimiento del robot se ha adaptado de acuerdo con la condición del paciente, gracias a su paradigma de control. Proporcionar asistencia al paciente a través de su control de fuerza bio-cooperativa o acondicionando la dificultad del software durante las tareas de rehabilitación.

Sin embargo, este es un estudio preliminar que debe ampliarse. Sería interesante continuar buscando en esta línea para determinar la efectividad de los parámetros seleccionados. Además, aunque los datos nos alientan a considerar la posibilidad de realizar el controlador, se debe tener en cuenta que la variabilidad de los parámetros de un individuo a otro es muy amplia y que debemos trabajar para desarrollarla. Modelos que identifican con precisión la carga cognitiva del individuo y no solo abordan su situación. La realización de un paradigma de control basado en las señales psicofisiológicas de una persona implica el estudio detallado de cada variable que se introducirá. Además, si la verificación se realiza inmediatamente con el rendimiento en línea, se requerirá una

retroalimentación de alta velocidad para caracterizar las señales iniciales del paciente durante el inicio de la terapia, así como un algoritmo de aprendizaje para adaptarse al paciente y mejorar su adaptación

El estudio investigó la posibilidad de diseñar plataformas robóticas controladas por señales psicofisiológicas. Sin embargo, todavía hay trabajo en esta dirección para desarrollar dispositivos que se correspondan con las emociones de las personas.

7. Trabajo futuro

La posibilidad de determinar los estados psico-emocionales en una interacción física humano-robot ofrece una interesante gama de oportunidades; por ejemplo, para conocer el estado emocional de un paciente en rehabilitación de manera online e instantánea para obtener bio-feedback y ofrecer una mejor experiencia terapéutica, tal y como se ha descrito en esta memoria.

A partir de los análisis realizados, y teniendo en cuenta que la variabilidad de la frecuencia cardíaca tiene una naturaleza compleja, dado que sus propiedades estadísticas cambian con el tiempo (no son estacionarias), se debe de trabajar en la aplicación de métodos estadísticos no lineales que permitan trabajar con las señales del ECG ya procesadas, a fin de encontrar algún indicador estadístico que sirva como biomarcador y permita programar una realimentación en la plataforma robótica PHYSIOBOT para realizar cambios en la asistencia durante el desarrollo de las terapias en función del estado emocional de los pacientes. Estos métodos estadísticos no lineales podrían ser tanto el CTM (Central Tendency Measure) como el LZC (Lempel-Ziv Complexity). En principio parece que la señal más adecuada sobre que aplicar estos métodos sería el RR, esto es, la señal del ECG ya muestreada y procesada en Matlab.

Además, atendiendo a la naturaleza de la variabilidad de la frecuencia cardíaca, se podría estudiar qué tipo de terapias virtuales resultan más atractivas para los pacientes que sufren de un ACV (accidente cerebro vascular), y que por lo tanto pueden motivarles más a la hora de ejercitarse. No se debe de olvidar que estas personas sufren de una grave invalidez y esta debe atender tanto en los aspectos motores como los relacionados con el habla, los trastornos visuales, las actividades de la vida diaria, etc.

A partir de los resultados obtenidos en los test de SAM aplicados a los sujetos tras cada etapa en las terapias de rehabilitación, se puede buscar validar los resultados obtenidos a partir de las señales fisiológicas buscando coincidencias y patrones repetidos en los resultados. De esta manera se podría hacer ingeniería inversa, es decir, conociendo la forma de la curva de un sujeto se sabría relacionar directamente con un estado emocional concreto dentro de los valores que ofrece el test de SAM.

