



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

FACULTAD DE INGENIERÍA

# Desarrollo de un sistema para caracterizar el estado de la alegría mediante bioseñales

TESIS

Que para obtener el título de  
Ingeniero Mecatrónico

P R E S E N T A

Brian Buendía Sosa

DIRECTOR DE TESIS

M.I. Livier Baez Rivas



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2016



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## Agradecimientos

Este trabajo está dedicado a toda mi familia que ha estado junto a mí en todo momento, apoyándome o regañándome para darme ánimo para seguir adelante.

A mis padres en especial por tener la paciencia para apoyarme hasta el momento de la culminación de esta tesis. Por su apoyo, su comprensión y darme todo lo que pudiera necesitar. A mis hermanos por sus críticas que me motivan a seguir adelante.

A mis amigos Jorge, Chucho, Cesar, Bere, Nancy y Gaby por haber hecho de mi estancia en la prepa y la universidad más placentera y por hacer la vida más divertida y entretenida.

Agradecimiento especial también para todos aquellos amigos que hice durante la carrera y los cuales también fueron clave para llegar hasta este punto de mi vida.

A los nuevos integrantes de la familia: El Bebe, Wawa, Justin, Dylan, Kevin, Pipkin, Tomy y Ayşe, quienes trajeron alegría y entretenimiento al hogar.

Por fin, puedo ir a jugar a la PS4...

## Índice

Índice de Tablas.....	6
Índice de Imágenes .....	7
Objetivo.....	9
Alcances.....	9
Introducción .....	9
Felicidad y alegría.....	10
Felicidad .....	10
Alegría .....	11
Sistema Nervioso.....	11
James-Lange .....	11
Cannon-Bard.....	12
Respuesta del sistema nervioso .....	12
Actividad de la piel .....	12
Estudio de la actividad de la piel.....	13
Actividad cardiovascular .....	14
Señal mioeléctrica .....	15
Tipos de electrodos .....	16
Distancia entre electrodos .....	17
Preparación de la piel.....	17
Grupo muscular a registrar .....	17
Trabajos actuales relacionados con la detección de emociones (alegría) .....	18
Software para detectar emociones positivas o negativas mediante el análisis del ritmo cardiaco [22]. .....	18
Aplicación pplkpr [23] .....	18
Hitachi Human Big Data [24] .....	19
Evaluación de parámetros fisiológicos para reconocer emociones [25] .....	19
Inducción de emociones y reconocimiento de emociones usando sus señales fisiológicas [26].	19
Capítulo 2 .....	21
Metodología .....	21
Prueba de concepto .....	22
Prueba 1 .....	24

Prueba 2 .....	25
Prueba 3 .....	25
Necesidades del proyecto .....	26
Características fisiológicas.....	27
Modelo circunflejo de emociones.....	28
Características del dispositivo .....	29
Especificaciones del sistema .....	31
Capítulo 3 .....	33
Generación de conceptos.....	34
Sistema de fotopleletismografía .....	34
Sistema de electromiografía .....	34
Sistema de respuesta electrodérmica.....	34
Tablas comparativas de soluciones para el sistema de fotopleletismografía.....	38
Tabla de elección de concepto.....	41
Tablas comparativas de soluciones para el sistema de respuesta electrodérmica .....	43
Tabla de elección de concepto.....	45
Tablas comparativas de soluciones para el sistema de electromiografía.....	46
Tabla de elección de concepto.....	47
Capítulo 4 .....	49
Subsistema de electromiografía.....	49
Subsistema de respuesta electrodérmica .....	53
Subsistema de fotopleletismografía .....	54
Convertidor Analógico – Digital .....	57
Interfaz gráfica .....	59
Capítulo 5 .....	63
Prueba 1 .....	64
Señal mioeléctrica .....	66
Señal cardíaca.....	68
Señal electrodérmica.....	70
Prueba 2 .....	73
Señal mioeléctrica .....	73

Señal cardiaca.....	75
Señal electrodérmica.....	77
Prueba 3 .....	79
Señal mioeléctrica .....	79
Señal cardiaca.....	81
Señal electrodérmica.....	83
Análisis de resultados.....	85
Conclusiones .....	87
Trabajo a futuro .....	89
Referencias.....	91
Anexos.....	94
Anexo A. Cédula para sujetos de prueba .....	94
Anexo B. Protocolo de Prueba .....	96
Anexo C. Código interfaz gráfica .....	98
Anexo D. Código adquisición de datos.....	101
Anexo E. Señales que no pudieron ser utilizadas por presencia de ruido o distorsion de la señal .....	102
Anexo F. Generación de la señal cardiaca.....	103

## Índice de Tablas

Tabla 1. Respuestas y su actividad esperada [11].....	12
Tabla 2. Características fisiológicas esperadas.....	28
Tabla 3. Características generales.....	29
Tabla 4. Necesidades del proyecto .....	30
Tabla 5. Especificaciones del dispositivo.....	31
Tabla 6. Tabla comparativa de métricas .....	33
Tabla 7. Tabla de posibilidades para sistema de fotopleletismografía.....	35
Tabla 8. Tabla de posibilidades para sistema de respuesta electrodérmica.....	36
Tabla 9. Tabla de posibilidades para sistema de electromiografía.....	36
Tabla 10. Tabla comparativa para sistema de adquisición de datos .....	37
Tabla 11. Tablas de elección de concepto para el sistema de fotopleletismografía .....	41
Tabla 12. Tabla de elección de concepto para el sistema de respuesta electrodérmica.....	45
Tabla 13. Tablas de elección de concepto para el sistema de electromiografía.....	47
Tabla 14. Tabla de promedio por fase en EMG durante la prueba 1.....	67
Tabla 15. Tabla de promedio por fase en la señal cardiaca durante la prueba 1 .....	69
Tabla 16. Tabla de promedio por fase en RED durante la prueba 1 .....	71
Tabla 17. Tabla de promedio por fase en EMG durante la prueba 2.....	74
Tabla 18. Tabla de promedio por fase en la señal cardiaca durante la prueba 1 .....	76
Tabla 19. Tabla de promedio por fase en RED durante la prueba 2 .....	78
Tabla 20. Tabla de promedio por fase en EMG durante la prueba 3.....	80
Tabla 21. Tabla de promedio por fase de la señal cardiaca durante la prueba 3 .....	82
Tabla 22. Tabla de promedio por fase en REM durante la prueba 3 .....	84
Tabla 23. Variación en porcentaje de las 3 bioseñales para la prueba 1 .....	85
Tabla 24. Variación en porcentaje de las 3 bioseñales para la prueba 2 .....	85
Tabla 25. Variación en porcentaje de las 3 bioseñales para la prueba 3 .....	85
Tabla 26. Calificación de las emociones experimentadas por parte de los sujetos de prueba durante el estado basal y aplicación del estímulo .....	86

## Índice de Imágenes

Imagen 1. Distancia entre electrodos .....	17
Imagen 2. Smart Watch enviando información a la app en Smartphone .....	18
Imagen 3. Dispositivo Human Big Data de Hitachi .....	19
Imagen 4. Diagrama de la metodología seguida .....	22
Imagen 5. Colocación de electrodos en músculo cigomático .....	23
Imagen 6. Colocación de sensores para respuesta electrodérmica y señal cardiaca .....	23
Imagen 7. Cambio promedio en la activación del músculo cigomático de la alegría y el enojo .....	27
Imagen 8. Gráfica de emociones excitación vs valencia [30] .....	28
Imagen 9. Electrodo de Ag/ClAg. Meditrace .....	49
Imagen 10. Preamplificación de electrodos para electromiografía .....	50
Imagen 11. Filtro Notch con frecuencia de corte a 60Hz .....	51
Imagen 12. Filtro paso bajas en serie con filtro paso altas .....	52
Imagen 13. Circuito que realiza procesamiento mediante valor raíz cuadrático medio. AD536a ..	53
Imagen 14. Amplificación de señal electrodérmica .....	54
Imagen 15. Sensor QRD1114 .....	55
Imagen 16. Conexión de sensor QRD1114 .....	55
Imagen 17. Etapa de procesamiento para señal cardiaca .....	56
Imagen 18. Adquisición de datos mediante Arduino UNO .....	58
Imagen 19. Diagrama electrónico del dispositivo .....	59
Imagen 20. Interfaz gráfica del dispositivo .....	60
Imagen 21. Diagrama de flujo del sistema .....	61
Imagen 22. Prueba 1, las 3 señales fisiológicas y momento donde hubo risa marcado con sombra azul. a) sujeto 1, b) sujeto 2, c) sujeto 3, d) sujeto 4, e) sujeto 5 .....	65
Imagen 23. EMG durante la prueba 1 .....	66
Imagen 24. Señal cardiaca durante la prueba 1 .....	68
Imagen 25. Fase tónica de la RED durante la prueba 1 .....	70
Imagen 26. EMG para la prueba 2 .....	73
Imagen 27. Señal cardiaca durante la prueba 2 .....	75
Imagen 28. Fase tónica durante la prueba 2 .....	77
Imagen 29. EMG durante la prueba 3 .....	79
Imagen 30. Señal cardiaca durante la prueba 3 .....	81
Imagen 31. Fase tónica de la RED durante la prueba 3 .....	83

## Resumen

El presente trabajo describe el procedimiento seguido para construir un dispositivo con la finalidad de encontrar algunas características en señales fisiológicas cuando una persona experimenta alegría.

Las 3 señales elegidas para lograr el objetivo son la respuesta electrodérmica, señal cardiaca y actividad muscular. Para poder adquirir dichas señales, el dispositivo va a estar conformado por un subsistema para adquirir respuesta electrodérmica, un fotopletismógrafo para señal cardiaca y un electromiógrafo para actividad muscular.

El dispositivo también cuenta con una interfaz gráfica en donde se muestran las 3 señales adquiridas durante la adquisición y también posterior a esta etapa. El sistema también almacena los datos adquiridos automáticamente para su posterior análisis.

Para la etapa de adquisición de datos, se utilizó una tarjeta Arduino, la cual envía la información a una computadora en la cual se ejecuta la interfaz gráfica. La interfaz gráfica fue diseñada con la ayuda de Matlab.

El análisis de las señales se hizo posterior a la adquisición de las señales y se realizó por separado, es decir, la interfaz no cuenta con la capacidad de detectar características en la señal. Para encontrar dichas características, se hizo un análisis de las señales solamente en el dominio del tiempo y comprobando si existía una similitud entre las señales adquiridas entre cada uno de los sujetos en cuanto a amplitud.

Se hicieron 3 pruebas utilizando 3 estímulos diferentes con el objetivo de evocar alegría en los sujetos. La primera consistió en mostrar a los sujetos una recopilación de vídeos graciosos, la segunda fue utilizando música y la tercera un desafío mental.

Se pudieron encontrar algunas coincidencias en las señales principalmente en la primera prueba. La segunda y la tercera no arrojaron resultado como los que se esperaban debido a que los estímulos utilizados no cumplieron con su objetivo de evocar alegría en los sujetos.

## Objetivo

Desarrollo de un dispositivo para encontrar características en el estado de la alegría mediante la adquisición, acondicionamiento y análisis de las señales fisiológicas cardíaca, muscular y electrodérmica.

## Alcances

- Adquisición, acondicionamiento y análisis de la señal mioeléctrica
- Adquisición, acondicionamiento y análisis de la señal cardíaca.
- Adquisición, acondicionamiento y análisis de la señal electrodérmica.
- Desarrollo de interfaz gráfica
- Almacenamiento de las señales.
- Identificación de las características del estado de la alegría

## Introducción

En la actualidad la mayoría de los trabajos relacionados con la identificación de emociones se basan en la detección de emociones negativas, tales como el estrés, miedo, dolor, etc., debido a que la psicología se ha centrado desde sus inicios en analizar los aspectos negativos del comportamiento humano (Martin Seligman, 1992) [1].

Pero recientemente ha surgido una rama dentro de la psicología, llamada psicología positiva [2], dentro de la cual los trabajos e investigaciones están basados en el estudio de emociones positivas como felicidad o amor. Las investigaciones han tenido aplicación en el área educativa, laboral o clínica. El ser feliz está relacionado con efectos positivos como el optimismo, eficacia, confianza, simpatía, energía para realizar actividades, creatividad y capacidad para lidiar con el estrés [3].

La alegría es un sentimiento afectivo, de breve duración, que provoca sensación agradable. Se manifiesta por optimismo, triunfo y aumento de la energía (Robert Plutchik, 1980).

Con el surgimiento de la computación afectiva (Rosalind Picard, 1995) se busca identificar las emociones de las personas con el fin de simular empatía, o poder interpretar la emoción y que el sistema de una respuesta acorde a la emoción de la persona. Para el caso específico de la alegría, algunas aplicaciones son medir cualitativamente campañas publicitarias con usuarios e identificar el nivel de aceptación, para identificar el nivel de satisfacción de niños durante las clases o para ciertos tratamientos médicos en donde se ha comprobado que tienen mejores resultados si el paciente tiene pensamientos positivos.

La mayoría de las investigaciones relacionadas con el reconocimiento de emociones que se han realizado en las últimas décadas, se han enfocado en el reconocimiento de expresiones faciales y de voz. Pero en ocasiones estos métodos resultan ser de baja fiabilidad por la facilidad para simular expresiones faciales o cambiar el tono de voz, además de que no son señales que estén disponibles de forma continua. En comparación con la voz y el análisis de expresiones faciales, las señales fisiológicas ocurren de forma continua y son difíciles de ocultar, tales como la Respuesta Electro Dérmica (RED), actividad cardiaca, temperatura de la piel, o actividad cefálica [4].

## **Felicidad y alegría**

### **Felicidad**

Definir la felicidad es aún complejo ya que son muchas las opiniones que se han dado y desde distintos puntos de vista como la filosofía o psicología, pero de forma general, las definiciones más aceptadas son aquellas que relacionan la felicidad con la satisfacción personal, con el logro de metas y aspiraciones, o con dotar de sentido a la vida [5].

La felicidad también está considerada como una forma de vida, como una suma de los acontecimientos que nos suceden cada día a los cuales nosotros les damos sentido. Bajo la explicación de Seligman sobre lo que entiende por felicidad “La vida es más feliz cuando tiene significado y este significado, se extiende a una trascendencia de nosotros mismos hacia los demás” (John Locke) se entiende que es un concepto de profundos significados, incluye alegría, pero también otras muchas emociones positivas; sin embargo, no excluye la posibilidad de otras no necesariamente positivas, que incluyen momentos de dolor, pena, lucha o conflicto, etc.

La felicidad entonces, no se trata solo de un momento si no de la actitud que cada persona tiene hacia la vida, por lo tanto, depende de la personalidad de cada individuo. La felicidad es un estado mental de los seres humanos, que se manifiesta con una actitud consistente de estar contento con la vida propia en general [5].

Podemos enlistar las características generales de la felicidad [5]:

1. Es una actitud hacia la vida, que es consistente y duradera. Está ligada a la personalidad de cada persona.
2. El sentirse contento es en relación con la vida en general, no en relación con un acontecimiento en particular.
3. Es un estado mental, es parte de uno mismo.

Podemos concluir entonces que la felicidad es un estado de cada persona y cada persona decide si quiere ser feliz adquiriendo ciertas actitudes hacia la vida y hacia su forma de vivirla e interpretar todo lo que sucede, por lo que es un sentimiento a largo plazo.

## **Alegría**

La alegría es una emoción que se caracteriza por ser positiva y que surge en respuesta al cumplir una meta u objetivo deseado, o cuando se experimenta una atenuación de estados de malestar, o al tener una experiencia estética (como contemplar una escultura o escuchar música). Su duración es breve y ocasionalmente se experimenta un estado de placer intenso o éxtasis [6]. La alegría es también considerada como la liberación de la tensión acumulada tras la espera de saber si se consigue o no una meta [7].

Es considerada una de las emociones básicas de bienestar. Su manifestación y su intensidad estarán determinadas por el grado de deseabilidad de un acontecimiento, la realidad del desencadenante, la cualidad de inesperado y la excitación fisiológica previa [8].

Las respuestas fisiológicas registradas al sentir alegría son que disminuye el tono muscular y los movimientos paroxísticos del tronco y hombros. Se produce una ligera aceleración de la frecuencia cardíaca, aumento de la presión sistólica y diastólica, y del volumen sanguíneo. Se dan fluctuaciones notorias en la actividad electro dérmicas [8].

## **Sistema Nervioso**

El sistema nervioso central se encarga de iniciar o frenar la actividad de los órganos o vísceras del organismo que están formados de músculo liso. Esto quiere decir que una persona no puede modificar su actividad de manera voluntaria. La autonomía de las vísceras sobre los pensamientos de las personas, hace que registrar su actividad sea ideal para relacionar los datos obtenidos con el estado de ánimo. Es por esta razón que se suelen registrar las respuestas evocadas por el sistema nervioso central [9].

Las emociones evocan respuestas fisiológicas en el organismo como una respuesta hacia determinados eventos. El caso más ilustrativo es el estrés, donde el sistema nervioso provoca reacciones específicas en el organismo con la finalidad de facilitar la huida o pelea ante determinada situación [9].

Tomando en cuenta que las emociones y las respuestas fisiológicas están relacionadas, es conveniente saber cómo se originan las respuestas fisiológicas a partir de un estímulo. A continuación, se describen las 2 primeras teorías que trataron de explicar este proceso y la postura actual.

## **James-Lange**

Esta teoría establece que cuando un sujeto percibe un estímulo en el ambiente por el que está rodeado, su sistema nervioso inicia una respuesta en los diferentes sistemas del organismo y posteriormente, la persona percibe que emoción está experimentando utilizando como referencia sus reacciones fisiológicas [10].

## Cannon-Bard

Posteriormente se postuló una nueva teoría que proponía que James y Lange estaban equivocados por las siguientes razones: la gente puede sentir respuestas fisiológicas similares a las experimentadas durante ciertas emociones, sin experimentar emoción alguna. Por ejemplo, al correr [10].

Las respuestas fisiológicas suelen ser muy lentas. Usualmente, las personas experimentan primero la emoción antes de que se presenten las respuestas en el organismo.

Las personas pueden experimentar diferentes emociones mientras tienen las mismas respuestas fisiológicas en el organismo.

La alternativa que propusieron decía que, al percibir un estímulo, las reacciones fisiológicas y las emociones aparecen al mismo tiempo y por tanto son independientes entre sí. La corteza cerebral recibe el mensaje para evocar una emoción al mismo tiempo que el sistema nervioso inicia su respuesta.

## Respuesta del sistema nervioso

Se cree que la información sensorial de un sujeto viaja a través de 2 caminos. Primero, la información viaja al tálamo y desde ahí, se mueve simultáneamente a la amígdala y a la corteza cerebral. La amígdala procesa rápidamente la información y envía señales al hipotálamo, en donde se activa el sistema nervioso autónomo. Por otra parte, la corteza procesa la información más lentamente, permitiendo así que la gente evalúe la situación [9].

La siguiente tabla muestra la forma en que cambia la actividad fisiológica en los sistemas que se desean muestrear.

<b>Respuesta</b>	<b>Actividad</b>
Nivel de conductividad de la piel	+ (aumenta)
Respuesta de conductividad de la piel	+ (aumenta)
Volumen sanguíneo	Sin conocimiento empírico

*Tabla 1. Respuestas y su actividad esperada [11]*

## Actividad de la piel

La conductividad de la piel sirve para medir indirectamente la sudoración de la piel en una persona, ya que la actividad de las glándulas sudoríparas es un indicador de actividad en el sistema nervioso simpático [12].

La piel humana está dividida en tres capas. La capa más externa y más resistente se llama epidermis, que a su vez se divide en cinco subcapas (estrato córneo, lucido, granuloso, espinoso y germinativo). La capa más interna es el estrato córneo, aquí se producen las nuevas células que van ascendiendo a la superficie empujadas por las demás capas hasta llegar al exterior a la capa del estrato córneo en donde mueren las células.

La segunda capa es la dermis, que contiene principalmente vasos sanguíneos y linfáticos, terminales nerviosas libres, corpúsculos de Ruffini y glándulas sebáceas. Esta capa presenta un grosor variable que puede ir desde medio milímetro hasta 6 mm.

La capa más interna es la hipodermis, que sujeta la piel con los huesos y músculos. En esta capa hay vasos sanguíneos y linfáticos, corpúsculos de Pacini, receptores nerviosos, entre otros. En esta capa se encuentran los folículos capilares en donde las glándulas apócrinas<sup>1</sup> descargan su contenido, pero también aquí se encuentran las porciones secretoras de las glándulas sudoríparas écrinas<sup>2</sup>.

Las dos funciones principales de la piel son la protección física y la termorregulación. Como protección física, aísla al organismo de agentes nocivos externos como bacterias o virus. Previene la pérdida de agua y otros agentes. En zonas de alto riesgo como las manos y las plantas de los pies es una barrera mecánica difícil de penetrar, y por esta misma razón la densidad de glándulas écrinas en estas zonas es mayor, ya que permite la hidratación de la piel para dificultar el rasgado o corte. En estas zonas la densidad glandular puede alcanzar las 2000 glándulas por cm<sup>2</sup>, en contraste con las 100 que se encuentran en el tronco.

En cuanto a la termorregulación, se da porque los mamíferos y aves deben mantener una temperatura estable, independientemente de la temperatura exterior o la actividad física, debido a la delicadeza del Sistema Nervioso Central. La piel interviene en este proceso dependiendo de si se debe disminuir la temperatura, o evitar que disminuya. En el caso de hacer actividad física o de que haya una temperatura ambiental elevada, la sudoración se incrementa fomentando su evaporación. La evaporación del sudor refresca a la piel. Cuando la piel se enfría, también se ve acompañado por una dilatación en los vasos sanguíneos, propiciando que una mayor cantidad de sangre acuda a la piel y pueda disminuir su temperatura. En caso de que la temperatura ambiental sea baja, la sudoración disminuye y los vasos sanguíneos se contraen.

## Estudio de la actividad de la piel

Una variable que puede influir en la respuesta electrodérmica es la personalidad, debido a que se ha encontrado que sujetos introvertidos muestran una reactividad electrodérmica mayor que los extrovertidos [13]. Otra variable podrían ser los trastornos de carácter clínico, tales como la hiperactividad infantil o la esquizofrenia. El insomnio y la fatiga que éste provoca, también se ha

---

<sup>1</sup> Se localizan en axila, pubis, conducto auditivo externo y en el párpado. Estas glándulas son las encargadas de la secreción de las feromonas [10].

<sup>2</sup> La mayor concentración está en las palmas de las manos, plantas de los pies y región frontal de la cara. El control de la producción del sudor por estas glándulas lo realiza el sistema nervioso simpático [10].

investigado y se ha mostrado que sujetos con falta de sueño presentan una mayor actividad electrodérmica (Waters y cols., 1993).

La amplitud de la señal se puede cuantificar con la resistencia o la conductancia de la piel. La resistencia de la piel varía principalmente con la sudoración. El sudor es básicamente un electrolito que, al impregnar el estrato córneo, capa seca y aislante de la epidermis, y rellenar los conductos secretores de las glándulas écrinas, facilita la vía conductora del exterior de la piel a la hipodermis, y viceversa.

Para colocar los electrodos no hay ideas claras sobre qué puntos elegir en ella. Por comodidad se ponen en los dedos, en las falanges medias de los dedos índice y medio [12].

Generalmente se colocan en la mano no dominante, particularmente cuando los sujetos deben hacer alguna tarea manual. La piel no debe rasparse, aunque sí deberíamos asegurarnos de que las manos están limpias frotando con algodón impregnado de acetona o alcohol. No debemos utilizar los geles electrolíticos comercializados para registros de Electroencefalograma (EEG) o Electrocardiograma (ECG), sino electrolitos que reproduzcan la concentración de sal del propio sudor.

Los electrodos para conductancia y resistencia deben ser no polarizables. Una superficie aproximada de  $1\text{cm}^2$  es la más apropiada para cualquier tipo de electrodo. Con este tamaño de electrodo, el rango de la amplitud varía generalmente de 50 a 500  $\text{k}\Omega$  [14].

El parámetro de interés a la hora de cuantificar la señal es la amplitud, mientras que la latencia únicamente se utiliza para saber si la respuesta fue producida realmente por un estímulo o una variable externa. En general, se considera que una respuesta fue provocada por un estímulo si ocurre entre 1 y 3 segundos después de ocurrido dicho estímulo. Las amplitudes de las respuestas son variables, pero con un electrodo como el mencionado anteriormente se puede esperar una respuesta entre los 0.2 y 5  $\text{k}\Omega$ , respectivamente [14].

## **Actividad cardiovascular**

La principal función del sistema cardiovascular es transportar oxígeno y nutrientes a todas las células del organismo, y la recolección de bióxido de carbono y otros desechos, la distribución de hormonas y otras sustancias específicas al organismo [15].

Para que el sistema funcione, se requiere de venas y arterias las cuales son los ductos por donde va a circular la sangre y las bombas que propician su circulación son las aurículas y ventrículos, las cuales forman el corazón. Las aurículas y ventrículos a su vez, están subdivididos en dos partes. Desde el ventrículo derecho se bombea sangre hacia los pulmones en donde se oxigena, posteriormente esa sangre regresa a la aurícula izquierda en donde se bombea la sangre oxigenada a los órganos periféricos a través de la aorta. A este proceso de irrigación de sangre por el organismo se le conoce como ciclo cardíaco.

El ciclo cardiaco consiste en un periodo de relajación llamado diástole, y posteriormente un periodo de contracción conocido como sístole [15]. El corazón consta de cuatro cámaras, las superiores son llamadas aurículas derecha e izquierda y las inferiores son llamadas ventrículos derecho e izquierdo. A las aurículas llega la sangre de las venas, y cuando se contraen la sangre pasa a los ventrículos que se contraen fracciones de segundo después. Cuando ocurre la sístole ventricular la sangre sale hacia las arterias, y de forma simultánea ocurre una diástole auricular que permite que las aurículas reciban sangre. Posteriormente ocurre la diástole ventricular, lo que permite a los ventrículos recibir sangre. Éste proceso se repite en promedio 70 veces por minuto [14].

