

Trabajo de Fin de Grado
Grado en Ingeniería de las Tecnologías de
Telecomunicación

Integración y validación de un sistema biométrico
para la detección de piloerección

Autora: María Castrillo Navarro

Tutores: María del Mar Elena Pérez

Alejandro Barriga Rivera

Dpto. Ingeniería Electrónica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2020



Trabajo de Fin de Grado
Grado en Ingeniería de las Tecnologías de Telecomunicación

Integración y validación de un sistema biométrico para la detección de piloerección

Autora:

María Castrillo Navarro

Tutores:

María del Mar Elena Pérez

Profesora Contratada Doctora

y

Alejandro Barriga Rivera

Investigador Senior (UPO)

Dpto. Ingeniería Electrónica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2020

Trabajo Fin de Grado: Integración y validación de un sistema biométrico para la detección de piloerección

Autora: María Castrillo Navarro

Tutores: María del Mar Elena Pérez
Alejandro Barriga Rivera

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2020

El Secretario del Tribunal

A mi familia

A mis amigos

A mis maestros

Agradecimientos

He preferido dejar este apartado para el final y ser lo último que escribiese de mi Trabajo de Fin de Grado.

En primer lugar, agradecer a todos los que han colaborado en este proyecto de una forma u otra, ya que no hubiera sido posible sin cada uno de ellos. A todos aquellos que me han acompañado en esta travesía, ya no solo con el TFG, sino desde que di mi primer paso en la Universidad.

La ETSI, mi segundo hogar. Ya sea dentro o fuera de mi querido edificio rojo, me llevo muchísimos recuerdos y anécdotas que nos unen. Como dijo un sabio: *«Cualquier cosa que hagas en esta vida, no es legendaria a menos que tus amigos estén allí para verlo»*. Cuánta razón, ¿no?

Por otro lado, no me puedo olvidar de mis padres ni de mis amigos de siempre, que han estado ahí en los mejores y peores momentos, siguiendo cada uno de mis pasos de cerca apoyándome. Y hacer mención especial a mis magistrales amigas, cuyos bucles y rifirrafes me dan la vida.

Por supuesto dar las gracias a Mar, mi tutora en esta locura de trabajo, por permitirme descubrir más de cerca el campo de la Biomedicina, por brindarme oportunidades y superar barreras personales. Por creer en mí. Y hacer una mención especial a Alejandro, por compartir sus conocimientos en este proyecto.

María Castrillo Navarro

Estudiante de Grado en Ingeniería de las Tecnologías de Telecomunicación

Sevilla, 2020

Resumen

Las emociones son estudiadas desde diferentes campos de la ciencia, como en neurociencia, psicología o fisiología y, a pesar de ello, sigue siendo en parte desconocido el cómo influyen en nuestro comportamiento o conducta.

Este proyecto gira en torno a la piloerección (o “piel de gallina”) inducida por estímulos musicales. El objetivo es desarrollar un sistema de monitorización sincronizada de la piloerección y de las constantes cardiorespiratorias para el estudio de las emociones. Asimismo, el trabajo se ha centrado en el estudio de la relación entre la piloerección y la modificación de los parámetros biológicos medidos (la frecuencia cardíaca con el Pulse Sensor® y la conductividad de la piel mediante el GSR Sensor®). Para ello, se han realizado varios experimentos donde se busca provocar en el sujeto escalofríos y/o la mencionada piloerección al oír varias piezas musicales y visionar fragmentos de películas con su correspondiente banda sonora.

Los resultados aportados en estas primeras pruebas muestran una variación en los parámetros obtenidos, que permiten establecer relaciones de correlación entre los estímulos y sus efectos biológicos.

Palabras clave: piloerección, escalofrío, sistema nervioso, sistema respiratorio, actividad electrodérmica, frecuencia cardíaca, conductancia de la piel, sensibilidad, música, emoción, neurociencia, estímulo.

Abstract

Emotions are studied from different fields of science, such as in neuroscience, psychology or physiology and, in spite of that, the way they influence our behavior or conduct remains unknown.

This project focuses on piloerection (or "goosebumps") induced by musical stimulation. The aim is to develop a synchronized monitoring system for piloerection and cardiorespiratory constants for the study of emotions. Likewise, the work has focused on the study of the correlation between piloerection and the modification of the biological parameters measured (the heart rate with the Pulse Sensor and the skin conductance through the GSR Sensor). For this, several experiments have been carried out where it is sought to cause chills and/or the mentioned piloerection in the person when hearing several musical pieces and watching fragments of films with their corresponding soundtrack.

The results provided in these first tests show a variation in the parameters obtained, which allow establishing correlation relations between the stimuli and their biological effects.

Índice

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Abstract	xiii
Índice	xv
Índice de Tablas	xvii
Índice de Figuras	xix
1 Estado del Arte	1
2 Introducción	5
2.1 <i>Objetivos del proyecto</i>	5
3 Marco Teórico	7
3.1 <i>Sistema Límbico</i>	7
3.1.1 Amígdala	8
3.1.2 Hipotálamo	8
3.2 <i>Sistema Nervioso</i>	10
3.2.1 Sistema nervioso central y periférico	10
3.2.2 Sistema nervioso autónomo y somático	10
3.3 <i>Piloerección</i>	12
3.3.1 Músculos erectores	12
3.3.2 Glándulas sudoríparas	12
3.3.3 Vasos sanguíneos	13
3.4 <i>Bioseñales</i>	14
3.4.1 Respuesta galvánica de la piel	14
3.4.2 Frecuencia cardíaca	14
4 Metodología	17
4.1 <i>Participantes</i>	17
4.2 <i>Estímulos</i>	17
4.3 <i>Prueba experimental</i>	18
4.4 <i>Adquisición de datos fisiológicos</i>	18
4.4.1 Desarrollo de los algoritmos implementados	19
4.4.2 Software de Arduino	21
4.4.3 Pulse Sensor	23
4.4.4 GSR Sensor	25
4.4.5 Complemento software PLX-DAQ	26
4.5 <i>Análisis de datos fisiológicos</i>	27
5 Resultados y Discusión	29
5.1 <i>Localización de respuestas fisiológicas</i>	29
5.1.1 Resultados objetivos	29
5.1.2 Resultados subjetivos	30
5.2 <i>Parámetros de las respuestas fisiológicas objetivas</i>	30

5.2.1	Parámetros de la conductancia de la piel	30
5.2.2	Parámetros de la frecuencia cardíaca	31
5.2.3	Relación entre la frecuencia cardíaca y conductancia de la piel	32
5.2.4	Relación entre la frecuencia cardíaca y la música	36
5.3	<i>Discusión</i>	36
6	Conclusiones y Futuras Líneas de Investigación	39
Apéndices		41
	<i>Cronograma</i>	41
	<i>Cuestionario</i>	42
	<i>Póster</i>	43
	<i>Lista de estímulos</i>	44
	Lista A: Fragmentos de películas	44
	Lista B: Canciones personalizadas	45
	<i>Manuales de Dispositivos</i>	46
	Arduino Uno R3	46
	Pulse Sensor	47
	GSR Sensor	49
	<i>Códigos de Arduino</i>	50
	SENSOR_main.ino	50
	GSR_sensor.ino	52
	PulseSensor_BPM.ino	52
	<i>Gráficas del Pulse Sensor y GSR Sensor</i>	53
	Sujeto 1	53
	Sujeto 2	56
	Sujeto 3	58
	Sujeto 4	61
	Sujeto 5	64
	Comparativa de todos los estímulos de cada sujeto	67
	Comparativa de todos los sujetos ante un estímulo común	72
	Referencias	75
	Glosario	79

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 5–1. Tabla resumen con el número de respuestas fisiológicas.	29
Tabla 5–2. Probabilidad de darse la piloerección en caso de tener alguna respuesta fisiológica en los ensayos realizados.	30
Tabla 5–3. Tabla resumen de las medias y desviaciones típicas de las muestras recogidas por Pulse Sensor y GSR Sensor por cada estímulo de cada sujeto. Se resalta en negrita los estímulos escogidos previamente por los experimentadores y cada estímulo está representado con un mismo color para todos los sujetos.	32

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1–1. Circuito de Papez (1937) [10].	2
Figura 3–1. Corte axial del cerebro donde se aprecia la materia blanca y la materia gris [17].	7
Figura 3–2. Estructura del sistema límbico [18].	8
Figura 3–3. Funcionamiento de la homeostasis para caso de regulación térmica corporal [21].	9
Figura 3–4. Corte axial del encéfalo [24].	9
Figura 3–5. Diferentes tipos de neuronas y sus partes [25].	10
Figura 3–6. Sistema nervioso humano [29].	11
Figura 3–7. Estructura básica de la piloerección [30].	12
Figura 3–8. Glándulas sudoríparas ecrinas y apocrinas [32].	13
Figura 3–9. Glándulas sudoríparas en las yemas de los dedos.	13
Figura 3–10. Estructura de las diferentes capas de la piel [34].	14
Figura 3–11. Actividades del sistema nervioso autónomo [36].	15
Figura 3–12. Intercambio de gases en los alvéolos [37].	15
Figura 4–1. Circuito empleado en el experimento con todos sus componentes. De izquierda a derecha: Pulse Sensor, Arduino Uno, placa de pruebas (<i>protoboard</i>) y GSR Sensor.	19
Figura 4–2. Conexiones a la placa Arduino.	19
Figura 4–3. Esquema de todos los sistemas implementados para la reproducción de la Lista B.	20
Figura 4–4. Pantalla del monitor durante la reproducción de un estímulo de la Lista B. Plugin de Excel (izquierda), Lista B (esquina superior derecha) y pista actual en reproducción (esquina inferior derecha). 20	20
Figura 4–5. Esquema de todos los sistemas implementados para la reproducción de la Lista A.	21
Figura 4–6. Interfaz de Arduino.	21
Figura 4–7. Selección del puerto serie de Arduino Uno.	22
Figura 4–8. Fases de compilación y ejecución.	22
Figura 4–9. Instalación de la librería PulseSensor Playground (1ª parte).	23
Figura 4–10. Instalación de la librería PulseSensor Playground (2ª parte).	23
Figura 4–11. Ejemplos de la librería PulseSensor Playground.	23
Figura 4–12. Modo de empleo del Pulse Sensor.	24
Figura 4–13. Bioseñales capturadas por el sketch “PulseSensor_BPM.ino”: intervalo de tiempo entre latidos en milisegundos (rojo), el pulso cardíaco (verde) y los pulsos por minuto (azul).	24
Figura 4–14. Modo de empleo del GSR Sensor.	25
Figura 4–15. Esquema básico del funcionamiento del GSR Sensor [39].	25
Figura 4–16. Ejemplo de gráfica de Arduino con los valores dados por GSR Sensor en un corto período de tiempo.	26
Figura 4–17. Interfaz de PLX-DAQ de Excel.	26
Figura 4–18. Ejemplo de adquisición de datos y posible visualización de gráficas.	27

Figura 5–1. Episodio completo de escalofrío representado en naranja.	31
Figura 5–2. Dos episodios consecutivos de piloerección representado en verde.	31
Figura 5–3. Aumento en las pulsaciones por la excitación propia del estímulo (en rosa).	31
Figura 5–4. Aumento en las pulsaciones debido a respiraciones profundas (en amarillo).	31
Figura 5–5. Demostración de la relación entre la SC y la FC (1). En la gráfica de los Bpm, hay dos picos representados en gris oscuro no reconocidos por ninguna de las respuestas fisiológicas estudiadas, por lo que se consideran artefacto.	33
Figura 5–6. Demostración de la relación entre la SC y la FC (2).	33
Figura 5–7. Observación conjunta de los diferentes cambios en la EDA y FC de todos los sujetos ante el estímulo 2. En negrita se muestra la media de ambas señales en cada instante.	34
Figura 5–8. Observación conjunta de los diferentes cambios en la EDA y FC de todos los sujetos ante el estímulo 4. En negrita se muestra la media de ambas señales en cada instante.	35
Figura 5–9. Gráfica comparativa de la EDA, FC y la propia canción.	36

1 ESTADO DEL ARTE

En Neurociencia no se empieza a tener constancia de la relación directa entre todo lo referente a las emociones con las diferentes zonas del cerebro hasta mediados del siglo XIX. El primer estudio data de los años 1848-1868, realizado por el doctor John Martyn Harlow, quien estuvo estudiando el conocido caso de Phineas Gage, un trabajador que tuvo un grave accidente laboral y sufrió grandes daños en el lóbulo frontal. A pesar de todo esto, consiguió sobrevivir, pero padeció cambios en su personalidad, lo que establecía una conexión inmediata entre los lóbulos frontales y el comportamiento emocional [1] [2].

En 1872, Charles Darwin publica su tercera obra de la teoría evolutiva, *“La expresión de las emociones en el hombre y los animales”*. En ella, se demuestra la afinidad existente entre las emociones y el movimiento corporal [3] y relata que *«casi ningún movimiento expresivo es tan general como la erección involuntaria de los pelos, las plumas y otros apéndices dérmicos (...) es común en tres de las grandes clases de vertebrados»*. Siguiendo por esta línea, se plantea la teoría de James-Lange (1884). Desarrolla la idea de que los estímulos sensoriales provocados por las emociones son interpretados por la corteza cerebral, afectando a los sistema nervioso autónomo (SNA) y sistema nervioso somático (SNS). Se basaba en que la percepción de una sensación física conllevaba una emoción, lo que a su vez provocaba una reacción fisiológica [4]. Esta teoría inicial fue superada en 1931 por la teoría de Cannon-Bard, donde demuestra que tanto las emociones como los sentimientos ocurren al mismo tiempo, una idea más cercana del pensamiento de hoy en día [5].

En 1937, James Papez crea un esquema representando parte del sistema límbico y el rol de las emociones en él. Como se puede ver en la Figura 1-1, el circuito comienza con la existencia de un estímulo emocional, que llega al tálamo, después hacia la corteza sensorial y finalmente termina en el hipotálamo. En este punto, las sensaciones se convierten en percepciones. Esta teoría fue continuada por MacLean en 1949. MacLean sugería que esos estímulos emocionales podrían generar cambios corporales, los cuales, junto a la percepción, generaban las experiencias emocionales [6]. Más adelante, se publica un artículo en la revista *Science* (Ekman *et al.*, 1983) y se establece la lista “Las Seis Grandes” (The Big Six) con las emociones universales más básicas: sorpresa, asco, tristeza, ira, miedo y alegría/felicidad [7].

A lo largo de la década de los 90, se tiene especial interés en el estudio de la amígdala. Está relacionada con las emociones negativas (miedo, ira, estrés) y es la responsable de la memoria emocional. Esto explicaría la existencia de las fobias [8].

Ya en el siglo XXI, las investigaciones acerca de las emociones o intensidad emocional fueron aumentando, correlacionándolas con la música. En 2004, Nikki Rickard, profesor en la universidad de Monash (Australia) realizó un experimento basándose en las medidas recogidas de la conductancia de la piel y en los escalofríos como parámetros para definir una intensidad emocional [9]. Sus estudios se basan en la idea de que las emociones intensas difieren de las emociones normales debido a que la intensidad viene determinada por el nivel de excitación de la persona y utilizó la música como estímulo para demostrarlo. A partir de este punto, se tiene en cuenta la liberación de hormonas de excitación de las glándulas suprarrenales y la actividad del sistema nervioso simpático (aumento del ritmo cardíaco, presión sanguínea, tasa de respiración y de la tensión muscular, y la disminución de la temperatura de la piel). Por ello, se midieron las pulsaciones de los pacientes y mediante electrodos tomaron las medidas de la tensión muscular (EMG) y de la conductancia (SC) y temperatura de la piel. Comparó música emocionalmente poderosa (música elegida individual y personalmente significativa para cada uno) con música excitante (música preseleccionada buscando una alta activación subjetiva y fisiológica). La primera de ellas causó una respuesta más subjetiva de escalofríos y mayor nivel de SC, mientras que no hubo cambios notorios para la frecuencia cardíaca (FC) o la temperatura de la piel.

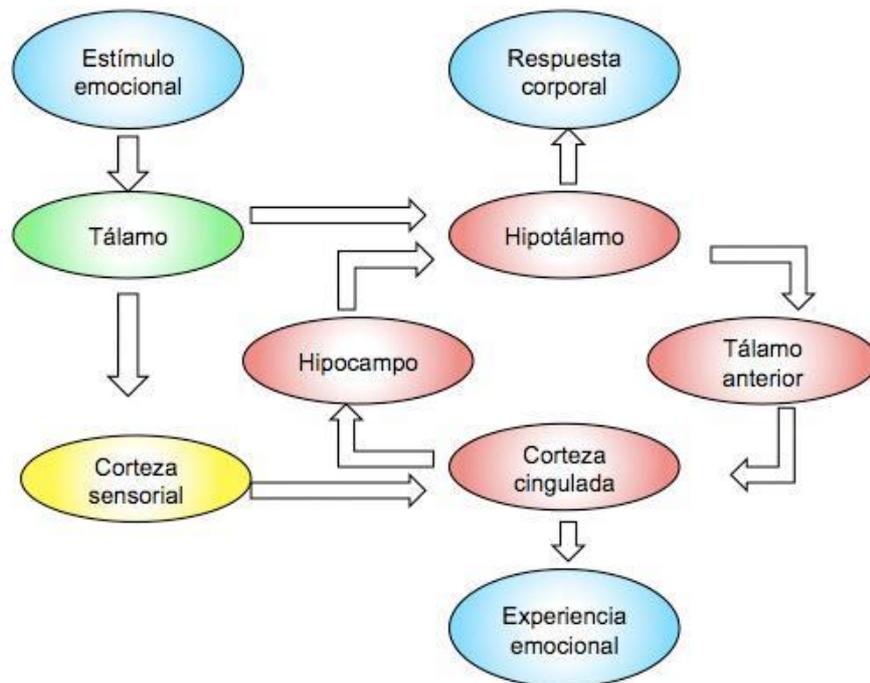


Figura 1–1. Circuito de Papez (1937) [10].

En un experimento similar, Craig (2005) por un lado, y Guhn et al. (2007) por otro, asociaron el aumento de SC con la aparición de escalofríos. Por otro lado, Grewe et al. (2009), además de un aumento en la SC, también adjudicaron a los escalofríos una subida en la FC, pero sin variación en la frecuencia respiratoria (FR).

Tuvo lugar otro estudio mediante tomografía por emisión de positrones (PET), donde la música que provocaba escalofríos para un sujeto A se probó en otro sujeto B. Se reportó mayor FC y FR, pero un valor estable en la SC y temperatura de la piel.

Se realiza otra investigación en 2011 por M. Benedeck y C. Kaernbach [11], donde se busca producir una piloerección mediante pistas de audio y escenas de películas. Al igual que ocurre con los escalofríos, la piloerección es una respuesta psicofisiológica muy buena como medida para emociones fuertes. En esta ocasión se registró un aumento en la actividad electrodérmica (EDA) y una respiración más profunda en el momento de la piloerección.

En 2016, el neurocientífico Matthew Sachs [12] demuestra en un estudio de la Universidad de Harvard que aquellos que sienten esa respuesta fisiológica escuchando determinada música tienen un cerebro “especial” [13] [14]. Realizó escáneres cerebrales a 20 personas, de las cuales 10 al escuchar determinadas pistas de audio experimentaban la sensación de “nudo en la garganta” (“chill¹ group”) y las otras 10 nada (“no-chill group”). Como resultado, se obtuvo que los individuos que registraron de alguna manera una respuesta fisiológica y/o emocional al oír la música tenían estructuras cerebrales ligeramente diferentes en comparación a los que no les había pasado nada. Suelen presentar una cantidad mayor de fibras que establecen una conexión entre la corteza auditiva y las regiones del cerebro donde se procesan las emociones, lo que significa que las dos áreas se comunican mejor y se vinculan con más facilidad. En otras palabras, las personas que presentan piloerección o alguna reacción emocional/física son aquellas que poseen la capacidad de sentir más y de experimentar emociones más fuertes que los demás, siendo esto más frecuente de ocurrir en mujeres que en hombres. Al mismo tiempo, las escenas de películas evocaban una respuesta fisiológica más fácilmente que las pistas de audio, al depender no solo del oído, sino también de la vista, por lo que la percepción es mayor. Las medidas que tuvo en cuenta fueron la FC y SC como medidas fisiológicas y tomó anotaciones sobre el comportamiento tenido de cada persona durante la prueba.

Otro experimento psicofisiológico en 2017 [15] hizo la prueba de dividir en los grupos de los que tienen

¹ Chill: escalofrío.

escalofríos (“chills group”) y los que lloran (“tears² group”). Mientras que la aparición de escalofríos seguía aumentando la SC, los que lloraban tenían una respiración lenta durante la aceleración de los latidos del corazón. No obstante, ambos grupos sintieron placer y respiración profunda. Así pues, queda esclarecida la independencia entre los escalofríos al oír la música y las lágrimas. Una vez más, se tiene una mayor intensidad emocional con las canciones seleccionadas por cada paciente que las preseleccionadas por los examinadores, haciendo un mayor énfasis en el grupo de los escalofríos.

Para concluir, se hizo un estudio en abril de 2019 en la Universidad de Barcelona acerca de la sustancia blanca y la música [16]. La sustancia blanca es el tejido por donde se comunican las diferentes áreas que forman el sistema nervioso central (SNC). De ese modo, para que las personas sientan placer musical, es necesario que las estructuras cerebrales relacionadas con la recompensa trabajen conjuntamente con las vinculadas a la percepción.

² Tears: lágrimas.

2 INTRODUCCIÓN

El estudio se ha realizado con la finalidad de demostrar la relación existente entre la música y la conducta humana. El fenómeno de la piloerección se origina gracias a diversas bioseñales que se envían por las terminaciones nerviosas del cuerpo, destacándose el rol protagónico del sistema nervioso simpático y sistema límbico.

Los estímulos sensoriales (sonido, tacto, visión, etc.), activan distintas regiones del cerebro, las cuales actúan como una “red de ordenadores”: se comunican entre sí y realizan acciones. Esas comunicaciones se llevan a cabo mediante la transmisión de pequeños impulsos eléctricos (potenciales de acción) y liberación de neurotransmisores (sustancias químicas). Estos potenciales, cuando llegan a las fibras musculares lisas localizadas en la base del folículo piloso producen un efecto (contracción, relajación, liberación de sustancias químicas, etc). En el caso concreto de la piloerección, se contraen, provocando el levantamiento de cada capilar de forma involuntaria y un estrechamiento de los vasos sanguíneos contiguos, lo que se traduce en un aumento de la presión sanguínea.

Debido a todo esto, se ha optado por tomar medidas de la frecuencia cardíaca (FC), como medida indirecta de la actividad del sistema nervioso parasimpático, y de la conductividad de la piel (ligada al nivel de sudoración y a la actividad exodérmica) a través de las glándulas sudoríparas localizadas en los dedos de las manos. Se han identificado los eventos, buscando alguno destacado en las muestras, de forma sincronizada con las posibles reacciones fisiológica en la piel, como son la piloerección o, en su defecto, el escalofrío.

2.1 Objetivos del proyecto

Para desarrollar correctamente esta investigación, se ha de:

1. Determinar los sensores óptimos a utilizar para la detección de piloerección.
2. Desarrollar e implementar un sistema de monitorización sincronizada con los sensores.
3. Elaborar una base de datos con estímulos multimedia emocionalmente poderosos.
4. Seleccionar un grupo de voluntarios para probar todo el sistema.
5. Realizar el experimento buscando provocar ciertas respuestas fisiológicas.
6. Adquisición de muestras.
7. Estudiar resultados y confirmar la relación entre las muestras recogidas por los sensores y la piloerección.

3 MARCO TEÓRICO

El cerebro es uno de los órganos más complejos y estudiados que existe hasta la fecha y aún sigue siendo en parte desconocido. Localizado dentro del cráneo, se sitúa cerca de los órganos de la vista, oído, olfato, gusto y del sentido del equilibrio. Aparte, está formado por millones de neuronas conectadas entre sí por axones y es la *alma mater* del sistema nervioso (SN), de ahí su complejidad.

La superficie del cerebro se denomina corteza cerebral y en ella encontramos la sustancia gris, que envuelve en el interior a la sustancia blanca. Dentro de esta, se halla nuevamente núcleos de sustancia gris y algunos de las partes más importantes del cerebro, como son el hipotálamo y la amígdala, los cuales forman parte del sistema límbico.

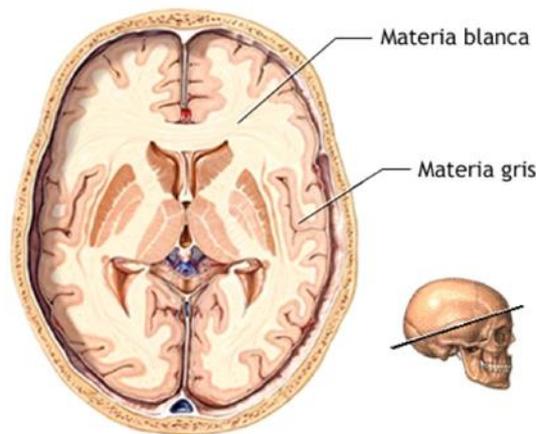


Figura 3–1. Corte axial del cerebro donde se aprecia la materia blanca y la materia gris [17].

3.1 Sistema Límbico

El sistema límbico es una de las redes neuronales más importantes del cerebro en lo referente a la conducta humana y a las emociones o estados de ánimo. Los instintos, las fobias, el miedo, la felicidad, etc., todo comportamiento irracional tienen su origen aquí. Por ese motivo, a este sistema se le conoce también como “cerebro emocional”.

Es difícil definir de forma exacta qué estructuras forman o no parte del sistema límbico [18], incluso la función que tendría cada una, es por ello que algunos estudios sugieren, de manera aceptada, que el sistema límbico esté formado al menos por: el hipotálamo, la amígdala, el hipocampo, el fórnix y la corteza límbica (véase Figura 3–2). No obstante, se sabe que está profundamente interconectado con otras áreas no irracionales del cerebro y se encarga de otras funciones como la regulación térmica, de la memoria inmediata y a corto plazo, funciones reproductivas, entre otras.

Los trastornos emocionales producidos por pequeñas lesiones en el sistema límbico suelen ser bastante difíciles de identificar. Cuando el problema ya es bastante más grave puede provocar un aplanamiento emocional en los estados más extremos, como el placer o la ansiedad.

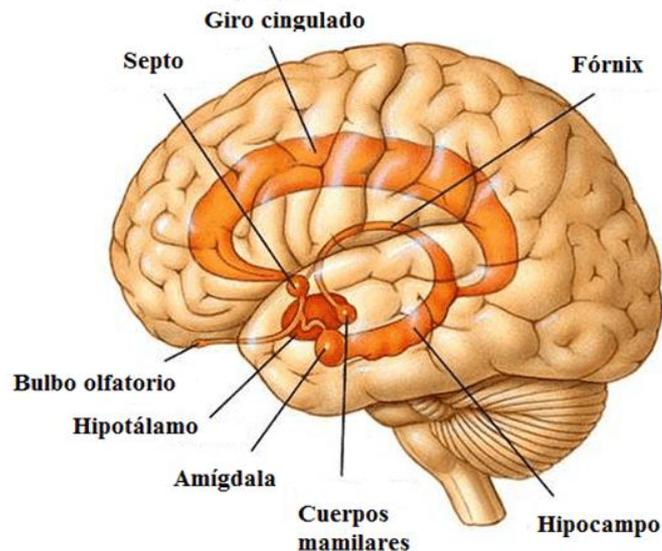


Figura 3–2. Estructura del sistema límbico [18].

3.1.1 Amígdala

La amígdala (cerebral) es un conjunto de núcleos de neuronas ubicado en cada uno de los lóbulos temporales del cerebro, es decir, forma parte del “cerebro profundo”, aquel donde predominan las emociones básicas y el instinto de supervivencia. La información que recibe de la corteza límbica y de las áreas relacionadas con la vista y olfato, entre otras, la transmite principalmente hacia el hipotálamo y, también, al tálamo e hipocampo [19].

Anteriormente se especificó que la amígdala tenía relación con las emociones negativas. Por ejemplo, en situaciones de miedo o peligro, la amígdala envía señales al hipotálamo buscando activar mecanismos de supervivencia. También es la responsable de ciertos neurotransmisores u hormonas como la dopamina o adrenalina (contracción de vasos sanguíneos), de sustancias químicas como las feromonas y contiene receptores para las hormonas sexuales (estrógenos y andrógenos). De igual modo, la amígdala está muy ligada con el sistema de recompensa y placer, basado al fin y al cabo en un proceso de aprendizaje y memoria (retención de información durante un período de tiempo), donde la dopamina tiene bastante importancia [20].

Esta estimulación puede generar cambios en el ritmo cardíaco, en la presión arterial e incluso en el aparato digestivo y hasta podría producir la dilatación de pupilas y piloerección.

3.1.2 Hipotálamo

El hipotálamo (del griego antiguo [hypó], “debajo de, bajo”) es una región del cerebro situado bajo el tálamo formado por varios núcleos de sustancia gris y está principalmente relacionado con la homeostasis [21]. La homeostasis no es más que la capacidad de mantener un ambiente interno estable contrarrestando cualquier cambio exterior al organismo.

El hipotálamo recibe los impulsos de la amígdala e hipocampo y los trasmite al tálamo, convirtiéndose en la parte más fundamental a la hora de asegurar la supervivencia del individuo: alimentación, huida, agresión, placer, reproducción y regulación de la temperatura corporal y del ciclo del sueño [18] [22]; por lo que comparte funciones con la amígdala. Es innegable que para ello necesita enviar señales a partes del organismo bastante dispares entre sí, por ello se sitúa en la base del encéfalo, lugar perfecto para relacionar el cerebro con el sistema endocrino (mediante la liberación de hormonas de la glándula pituitaria) y comunicarse con el sistema nervioso (mediante neuronas).

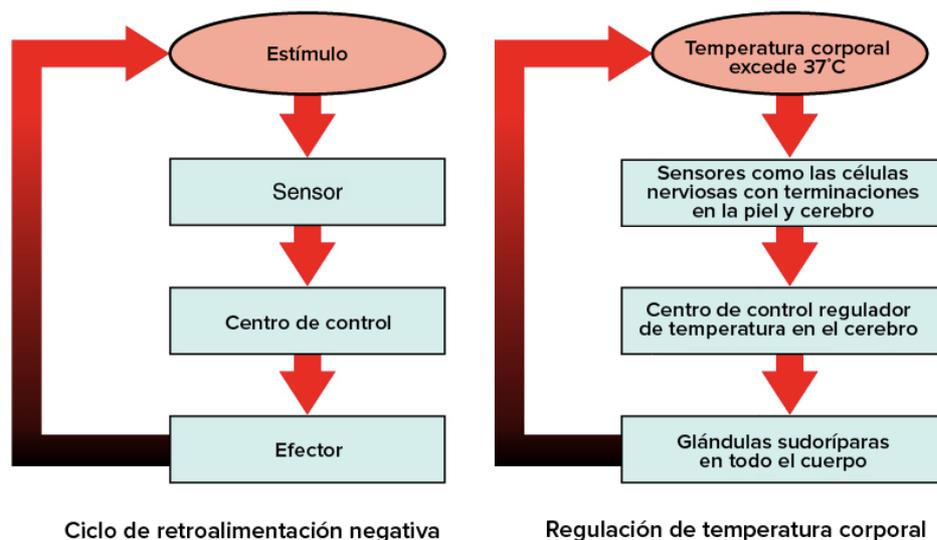


Figura 3–3. Funcionamiento de la homeostasis para caso de regulación térmica corporal [21].