Bibliografía

- [1] KOENIG, Alexander, et al. Real-time closed-loop control of cognitive load in neurological patients during robot-assisted gait training. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 2011, vol. 19, no 4, p. 453-464.
- [2] FRAILE, Juan-Carlos, et al. Control of the PHYSIOBOT Platform for Upper Limb Rehabilitation in Patients with Neuromotor Impairment. En *Robot 2015: Second Iberian Robotics Conference*. Springer International Publishing, 2016. p. 303-314.
- [3] Biopac System, Inc. *MP System Hardware Guide*. 2007.
- [4] RUSSELL, James A.; MEHRABIAN, Albert. Evidence for a three-factor theory of emotions. *Journal of research in Personality*, 1977, vol. 11, no 3, p. 273-294. (Citado en [6])
- [5] MEHRABIAN, Albert. Pleasure-arousal-dominance: A general framework for describing and measuring individual differences in temperament. *Current Psychology*, 1996, vol. 14, no 4, p. 261-292.
- [6] BRADLEY, Margaret M.; LANG, Peter J. Measuring emotion: the self-assessment manikin and the semantic differential. *Journal of behavior therapy and experimental psychiatry*, 1994, vol. 25, no 1, p. 49-59.
- [7] NOVAK, Domen, et al. Psychophysiological measurements in a biocooperative feedback loop for upper extremity rehabilitation. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 2011, vol. 19, no 4, p. 400-410.
- [8] NOVAK, Domen, et al. Psychophysiological responses to robotic rehabilitation tasks in stroke. *IEEE Transactions on neural systems and rehabilitation engineering*, 2010, vol. 18, no 4, p. 351-361.
- [9] BADESA, Francisco Javier, et al. Dynamic Adaptive System for Robot-Assisted Motion Rehabilitation. 2014.
- [10] BOUCSEIN, Wolfram. *Electrodermal activity*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [11] BRAITHWAITE, Jason J., et al. A guide for analysing electrodermal activity (EDA) & skin conductance responses (SCRs) for psychological experiments. *Psychophysiology*, 2013, vol. 49, p. 1017-1034.
- [12] GUERRERO, Carlos David Rodríguez. *Psychophysiological Feedback Control in Physical Human-robot Interaction*. 2012. Tesis Doctoral. Universidad de Valladolid. Escuela de Ingenierías Industriales.
- [13] BOUDEWYNS, Patrick A. A comparison of the effects of stress vs. relaxation instruction on the finger temperature response. *Behavior Therapy*, 1976, vol. 7, no 1, p. 54-67.
- [14] MITTELMANN, Bela; WOLFF, Harold G. Emotions and Skin temperature: Observations on Patients During Psychotherapeutic (Psychoanalytic) Interviews1. *Psychosomatic Medicine*, 1943, vol. 5, no 3, p. 211. (Citado en [16])
- [15] ELAM, M.; WALLIN, B. G. Skin blood flow responses to mental stress in man depend on body temperature. *Acta physiologica scandinavica*, 1987, vol. 129, no 3, p. 429-431. (Citado en [16])

- [16] KISTLER, Andreas; MARIAUZOULS, Charles; VON BERLEPSCH, Klaus. Fingertip temperature as an indicator for sympathetic responses. *International Journal of Psychophysiology*, 1998, vol. 29, no 1, p. 35-41.
- [17] BAKER, Lawrence M.; TAYLOR, William M. The relationship under stress between changes in skin temperature, electrical skin resistance, and pulse rate. *Journal of experimental psychology*, 1954, vol. 48, no 5, p. 361.
- [18] WENGER, M. A.; GILCHRIST, J. C. A comparison of two indices of palmar sweating. *Journal of experimental psychology*, 1948, vol. 38, no 6, p. 757.
- [19] LIN, Hsiao-Pei, et al. Effects of stress, depression, and their interaction on heart rate, skin conductance, finger temperature, and respiratory rate: sympathetic-parasympathetic hypothesis of stress and depression. *Journal of clinical psychology*, 2011, vol. 67, no 10, p. 1080-1091.
- [20] Takahashi T, Murata T, Hamada T, Omori M, Kosaka H, Kikuchi M, Yoshida H, Wada YL: Changes in EEG and autonomic nervous activity during meditation and their association with personality traits. *Int J Psychophysiol.* 2005, 55 (2): 199-207. (Citado en [21])
- [21] KATSIS, Christos D.; GANIATSAS, George; FOTIADIS, Dimitrios I. An integrated telemedicine platform for the assessment of affective physiological states. *Diagnostic Pathology*, 2006, vol. 1, no 1, p. 1.
- [22] VELTMAN, J. A.; GAILLARD, A. W. K. Physiological workload reactions to increasing levels of task difficulty. *Ergonomics*, 1998, vol. 41, no 5, p. 656-669.
- [23] VILLEGAS, Jaime A. Gallo; FARBIARZ, Jorge Farbiarz; MONTOYA, Diego Luis Álvarez. Análisis espectral de la variabilidad de la frecuencia cardíaca. *Iatreia*, 1999, vol. 12, no 2, p. 94-104.
- [24] VIÑAS, Pablo F, et al. Psychophysiological Measurements in a Robotic Platform for Upper Limbs Rehabilitation: First trials. En *International Conference on Neurorehabilitation 2016, ICNR 2016.* (3º. 18-21 octubre 2016. Segovia, España). Documento aceptado para su publicación.
- [25] MAURI, Maurizio, et al. Psychophysiological signals associated with affective states. En *2010 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology.* IEEE, 2010. p. 3563-3566.