Cuando se experimentan emociones, los vasos periféricos se contraen o dilatan y, en consecuencia, la tasa cardiaca aumenta o disminuye respectivamente. La razón de esto es porque es necesario suministrar más sangre al cerebro y a la musculatura estriada para facilitar que éstos tengan un mejor suministro de energía [12].

Se ha visto experimentalmente que cuando se experimentan emociones positivas, los cambios suelen ser pequeños en comparación con los observados con emociones negativas como la ira o el estrés. El ritmo cardiaco al experimentar alegría puede tener un cambio de entre 1.6 a 2.6 latidos por minuto [16].

Para poder detectar los cambios en el ritmo cardiaco es posible usar diferentes dispositivos de adquisición de datos, tales como el electrocardiograma, fotopleletismografía o un fonocardiograma.

La característica que es de utilidad en la señal adquirida mediante el fotopleletismógrafo, es la amplitud de la señal. La amplitud se puede interpretar como la variación en el volumen sanguíneo que circula a través de los vasos capilares y se puede interpretar como una vasodilatación local cuando aumenta y una vasoconstricción local [33].

## **Señal mioeléctrica**

El músculo esquelético funciona gracias a las unidades motoras, que están conformadas por una moto neurona y las fibras musculares adjuntas [17]. La electromiografía (EMG) es el estudio de los potenciales eléctricos generados por los músculos durante el movimiento [18].

Una señal mioeléctrica, también llamado potencial de acción motor, es un impulso eléctrico que produce la contracción de las fibras musculares en el cuerpo. El término se utiliza más a menudo en referencia a los músculos esqueléticos que controlan los movimientos voluntarios. Señales mioeléctricas tienen frecuencias que van desde unos pocos Hz a aproximadamente 300 Hz y los niveles de voltaje van desde aproximadamente 10 $\mu$ V a 1mV [18].

## Tipos de electrodos

Para adquirir la señal mioeléctrica es necesario utilizar electrodos que pueda conducir la actividad eléctrica de los grupos musculares deseados. Como los niveles de voltaje son pequeños, se necesita de materiales que sean altamente conductivos. Existen dos tipos de electrodos. Los electrodos internos son menos susceptibles a adquirir ruido en la señal, pudiendo de esta manera tener una señal bastante limpia, pero la señal adquirida solo se enfoca en grupos musculares específicos, por otra parte, los electrodos de superficie pueden adquirir un conjunto de grupos musculares al mismo tiempo y son fáciles de colocar, pero son bastante susceptibles al ruido eléctrico. Se pueden utilizar configuraciones monopolar y bipolar al colocarlos sobre el grupo muscular deseado.

Los materiales utilizados principalmente son el oro de alta pureza (Au), plata clorada (AgCl) y Ag/AgCl. Los electrodos de oro son más robustos y fáciles de mantener y ofrecen una buena calidad de la señal a frecuencias superiores a 0,1 Hz. Los de AgCl y Ag/AgCl proporcionan excelentes señales, polarización más baja, y se pueden utilizar para señales de corriente continua si se desea. Los materiales como el estaño o acero inoxidable, pueden causar baja calidad de la señal en función de la polarización y el ruido [19].

Dentro de los electrodos superficiales podemos encontrar los activos y pasivos. Los pasivos son básicamente una pequeña placa de metal de tamaño y forma variable (circular o rectangular) que se coloca sobre la piel y suele aplicarse un gel electrolítico entre el electrodo y la piel [20].

Los activos son 2 electrodos que vienen fijos en una pequeña carcasa y dentro de ésta se encuentra un preamplificador, el cual amplifica la señal de los electrodos antes de enviarla al amplificador principal del circuito, por lo que la señal obtenida tiene menos cantidad de ruido que los electrodos pasivos, la desventaja es que la distancia inter electrodo ya está fija por lo que no se puede adecuar a todos los experimentos [18].

Los electrodos internos son los que se insertan en la piel para analizar músculos internos o específicos. Se centra principalmente en estudiar unidades motoras individuales.

Dentro de este tipo de electrodos existen los de aguja y los de cable. La diferencia radica en que los de aguja se utilizan principalmente para contracciones estáticas de los músculos, mientras que los de cable, al anclarse mejor al músculo, sirven para estudiar contracciones dinámicas en músculos más profundos, los cuales serían casi imposibles de estudiar mediante electrodos superficiales [18].

## Distancia entre electrodos

La distancia entre electrodos puede afectar tanto a la frecuencia de la señal como a la amplitud. En la figura 1, posicionando a G2 más lejos con respecto a G1, forzará al dipolo a recorrer una mayor distancia. La velocidad de conducción se mantiene constante, por lo que el dipolo necesitará más tiempo para llegar a G2. La señal EMG será de mayor duración y mayor en amplitud. Potenciales de mayor duración resultan en componentes de baja frecuencia en la señal de EMG. Ocurre lo contrario cuando la separación es más corta. Debido a que el contenido de amplitud y frecuencia de señales de EMG se alteran por la distancia entre los electrodos, los electrodos bipolares funcionan como un filtro espacial [18].

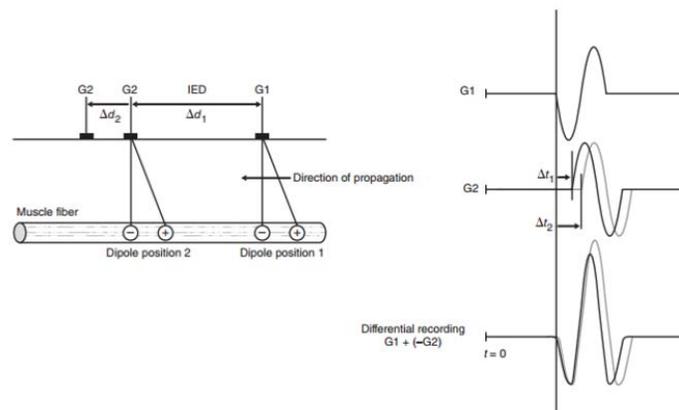


Imagen 1. Distancia entre electrodos

## Preparación de la piel

A fin de minimizar la impedancia entre el contacto electrodo-piel, la Surface ElectroMyoGraphy for the Non-Invasive Assessment of Muscles (SENIAM)1 recomienda que la superficie de la piel sea afeitada de vellos y piel muerta en el lugar objetivo. El afeitado en seco tiene resultados adecuados para eliminar las células muertas de la piel. Una vez afeitado, la piel se debe limpiar con alcohol y dejarse secar antes de colocar los electrodos [19].

## Grupo muscular a registrar

El músculo cigomático es el que está relacionado con la sonrisa. El neurólogo Duchenne, después de hacer investigaciones, concluyó que la contracción de los músculos que rodean a los ojos y el cigomático, reflejan la experiencia genuina de felicidad, alegría y risa. Se puede registrar la actividad del musculo cigomático mediante electrodos. Esta señal se puede filtrar haciéndola pasar por un filtro paso altas con frecuencia de corte en 20Hz para evitar ruido por parpadeos o movimiento. Siendo el rango de corte para el filtro de 20 a 500Hz [21].

## Trabajos actuales relacionados con la detección de emociones (alegría)

En la actualidad, aún es escasa la información relacionada a la investigación de emociones positivas. Básicamente desde sus inicios, las investigaciones psicológicas se enfocaron principalmente en estudiar emociones negativas y cómo éstas afectan la calidad de vida de las personas.

Fue hasta finales de la década de 1990, cuando el profesor Martin Seligman fue quien dio un mayor impulso al estudio de las emociones positivas y creó el área que se conoce como psicología positiva.

### Software para detectar emociones positivas o negativas mediante el análisis del ritmo cardiaco [22].

León Villeda creó un algoritmo que mide el ritmo cardiaco que es detectado mediante el uso de una pulsera, y posteriormente la información es enviada vía bluetooth a un Smartphone o una computadora para su análisis. La respuesta de este análisis es determinar si la emoción experimentada es positiva o negativa. El uso que le da a este software es relacionado con la mercadotecnia. Puede usarse para conocer las emociones que experimenta un sujeto al estar expuesto a anuncios publicitarios, discursos políticos o cualquier otro tipo de campaña que se desee cualificar.

### Aplicación pplkpr [23]

Los artistas y programadores Lauren McCarthy y Kyle McDonald crearon una aplicación llamada pplkpr (siglas de la expresión en inglés 'peoplekeeper') mostrada en la figura 3, que se ayuda de un Smart watch para detectar y analizar señales de ritmo cardiaco. El software analiza las variaciones sutiles en el ritmo del corazón para determinar el estado emocional de una persona. Los sensores se ubican en la muñeca y las señales adquiridas son enviadas a la aplicación en el celular, en donde son analizadas y la aplicación es capaz de detectar si te sientes enfadado, aburrido, triste o alegre. La finalidad de esta aplicación, es mostrarte qué emoción estuvo presente en tí mientras estuviste con alguna persona, y aconsejarte si deberías o no seguir viendo a dicha persona.



*Imagen 2. Smart Watch enviando información a la app en Smartphone*

## Hitachi Human Big Data [24]

Científicos japoneses crearon un dispositivo del tamaño de una tarjeta de crédito que se cuelga en el cuello y puede analizar si una persona es feliz en su trabajo y así mejorar su vida laboral y la productividad. Los desarrolladores de este dispositivo explican que hay una relación entre las acciones que realiza una persona en el trabajo y su felicidad. Por esta razón, los datos que analiza el dispositivo para detectar el estado de ánimo son el tiempo que el usuario tarda en hablar con otras personas, las veces que se levanta de su lugar, el momento del día en que platica con otras personas, los lugares que frecuenta e incluso la silla en la que prefiere sentarse durante una junta.



*Imagen 3. Dispositivo Human Big Data de Hitachi*

## Evaluación de parámetros fisiológicos para reconocer emociones [25]

Primero desarrollaron el dispositivo para adquirir las señales fisiológicas, posteriormente aplicaron como estímulo las imágenes de IAPS (International Affective Picture System) para evocar en los sujetos las emociones de alegría, placer, disgusto y miedo. Las señales fisiológicas que detectaron para dicho fin fueron fotopletismografía, electromiografía, electrocardiograma, respuesta galvánica de la piel y temperatura de la piel. Después de adquirir, procesar y extraer las características de las señales, se introdujeron 19 parámetros a un vector clasificador para evaluar el significado de los parámetros y evaluar el reconocimiento de emociones. Su conclusión fue que algunos parámetros no resultaron ser buenos para el análisis de las emociones.

## Inducción de emociones y reconocimiento de emociones usando sus señales fisiológicas [26]

En este estudio, los científicos se enfocaron en detectar 3 estados emocionales, aburrimiento, sufrimiento y sorpresa. Se utilizaron estímulos para provocar en los sujetos de estudio estas emociones, dichos estímulos son fragmentos de vídeos obtenidos de películas, documentales y programas de televisión. Las señales fisiológicas que se detectaron fueron temperatura de la piel,

actividad electrodérmica, fotopleiometría y electrocardiograma. Para adquirir estas señales, ellos utilizaron el dispositivo MP150 Biopac system Inc. Utilizaron redes neuronales artificiales y lógica difusa para analizar los datos y evaluar las emociones.

## Capítulo 2

### Metodología

El primer paso para cumplir el objetivo fue hacer una investigación previa sobre otros trabajos que tuvieran objetivos similares al de esta tesis para tener una idea general de los posibles caminos a seguir para cumplir el objetivo propio.

Fue necesario hacer una distinción entre los conceptos de “felicidad” y “alegría”, ya que cotidianamente se suelen utilizar de forma indistinta, sin embargo, la diferencia es de tal magnitud que al querer identificarlas se usarían métodos completamente distintos.

Al tener claro lo que implica la alegría, el siguiente paso es identificar qué tipo de señales pueden ser de utilidad y seleccionar las que mejor se adecuen a nuestras posibilidades.

A continuación, se hace una investigación alrededor de las bioseñales seleccionadas, de qué forma pueden ser adquiridas, que tipo de sensores utilizar, en donde se colocan, etc. Buscando que sean compatibles con los objetivos.

Cuando ya se seleccionaron las bioseñales y se sabe de qué forma van a ser adquiridas, lo siguiente es hacer el diseño electrónico de la parte de instrumentación del dispositivo. Esta etapa debe cumplir con la adquisición y acondicionamiento de las bioseñales. Se hacen pruebas hasta que los resultados sean satisfactorios.

Posteriormente se realiza la transferencia de datos utilizando el protocolo más conveniente, en este caso se utilizó UART (Transmisor-Receptor Asíncrono Universal por sus siglas en inglés). Este tipo de comunicación envía bits uno a uno de forma serial, desde el emisor. El receptor almacena cada bit y posteriormente los convierte en bytes.

Se diseña una interfaz gráfica amigable en donde se muestren gráficas con los datos adquiridos y se almacenen en un archivo para su posterior análisis.

Después de hacer las pruebas pertinentes para comprobar que funciona nuestro sistema de adquisición, acondicionamiento, visualización y almacenamiento de datos, se diseña un protocolo a seguir para realizar las pruebas con la ayuda de sujetos de estudio, así como una cédula que los sujetos deben firmar y llenar si están de acuerdo con participar en el experimento.

Se realizan las pruebas siguiendo el protocolo previamente diseñado y se recaba la información.

Para finalizar, se hace un análisis de la información recabada para afirmar o negar que se cumplieron los objetivos y por qué.

El siguiente diagrama muestra la metodología seguida de forma gráfica:

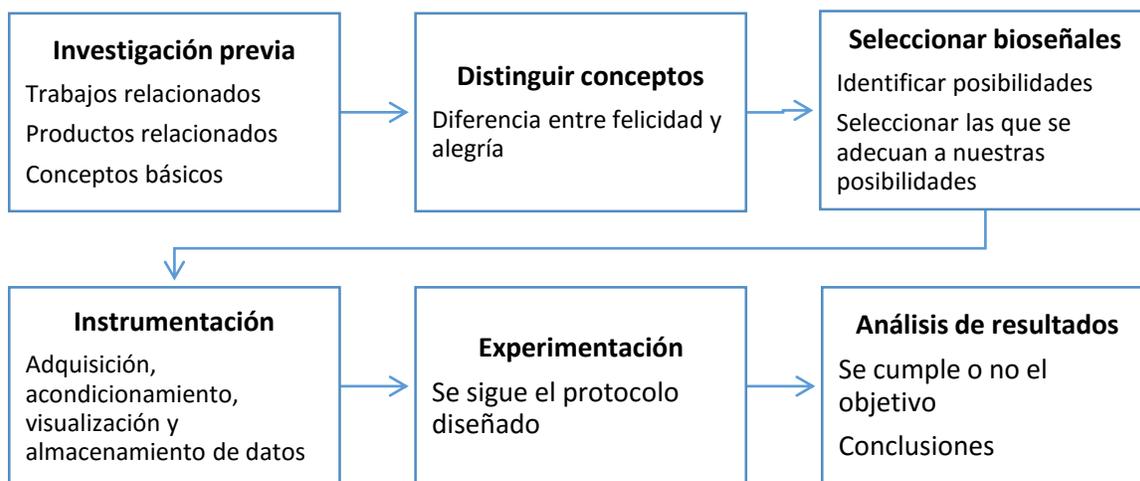


Imagen 4. Diagrama de la metodología seguida.

## Prueba de concepto

Después del proceso de seleccionar los sistemas que en conjunto van a conformar el dispositivo, es necesario poner a prueba cada uno de ellos para comprobar que efectivamente cumplen con los objetivos.

Los experimentos se diseñaron con la intención de evocar en los sujetos de estudio sensación de alegría.

La meta al finalizar las pruebas, es encontrar qué características se repiten en los sujetos de estudio durante la aplicación del estímulo, ya que se espera que durante este lapso es donde se pueda localizar la emoción.

Se programaron 3 experimentos que buscan evocar alegría en los sujetos. El primero utilizando un estímulo audiovisual, el segundo un estímulo musical y el tercero resolviendo un desafío.

Al inicio y al final de cada prueba hay un lapso donde no hay clase alguna de estímulo, buscando obtener las respuestas fisiológicas relacionadas con un estado basal en cada sujeto, para de ésta

forma poder compararlo con las respuestas fisiológicas obtenidas durante la aplicación del estímulo y localizar las características relacionadas con la alegría.

Las pruebas podrían verse alteradas debido a variables externas independientes de la prueba, como el lugar donde se lleva a cabo el experimento, la iluminación, la disposición de los sujetos de prueba, etc. por esta razón se detallaron previo a las pruebas las condiciones con las que se deberían llevar a cabo las pruebas.

Las siguientes imágenes muestran la ubicación de los sensores en el sujeto de estudio:

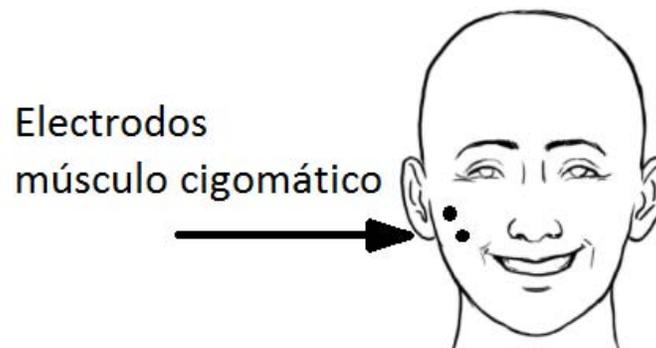


Imagen 5. Colocación de electrodos en músculo cigomático.

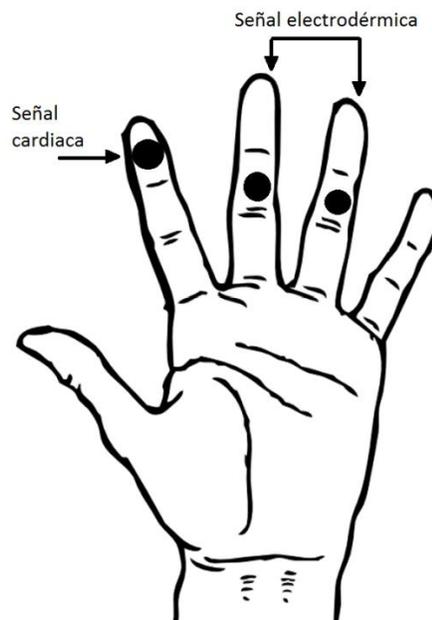


Imagen 6. Colocación de sensores para respuesta electrodérmica y señal cardíaca.

Para el estímulo audiovisual se propuso visualizar una recopilación de vídeos divertidos encontrados en internet sin contener vídeos de chistes o mensajes graciosos, ya que el humor varía mucho entre cada persona.

En el estímulo auditivo, se propuso que cada sujeto eligiera la canción que más les hiciera sentir alegría. Es importante que cada quien elija su música porque esta les puede traer recuerdos que evoquen en ellos la emoción deseada, y solo ellos saben que música es la necesaria.

La alegría se relaciona también con el logro de una meta o éxito en una empresa. Esta es la razón por la que se propuso como tercera prueba realizar un desafío que provocara una respuesta positiva al ser resuelto por los sujetos.

## **Prueba 1**

La prueba consiste en reproducir un vídeo de 3 minutos a los sujetos de estudio con vídeos graciosos para tratar de evocar alegría en los sujetos de estudio mientras lo veían. La prueba dura en total 7 minutos, con 2 minutos al inicio sin estímulo, posteriormente 3 minutos de estímulo y al final 2 minutos más en estado basal.

A los sujetos se les pidió que se relajaran y que vieran el vídeo, sin tratar de fingir u ocultar sus emociones, es decir, si el vídeo les parecía divertido se deberían reír, si el vídeo no les parecía divertido en absoluto, no había problema en mantenerse serios durante toda la prueba.

Para corroborar posteriormente las señales obtenidas con lo que sucedió en realidad, se tomó un vídeo de los sujetos mientras miraban el vídeo, para saber en qué momento de la prueba se notaba un cambio en su expresión facial, principalmente identificar una risa.

El músculo elegido para colocar los electrodos de electromiografía fue el músculo cigomático, y éste fue el único sistema que en pequeña medida resultó incómodo, pero los sujetos de prueba pudieron contrarrestar esa sensación después de un tiempo.

El vídeo es una recopilación de vídeos graciosos encontrados en internet. Se buscó reproducir vídeos graciosos o divertidos sin contener escenas grotescas o violentas, así mismo se evitó reproducir vídeos que contuvieran chistes o diálogos divertidos, ya que en esta forma sería más subjetivo encontrar que es gracioso para todos. Otra cosa que se consideró para elegir los vídeos fue buscar los que no fueran excesivamente populares para evitar que hubiera una predisposición entre los sujetos y al conocer lo que va a pasar perdiera lo gracioso y en cambio resultara aburrido o monótono.

## Prueba 2

La prueba 2 consistió en utilizar música como estímulo para tratar de evocar alegría en los sujetos de prueba. En este caso es evidente que no se espera que los sujetos se rían o incluso sonrían, pero igual forma se colocaron los electrodos de electromiografía en caso de que el sujeto haga alguna expresión facial. La música fue elegida totalmente por los sujetos de prueba a gusto de cada uno, pidiéndoles que eligieran una canción en especial que les guste y que les haga sentirse alegres.

La prueba consistió en 3 etapas. La primera con duración de 2 minutos fue una etapa de relajación para el sujeto de estudio para poder usarla como control y compararla posteriormente con la etapa del estímulo. La siguiente etapa es donde se aplica el estímulo, con la ayuda de unos audífonos y un reproductor de música se inicia la melodía indicándole al sujeto de prueba que simplemente escuche la música y trate de guiarse por las emociones que ésta le provoque. Para finalizar con la tercera etapa, se le pide nuevamente al sujeto de prueba que nuevamente se relaje durante 2 minutos posteriores a la aplicación del estímulo, y trate de estar tranquilo durante este lapso.

## Prueba 3

La prueba final se ideó con el objetivo de corroborar la información recabada en las pruebas anteriores. El objetivo de esta etapa es encontrar un momento en que el sujeto de prueba haya experimentado alegría después de resolver un desafío mental, la cual se presentaría después de haber descubierto la respuesta y sentirse satisfechos consigo mismos.

Ésta prueba se dividió en 3 etapas. La primera constó de un minuto de relajación para tratar de que el usuario estuviera en su estado basal y tomar las señales obtenidas en esta etapa como referencia. Posteriormente se le indicó al sujeto de prueba que podía iniciar a resolver el desafío. Cuando encontraron la solución, se les confirmó que efectivamente estuvo bien su respuesta y se les pidió un minuto más de relajación para tomarlo como referencia.

Para no interferir con la prueba, se les dieron las instrucciones de lo que debían hacer en el desafío antes de iniciar la prueba, mediante un ejemplo de lo que debían hacer.

Las instrucciones del desafío fueron las siguientes:

Con los dígitos: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9.

Encuentra una manera de colocar los signos de suma y resta (+, -) entre los números para que den como resultado el número 100, sin alterar el orden de los dígitos.

Sí puedes unir dígitos sin ningún signo, pero no desordenar la secuencia de dígitos, ejemplo:  
1 - 23 + 456...

## Necesidades del proyecto

Identificar las necesidades del proyecto desde el inicio es de vital importancia para el desarrollo del mismo, porque nos va a dar la pauta para determinar los objetivos y de qué forma podemos llegar a conseguirlos.

Para determinar las necesidades es posible hacerlo interactuando con los posibles usuarios mediante una entrevista, un análisis de mercado o con la observación de productos similares [29]. En este caso se ha recurrido a analizar productos similares e investigando en artículos relacionados con la investigación del presente tema.

Las necesidades son independientes del producto final, y no se distingue entre deseos o metas [29], por lo que es posible en esta etapa describir todo lo que queremos en el producto final sin importar si es realizable o no. Las necesidades del dispositivo son el resultado de traducir los enunciados del usuario.

Las enfermedades mentales y las emociones negativas han sido el principal centro de atención y, por consiguiente, de investigación de la psicología en las últimas décadas [26]. Se ha hecho investigación tratando de comprender las causas y consecuencias de diferentes enfermedades, y entre algunas de esas causas están las emociones negativas como la tristeza o el miedo. Pero se habían dejado de lado las emociones positivas y los beneficios que pueden traer a los individuos o a un conjunto de ellos ya sea en el trabajo, escuela o la sociedad. Es por este motivo que el presente trabajo busca enfocarse únicamente en la emoción positiva de alegría y desarrollar un dispositivo de bajo costo que tenga la capacidad de detectar dicha emoción.

En la actualidad existen algunos dispositivos que ya son capaces de reconocer emociones positivas.

El uso principal que tienen la mayoría de estos dispositivos es cualificar campañas publicitarias, y se empiezan a hacer investigaciones también sobre los estados de ánimo positivos que experimenta una persona en su trabajo, debido a que se ha descubierto que los trabajadores que experimentan emociones positivas aumentan su productividad. Los usos se pueden extender a otras áreas como determinar qué tan efectivos son los métodos de enseñanza en un salón de clases, la calidad del servicio en un establecimiento, entre otros. Por esta razón es importante que sea portable y tenga la capacidad de almacenar datos para su posterior análisis.

En los casos en donde se deseen comprender las emociones experimentadas en un grupo de personas como en un salón de clases o un centro de trabajo, también es deseable que el dispositivo sea de bajo costo ya que se requerirán varias piezas para hacer un análisis de cada uno de los individuos. Si el dispositivo se utiliza para uso personal, por ejemplo, en forma de un dispositivo portátil, éste debe ser ligero, cómodo y debe identificar las características de la emoción y almacenar la información.

## Características fisiológicas

Tanto en emociones negativas como en positivas, es posible identificar activación cardíaca (Harrison, 2013). Pero es posible hacer una comparación entre ambos estados. La alegría, en comparación con emociones negativas, se distingue por presentar vasodilatación provocando una disminución en la presión sanguínea y ritmo cardíaco [12].