Las hormonas son segregadas en las glándulas endocrinas (carentes de conductos) y circulan por los vasos sanguíneos. Estas controlan diversas funciones fisiológicas y, a su vez, están involucradas en la conducta [23]. Por otro lado, las neuronas son las células que componen el SN y se encargan de procesar y transmitir los estímulos que les llegan mediante impulsos eléctricos.

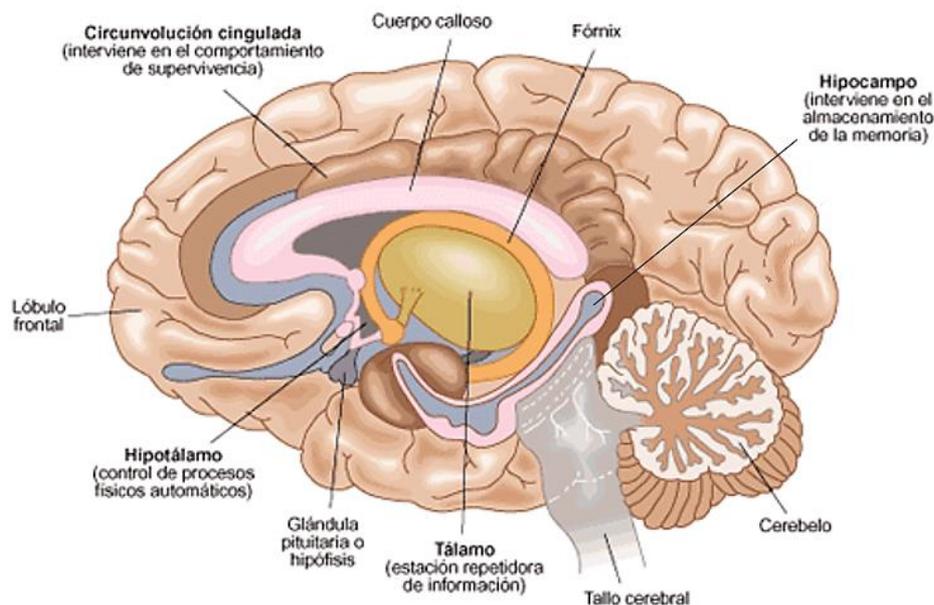


Figura 3–4. Corte axial del encéfalo [24].

En el caso del SNA, las reacciones que nuestro cuerpo puede presentar con la estimulación del hipotálamo son totalmente involuntarias y depende desde donde reciba la señal. Algunas a destacar: aumento o disminución de la FR, sudoración y piloerección para mantener la temperatura corporal; o liberación de hormonas para la regulación del apetito, por ejemplo. Lo complejo viene cuando se habla de las emociones.

Para las emociones, el hipotálamo hace uso de todas sus posibles funciones para expresar plenamente cada una de ellas y poder generar una respuesta ante cualquier situación que se presente.

3.2 Sistema Nervioso

Cuando se habla de sistema nervioso se hace referencia al conjunto formado por millones de neuronas especializadas en la transmisión de señales eléctricas. Las neuronas transmiten dichas señales entre sí mediante su axón, donde la señal eléctrica se transforma en señal química y se liberan los neurotransmisores. Estos, viajan a la dentrita de otra neurona donde se convierten nuevamente en señal eléctrica, y así sucesivamente. La zona donde ocurre todo esto se denomina sinapsis.

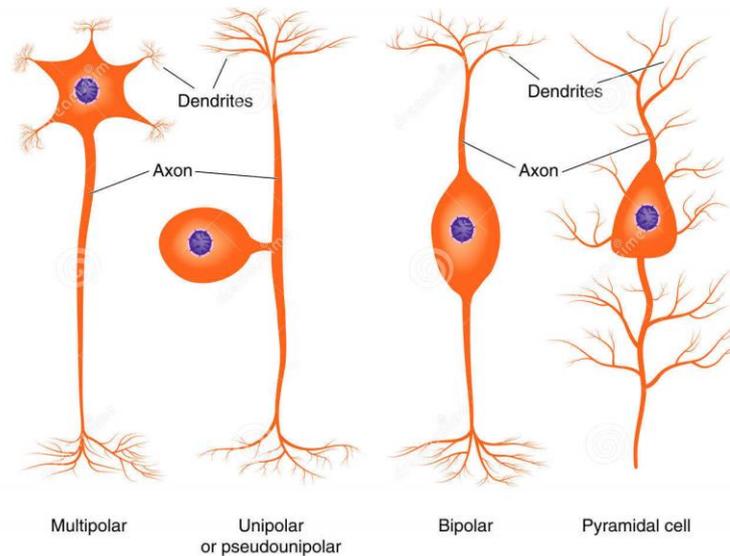


Figura 3–5. Diferentes tipos de neuronas y sus partes [25].

El SN puede clasificarse de dos maneras: 1) desde el punto de vista anatómico y 2) desde el punto de vista funcional.

3.2.1 Sistema nervioso central y periférico

Anatómicamente, el SN se divide en sistema nervioso central (SNC) y sistema nervioso periférico (SNP).

El SNC viene protegido por las meninges y se compone de la médula espinal (se extiende por el interior de la columna vertebral) y del encéfalo, en el cual encontramos el cerebro, el cerebelo y tallo cerebral, ya mostrados en la Figura 3–4. El SNP lo forma las fibras nerviosas que salen de la médula espinal hacia el resto del cuerpo.

El SNC se comunica con el SNP mediante nervios motores. Así pues, cuando el cerebro tiene información que transmitir, lo hace a través de la médula y los nervios del SNP para controlar la función de los órganos internos (SNA) y el movimiento muscular (SNS) [26].

3.2.2 Sistema nervioso autónomo y somático

Otra manera de dividir al SN es según la función que presenten las vías neuronales. Hablaremos de sistema nervioso somático (SNS) para las funciones que sean voluntarias, como el tacto o el movimiento muscular; y si se experimentan acciones involuntarias, entonces se tratará del sistema nervioso autónomo (SNA).

El SNS abarca todo el movimiento muscular (neuronas motoras) e información sensitiva (neuronas sensitivas) que el SNC y SNP manejen. El SNS recibe mediante las fibras nerviosas estímulos afines a los cinco sentidos (vista, oído, gusto, tacto y olfato), así como a la temperatura, presión o dolor y estados de los músculos), de modo que podrá generar una contracción voluntaria del músculo como respuesta (p. ej., saludar moviendo el brazo, presionar las teclas de un teclado para escribir o el movimiento de acto reflejo al tocar algo demasiado caliente).

El SNA es mayoritariamente responsable dentro del SN de mantener la homeostasis, al igual que ocurría con el hipotálamo, de manera que trasmite impulsos nerviosos hacia los órganos mediante el SNC buscando regular la digestión, el flujo sanguíneo, la actividad de las glándulas exocrinas y endocrinas, la FC, la respiración (excluyendo la respiración consciente), entre otras funciones involuntarias. El SNA es activado por centros

nerviosos provenientes del hipotálamo, tallo cerebral o la médula espinal, e incluso también por la corteza cerebral y límbica [27]. Al mismo tiempo, este sistema se clasifica funcionalmente en simpático (SNAS), parasimpático (SNAP) y entérico, pero se hará hincapié en los dos primeros, los cuales tienen funciones antagónicas entre sí [28].

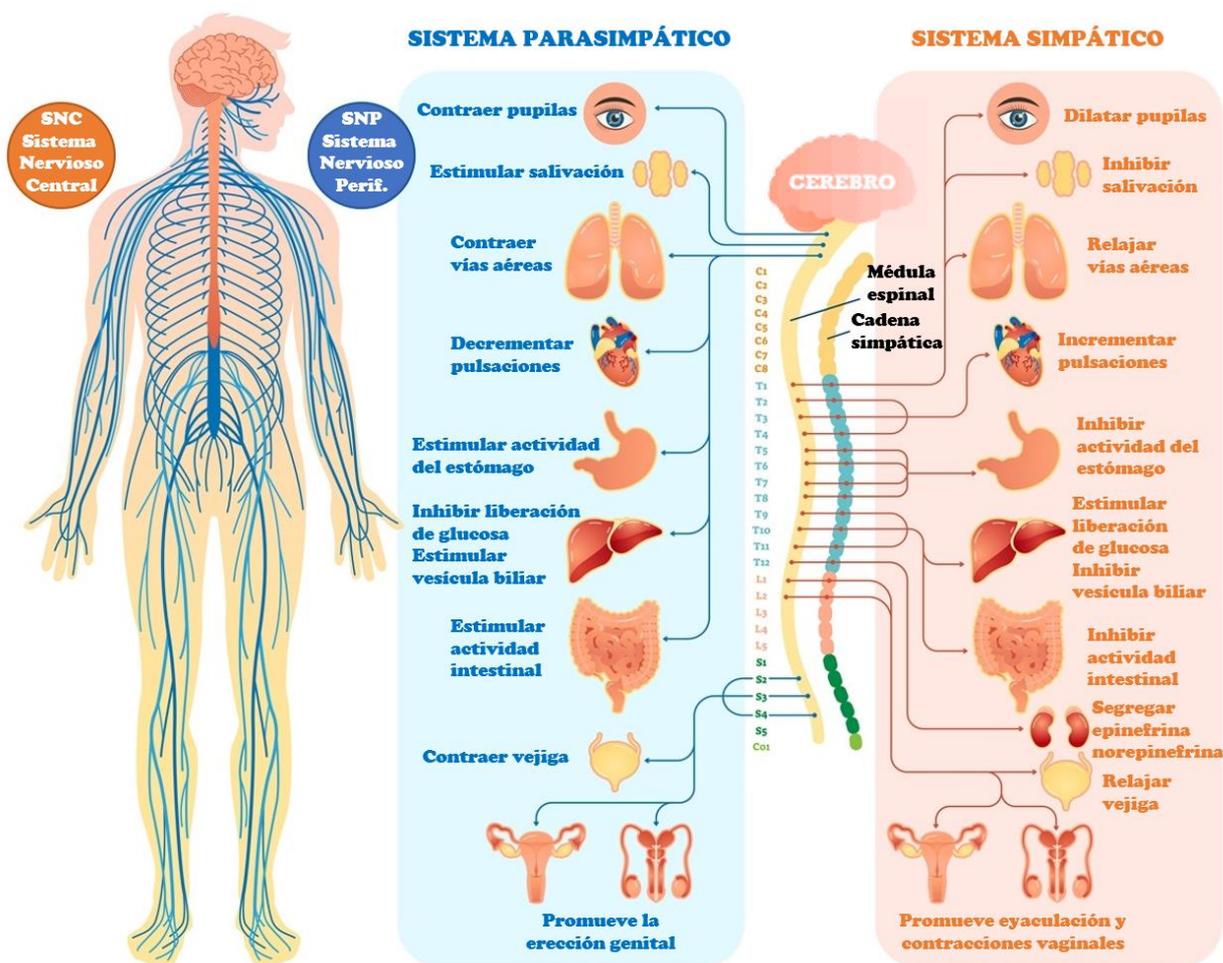


Figura 3–6. Sistema nervioso humano [29].

3.2.2.1 Sistema nervioso parasimpático

Recibe órdenes del tallo cerebral y de la parte baja de la médula espinal, tal y como se ilustra en la figura anterior. El SNAP es un sistema de reposo, encargado de devolver el cuerpo a un estado de normalidad tras una situación de alerta producido por el SNAS. En la Figura 3–6 aparecen sus principales funciones, como la activación de las glándulas salivales, la estimulación de la actividad estomacal e intestinal, disminución de la FC (buscando el reposo), fomentar la excitación, etc.

3.2.2.2 Sistema nervioso simpático

Se trata de un sistema de huida y manda señales a las diferentes partes del cuerpo mediante la médula espinal.

Sus principales funciones, como aumentar la FC, contracción de músculos lisos, estimular la piloerección, activar las glándulas sudoríparas o dilatar las vías aéreas de los pulmones, no son más que acciones para preparar al organismo de una situación de peligro o lucha, buscando la supervivencia, o como respuesta al estrés o ante un estímulo intenso o inesperado. Esto, en parte, ocurre gracias a liberación de adrenalina (o epinefrina) y noradrenalina por parte del propio SNAS.

3.3 Piloerección

La piloerección, comúnmente conocida como “piel de gallina” o “pelos de punta”, no es más que una reacción corporal ante una bajada de temperatura o una emoción intensa como el miedo o el placer y está relacionado con el sistema de placer-recompensa, confirmando su origen neuropsicológico.

Centrándonos en el ser humano, puede ser provocado por diversos mecanismos, como un bostezo o escalofrío ante una situación de frío buscando regular la temperatura corporal, directamente al oír un sonido desagradable o vivir una experiencia de miedo o hasta paranormal. Incluso puede darse al tocar una superficie áspera, con una caricia en determinadas zonas del cuerpo o en momentos de placer. Como mención a esto último, numerosos estudios actuales concuerdan en que la música también es otro estímulo a tener en cuenta [9] [11] [12] [13] [14] [15] [16].

Cuando escuchamos música que nos cautiva, nuestro cerebro libera dopamina, neurotransmisor relacionado con el placer y recompensa (véase sección 3.1.1). Cuanto mayor intensidad emocional cause una canción o melodía, mayor liberación de dopamina y, por ello, mayor sensación placentera provocará. Si nos centramos en el placer musical, para el individuo puede resultar reconfortante escuchar una pieza inédita que resulta ser inesperadamente de su agrado, así como oír una de sus canciones favoritas más de una vez. Para este último caso, juega un papel importante la recompensa, pues el cerebro ya sabe mediante la repetición y aprendizaje que esa canción va a complacer y genera excitación, liberando una gran cantidad de dopamina.

La música simplemente afecta al estado anímico de cada persona y de forma diferente para cada una, no tiene otra función práctica, como sí ocurre con los instintos de supervivencia u otras causas anteriormente mencionadas.

Por otro lado, el escalofrío no solo produce piloerección. A la par, ocurren otras reacciones fisiopsicológicas como aumento de la FC, respiraciones más profundas, crecimiento de la actividad electrodérmica y un posible sudor frío por la columna vertebral.

3.3.1 Músculos erectores

Los músculos erectores (también conocidos como horripiladores o arrectores) son unas fibras musculares lisas localizadas en la base del folículo piloso (propio de la mayoría de mamíferos) cuyas contracciones provocan el levantamiento de cada capilar de forma involuntaria (característica del SNA).

Para los animales, su principal función es la de crear una capa gruesa de pelo que aisle del frío o si se está en estado de peligro hacer parecer al animal más grande. La piloerección en humanos no es más que un vestigio evolutivo, pues realmente no resulta extremadamente útil para proteger del frío o en una situación de peligro.

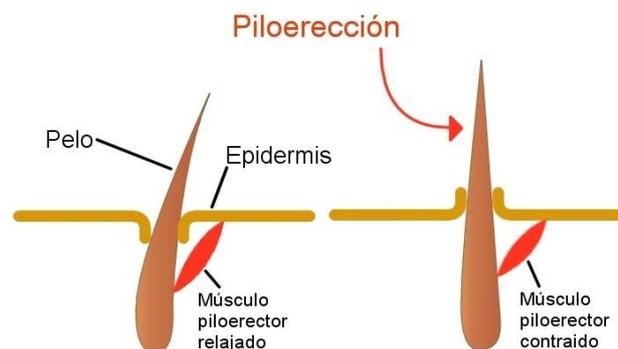


Figura 3–7. Estructura básica de la piloerección [30].

3.3.2 Glándulas sudoríparas

Son glándulas situadas en la dermis e hipodermis formado por delgados conductos enrollados hasta la epidermis concluyendo en los poros o en folículos pilosos, por donde segregan el sudor [31]. Se encuentran por casi toda la piel del cuerpo y son controladas por las hormonas y el SNAS.

Su principal función es ayudar a la regulación térmica corporal mediante la sudoración, pero también actúa como

equilibrador emocional por órdenes del sistema límbico para casos de estrés o ansiedad. En otras palabras, a mayor excitación del SNAS, mayor secreción de sudor.

Hay dos tipos de glándula sudorípara: las glándulas ecrinas, cuya secreción va directamente a la superficie de la piel y funcionan como regulador térmico; y las glándulas apocrinas, que poseen un conducto excretor dérmico que desemboca en el folículo pilo-sebáceo y se activan con emociones intensas como la excitación o miedo.

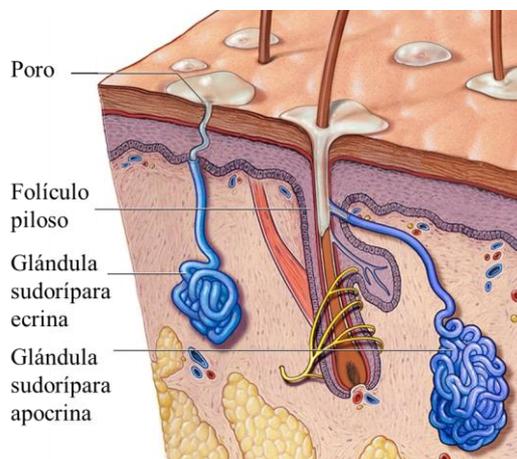


Figura 3–8. Glándulas sudoríparas ecrinas y apocrinas [32].

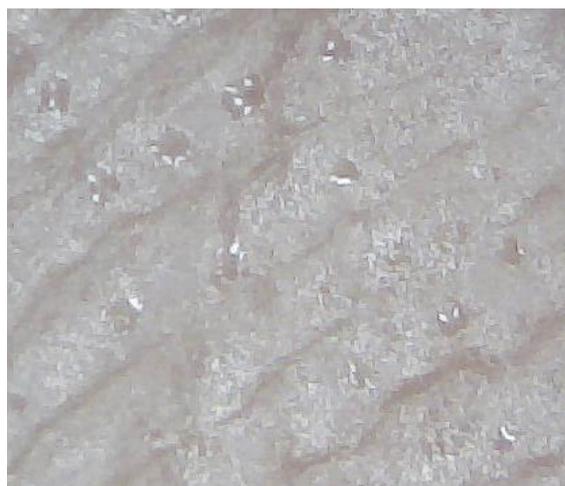


Figura 3–9. Glándulas sudoríparas en las yemas de los dedos.

3.3.3 Vasos sanguíneos

Como puede verse en la Figura 3–10, hay vasos sanguíneos localizados en la raíz de los capilares. Cuando aumenta la actividad del SNAS para, en este caso, producir piloerección, se contrae el músculo liso situado en la pared del vaso sanguíneo, provocando el estrechamiento de este, lo que se denomina vasoconstricción [33]. Lo mismo ocurre con la adrenalina, que hace aumentar la tensión arterial.

Si las fibras musculares lisas se contraen, entonces implica una previa relajación del corazón, que se traduce en un aumento en la presión y aceleración sanguíneas.

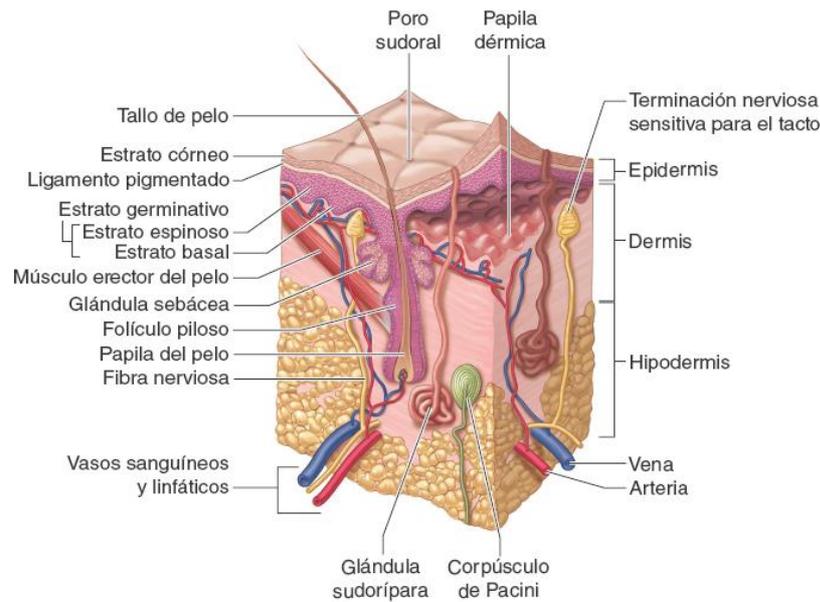


Figura 3–10. Estructura de las diferentes capas de la piel [34].

3.4 Bioseñales

3.4.1 Respuesta galvánica de la piel

La respuesta galvánica de la piel (GSR), también conocida como EDA o SC, es una propiedad del cuerpo que permite medir y recoger las variaciones de la resistencia eléctrica de la propia piel. Estas variaciones están íntimamente relacionadas con los niveles de sudoración [31], controlado a su vez por el SNA, el cual maneja el comportamiento emocional (sección 3.3.2).

Cuando las neuronas transmiten una información del SNA y se produce la sinapsis, uno de los neurotransmisores que se liberan es la acetilcolina. La acetilcolina es conocida como el transmisor parasimpático, ya que se distribuye por todas las terminaciones parasimpáticas, pero hay excepciones, como la participación en la respuesta simpática de los músculos piloerectores o glándulas sudoríparas [35].

En la terminación del axón, dentro de la membrana celular, hallamos precisamente receptores de acetilcolina (AChR), llamados receptores colinérgicos. Son canales iónicos activados por ligandos (ACh), proteínas en una solución acuosa por donde pasan iones de sodio (Na^+) y potasio (K^+) provocando una despolarización y la aparición de un potencial de acción. Un potencial de acción no es más que una onda de descarga eléctrica que se da en la sinapsis o al enviar un estímulo a los músculos o glándulas [19].

En resumen, la GSR no es más que la medida externa de la caída de potencial eléctrico entre dos puntos de la piel (mediante electrodos) provocada por la aparición (internamente) de esos potenciales de acción, originados a su vez por el intercambio de iones positivos y negativos. La GSR puede aumentar con ciertos estados emocionales, donde a mayor secreción de sudor y mayor flujo sanguíneo, menor resistencia de la piel, mayor conductancia y menor GSR.

3.4.2 Frecuencia cardíaca

Aparte de la acetilcolina, otros neurotransmisores ya mencionados son la adrenalina y noradrenalina, con sus correspondientes receptores adrenérgicos. Existen dos tipos: los receptores alfa (α) y los receptores beta (β).

Cuando se libera adrenalina, afecta directamente a los vasos sanguíneos debido a estos receptores, donde los receptores α y β son los responsables de la vasoconstricción y vasodilatación respectivamente [33]. La relación entre esto y la piloerección fue demostrada en la sección 3.3.3, por ello, otra de las bioseñales a tener en cuenta es la frecuencia cardíaca o FC.

Los subtipos de receptores α reaccionan a la adrenalina y noradrenalina provocando la contracción y relajación

de la fibra del músculo liso, mientras que los receptores β están relacionados con la relajación del músculo liso y la contracción del miocardio [19].

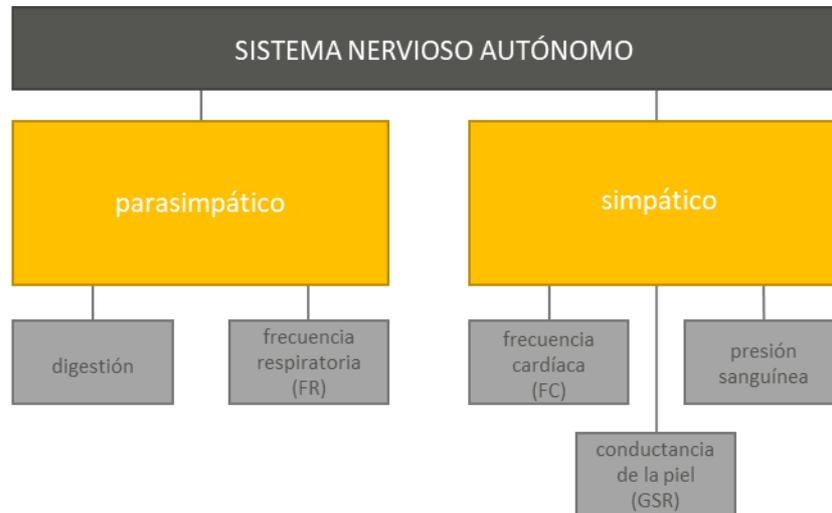


Figura 3–11. Actividades del sistema nervioso autónomo [36].

Adicionalmente, la FC también depende de la respiración. Una respiración profunda se traduce en un aumento considerable (pero momentáneo) de los Bpm y recibe el nombre de arritmia sinusal.

Es frecuente que ciertas emociones provoquen esta variación en la FR. En esos casos, se trata propiamente de una respiración abdominal. Al inspirar más aire, mayor intercambio de gases (O_2 y CO_2) entre los pulmones y la sangre [37] debe hacerse, por lo que el corazón necesita bombear más.

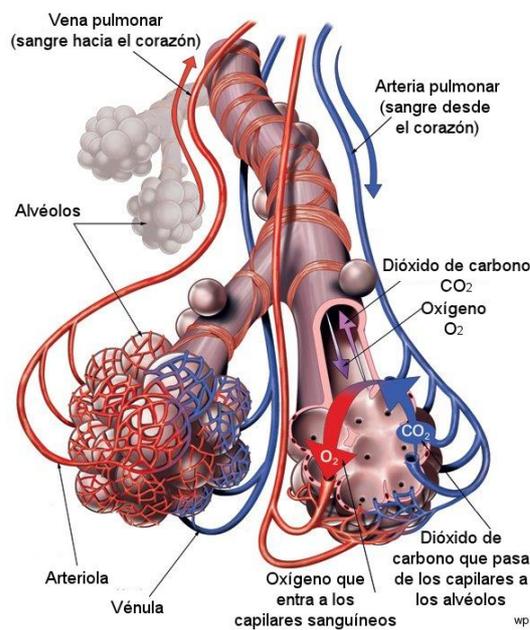


Figura 3–12. Intercambio de gases en los alvéolos [37].

4 METODOLOGÍA

4.1 Participantes

Para la prueba de control realizada en este trabajo (cuyos resultados se detallan en el apartado 5), se eligieron personalmente a cinco sujetos voluntarios y ya conocidos (3 mujeres y 2 hombres), intentando aportar diferentes perfiles al experimento en cuanto a la relación con la música se refiere. Con esto, se buscaba perfeccionar la base de datos de estímulos y la metodología llevada a cabo.

De cara a una prueba posterior y ya definitiva^{3 4}, con una mayor participación, se elaboró un breve cuestionario (puede encontrarse dentro de Apéndices) para establecer los niveles de sensibilidad ante la música, condicionando la selección de los candidatos (siguiendo la línea de M. Benedeck y C. Kaernbach, 2007, Matthew Sachs, 2016). Fue rellenado por 12 personas, de diferentes rangos de edades e inesperadamente cada una con sus propios gustos musicales. Ninguna de ellas se dedica profesionalmente a la música, pero la mitad sabe tocar algún instrumento. Prácticamente todos oyen música gran parte del día y 6 personas dicen emocionarse fácilmente (las otras 6 restantes solo en circunstancias concretas).

De este modo, y ya que la participación en el cuestionario para esta próxima prueba ha sido moderada, se optó por aceptar en su totalidad a los 12 voluntarios, pues no se repetía ningún patrón en las respuestas, ofreciendo una posible variabilidad en las respuestas fisiológicas ante la presentación futura de los estímulos. De haberse dado el caso de una participación mayor en el cuestionario, se habría hecho una selección más minuciosa y se descartaría a cualquier persona que no mostrara indicios de gustarle la música.

4.2 Estímulos

A cada sujeto de la prueba de control se le facilitó dos listas, una con 49 canciones y otra con 16 títulos de películas (cada una detallada en el Apéndice). La lista de películas (Lista A) contiene títulos ampliamente conocidos o *blockbusters*, desde clásicos como “E.T.” hasta más actuales como “La La Land” incluyendo también filmes animados como “Mulán”. Los clips elegidos y mostrados de cada película presentan una escena visualmente emotiva y/o impactante acompañada de una pista de audio de su correspondiente banda sonora (BSO). Para esta ocasión, el fragmento de menor duración es el de la primera aparición la de la Marcha Imperial de Darth Vader en “Star Wars: Episodio V – El Imperio Contraataca” (0:52) y el de mayor duración es el elegido para “Los Miserables” con la actuación de Anne Hathaway en el papel de Fantine interpretando “*I Dreamed A Dream*” (4:15).

Por otro lado, las canciones que conforman la Lista B fueron elegidas basándonos en un estudio anterior [11], aportando pistas nuevas buscando provocar emoción mediante la nostalgia, notas agudas y/o mantenidas un significado tiempo, golpes marcados de percusión, voz rota, etc., y de diversos géneros musicales (balada, pop, clásico, rock...). Encontramos desde éxitos actuales como “*Shallow*” de “Ha Nacido Una Estrella” interpretado por Lady Gaga y Bradley Cooper, hasta canciones que aún perduran a lo largo de los años como “*I Will Always Love You*” de Whitney Houston. También se incluye artistas españoles tales como Pastora Soler, Pablo Alborán, entre otros.

Todas las canciones fueron normalizadas hasta alcanzar el rango de [-1, 1], presentando el mismo nivel de sonoridad para un mismo nivel de potencia acústica. Solo 4 tuvieron que ser truncadas (las identificadas con *) debido a su excesiva duración (> 6 minutos), pero sin que el oyente notara el corte eliminando pasajes repetitivos de las canciones: “*Frozen*” de Madonna (4:25), “*We Are The World*” de Michael Jackson (4:57), “*Still Loving You*” de Scorpions (5:02) y “*Europa*” de Mónica Naranjo (5:13). Con todo ello, la pista de menor duración de

³ Este estudio fue aprobado por el Comité Ético de Experimentación (CE) de la Universidad de Sevilla.

⁴ Todos los participantes recibieron y firmaron el consentimiento para realizarles dicho experimento y para la posible publicación anónima de los resultados.

esta presente lista es el tema principal de “Piratas del Caribe” compuesta por Hans Zimmer (1:23) y la de mayor duración “*Caruso*” interpretada por el trío italiano Il Volo (5:17).