Bibliografía web

- [1w] CASTRO, María Paula, et al. *¿De qué manera afecta el estrés al sistema nervioso?* [En línea]. Neiva (Huila, Colombia), 2015. Publicado: 11 de julio, 2015. [Consulta: junio 2016]. Disponible en: <http://es.slideshare.net/NaniSalgado1/estrs-y-sistema-nervioso>
- [2w] BELLVER, Elena. *Demedicina.com: SISTEMA NERVIOSO SIMPÁTICO Y PARASIMPÁTICO* [web]. 18 septiembre, 2015. [Consulta: junio 2016]. Disponible en: <http://demedicina.com/sistema-nervioso-simptico-y-parasimptico/>
- [3w] FRANCO, Guillermo. El Electrocardiograma. Componentes. Valores normales y Semiología de sus perturbaciones. *ELECTROCARDIOGRAFIA ELEMENTAL* [en línea]. Cuba: 1987. [consulta: junio 2016]. Disponible en: http://www.sld.cu/galerias/pdf/sitios/pdvedado/franco_03.pdf

- [4w] FRANCO, Guillermo. Las derivaciones del electrocardiograma. *ELECTROCARDIOGRAFIA ELEMENTAL* [en línea]. Cuba: 1987. [consulta: junio 2016]. Disponible en: http://www.sld.cu/galerias/pdf/sitios/pdvedado/franco_02.pdf
- [5w] SERRA Simal, Rafael. *Webfisis.es: CORAZÓN. ELECTROCARDIOGRAMA* [web]. 29 septiembre, 2011. [Consulta: junio 2016] (ISBN: 84-688-1218-8). Disponible en: <http://www.webfisis.es/fisiologia/cardiovascular/textos/electroc.htm#>
- [6w] ESTÉBANEZ, Lorena. *Cuidandote.net: Electrocardiograma convencional* [blog]. 24 abril, 2012. [Consulta: junio 2016]. Disponible en: http://www.cuidandote.net/articulos/ECG/ecg_a.jpg

A. Documentos elaborados para el estudio

0. Información sobre los tiempos de ejecución

[TECHNOLOGY
CENTRE]CARTIF



Tiempos de las terapias de E2Robot:

AVD:

Colocar Libros:

Modo (Espacio de trabajo)	Tiempo (minutos)
Normal	1:22
Reducido	1:12
Muy Reducido	1:08

Marcar Número:

Modo (Espacio de trabajo)	Tiempo (minutos)
Normal	00:34

Terapia Reloj:

Reloj:

Modo (Espacio de trabajo)	Tiempo (minutos)
Normal	00:50
Reducido	00:40
Muy Reducido	00:32

1. Documento informativo para participantes

	DOCUMENTO INFORMATIVO PARA PARTICIPANTES “E2ROBOT”	C.P.
		06.I.41

TÍTULO DEL ESTUDIO:

Estudio del impacto psicológico de las terapias “activas asistidas” aplicadas con el E2Rebot

1. INTRODUCCIÓN Y FINALIDAD DEL ESTUDIO.

El documento actual se ha diseñado para informarle del motivo y las características del estudio de investigación en el que deseamos que participe

Usted es totalmente libre de decidir si le interesa participar o no en este estudio. Si decide participar en el mismo, debe recibir información personalizada del investigador, leer antes este documento y hacer todas las preguntas que sean necesarias para comprender los detalles sobre el mismo. Usted puede decidir no participar o, en caso de aceptar, cambiar de parecer retirando el consentimiento en cualquier momento sin obligación de dar explicaciones.

Lea toda la información que se le ofrece en este documento y haga todas las preguntas que necesite, antes de tomar una decisión.

2. PROPOSITO DEL ESTUDIO

Con este estudio se pretende evaluar el impacto psicológico de las terapias “**activas asistidas**” con el robot E2Rebot, que es un robot diseñado para ofrecer terapias de neuro-rehabilitación realizado con este robot.