Las emociones se pueden ver reflejadas evocando actividad muscular facial. Existen 2 tipos de músculos que son inervados principalmente, el cigomático y el corrugador. A pesar de que actúan en conjunto para reflejar emociones faciales tanto positivas como negativas, en el caso de la alegría, el músculo principal es el cigomático (W., 1984).

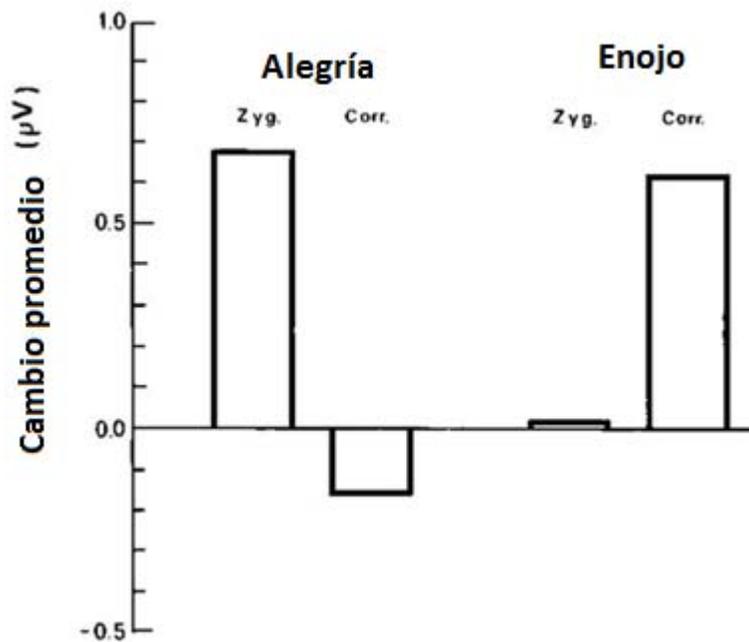


Imagen 7. Cambio promedio en la activación del músculo cigomático de la alegría y el enojo.

El músculo cigomático se ve reflejado visualmente como una sonrisa, y está sumamente relacionado con la alegría. A diferencia de otras emociones, este músculo puede presentar poca o nula activación, sin embargo, al sentir alegría es cuando presenta un nivel mayor de inervación [27].

La actividad electrodérmica se ve reflejada por la sudoración en la piel. Esta sudoración es inervada por el sistema nervioso simpático, y mientras más excitación se experimente con las emociones, mayor será el grado de sudoración.

## Modelo circunflejo de emociones

El modelo circunflejo fue propuesto por James Russell. Se representa mediante 2 ejes, el horizontal representa la valencia y el vertical la excitación. La valencia representa que tan placentera es la emoción [30]. Este modelo se ha utilizado comúnmente para hacer pruebas donde los estímulos sean palabras emocionales, expresiones faciales y estados afectivos [29].

Tomando en cuenta la representación bidimensional de las emociones, podemos identificar a la alegría como un estado positivo de baja excitación, por lo que se espera que existan picos en la señal de respuesta electrodérmica, pero de una amplitud baja.



Imagen 8. Gráfica de emociones excitación vs valencia [30]

En la siguiente tabla se describen las características esperadas para cada señal, con base en la gráfica de la imagen 8.

Subsistema	Características esperadas
Respuesta electrodérmica	Respuesta tónica de baja amplitud
Ritmo cardíaco	Disminución del ritmo cardíaco
EMG	Activación muscular de alta amplitud

Tabla 2. Características fisiológicas esperadas

## Características del dispositivo

Tomando en cuenta lo anterior, las características principales con las que se desea que el producto final cumpla son las siguientes:

Característica	Descripción
<b>Interfaz amigable con el usuario</b>	El usuario final debe ser capaz de utilizar el dispositivo sin mayores complicaciones y el sistema debe tener tal facilidad de uso que el usuario pueda intuir la forma de hacerlo funcionar.
<b>Portátil</b>	Debe ser capaz de ser trasladado de un lado a otro sin necesidad de volver a armar el circuito o conectar y desconectar demasiados cables que hagan confuso o difícil volver a usarlo después de un traslado. El tamaño final del dispositivo debe ser tan pequeño que pueda ser trasladado en una mochila y ligero para no causar molestia al usuario.
<b>Fácil de usar</b>	Tanto la interfaz como la colocación de los electrodos debe ser fácil de intuir y no debe requerir conocimientos técnicos para saber colocarlos.
<b>Confortable</b>	Es de vital importancia que el dispositivo sea confortable, tanto para la comodidad del usuario como para prevenir posibles interferencias para llegar al estado de ánimo deseado debido a molestia por parte del usuario, provocando otras emociones no deseadas como ira o estrés.
<b>Almacenamiento de datos</b>	Esta característica es importante para hacer un análisis de las señales ya sea en tiempo real o posterior a la adquisición.

Tabla 3. Características generales

Como primer paso para la metodología de diseño utilizada, se debe hacer una lista con las necesidades que van a describir qué características o funciones debe cumplir el dispositivo final.

Para crear dicha lista se tomaron en cuenta las características descritas, así como una encuesta realizada a posibles usuarios del dispositivo final.

Las necesidades deben ser expresadas como un atributo del dispositivo, y deben describir qué características debe cumplir, y no cómo cumplirlas.

La siguiente tabla muestra la información recabada, enumerando las necesidades obtenidas y asignándoles una jerarquización que busca calificar el grado de importancia de las necesidades en el dispositivo final, siendo 5 la de mayor importancia y por lo tanto una característica que se debe satisfacer en el dispositivo final, y 1 la de menor importancia.

No. De necesidad	Traducción a necesidad	Jerarquización
1	El dispositivo es portátil	3
2	El dispositivo almacena datos	4
3	El costo del dispositivo es aproximadamente igual o menor al de productos similares existentes en el mercado	2
4	El dispositivo es ligero	4
5	El dispositivo es ergonómico	4
6	Identifica alegría en tiempo real	3
7	Interfaz con el usuario fácil de entender	4

*Tabla 4. Necesidades del proyecto*

Podemos concluir de la tabla anterior que se busca la portabilidad del dispositivo, así como ser ergonómico. Esto es importante para poder hacer pruebas en diferentes sitios sin la necesidad de trasladarse a un lugar en específico y que sea una molestia tanto para el usuario como para el sujeto de prueba, lo que podría alterar el resultado del experimento.

De igual forma se tiene la posibilidad de realizar pruebas en lugares donde se deseen evaluar las emociones de los sujetos de prueba, por ejemplo, una escuela o un área de trabajo.

En cuanto a la interfaz con el usuario, se busca que sea fácil de usar y que tenga la capacidad de almacenar los datos recabados, con la finalidad de poder analizar la información obtenida en el

futuro, así como en diferentes computadoras, sin necesidad de que otro usuario tenga instalada la interfaz gráfica o tenga en su poder el dispositivo.

### **Especificaciones del sistema**

Es importante señalar que las necesidades son independientes del concepto final. Las necesidades son un atributo potencial para el producto final, y son características deseadas por el usuario sin saber si se podrán cumplir ni en qué forma.

Por otro lado, las especificaciones dependen completamente del concepto que seleccionemos, y se van a seleccionar de acuerdo con lo que sea económica y técnicamente factible, de los productos existentes en el mercado y de las necesidades del cliente. En conclusión, las necesidades nos dan una idea de las posibles características que tendrá el producto final y de lo que el cliente quiere, pero al determinar cuáles son factibles y adecuarlas al sistema obtenemos las especificaciones [29].

Para detallar las especificaciones necesitamos asignar métricas. Las métricas necesarias para describir cada una de las especificaciones deben ser lo más directas posibles. A continuación, se muestra una tabla donde se colocan las métricas para cada especificación:

<b>No. de métrica</b>	<b>Especificación</b>	<b>Unidades</b>
1	Peso del dispositivo	< 1kg
2	Dimensiones del dispositivo	
3	Memoria de almacenamiento	> 1Mb
4	Visualización de datos mediante gráficas	Subj.
5	Botones de la interfaz gráfica	1 botón
6	Frecuencia de la señal cardiaca	0.4 – 4 Hz
7	Frecuencia de la señal muscular	15 – 500 Hz
8	Frecuencia de la respuesta electro dérmica	> 0.05 Hz
9	Amplitud de las bioseñales	>1 V

*Tabla 5. Especificaciones del dispositivo*

La tabla anterior muestra las especificaciones del dispositivo final, y sirve como una guía de cómo satisfacer las necesidades. La importancia de esta tabla, también radica en que muestra las limitaciones y alcances del dispositivo final, tomando en cuenta las capacidades técnicas y económicas con las que se cuenta para la realización del dispositivo final.

## Capítulo 3

Es importante hacer una comparación con la tecnología actual disponible en el mercado, a menos que se considere tener el monopolio en dicho producto [31], el cual no es el caso en el presente trabajo, aunque actualmente los productos relacionados son pocos y los trabajos relacionados principalmente se hacen en centros de investigación. La siguiente tabla muestra una comparación entre los trabajos relacionados que pueden realizar funciones similares a las del presente proyecto.

<b>Métrica</b>	<b>Software detecta emociones</b>	<b>App pplkpr</b>	<b>Hitachi Human Big Data</b>	<b>Unidades</b>
Peso del dispositivo	< 1kg	< 1kg		kg
Dimensiones del dispositivo	No aplica	No aplica		cm
Memoria de almacenamiento	Depende del dispositivo	Depende del dispositivo	No disponible	Mb
Visualización de datos mediante gráficas	No	No	Si	Subj.
Botones de la interfaz gráfica	no	3	No	botón (es)

*Tabla 6. Tabla comparativa de métricas*

Como se aprecia en la tabla, no fue posible obtener la información de algunas métricas para la comparación de los dispositivos, debido a la poca información disponible. En el mercado se pueden encontrar mayormente software para el análisis de las señales, pues gracias a que actualmente es posible encontrar pulseras o relojes con sensores incluidos. El único producto que aborda el tema de una manera diferente es el Hitachi Human Big Data, que utiliza otro tipo de información mediante sensores de movimiento y micrófono.

La mayoría de los productos que existen actualmente utilizan fotopleletismografía y respuesta electrodérmica para detectar algún tipo de emoción, ya sea positiva o negativa. En experimentos en centros de investigación se utilizan además otros sistemas como electrocardiograma, electroencefalograma, temperatura corporal y frecuencia respiratoria, pero tener tantos electrodos y sensores interferiría con la comodidad del usuario y esto provocaría que fuera más complicado entrar en un estado de alegría lo cual interferiría con los objetivos del proyecto. Es por esta razón

que se decidió utilizar un número menor de sistemas eligiendo los que fueran lo menos invasivos posible y dieran información relevante.

## **Generación de conceptos**

En esta etapa se busca describir la tecnología, principios de trabajo y forma del producto [31], detallando la forma en cómo se van a satisfacer las necesidades mediante bosquejos o modelos del sistema.

Para iniciar con esta generación de conceptos es importante tener en cuenta las necesidades y las especificaciones establecidas para tener una idea de cómo vamos a satisfacer dichas necesidades. Pero para ello debemos entender bien los posibles problemas y alternativas que tendremos durante el proceso de construcción del dispositivo, y un buen inicio para entender bien la generación de conceptos es dividir el problema, en este caso, analizaremos cada uno de los subsistemas del dispositivo:

### **Sistema de fotopleletismografía**

Este sistema nos va a devolver una señal que describe el flujo sanguíneo a través de los vasos capilares en cierta zona del cuerpo. Para poder obtener esta señal podemos elegir entre ciertas zonas que ya han sido probadas con anterioridad, principalmente suele ser la falange distal del dedo medio o índice de la mano no dominante, el lóbulo de una oreja, o en los dedos del pie.

### **Sistema de electromiografía**

La señal que podremos obtener gracias a este sistema es la actividad de cierto grupo muscular, esto es colocando 2 electrodos sobre el músculo objetivo, y un tercero como referencia en alguna zona libre de músculo esquelético. Para la alegría no hay músculos específicos que nos indiquen si se experimenta esa emoción, pero podemos intuir porque sabemos que cuando alguien se siente alegre su expresión facial se suele modificar y la característica más destacable es la sonrisa, por ello se eligió el músculo cigomático para colocar los electrodos.

### **Sistema de respuesta electrodérmica**

Este sistema se encarga de detectar la sudoración en la piel, haciendo pasar una pequeña corriente sobre la piel y detectando el cambio de voltaje entre ambos electrodos debido a la sudoración, que funciona como un electrolito que hace variar la resistencia. Las glándulas écrinas se encuentran en la mayor parte del cuerpo, pero es en las palmas de las manos y en las plantas de los pies en donde se encuentra la mayor concentración de dichas glándulas, lo que las hace zonas ideales para colocar los electrodos.

La información anterior describe la forma de abordar la adquisición de las bioseñales, de donde podemos determinar diferentes posibilidades para diseñar el sistema de instrumentación necesario para cada una.

Para cada uno de los sistemas se consideran diferentes posibles soluciones, y es imprescindible comparar cada una de ellas para poder determinar cuál es la mejor opción.

A continuación, se muestran 3 tablas enlistando las posibles alternativas para satisfacer cada una de las características de cada sistema.

En la siguiente tabla se muestran las posibilidades para el tipo de sensor, la ubicación y el tipo de colocación. En esta tabla solo se describen las posibilidades consideradas.

<b>Posibilidades para el Sistema de fotopletoisgrafía</b>		
<b>Tipo de sensor</b>	<b>Ubicación del sensor</b>	<b>Tipo de colocación</b>
Utilizar un LED infrarrojo y un fototransistor por separado	Falange de los dedos de la mano	Utilizar una superficie lisa y sobre el nivel de esa superficie colocar el sensor
	Falange de los dedos del pie	
Utilizar un empaquetado que incluye un LED infrarrojo y un fototransistor colocados lado a lado	Lóbulo de una oreja	Utilizar una pinza para sujetar el sensor
		Utilizar un velcro para sujetar el sensor a una falange

*Tabla 7. Tabla de posibilidades para sistema de fotopletoisgrafía*

La siguiente tabla se muestran las posibilidades consideradas para la ubicación de los electrodos y el material de los electrodos.

<b>Posibilidades para el Sistema de respuesta electrodérmica</b>	
<b>Ubicación de los electrodos</b>	<b>Material de los electrodos</b>
Falanges de los dedos de la mano	Electrodos de Ag/ClAg  Electrodo hecho con una placa de cobre
Palma de la mano	
Falanges de los dedos del pie	

*Tabla 8. Tabla de posibilidades para sistema de respuesta electrodérmica*

La siguiente tabla muestra las posibilidades consideradas para la ubicación de los electrodos y el tipo de electrodos a utilizar.

<b>Posibilidades para el Sistema de electromiografía</b>	
<b>Ubicación de los electrodos</b>	<b>Tipos de electrodo</b>
Músculo cigomático	Electrodos superficiales
Músculo corrugador superciliar	Electrodos de aguja

*Tabla 9. Tabla de posibilidades para sistema de electromiografía*

Al tener una lista con los posibles dispositivos a utilizar para satisfacer los requerimientos, a continuación, se hacen las comparaciones entre posibles soluciones para elegir la mejor alternativa.

En la siguiente tabla se muestra una comparación entre las posibilidades de convertidor analógico-digital y transferencia de datos a la computadora:

<b>Sistema de adquisición de datos</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Convertidor ADC + circuito integrado Max232 (comunicación serial)	Posibilidad de elegir bits de resolución	Circuito complicado  Tiempo de armado prolongado  Susceptible a fallas por mala conexión
Arduino UNO	Conocimiento previo  Sencillo de utilizar  Tarjeta ya adquirida	10 bits de resolución  Taza de muestreo máxima 10000 muestras por segundo
PIC + Max232	Posibilidad de elegir taza de muestreo y resolución	Poca experiencia utilizándolos  Circuito complicado
DAQ USB-6009 National Instruments	12 bits de resolución  Fácil de utilizar  Experiencia previa	10000 muestras por Segundo  Compatible con Labview

*Tabla 10. Tabla comparativa para sistema de adquisición de datos*

El sistema Arduino UNO es el que muestra más ventajas en comparación con los demás sistemas y es el que se seleccionó para ser utilizado en la versión final.

Posteriormente hacemos el mismo procedimiento para las alternativas de los sistemas de adquisición de bioseñales haciendo tablas que describan las posibles combinaciones que cumplirán con los requerimientos y necesidades.

Como se definió, una de las necesidades más importantes es la comodidad del sujeto, y es bien sabido que la colocación de algunos electrodos puede poner en juego la comodidad y, por el contrario, hacer que el sujeto se sienta apenado o tenso. Es por esta razón que se decidió desechar las posibilidades que incluyen colocar electrodos o sensores en los pies.

## Tablas comparativas de soluciones para el sistema de fotopleletismografía

Las siguientes 4 tablas muestran combinaciones posibles del tipo de sensor, ubicación del sensor y tipo de colocación para el sistema de fotopleletismografía con la finalidad de hacer una comparación entre las cuatro posibles soluciones y seleccionar la opción que mejor se adapte al proyecto.

<b>Opción A Sistema de fotopleletismografía</b>	
Tipo de sensor	QRD1114
Ubicación del sensor	Falange de un dedo de la mano
Tipo de colocación	Pinza sujetadora

<b>Opción B. Sistema de fotopleletismografía</b>	
Tipo de sensor	LED infrarrojo + fototransistor
Ubicación del sensor	Lóbulo de la oreja
Tipo de colocación	Pinza sujetadora

<b>Opción C. Sistema de fotopleletismografía</b>	
Tipo de sensor	LED infrarrojo + fototransistor
Ubicación del sensor	Falange de un dedo de la mano
Tipo de colocación	Pinza sujetadora

<b>Opción D Sistema de fotopleletismografía</b>	
Tipo de sensor	QRD1114
Ubicación del sensor	Falange de un dedo de la mano
Tipo de colocación	velcro

Las cuatro opciones muestran ventajas y desventajas entre sí. Se realizaron pruebas colocando el sensor en las diferentes ubicaciones y en donde mejores resultados se obtuvieron fue en las falanges de las manos. De la misma manera se realizaron pruebas con las diferentes posibilidades para el tipo de colocación y el tipo de sensor ubicándolos en las falanges de la mano izquierda, y se obtuvo un mejor ajuste al dedo utilizando velcro. Utilizando el sensor QRD1114 se mantuvo más estable en el dedo, lo que al final se refleja en una señal con menos ruido por movimiento mecánico.



## Tabla de elección de concepto

En la tabla de elección de concepto se hace una comparación entre las cuatro opciones que se mencionaron, calificando la importancia de cada criterio y haciendo una suma cuyo resultado final es comparado con las demás opciones y se selecciona la de más alta calificación. La evaluación toma en cuenta la realización de pruebas con las alternativas mencionadas, así como la capacidad técnica para llevarlas a cabo. La calificación asignada va de 1 a 5, siendo 1 la de menor importancia y 5 imprescindible.

		Concepto							
		Opción A		Opción B		Opción C		Opción D	
Criterio de selección	Peso	Calificación	Evaluación ponderada						
<b>Comodidad</b>	35%	3	1.05	3	1.05	3	1.05	4	1.4
<b>Facilidad de colocación</b>	20%	4	0.8	4	0.8	4	0.8	4	0.8
<b>Facilidad de construcción</b>	15%	2	0.3	2	0.3	1	0.15	3	0.45
<b>Facilidad de uso</b>	15%	4	0.6	4	0.6	3	0.45	3	0.45
	Total de puntos		3.2		3.2		2.9		3.7
	Lugar	4		2		4		1	
¿Continuar?	No	No		No		Si			

Tabla 11. Tablas de elección de concepto para el sistema de fotoplestismografía

Se ha seleccionado la opción D porque se pueden realizar las pruebas requeridas con ese sistema y se cuenta con la capacidad técnica y económica para su construcción, además de que satisface los requerimientos del sistema.



## Tablas comparativas de soluciones para el sistema de respuesta electrodérmica

Las siguientes 4 tablas muestran combinaciones posibles de la ubicación de los electrodos y el material de los electrodos para el sistema de respuesta electrodérmica con la finalidad de hacer una comparación entre las cuatro posibles soluciones y seleccionar la opción que mejor se adapte al proyecto.

<b>Opción A. Sistema de respuesta electrodérmica</b>	
<b>Ubicación de los electrodos</b>	<b>Falanges de los dedos de la mano</b>
<b>Material de los electrodos</b>	<b>Electrodos de Ag/ClAg</b>

<b>Opción B. Sistema de respuesta electrodérmica</b>	
<b>Ubicación de los electrodos</b>	<b>Falanges de los dedos de la mano</b>
<b>Material de los electrodos</b>	<b>Electrodo hecho con una placa de cobre</b>

<b>Opción C. Sistema de respuesta electrodérmica</b>	
<b>Ubicación de los electrodos</b>	<b>Palma de la mano</b>
<b>Material de los electrodos</b>	<b>Electrodo hecho con una placa de cobre</b>

<b>Opción D. Sistema de respuesta electrodérmica</b>	
<b>Ubicación de los electrodos</b>	<b>Palma de la mano</b>
<b>Material de los electrodos</b>	<b>Electrodos de Ag/ClAg</b>

Para elegir la mejor opción, se realizaron pruebas colocando los electrodos en las falanges de los dedos de la mano izquierda y en la palma de la mano. Lo que se concluyó fue que es complicado colocar los electrodos en la palma sin tener que utilizar cinta o velcro que cubrieran parte de la mano, lo cual provoca sudoración que puede interferir con el resultado final.

El material de los electrodos elegido fue Ag/ClAg debido a que ya se contaba con electrodos de tal material.



## Tabla de elección de concepto

En la tabla de elección de concepto se hace una comparación entre las cuatro opciones que se mencionaron, calificando la importancia de cada criterio y haciendo una suma cuyo resultado final es comparado con las demás opciones y se selecciona la de más alta calificación. La evaluación toma en cuenta la realización de pruebas con las alternativas mencionadas, así como la capacidad económica y técnica para llevarlas a cabo. La calificación asignada va de 1 a 5, siendo 1 la de menor importancia y 5 imprescindible.

		Peso	Concepto							
			Opción A		Opción B		Opción C		Opción D	
Criterio de selección			Calificación	Evaluación ponderada						
<b>Comodidad</b>		35%	4	<b>1.4</b>	4	<b>1.4</b>	3	<b>1.05</b>	4	<b>1.4</b>
<b>Facilidad de colocación</b>		20%	4	<b>0.8</b>	4	<b>0.8</b>	2	<b>0.4</b>	2	<b>0.4</b>
<b>Facilidad de construcción</b>		15%	5	<b>0.75</b>	3	<b>0.45</b>	3	<b>0.45</b>	4	<b>0.6</b>
<b>Facilidad de uso</b>		15%	4	<b>0.6</b>	4	<b>0.6</b>	4	<b>0.6</b>	4	<b>0.6</b>
	Total de puntos			4		3.85		3.1		3.45
	Lugar		1		2		3		4	
	¿Continuar?		Si		No		No		No	

Tabla 12. Tabla de elección de concepto para el sistema de respuesta electrodérmica

Se ha seleccionado la opción A porque se pueden realizar las pruebas requeridas con ese sistema y se cuenta con la capacidad técnica y económica para su construcción, además de que satisface los requerimientos del sistema.

## Tablas comparativas de soluciones para el sistema de electromiografía

Las siguientes 4 tablas muestran combinaciones posibles de la ubicación de los electrodos y el tipo de electrodos para el sistema de electromiografía con la finalidad de hacer una comparación entre las cuatro posibles soluciones y seleccionar la opción que mejor se adapte al proyecto.

<b>Opción A. Sistema de electromiografía</b>	
Ubicación de los electrodos	Músculo cigomático
Tipos de electrodo	Electrodos superficiales

<b>Opción B. Sistema de electromiografía</b>	
Ubicación de los electrodos	Músculo cigomático
Tipos de electrodo	Electrodos de aguja

<b>Opción C. Sistema de electromiografía</b>	
Ubicación de los electrodos	Músculo corrugador superciliar
Tipos de electrodo	Electrodos de aguja

<b>Opción D. Sistema de electromiografía</b>	
Ubicación de los electrodos	Músculo corrugador superciliar
Tipos de electrodo	Electrodos superficiales

La selección de esta opción no fue posible mediante experimentación. Los electrodos de aguja fueron descartados por ser intimidantes para la mayoría de las personas provocando emociones negativas, así como la falta de conocimientos previos sobre como colocar estos electrodos por parte del usuario.

El músculo corrugador superciliar fue descartado al ser un músculo fino ubicado en la parte inferior de los ojos, lo cual hace difícil su detección con electrodos convencionales ya que la parte adhesiva de los electrodos sería molesta para los sujetos de prueba.

## Tabla de elección de concepto

En la tabla de elección de concepto se hace una comparación entre las cuatro opciones que se mencionaron, calificando la importancia de cada criterio y haciendo una suma cuyo resultado final es comparado con las demás opciones y se selecciona la de más alta calificación. La evaluación toma en cuenta la realización de pruebas con las opciones mencionadas, así como la capacidad económica y técnica para llevarlas a cabo. La calificación asignada va de 1 a 5, siendo 1 la de menor importancia y 5 imprescindible.

Criterio de selección	Peso	Concepto							
		Opción A		Opción B		Opción C		Opción D	
		Calificación	Evaluación ponderada						
<b>Comodidad</b>	35%	3	1.05	2	0.7	1	0.35	2	0.7
<b>Facilidad de colocación</b>	20%	4	0.8	1	0.2	1	0.2	2	0.4
<b>Facilidad de construcción</b>	15%	5	0.75	1	0.15	1	0.15	4	0.6
<b>Costo</b>	15%	3	0.45	2	0.3	1	0.15	3	0.45
<b>Facilidad de uso</b>	15%	4	0.6	1	0.15	1	0.15	2	0.3
	Total de puntos		3.65		1.5		1		2.45
	Lugar	1		3		4		2	
	¿Continuar?	Si	No	No	No	No	No	No	No

Tabla 13. Tablas de elección de concepto para el sistema de electromiografía

Se ha seleccionado la opción A porque se pueden realizar las pruebas requeridas con ese sistema y se cuenta con la capacidad técnica y económica para su construcción, además de que satisface los requerimientos del sistema.