4.3 Prueba experimental

Previo a la prueba, de cada lista, el experimentador escogió una canción y película buscando causar un mayor impacto en el espectador: la pista “*Never Enough*” de la BSO de “El Gran Showman” y la escena final de “Gladiator”. “*Never Enough*” a pesar de poder no ser conocida para todos, se caracteriza por ser emocionalmente poderosa y la elección de “Gladiator” vino inspirada por el estudio de M. Benedeck et al. (2007). Ambas opciones fueron eliminadas de las listas mostradas a cada participante para evitar coincidencia y se mantuvieron desconocidas hasta el mismo momento de la escucha/visualización de las mismas. A continuación, y de forma análoga, cada sujeto elegía una canción y una película con las que pudiera sentir personalmente emociones fuertes. Así pues, cada persona tendría 4 estímulos en total, 2 de ellos comunes para todos (aquellos elegidos por el examinador).

El experimento tuvo lugar en una sala climatizada (21°) y aislada acústicamente del exterior al carecer de ventanas. El sujeto se sentaba en una silla con reposacabezas y reposabrazos, buscando una posición confortable. Cada brazo debía apoyarse parcial o totalmente sobre la mesa, según conveniera a la hora de ponerse los sensores. Para una mayor comodidad, se colocaron los cascos en primer lugar y posteriormente los sensores (cuyos funcionamientos se detallan en las secciones 4.4.3 y 4.4.4).

Durante la prueba, el experimentador permanecía en la sala controlando la correcta toma de muestras y se pidió que no hicieran movimientos bruscos e innecesarios para evitar el ruido y la contaminación de estas. La recogida de datos fue llevada a cabo usando el propio software de Arduino y un complemento de Excel para verter y poder guardar todas las muestras en hojas de cálculo, generar gráficas dinámicas y cualquier manipulación posterior (véase el siguiente apartado para mayor profundidad).

La presentación de estímulos seguía el siguiente orden: 1) la canción elegida por cada sujeto (C1), 2) la preseleccionada por el experimentador (C2), 3) película preferida de cada sujeto (P1), y 4) la película destacada por el experimentador (P2). Cada pista musical era precedida y seguida por 10 segundos de silencio, para que la posible excitación de la canción anterior no influyera en su totalidad sobre la siguiente. Adicionalmente, tras cada estímulo se les preguntaba a los pacientes cuán emocionados se hallaban, si habían tenido escalofríos o piloerección u otro tipo de sensación o reacción fisiológica al respecto. Esta entrevista final fue realizada de forma cualitativa con opiniones subjetivas buscando una mayor concordancia con la respuesta objetiva obtenida en el experimento.

Todo este proceso ha llevado entre 20 y 30 minutos por persona.

4.4 Adquisición de datos fisiológicos

El circuito implementado para las mediciones consta de una placa Arduino Uno R3 (Arduino LLC, Italia) y los sensores no invasivos Pulse Sensor (World Famous Electronics llc, Estados Unidos) y GSR Sensor (Seed Technology Co., Ltd., China). Aparte, se ha utilizado una cámara compacta (Cyber-Shot DSC-W570) (Sony, Japón), con una resolución de 16.1 MP, para grabar el antebrazo izquierdo de cada sujeto en cada estímulo y parte del abdomen para tener una prueba visual en caso de que ocurriera piloerección y controlar la respiración.

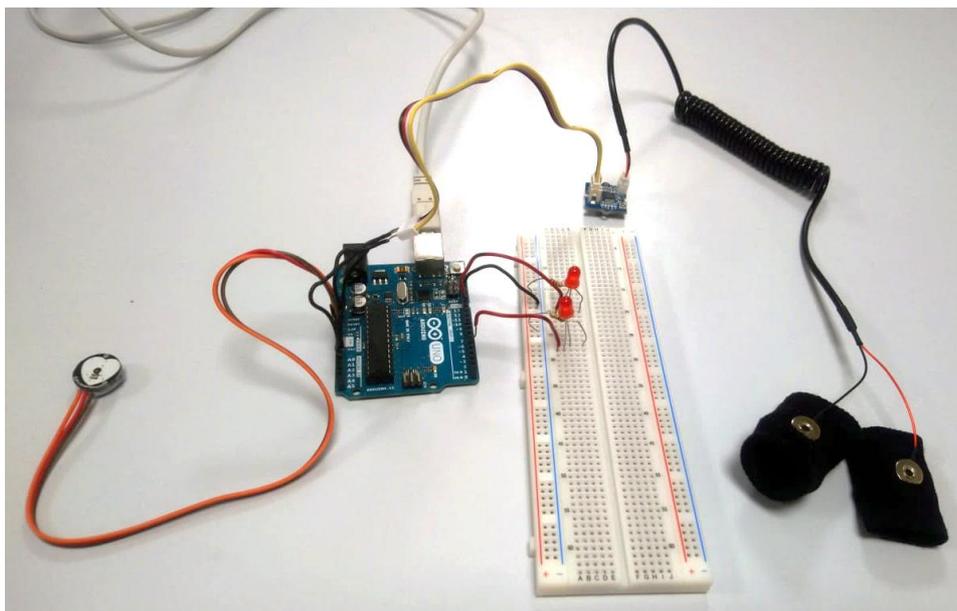


Figura 4–1. Circuito empleado en el experimento con todos sus componentes. De izquierda a derecha: Pulse Sensor, Arduino Uno, placa de pruebas (*protoboard*) y GSR Sensor.

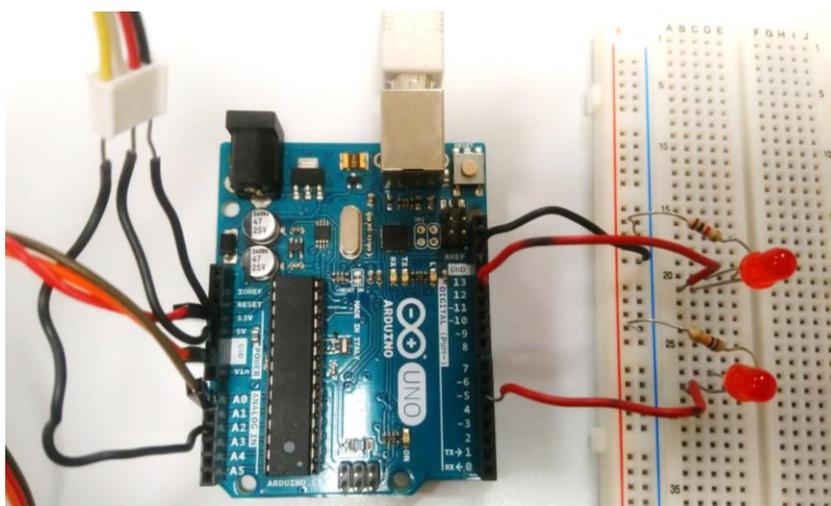


Figura 4–2. Conexiones a la placa Arduino.

4.4.1 Desarrollo de los algoritmos implementados

En esta parte del trabajo, hubo dos grandes problemas: implementar de manera sincronizada tanto el Pulse Sensor como el GSR Sensor y poder guardar las muestras recogidas con el software de Arduino.

En un primer momento se intentó elaborar todo el código en un solo *sketch*, donde el valor de la SC se calculaba con la diferencia de potencial eléctrico y el valor de la FC se obtenía a partir de una librería. De este modo, resultó imposible recoger las muestras de ambos sensores de manera simultánea, ya que leía los datos del GSR Sensor primero y luego los del Pulse Sensor, por lo que, obviamente, lo mostrado en pantalla no estaba sincronizado. Este error se consiguió subsanar separando el código de cada sensor en diferentes *sketches* (“PulseSensor_BPM.ino” y “GSR_Sensor”), dejando la llamada de estos y la definición de los pines en el *sketch* principal (“SENSOR_main”). De esta manera, se logró imprimir por pantalla y, de forma sincronizada, los valores recogidos por los dos sensores, además de plasmar la hora exacta de su adquisición.

Una vez solucionado el problema anterior, necesitábamos guardar todos los datos generados para su posterior estudio. Se optó hacerlo mediante un complemento de Excel, que permitía la conexión directa con el código de

Arduino, sin necesidad de ejecutar este. Para verter correctamente las muestras, cada valor se escribía en Excel en su correspondiente columna con una línea de código del tipo:

```
Serial.print("DATA, TIME, TIMER, ");
```

atendiendo a la importante separación de cada una de ellas por una coma (,). La ausencia de una coma provoca un erróneo o nulo traspaso de datos al Excel.

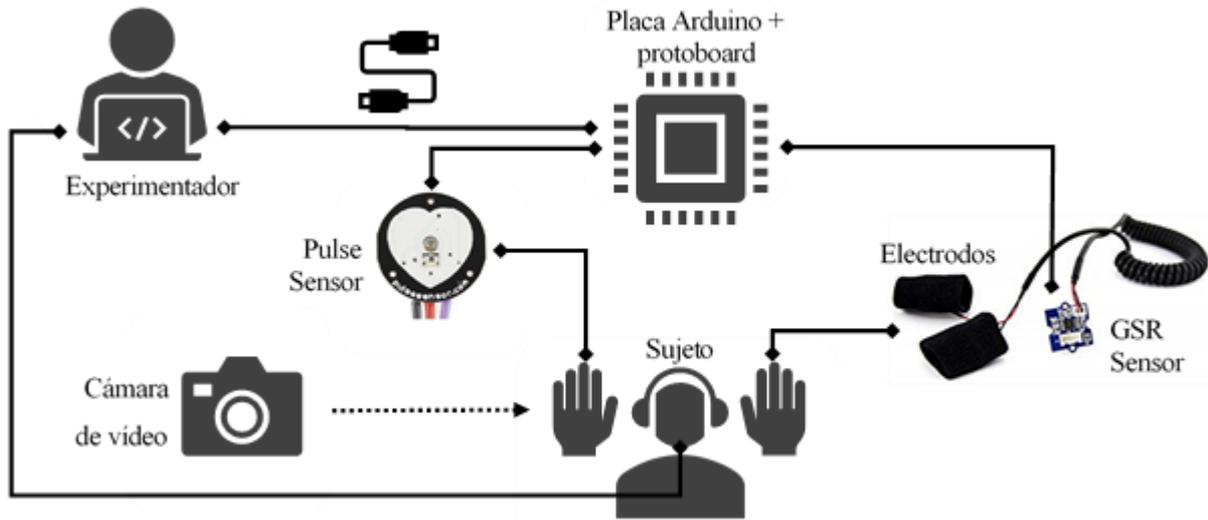


Figura 4–3. Esquema de todos los sistemas implementados para la reproducción de la Lista B.

A la hora de realizar el experimento, el circuito ya mostrado en la Figura 4–1 se colocará frente al sujeto, con el Pulse Sensor en la mano izquierda y el GSR Sensor en la mano derecha. A la par, la cámara compacta enfocará al brazo izquierdo y de fondo el abdomen, como se comentó anteriormente. El experimentador controlará la actividad de los sensores, la lista de estímulos y la conexión de los cascos del sujeto desde su propio monitor, como se aprecia en el esquema anterior.

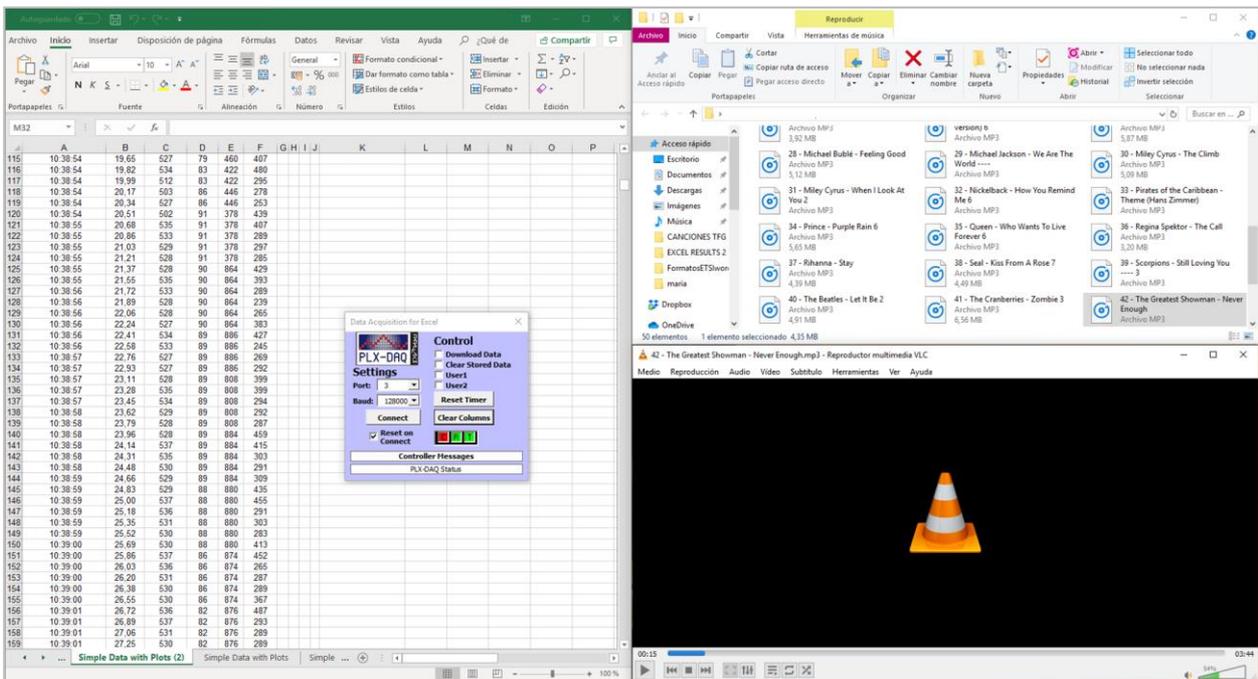


Figura 4–4. Pantalla del monitor durante la reproducción de un estímulo de la Lista B. Plugin de Excel (izquierda), Lista B (esquina superior derecha) y pista actual en reproducción (esquina inferior derecha).

La diferencia entre los esquemas de las Figura 4–3 y 4–5, radica en el uso de otro monitor para el visionado de los clips de películas de la Lista A, colocado lo suficientemente cerca como para que la persona examinada vea bien la pantalla y sin interferir en el resto del circuito.

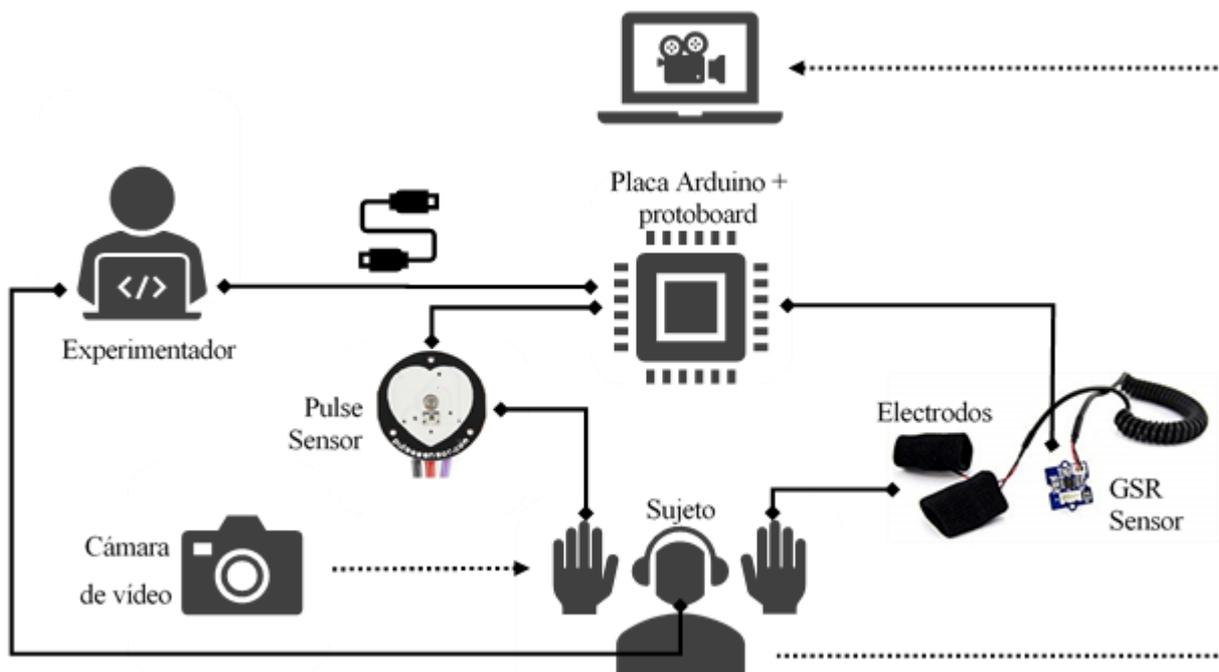


Figura 4–5. Esquema de todos los sistemas implementados para la reproducción de la Lista A.

4.4.2 Software de Arduino

Para el funcionamiento del circuito hemos empleado el entorno de desarrollo integrado (IDE) de Arduino [38], una aplicación de código abierto escrito en lenguaje de programación Java, perfectamente compatible con nuestra placa.

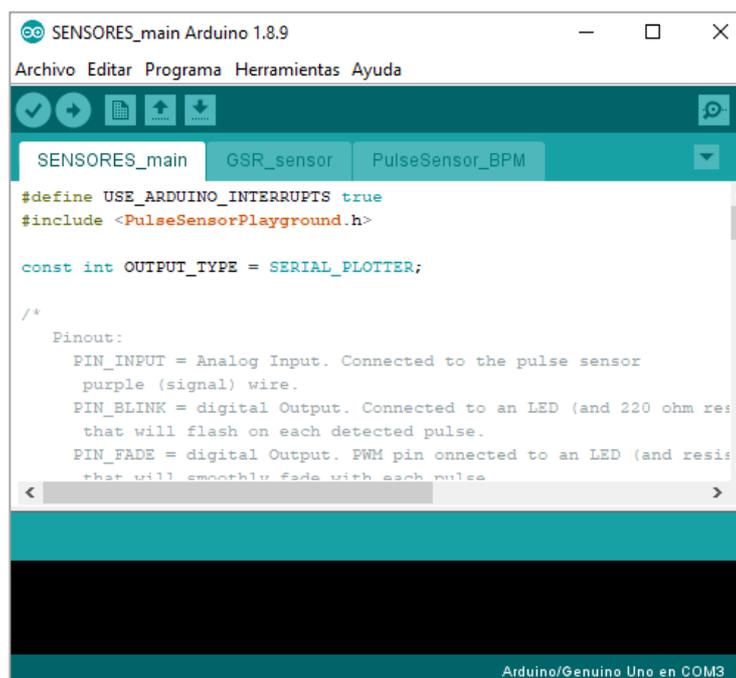


Figura 4–6. Interfaz de Arduino.

Una vez tengamos la placa conectada mediante USB al ordenador, debemos seleccionar en la aplicación en qué puerto se halla nuestra placa Arduino Uno. En nuestro caso, llamado COM3 (Arduino/Genuino Uno):

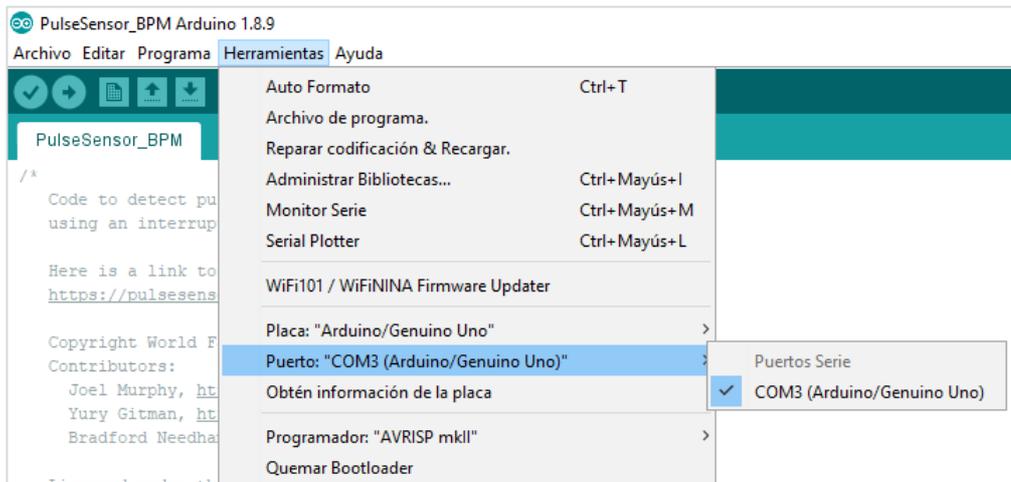


Figura 4–7. Selección del puerto serie de Arduino Uno.

Una vez deseemos probar el código en cuestión, solo tenemos que darle a la flecha que aparece en la parte superior izquierda de la interfaz. Con esta acción se compila el código y se ejecuta, como puede verse en la ventana en la parte inferior de la aplicación. Asimismo, se nos muestra el espacio ocupado por nuestros códigos y variables, así como el espacio libre restante.

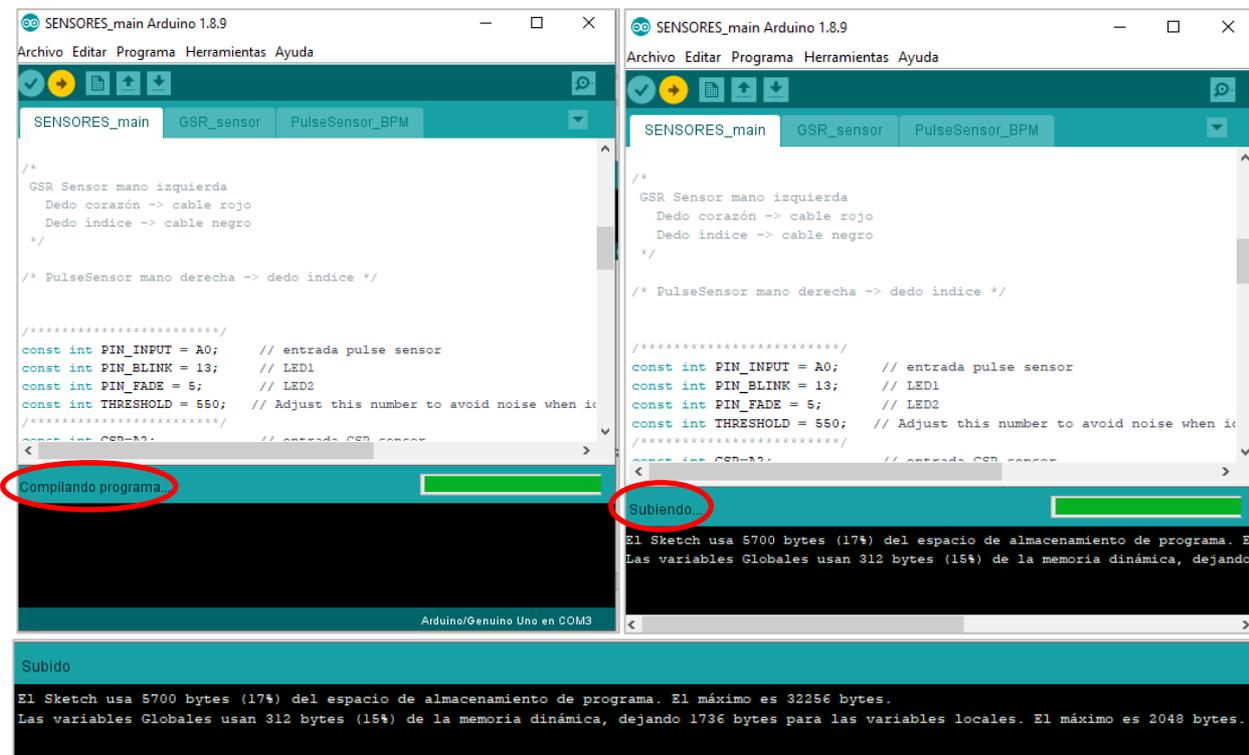


Figura 4–8. Fases de compilación y ejecución.

Todos los códigos utilizados se encuentran en el Apéndice.

4.4.3 Pulse Sensor

Pulse Sensor es un sensor de pulso de FC para Arduino que hemos utilizado para medir los Bpm. Contiene su propia librería de fácil instalación (dependiendo de la versión, la nomenclatura puede variar):

Programa > Incluir Librería > Administrar Bibliotecas.

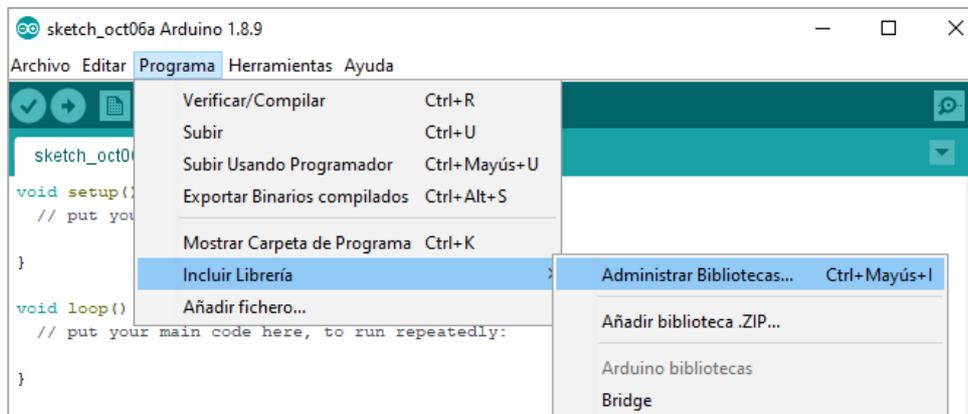


Figura 4–9. Instalación de la librería PulseSensor Playground (1ª parte).

Acto seguido se abrirá una nueva ventana y en el buscador escribimos en el nombre de la librería e instalamos:



Figura 4–10. Instalación de la librería PulseSensor Playground (2ª parte).

Con la librería ya instalada, tenemos al alcance diversos códigos de ejemplo según el uso que se quiera dar al sensor. En nuestro caso, el código implementado es una variante a “PulseSensor_BPM”.

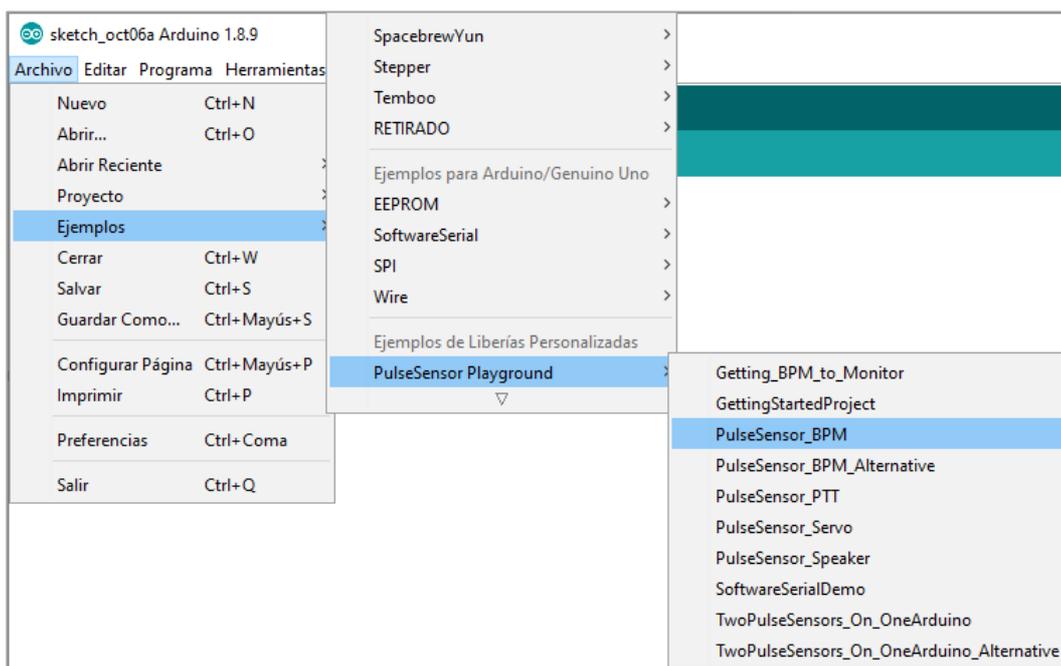


Figura 4–11. Ejemplos de la librería PulseSensor Playground.

En el experimento, Pulse Sensor se dispuso para el dedo índice de la mano izquierda. En la base del sensor puede apreciarse un sensor óptico de FC de luz verde que lee el pulso mediante fotopletimografía (PPG) con simplemente depositar un dedo sobre éste de forma suave. La PPG se basa en la proyección de esa luz a través de la piel hasta alcanzar la sangre que circula en los vasos sanguíneos, donde es reflejada a su vez al sensor óptico de nuevo.

Tenemos que, a mayor cantidad de sangre en los vasos sanguíneos, más luz será reflejada. En consecuencia, como la circulación de la sangre depende de los latidos del corazón, podemos conocer fácilmente la frecuencia cardíaca (o los pulsos por minuto) gracias a este método y con bastante precisión.

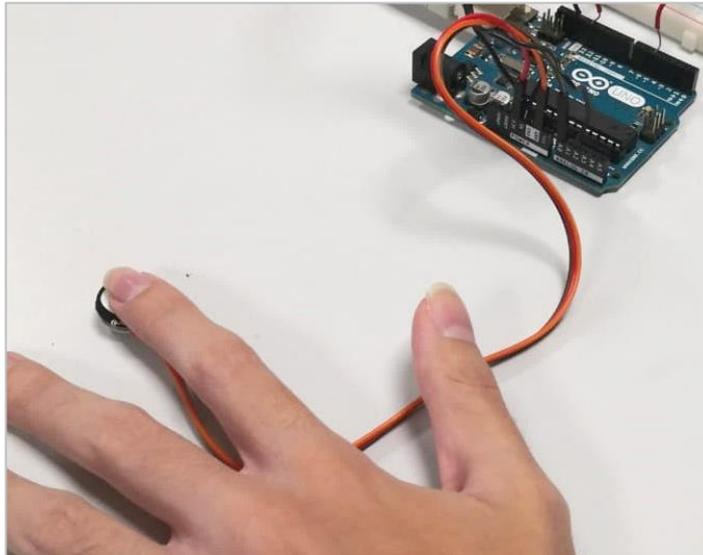


Figura 4–12. Modo de empleo del Pulse Sensor.

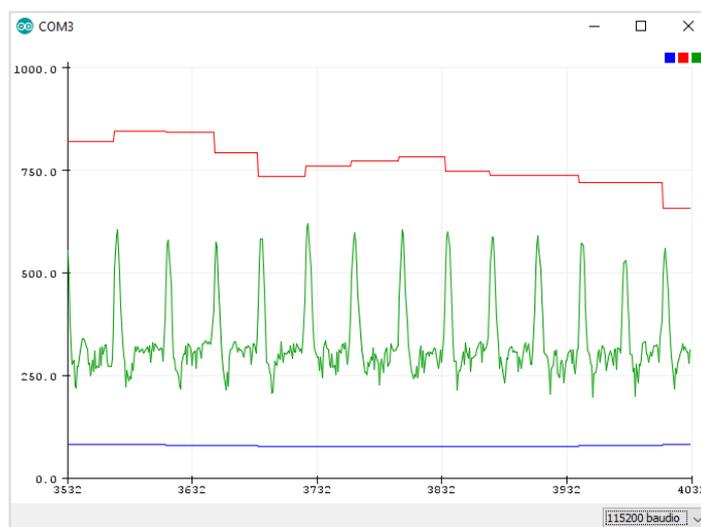


Figura 4–13. Bioseñales capturadas por el sketch “PulseSensor_BPM.ino”: intervalo de tiempo entre latidos en milisegundos (rojo), el pulso cardíaco (verde) y los pulsos por minuto (azul).