Se trata de una máquina específicamente diseñada por el personal del Centro Tecnológico CARTIF para la rehabilitación de los brazos tras un daño cerebral. Es un robot cartesiano-planar que plantea unos juegos (Terapias) de realidad virtual. Estos ejercicios están pensados para aumentar la coordinación de las personas que han sufrido un ictus.

Con los resultados de esta investigación se evaluará el impacto psicológico en “sujetos normales” que sirvan de referencia en comparación de estas terapias en pacientes que han sufrido un ACV.

3. PARTICIPANTES EN EL ESTUDIO

En el estudio participarán voluntarios que reúnan las siguientes características:

Sujetos sanos con los que se pueda determinar parámetros de referencia.

4. CRITERIOS DE EXCLUSIÓN

- Fumadores habituales o que hubieran consumido tabaco en las 8 horas antes de la prueba.
- Haber consumido bebidas alcohólicas en las 8 horas antes de la prueba.
- Haber consumido bebidas con cafeína o excitantes en las 4 horas antes de la prueba. (Si se puede haber bebido te, descafeinado, cola cao, zumos, agua ...)



DOCUMENTO INFORMATIVO PARA PARTICIPANTES “E2ROBOT”

C.P.

06.I.41

- Estar tomando medicaciones.
- Estar enfermo con un proceso agudo (por ejemplo gripe, resfriado, etc)
- Padecer una enfermedad crónica diagnosticada, neurológica, endocrinológica o metabólica (por ejemplo, síndrome metabólico, diabetes, hiper o hipo tiroidismo)

5. DESARROLLO DE LA PRUBA

Con el objetivo de analizar el impacto psicológico de las terapias aplicadas con el robot, se le solicitará que complete unos test muy simples, ejecute unos ejercicios con el robot, y se registrara unas señales fisiológicas mediante sensores no invasivos:

Ritmo cardíaco.

Temperatura corporal.

Sudoración de la piel.

Oxígeno en Sangre.

Durante la realización de la prueba usted puede decidir dejar de participar en el estudio y por su parte el técnico pueden decidir finalizar el estudio por aparición de nueva información relevante, por motivos de seguridad, o por alguna falla o situación en la que valore que no es recomendable por la seguridad de sujeto o en la consecución de los objetivos de prueba.

6. ¿QUÉ RIESGOS O INCONVENIENTES TIENE?

Creemos poco probable la aparición de efectos secundarios tras el uso del robot y los sensores, ya que estos ejercicios son muy poco agresivos. Además el robot está diseñado para adaptarse a la capacidad de cada voluntario, por un mecanismo de autoajuste y los sensores cumplen con las certificaciones necesarias para utilizarse en este estudio. En cualquier caso, podrían presentarse situaciones o consecuencias durante el desarrollo de los tratamientos y que debe conocer:

- Fatiga o cansancio muscular en el brazo a rehabilitar.
- Dolor muscular, más frecuente en las primeras sesiones. (Agujetas).
- Al retirar los sensores para el registro del ECG se puede sentir un pequeño malestar.

8. CONFIDENCIALIDAD.

La información obtenida se almacenará en una base de datos, en soporte informático. Según lo indicado en la legislación vigente sobre protección de datos de carácter personal (Ley Orgánica 15/1999), de 13 de diciembre). Los datos registrados serán tratados estadísticamente de forma codificada. En todo



DOCUMENTO INFORMATIVO PARA PARTICIPANTES “E2ROBOT”

C.P.

06.I.41

momento el donante tendrá derecho de acceso, rectificación o cancelación de los datos depositados en la base de datos siempre que expresamente lo solicite. Los datos quedarán custodiados bajo la responsabilidad del Jefe de Proyecto Pablo Francisco Viñas. Los datos serán guardados de forma indefinida, al menos hasta la consecución de los fines científicos del proyecto.

La información estará codificada de forma que la identidad del participante nunca estará disponible para los investigadores.