Después de hacer todas las comparaciones entre las posibilidades para encontrar la mejor manera de construir los sistemas que van a conformar en conjunto el dispositivo, se eligieron las posibilidades que más se adecuaban a las capacidades técnicas, económicas y de conocimientos que se tienen hasta ahora.

A pesar de considerar las mejores opciones para cada sistema, existen ventajas y desventajas inherentes a cada uno, por ejemplo, en el sistema de electromiografía los sensores de aguja tienen la ventaja de que la señal obtenida es más limpia y es menos susceptible a ruido, al ser sensores invasivos podrían ser inseguros para los sujetos de prueba, además de requerir experiencia para colocar los electrodos.

## Capítulo 4

### Subsistema de electromiografía

El sistema de electromiografía tiene la función de detectar la actividad muscular gracias a los potenciales de acción que ocurren en las unidades motoras al realizar un movimiento. En este trabajo se ha decidido que el músculo objetivo es el músculo cigomático, ya que es el músculo más grande que actúa cuando una persona se ríe o sonríe, y por lo tanto es posible adquirir señales de él con electrodos de electromiografía superficiales, mientras que con otros músculos que también actúan sería complicado adquirir sus señales con este método, es decir con los músculos finos.

Los electrodos utilizados son electrodos superficiales de Ag/ClAg de 1cm de diámetro. Estos electrodos incluyen gel conductor que ayuda a hacer un mejor contacto entre el electrodo y la piel para obtener una mejor señal.



*Imagen 9. Electrodo de Ag/ClAg. Meditracé.*

Esta señal suele estar acompañada de ruido externo como el de 60Hz de la red de energía eléctrica, o ruido interno como el que se podría adicionar a la señal que provenga de otros músculos no deseados.

Para disminuir el ruido provocado por otros músculos que no son nuestro objetivo, utilizamos un filtro paso bajas y uno paso altas con frecuencia de corte de 20Hz a 500Hz respectivamente. Por otro lado, también es imprescindible utilizar un filtro notch a 60Hz para minimizar el ruido provocado por la corriente eléctrica.

Los 3 electrodos para electromiografía de Ag/ClAg tienen un diámetro de 1cm<sup>2</sup> y se ubican a 1cm de distancia entre si sobre el músculo cigomático. El tercer electrodo se coloca en la frente ya que en la barbilla es más complicado hacer que el electrodo se quede fijo debido a su relieve.

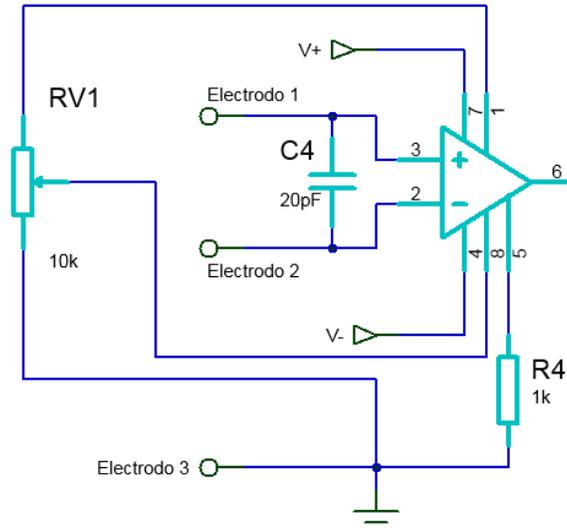


Imagen 10. Preamplificación de electrodos para electromiografía.

Los electrodos bipolares van colocados en un amplificador de instrumentación, de gran utilidad porque su rechazo en modo común permite reducir el ruido que pudiera adicionarse a cada uno de los electrodos y que sea común entre ellos. Permite también amplificar la señal de manera significativa y con buena precisión, al variar el valor de la resistencia de ganancia.

La ganancia está dada por la función:

$$G = \frac{49.4k\Omega}{R_G} + 1$$

Por lo que tenemos un rango de ganancia de 10,000 (ganancia máxima) a 5.94. Es importante mantenerlo variable para hacer pruebas y determinar la mejor ganancia, también tomando en cuenta que cada persona es diferente y también la amplitud de la actividad electrodérmica va a variar.

La siguiente etapa del circuito es un filtro notch cuya frecuencia de corte es de 60Hz para atenuar el ruido de la corriente eléctrica.

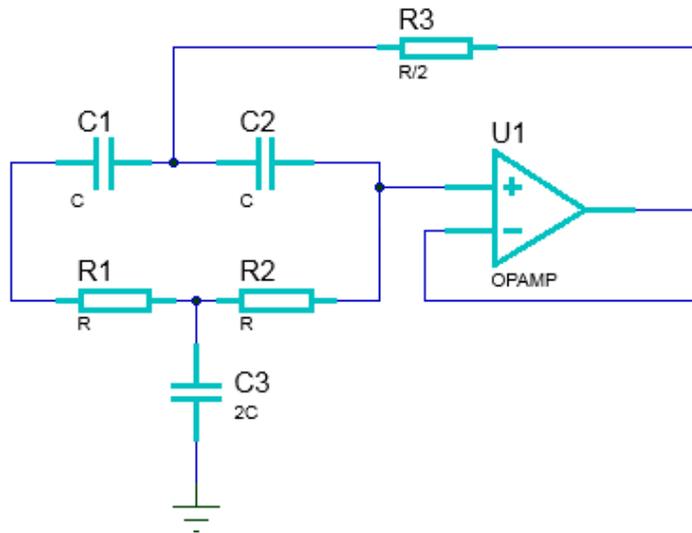


Imagen 11. Filtro Notch con frecuencia de corte a 60Hz.

En la figura anterior podemos ver una configuración de filtro notch. Sabemos que la frecuencia de corte es:

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC}$$

La frecuencia de corte la conocemos, pero la función aún queda con 2 variables independientes, elegimos un valor para que solo quede en función de una sola variable.

Si consideramos que:

$$C = 0.1\mu F$$

$$f_c = 60Hz$$

Entonces:

$$R = \frac{1}{2\pi(60)(0.1 \times 10^{-6})} = 26.5k\Omega$$

La siguiente etapa es un filtro paso altas y posteriormente un paso bajas. Como se mencionó anteriormente, estos filtros ayudan a mitigar el ruido provocado por movimientos de otros músculos que no son nuestro objetivo y que pueden alterar la señal deseada. Las frecuencias de corte son 20Hz y 500Hz respectivamente.

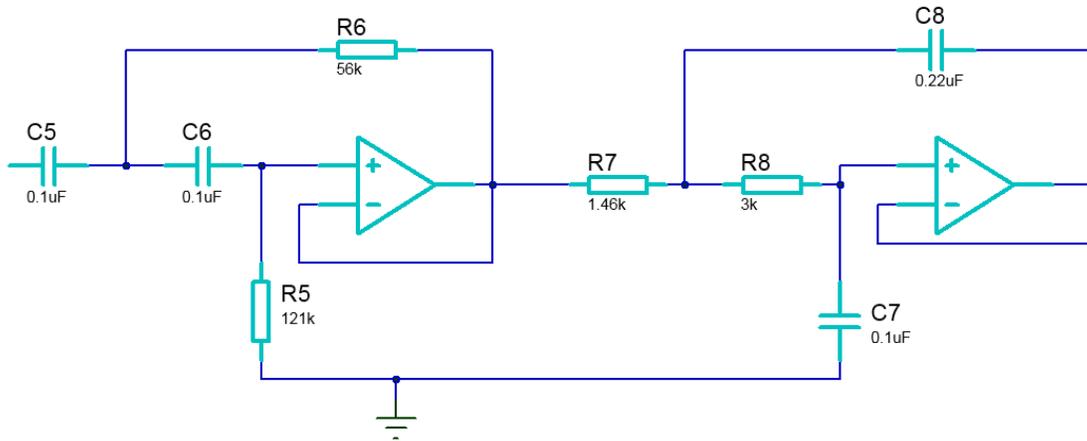


Imagen 12. Filtro paso bajas en serie con filtro paso altas.

Después de estas etapas de adquisición y filtrado tenemos una señal donde podemos apreciar la actividad eléctrica muscular, pero de la forma en que se encuentra no la podemos procesar, ya que es una señal que tiene tanto componentes negativos y positivos de voltaje y el convertidor Analógico-Digital solo admite voltajes de 0 a 5V. Para solucionar dicho inconveniente y al mismo tiempo tener una mejor señal al promediar todos los picos que se obtienen, se utiliza el método de valor raíz cuadrático medio.

La señal se procesa en el circuito integrado AD536a que determina el valor raíz cuadrático medio de la señal y sirve como un promedio de la señal para evitar tener tantos picos y tener una curva más sólida para un mejor análisis.



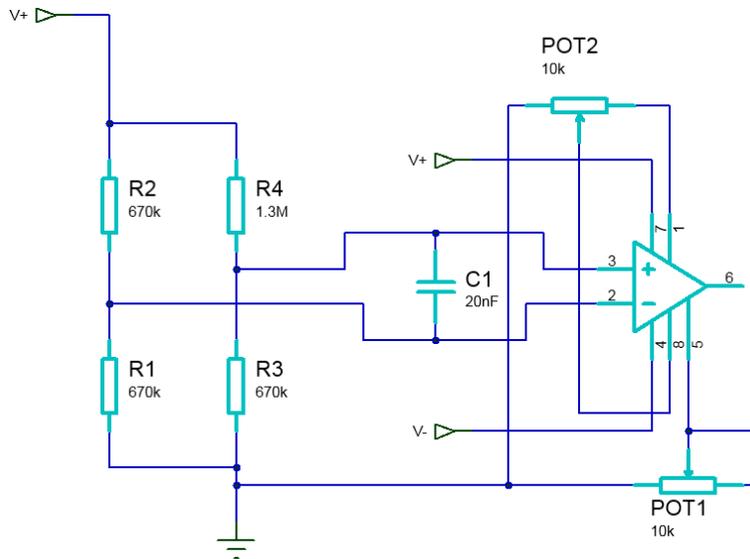


Imagen 14. Amplificación de señal electrodérmica.

Posteriormente ingresa a un amplificador de instrumentación que gracias a su configuración interna como amplificador restador, permite comparar las 2 entradas del puente de Wheatstone y reducir el ruido común. La respuesta fisiológica de las glándulas écrinas no es periódica, ya que puede suceder en cualquier momento por un tiempo totalmente dependiente del acontecimiento que originó la respuesta, por este motivo no se utilizaron filtros para dicha señal.

Al final del circuito se agrega un filtro paso bajas pasivo con frecuencia de corte a 7Hz, después de pasar por el amplificador la señal tiene ligeras perturbaciones que pueden ser mitigadas con este filtro, así como ruido que se adiciona desde el organismo.

## Subsistema de fotopleletismografía

El sensor de fotopleletismografía devuelve la señal adquirida del flujo de sangre sobre las venas y arterias sobre la superficie donde se coloque el sensor. Se decidió colocar el sensor sobre la falange distal del dedo índice para que no interfiriera con el subsistema de respuesta electrodérmica. En general, el LED infrarrojo emite luz que viaja a través de la piel y los vasos sanguíneos y se refleja al llegar al hueso, esa luz varía su intensidad con el flujo sanguíneo y es entonces cuando el fototransistor detecta dicha luz. El sensor infrarrojo utilizado es un QRD1114.



Imagen 15. Sensor QRD1114.

La forma de la carcasa permite que no haya una detección directa desde el fototransistor del LED infrarrojo ni por los costados, reduciendo así la posibilidad de adquirir luz externa que pudiera interferir. Así mismo, la forma permite un mejor contacto con el dedo evitando el ruido mecánico.

El siguiente diagrama muestra la configuración del sensor y sus conexiones eléctricas.

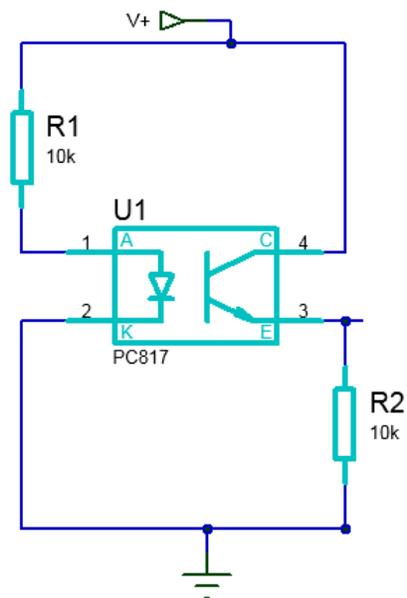


Imagen 16. Conexión de sensor QRD1114.

La primera etapa es un filtro paso altas, posteriormente un amplificador de señal y después otra etapa de filtrado con un filtro paso bajas.

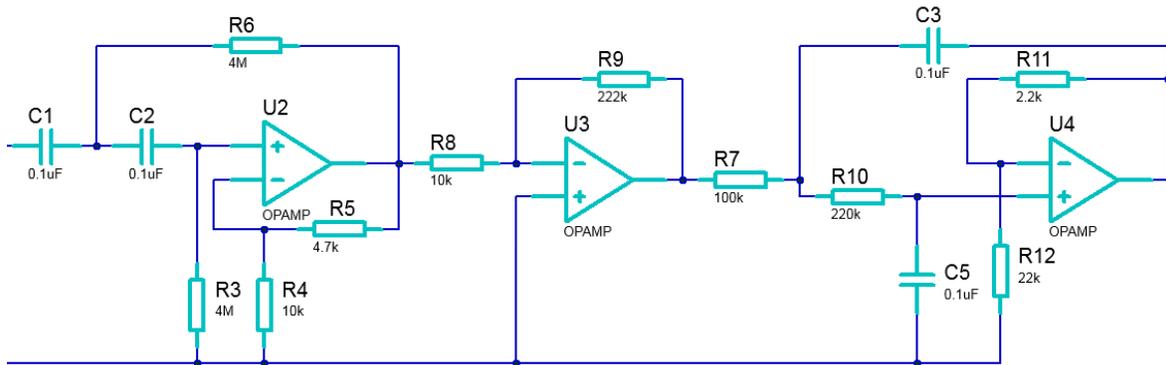


Imagen 17. Etapa de procesamiento para señal cardiaca.

El primer filtro paso altas tiene una frecuencia de corte a 0.3Hz el cual tiene la función de remover las variaciones de voltaje por movimientos del dedo.

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC}$$

$$R = \frac{1}{2\pi(0.1 \times 10^{-6})(0.3)} = 5.3 M\Omega$$

El valor comercial más cercano es 4.7MΩ.

Posteriormente se utiliza un amplificador inversor con una ganancia de 22 ya que la señal sigue siendo pequeña.

$$G = \frac{222k}{10k} = 22.2$$

Finalmente se incorpora un filtro paso bajas que tiene la finalidad de mitigar los efectos de señales de alta frecuencia como la luz artificial de la habitación o la corriente eléctrica. El filtro paso bajas tiene una frecuencia de corte a 7Hz.

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC}$$
$$f_c = \frac{1}{2\pi(220 \times 10^3)(0.1 \times 10^{-6})} = 7.2 \text{ Hz}$$

La señal ahora está filtrada pero no está lo suficientemente amplificada, por otra parte, la amplitud de la señal varía con cada persona y es por ello que al final de las etapas de filtrado, se agrega un amplificador de instrumentación con una ganancia variable para amplificar la señal dependiendo del sujeto de estudio.

La señal puede sufrir perturbaciones debido a la luz natural o artificial del lugar, para evitarlo se utilizó velcro negro para evitar que la luz exterior pudiera alterar la señal.

## **Convertidor Analógico – Digital**

Al adquirir las señales fisiológicas con la ayuda de cada uno de los sistemas correspondientes, éstas se encuentran como señales analógicas. Para hacer el procesamiento de las señales en la computadora, es indispensable convertir las señales analógicas a digitales y para cumplir dicho objetivo utilizamos el convertidor analógico – digital.

El ADC de la tarjeta Arduino tiene 10 bits de entrada. Para conocer la resolución del dispositivo hacemos el siguiente cálculo:

$$Res = \frac{5V}{2^{10}} = 4.8mV$$

De esta forma sabemos que el ADC no puede adquirir señales cuya amplitud sea menor a 4.8mV pero esto no representa un problema ya que gracias a la amplificación en la etapa de adquisición de datos, la amplitud de cada una de las bioseñales será de al menos 1V.

La tarjeta Arduino cuenta con 13 puertos de entrada-salida digitales y con 6 analógicos, en este caso solo utilizaremos los pines 1, 3 y 4.

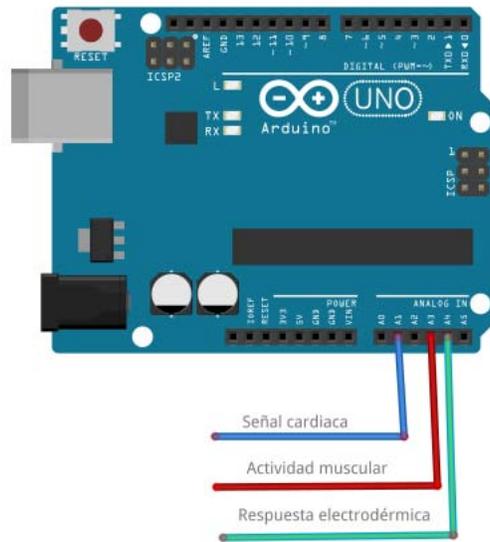


Imagen 18. Adquisición de datos mediante Arduino UNO.

Una vez adquiridos y convertidos a digital los datos el paso siguiente es hacer la transferencia hacia la computadora. Existen varios protocolos, pero Arduino cuenta con I2C y el protocolo RS-232. El conector USB con el que cuenta la tarjeta funciona al mismo tiempo como alimentación y como comunicación mediante protocolo RS-232, y por esta razón se eligió este protocolo.

A continuación, se muestra la configuración de todo el dispositivo:

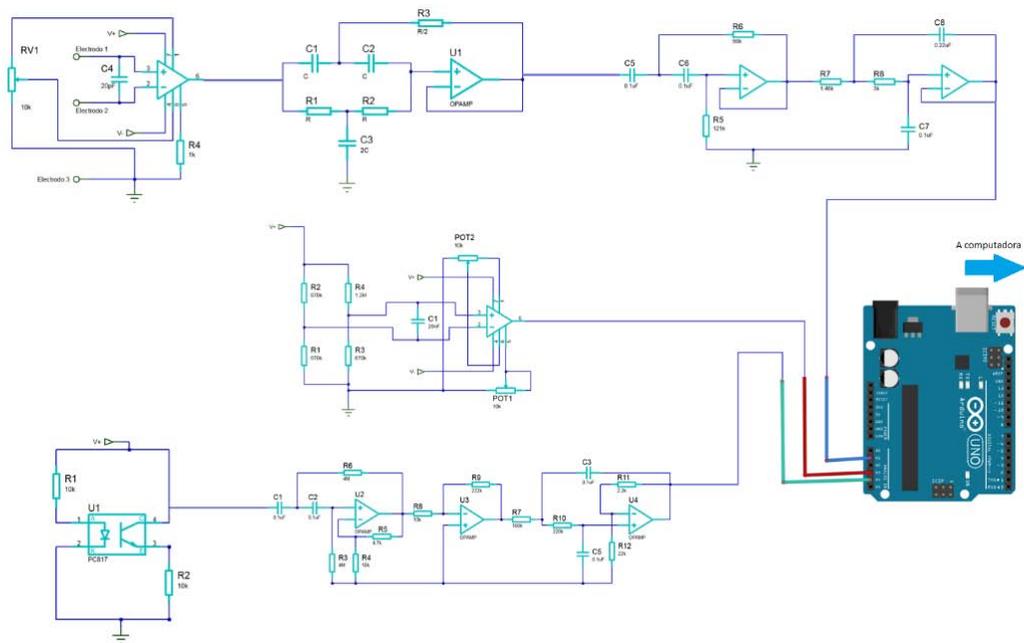


Imagen 19. Diagrama electrónico del dispositivo.

## Interfaz gráfica

La interfaz gráfica es la herramienta que sirve para visualizar y analizar las 3, así como iniciar el programa completo, es decir, iniciar la adquisición de datos y su almacenamiento.

La interfaz gráfica se diseñó y programó con el programa Matlab cuya función es adquirir los datos enviados a través de la tarjeta Arduino, almacenarlos en la memoria temporal de la computadora y posteriormente dibujar la gráfica.

La siguiente imagen muestra la interfaz gráfica, se puede apreciar que muestra las 3 bioseñales, y cuenta con un cronómetro para conocer el tiempo en segundos, transcurrido durante la prueba.

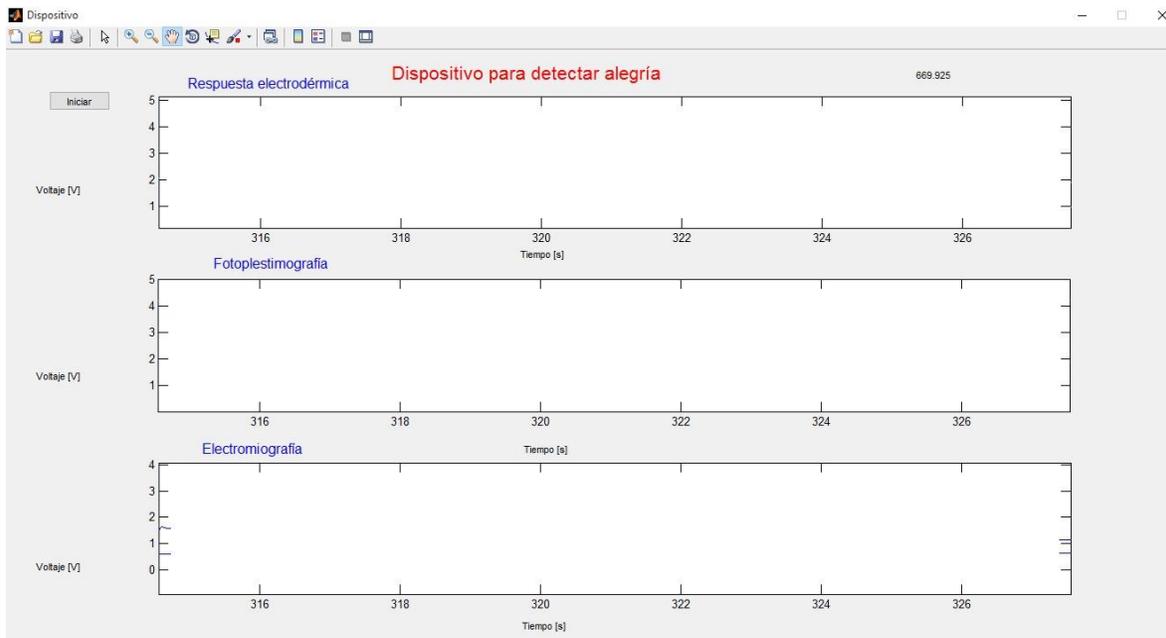


Imagen 20. Interfaz gráfica del dispositivo.

A continuación, se muestra un diagrama de flujo que describe el funcionamiento de la interfaz gráfica:

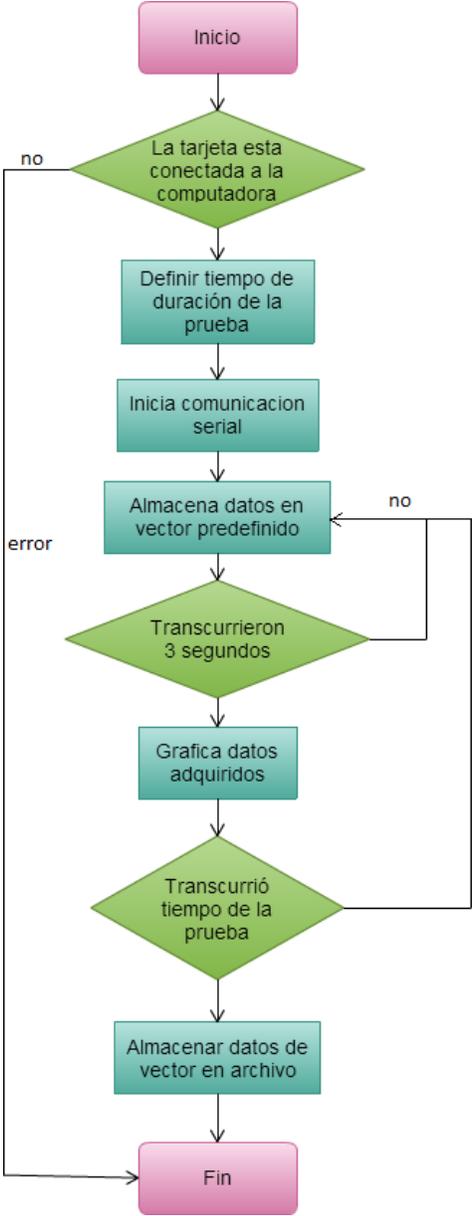


Imagen 21. Diagrama de flujo del sistema.

Después de hacer varias pruebas, se comprobó que el tiempo aproximado para que el programa trace los datos es de 0.2 segundos, y considerando que lo ideal es registrar en tiempo real, este retraso provoca un desfase entre la adquisición de datos y la gráfica, es esta la razón por la que se adquieren datos durante 3 segundos y posteriormente se registran los datos ya almacenados.

Los datos adquiridos primeramente se almacenan en un vector predefinido, esto con la finalidad de agilizar el almacenamiento de datos y hacer que el proceso sea lo más rápido posible. De lo contrario, el tamaño de dicho vector tendría que irse modificando conforme se adquirieran los datos haciendo que el proceso sea más lento.