4.4.4 GSR Sensor

El GSR Sensor nos permite medir la EDA aprovechando las propiedades eléctricas de la piel ligada a la sudoración. Para ello, incluye dos electrodos que los colocaremos en el dedo índice y corazón, respectivamente, de la mano derecha, preferiblemente en las falanges medias o proximales.

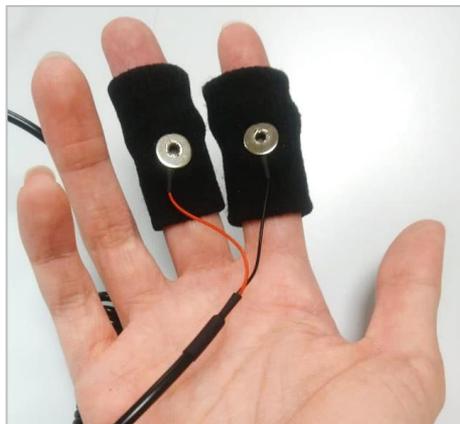


Figura 4–14. Modo de empleo del GSR Sensor.

Este sensor funciona de la siguiente manera: el propio sensor aplica una tensión constante de 0.5V en ambos electrodos y una resistencia muy pequeña en comparación con la resistencia de la piel. De este modo, la SC se calcula midiendo el flujo de corriente a través de los electrodos, donde cualquier variación acaecida en ese flujo será debida, principalmente, a variaciones en las propiedades eléctricas de la piel y, por ende, en la actividad de las glándulas sudoríparas de la piel.

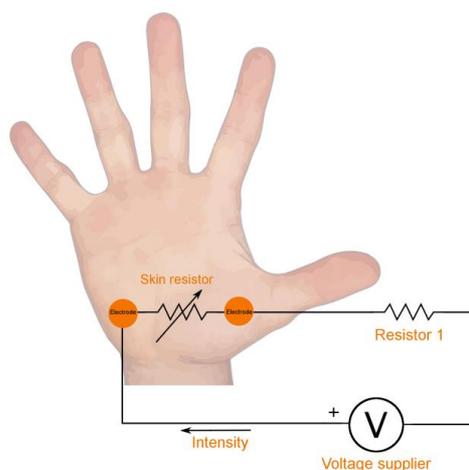


Figura 4–15. Esquema básico del funcionamiento del GSR Sensor [39].

El código usado para este sensor es una variación del expuesto en la página del distribuidor Sseed Studio [40] y las muestras recogidas no resultan ser la resistencia como tal. Para ello, deberemos aplicar la siguiente expresión:

$$\text{Resistencia humana } (\Omega) = \frac{1024 + 2 * \text{Serial_Port_Reading}}{512 - \text{Serial_Port_Reading}} * 10000 \quad (4-1)$$

donde *Serial_Port_Reading* sería el valor de la muestra mostrada por pantalla, con el que se ha decidido trabajar por mayor comodidad.

Si queremos hallar la conductancia, no tenemos más que calcular la inversa de la resistencia:

$$\text{Conductancia eléctrica } (S) = \frac{1}{R} \quad (4-2)$$

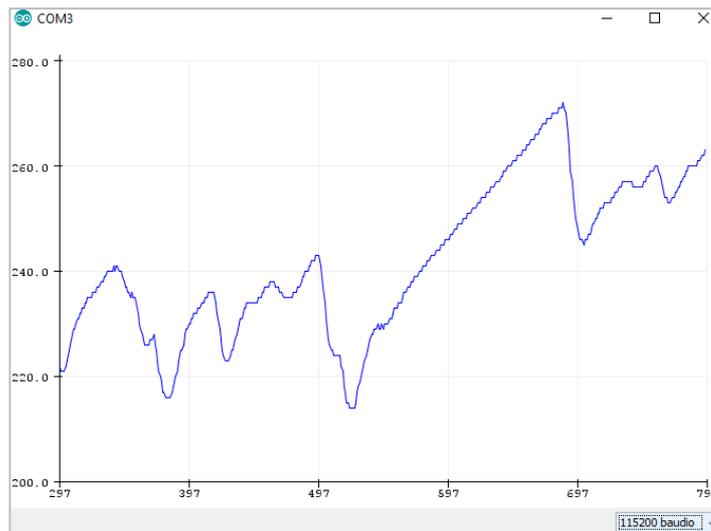


Figura 4–16. Ejemplo de gráfica de Arduino con los valores dados por GSR Sensor en un corto período de tiempo.

4.4.5 Complemento software PLX-DAQ

Como el software de Arduino de por sí no permitía almacenar los datos recogidos, hemos utilizado para ello el plugin de Excel Parallax Data Acquisition tool (PLX-DAQ) [41]. Con esto, directamente podemos imprimir cada muestra sin necesidad de tener funcionando la aplicación de Arduino y generar las gráficas que deseemos en función de los datos que nosotros queramos (pudiendo modificar también el inicio y final del intervalo).

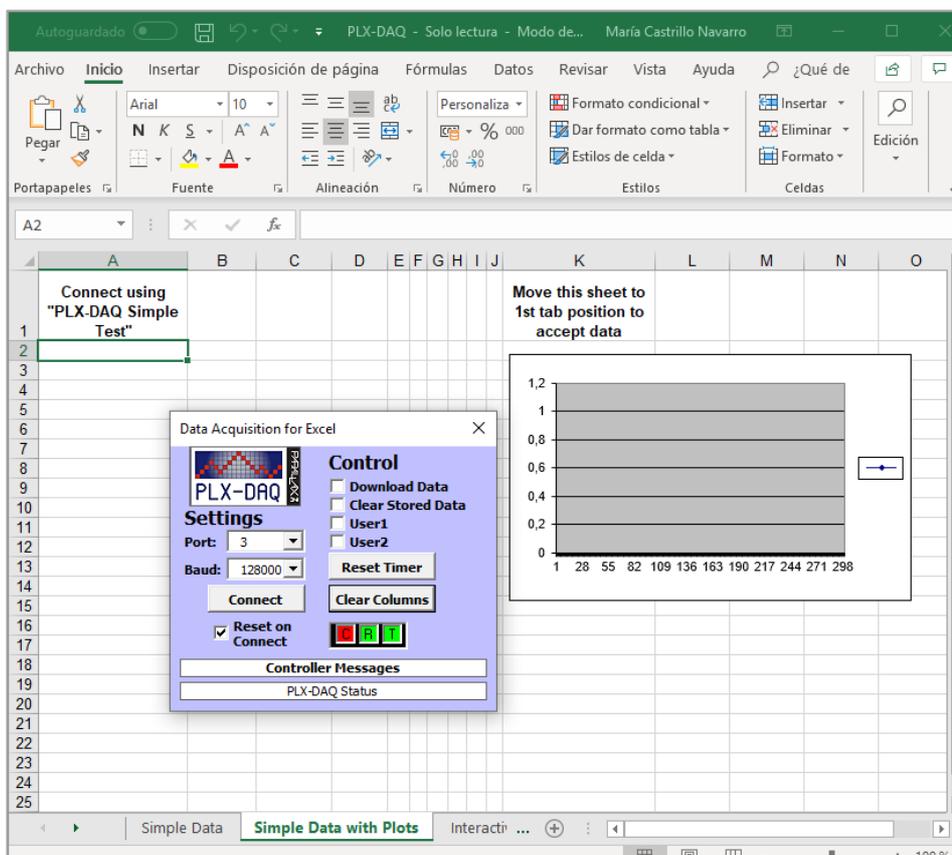


Figura 4–17. Interfaz de PLX-DAQ de Excel.

En nuestro caso, para una posterior comodidad y utilidad, decidimos mostrar en Excel: la hora, un temporizador, los valores de cada muestra del GSR Sensor y los Bpm (una tasa de muestreo de 6 muestras por segundo cada uno), el intervalo de tiempo entre latidos en milisegundos y el pulso, como puede verse en la siguiente figura:

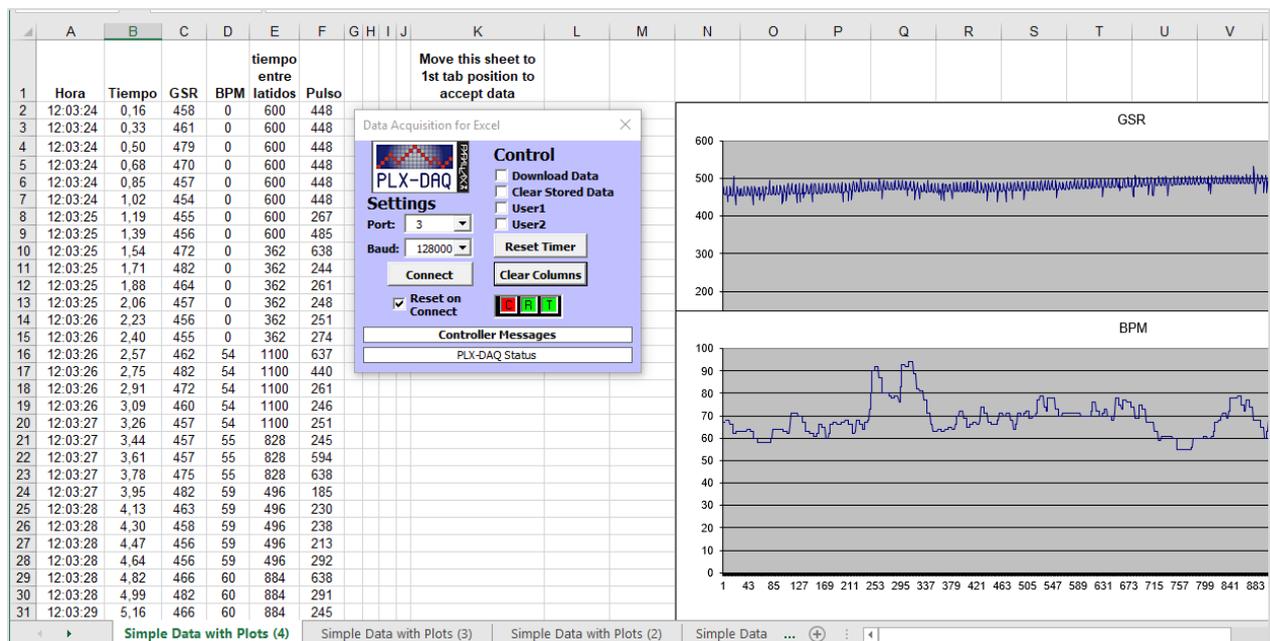


Figura 4–18. Ejemplo de adquisición de datos y posible visualización de gráficas.

4.5 Análisis de datos fisiológicos

Como comentábamos en la sección anterior, en un primer momento los datos fueron recogidos en Excel, pero a la hora de trabajar y estudiar los resultados y gráficas se consideró mejor el importar la base de datos a MatLab. El *modus operandi* para contrastar la información fue la siguiente:

- 1) Para todos los estímulos, se analizó en primer lugar la gráfica de los Bpm junto con la respiración observada en los vídeos recogidos. De este modo, podíamos diferenciar los picos pronunciados en los Bpm provocados por una respiración o, en su defecto, considerarlos artefacto, ya que el aumento circunstancial de las pulsaciones se produce de manera más suave.
- 2) Para las canciones, a esos picos o cambios suaves en la FC se les buscó un posible origen en la misma pista de audio, comprobando posibles coincidencias con cambios abruptos en la melodía o algún momento álgido de la misma.
- 3) En el caso de las películas, para los cambios en la FC se buscó coincidencia en alguna escena culmen de la película y/o momento a destacar en su BSO.
- 4) Todo lo anterior se comparó con la gráfica de la señal GSR, intentando demostrar la correlación en alguna bajada (escalofrío) con la subida de Bpm. Cualquier posible indicio mostrado en el vídeo grabado que pudiera ser catalogado como escalofrío o piloerección se contrastaba en ella. Algunas gráficas de la señal GSR presentaban demasiado ruido, por lo que se tuvo que aplicar un filtrado en esos casos antes que nada.
- 5) Tras examinar individualmente los estímulos, se estudia todos los estímulos de cada sujeto en conjunto para observar los cambios a lo largo del tiempo y posible excitación de cada persona.
- 6) Para concluir, se observa colectivamente la reacción de cada sujeto a los estímulos comunes.

5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Localización de respuestas fisiológicas

Con nuestro estudio buscábamos provocar principalmente piloerección (acompañado o no de escalofrío) en los sujetos, pero también se han presentado episodios de escalofríos y llantos. Además, se encontraron discrepancias entre lo que los sujetos dicen haber sentido con lo que finalmente se muestra en los datos obtenidos.

Para un mejor entendimiento, todas las gráficas recopiladas en este trabajo están disponibles al final del Apéndice.

5.1.1 Resultados objetivos

Si atendemos a los resultados de forma objetiva, la piloerección visible se obtuvo en 3 de los 19 ensayos realizados (15.78% de éxito) entre los cinco sujetos (véase Lista de estímulos en Apéndices) con un estímulo diferente cada uno y 6 ensayos del total provocaron lágrimas (100% de las mujeres). Con respecto a los escalofríos, se produjeron en 8 de los 19 estímulos, lo que representa un 42.10% (100% de los participantes), y se presenciaron episodios de respiración profunda en los cinco sujetos (11 ensayos de 19, es decir, en el 57.89%).

La piloerección tuvo lugar solamente en los estímulos elegidos por los propios sujetos (en la línea de Craig, 2005, Grewe et al., 2007): una película para un hombre y una canción y otra película para una misma mujer. Por otro lado, con el fragmento de película seleccionado por los experimentadores (estímulo 4: “Gladiator”), se logró inesperadamente que las participantes femeninas lloraran en algún momento durante su visionado. Asimismo, una de ellas también lloró con la pista de audio que los experimentadores escogieron. El ensayo restante que provocó lágrimas corresponde a una película elegida por el sujeto.

Los escalofríos y la respiración fuerte son las respuestas fisiológicas con mayor frecuencia de las vistas, independientemente del sexo de la persona. El primero de ellos es más común con estímulos audiovisuales: se han recogido 7 incidencias de escalofríos en 4 clips de películas (un 42.86% provocado por “Gladiator”, la cual era conocida por todos los participantes), 5 escalofríos en total en 3 canciones escogidas por los respectivos sujetos y un solo episodio para la pista de audio designada por los experimentadores en otro sujeto. Especial mención a que, de todos los escalofríos reportados, el 69.23% de ellos ocurrieron en mujeres frente al 30.77% en los hombres. De las 30 respiraciones profundas localizadas (el 60% en mujeres y el 40% en hombres), 20 tuvieron lugar en las canciones (el 60% se produjo en el primer estímulo) y las 10 restantes en las películas (un 80% provocado por “Gladiator”).

Tabla 5–1. Tabla resumen con el número de respuestas fisiológicas.

	SUJETO 1				SUJETO 2			SUJETO 3				SUJETO 4				SUJETO 5			
	C1	C2	P1	P2	C2	P1	P2	C1	C2	P1	P2	C1	C2	P1	P2	C1	C2	P1	P2
Piloerección										2						1		1	
Escalofrío	2		3	1		1			1				1		2	2			
Llanto	1			1	1		1											1	1
Resp. fuerte	7	1	1	4	4			4	3		3			1	1	1			

En la Tabla 5–1 se han plasmado todos los sucesos objetivos de piloerección, escalofríos, llantos y respiraciones fuertes descritos anteriormente. En general, puede observarse como a medida que se van sucediendo los estímulos, la probabilidad de tener algún tipo de reacción fisiológica aumenta. La piloerección varía de un 25% en el primer estímulo a un 40% en el estímulo 3 y, de manera similar, pasamos de un 25% de poder tener llanto a un 60% en el último estímulo. En cambio, hay un mayor índice (75%) de tener escalofríos y respiración más marcada en el primer estímulo que en los demás. En la segunda escucha, los escalofríos son tan solo del 20%,

que aumenta solamente hasta el 40% al llegar al último estímulo, es decir, la pista de audio preseleccionada por los investigadores (siendo totalmente desconocida para 2 personas) es la menos favorable. Para los episodios de respiración fuerte, la probabilidad no crece de forma lineal como en las respuestas anteriores, pero se mantiene entre el [40, 60]%.

Finalmente, si hacemos una comparación global del número de todas las respuestas objetivas obtenidas (53), tenemos que 35 tuvieron lugar en mujeres (66.04%) y las 20 restantes en hombres (33.96%). De estas 53 respuestas, la piloerección representa un 7.55%, el llanto un 11.32%, los escalofríos un 24.53% y las incidencias de respiración profunda un 56.60%. Con lo cual, tenemos que, ante un estímulo, es más común tener varios episodios de respiración fuerte que de piloerección o llanto, por ejemplo. Desde otro punto de vista, las canciones (C1 y C2) engloba el 54.72% de las respuestas fisiológicas objetivas y las películas el 45.28%.

A continuación, se muestra la relación entre la probabilidad de que tenga lugar una respuesta fisiológica cualquiera en un estímulo con la probabilidad, de darse el caso anterior, de que suceda la piloerección.

Tabla 5–2. Probabilidad de darse la piloerección en caso de tener alguna respuesta fisiológica en los ensayos realizados.

	C1	C2	P1	P2
Prob. de piloerección	5.26%	0%	29.99%	0%

A pesar de estos datos, no podemos llegar a garantizar que, de ocurrir la piloerección, venga acompañada de otras respuestas ni de predecir cuáles exactamente.

5.1.2 Resultados subjetivos

Desde un punto de vista subjetivo, hubo otros reportes de episodios de piloerección, pero no fueron captados por vídeo ni localizados en las muestras recogidas. Tres participantes aseguraron haber tenido piloerección en diferentes ensayos, pero no poseemos pruebas de ello, por lo que no se tomaron en cuenta en los cálculos. Al igual que dos de esas personas dijeron sentir escalofríos y no hay constancia de los mismos. De estos 5 sucesos subjetivos, en 2 de ellos comunicaron haber tenido una reacción fisiológica diferente a la que luego se mostraba en los resultados (piloerección ↔ escalofrío).

Si juntáramos las respuestas fisiológicas objetivas y subjetivas, estas últimas solo representarían un 8.62%.

5.2 Parámetros de las respuestas fisiológicas objetivas

5.2.1 Parámetros de la conductancia de la piel

A la hora de estudiar la bioseñal de la SC, nos hemos basado en el parámetro *Serial_Port_Reading* que el propio GSR Sensor recoge (vea sección 4.4.3), en lugar de trabajar con kiloohmios ($k\Omega$) o microSiemens (μS). Los valores de dicho parámetro oscilan entre [100, 600]. Instantes antes a la descarga eléctrica, *Serial_Port_Reading* aumenta ligeramente (menos de un 1%) para después disminuir notablemente en el momento de la descarga en hasta 15 puntos o más (para un caso de piloerección se ha dado un decremento de hasta $\Delta y = -57$). Ese pequeño aumento al principio permite cierta predicción ante un episodio de escalofrío o piloerección.

De los 4 casos de piloerección conseguidos, deducimos que el episodio completo dura entre $t = [8.07, 12.60]$ segundos (s), del cual el 58.70% del tiempo corresponde al tiempo de caída, y un $\Delta y = [-11.8, -57]$. Para los escalofríos tenemos que $t = [7.9, 18.3]$ s (el 52.76% es el tiempo de caída) y $\Delta y = [-8.5, -55.3]$, por lo que se puede apreciar la gran similitud con la respuesta anterior, de ahí la importancia de captar la piloerección en vídeo para que no haya dudas, pues son parámetros muy subjetivos que dependen de la potencia de la descarga eléctrica en ambos casos.

En las siguientes dos imágenes podemos ver un caso de escalofrío (Figura 5–1) y dos incidencias de piloerección (Figura 5–2).

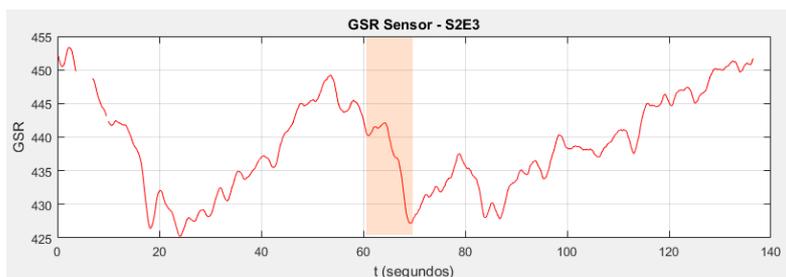


Figura 5–1. Episodio completo de escalofrío representado en naranja.



Figura 5–2. Dos episodios consecutivos de piloerección representado en verde.

5.2.2 Parámetros de la frecuencia cardíaca

La FC de una persona suele oscilar entre los 60 y los 100 latidos por minuto en estado de reposo (para deportistas de alto rendimiento no es extraño que se sitúe por debajo las 60 pulsaciones).

Si nos centramos en el estudio aislado de la variación de las pulsaciones provocada exclusivamente por la exposición ante un estímulo (Figura 5–3), en lugar de ser una consecuencia directa de otra reacción involuntaria (Figura 5–4), tenemos que la duración de tal variación oscila entre $t = [9, 54.32]$ s, donde las pulsaciones aumentan hasta entre un 5.4 y 18.9%. Sin embargo, la subida de pulsaciones originada por una respiración profunda y momentánea tiene una duración más comedida que el caso anterior ($t = [6.9, 22.43]$ s) y un incremento entre un 4.9 y 52.7%.

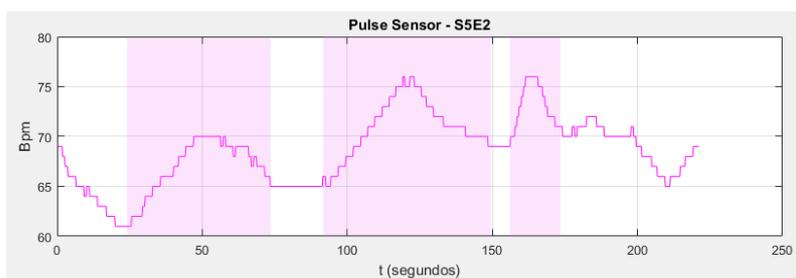


Figura 5–3. Aumento en las pulsaciones por la excitación propia del estímulo (en rosa).

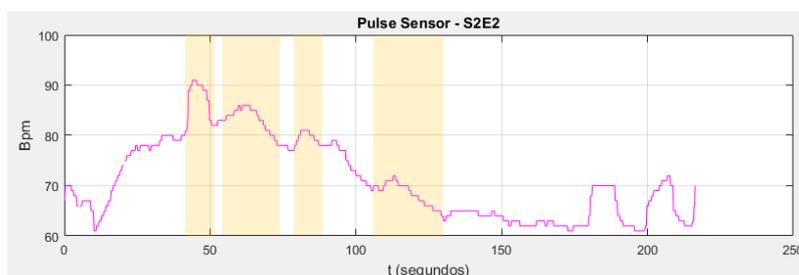


Figura 5–4. Aumento en las pulsaciones debido a respiraciones profundas (en amarillo).

5.2.3 Relación entre la frecuencia cardíaca y conductancia de la piel

Una vez estudiadas las dos bioseñales utilizadas en este experimento, se confirma la correlación existente entre ellas. Cuando se detecta alguna actividad eléctrica (sea piloerección y/o escalofrío), las pulsaciones aumentan, tendiendo a casi coincidir en el mismo instante el valor pico de los Bpm con el valor mínimo del parámetro *Serial_Port_Reading*. No obstante, el aumento en el pulso debido a la excitación audiovisual o a una respiración fuerte o profunda no se ve reflejado en la SC. Un ejemplo de ello puede verse en la Figura 5-5 y Figura 5-6.

Se observa también cómo en un estado de relajación los Bpm tienden a bajar (disminución de la FC) y el valor de *Serial_Port_Reading* de la señal GSR va aumentando. Esto puede demostrarse en la siguiente tabla:

Tabla 5-3. Tabla resumen de las medias y desviaciones típicas de las muestras recogidas por Pulse Sensor y GSR Sensor por cada estímulo de cada sujeto. Se resalta en negrita los estímulos escogidos previamente por los experimentadores y cada estímulo está representado con un mismo color para todos los sujetos.

		SUJETO 1	SUJETO 2	SUJETO 3	SUJETO 4	SUJETO 5	TOTAL
MEDIA BPM	C1	90.9465020	-	75.6354786	70.3297213	74.1152815	77.7567458
	C2	76.6635441	71.2936951	70.9647611	67.0839874	68.6014040	70.9214783
	P1	71.9575353	65.0063291	71.8406304	69.9287338	78.1091854	71.3684828
	P2	76.3353338	68.6437500	72.4791489	74.3356216	78.8408748	74.1269458
DESV. TÍPICA BPM	C1	13.2395957	-	10.0134193	9.8377178	12.6785615	11.4423871
	C2	5.8238456	8.07799045	6.1561075	3.1523272	3.5329736	5.3486488
	P1	4.3503672	5.12344054	5.3387851	10.5147234	10.0265378	7.0707708
	P2	9.1788659	4.38986075	11.6488675	9.1788974	14.3270538	10.2755614
MEDIA GSR	C1	537.289134	-	245.936772	319.986046	303.207062	351.604753
	C2	550.908910	404.308240	271.486630	307.089729	333.082121	373.375126
	P1	564.451963	438.986075	264.649494	282.965351	231.922999	356.552609
	P2	497.477930	483.084874	259.459930	255.994313	161.198740	331.443158
DESV. TÍPICA GSR	C1	25.4142713	-	14.2925482	15.9474279	11.1880676	16.7105787
	C2	11.1923619	21.7208437	9.5272109	29.8926499	6.2078069	15.7081747
	P1	7.2110944	7.0417257	11.0566866	30.0256111	16.8324066	14.4335049
	P2	50.9979485	12.4491212	4.3274096	16.0404604	12.5920596	19.2813999

Si atendemos a la Tabla 5-3, podemos ver cómo la media de los Bpm desciende del primer estímulo (C1) al segundo (C2) en todos los sujetos (exceptuando el sujeto 2, del cual no tenemos datos). Esto podría significar dos cosas: la persona empieza el experimento con cierto nerviosismo, situación normal ante algo desconocido; y/o está oyendo una canción emocionalmente poderosa elegida precisamente por ella misma. En cuanto a la señal GSR, ocurre lo contrario, el valor medio aumenta de C1 a C2, con una excepción en el sujeto 3.

A partir del segundo estímulo, hay una tendencia global a aumentar la excitación en mayor o menor medida (con las respectivas subidas en los Bpm y bajadas en la señal GSR). En las imágenes Figura 5-7 y Figura 5-8 se ha hecho una comparativa conjunta de todos los sujetos ante el segundo y cuarto estímulo y se ha dibujado para cada muestra la media. Así, puede asimilarse mejor los resultados de la tabla anterior. Se puede comprobar visualmente, por ejemplo, cómo efectivamente la media en la señal GSR de un estímulo a otro ha descendido mientras que la media en la FC ha aumentado. Se puede apreciar también en ambos estímulos cómo todos los sujetos tienden a mostrar cambios parecidos en los mismos instantes de tiempo.

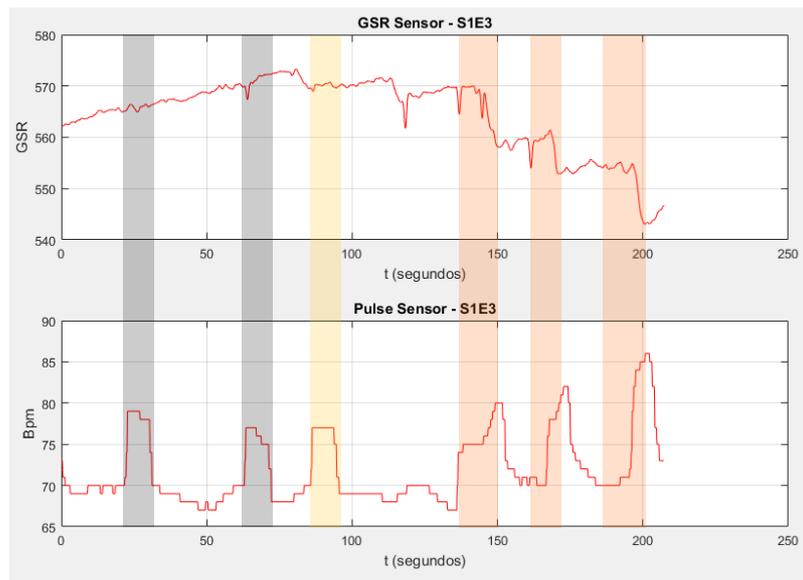


Figura 5–5. Demostración de la relación entre la SC y la FC (1). En la gráfica de los Bpm, hay dos picos representados en gris oscuro no reconocidos por ninguna de las respuestas fisiológicas estudiadas, por lo que se consideran artefacto.

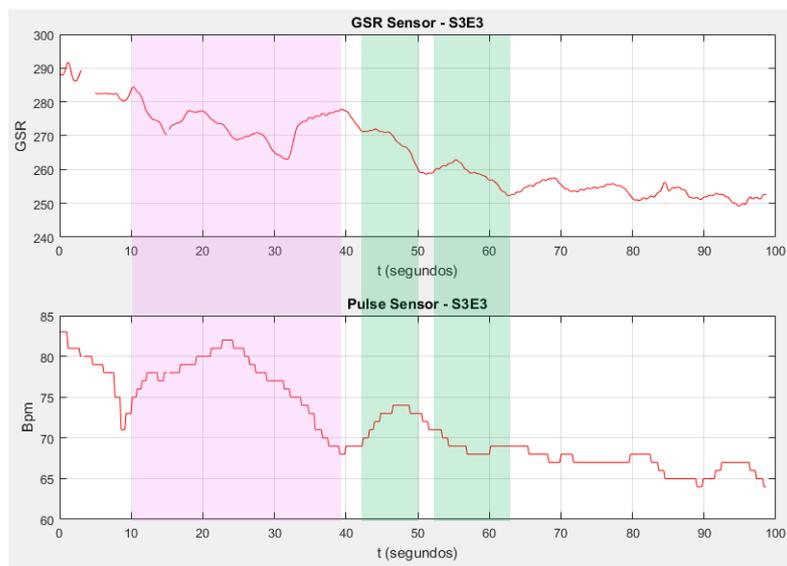


Figura 5–6. Demostración de la relación entre la SC y la FC (2).