9. PREGUNTAS Y CONSULTAS.

Para cualquier duda o aclaración referente al estudio, diríjase al equipo responsable del mismo:

- Juan Carlos Fraile Director de la División de Ingeniería Biomédica de la Fundación CARTIF. Email: carfra@cartif.es
- Javier Pérez Turiel Director de la División de Ingeniería Biomédica de la Fundación CARTIF. Email: javper@cartif.es
- Pablo Francisco Viñas Responsable del Proyecto E2REBOT en la Div. Ingeniería Biomédica de la Fundación CARTIF. Email: pabvin@cartif.es

Documento de consentimiento

	TERAPIAS PHYSIOBOT PROYECTO "E2ROBOT"	C.P.
		06.I.41

Estudio del impacto psicológico de las terapias "activas asistidas" aplicadas con el E2Rebot

D./Dña....., de años de edad y con DNI N°....., manifiesta que ha sido informado/a sobre la experiencia basada en las terapias del prototipo Robot Physiobot, que se utilizaran en el proyecto "Estudio del impacto psicológico de las terapias "activas asistidas" aplicadas con el E2Rebot" que lleva a cabo Centro Tecnológico CARTIF, con el fin de generar evidencia científica del impacto psicológico de la utilización de tecnología robótica de rehabilitación aplicada a personas sanas.

Así mismo, manifiesta que ha sido informado/a del objetivo del estudio, duración, procedimientos y desarrollo, posibles riesgos, inconvenientes, perjuicios y ventajas que la terapia puede tener sobre su bienestar y salud. Declara que todas sus dudas han sido resueltas mediante la lectura de los documentos pertinentes y la formulación de preguntas a los técnicos.

Ha sido informado/a que sus datos personales serán protegidos e incluidos en un fichero que deberá estar sometido a las garantías de la Ley Orgánica 15/1999 de 13 de diciembre, de Protección de Datos de Carácter Personal.

Tomando ello en consideración, OTORGA su CONSENTIMIENTO a que se inicie y desarrolle la experiencia y a que ésta última sea utilizada para cubrir los objetivos especificados en el proyecto.

Se reserva así mismo el derecho a revocar este consentimiento en cualquier momento y sin necesidad de ninguna justificación por su parte.

En Valladolid, a de de

Fdo.:
Voluntario

Fdo.:
Técnico Responsable

Rev. 1 (22/08/11) © FUNDACIÓN CARTIF 2011 F-PGG-7.5.1.1/02

2. Plantilla identificativa

Identificador del sujeto asociado al Estudio:			
Edad			
Peso			
Altura			
Sexo	Femenino	Masculino	
Mano hábil	Diestro	Zurdo	Ambidiestro
Ha utilizado este Robot anteriormente?			
He jugado frecuente de juegos por ordenador o consola?			

Nombre Etapa de la Experiencia	Tiempo (minutos)	Nota
Recepción del Sujeto		
Explicaciones, Firma de Consentimiento, Colocación de sensores, Plantilla Identificativa	5	
Registro Basal + Explicación TEST+TEST 1/5	6	
Terapia 1	6	
Descanso + TEST 2/5	3	
Terapia 2	6	
Descanso + TEST 5/5	6	
FIN (TOTAL)	32	