Esta situación también es la razón del por qué se define el tiempo desde el inicio y por qué la interfaz gráfica no cuenta con botón de finalizar.

## Capítulo 5

Antes de iniciar con las pruebas, se les pidió a los sujetos que firmaran una cedula de consentimiento (Anexo A), en la cual autorizan que están de acuerdo en que se adquieran y se estudien las señales obtenidas de su fisiología. En la misma cédula se requiere información sobre su estado de salud, su estado emocional y su estado físico al momento de la prueba. De esta forma se puede discriminar si existe algún inconveniente que podría ocasionar obtener resultados no deseados.

La media de edad entre los sujetos es de 24 años y de los 5 sujetos, 3 fueron mujeres y 2 hombres.

Después de realizar todas las pruebas y obtener las señales fisiológicas, a continuación, se hace un análisis de los resultados obtenidos, principalmente tratando de encontrar características que hayan aparecido durante el estímulo y se repitan entre los sujetos de prueba y en las 3 pruebas realizadas.

La importancia de encontrar estas características es comprobar que la alegría evoca ciertas respuestas fisiológicas en el organismo, las cuales serían de utilidad para identificar dicha emoción cada vez que se presente.

La complejidad que conlleva este proyecto en general, es que, al haber poca información sobre las respuestas fisiológicas generadas con la alegría, no está claro qué resultados esperar ante cada prueba. El procedimiento que se va a seguir, como ya se mencionó, es encontrar que características coinciden en comportamiento con el momento en que se aplica el estímulo en cada sujeto de prueba. Se espera que estas características tengan valores diferentes para cada sujeto ya que las señales fisiológicas varían de persona a persona, pero la tendencia de estas características es lo que se trata de identificar.

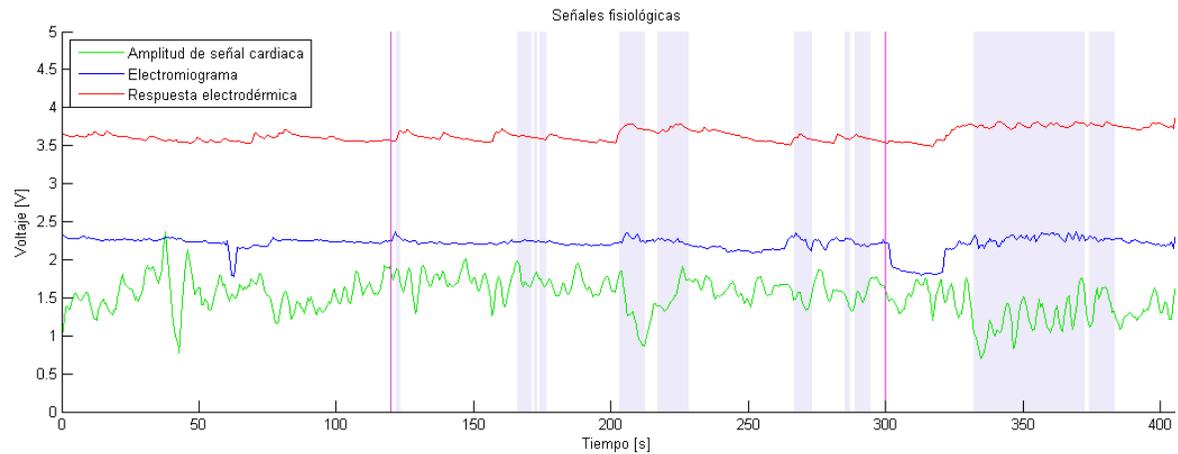
La característica que se identifica en cada una de las señales es el promedio, con este parámetro podemos identificar la diferencia entre la amplitud promedio de las señales en cada una de las etapas de la prueba e identificar la diferencia entre ellas.

Se hará la comparación entre las 3 pruebas para cada señal, con el objetivo de identificar una característica común entre los sujetos de prueba, para verificar si existe una tendencia en el cambio de las señales fisiológicas por cada señal.

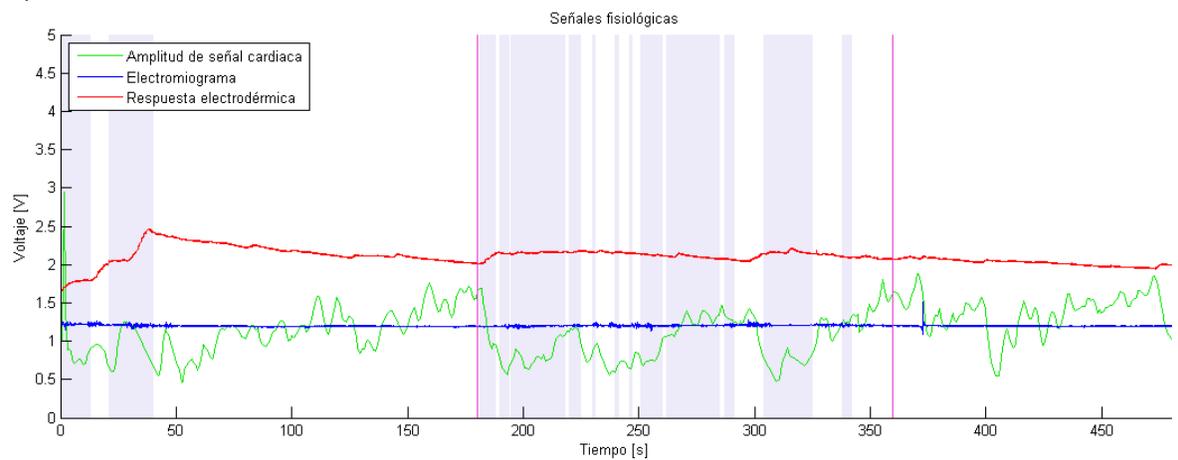
## Prueba 1

A continuación se muestran las señales fisiológicas de la prueba 1, marcando con una sombra el momento en que el sujeto se rio, de esta forma se puede hacer una comparación entre las 3 señales y verificar que comportamiento existe en ese momento.

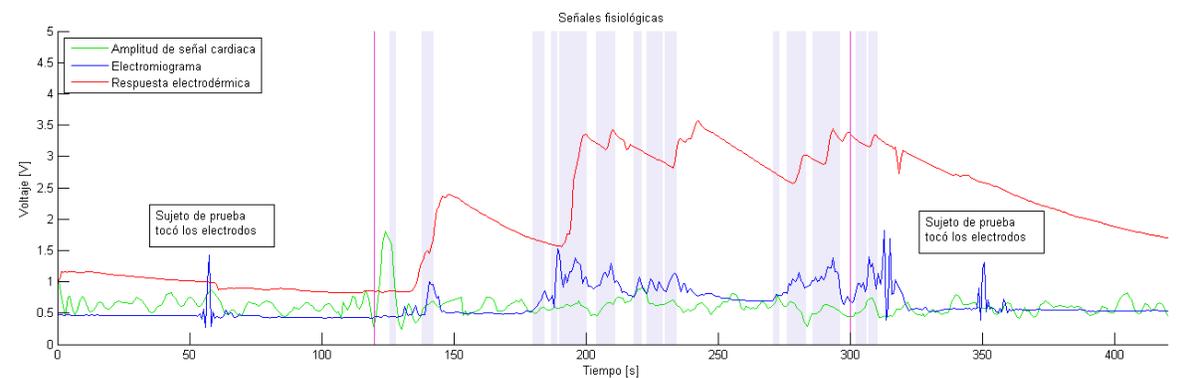
a)



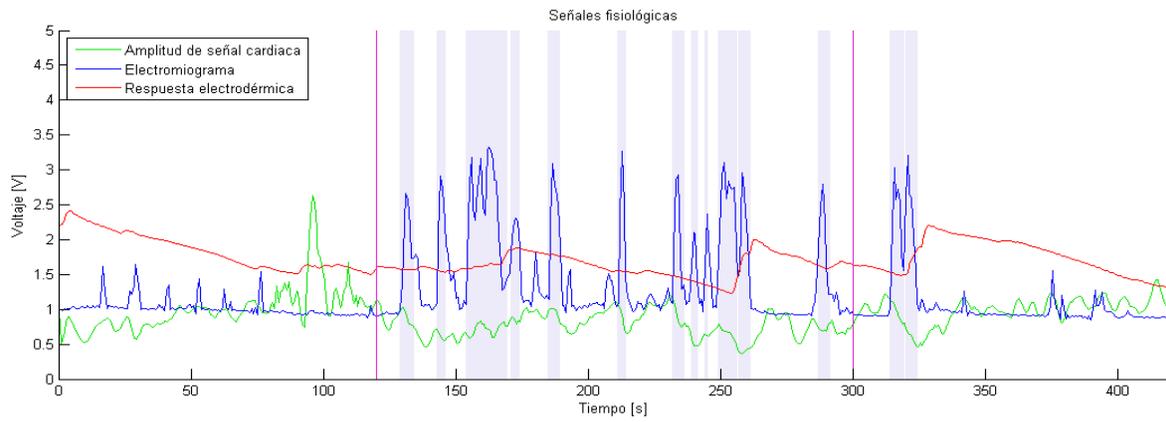
b)



c)



d)



e)

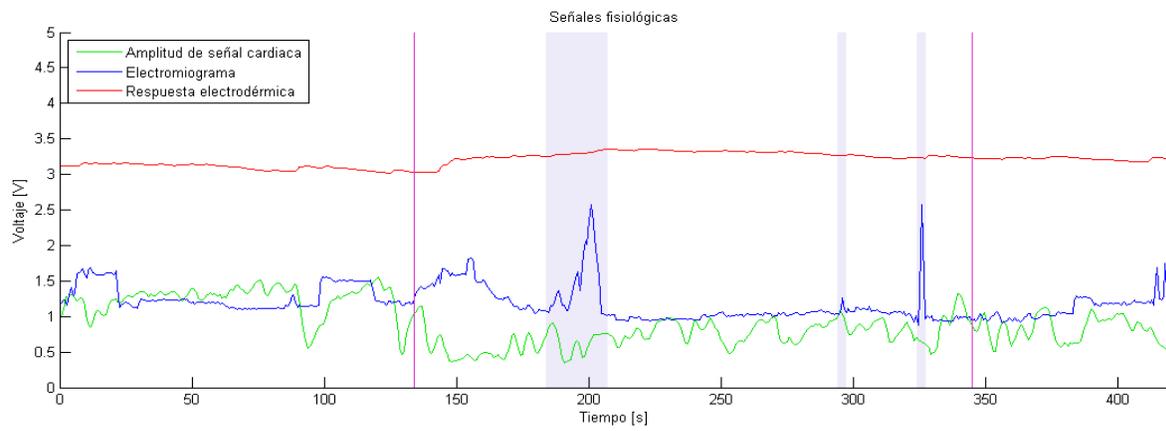


Imagen 22. Prueba 1, las 3 señales fisiológicas y momento donde hubo risa marcado con sombra azul. a) sujeto 1, b) sujeto 2, c) sujeto 3, d) sujeto 4, e) sujeto 5

## Señal mioeléctrica

A continuación se muestra la señal mioeléctrica de cada sujeto obtenidas en la prueba 1.

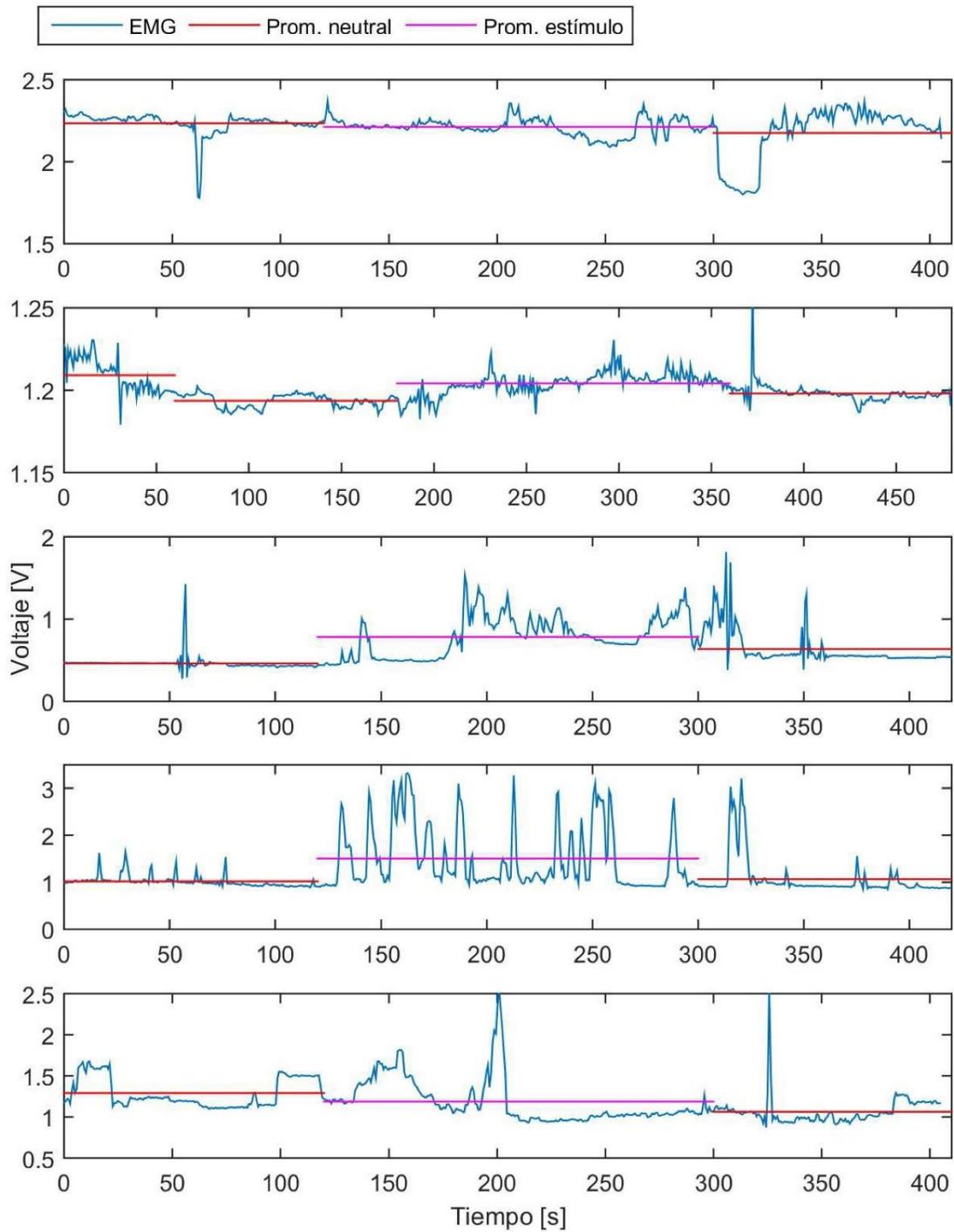


Imagen 23. EMG durante la prueba 1

La siguiente tabla muestra el promedio de cada señal durante las fases de la prueba.

	<b>Fase adicional</b>	<b>Fase 1</b>	<b>Fase 2</b>	<b>Fase 3</b>
<b>Sujeto 1</b>		2.235295	2.212484	2.175261
<b>Sujeto 2</b>	1.209069	1.193491	1.204054	1.198
<b>Sujeto 3</b>		0.458515	0.778802	0.633912
<b>Sujeto 4</b>		1.016831	1.505324	1.063826
<b>Sujeto 5</b>		1.289399	1.186731	1.063979

*Tabla 14. Tabla de promedio por fase en EMG durante la prueba 1*

En el sujeto 1, la señal mioeléctrica disminuyó 1% en la fase 2 con respecto a la fase 1, y la fase 3 disminuyó 1.68% con respecto a la fase 2. Es normal ver en ésta señal que el incremento o decremento del promedio de la señal se mantiene casi constante, ya que es una señal cuya variación es independiente del tiempo. Para este sujeto en específico, la variación es mínima debido a un problema técnico ocurrido durante la prueba, en donde el amplificador de señal tuvo un mal funcionamiento provocando que en la señal de salida sean casi imperceptibles los eventos en donde hubo una activación muscular.

En el sujeto 2, la señal mioeléctrica disminuyó 1.28% en la fase 1 con respecto a la fase 0, la fase 2 aumentó 0.88% con respecto a la fase 1 y la fase 3 disminuyó 0.5% con respecto a la fase 2. Es normal ver en esta señal que el incremento o decremento del promedio de la señal se mantiene casi constante, ya que es una señal cuya variación es independiente del tiempo. Para este sujeto, la variación es mínima debido a un problema técnico ocurrido durante la prueba, en donde el amplificador de señal tuvo un mal funcionamiento provocando que en la señal de salida sean casi imperceptibles los eventos en donde hubo una activación muscular.

En el sujeto 3, la señal mioeléctrica aumentó en 69.85% en la fase 2 con respecto a la fase 1, la fase 3 disminuyó 18.6% con respecto a la fase 2.

En el sujeto 4, la señal mioeléctrica aumentó 48% en la fase 2 con respecto a la fase 1, posteriormente la fase 3 disminuyó 29.32% con respecto a la fase 2.

En el sujeto 5, la señal mioeléctrica disminuyó 7.96% en la fase 2 con respecto a la fase 1, la fase 3 también disminuyó 10.34% con respecto a la fase 2.

Lo que se puede apreciar para esta señal es que las características son puntuales, es decir, el nivel aumenta solo en el momento cuando el estímulo hizo efecto en el sujeto y el músculo cigomático fue inervado. En la imagen 24 se puede ver que hubo mayor actividad durante la fase del estímulo, a excepción de los sujetos 1 y 2, con quienes hubo actividad fuera de la fase de estímulo.

## Señal cardiaca

A continuación se muestra la señal de ritmo cardiaco de cada sujeto obtenidas en la prueba 1.

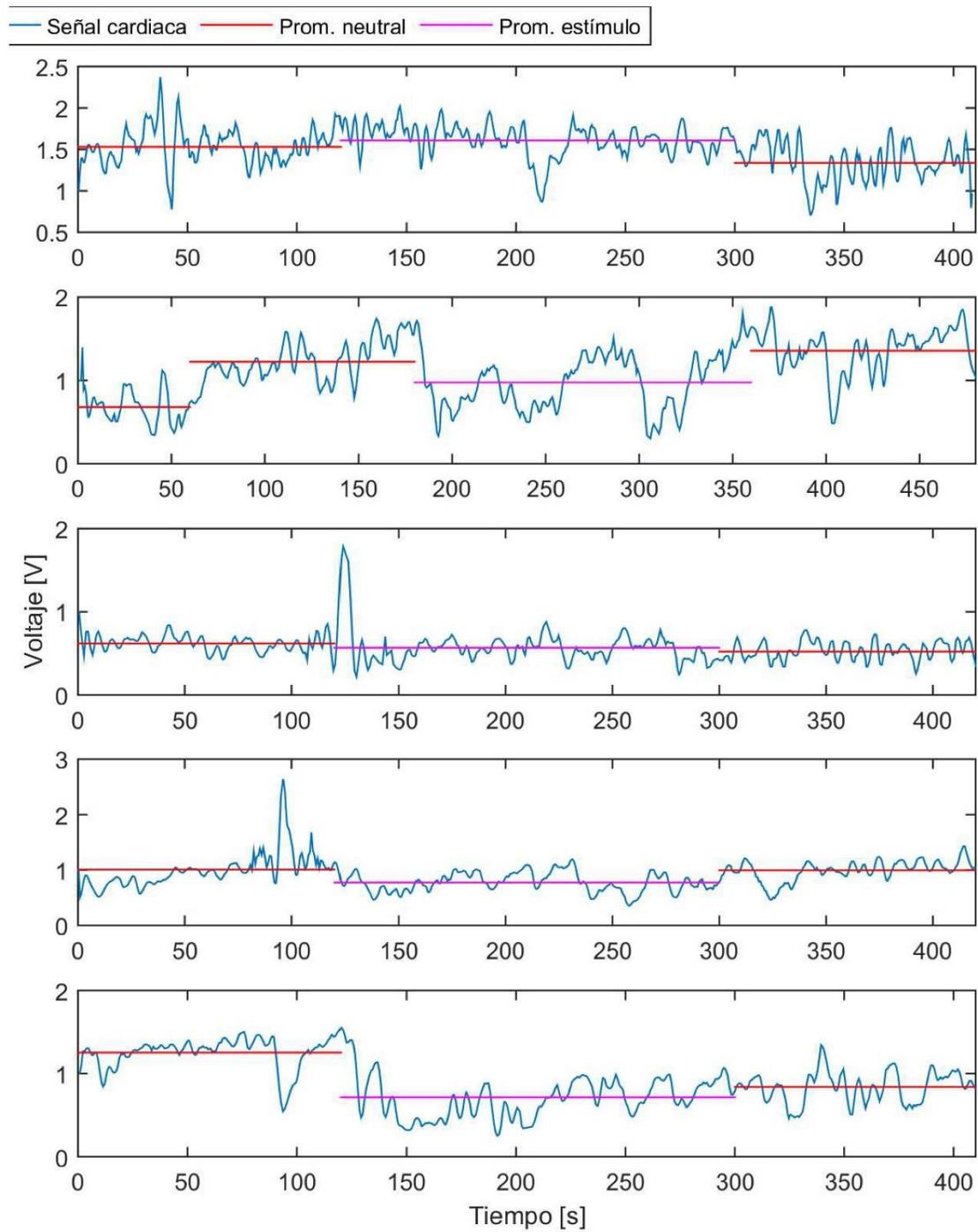


Imagen 24. Señal cardiaca durante la prueba 1.

En el sujeto 1, la señal cardiaca tiene un incremento del 5.2% de la fase del estímulo con respecto a la primera fase basal, posteriormente existe un decremento del 16.8% de la segunda fase basal con respecto a la fase del estímulo, lo que sugiere que durante la fase del estímulo el sistema cardiovascular sufre una vasodilatación.

En el sujeto 2, la señal cardiaca tiene un decremento del 79.67% de la fase 0 en comparación con la fase 1, posteriormente existe un decremento del 20% de la fase 1 con respecto a la fase del estímulo, y finalmente vuelve a existir un incremento del 38.88% en la fase 3 con respecto a la 2. En esta prueba, es posible notar que durante las fases donde el sujeto ríe, se produce una vasodilatación.

En el sujeto 3, la señal cardiaca tiene un decremento del 8.3% de la fase 2 en comparación con la fase 1, posteriormente existe un decremento del 7.8% de la fase 3 con respecto a la fase 2.

En el sujeto 4, la señal cardiaca tiene un decremento del 23.24% de la fase 2 en comparación con la fase 1, posteriormente existe un incremento del 28.34% de la fase 3 con respecto a la fase del estímulo.

En el sujeto 5, la señal cardiaca tiene un decremento del 42.76% de la fase 2 en comparación con la fase 1, posteriormente existe un incremento del 17.27% de la fase 3 con respecto a la fase del estímulo.

En la tabla 14 se encuentra marcado con color verde la fase donde hubo incremento y en rojo donde hubo decremento en la tasa de ritmo cardiaco. De esta forma se puede visualizar la tendencia esperada, la cual es una disminución en el ritmo cardiaco durante el estímulo.

También se puede notar esta tendencia en los sujetos 1 y 2 en las fases donde su estímulo fue de manera natural.

	<b>Fase adicional</b>	<b>Fase 1</b>	<b>Fase 2</b>	<b>Fase 3</b>
<b>Sujeto 1</b>		1.528619	1.608115	1.337876
<b>Sujeto 2</b>	0.679993	1.221757	0.97622	1.355829
<b>Sujeto 3</b>		0.617452	0.566343	0.52216
<b>Sujeto 4</b>		1.009694	0.775033	0.994713
<b>Sujeto 5</b>		1.251855	0.71651	0.840267

*Tabla 15. Tabla de promedio por fase en la señal cardiaca durante la prueba 1*

## Señal electrodérmica

A continuación se muestra la señal electrodérmica de cada sujeto obtenidas en la prueba 1.