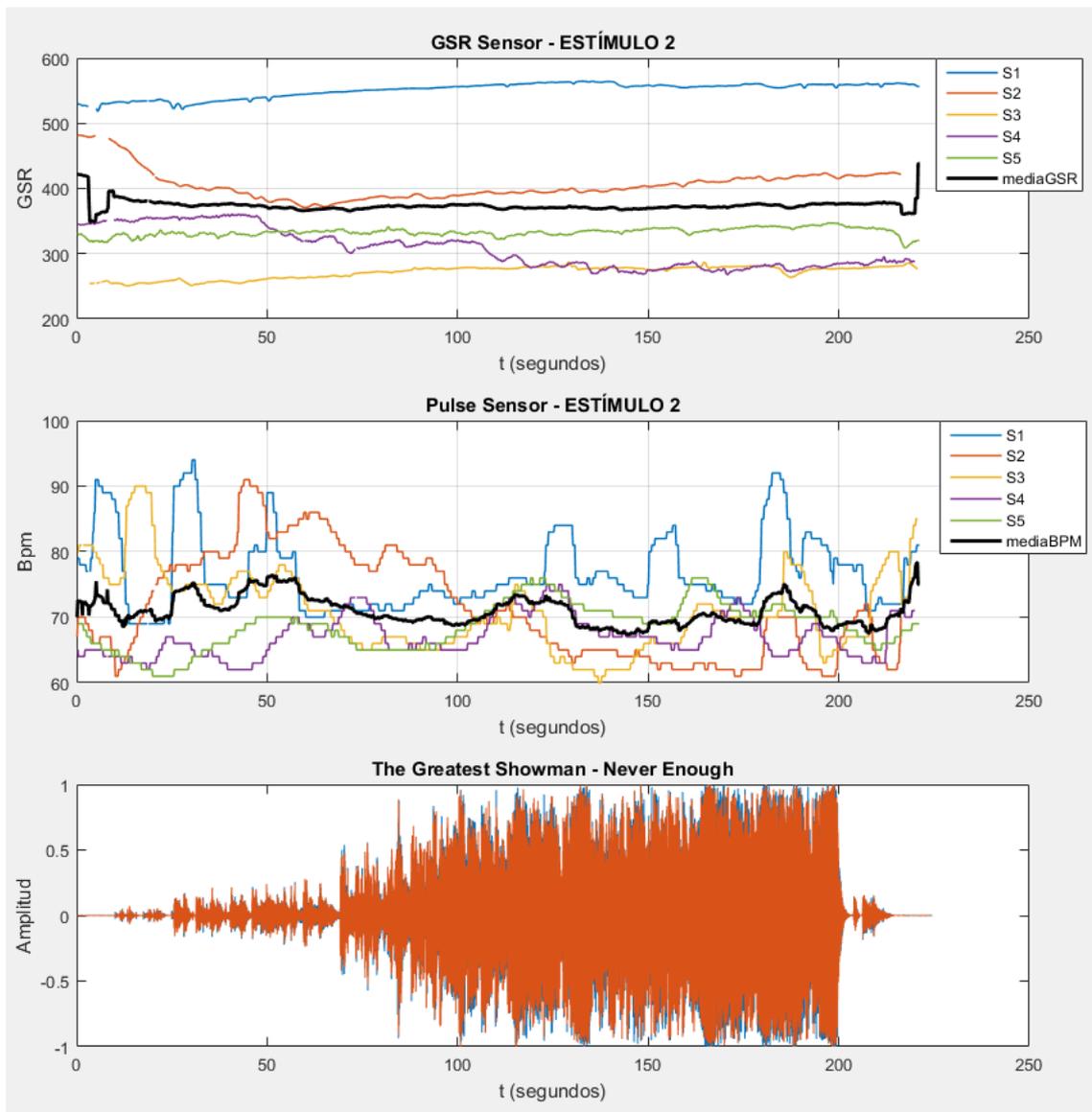


Figura 5–7. Observación conjunta de los diferentes cambios en la EDA y FC de todos los sujetos ante el estímulo 2. En negrita se muestra la media de ambas señales en cada instante.

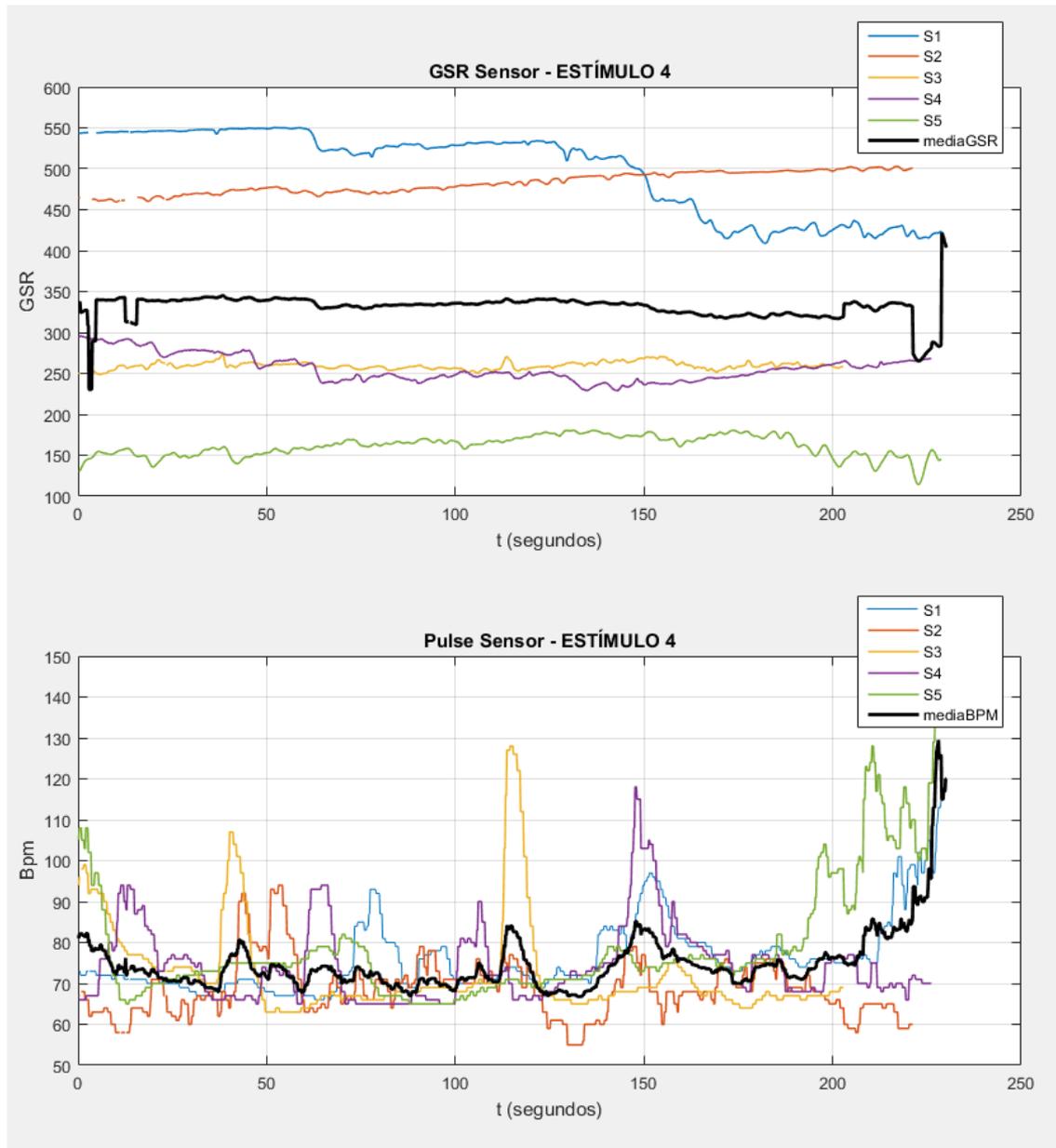


Figura 5–8. Observación conjunta de los diferentes cambios en la EDA y FC de todos los sujetos ante el estímulo 4. En negrita se muestra la media de ambas señales en cada instante.

5.2.4 Relación entre la frecuencia cardíaca y la música

Observando las gráficas también se ha percibido cómo las pulsaciones (sin cambios apreciables en la SC) suelen presentar picos en momentos de cambios de ritmo notables o bruscos o de clímax en las pistas de audio. Para acompañar esta hipótesis tenemos la siguiente imagen:

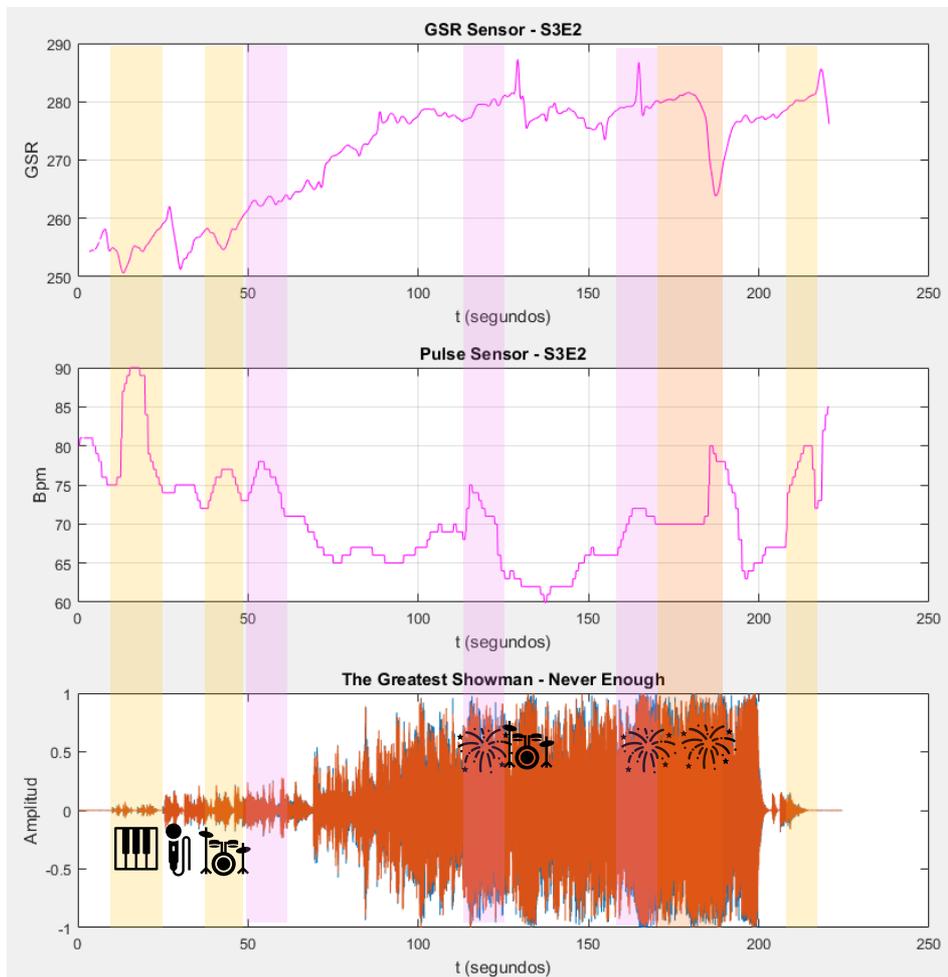


Figura 5-9. Gráfica comparativa de la EDA, FC y la propia canción.

En ella, se han destacado (en sus respectivos colores) las respuestas fisiológicas localizadas en el análisis de las muestras. También se han señalado con diversos símbolos sobre la onda acústica todos los cambios destacados en el ritmo de la pista musical: parte instrumental (🎹), momento en el que se empieza a cantar (🎤), golpes fuertes de percusión (🥁), y momento donde la canción llega a su clímax (🎆).

Como se aprecia, las respiraciones profundas encontradas, así como el escalofrío y un aumento en las pulsaciones coinciden con algunos cambios de ritmo ya detallados.

5.3 Discusión

El principal motivo de este trabajo era poder provocar en pacientes piloerección mediante estímulos audiovisuales. No solo se ha llegado a conseguir, sino que también han aparecido otras respuestas fisiológicas que han ayudado a comprender el comportamiento humano y estas reacciones involuntarias.

El estudio de todas ellas se ha hecho en función del género de la persona, del tipo de estímulo (si pista de audio o fragmento de película con su BSO), de quién escogió el estímulo (si previamente los investigadores o el sujeto en cuestión) y de si el estímulo reproducido era conocido o no. Además, se hizo una distinción entre la objetividad y subjetividad de las respuestas.

En relación a esto y, a nivel general, gracias a los datos obtenidos en la sección 5.1.1, se hace presente que las

mujeres muestran una mayor sensibilidad que los hombres (66.04% frente al 33.96%) [11] [12]. Por otro lado, el grupo de control desconocía gran parte de las canciones ofrecidas en la Lista B e incluso demandaban una mayor presencia de música clásica, pero esto no ha impedido que el primer estímulo (C1) cumpliera su función de evocar emociones fuertes y un caso de piloerección. La Lista A, en cambio, sí les era familiar en su totalidad, ofreciendo también resultados muy favorables como se demostraba en la Tabla 5-1. Como conclusión de esto, se tiene que, en una persona, un estímulo emocionalmente fuerte y conocido tiene más probabilidades de causar una respuesta fisiológica de las estudiadas que uno desconocido e igualmente poderoso (ya visto en las Tabla 5-1 y Tabla 5-2), pero no podemos confirmar con nuestros datos que las películas evoquen mayor estimulación que las pistas de audio, como concluían los estudios de M. Benedek et al. (2011) y M. Sachs (2016).

Para la recogida y análisis de los datos, se ha usado una evaluación objetiva de los mismos, pero esto a su vez puede ser inexacto. Las encuestas subjetivas realizadas a los sujetos tras cada estímulo sobre lo que habían sentido evidenciaron ciertas incongruencias con las muestras analizadas. Si nos centramos en la piloerección y en los escalofríos, solo se tienen pruebas visuales de un brazo y medidas de la EDA del otro. Es por ello que, si alguna de esas dos reacciones hubiera ocurrido en otro lugar, como en la zona de las cervicales o a lo largo de la columna vertebral, difícilmente haya podido ser captado por nuestro sensor.

Otro tema importante a aclarar es el estado de la persona en el momento del experimento. Los datos de la Tabla 5-3 y Tabla 5-1 evidencian síntomas de cierto nerviosismo al empezar cada sujeto el primer ensayo. El nerviosismo puede venir acompañado de un aumento en la FC, mayor sudoración (menor GSR), aumento en la FR, etc., mismas respuestas fisiológicas que las causadas por la excitación musical. La diferencia radica, en este caso, en que esta última es provocada deliberadamente y es un sentimiento positivo (placer-recompensa, sección 3.3), todo lo contrario que el nerviosismo. De este modo, como comentábamos en la página anterior en relación a los datos de la Tabla 5-3, el descenso en la media de los Bpm y el aumento en el valor de la señal GSR en el segundo estímulo, en comparación con el primero, reflejan una cierta relajación. A partir de este punto, el nivel de excitación causada por la sucesión de estímulos *va in crescendo*, confirmando el estudio de M. Benedek et al. (2011) de que el estado de la persona en un estímulo anterior afecta al estado de la misma ante el estímulo posterior.

6 CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

En este trabajo se ha puesto de manifiesto las bioseñales principales elegidas para el estudio de la piloerección y los sensores utilizados para ellos. Así como el sistema de monitorización empleado en el experimento realizado.

Los resultados comentados en el apartado anterior siguen la estela de investigaciones anteriores, demostrando la relación entre la SC y la FC, así como que los estímulos personalmente elegidos por cada sujeto tienen mayor probabilidad de provocar emociones intensas en la persona y que las mujeres tienen mayor predisposición a sentirlas. Aunque es cierto que es necesario generalizar aún más los resultados con un mayor número de participantes y poder deducir, por ejemplo, si realmente los estímulos que incluyan tanto información auditiva como visual son más poderosos emocionalmente que las pistas exclusivamente de audio. Ante esta idea, nos enfrentamos al problema de la adquisición de una excesiva cantidad de datos. A pesar de que este estudio solo se haya hecho para cinco sujetos en una prueba de control, la cantidad de datos a manejar es bastante grande y esto es algo a tener en cuenta a la hora de realizar un estudio ampliado del mismo (para el que ya tenemos permiso del Comité Ético).

Si bien los objetivos puestos en este proyecto se han cumplido, el motivo de la prueba de control también fue el buscar perfeccionar el sistema empleado de cara a las siguientes investigaciones. En primer lugar, la sincronización entre los sistemas de grabación y adquisición de datos puede no ser perfecta, pues fue totalmente manual. Se carecía de un sistema de sincronismo. Para solucionar esto, podría introducirse una señal de aviso mediante audio por un pin analógico de la placa de Arduino y que fuera captado a su vez por la cámara. Además, el plugin de Excel usado no permite recuperar datos en caso de borrarlos accidentalmente (situación ocurrida para el primer estímulo en el segundo sujeto). En segundo lugar, pese a que los resultados otorgados por Pulse Sensor son bastante precisos y satisfactorios, necesita ser pulsado con una cierta (y exacta) presión. A la mínima separación de la yema del dedo con el sensor óptico se deja de tomar muestras. Por ello, sería conveniente usar quizá otro tipo de sensor con la misma función u otro con mejor sistema de sujeción. En tercer lugar, el GSR Sensor toma diferente rango de valores según se mida en la punta de los dedos o en la falange. Nosotros lo pusimos en la falange media asegurando también tener mayor adherencia del sensor a la piel. Sea como fuere, la señal fue filtrada para eliminar el exceso de ruido mostrado en algunos casos. Adicionalmente, se quiso también emplear un microscopio enfocando al brazo contrario al de la cámara, pero había complicaciones para grabar una zona concreta ya que era difícil mantener el enfoque todo el tiempo. Por último, se desea provocar un mayor índice de probabilidad de que ocurra la piloerección (>15.78% de éxito). Una forma de lograrlo sería cambiando el segundo estímulo (“*Never Enough*” de “*The Greatest Showman*”) por otra canción quizá más conocida por los oyentes, pero igualmente poderosa.

Por otro lado, como gran parte de este trabajo está basado en el estudio de la actividad del SN y en la contracción del músculo, otra posible bioseñal a tener en cuenta es el EMG, pero al ser un método invasivo quedaba fuera de nuestro alcance.

Para concluir, las variaciones encontradas en la FC, en la EDA, así como en la FR, pueden servir no solo para el estudio de la piloerección o excitación musical, sino también para profundizar en el origen de otras emociones como el estrés o el nerviosismo, que presentan respuestas fisiológicas comunes.

APÉNDICES

Cronograma



Duración del plan

ACTIVIDAD	INICIO	DURACIÓN	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Buscar información previa acerca del tema	2	2												
Estado del arte	7	1												
Marco teórico	7	1												
Obtención de los sensores	4	4												
Elaborar los códigos en Arduino	7	2												
Elaboración de la BBDD	4	6												
Elaboración del anuncio	7	1												
Selección de los voluntarios	8	2												
Realización de prueba de control	9	1												
Implementación y metodologías	9	2												
Análisis de los resultados obtenidos	9	2												
Póster	11	1												

Cuestionario

Aquí se incluye las preguntas realizadas a los voluntarios antes de ser seleccionados (a parte de los datos de contacto como son el nombre, apellidos y dirección de correo electrónico):

1. ¿Qué edad tienes?
 - Menos de 20
 - Entre 20 y 30
 - Entre 30 y 50
 - Entre 50 y 75
 - Más de 75
2. ¿Te dedicas profesionalmente a la música?
 - Sí/No
3. ¿Sabes tocar algún instrumento?
 - Sí/No
4. ¿Qué género(s) musical(es) te gusta escuchar? (Respuesta libre)
5. ¿Con cuánta frecuencia oyes música?
 - A diario
 - 2-5 veces por semana
 - Un par de veces al mes
 - Apenas escucho música
 - Otros (Respuesta libre)
6. ¿En qué condiciones te gusta oír música?
 - Trabajando/estudiando
 - En mi tiempo libre
 - Mientras practico deporte
 - Otras (Respuesta libre)
7. Cuando escuchas una canción...
 - Es fácil que te emociones
 - Solo en circunstancias concretas te sientes emocionado
 - No sueles tener emociones
 - No quiero contestar

Póster



Validación de un sistema biométrico para la detección de piloerección

María Castrillo Navarro¹, Mar Elena Pérez¹, Alejandro Barriga Rivera²
¹ Dpto. Ingeniería Electrónica, Universidad de Sevilla (España), marel@us.es; ² The University of Sydney (Australia)



Introducción

El fenómeno de la **piloerección** se origina gracias a diversas bioseñales que se envían por las terminaciones nerviosas del cuerpo. Como consecuencia directa, las fibras musculares lisas localizadas en la base del folículo piloso se contraen, provocando el levantamiento de cada capilar de forma involuntaria y un estrechamiento de los vasos sanguíneos contiguos, lo que se traduce en un aumento de la presión sanguínea. A la par, tiene lugar una despolarización, por lo que se tiene en cuenta también las glándulas sudoríparas localizadas en los dedos de las manos a la hora de tomar muestras para estudiar la **actividad eléctrica de la piel**.

Debido a todo esto, se ha optado por tomar medidas de la **frecuencia cardíaca** y de la **conductividad de la piel** (ligada al nivel de sudoración y a la actividad exodérmica). Se han identificado los eventos, buscando alguno destacado en las muestras, de forma sincronizada con las posibles reacciones fisiológica en la piel, como son la piloerección o, en su defecto, el escalofrío.

Objetivo

Provocar en el paciente escalofríos y/o piloerección al oír varias piezas musicales y visionar fragmentos de películas con su correspondiente banda sonora, para así demostrar la relación existente entre la música y la conducta humana a partir de la ya mencionada piloerección en una primera prueba de control, para establecer los parámetros biológicos de interés para medidas o estudios posteriores.

Metodología

Se busca determinar los parámetros de interés y validar el conjunto de sensores integrados, así como la correcta sincronización de los eventos y sus síntomas asociados. Para ello:

1. Se realizó un breve cuestionario a voluntarios para establecer los niveles de sensibilidad ante la música y establecer umbrales de estímulos.
2. En base a ello, se eligió a 5 sujetos para el experimento (3 mujeres y 2 hombres).
3. A los sujetos de estudio se les presentó una lista de 49 canciones (de duración no mayor a 6') y otra de 16 películas (duración de hasta 4'). Los experimentadores eligieron previamente un estímulo de cada lista, los cuales fueron eliminados de ellas (para su uso posterior) y, de forma análoga, eligieron los sujetos.

En total, **4 estímulos** (C1, C2, P1, P2) fueron reproducidos por persona, empezando por los seleccionados por esta y después los preseleccionados por los experimentadores (para poder comparar también los resultados bajo estímulos idénticos). Primero las canciones (Ci) y acto seguido las películas (Pi).

Instrumentos de medida

	Medida	Unidades	Modo de empleo	Gráfica	Características
Pulse Sensor 	Sensor de pulso de frecuencia cardíaca para Arduino que hemos utilizado para medir los pulsos por minuto.	Bpm (<i>pulsos por minuto</i>)			Una FC media se establece entre las 60-80 pulsaciones. Puede aumentar en un 20-30% o más ante una emoción intensa o respiración profunda.
GSR Sensor 	Permite medir la respuesta galvánica de la piel aprovechando sus propiedades eléctricas ligada a la sudoración	Resistencia: kΩ Conductancia: μSiemens			El escalofrío y piloerección se caracteriza por una pronunciada bajada en la gráfica. Asimismo, aumenta su valor en estado de reposo. No se destacan cambios apreciables en caso de respiración profunda.

Resultados

	Pulsos (Bpm)	Resistencia (kΩ)
C ₁	77,75	107,688
C ₂	70,92	127,845
P ₁	71,36	111,853
P ₂	74,12	93,385

En todo momento, Pulse Sensor y GSR Sensor recogían 6 muestras simultáneamente. De todos estos datos adquiridos, en la tabla adyacente se muestran las medias calculadas de los 5 sujetos por estímulo.

Si observamos las gráficas anteriores, se aprecia como las señales de ambos sensores presentan proporcionalidad inversa. Si nos fijamos en la tabla, del primer al segundo estímulo hay una cierta relajación, lo que se traduce en una disminución de FC y, a su vez, un aumento en la resistencia. Todo lo contrario si consideramos los datos desde el segundo estímulo en adelante, que se aprecia una cierta excitación en aumento en los sujetos.



Las mujeres demostraron tener una mayor sensibilidad en este experimento. Frecuentaron un mayor número de episodios de escalofrío, piloerección y/o llanto que los hombres durante los estímulos.

Lista de estímulos

En naranja aparece el estímulo elegido por los experimentadores.

Lista A: Fragmentos de películas

ID	Título de la película	Duración	Prob. de selección (%) ⁵	Prob. de escalofrío (%) ⁶	Prob. de piloerección (%) ⁷
F01	2001: Odisea en el Espacio	01:39	40	0	100
F02	Apocalypse Now	03:56	0	0	0
F03	Braveheart	01:33	0	0	0
F04	El Rey León	04:08	0	0	0
F05	E.T.	02:13	20	100	0
F06	Forrest Gump	02:35	0	0	0
F07	Gladiator	03:49	100	40	0
F08	Ghost	03:35	20	100	0
F09	La Ciudad de las Estrellas: La La Land	04:14	0	0	0
F10	Los Miserables	04:15	0	0	0
F11	Los Vengadores	01:10	0	0	0
F12	Mulán	01:37	0	0	0
F13	Rocky II	02:37	0	0	0
F14	Rocky III	03:38	0	0	0
F15	Rogue One: una historia de Star Wars	01:45	0	0	0
F16	Star Wars: Episodio V - El Imperio contraataca	00:52	0	0	0
F17	The Matrix	03:58	20	0	0

⁵ Probabilidad de que el estímulo sea elegido de la lista.

⁶ Probabilidad de que el estímulo provoque una experiencia subjetiva de escalofríos.

⁷ Probabilidad de que el estímulo provoque piloerección visible.

Lista B: Canciones personalizadas

En la tercera columna, en el tiempo marcado se incluye los 20 segundos de silencio que incluye cada pista.

ID	Artista/Película/Serie - Título	Duración	Prob. de selección (%) ⁸	Prob. de escalofrío (%) ⁹	Prob. de piloerección (%) ¹⁰
M01	A Star Is Born (Lady Gaga & Bradley Cooper) - Shallow	03:54	0	0	0
M02	Adele - Set Fire To The Rain	04:18	0	0	0
M03	Aerosmith - I don't Wanna Miss A Thing	05:13	0	0	0
M04	Anastacia - Left Outside Alone	04:07	0	0	0
M05	Avril Lavigne - Keep Holding On	04:18	0	0	0
M06	Begin Again (Adam Levine) - Lost Stars	04:45	0	0	0
M07	Beyoncé - Crazy In Love (live version)	04:24	20	100	100
M08	Bonnie Tyler - Total Eclipse of the Heart	05:00	0	0	0
M09	Céline Dion - My Heart Will Go On	04:54	0	0	0
M10	Christina Aguilera - Hurt	04:20	0	0	0
M11	Coldplay - The Scientist	05:27	20	100	0
M12	Demi Lovato - Skyscraper	03:58	0	0	0
M13	Drowning Pool - Bodies (Let The Bodies Hit The Floor)	03:38	0	0	0
M14	Enya - Only Time	03:53	0	0	0
M15	Europe - The Final Countdown	05:27	0	0	0
M16	Evanescence - Bring Me To Life	04:15	0	0	0
M17	Game of Thrones - Opening theme	01:58	40	100	0
M18	Green Day - Boulevard Of Broken Dreams	04:39	0	0	0
M19	Imagine Dragons - Radioactive	03:25	0	0	0
M20	Il Volo - Caruso	05:37	20	100	0
M21	John Legend - All Of Me	04:55	0	0	0
M22	Kansas - Dust In The Wind	03:39	0	0	0
M23	Lady Antebellum - Need You Now	04:12	0	0	0
M24	Lana del Rey - Young And Beautiful	04:11	0	0	0
M25	Linkin Park - Numb	03:24	0	0	0
M26	Loreen - Euphoria (acoustic version)	04:24	0	0	0
M27	Madonna - Frozen	*04:45	0	0	0
M28	Michael Bublé - Feeling Good	04:13	0	0	0
M29	Michael Jackson - We Are The World	*05:17	0	0	0
M30	Miley Cyrus - The Climb	04:11	0	0	0
M31	Miley Cyrus - When I Look At You	04:25	0	0	0
M32	Nickelback - How You Remind Me	04:00	0	0	0
M33	Pirates of the Caribbean - Theme (Hans Zimmer)	01:43	0	0	0
M34	Prince - Purple Rain	04:51	0	0	0
M35	Queen - Who Wants To Live Forever	05:32	0	0	0
M36	Regina Spektor - The Call	03:22	0	0	0
M37	Rihanna - Stay	04:18	0	0	0
M38	Seal - Kiss From A Rose (Batman Forever OST)	03:54	0	0	0
M39	Scorpions - Still Loving You	*05:22	0	0	0
M40	The Beatles - Let It Be	04:21	0	0	0
M41	The Cranberries - Zombie	05:24	0	0	0
M42	The Greatest Showman - Never Enough	03:44	100	20	0
M43	Toni Braxton - Unbreak My heart	04:44	0	0	0
M44	Twenty One Pilots - Heathens (Suicide Squad OST)	03:29	0	0	0
M45	Whitney Houston - I Will Always Love You	04:48	0	0	0
M46	Malú - Aprendiz (live version)	03:59	0	0	0
M47	Mónica Naranjo - Europa	*05:33	0	0	0
M48	Pablo Alborán - Solamente Tú	04:19	0	0	0
M49	Pablo López - El Patio	04:51	0	0	0
M50	Pastora Soler - Quédate Conmigo (live version)	03:24	0	0	0

⁸ Probabilidad de que el estímulo sea elegido de la lista.

⁹ Probabilidad de que el estímulo provoque una experiencia subjetiva de escalofríos.

¹⁰ Probabilidad de que el estímulo provoque piloerección visible.

* La pista de audio fue acertada.

Manuales de Dispositivos

Arduino Uno R3



Descripción del pin

Categoría Pin	Nombre del pin	Detalles
Potencia	Vin, 3.3V, 5V, GND	Vin: Voltaje de entrada a Arduino cuando se utiliza una fuente de alimentación externa. 5V: Fuente de alimentación regulada utilizada para alimentar el microcontrolador y otros componentes en la placa. 3.3V: alimentación de 3.3V generada por el regulador de voltaje a bordo. El consumo máximo de corriente es de 50mA. GND: pasadores de tierra.
Reset	Reset	Restablece el microcontrolador.
Pines analógicos	A0 – A5	Se utiliza para proporcionar entrada analógica en el rango de 0-5V
Pines de entrada/salida	Pines digitales 0 - 13	Se puede utilizar como pines de entrada o salida.
Serial	0(Rx), 1(Tx)	Se utiliza para recibir y transmitir datos serie TTL.
Interrupciones externas	2, 3	Para desencadenar una interrupción.
PWM	3, 5, 6, 9, 11	Proporciona salida PWM de 8 bits.
SPI	10 (SS), 11 (MOSI), 12 (MISO) y 13 (SCK)	Se utiliza para la comunicación SPI.
LED incorporado	13	Para encender el LED incorporado.
TWI	A4 (SDA), A5 (SCA)	Se utiliza para la comunicación TWI.
A _{REF}	A _{REF}	Para proporcionar tensión de referencia para la tensión de entrada.