B. Códigos en software Matlab 2013

0. Fragmentación de ficheros

```
function fragmentacion=fragm_ficheros(nom_fich, delay_1, delay_2)

% frag_ficheros divide el fichero introducido en 5 ficheros
%
% NOMBRE DEL FICHERO:   fragm_ficheros.m
% RECIBE: el fichero original y dos variables temporales
% DEVUELVE: Mensaje de 'OK' al finalizar
% VARIABLES: nom_fich = nombre del fichero original: 'P_X'
%              delay_1 = segundos de retraso en la etapa 1
%              delay_2 = segundos de retraso en la etapa 3
%
format longG

frecuency=2000;
nom_fich_bruto=[nom_fich, '.txt'];

%Abrimos el fichero
fich=fopen(nom_fich_bruto);

%Volcamos los datos del fichero en una matriz de datos
[A,cont]=fscanf(fich, '%f\n', [4,inf]);
valores=A';
[num_filas, num_columnas]=size(valores);

%Cerramos el fichero de datos
fclose(fich);

%Calculamos las iteraciones en columnas por etapa
lim_etapa_1=(360+delay_1)*frecuency;
lim_2=360*frecuency;
lim_etapa_2=lim_etapa_1+lim_2;
lim_3=(180+delay_2)*frecuency;
lim_etapa_3=lim_etapa_2+lim_3;
lim_4=360*frecuency;
lim_etapa_4=lim_etapa_3+lim_4;
lim_5=num_filas-lim_etapa_4;

%Sacamos los datos del fichero para cada etapa
for i=1:num_columnas
    %Etapa 1
    k=1;
    for j=1:lim_etapa_1
        valores_E_1(k,i)= valores(j,i);
        k=k+1;
    end
    %Etapa 2
    k=1;
    for j=lim_etapa_1:lim_etapa_2
        valores_E_2(k,i)= valores(j,i);
        k=k+1;
    end
    %Etapa 3
    k=1;
    for j=lim_etapa_2:lim_etapa_3
        valores_E_3(k,i)= valores(j,i);
        k=k+1;
    end
    %Etapa 4
    k=1;
    for j=lim_etapa_3:lim_etapa_4
```

```

        valores_E_4(k,i) = valores(j,i);
        k=k+1;
    end
    %Etapa 5
    k=1;
    for j=lim_etapa_4:num_filas
        valores_E_5(k,i) = valores(j,i);
        k=k+1;
    end
end

%Creamos los nuevos ficheros e incluimos los datos
%Etapa 1
nom_fich_E_1=[nom_fich, '_E_1.txt'];
fich_E_1=fopen(nom_fich_E_1, 'wt');
for j=1:lim_etapa_1
    fprintf(fich_E_1, '%8.7f\t%5.4f\t%6.4f\t%7.5f\n', valores_E_1(j,1), valores_E_1(j,2), valores_E_1(j,3), valores_E_1(j,4));
end
fclose(fich_E_1);

%Etapa 2
nom_fich_E_2=[nom_fich, '_E_2.txt'];
fich_E_2=fopen(nom_fich_E_2, 'wt');
for j=1:lim_2
    fprintf(fich_E_2, '%8.7f\t%5.4f\t%6.4f\t%7.5f\n', valores_E_2(j,1), valores_E_2(j,2), valores_E_2(j,3), valores_E_2(j,4));
end
fclose(fich_E_2);

%Etapa 3
nom_fich_E_3=[nom_fich, '_E_3.txt'];
fich_E_3=fopen(nom_fich_E_3, 'wt');
for j=1:lim_3
    fprintf(fich_E_3, '%8.7f\t%5.4f\t%6.4f\t%7.5f\n', valores_E_3(j,1), valores_E_3(j,2), valores_E_3(j,3), valores_E_3(j,4));
end
fclose(fich_E_3);

%Etapa 4
nom_fich_E_4=[nom_fich, '_E_4.txt'];
fich_E_4=fopen(nom_fich_E_4, 'wt');
for j=1:lim_4
    fprintf(fich_E_4, '%8.7f\t%5.4f\t%6.4f\t%7.5f\n', valores_E_4(j,1), valores_E_4(j,2), valores_E_4(j,3), valores_E_4(j,4));
end
fclose(fich_E_4);

%Etapa 5
nom_fich_E_5=[nom_fich, '_E_5.txt'];
fich_E_5=fopen(nom_fich_E_5, 'wt');
for j=1:lim_5
    fprintf(fich_E_5, '%8.7f\t%5.4f\t%6.4f\t%7.5f\n', valores_E_5(j,1), valores_E_5(j,2), valores_E_5(j,3), valores_E_5(j,4));
end
fclose(fich_E_5);

fragmentacion='OK';

```

1. Pre-procesamiento de las señales

```
function [ecg, skt, gsr]= Signals(nom_fich)

% Signals extrae los datos de un fichero de cuatro columnas en vectores
%
%-----%
% NOMBRE DEL FICHERO:   Signals.m
% RECIBE: el nombre del fichero original
% DEVUELVE: los cuatro vectores
% VARIABLES: nom_fich = nombre del fichero original sin extensión%
%          ecg = vector de datos
%          rr = vector de datos
%          skt = vector de datos
%          gsr = vector de datos
%-----%
format longG

%Recolpilación de datos
nom_fich_bruto=[nom_fich, '.txt'];
fich=fopen(nom_fich_bruto);
[A,cont]=fscanf(fich, '%f\n', [4,inf]);
fclose(fich);

%Separamos las tres señales
Signals=A';
[filas_Signals, columnas_Signals]=size(Signals);
ecg=Signals (: , 1);
skt=Signals (: , 3);

%Submuestreamos a 500Hz
n=1;
for i=1:4:filas_Signals
    gsr(n)=Signals (i , 4);
    n=n+1;
end
end
```