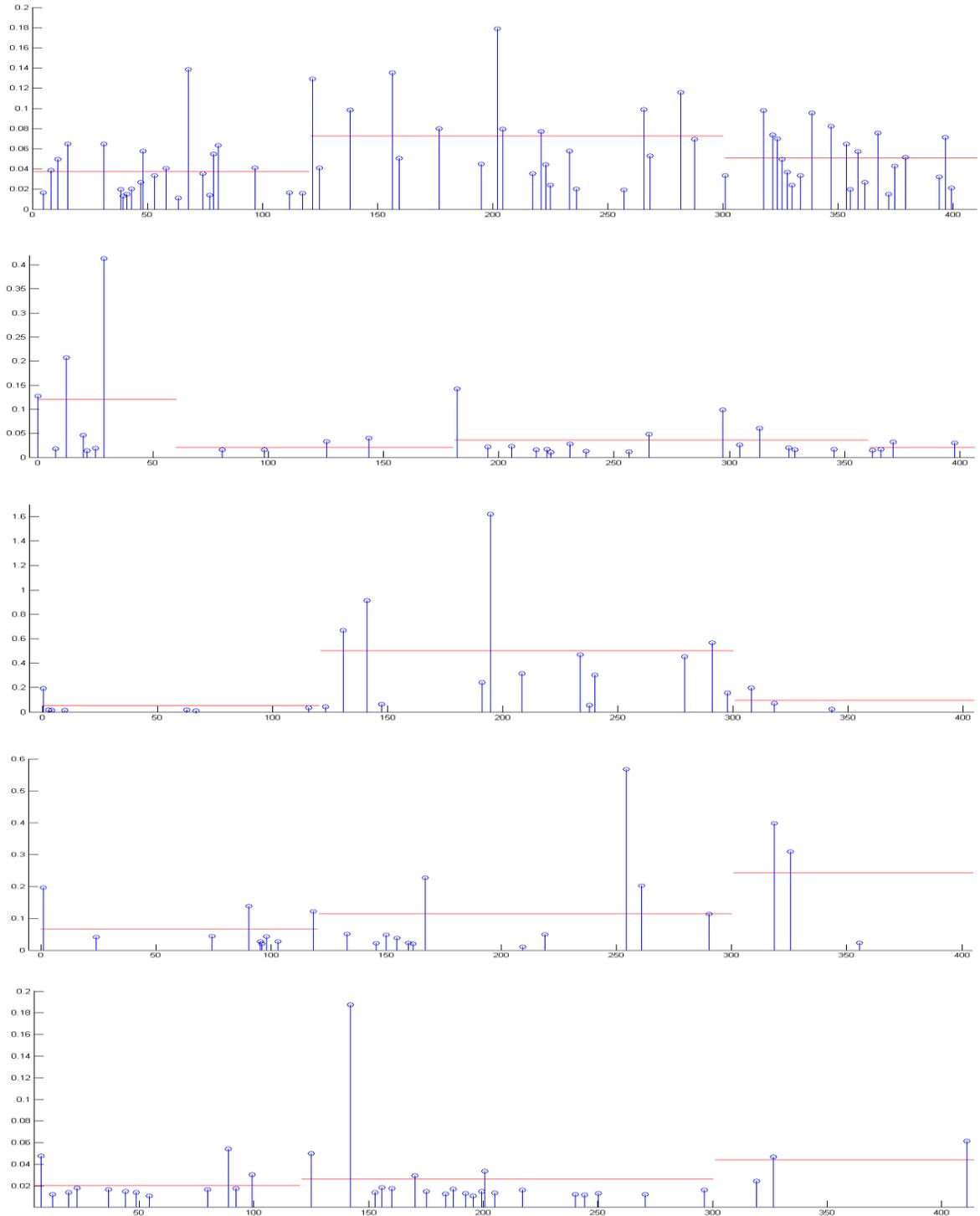


Imagen 25. Fase tónica de la RED durante la prueba 1.

Para el sujeto 1, la respuesta electrodérmica aumentó un 96.35% en la fase 2 con respecto a la fase 1, y al concluir esta fase el promedio disminuyó en 29.55%.

Para el sujeto 2, la respuesta electrodérmica disminuyó en un 82.72% de la fase 0 a la fase 1, aumentó un 70.69% en la fase 2 con respecto a la fase 1, y posteriormente el promedio disminuyó en 41.13% en la fase 3 con respecto a la fase 2.

Para el sujeto 3, la respuesta electrodérmica tuvo un incremento en sus señales promedio de 917% de la fase 1 a la fase 2, y posteriormente el promedio disminuyó en 81.3% en la fase 3 con respecto a la fase 2.

Para el sujeto 4, la respuesta electrodérmica disminuyó en un 82.67% de la fase 1 a la fase 2, y aumentó un 112.93% en la fase 3 con respecto a la fase 2.

Para el sujeto 5, la respuesta electrodérmica aumentó en un 29% en la fase 2 respecto a la fase 1, posteriormente el promedio volvió a aumentar en 66.9% en la fase 3 con respecto a la fase 2.

En la tabla 15 se visualiza mediante color verde donde hubo incremento y en rojo decremento en la señal. Es visible la tendencia a aumentar la respuesta electrodérmica en las fases donde se presentó el estímulo, incluso en los sujetos 1 y 2.

	Fase adicional	Fase 1	Fase 2	Fase 3
Sujeto 1		0.036971	0.072594	0.051141
Sujeto 2	0.120661	0.020844	0.03558	0.020945
Sujeto 3		0.04932	0.5018	0.09387
Sujeto 4		0.06602	0.1144	0.2436
Sujeto 5		0.02053	0.02649	0.04422

Tabla 16. Tabla de promedio por fase en RED durante la prueba 1

En esta prueba se puede observar que la señal cardiaca disminuye en amplitud durante el estímulo en comparación con las fases basales. Los ejemplos más reveladores son los sujetos de prueba 1 y 2, quienes no pudieron seguir el protocolo de prueba y experimentaron el estado de alegría en una etapa diferente a la del estímulo. El sujeto de prueba 1 tuvo un estímulo mayor durante la segunda etapa basal, al recordar un acontecimiento gracioso. Experimentó una mayor cantidad de risa en esta etapa y el estímulo fue totalmente natural, por lo que el promedio de la señal disminuyó hasta un 16.8% en comparación con la fase del estímulo.

En el caso del sujeto 2, durante la fase extra, experimentó un acontecimiento similar al del sujeto 1, por lo que mantuvo una risa durante aproximadamente 50 segundos. Para no alterar la prueba, se decidió dejar ese minuto como una etapa extra y posteriormente al ver que el sujeto ya estaba relajado, se prosiguió con el tiempo del protocolo. Al analizar los resultados, es posible notar que, tanto en esta etapa como en la etapa de prueba, el nivel de la señal cardiaca disminuye. En la

primera fase, la señal es un 79.6% menor que la primera fase basal. La fase del estímulo tiene un nivel 20% menor a la primera fase basal.

La actividad muscular se puede ver claramente con ayuda del EMG durante la fase del estímulo. Durante la aplicación del estímulo, los sujetos presentaron un cambio en cada una de las 3 señales fisiológicas que se puede apreciar como un cambio en la amplitud de cada señal.

Los cambios en la señal no se esperaban que fueran drásticos, con base en la figura 8, la excitación aumenta, pero a un nivel bajo, en cambio la valencia positiva es la más alta entre las distintas emociones. Lo que esta valencia nos indica es cuan placentero fue el estímulo para los sujetos.

En la imagen 22 se aprecia el decremento en la señal cardiaca, interpretado como una vasoconstricción, así como la activación muscular por medio del EMG y un incremento en la respuesta electrodérmica, en donde existe un mayor número de picos en la señal y algunos con mayor amplitud que el promedio.

## Prueba 2

### Señal mioeléctrica

A continuación se muestra la señal mioeléctrica de cada sujeto obtenidas en la prueba 2.

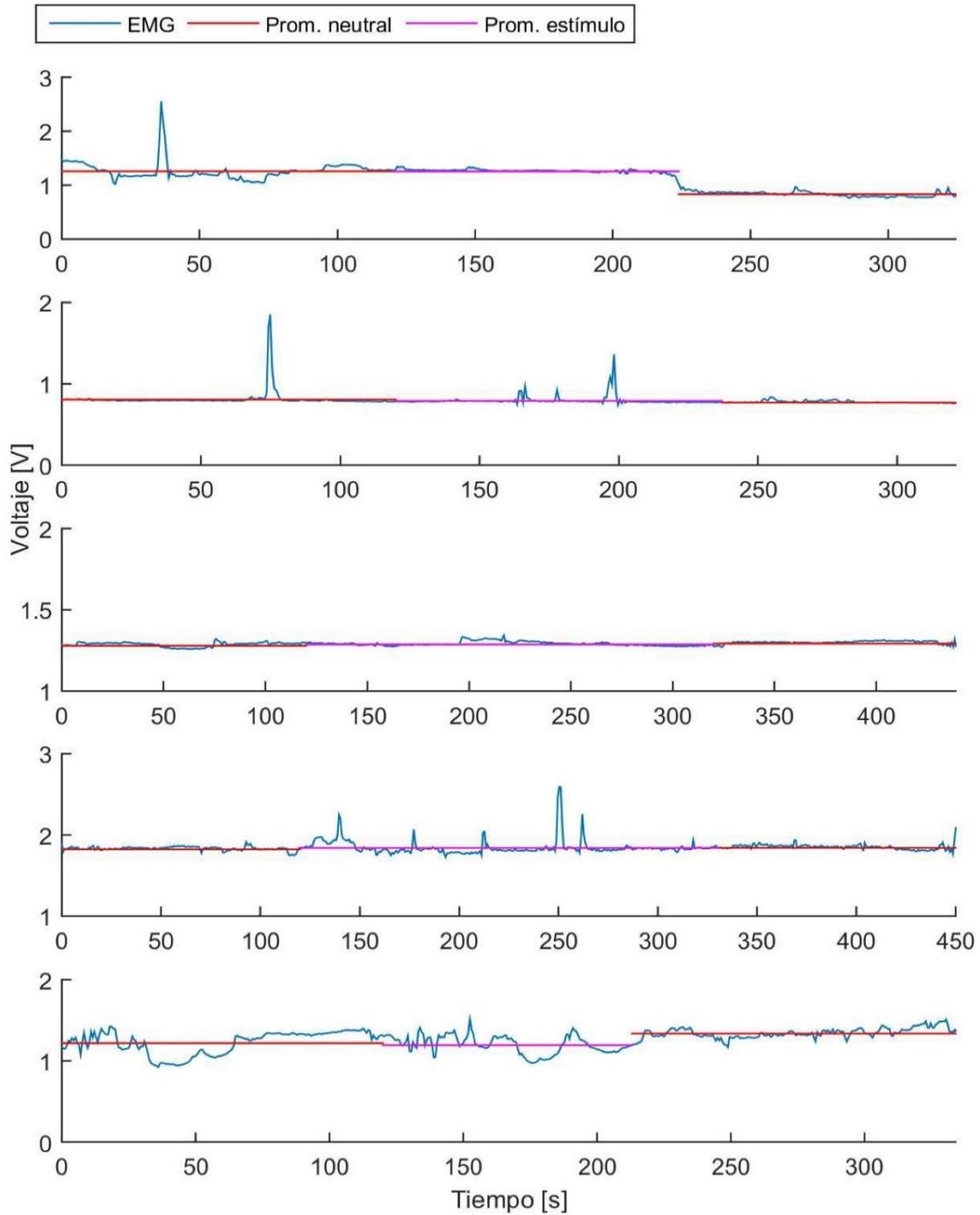


Imagen 26. EMG para la prueba 2.

La siguiente tabla muestra el promedio de cada señal durante las fases de la prueba.

	<b>Fase 1</b>	<b>Fase 2</b>	<b>Fase 3</b>
<b>Sujeto 1</b>	1.257	1.254	0.8296
<b>Sujeto 2</b>	0.8062	0.7893	0.7678
<b>Sujeto 3</b>	1.278	1.286	1.291
<b>Sujeto 4</b>	1.823	1.84	1.841
<b>Sujeto 5</b>	1.218	1.194	1.337

*Tabla 17. Tabla de promedio por fase en EMG durante la prueba 2*

En el sujeto 1, la señal mioeléctrica tiene un nivel similar, la etapa de estímulo es apenas un 0.23% menor a la primera fase basal y la segunda fase basal es un 33.8% menor a la del estímulo. A su vez existen picos en la señal que denota que hubo actividad en el músculo cigomático, y también se aprecia en la primera gráfica que este sujeto de estudio se rio durante la segunda fase basal, por lo que las respuestas de esta fase y la del estímulo son similares. También se puede concluir que, al término de la fase de estímulo, el sujeto relajó sus músculos faciales, lo que explica el descenso en el nivel.

En el sujeto 2, la señal mioeléctrica tiene un nivel similar, la etapa de estímulo es apenas un 2% menor a la primera fase basal y la segunda fase basal es un 2.7% menor a la del estímulo. A su vez existen picos en la señal que denota que hubo actividad muscular en el músculo cigomático. En el caso de este sujeto de estudio, los picos en la señal que se aprecian en la figura X son consecuencia de que estuvo haciendo movimientos faciales como si estuviera cantando la canción. Se puede concluir que, al término de la fase de estímulo, el sujeto relajó sus músculos faciales, lo que explica el descenso en el nivel.

En el sujeto 3, la señal mioeléctrica tiene un nivel similar, la etapa de estímulo es apenas un 0.62% mayor a la primera fase basal y la segunda fase basal es un 0.4% mayor a la del estímulo. La señal mantiene un nivel similar, lo que concuerda con lo visto durante la prueba, pues el sujeto no hizo gesticulación alguna.

En el sujeto 4, la señal mioeléctrica tiene un nivel similar, la etapa de estímulo es apenas un 0.93% mayor a la primera fase basal y la segunda fase basal tiene un nivel prácticamente igual a la del estímulo.

En el sujeto 5, la señal mioeléctrica tiene un nivel similar, la etapa de estímulo es apenas un 1.97% menor a la primera fase basal y la segunda fase basal es un 11.9% mayor a la del estímulo.

## Señal cardiaca

A continuación, se muestra la señal de ritmo cardiaco de cada sujeto obtenidas en la prueba 2.

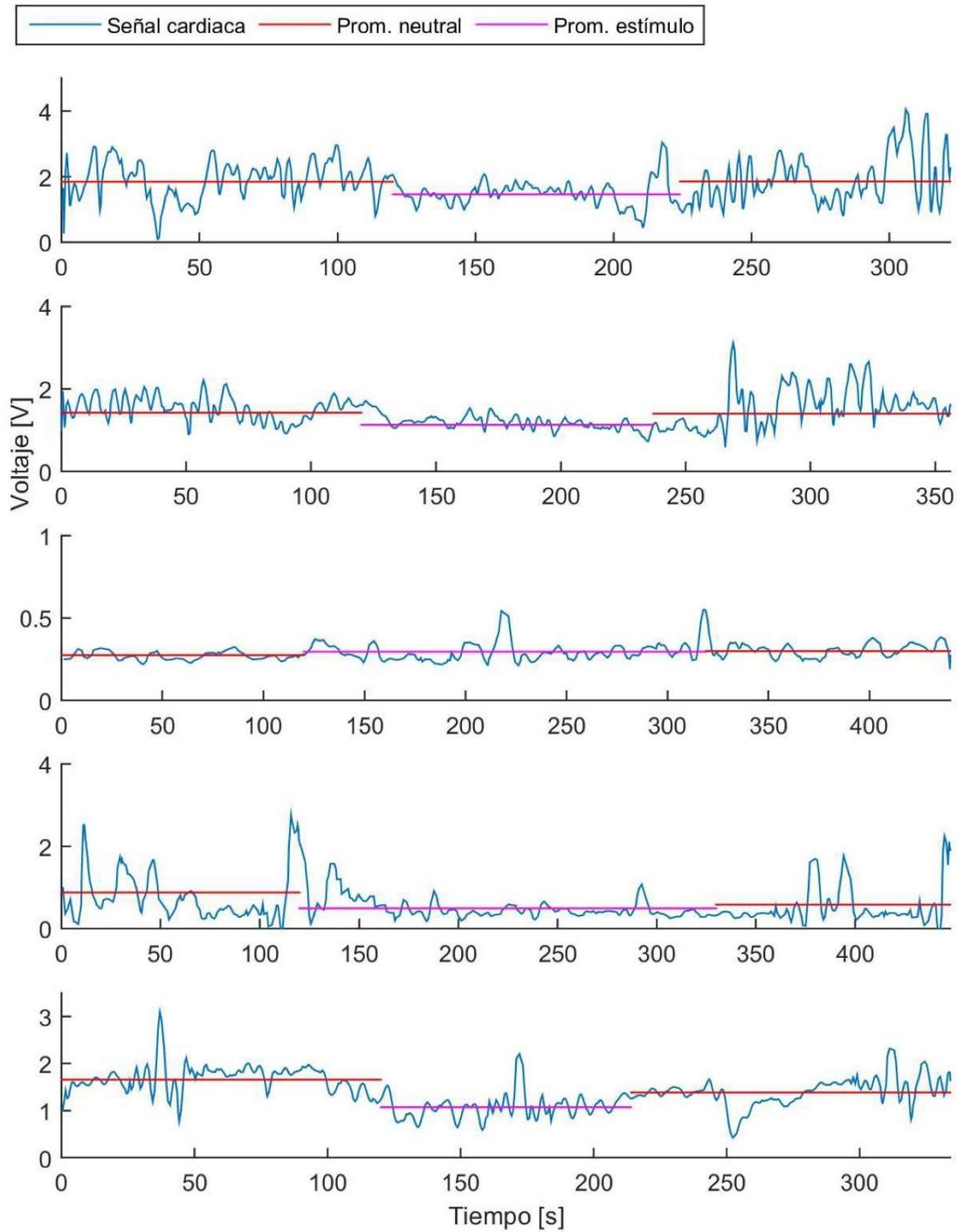


Imagen 27. Señal cardiaca durante la prueba 2.

En el sujeto 1 existe un decremento del 20.7% de la fase del estímulo con respecto a la primera fase basal, posteriormente existe un incremento del 27% de la segunda fase basal con respecto a la fase del estímulo, lo que sugiere que durante la fase del estímulo el sistema cardiovascular sufre una vasodilatación.

En el sujeto 2 existe un decremento del 20.91% de la fase del estímulo con respecto a la primera fase basal, posteriormente existe un incremento del 24.39% de la segunda fase basal con respecto a la fase del estímulo, lo que sugiere que durante la fase del estímulo el sistema cardiovascular sufre una vasodilatación.

En el sujeto 3 existe un incremento de 7.25% de la fase del estímulo con respecto a la primera fase basal, posteriormente existe un incremento del 1% de la segunda fase basal con respecto a la fase del estímulo.

En el sujeto 4 existe un decremento del 43.7% de la fase del estímulo con respecto a la primera fase basal, posteriormente existe un incremento del 17.82% de la segunda fase basal con respecto a la fase del estímulo.

En el sujeto 5 existe un decremento del 35.3% de la fase del estímulo con respecto a la primera fase basal, posteriormente existe un incremento del 29% de la segunda fase basal con respecto a la fase del estímulo, lo que sugiere que durante la fase del estímulo el sistema cardiovascular sufre una vasodilatación.

En la siguiente tabla volvemos a ver una tendencia a disminuir el ritmo cardiaco durante la fase de estímulo.

	Fase 1	Fase 2	Fase 3
<b>Sujeto 1</b>	1.836	1.456	1.85
<b>Sujeto 2</b>	1.42	1.123	1.397
<b>Sujeto 3</b>	0.2744	0.2943	0.2975
<b>Sujeto 4</b>	0.8729	0.4914	0.579
<b>Sujeto 5</b>	1.654	1.07	1.381

*Tabla 18. Tabla de promedio por fase en la señal cardiaca durante la prueba 1*

## Señal electrodérmica

A continuación, se muestra la señal electrodérmica de cada sujeto obtenidas en la prueba 2.

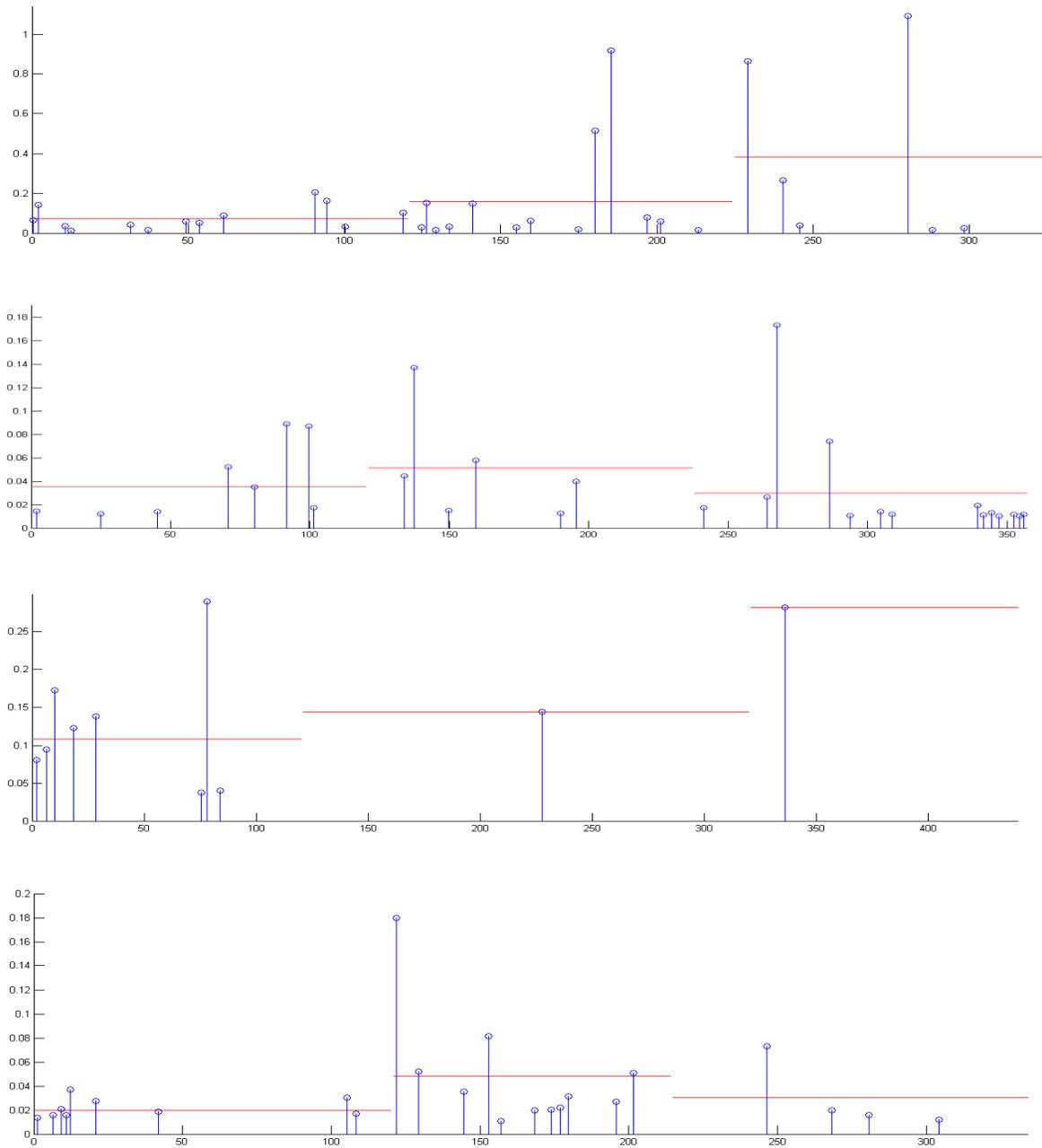


Imagen 28. Fase tónica durante la prueba 2.

En el sujeto 1 la respuesta electrodérmica tiene un incremento del 77.9% en la fase de estímulo con respecto a la primera fase basal, y nuevamente un aumento del 140% en la segunda fase basal con respecto a la fase de estímulo.

En el sujeto 2 la respuesta electrodérmica tiene un incremento del 43.46% en la fase de estímulo con respecto a la primera fase basal, y posteriormente un decremento del 42.17% en la segunda fase basal con respecto a la fase de estímulo.

En el sujeto 3 la respuesta electrodérmica tiene un incremento del 33.36% en la fase de estímulo con respecto a la primera fase basal, y posteriormente otro incremento del 95.2% en la segunda fase basal con respecto a la fase de estímulo.

En el sujeto 5 la respuesta electrodérmica tiene un incremento del 146.7% en la fase de estímulo con respecto a la primera fase basal, y posteriormente un decremento del 37.3% en la segunda fase basal con respecto a la fase de estímulo.

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos de la señal de respuesta electrodérmica. Como es posible observar, ya no hay una tendencia clara en los resultados obtenidos.

	<b>Fase 1</b>	<b>Fase 2</b>	<b>Fase 3</b>
<b>Sujeto 1</b>	0.7196	0.1589	0.3825
<b>Sujeto 2</b>	0.03573	0.05126	0.02964
<b>Sujeto 3</b>	0.1085	0.1447	0.2825
<b>Sujeto 4</b>			
<b>Sujeto 5</b>	0.01954	0.04821	0.03022

*Tabla 19. Tabla de promedio por fase en RED durante la prueba 2*

En el caso de la prueba 2, las señales tienen un comportamiento similar a la prueba 1 tal como se esperaba. Al tratarse de una prueba donde el estímulo es música, los resultados que se esperaban obtener eran similares para la señal cardíaca y la respuesta electrodérmica, y la excepción es la señal de actividad muscular, ya que no se esperaba que el sujeto riera durante el estímulo, aunque si se esperaba ver una ligera sonrisa, lo que se traduciría en activación muscular con una amplitud baja.

En esta prueba los sujetos también expresaron haber experimentado una sensación placentera durante la fase del estímulo, pero no existe activación muscular durante ésta.

Se puede concluir que, en esta prueba, los sujetos también experimentaron emociones positivas, sin embargo, no se trata de alegría, probablemente sea sensación de estar contento o tranquilidad.

## Prueba 3

### Señal mioeléctrica

A continuación, se muestra la señal mioeléctrica de cada sujeto obtenidas en la prueba 3.