Especificaciones técnicas de Arduin Uno

Microcontrolador	ATmega328P
Tensión de funcionamiento	5V
Voltaje de entrada (recomendado)	7-12V
Voltaje de entrada (límite)	6-20V
Pines de E/S digitales	14 (de los cuales 6 proporcionan salida PWM)
Pines de E/S digitales PWM	6
Pines de entrada analógica	6 (A0-A5)
Corriente de DC por pin de E/S	20 mA
Corriente de DC para pin de 3.3V	50 mA
Memoria Flash	32 KB (ATmega328P) de los cuales 0,5 KB utilizados por bootloader
SRAM	2 KB (ATmega328P)
EPROM	1 KB (ATmega328P)
Frecuencia (Velocidad del reloj)	16 MHz
LED BUILTIN	13
Longitud	68,6 mm óptico
Ancho	53,4 mm
Peso	25 g

Advertencias

El Arduino Uno tiene un polifusible reajutable que protege los puertos USB de su computadora de cortocircuitos y sobrecorriente. Aunque la mayoría de los ordenadores proporcionan su propia protección interna, el fusible proporciona una capa adicional de protección. Si se aplican más de 500 mA al puerto USB, el fusible romperá automáticamente la conexión hasta que se retire la sobrecarga o cortocircuito

Pulse Sensor

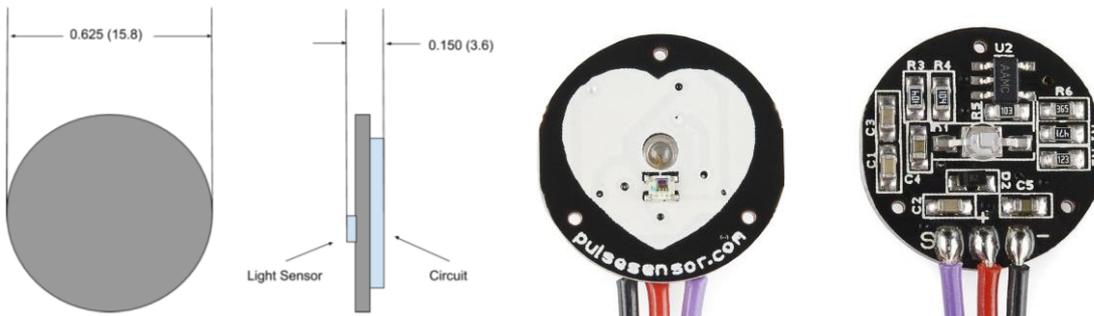
Descripción General	Características
Pulse Sensor es el sensor óptico de frecuencia cardíaca (PPG) original de bajo costo para Arduino y otros microcontroladores. Está diseñado y fabricado por <i>World Famous Electronics</i> , que mantiene activamente extensos proyectos y códigos de ejemplo en: www.pulsesensor.com	<ul style="list-style-type: none"> • Incluye accesorios del kit para lecturas de sensores de alta calidad. • Diseñado para Plug and Play • Tamaño pequeño e integrable en wearables. • Funciona con cualquier MCU con un ADC • Trabaja con 3 voltios o 5 voltios • Biblioteca Arduino bien documentada.

Índices absolutos máximos	Min	Tipo	Max	Unidad
Rango de temperatura de funcionamiento	-40		+85	°C
Rango de voltaje de entrada	3		5.5	V
Rango de voltaje de salida	0.3	Vdd/2	Vdd	V
Corriente de suministro	3			mA

Componentes del kit Pulse Sensor



Tamaño del sensor en pulgadas(mm) y conexiones

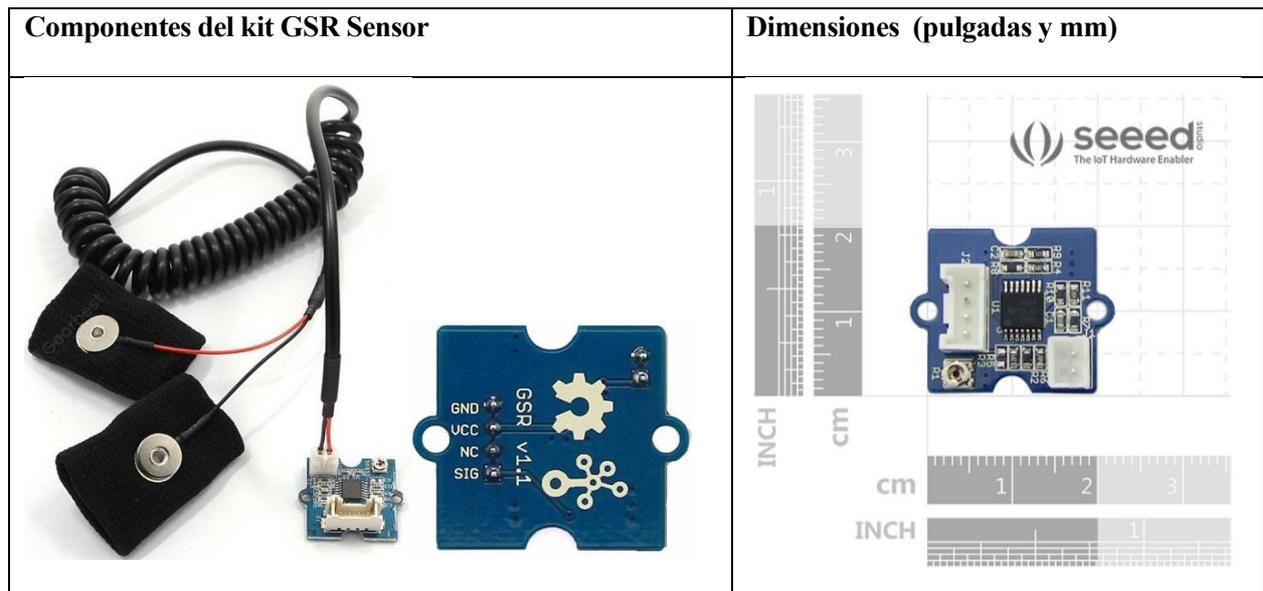


Especificaciones del cable

<ul style="list-style-type: none"> • Longitud 610 mm (24 pulgadas) • Calibre 26 • Aislamiento de PVC, estilo de cinta • Terminación del encabezado masculino <ul style="list-style-type: none"> ○ Cable negro = GND ○ Red Wire = Vdd ○ Cable púrpura = señal de pulso 	
---	--

El sensor de pulso está certificado como Código Abierto con la *Open Source Hardware Association*



GSR Sensor

Parámetros	Valor/Rango
Dimensiones	24mm x 20mm x 9.8mm
Tensión de funcionamiento	3.3V/5V
Sensibilidad	Ajustable mediante potenciómetro
Señal de entrada	Resistencia, NO Conductividad
Señal de salida	Voltaje, valor analógico
Material de contacto con los dedos	Niquel
Peso	29g

Códigos de Arduino

A la hora de implementar el correspondiente código de los sensores en Arduino, hemos creado un proyecto formado por tres ficheros: el primero de ellos como main (“SENSORES_main.ino”), que incluye la librería, la definición de constantes y variables, las funciones void setup() y void loop() y las llamadas a los otros 2 ficheros; estos son “PulseSensor_BPM.ino” y “GSR_sensor.ino”.

SENSOR_main.ino

```
#define USE_ARDUINO_INTERRUPTS true
#include <PulseSensorPlayground.h>

const int OUTPUT_TYPE = SERIAL_PLOTTER;

/*
  Pinout:
  PIN_INPUT = Analog Input. Connected to the pulse sensor purple (signal) wire.
  PIN_BLINK = digital Output. Connected to an LED (and 220 ohm resistor)that
              will flash on each detected pulse.
  PIN_FADE = digital Output. PWM pin onected to an LED (and resistor)that
              will smoothly fade with each pulse.
  NOTE: PIN_FADE must be a pin that supports PWM. Do not use pin 9 or 10,
        because those pins' PWM interferes with the sample timer.
*/

/*
*****
* PINES DE PULSE SENSOR ** PINES DE GSR *
* MARRON S A0          ** GND BLACK/GND *
* ROJO + VCC           ** 5V RED/VCC *
* NARANJA - GND        ** A2 YELLOW/SIG *
*                      ** NC WHITE/RED LED *
*****
*/

/*
GSR Sensor mano derecha
  Dedo corazón -> cable rojo
  Dedo índice -> cable negro
*/

/* PulseSensor mano izquierda -> dedo índice */

/*****/
const int PIN_INPUT = A0; // entrada pulse sensor
const int PIN_BLINK = 13; // LED1
const int PIN_FADE = 5; // LED2
const int THRESHOLD = 550; // Adjust this number to avoid noise when idle
/*****/
const int GSR=A2; // entrada GSR sensor
int sensorValue=0;
int gsr_average=0;
/*****/
```

```
/*
  All the PulseSensor Playground functions.
*/
  PulseSensorPlayground pulseSensor;

void setup(){
  //Serial.begin(115200); //velocidad en baudios serie para arduino
  Serial.begin(128000); //velocidad en baudios serie para excel

  //líneas necesarias para imprimir los datos en una hoja excel
  Serial.println("CLEARDATA");
  Serial.println("LABEL,Hora,Tiempo,GSR, BPM, tiempo entre latidos, Pulso"); //etiquetas
  para las columnas de excel
  Serial.println("RESETTIMER");

  pulseSensor.analogInput(PIN_INPUT);
  pulseSensor.blinkOnPulse(PIN_BLINK);
  pulseSensor.fadeOnPulse(PIN_FADE);

  pulseSensor.setSerial(Serial);
  pulseSensor.setOutputType(OUTPUT_TYPE);
  pulseSensor.setThreshold(THRESHOLD);

  if (!pulseSensor.begin()) { //en el caso de que el PulseSensor no se inicie
    /*
      PulseSensor initialization failed,
      likely because our particular Arduino platform interrupts
      aren't supported yet.

      If your Sketch hangs here, try ProcessEverySample.ino,
      which doesn't use interrupts.
    */
    for(;;) {
      // Flash the led to show things didn't work.
      digitalWrite(PIN_BLINK, LOW);
      delay(100);
      digitalWrite(PIN_BLINK, HIGH);
      delay(100);
    }
  }
}

void loop(){
  Serial.print("DATA, TIME, TIMER, "); //imprime en excel la hora y un temporizador
  //llamamos previamente a la funcion gsr con las instrucciones del GSR Sensor e imprimimos
  el valor:
  Serial.print(gsr());
  Serial.print(",");
  //llamamos previamente a la funcion pulse con las instrucciones del PulseSensor e
  imprimimos los valores indicados
  Serial.print(pulse());
  Serial.println("");
}
```

GSR_sensor.ino

```
int gsr(){ //función para GSR Sensor

  long sum=0;
  for(int i=0;i<10;i++) //hacemos el promedio entre 10 muestras para eliminar posible fallo
  {
    sensorValue=analogRead(GSR);
    sum += sensorValue;
    delay(15);
  }
  gsr_average = sum/10;
  //Serial.print(gsr_average); //dato a mostrar por pantalla
}
```

PulseSensor_BPM.ino

```
int pulse(){ //función para PulseSensor

  /*
   * Introducimos un cierto retraso entre muestra y muestra a enviar
   * debido a que la velocidad de transmisión no admite tantas E/S
   */
  delay(20);
  pulseSensor.outputSample();
  pulseSensor.outputBeat();

  /*
   * Si se ha tenido un latido desde la última vez que se comprobó,
   * se escribirá la información por latido en serie.
   */
  if (pulseSensor.sawStartOfBeat()) {
    pulseSensor.outputBeat();
  }
}
```

Gráficas del Pulse Sensor y GSR Sensor

Las gráficas son generadas desde MatLab. Las del primer estímulo aparecerán en color celeste, magenta para el segundo estímulo, rojo para el tercero y negro para el cuarto. Se compararán a la vez el GSR Sensor (parte superior) y el Pulse Sensor (parte inferior). Además, si procede, se añadirá la forma de onda de las canciones (C1 y C2).

Sujeto 1

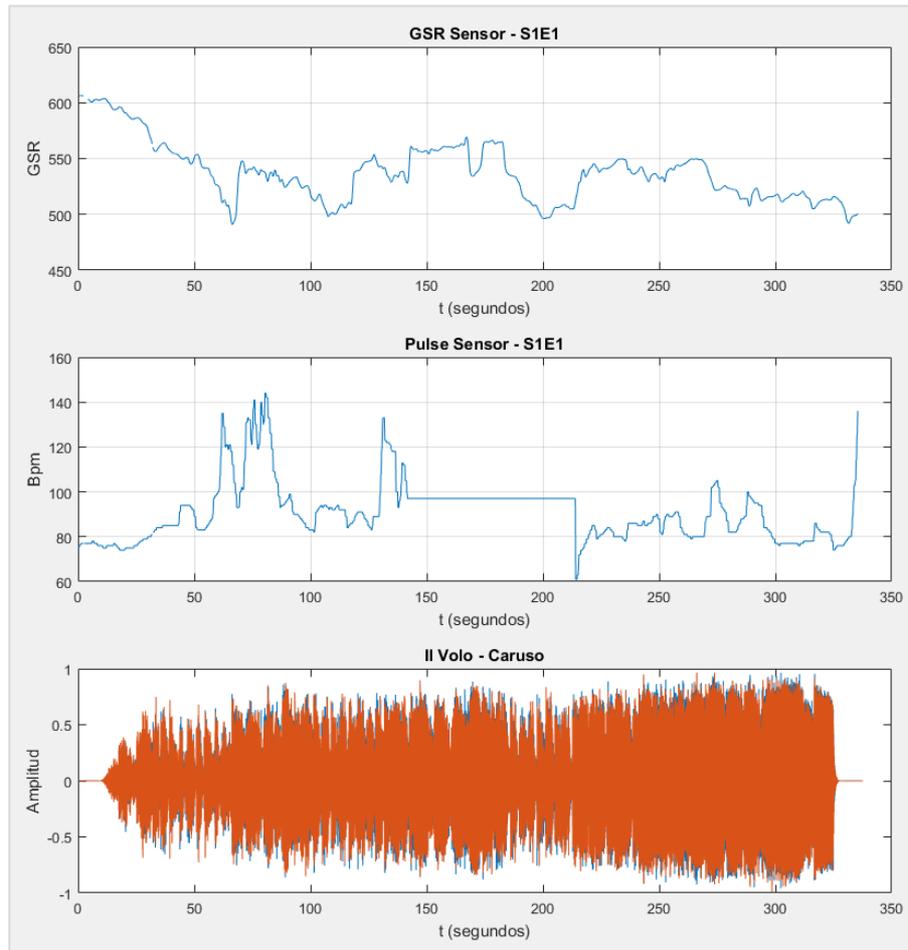


Ilustración 1: Estímulo 1 ("Caruso" por Il Volo).

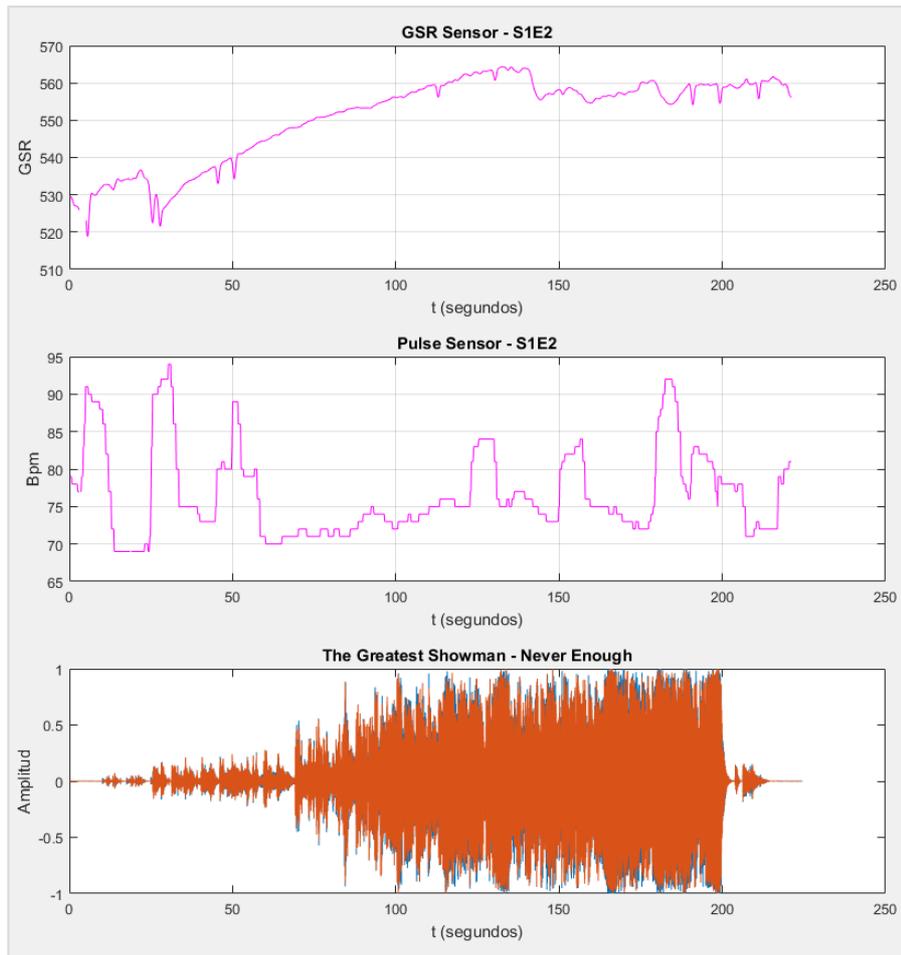


Ilustración 2: Estímulo 2 (“*Never Enough*” de “*The Greatest Showman*”).

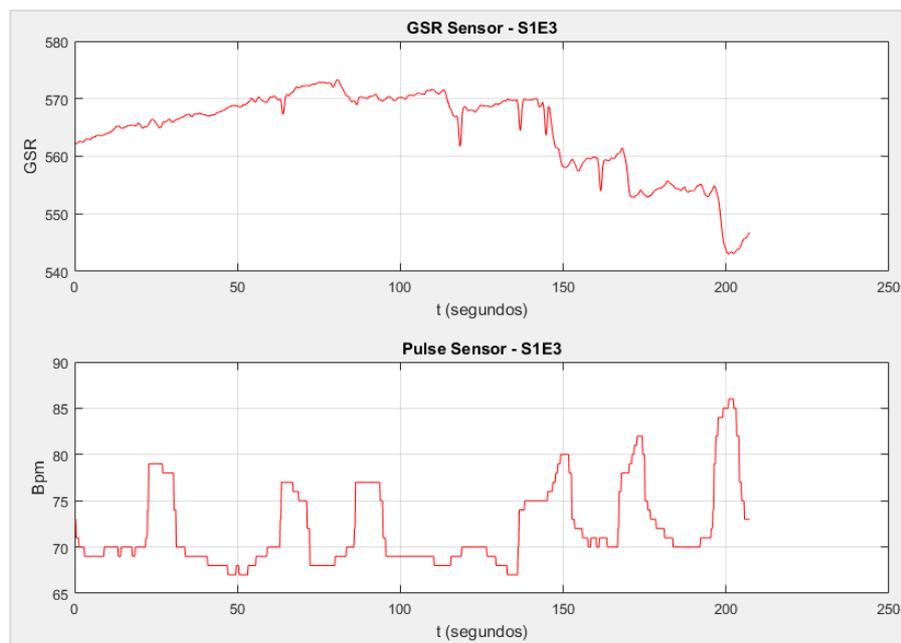


Ilustración 3: Estímulo 3 (“*Ghost*”).

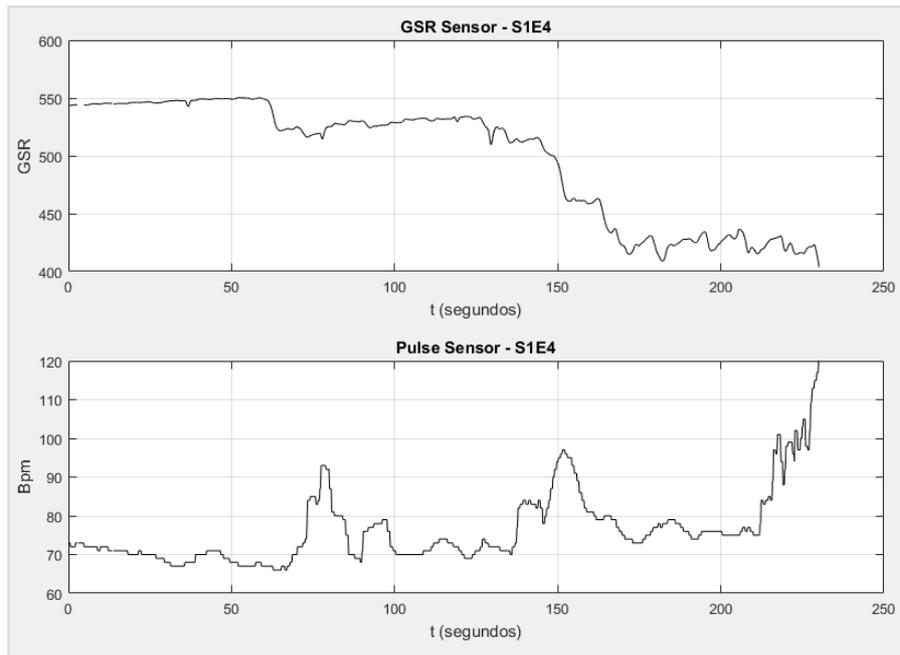
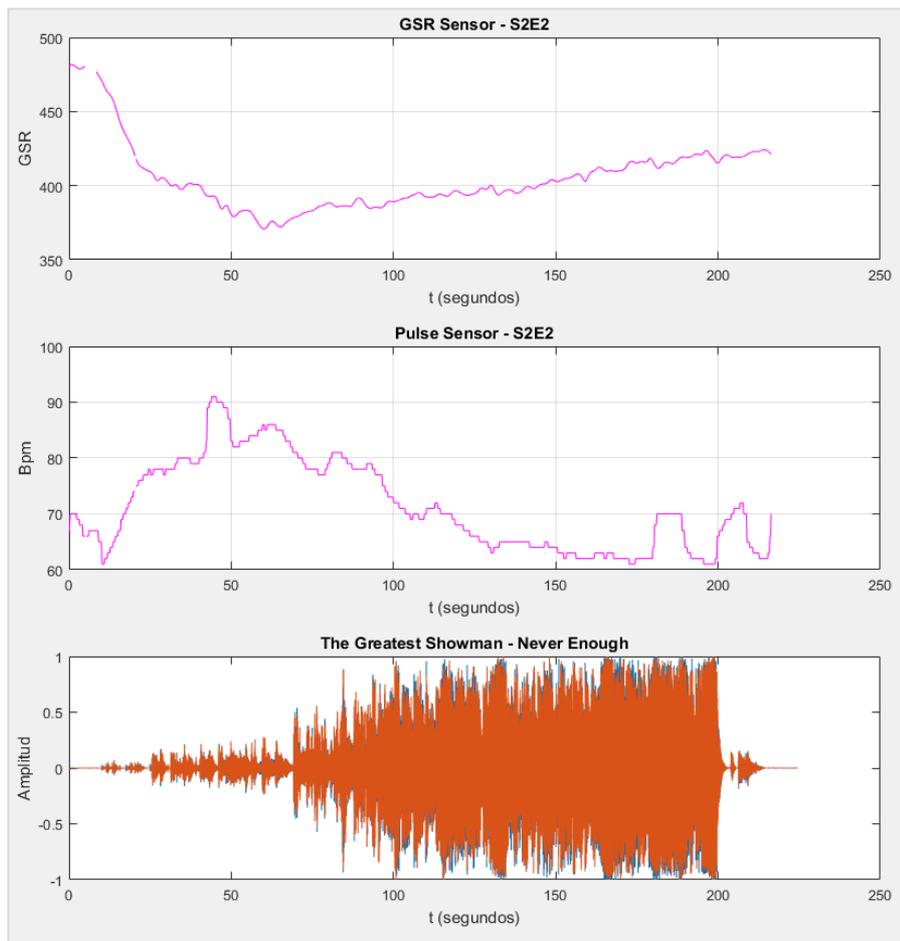
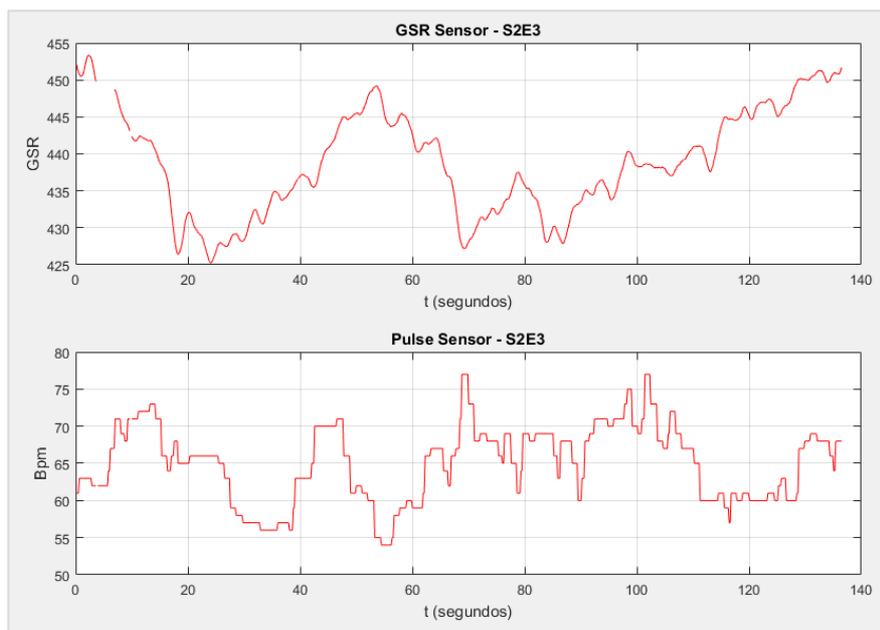


Ilustración 4: Estímulo 4 ("Gladiator").

Sujeto 2

Ilustración 5: Estímulo 2 (“*Never Enough*” de “*The Greatest Showman*”).Ilustración 6: Estímulo 3 (“*E.T.*”).

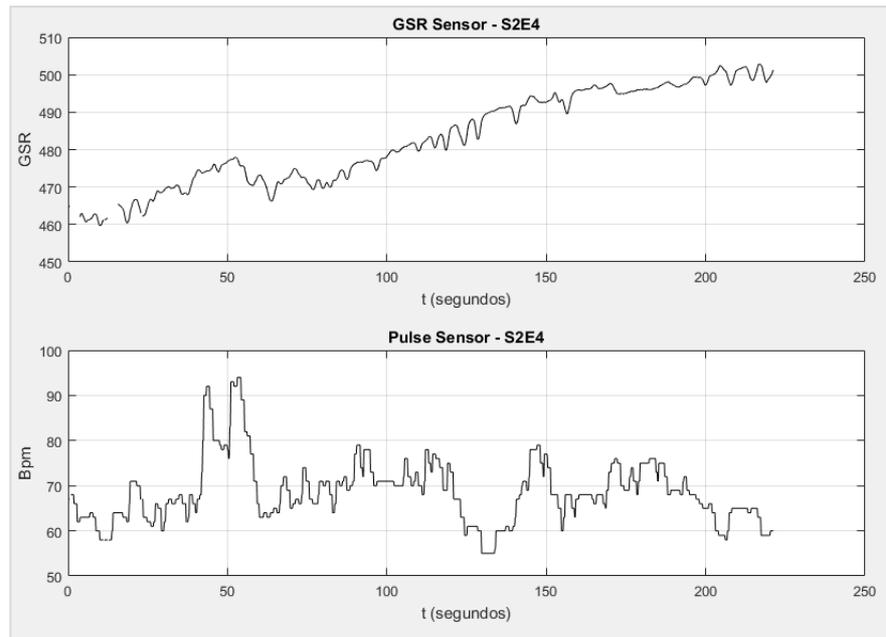


Ilustración 7: Estímulo 4 ("Gladiator").