2. Pre-procesamiento de la señal GSR

```
function [yngsr, ygsr]=filt_deriv(gsr)

% filt_der filtra y deriva la señal gsr
%
%-----%
% NOMBRE DEL FICHERO:   filt_deriv.m
% RECIBE: un vector con los datos de la señal gsr
% DEVUELVE: la señal filtrada y su derivada
% VARIABLES: gsr = vector de datos de la señal en bruto
%          yngsr = vector de datos de la señal filtrada
%          ygsr = vector de datos de la derivada de yngsr
%-----%
format longG

%Inicialización de variables
muestra_actual=1;
num_muestras=length(gsr);
Fs=500; %Frecuencia de 500Hz
Ts=1/Fs;
m=1101; %Periodo del filtro
yngsr=zeros (1 , num_muestras) ; %Señal filtrada
ygsr=zeros (1 , num_muestras) ; %Derivada

while (muestra_actual<num_muestras)
```

```

% Filtramos
n= muestra_actual - (m-1)/2;
%n=muestra_actual+1;
if n>=((m-1)/2)+1 %%ya se puede filtrar ?
    sum=0;
    %Eliminamos el ruido de alta frecuencia de la señal GSR
    for k= muestra_actual- (m-1) : muestra_actual
        sum= sum+ (gsr(k)/m) ;
    end
    yngsr(n)=sum;
    %Operación de diferencia hacia atrás
    ygsr(n)=(sum - yngsr(n-1))/Ts;

else %%si no se pudo deje la senal original
    yngsr(muestra_actual)=gsr(muestra_actual) ;
end
muestra_actual=muestra_actual+1;
end
end

```

3. Procesamiento de la señal GSR

```

function [SCR, frec_SCR, amp_SCR, SCL]=GSR(gsr, yngsr, ygsr)

% GSR extrae las características de la señal gsr
%
%-----%
% NOMBRE DEL FICHERO:   GSR.m
% RECIBE: los datos en bruto, filtrados y derivados de la señal
% DEVUELVE: las caracterísitcas de la señal
% VARIABLES: gsr = vector de datos de la señal en bruto
%             yngsr = vector de datos de la señal filtrada
%             ygsr = vector de datos de la derivada de yngsr
%             SCR = número entero de eventos registrados
%             frec_SCR = núm. decimal de eventos en un minuto
%             amp_SCR = promedio de la amplitud de los eventos
%             SCL = promedio de la señal gsr
%-----%
format longG

%Inicialización de variables
numscr=0;
num_amp=1;

for i=1:(num_muestras-1)
    if(ygsr(i)==0) %pico encontrado
        %Comprobar si desde i hasta (i-10000) la pendiente es positiva
        [pico_ok, start_SCR]=comprobar_pico(i,ygsr,yngsr);

        if(pico_ok)
            if(numscr>=1)
                %Comprobamos que el pico se puede contabilizar
                diferencia=i-eventgsr2(numscr);
                der_neg=false;
                num=eventgsr2(numscr);
                %Si hay derivada negativa son dos picos
                while (~der_neg && num<i)
                    if (ygsr(num)<(-0.005)) %Dejamos margen por las aprox.
                        der_neg=true;
                    end
                    num=num+1;
                end
                if(diferencia>=2500 || der_neg) %Hay un nuevo pico
                    numscr=numscr+1;
                    eventgsr1(numscr)=start_SCR ;
                    eventgsr2(numscr)=i;
                else