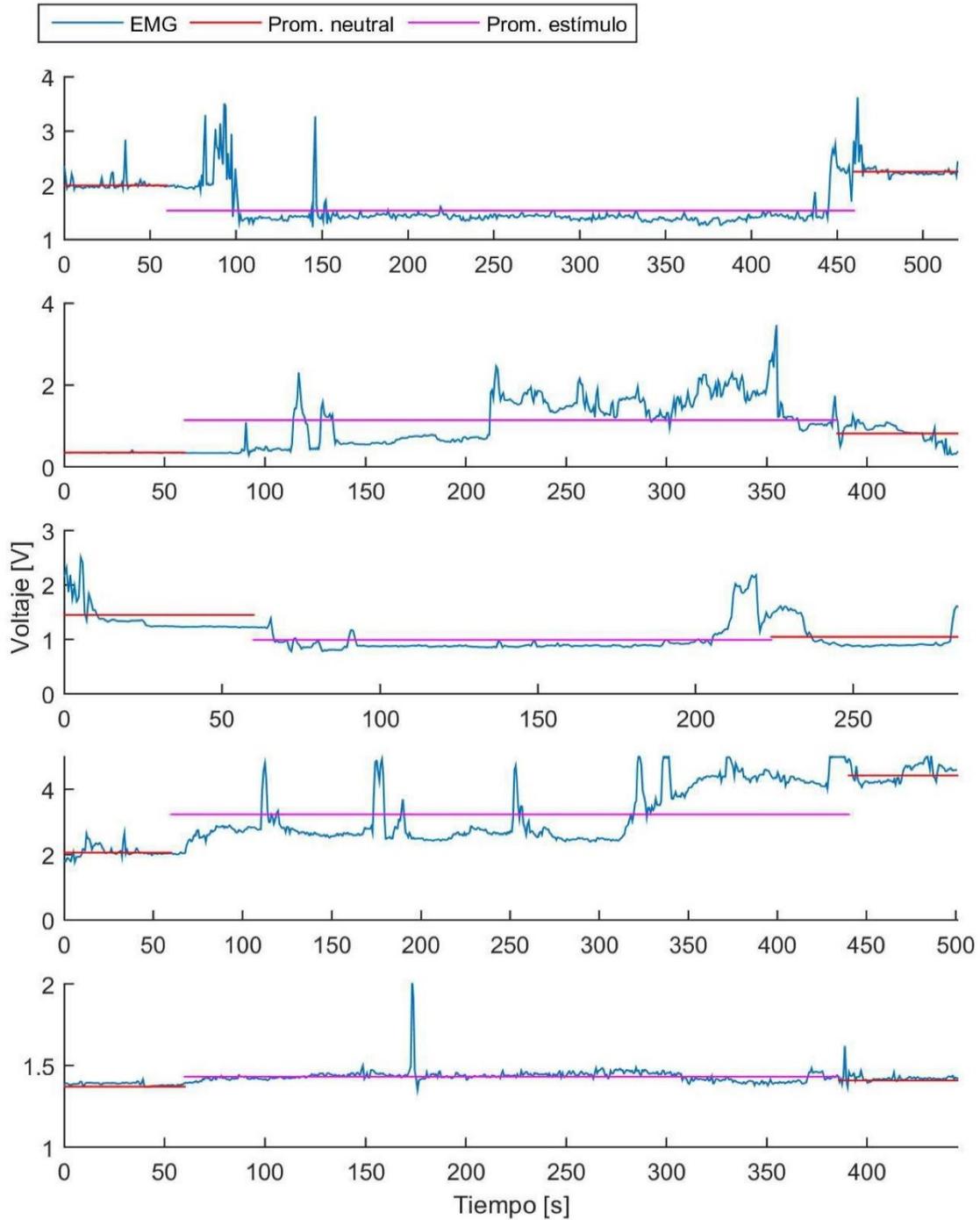


Imagen 29. EMG durante la prueba 3.

La siguiente tabla muestra el promedio de cada señal durante las fases de la prueba.

	<b>Fase 1</b>	<b>Fase 2</b>	<b>Fase 3</b>
<b>Sujeto 1</b>	1.999	1.533	2.253
<b>Sujeto 2</b>	0.3474	1.135	0.8079
<b>Sujeto 3</b>	1.447	0.9893	1.012
<b>Sujeto 4</b>	2.066	3.234	4.424
<b>Sujeto 5</b>	1.371	1.432	1.408

*Tabla 20. Tabla de promedio por fase en EMG durante la prueba 3*

La señal mioeléctrica tiene un nivel poco constante, la etapa de estímulo es un 23.3% menor a la primera fase basal y la segunda fase basal es un 46.9% mayor a la del estímulo. A su vez existen picos en la señal que denota que hubo actividad muscular en el músculo cigomático, y también se aprecia en la imagen 22 que este sujeto de estudio se rio durante la segunda fase basal, por lo que las respuestas de esta fase y la del estímulo son similares. Para esta señal y en esta prueba, se aprecia mucha actividad en otros momentos de la prueba porque el sujeto mencionó algunas palabras.

En el sujeto 2, la etapa de estímulo es un 226% mayor a la primera fase basal y la segunda fase basal es un 28.81% menor a la del estímulo. En esta prueba, se puede apreciar mucha actividad en la etapa de estímulo, esto se debe a que el sujeto murmuraba para sí mismo sus propios pensamientos, por lo que se ve reflejada la activación del músculo cigomático al hablar.

En el sujeto 3, la etapa de estímulo es un 31.63% menor a la primera fase basal y la segunda fase basal es un 5.83% mayor a la del estímulo.

En el sujeto 4, la etapa de estímulo es un 56.5% mayor a la primera fase basal y la segunda fase basal es un 36.79% mayor a la del estímulo.

En el sujeto 5, la etapa de estímulo es un 1.97% menor a la primera fase basal y la segunda fase basal es un 11.97% mayor a la del estímulo.

En esta prueba, la mayoría de los sujetos hicieron comentarios acerca del desafío o hablaba para sí mismo mientras analizaba el problema, es esa la razón por la cual se puede ver actividad en la mayor parte de la prueba.

## Señal cardiaca

A continuación, se muestra la señal de ritmo cardiaco de cada sujeto obtenidas en la prueba 3.

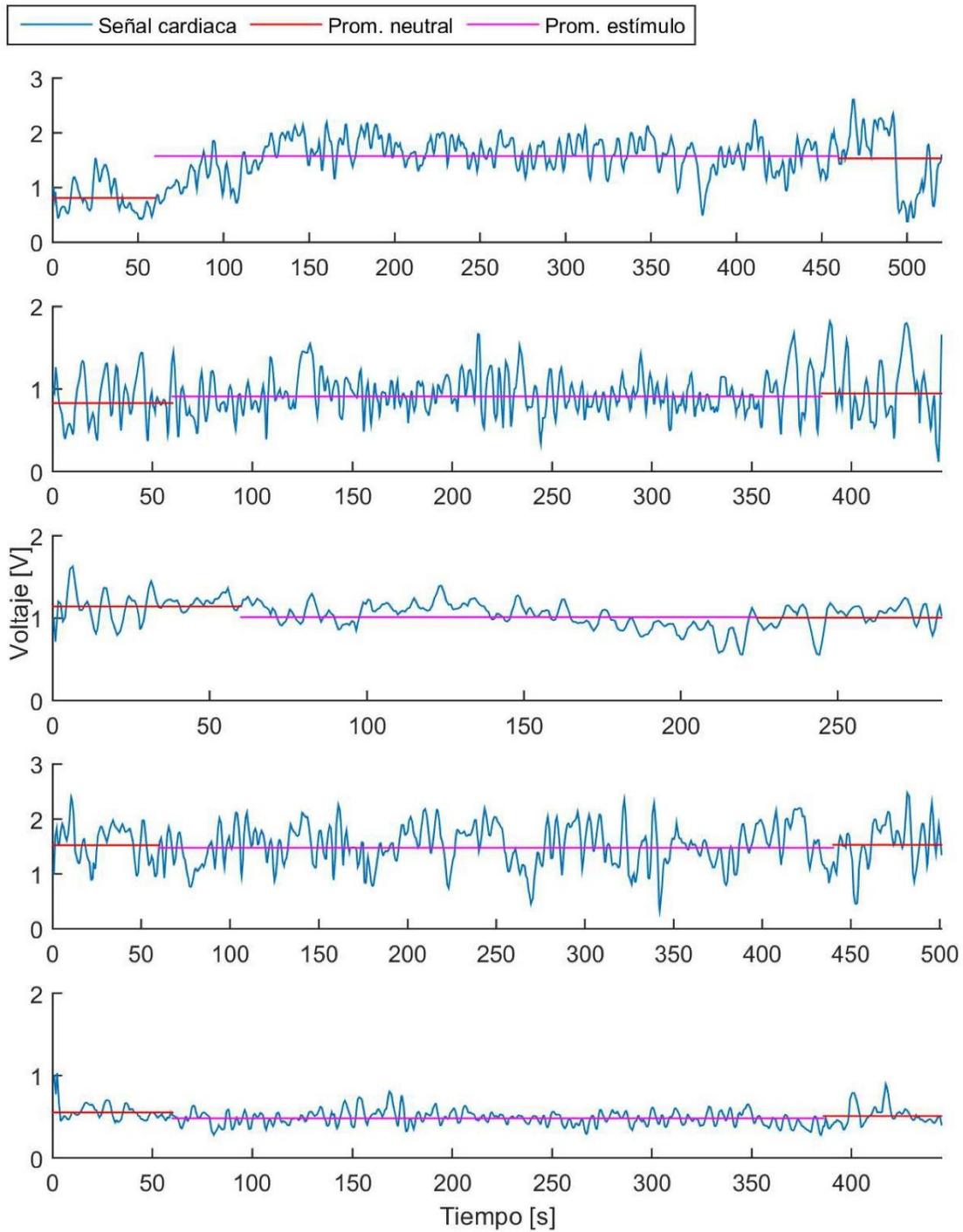


Imagen 30. Señal cardiaca durante la prueba 3.

En el sujeto 1 existe un incremento del 94.9% de la fase del estímulo con respecto a la primera fase basal, posteriormente existe un decremento del 2.5% de la segunda fase basal con respecto a la fase del estímulo, lo que sugiere que durante la fase del estímulo el sistema cardiovascular sufre una vasodilatación.

En el sujeto 2 existe un incremento del 9.35% de la fase del estímulo con respecto a la primera fase basal, posteriormente existe otro incremento del 4.22% de la segunda fase basal con respecto a la fase del estímulo, lo que sugiere que durante la fase del estímulo el sistema cardiovascular sufre una vasodilatación.

En el sujeto 3 existe un decremento del 11.3% de la fase del estímulo con respecto a la primera fase basal, posteriormente existe otro decremento del 0.6% de la segunda fase basal con respecto a la fase del estímulo.

En el sujeto 4 existe un decremento del 3% de la fase del estímulo con respecto a la primera fase basal, posteriormente existe un incremento del 3.7% de la segunda fase basal con respecto a la fase del estímulo.

En el sujeto 5 existe un decremento de 35.3% de la fase del estímulo con respecto a la primera fase basal, posteriormente existe otro incremento del 29% de la segunda fase basal con respecto a la fase del estímulo.

Como se muestra en la tabla 20 ya no es posible observar una tendencia en el ritmo cardiaco de los sujetos.

	<b>Fase 1</b>	<b>Fase 2</b>	<b>Fase 3</b>
<b>Sujeto 1</b>	0.8059	1.571	1.531
<b>Sujeto 2</b>	0.8297	0.9073	0.9456
<b>Sujeto 3</b>	1.141	1.012	1.006
<b>Sujeto 4</b>	1.523	1.476	1.531
<b>Sujeto 5</b>	0.553	0.4786	0.5088

*Tabla 21. Tabla de promedio por fase de la señal cardiaca durante la prueba 3*

## Señal electrodérmica

A continuación se muestra la señal electrodérmica de cada sujeto obtenidas en la prueba 3.

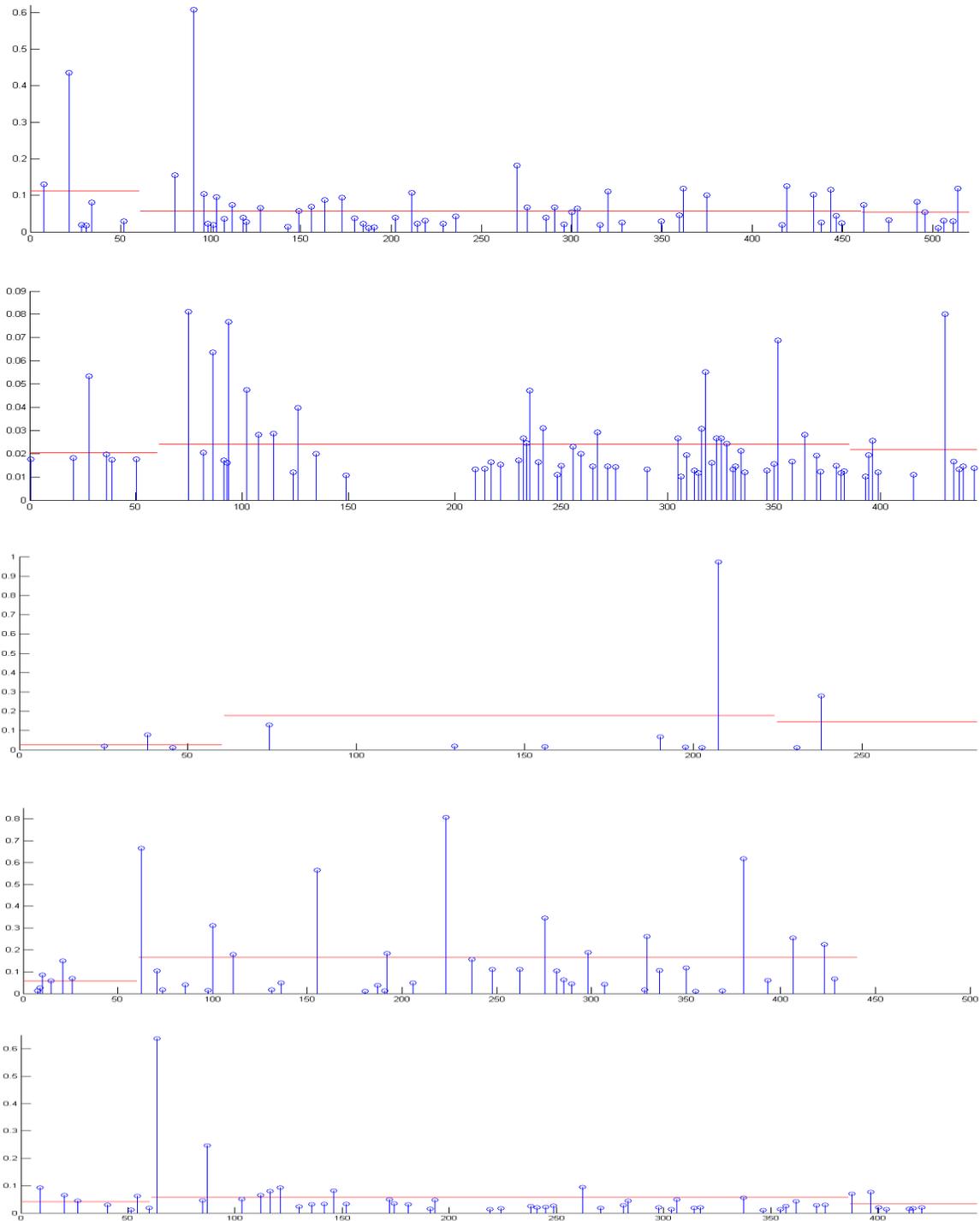


Imagen 31. Fase tónica de la RED durante la prueba 3.

En el sujeto 1 la respuesta electrodérmica tiene un decremento del 48.2% en la fase de estímulo con respecto a la primera fase basal, y nuevamente un decremento del 6.8% en la segunda fase basal con respecto a la fase de estímulo.

En el sujeto 2 la respuesta electrodérmica tiene un incremento del 17.1% en la fase de estímulo con respecto a la primera fase basal, y posteriormente un decremento del 9.98% en la segunda fase basal con respecto a la fase de estímulo.

En el sujeto 3 la respuesta electrodérmica tiene un incremento del 555% en la fase de estímulo con respecto a la primera fase basal, y posteriormente un decremento del 17.67% en la segunda fase basal con respecto a la fase de estímulo.

En el sujeto 4 la respuesta electrodérmica tiene un incremento del 190% en la fase de estímulo con respecto a la primera fase basal. Durante la segunda fase basal, no se mostró ninguna respuesta electrodérmica en la parte tónica de la señal.

En el sujeto 5 la respuesta electrodérmica tiene un incremento del 146% en la fase de estímulo con respecto a la primera fase basal, y posteriormente un decremento del 37.3% en la segunda fase basal con respecto a la fase de estímulo.

En la siguiente tabla, se puede observar que existe una tendencia en la señal de la mayoría de los sujetos a aumentar la actividad en la respuesta electrodérmica durante la fase de estímulo.

	<b>Fase 1</b>	<b>Fase 2</b>	<b>Fase 3</b>
<b>Sujeto 1</b>	0.1113	0.05758	0.05364
<b>Sujeto 2</b>	0.02052	0.02403	0.02163
<b>Sujeto 3</b>	0.02684	0.176	0.1449
<b>Sujeto 4</b>	0.05723	0.1663	
<b>Sujeto 5</b>	0.04077	0.05751	0.03335

*Tabla 22. Tabla de promedio por fase en REM durante la prueba 3*

Para la prueba 3, los resultados son distintos a lo que se esperaba, pero esto tiene explicación en la forma en que se llevó a cabo la prueba. Al tratarse de un desafío mental, los sujetos de prueba no estaban en una fase basal durante la prueba, y pudieron experimentar un ligero estrés mientras estaban en busca de la solución. El momento donde se esperaba ver resultados con un comportamiento similar al de las 2 pruebas anteriores, fue cuando lograban encontrar la solución, sin embargo, no es posible observar dicho comportamiento. La razón puede ser que los sujetos de prueba mencionaron no haber sentido un estado de satisfacción o de logro al encontrar la solución.

## Análisis de resultados

La emoción de alegría dentro de la gráfica de valencia vs excitación, muestra que la excitación tiene un nivel con baja amplitud, por lo que podemos esperar que el cambio en las señales fisiológicas no sea grande pero que los sujetos muestren un alto grado de satisfacción durante el estímulo.

Los resultados obtenidos son el reflejo de la actividad fisiológica de los sujetos durante las pruebas, tanto para el estado basal como durante el estímulo.

Las características que se detectaron en las señales son incrementos o decrementos en la amplitud de las señales.

En las siguientes tablas se muestra el cambio entre fases de cada prueba, mostrando en que porcentaje incrementó o disminuyó la señal. En la primera columna se encuentra el cambio que hubo de la primera fase basal a la fase de estímulo, y en la segunda columna se muestra el cambio que hubo de la fase de estímulo a la segunda fase basal.

Para hacer una mejor distinción, con color rojo se muestra el incremento de la señal y en color negro el decremento.

En la primera prueba se obtuvieron resultados variables en cada señal, pero se pudieron identificar tendencias en el comportamiento de las respuestas, las cuales se describen en la siguiente tabla:

	<b>Fase 1-2</b>	<b>Fase 2-3</b>
<b>EMG</b>	0.88% - 69.8%	0.5% - 29.3%
<b>Señal cardiaca</b>	8.3% - 42.7%	17.27% - 28.34%
<b>Respuesta electrodérmica</b>	29% - 917%	29.55% - 81.3%

Tabla 23. Variación en porcentaje de las 3 bioseñales para la prueba 1

En la segunda prueba también se pudieron identificar tendencias que se repetían en las respuestas obtenidas, sin embargo, en la señal de EMG los cambios fueron mínimos y no fue posible identificar una tendencia clara.

	<b>Fase 1-2</b>	<b>Fase 2-3</b>
<b>EMG</b>	0.23% - 2%	0.93% - 33.8%
<b>Señal cardiaca</b>	20.7% - 43.7%	1% - 27%
<b>Respuesta electrodérmica</b>	33.36% - 146.7%	42.17% - 140%

Tabla 24. Variación en porcentaje de las 3 bioseñales para la prueba 2

En la prueba 3 se obtuvieron señales de las cuales tampoco fue posible identificar una tendencia que tuviera relación con la primera prueba.

	<b>Fase 1-2</b>	<b>Fase 2-3</b>
<b>EMG</b>	1.97% - 31.63%	5.83% - 46.9%
<b>Señal cardiaca</b>	3% - 35.3%	3.7% - 29%
<b>Respuesta electrodérmica</b>	17.1% - 555%	6.8% - 37.3%

Tabla 25. Variación en porcentaje de las 3 bioseñales para la prueba 3

La tendencia más clara se observó en la primera prueba, con los siguientes resultados: la señal EMG tuvo un incremento durante la fase de estímulo entre 0.88% y 69.8%. La señal cardiaca presenta una disminución de entre 8.3% y 42.7%. Finalmente, la respuesta electrodérmica tuvo un incremento en la señal desde 29% hasta 917%.

En las pruebas 2 y 3, no es posible observar una tendencia clara. Sin embargo, es posible notar que entre cada una de las fases sí existe un cambio en el nivel en amplitud de las señales. En la señal cardiaca durante la prueba 3, existe un cambio que va desde un decremento en la señal de 35.3% hasta un incremento de 94.9%. Mientras que en la prueba 2, la respuesta electrodérmica es la que no muestra un claro comportamiento, ya que disminuye desde un 42.17% y aumenta hasta un 140%.

En la siguiente tabla se muestran los resultados de una encuesta aplicada a los sujetos posterior a la prueba, en donde se les pidió calificar en una escala del 1 al 10 el nivel de alegría que sintieron durante la etapa del estímulo, siendo 1 ausencia de alegría y 10 el punto máximo. Así mismo, se les pidió que describieran su estado de ánimo durante las 2 etapas basales.

Sujeto	Prueba 1		Prueba 2		Prueba 3	
	Calificación de alegría durante estímulo	Emoción durante estado basal	Calificación de alegría durante estímulo	Emoción durante estado basal	Calificación de alegría durante estímulo	Emoción durante estado basal
1	5	Desesperación	10	Desesperación	7	Desesperación
2	8	Ansiedad	9	Felicidad	6	Ansiedad
3	7	Relajación	8	Sueño	6	Relajación
4	3	Relajación	2	Relajación	5	Aburrición
5	-	-	-	-	-	-

*Tabla 26. Calificación de las emociones experimentadas por parte de los sujetos de prueba durante el estado basal y aplicación del estímulo*

Los sujetos sintieron la menor satisfacción en la prueba 3 (prueba de desafío mental), mientras que la prueba donde mencionaron haber sentido la mayor satisfacción fue donde se utilizó música como estímulo.

Basándonos en las características fisiológicas que se buscaban y las calificaciones de alegría en la prueba, la prueba 1 muestra ser la que más se acerca a la alegría, pues a pesar de que la calificación que dieron los sujetos fue menor a la de la prueba 2, las calificaciones son muy parecidas.

En la prueba 2 se pudieron haber evocado otras emociones muy cercanas a la alegría como el estar contento o la tranquilidad, las cuales muestran estados de satisfacción muy similares, pero con una excitación menor.

## Conclusiones

Las emociones se pueden clasificar, de forma general, en positivas y negativas. Históricamente se ha priorizado el estudio de las causas y consecuencias de las emociones negativas, ya que al ser éstas las que afectan de manera directa la vida de un individuo, resulta lógico investigar qué las provoca y cómo pueden afectar a quien las experimenta. Tomando esto en cuenta, las emociones positivas se habían dejado de lado durante un gran periodo de tiempo, siendo hasta el siglo XX que se acuñó el término de psicología positiva de mano del Prof. Martin Seligman, quien también inició esta nueva corriente dentro de la psicología, que busca estudiar el bienestar psicológico.

Uno de los desafíos más importantes para esta tesis, fue encontrar la manera de evocar en los sujetos de estudio el estado de ánimo deseado. La alegría se puede evocar mediante estímulos que provoquen bienestar físico o psicológico [1]. Para identificar las emociones, podemos basarnos en la *triada reactiva emocional* e identificar la alegría mediante informes verbales, observaciones o registros fisiológicos. Como el objetivo es que el dispositivo sea el que detecte alegría, la información obtenida mediante los registros fisiológicos, se complementa con informes verbales de cada usuario y también se tomó en cuenta el comportamiento mostrado por los sujetos durante cada prueba.

La característica principal visible de comportamiento cuando una persona experimenta alegría es la risa o sonrisa, dependiendo de la intensidad del estímulo y la personalidad de la persona. Tomando como base lo mencionado anteriormente para detección, el comportamiento provocado por el estímulo (sonrisa) se eligió el uso de EMG para detectar actividad muscular, así como respuesta electrodérmica y fotopleetismografía para el registro fisiológico.

La complejidad de analizar los resultados obtenidos, radica en la variación de resultados entre los diferentes sujetos, debido a diferencias fisiológicas y de personalidad.

En la primera prueba se obtuvieron características en las señales obtenidas que concuerdan con lo esperado según la tabla 1. En las pruebas 2 y 3 se obtuvieron características que no concuerdan con lo esperado, por lo tanto, corresponden a emociones diferentes a la alegría.

Debido a que las bioseñales son únicas en cada persona, así como su personalidad, el siguiente paso sería hacer pruebas para tratar de identificar también emociones negativas y así poder hacer una comparación. Tener las características de las respuestas fisiológicas para diferentes emociones en cada individuo, puede dar pie a hacer la comparación entre señales y estar seguros de que la tendencia de ciertas características se debe a determinadas emociones.

Se lograron identificar características que correspondieron a lo esperado para la alegría, pero sólo en la primera prueba, lo cual indica que las pruebas 2 y 3 no lograron evocar alegría en los sujetos de prueba. Las características observadas en la primera prueba, se repiten en cada uno de los sujetos, incluso en aquellos que no siguieron el protocolo, pero que de igual manera experimentaron alegría. Con esto se comprobó que se pudieron identificar características para la alegría, y que de igual manera se pueden identificar características para otras emociones.

En la etapa de adquisición y acondicionamiento de datos, se utilizaron filtros y amplificaciones que ayudaron la adquisición de las señales, pues éstas tienen adicionado ruido que no hubiera permitido notar el comportamiento de las señales.

Las ganancias variables que se utilizaron fueron convenientes cuando se realizaron las pruebas, debido a que en cada sujeto la intensidad de la señal varía y en algunos casos la señal se salía de la escala.

El convertidor analógico-digital utilizado fue el que viene incluido en el microcontrolador Arduino, mostrando un buen funcionamiento y una resolución aceptable al adquirir las 3 señales al mismo tiempo.

La interfaz con el usuario fue diseñada con la ayuda de Matlab, así como la interfaz con el microcontrolador Arduino. Con la ayuda de este software se pudo obtener el funcionamiento deseado, el único inconveniente fue lograr que las señales se trazan rápidamente, pues al tener que adquirir 3 señales, almacenarlas y trazarlas existía un retraso que no se consiguió disminuir de aproximadamente 2.5 s.

Las características que se plantearon al principio para el sistema, fueron cumplidas de forma general, pues el dispositivo tiene la capacidad de ser trasladado a cualquier parte sin mayor problema. El dispositivo también es capaz de adquirir las 3 señales planteadas, respuesta electrodérmica, fotopleletismografía y EMG de forma simultánea y mostrarlas en una interfaz gráfica.