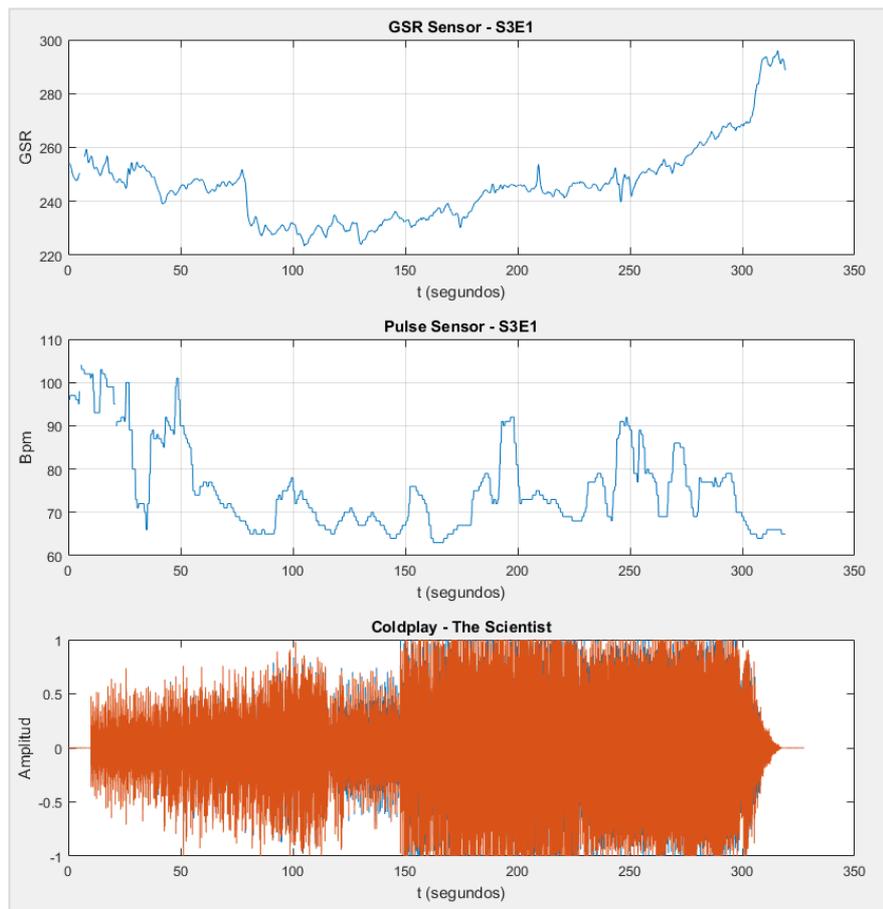
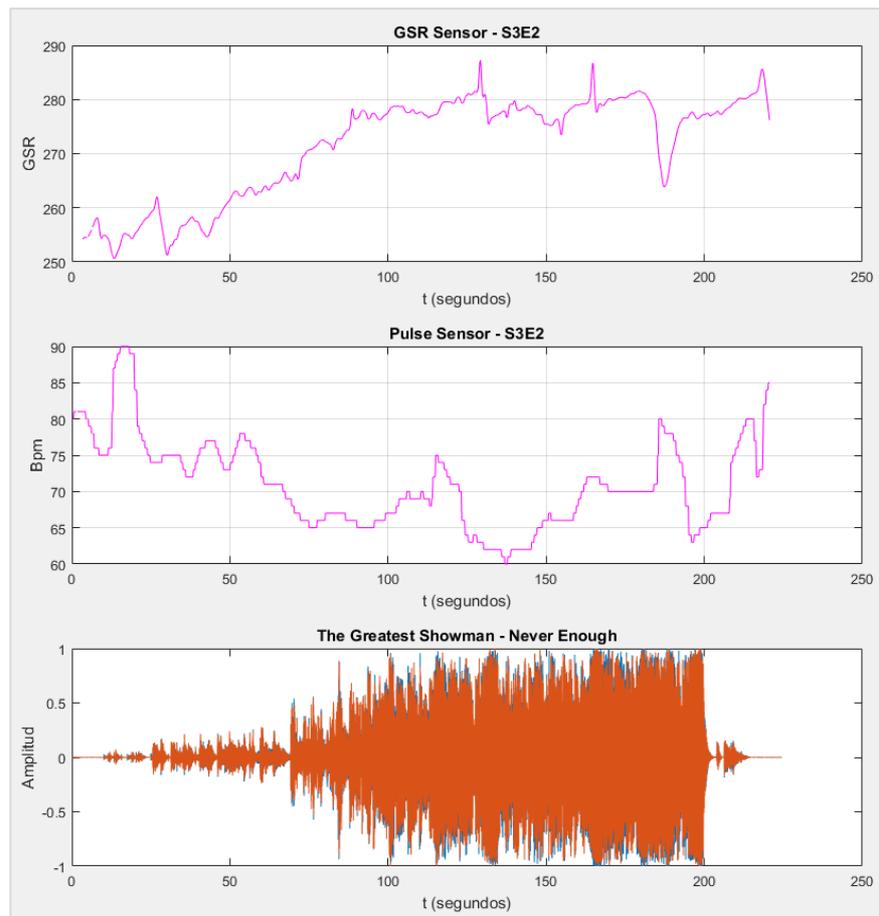
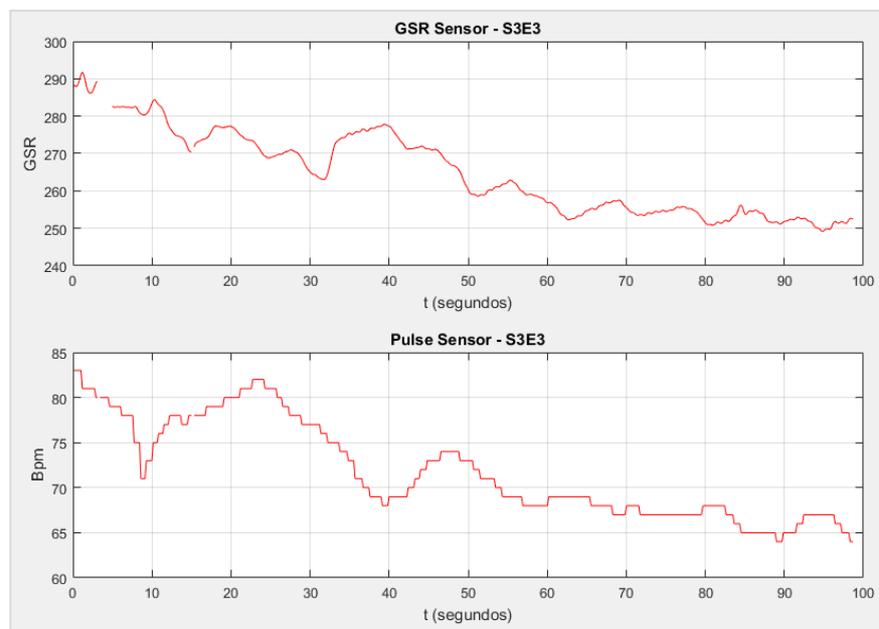
Sujeto 3

Ilustración 8: Estímulo 1 (“*The Scientist*” por Coldplay).

Ilustración 9: Estímulo 2 (“*Never Enough*” de “*The Greatest Showman*”).Ilustración 10: Estímulo 3 (“*2001: Odisea en el Espacio*”).

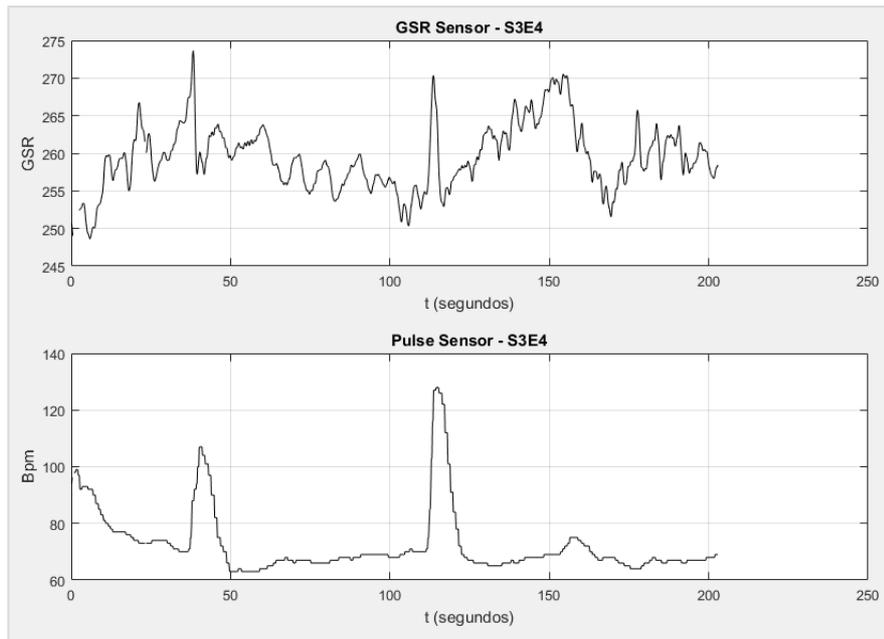
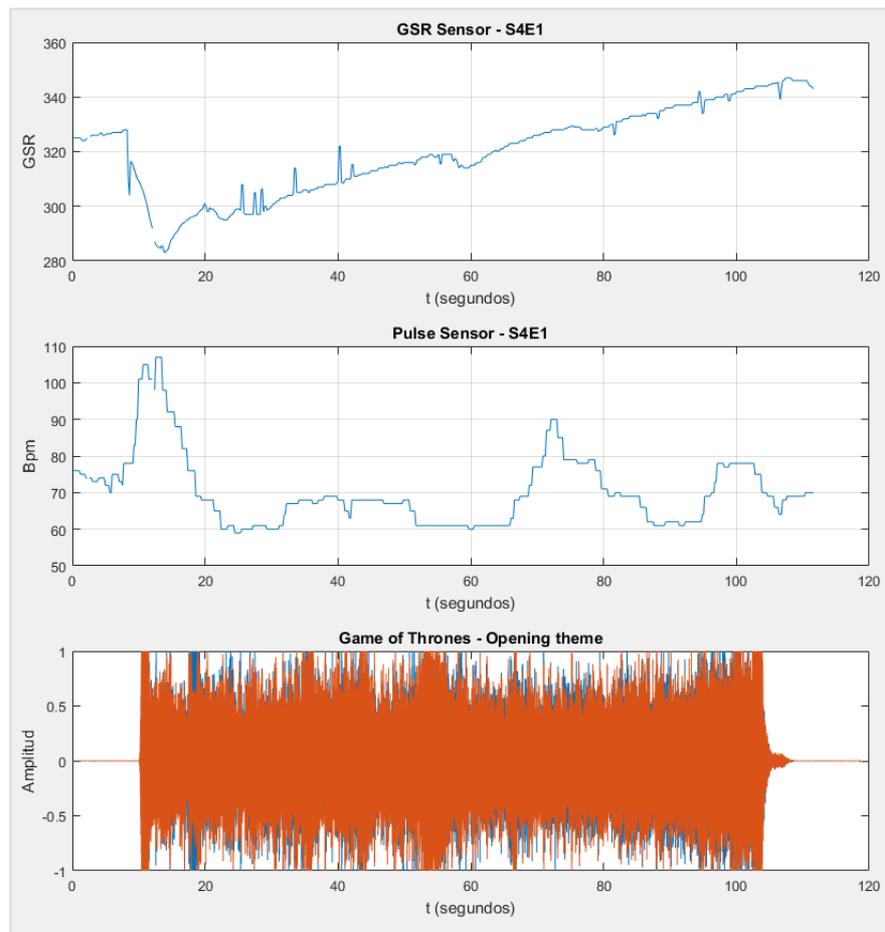


Ilustración 11: Estímulo 4 ("Gladiator").

Sujeto 4Ilustración 12: Estímulo 1 (“*Game of Thrones - Opening theme*”).

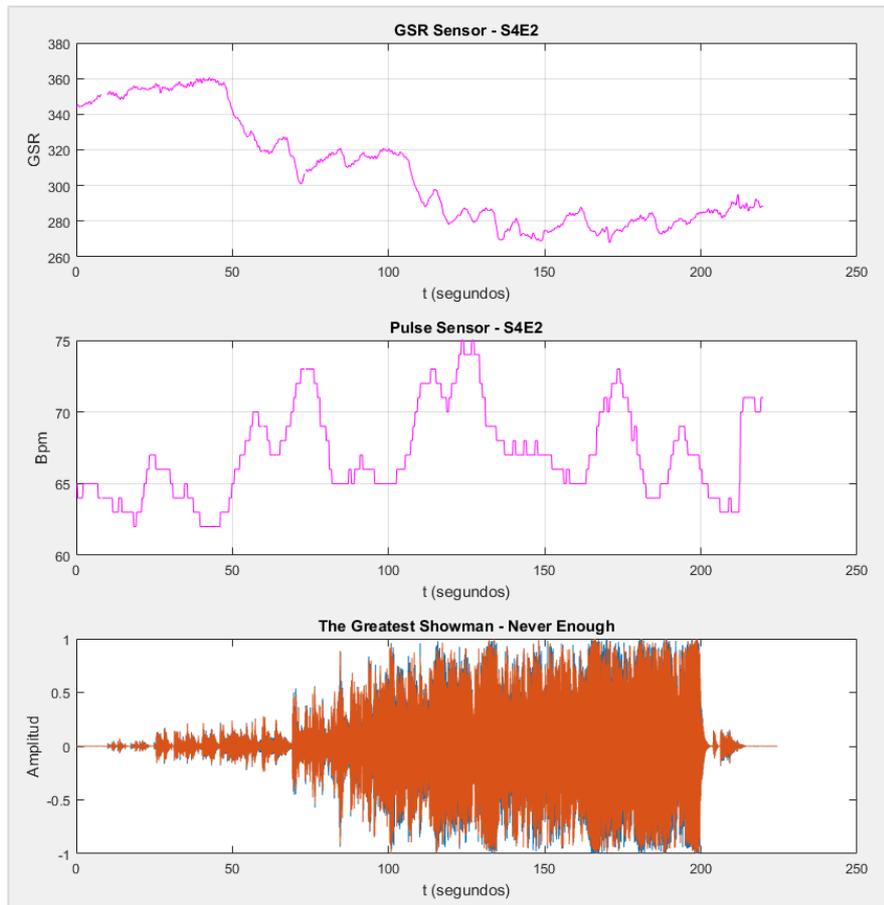


Ilustración 13: Estímulo 2 (“*Never Enough*” de “*The Greatest Showman*”).

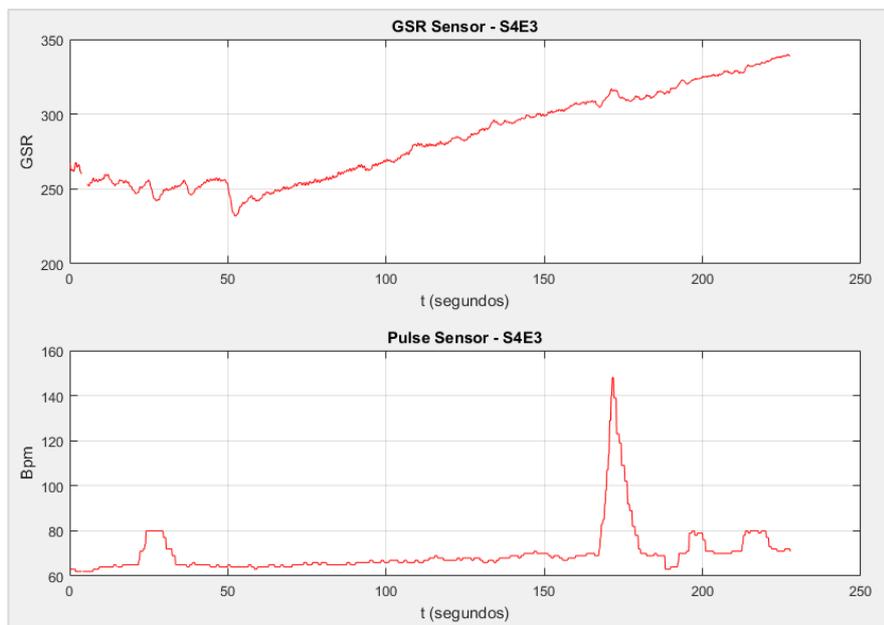


Ilustración 14: Estímulo 3 (“*The Matrix*”).

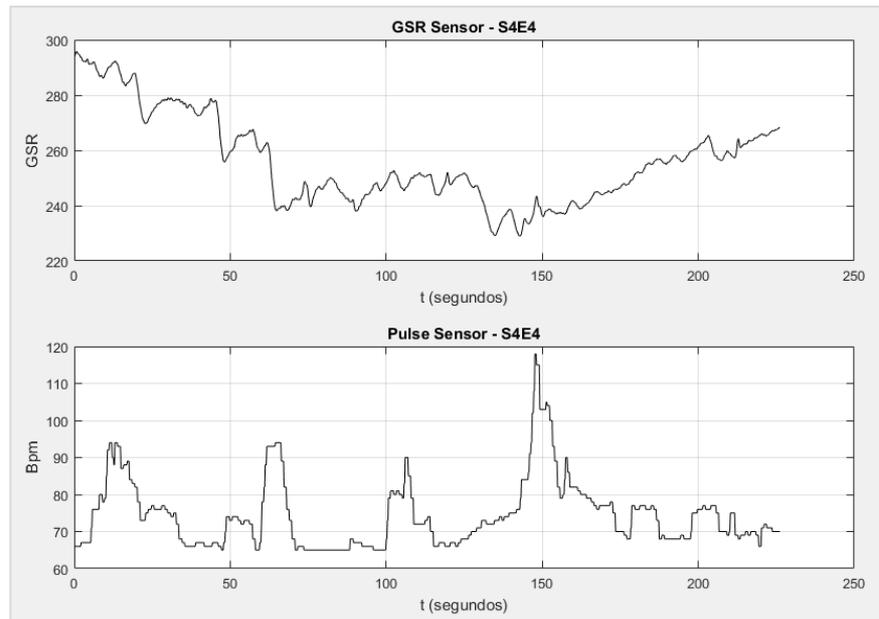


Ilustración 15: Estímulo 4 (“Gladiator”).

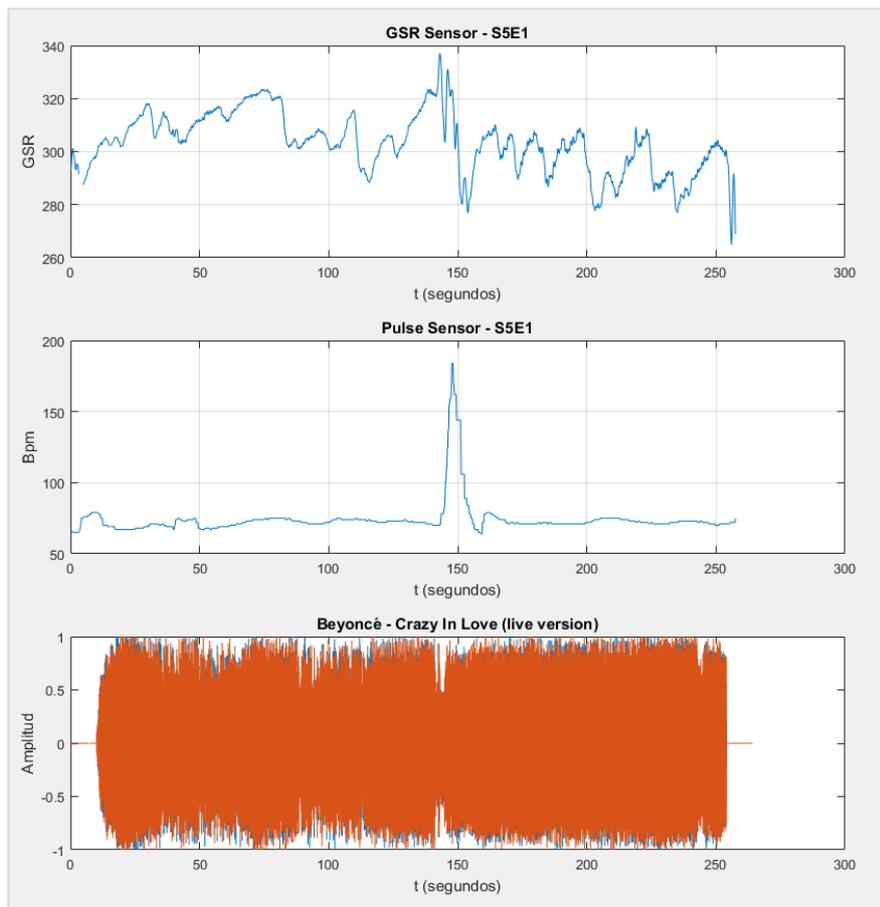
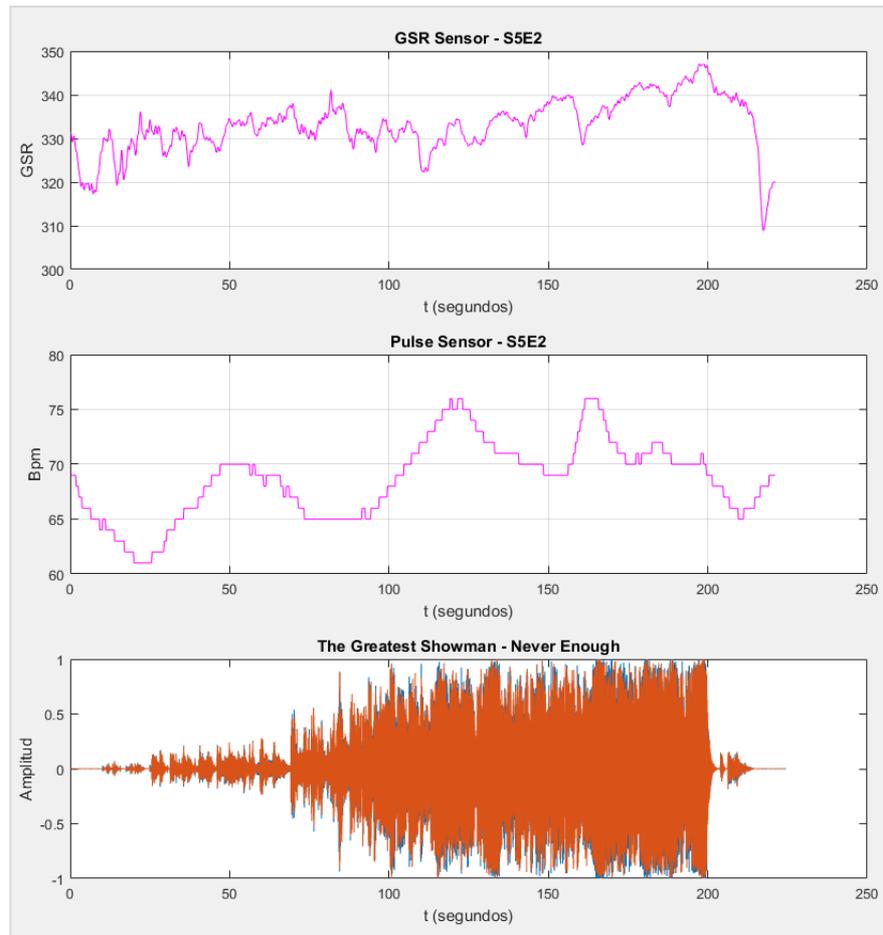
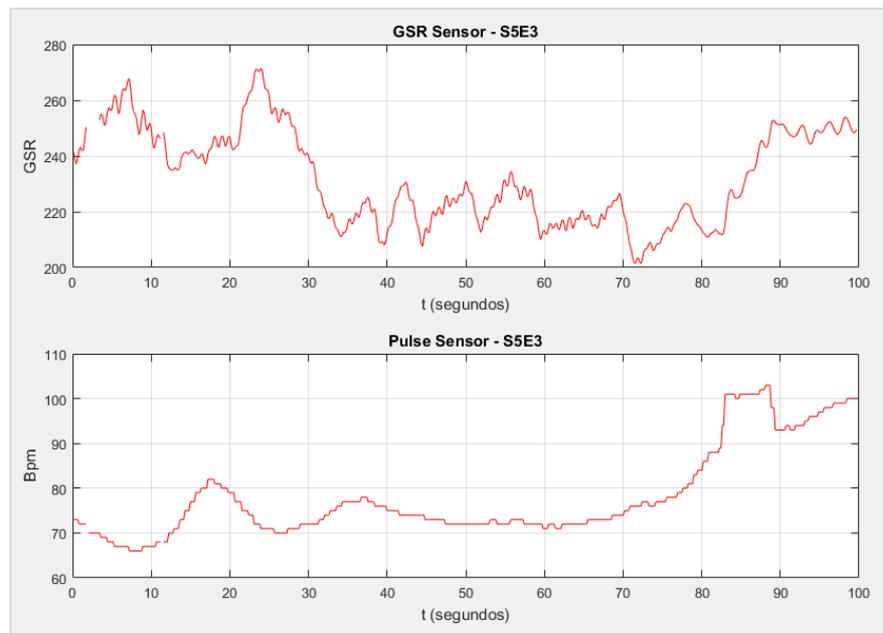
Sujeto 5

Ilustración 16: Estímulo 1 (“*Crazy In Love - live version*” por Beyoncé).

Ilustración 17: Estímulo 2 (“*Never Enough*” de “*The Greatest Showman*”).Ilustración 18: Estímulo 3 (“*2001: Odisea en el Espacio*”).

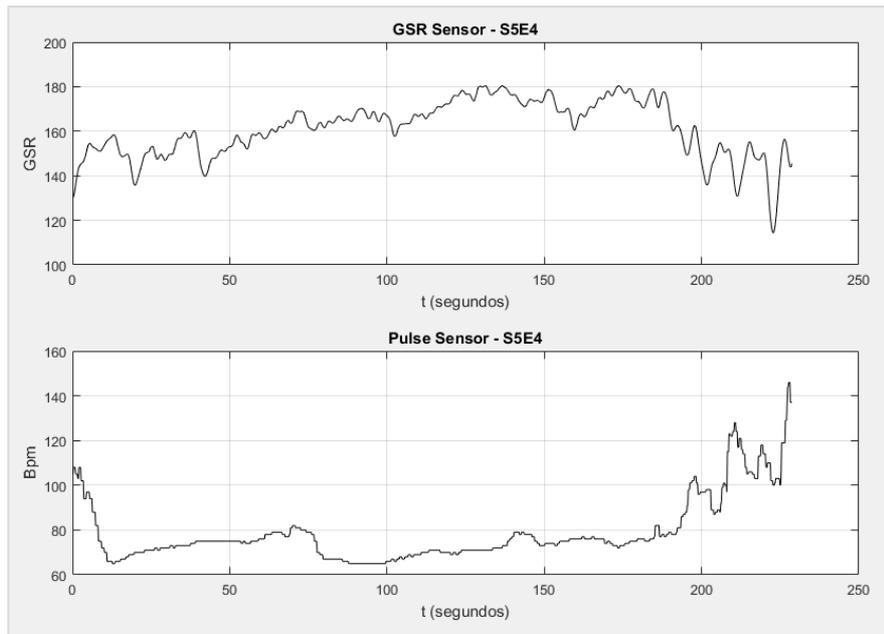


Ilustración 19: Estímulo 4 ("Gladiator").

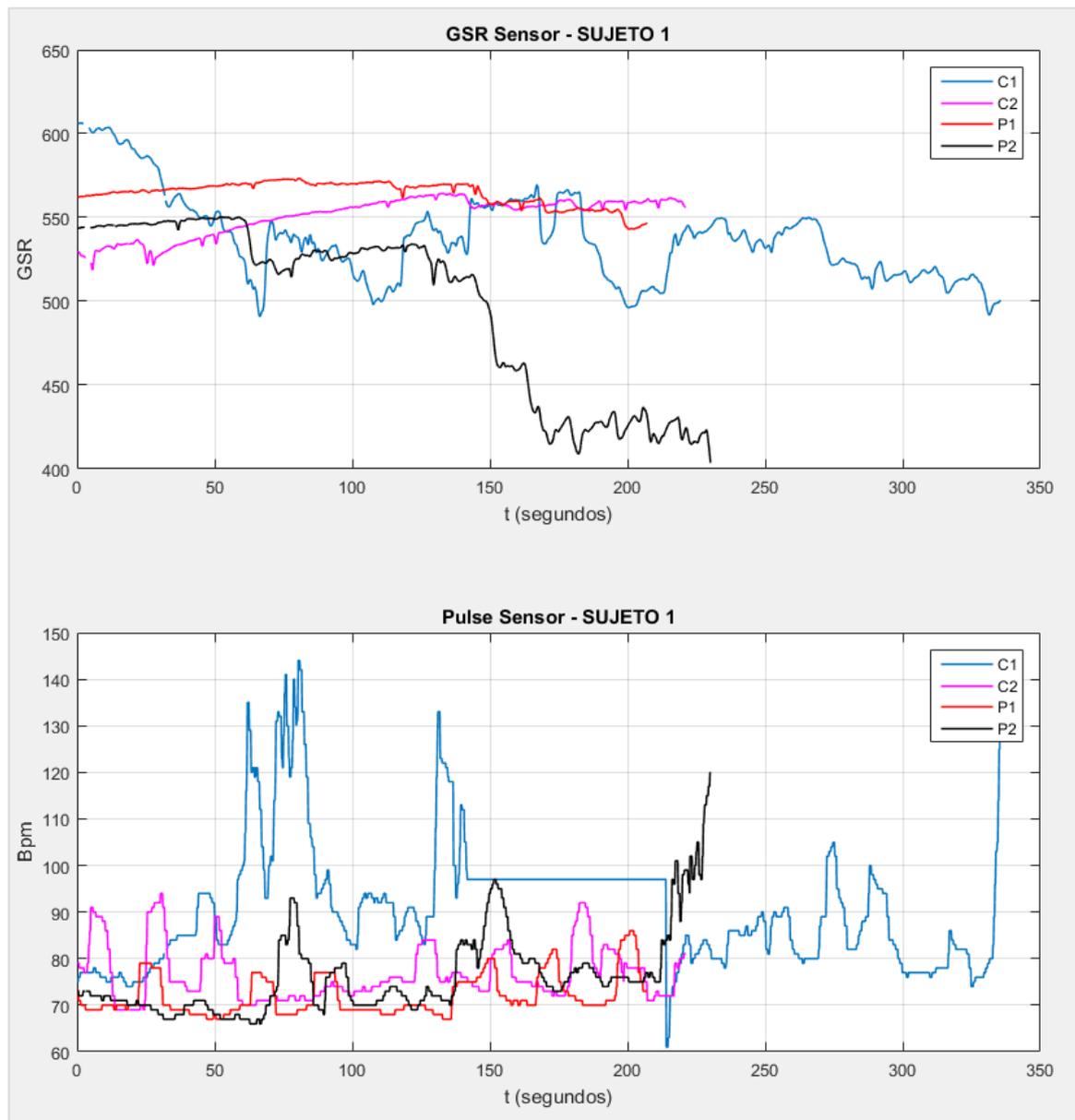
Comparativa de todos los estímulos de cada sujeto

Ilustración 20: Observación de los cambios en la EDA y FC del sujeto 1.

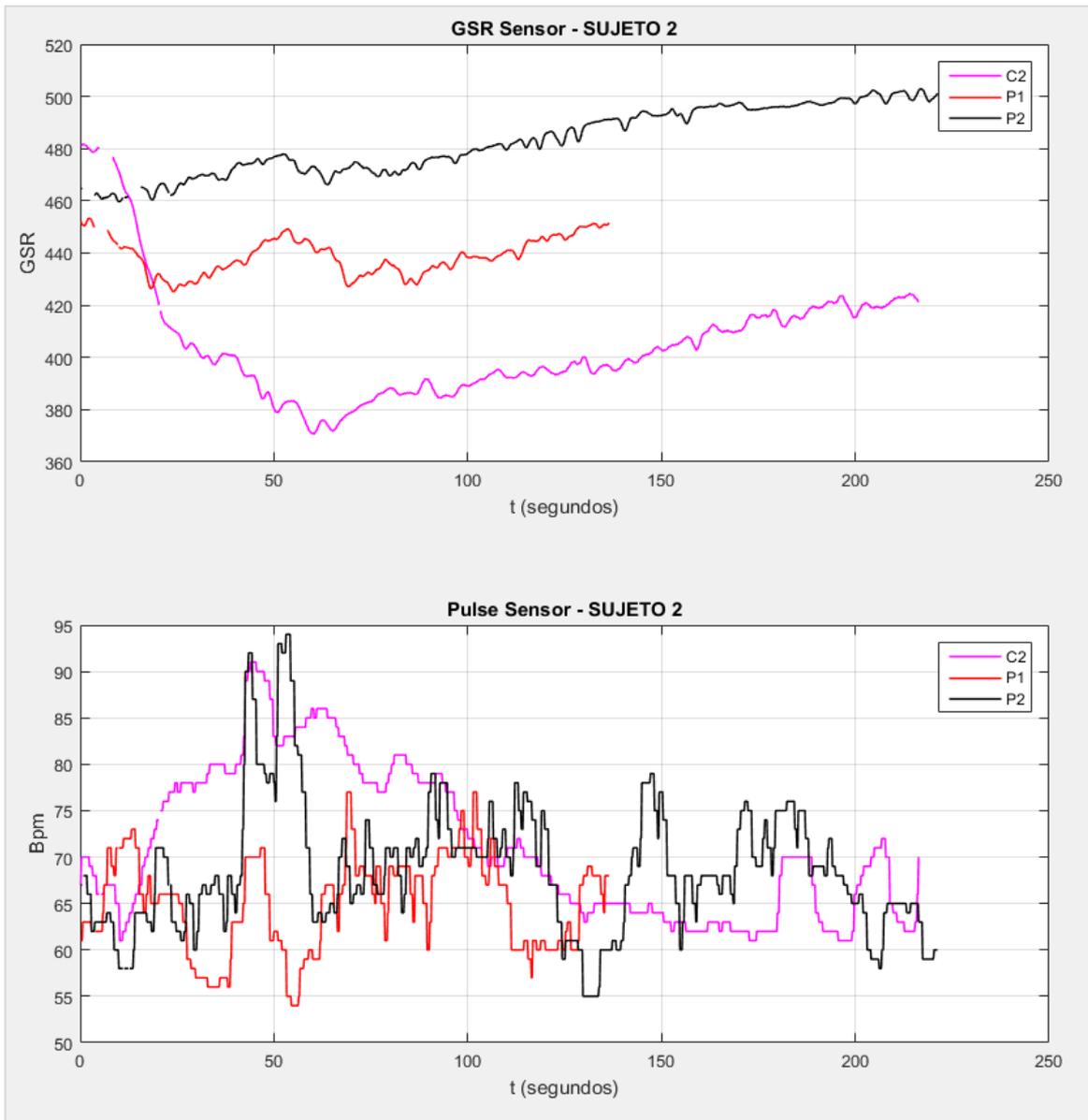


Ilustración 21: Observación de los cambios en la EDA y FC del sujeto 2.