```

```

        %Almacenamos el nuevo pico como parte del anterior
        eventgsr2(numscr)=i;
    end

    else %La primera iteracion siempre la contabilizamos
        numscr=numscr+1;
        eventgsr1(numscr)=start_SCR ;
        eventgsr2(numscr)=i;
    end
    vector_ampSCR(num_amp)=(yngsr(eventgsr2(numscr))-
yngsr(eventgsr1(numscr)));
    num_amp=num_amp+1;
end
end
end

% SCR -> eventos
SCR=numscr
minutos=num_muestras/(60*500);
frec_SCR=numscr/minutos
% amp_SCR
amp_SCR=mean(vector_ampSCR)
% SCL -> media de GSR en el tiempo
SCL=mean(gsr)

end

function [resultado,primer_punto]=comprobar_pico(iteracion,derivada,yngsr)

% comprobar_pico es una función booleana que valida el pico
% _____ %
% NOMBRE DEL FICHERO: comprobar_pico.m %
% RECIBE: los datos en bruto, filtrados y derivados de la señal %
% DEVUELVE: true/false %
% VARIABLES: iteración = num. de muestra del pico %
% yngsr = vector de datos de la señal filtrada %
% derivada = vector de datos de la derivada de yngsr %
% resultado = valor booleano %
% primer_punto = num. de muestra de comienzo del pico %
% _____ %

%Comenzamos suponiendo que es un pico fail
resultado=false;
start_SCR=0;
%Seleccionamos el rango de trabajo [primer_punto, iteracion] de 5 seg
primer_punto=iteracion-2500;

%El rango no es suficientemente grande -> Pico fail
if(primer_punto<=0)
    resultado=false;
else
    %Comprobar que en algún punto del rango haya -0.05uS
    for i=primer_punto:iteracion
        if (yngsr(i)<=(yngsr(iteracion)-0.05))
            start_SCR=i;
        end
    end
end
end

while(resultado && n<iteracion)
    %En el rango hay otro punto MIN, MAX
    if(derivada(n)==0)
        if(n>=start_SCR)
            resultado=false;
        else

```

```

        primer_punto=n;
    end
else
    resultado=true;
end
n=n+1;
end
end
end

```

4. Procesamiento de la señal SKT

```

function TEMP=SKT(skt)

% SKT extrae el valor medio de la señal sus últimos 5 segundos
%
%-----%
% NOMBRE DEL FICHERO:   SKT.m
% RECIBE: un vector con los datos de la señal skt
% DEVUELVE: el valor medio de los últimos 5 seg
% VARIABLES: skt = vector de datos de la señal en bruto
%            TEMP = valor decimal con el valor medio final
%-----%

%Inicialización de variables
num_muestras=length(skt);
primer_punto=num_muestras-(5*2000); %2000Hz y 5 seg
datos=skt(primer_punto:num_muestras);

TEMP=mean(datos)

end

```

5. Programa principal y creación de ficheros

```

function trat_GRSKT(nom_fich)

% trat_GRSKT almacena los índices de las dos señales en un fichero
%
%-----%
% NOMBRE DEL FICHERO:   trat_GRSKT.m
% RECIBE: el fichero de datos de una etapa
% DEVUELVE:
% VARIABLES: nom_fich = nombre del fichero original sin extensión%
%-----%

%Pre-procesamiento
.....

[yngrsr, ygrsr]=filt_derv(gsr);
%Extracción de índices de la señal GSR
[SCR, frec_SCR, amp_SCR, SCL]=GSR(gsr, yngrsr, ygrsr);
%Extracción del índice de la señal SKT
TEMP=SKT(skt);

%Fichero de índices
filename = ['GSR_SKT_', nom_fich, '.txt'];
fid = fopen(filename, 'wt');
fprintf(fid, 'SCR \t %f', SCR);
fprintf(fid, '\nfrec_SCR \t %f', frec_SCR);
fprintf(fid, '\namp_SCR \t %f', amp_SCR);
fprintf(fid, '\nSCL \t %f', SCL);
fprintf(fid, '\nSKT \t %f', TEMP);
fclose(fid);

```

end

6. Cambio de la asistencia del robot

Como se ha explicado en el apartado anterior, la asistencia va a cambiar en función del nivel de dificultad en que se encuentre el paciente. De esta manera, en el nivel fácil la asistencia será más prolongada y con mayor frecuencia, disminuyendo a medida que se avanza y se pasa por los niveles medio o difícil.

Ya que la asistencia está programada en función de unos tiempos, cambiando dichos tiempos podremos modificar fácilmente la dificultad de los niveles.

```
if (nivel == 2)
{
  Inicializar_Posiciones_Libros_N2_N3();
  tiempo_asistir = 10000; //Diferentes tiempos para cambiar la asistencia
  IntervaloCambiarAsistencia = 1000;
}
else if (nivel == 3)
{
  Inicializar_Posiciones_Libros_N2_N3();
  tiempo_asistir = 20000;

  IntervaloCambiarAsistencia = 5000;
}
else if (nivel == 1)
{
  tiempo_asistir = 1000;

  IntervaloCambiarAsistencia = 500;
}
```