El sistema es capaz de funcionar por medio de una tarjeta Arduino, que a su vez va conectada a una computadora cuya interfaz es el programa Matlab. La conjunción entre Arduino y Matlab mostraron funcionar de manera correcta para adquirir señales, el único inconveniente fue el diseñar la interfaz gráfica en Matlab, debido a que la interfaz muestra la gráfica de las señales con un retraso de alrededor de 2.5 segundos, lo cual dificulta calibrar el sistema previo a la adquisición de datos, es decir, aumentar o disminuir la ganancia dependiendo de cada sujeto.

La respuesta electrodérmica fue una señal que arrojó información valiosa, pues en ella se pudieron identificar picos en la señal cada vez que había un cambio durante las pruebas, por ejemplo, el inicio de la fase de estímulo.

La señal cardíaca fue una de las señales más erráticas, pues de forma recurrente, la señal perdía por completo el comportamiento esperado y la señal se salía de la escala, teniendo así una pérdida de información. Por otra parte, el sistema de fotopleletismografía fue el más difícil de adquirir, pues al mínimo movimiento o cambio en la iluminación, la señal se volvía inconsistente.

La electromiografía también fue una señal que aportó información valiosa para identificar el momento en que se presentaba actividad muscular. El único inconveniente al adquirir esta señal fue la colocación de los electrodos, pues al haber movimiento en la zona donde se colocan, eran susceptibles a desprenderse de la piel y perder la señal.

Los protocolos fueron de importancia para poder tener un orden al hacer cada una de las pruebas y no tener que improvisar cada vez. También fueron de ayuda para especificar el estado de salud en

el que se debían encontrar los sujetos, ya que, al tener alguna enfermedad, las señales podrían estar contaminadas. Sin embargo, se puede mejorar el protocolo indicando de igual forma que los sujetos hayan dormido el tiempo suficiente el día anterior y que, de preferencia, no tengan presiones o prisa por hacer una actividad posterior a la prueba, porque la ansiedad que sintieron la mayoría de los sujetos pudo ser un obstáculo para llegar al estado deseado durante la fase de estímulo.

Las bioseñales utilizadas en la presente tesis aportaron información fundamental para tratar de identificar una emoción en un determinado momento, debido a que se pudieron identificar cambios en las señales al pasar a etapas diferentes de las pruebas. Esto es importante porque, a pesar de que no es posible determinar aun rangos específicos de cómo aumenta o disminuye cada señal, se puede saber que si existe un cambio en la señal y que efectivamente está ocurriendo una respuesta fisiológica a un estímulo externo.

La instrumentación juega un papel importante dentro de esta tesis, así como para la carrera de ingeniería mecatrónica, ya que es la forma en que nuestros sistemas puede obtener información del mundo que los rodea y de esta forma poder hacer un análisis de los datos y llegar a un fin específico de forma más certera. Hablando de bioseñales, y sistemas cuyo objetivo final es identificar estados de ánimo o estados psicológicos de las personas, el objetivo aumenta su dificultad ya que la mente humana es un sistema completamente distinto entre cada individuo.

Con esta tesis se buscó tratar de encontrar que, a pesar de esas diferencias entre cada persona, es posible encontrar tendencias que se repiten dependiendo de los estímulos externos que experimenten y así poder identificar emociones para diversas aplicaciones que ayuden a las personas a mejorar su calidad de vida y a tratar de hacer sus actividades cotidianas más placenteras.

## **Trabajo a futuro**

A continuación, se describen las dificultades experimentadas al realizar las pruebas y que deben ser tomadas en cuenta para trabajos futuros en donde sea necesario realizar pruebas psicológicas a sujetos de estudio, ya que afectan indirectamente los resultados finales.

La primera dificultad fue encontrar el espacio ideal para realizar las pruebas. Por cuestiones de disponibilidad, no fue posible realizar las pruebas en un lugar que cumpliera con los requisitos del protocolo, ya que el lugar contaba con múltiples distractores visuales y auditivos.

La dificultad de los voluntarios para cumplir con los horarios acordados también representó un desafío, siendo el experimentador el que se acopló a los horarios de los voluntarios. Otra dificultad fue que los sujetos de prueba, en sus actividades regulares solían experimentar estrés y al momento de llevar a cabo las pruebas, aun mencionaron tener un poco de estrés antes de iniciar la prueba, pero todos mencionaron experimentar un estado basal durante la primera fase de las pruebas.

Con base en las experiencias que se tuvieron durante la realización de estas pruebas, se generaron las siguientes conclusiones que también pueden fungir como recomendaciones para futuras pruebas.

La disponibilidad de los sujetos de prueba es un motivo a tomar en cuenta para tratar de que las pruebas sean consistentes y que, al mismo tiempo, ellos no se sientan presionados por falta de tiempo o para realizar otras actividades, debido a que esto puede provocar estrés. Si el horario no es un factor indispensable en la prueba, es mejor realizar las pruebas durante la mañana, pues las personas a lo largo del día suelen enfrentar diferentes situaciones y cabe la posibilidad de que el sujeto pase por una situación que pueda afectar significativamente su estado de ánimo.

El espacio de trabajo en donde se llevan a cabo las pruebas juega un papel importante. Si se lleva a cabo una prueba en donde se requiere que el sujeto esté concentrado en un solo estímulo, lo ideal es que el laboratorio esté aislado de estímulos externos que podemos considerar como ruido. Éstos estímulos pueden ser visuales, auditivos, sensoriales u olfativos. Un buen espacio de trabajo debería de carecer de ventanas hacia el exterior, pero al mismo tiempo estar bien iluminado y ventilado. Se debe evitar estar cerca de zonas con mucha actividad para evitar ruidos sonoros que podrían poner incómodo al sujeto de prueba, así como evitar colocar estímulos visuales en la pared como posters o fotografías.

Otro factor a tomar en cuenta, como referencia a trabajos futuros, es el tamaño de los adhesivos de los electrodos. Debido a falta de experiencia, no se consideró durante la prueba que el tamaño de los adhesivos no fuera adecuado, ya que el diámetro de los electrodos si concordaba con los requerimientos. Si se va a trabajar con músculos finos o en áreas donde exista una deformación considerable en el relieve de la piel al momento de realizar actividad muscular, lo mejor será conseguir electrodos con adhesivos con el diámetro más pequeño que se pueda conseguir.

Para ampliar la efectividad también se puede hacer uso de otro tipo de sensores como EEG o sensores químicos para cuantificar los niveles de endorfinas, las cuales también se relacionan con emociones positivas.

## Referencias

- [1] Seligman, M. E. P., "Helplessness: On Depression, Development and Death", 2ª Edición, W. H. Freeman & Company, Estados Unidos, 1992.
- [2] Csikszentmihalyi, M., "Finding Flow: The Psychology of Engagement with Everyday Life", 1ª Edición, Basic Books, Estados Unidos, 1997.
- [3] Lyubomirsky S., King L., "The Benefits of Frequent Positive Affect: Does Happiness Lead to Success?", *Psychological Bulletin*, 2005, Vol. 131, No. 6, pp. 803-855
- [4] Jatupaiboon N., Pan-Ngum S., Israsena P., "Real-Time EEG-Based Happiness Detection System *Scientific World Journal*", *The Scientific World Journal*, 2013
- [5] Mand J., "The Secret of Happiness", Edición 2004, Fusion Books, India, 2004.
- [6] Rodríguez L., "Psicología de la Emoción: Capítulo 6: La alegría, la tristeza y la ira".  
Disponible en: <http://www.psicocode.com/resumenes/6EMOCION.pdf>  
Fecha de consulta: 16 de septiembre de 2014.
- [7] Navas J., Guil R., "La Regulación de las Emociones", 1ª Edición, Psicología Pirámide, España, 2012.
- [8] Aguilar G., Oblitas L., "Psicología del Bienestar y la Felicidad", PSICOM Editores, Colombia, 2011.
- [9] SparkNotes Editors. "SparkNote on Emotion." SparkNotes LLC. 2005.  
Disponible en: <http://www.sparknotes.com/psychology/psych101/emotion/>  
Fecha de consulta: 25 de mayo de 2016.
- [10] Pinel J., "Biopsicología", 6ª Edición, Pearson Educacion, SA , Madrid, 2007.
- [11] Tugade M., Shiota M., Deneen L., "Handbook of Positive Emotions", The Guilford Press, Estados Unidos, 2014.
- [12] Calvo R., D'Mello S., Gratch J., "The Oxford Handbook of Affective Computing", Oxford University Press, Estados Unidos, 2015.
- [13] Stelmack, R. M. & Geen, R. G., "The psychophysiology of extraversion. Handbook of individual differences: Biological perspectives", New York: Wiley., pp. 227-254.
- [14] Arangüena L., Iglesias J., "Psicofisiología", Editorial Pirámide, España, 2009.
- [15] Guyton, Hall J., "Tratado de Fisiología Médica", 12ª Edición, Elsevier, España, 2011.
- [16] Ekman P., Levenson R., Friesen W., "Autonomic Nervous System Activity Distinguishes Among Emotions", *Science*, vol. 221, pp. 1208-1210, Estados Unidos, 1983
- [17] Webster J., "Medical Instrumentation", 3ª Edición, John Wiley & Sons, India, 2009.

- [18] Kamen G., "Essential of Electromyography", Human Kinetics, Estados Unidos, 2010.
- [19] Day S., "Important Factors in Surface EMG Measurement", Bortec Biomedical, Canada.
- [20] Choe G., Moon I. Mun M., "Development of Surface Myoelectric Sensor for Myoelectric Hand Prosthesis", Power Electronics Specialists Conference, Corea, 2006
- [21] Boxtel A., "Facial EMG as a Tool for Inferring Affective States", Proceedings of Measuring Behavior, Holanda, 2010.
- [22] "Mexicano Crea Software De Deteccion De Emociones Para Diseñar Publicidad"  
Disponibile en: <http://www.circuito-cerrado.net/mexicano-crea-software-de-deteccion-de-emociones-para-disenar-publicidad/>  
Consultado: 23 de marzo de 2015
- [23] "Mi amigo, ¿es sano o tóxico?"  
Disponibile en: <http://www.portafolio.co/portafolio-plus/pulsera-detectar-estados-emocionales>.  
Consultado: 21 de marzo de 2015
- [24] "Human Big Data, Hitachi"  
Disponibile en: [http://www.hitachi-ightech.com/global/products/ind\\_solutions/ict/big\\_data/index.html/](http://www.hitachi-ightech.com/global/products/ind_solutions/ict/big_data/index.html/)  
Consultado en: 21 de marzo de 2015
- [25] Cheng K., "Physiological parameters Assessment for Emotion Recognition", National Cheng Kung University., 2012 IEEE EMBS Conference on Biomedical Engineering and Sciences (IECBES), Taiwan, 2012, pp. 995-998.
- [26] Park B., "Emotion Induction and Emotion Recognition using Their Physiological Signals", 7th International Conference on Computing and Convergence Technology (ICCT), Corea, 2012.
- [27] Seligman M., "Authentic Happiness: Using the New Positive Psychology to Realize Your Potential for Lasting Fulfillment", Free Press, Estados Unidos, 2002.
- [28] Herrmann, F., Prose, P. H., Sulzberger, M. B. "Studies of sweating. IV. A new quantitative method of assaying sweat-delivery to circumscribed areas of the skin surface", Journal of Investigative Dermatology, 1951, pp. 241-249.
- [29] Remington, N. A., Fabrigar, L. R., Visser, P. S., "Re-examining the circumplex model of affect". Journal of Personality and Social Psychology 79, pp. 286–300.
- [30] Altarriba, J., Basnight, D. M., & Canary, T. M., "Emotion representation and perception across cultures", Online Readings in Psychology and Culture (Unit 4, Chapter 5), Estados Unidos.  
Disponibile en: <http://www.wvu.edu/culture/altarriba2.htm>  
Consultado en: 24 de mayo de 2016.
- [31] Ulrich K., Eppinger S., "Diseño y desarrollo de productos", 5ª Edición, McGraw-Hill Educación, 2013.

[32] Hugdahl K., "Psychophysiology", 2ª Edición, Harvard University Press, Estados Unidos, 1998.

[33] Thompson J., "Handbook of emotions", Springer Science+Business Media, LLC, Estados Unidos, 1998.

# Anexos

## Anexo A. Cédula para sujetos de prueba

Universidad Nacional Autónoma de México  
Facultad de Ingeniería  
Sistema de Reconocimiento de Alegría  
Cédula de Sujeto de Prueba

El siguiente experimento consiste en determinar si se está experimentando alegría mediante la identificación de 3 variables fisiológicas. Se colocarán 3 tipos de sensores no invasivos y se reproducirán vídeos graciosos para inducir alegría.

*El objetivo de esta tesis es comprobar o refutar que es posible identificar el estado de ánimo de alegría mediante la adquisición de 3 variables fisiológicas con el uso de electromiografía (EMG), respuesta galvánica de la piel (GSR) y fotopleletismografía (PPG)*

**Nota:** Se va a tomar vídeo con fines de investigación y no se publicará de ninguna forma en ningún medio.

### Datos de la Prueba

Fecha de la Prueba: \_\_\_\_\_ Hora de la Prueba: \_\_\_\_\_  
Lugar de la Prueba: \_\_\_\_\_  
Temperatura Ambiente: \_\_\_\_\_  
Tipo de Iluminación: \_\_\_\_\_  
Duración de la Prueba: \_\_\_\_\_  
Sonidos Existentes: \_\_\_\_\_  
Observaciones Adicionales: \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

### Datos del Sujeto de Prueba

Nombre: \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_ Género: \_\_\_\_\_ Ocupación: \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_ cm. Peso:  Kg. Compleción: \_\_\_\_\_

Edad:

Estatura:

Condición del Sujeto de Prueba

Condición	Si No	Observación
Tinte en uñas		
Presencia de vello corporal		
Hipertensión		
Arteriosclerosis		
Arritmia		
Insuficiencia Cardíaca		
Aneurisma		
Infartos		
Diabetes		
Infección reciente		
Gripe		
Ingestión de Medicamentos		
Ingesta de alimentos Reciente:		
Ingesta de Alcohol		
Ingesta de Drogas		
Fuma		

Horas de Sueño diario: \_\_\_\_\_

Horas desde el último sueño: \_\_\_\_\_

Actividad física reciente: \_\_\_\_\_

Embarazo: \_\_\_\_\_

Pigmentación de la piel: \_\_\_\_\_

Estado emocional: \_\_\_\_\_

Otros \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Nombre y Firma del voluntario

## Anexo B. Protocolo de Prueba

Universidad Nacional Autónoma de México  
Facultad de Ingeniería

Nombre del alumno: Brian Buendía Sosa  
No. Cuenta: 307101640 Carrera: Ingeniería Mecatrónica  
Título de la tesis: Sistema de Reconocimiento de Alegría  
Asesora: M. I. Livier Baez Rivas

El siguiente experimento consiste en determinar si se está experimentando alegría mediante la identificación de 3 variables fisiológicas. Se colocarán 3 tipos de sensores no invasivos y se reproducirá un estímulo para inducir alegría.

*El objetivo de esta tesis es comprobar o refutar que es posible identificar el estado de ánimo de alegría mediante la adquisición de 3 variables fisiológicas con el uso de electromiografía (EMG), respuesta galvánica de la piel (GSR) y fotopletismografía (PPG)*

*El objetivo de las pruebas es caracterizar el estado de la alegría en un ambiente de inmersión controlado.*

**Nota:** *Se va a tomar vídeo con fines de investigación y no se publicará de ninguna forma en ningún medio.*

Se van a realizar 3 pruebas con un tiempo de separación entre sí de una semana, las cuales van a consistir principalmente en lo siguiente:

- Pedir al sujeto de prueba que se siente en el espacio de experimentación y que se ponga cómodo, conectar los sensores en su lugar correspondiente y darle 3 minutos de adaptación al entorno al sujeto de prueba.
- Empezar a registrar las señales fisiológicas sin presentar ningún estímulo, durante 2 minutos.
- Reproducir el estímulo durante un intervalo de 3 minutos.
- Detener el estímulo y seguir registrando las variables fisiológicas durante 2 minutos más.

Al finalizar las pruebas se pedirá calificar del 1 al 10 el nivel de alegría que sintieron durante la presentación del estímulo.

El tiempo estimado para realizar las pruebas será de entre 10 y 15 minutos por sujeto.

Las pruebas se van a realizar en 6 sujetos de prueba, 3 hombres y 3 mujeres de  $22 \pm 2$  años de edad.

La hora propuesta para realizar las pruebas es entre 11AM y 1PM.

Para comenzar con las pruebas, el lugar de experimentación debe cumplir con las siguientes condiciones:

- Estar aislado de ruidos externos de cualquier tipo
- La luminosidad del lugar debe ser natural o luz fría.
- La luz no debe iluminar directamente a la cara del sujeto de prueba.
- Temperatura agradable (entre 22°C y 27°C).
- Una silla cómoda.
- Equipo para visualizar y escuchar vídeos, puede ser una pantalla de televisión o computadora.
- El experimentador debe estar fuera de la vista del sujeto de prueba, así como el equipo de adquisición y análisis de datos.

Para realizar las pruebas se necesitan los siguientes recursos técnicos:

- Una computadora para el experimentador
- Una cámara de vídeo
- Una pantalla o monitor
- Un reproductor de música
- Audífonos
- Una silla confortable
- Una mesa pequeña para el sujeto de prueba (para la tercera prueba)
- Una silla y mesa para el experimentador

## Anexo C. Código interfaz gráfica

```
function varargout = interfaz(varargin)

% El siguiente código inicializa la
% interfaz gráfica
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
                  'gui_Singleton',   gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn',  @interfaz_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn',  @interfaz_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn',   [], ...
                  'gui_Callback',    []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargin
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end

% Este código se ejecuta antes de que la interfaz
% sea visible
function interfaz_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
handles.output = hObject;
guidata(hObject, handles);

% En esta función se especifican los argumentos de salida
function varargout = interfaz_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
% Activamos la barra de herramientas en la interfaz gráfica
set(hObject, 'toolbar', 'figure');
varargout{1} = handles.output;

% Función que se ejecuta al presionar el botón "iniciar"
function iniciar_Callback(hObject, eventdata, handles)
clc; % limpiar la memoria de otras variables almacenadas previamente
clear all; % limpia la pantalla de edición
puerto = serial('COM8', 'BaudRate', 9600); % inicia la comunicación
% serial con la tarjeta Arduino

fopen(puerto); % Abre la comunicación con Arduino

x=0; % Cuenta cuantas muestras se adquieren antes de graficar
muestra_previa=250; % Límite del tamaño de la muestra adquirida antes de
graficar
muestra=3000; % Tamaño de la muestra almacenada

% Con ésta función, declaramos que vamos a crear 3 gráficas en la misma
% ventana
```

```

rem=subplot(3,1,1);
fot=subplot(3,1,2);
emg=subplot(3,1,3);

% Creamos previamente 3 vectores en donde se almacenarán los datos de
% cada señal. Adicionalmente se crea un vector para almacenar el tiempo
% que tardó la prueba. La función crea los vectores cuyos elementos son
% solo 0.
y1=zeros(1,muestra);
y2=zeros(1,muestra);
y3=zeros(1,muestra);
tiempo=zeros(1,muestra);

% Crea la gráfica de los datos obtenidos hasta el momento de cada señal
h=plot(rem,tiempo,y1,'g-','EraseMode','background');
h1=plot(fot,tiempo,y2,'r-','EraseMode','background');
h2=plot(emg,tiempo,y3,'b-','EraseMode','background');

% Hace que al actualizar la gráfica, no se borren los datos previamente
% graficados
hold all;
tic % Inicia a contar el tiempo transcurrido

while(muestra_previa<=muestra);

    while(x<muestra_previa)
x=x+1;

% Recibe los nuevos datos para las 3 señales y se hace la conversión
% a voltaje.
y1(x)=fscanf(puerto, '%f')*(5/1024);
y2(x)=fscanf(puerto, '%f')*(5/1024);
y3(x)=fscanf(puerto, '%f')*(5/1024);
tiempo(x) = toc; % Almacena el tiempo transcurrido desde "tic"
set(findobj('Tag','text2'),'String',toc);% Escribe el tiempo transcurrido
% en la interfaz gráfica.

    end

% Grafica los datos obtenidos y muestra las señales en la interfaz graf.
set(h,'XData',tiempo,'YData',y1)
drawnow expose;
set(h1,'XData',tiempo,'YData',y2)
drawnow expose;
set(h2,'XData',tiempo,'YData',y3)
drawnow expose;

% Definimos el tamaño del eje X y Y para cada subgráfica para su mejor
% visualización
axis([rem fot emg],[time time1 0 5])

muestra_previa=muestra_previa+250;

```

```

toc
end

% Almacenamos los datos obtenidos de las señales en un archivo .dat
csvwrite('electrodermica.dat', y1);
csvwrite('fotoplestimografia.dat', y2);
csvwrite('electromiografia.dat', y3);
csvwrite('tiempo.dat', tiempo);

% Cierra y finaliza la comunicación con Arduino
fclose(puerto);
delete(puerto);

%Funciones creadas para el funcionamiento de la interfaz gráfica.
function edit1_Callback(hObject, eventdata, handles)

function edit1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

## Anexo D. Código adquisición de datos

```
//Declaración de variables para cada señal
unsigned int electrodermica;
unsigned int fotopletismografia;
unsigned int emg;

void setup() {

  // Inicia la comunicación serial
  Serial.begin(9600);

}

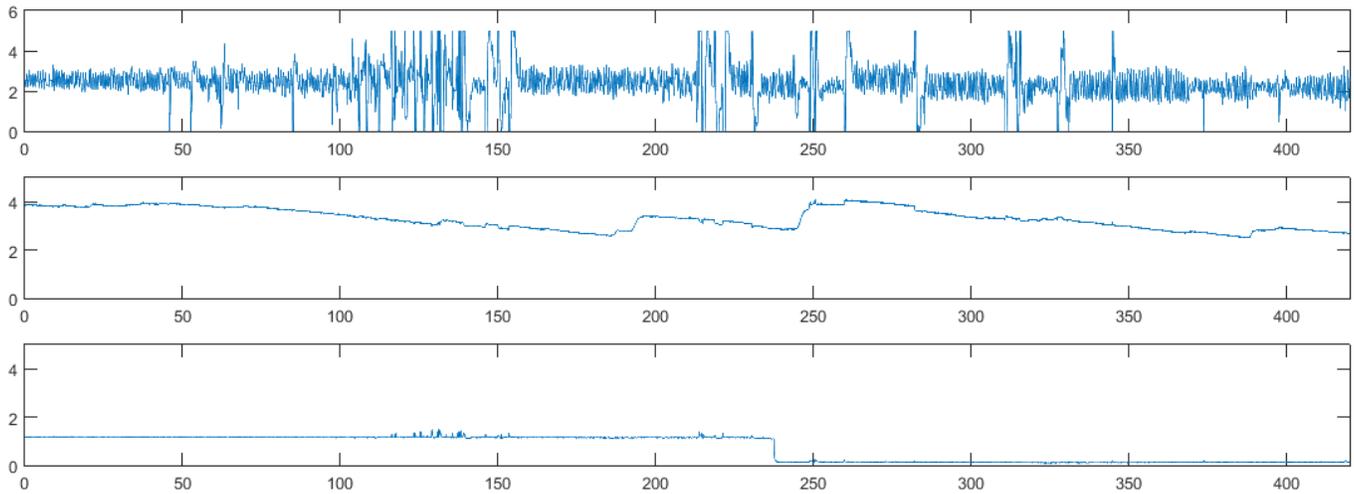
void loop() {

  // Adquisición de las señales mediante entradas analógicas
  electrodermica=analogRead(1);
  fotopletismografia=analogRead(2);
  emg=analogRead(4);

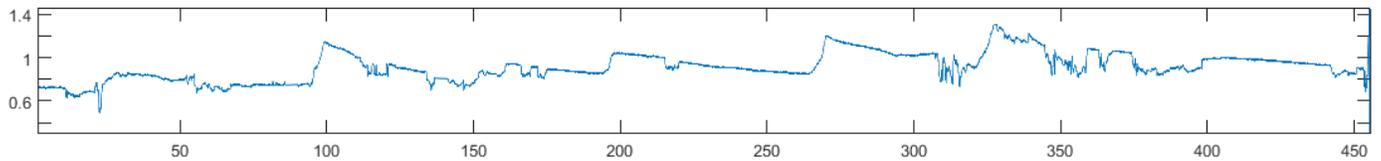
  // Envía datos adquiridos a computadora
  Serial.println(electrodermica);
  Serial.println(fotopletismografia);
  Serial.println(emg);
}
```

## Anexo E. Señales que no pudieron ser utilizadas por presencia de ruido o distorsion de la señal

Señales de fotopletismografía, respuesta electrodérmica y EMG respectivamente. Las señales pertenecen a un sujeto 6 las cuales no pudieron ser utilizadas por la distorsion que presentaban.



Señal de respuesta electrodérmica del sujeto 4 durante la prueba 2.



## Anexo F. Generación de la señal cardiaca

La señal cardiaca utilizada en este trabajo, fue generada de la señal de fotopleletismografía adquirida gracias al sistema de adquisición de señales.

La característica de la fotopleletismografía que se analizó fue la amplitud de la señal con respecto al tiempo.

Para generar la señal, lo que se hizo fue detectar el valor máximo local y mínimo local de cada periodo de la señal, y posteriormente restar los valores para obtener la amplitud. Finalmente las amplitudes obtenidas se graficaron con respecto al tiempo.

$$\textit{Amplitud} = \textit{Valor máximo} - \textit{Valor mínimo}$$

En la siguiente imagen, se muestra un ejemplo de un periodo de la señal de fotopleletismografía y los valores detectados para hacer el cálculo anterior.