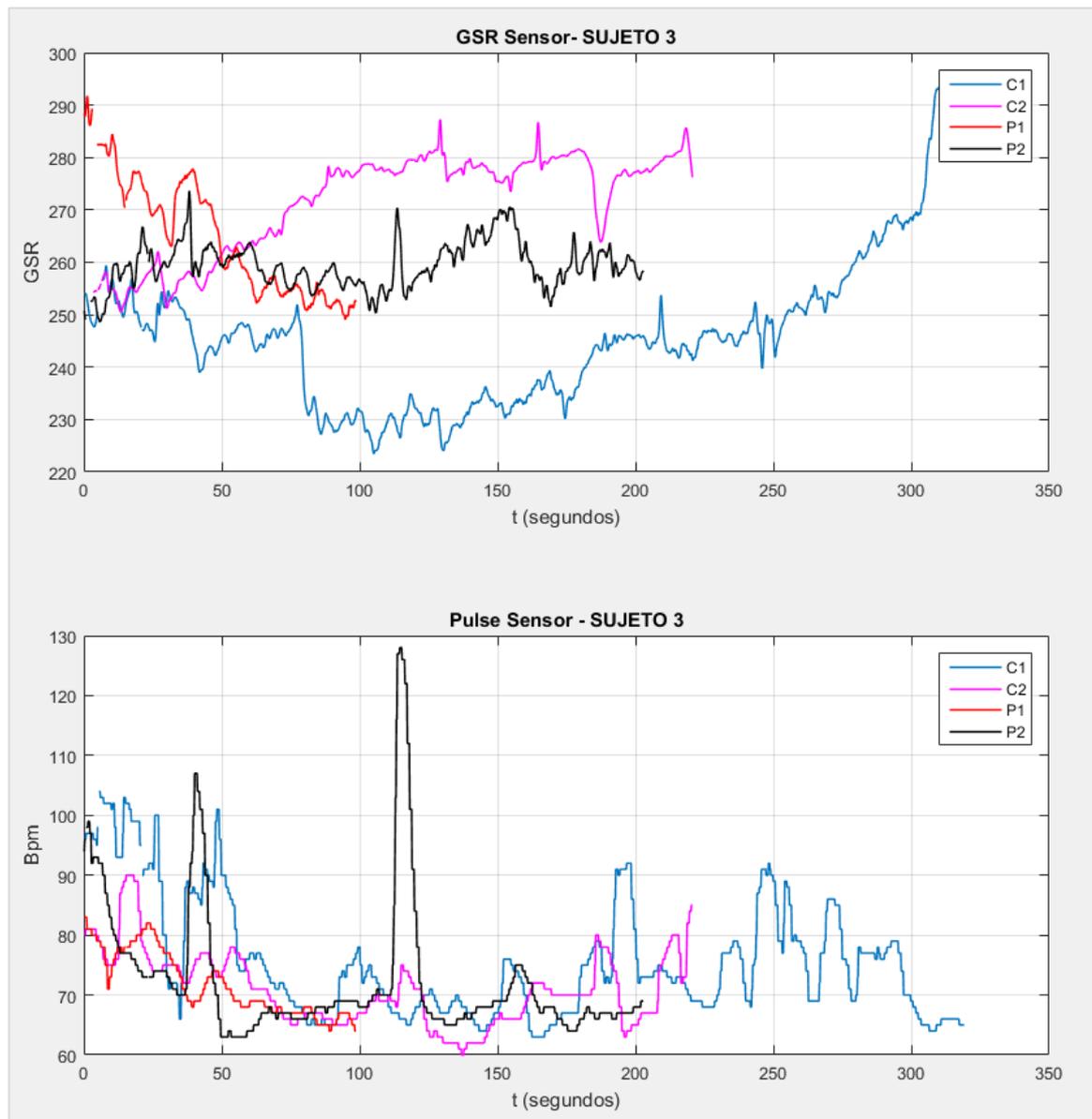


Ilustración 22: Observación de los cambios en la EDA y FC del sujeto 3.

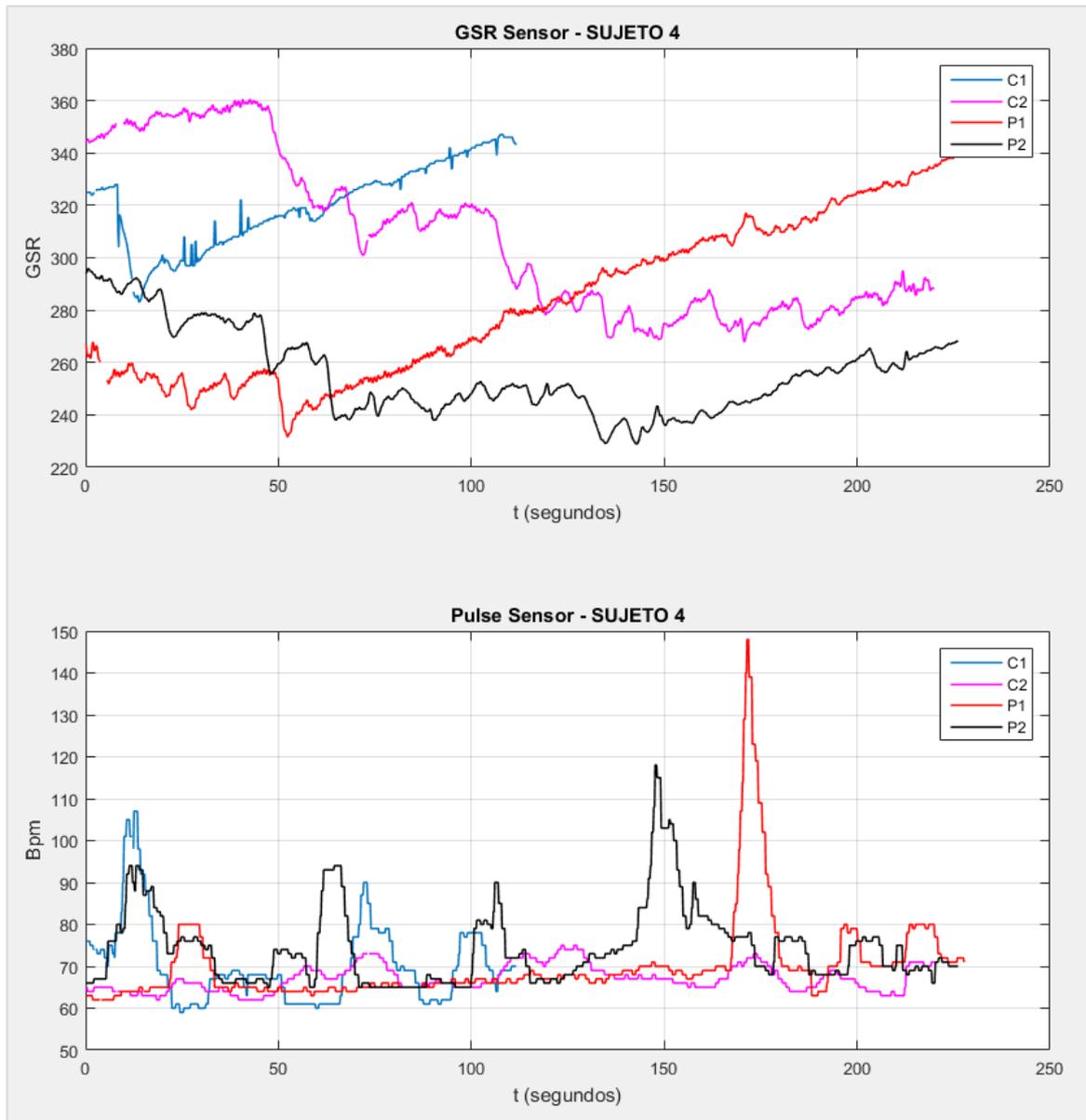


Ilustración 23: Observación de los cambios en la EDA y FC del sujeto 4.

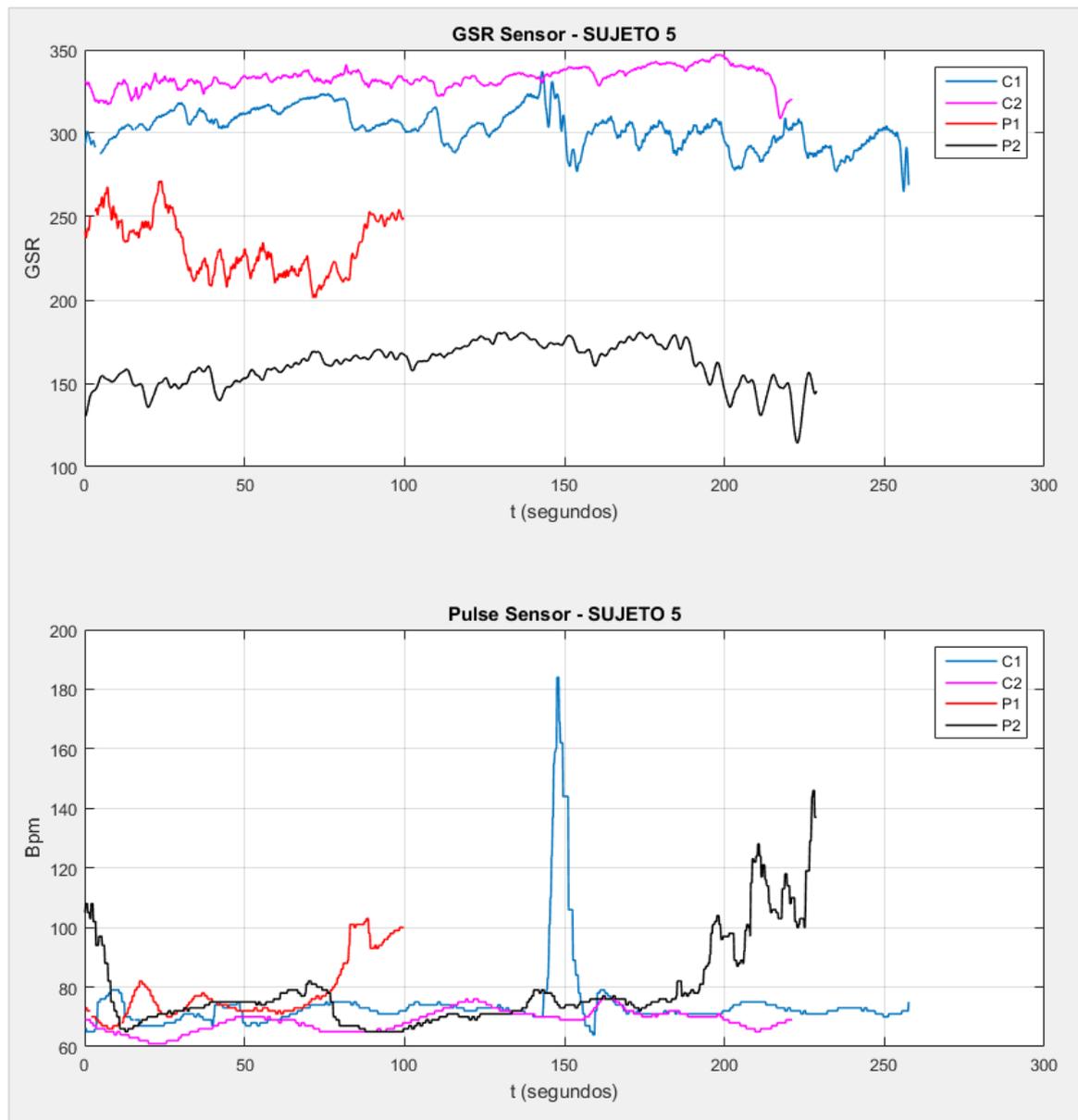


Ilustración 24: Observación de los cambios en la EDA y FC del sujeto 5.

Comparativa de todos los sujetos ante un estímulo común

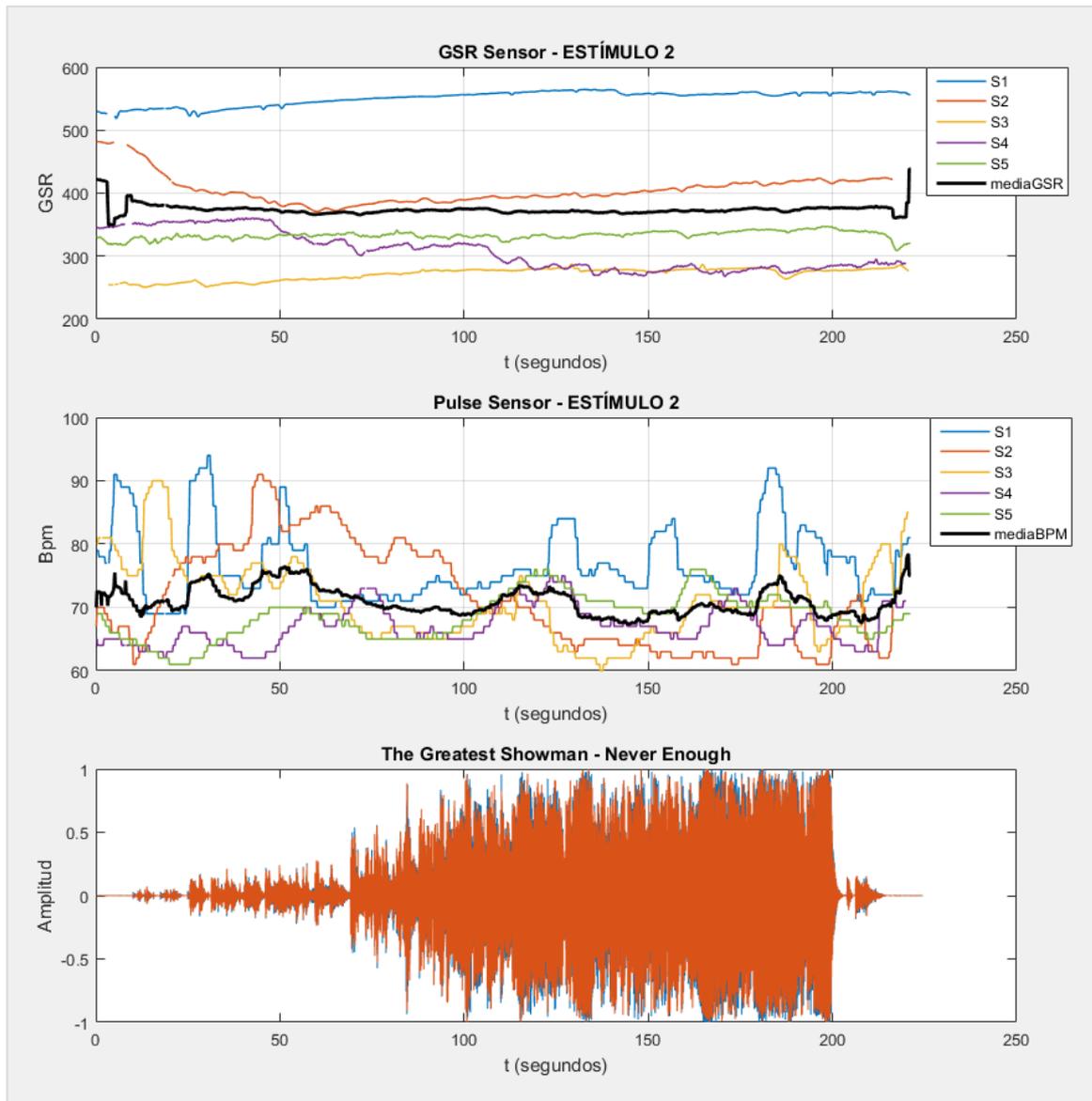


Ilustración 25: Observación conjunta de los diferentes cambios en la EDA y FC de todos los sujetos ante el estímulo 2. Tal y como muestra la leyenda, en celeste el sujeto 1, en naranja el sujeto 2, en amarillo el sujeto 3, en morado el sujeto 4 y en verde el sujeto 5. Se representa también la media de ambas señales en negra.

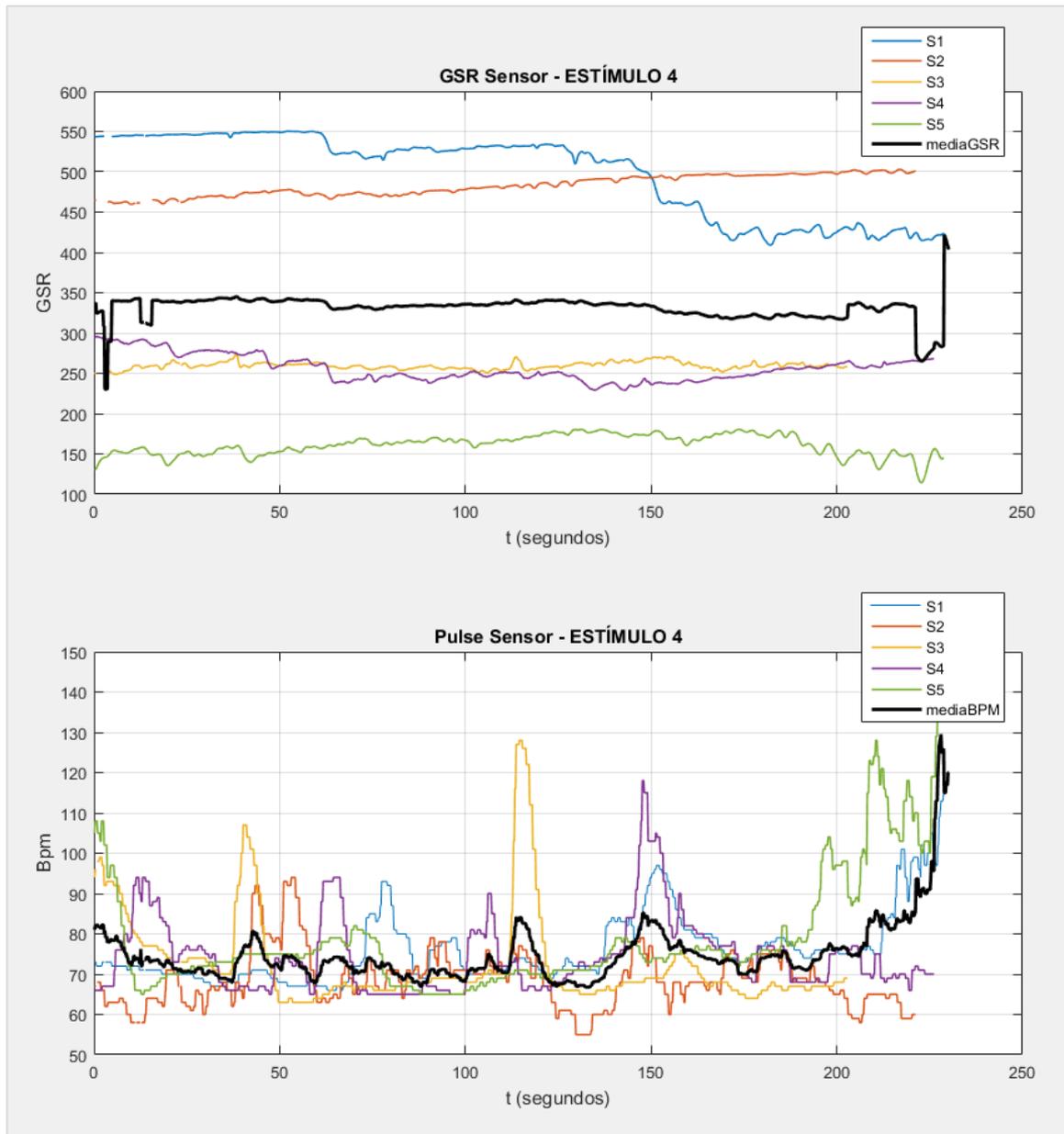


Ilustración 26: Observación conjunta de los diferentes cambios en la EDA y FC de todos los sujetos ante el estímulo 4. Tal y como muestra la leyenda, en celeste el sujeto 1, en naranja el sujeto 2, en amarillo el sujeto 3, en morado el sujeto 4 y en verde el sujeto 5. Se representa también la media de ambas señales en negra.

REFERENCIAS

- [1] H. Damasio, A. R. Damasio, T. Grabowski, R. Frank y A. M. Galaburda, «The return of Phineas gage: Clues about the brain from the skull of a famous patient,» *Science*, vol. 264, pp. 1102-1105, 1994.
- [2] A. García Molina, «Phineas Gage y el enigma del córtex prefrontal,» *Neurología*, vol. 27(6), pp. 370-375, 2012.
- [3] A. I. Partida Hanon, «DNAngelica.com,» 27 Septiembre 2015. [En línea]. Available: <https://dnangelica.com/dnangelica/index.php/2015/09/27/la-expresion-de-las-emociones-en-el-hombre-y-los-animales/>. [Último acceso: 20 Enero 2020].
- [4] C. Rodríguez Sutil, «Emoción y cognición. James, más de cien años después,» *Anuario de Psicología*, vol. 29(3), pp. 3-23, 1998.
- [5] Asociación de Psicología de Puerto Rico, «¿Pensabas que Emocionarse era Sencillo?: Las Emociones Como Fenómenos Biológicos, Cognoscitivos y Sociales,» *Revista Puertorriqueña de Psicología*, vol. 13(1), pp. 9-26, 2002.
- [6] J. Bigbee, «Papez Circuit,» de *Encyclopedia of Clinical Neuropsychology*, Nueva York, Springer, 2011.
- [7] P. Ekman, R. W. Levenson y W. V. Friesen, «Autonomic Nervous System Activity Distinguishes Among Emotions,» *Science*, vol. 221, pp. 1208-1210, 1983.
- [8] A. Damasio, J. S. Feinstein, D. Tranel y R. Adolphs, «The Human Amygdala and the Induction and Experience of Fear,» *Current Biology*, vol. 21(1), pp. 34-38, 2011.
- [9] N. Rickard, «Intense emotional responses to music: A test of the physiological arousal hypothesis,» *Psychology of Music*, vol. 32(4), pp. 371-388, 2004.
- [10] Govaf, «Wikipedia,» 21 Febrero 2011. [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Circuito_de_Papez. [Último acceso: 9 Julio 2019].
- [11] M. Benedek y C. Kaernbach, «Physiological correlates and emotional specificity of human piloerection,» *Biological Psychology*, vol. 86(3), pp. 320-329, 2011.
- [12] M. E. Sachs, R. J. Ellis, G. Schlaug y P. Loui, «Brain connectivity reflects human aesthetic responses to music,» *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, vol. 11(6), pp. 884-891, 2016.
- [13] C. Villalonga, «La Vanguardia,» 9 Diciembre 2017. [En línea]. Available: <https://www.lavanguardia.com/vivo/psicologia/20171209/433454246955/musica-piel-de-gallina-mito-realidad.html>. [Último acceso: 20 Enero 2020].
- [14] N. News, «Neuroscience News,» 27 Febrero 2017. [En línea]. Available: <https://neurosciencenews.com/music-chills-neuroscience-6167/>. [Último acceso: 20 Enero 2020].
- [15] K. Mori y M. Iwanaga, «Two types of peak emotional responses to music: The psychophysiology of chills

- and tears,» *Scientific Reports*, vol. 7(46063), 2017.
- [16] N. Martínez-Molina, E. Mas-Herrero, A. Rodríguez-Fornells, R. J. Zatorre y J. Marco-Pallarés, «White Matter Microstructure Reflects Individual Differences in Music Reward Sensitivity,» *Journal of Neuroscience*, vol. 39(25), pp. 5018-5027, 2019.
- [17] A. Education, «A.D.A.M. Education,» 26 Julio 2017. [En línea]. Available: <http://www.adameducation.com/aiaonline>. [Último acceso: 10 Julio 2019].
- [18] L. Vara González, «La mente es maravillosa,» 31 Mayo 2019. [En línea]. Available: <https://lamenteesmaravillosa.com/sistema-limbico-funciona/>. [Último acceso: 20 Enero 2020].
- [19] A. C. Guyton y J. E. Hall, «Textbook of Medical Physiology,» de *Tratado de Fisiología médica*, Elsevier España, S.L., 2011, pp. 719-720.
- [20] A. Triglia, «Psicología y Mente,» 2017. [En línea]. Available: <https://psicologiaymente.com/neurociencias/sistema-recompensa-cerebro>. [Último acceso: 20 Enero 2020].
- [21] Betts, J. Gordon; Desaix, Peter; Johnson, Eddie, «Anatomy and Physiology,» OpenStax, 2013, p. 21.
- [22] M. Redondo, «tiempo.com,» 29 Enero 2018. [En línea]. Available: <https://www.tiempo.com/noticias/ciencia/-por-que-se-nos-pone-la-piel-de-gallina-.html>. [Último acceso: 20 Enero 2020].
- [23] S. Muñoz Collado, «PsicoActiva,» 11 Mayo 2018. [En línea]. Available: https://www.psicoactiva.com/blog/sistema-neuroendocrino-funcionamiento/#Hipotalamo_y_hormonas_hipofisarias. [Último acceso: 20 Enero 2020].
- [24] E. Márquez, «Red Estrategia,» 9 Junio 2015. [En línea]. Available: <http://www.redestrategia.com/que-es-el-cerebro-limbico-y-que-funciones-cumple.html>. [Último acceso: 8 Julio 2019].
- [25] «dreamstime,» [En línea]. Available: <https://es.dreamstime.com/fotografia-de-archivo-libre-de-regalías-ilustración-de-los-tipos-básicos-de-la-neurona-image12436227>. [Último acceso: 10 Julio 2019].
- [26] Society for Neuroscience (SfN), «Brain Facts: A Primer On The Brain And Nervous System,» Washington, DC., 2012, pp. 12-15.
- [27] «Sistema Nervioso,» 31 Julio 2012. [En línea]. Available: <http://sistemanervioso9d.blogspot.com/2012/07/sistema-nervioso-somatico-sns-y.html>. [Último acceso: 20 Enero 2020].
- [28] Á. J. Chú Lee, S. Cuenca Buele y M. López Bravo, «Anatomía y Fisiología del Sistema Nervioso,» Machala, UTMATCH, 2015, pp. 299-307.
- [29] A. Mandal, «News Medical Life Sciences,» 11 Abril 2019. [En línea]. Available: [https://www.news-medical.net/health/What-is-the-Nervous-System-\(Spanish\).aspx](https://www.news-medical.net/health/What-is-the-Nervous-System-(Spanish).aspx). [Último acceso: 12 Julio 2019].
- [30] X. Páez, «saber.ula.ve,» 2009. [En línea]. Available: <http://www.saber.ula.ve/bitstream/handle/123456789/32968/sesion11.pdf?sequence=5&isAllowed=y>. [Último acceso: 2 Marzo 2019].

- [31] R. G. Hibbs, «lifeder.com,» *The fine structure of human eccrine sweat glands*, vol. 103(2), pp. 201-217, 1958.
- [32] «Mayo Clinic,» [En línea]. Available: <https://www.mayoclinic.org/es-es/diseases-conditions/hyperhidrosis/multimedia/sweat-glands/img-20007980>. [Último acceso: 15 Julio 2019].
- [33] E. N. Marieb, «Anatomía y Fisiología Humana,» Madrid, Pearson Educación S.A., 2008, pp. 389-391.
- [34] F. C. Brunicardi, D. K. Andersen, T. R. Billiar, D. L. Dunn, J. G. Hunter, J. B. Matthews y R. E. Pollock, «Acces Medicina,» [En línea]. Available: www.accesmedicina.com. [Último acceso: 14 Julio 2019].
- [35] G. R. S., «Viref,» Mayo 2008. [En línea]. Available: http://viref.udea.edu.co/contenido/menu_alterno/apuntes/ac22-sistemaNA.pdf. [Último acceso: 20 Enero 2020].
- [36] iMotions, «iMotions,» 22 Diciembre 2015. [En línea]. Available: <https://imotions.com/blog/3-striking-reasons-gsr-push-insights-emotional-behavior/>. [Último acceso: 2 Marzo 2019].
- [37] dream, «YouBioit.com,» 1 Octubre 2014. [En línea]. Available: https://www.youbioit.com/es/article/23483/que-son-los-alveolos?size=_original. [Último acceso: 16 Septiembre 2019].
- [38] «Arduino,» [En línea]. Available: <https://www.arduino.cc/en/Main/Software>. [Último acceso: 11 Junio 2019].
- [39] «tobiipro,» [En línea]. Available: <https://www.tobiipro.com/learn-and-support/learn/GSR-essentials/how-does-a-gsr-sensor-work/>. [Último acceso: 6 Julio 2019].
- [40] «Seed Studio,» [En línea]. Available: http://wiki.seedstudio.com/Grove-GSR_Sensor/. [Último acceso: 17 Julio 2019].
- [41] «Parallax Inc,» [En línea]. Available: <https://www.parallax.com/downloads/plx-daq>. [Último acceso: 25 Julio 2019].

GLOSARIO

μS : microsiemens	1
AChR: Receptor de Acetilcolina	14
BSO: Banda Sonora Original	17
CE: Comité Ético de Experimentación	17
EDA: Actividad Electrodermica	2
EMG: Electromiograma	1
FC: Frecuencia cardíaca	1
FR: Frecuencia respiratoria	2
GSR: Respuesta Galvánica de la Piel	14
K: Potasio	14
k Ω : kiloohmios	30
mV: milivoltios	1
Na: Sodio	14
PET: Tomografía por Emisión de Positrones	2
PPG: Fotopletismografía	24
s: segundo/s	30
S: Siemens	25
SC: Conductancia de la Piel	1
SN: Sistema Nervioso	7
SNA: Sistema Nervioso Autónomo	1
SNAP: Sistema Nervioso Autónomo Parasimpático	11
SNAS: Sistema Nervioso Autónomo Simpático	11
SNC: Sistema Nervioso Central	3
SNP: Sistema Nervioso Periférico	10
SNS: Sistema Nervioso Somático	1
t: Variable de tiempo	30
V: Voltios	25
Δy : Variación en la amplitud de la señal	30