

INTERFAZ HOMBRE-MÁQUINA BASADA EN EL EMOTIV EPOC SYSTEM
PARA PERSONAS EN CONDICIÓN DE CUADRIPLÉJIA

DANIEL JAVIER SILVA NUÑEZ
MARLON ANDRÉS SILVA ROMERO

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA,
ELECTRÓNICA Y DE TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA

2018

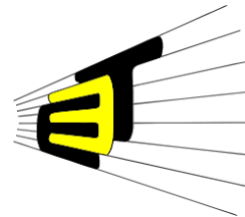
INTERFAZ HOMBRE-MÁQUINA BASADA EN EL EMOTIV EPOC SYSTEM
PARA PERSONAS EN CONDICIÓN DE CUADRIPLÉJIA

DANIEL JAVIER SILVA NUÑEZ
MARLON ANDRÉS SILVA ROMERO

Trabajo de grado para optar al título de: Ingeniero Electrónico

DIRECTOR:
JORGE EDUARDO QUINTERO MUÑOZ
Esp. en telecomunicaciones

CODIRECTOR:
DANIEL ALFONSO SIERRA BUENO
PhD. en Ingeniería Biomédica



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA,
ELECTRÓNICA Y DE TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA

2018

Agradezco a Dios primeramente por darme sabiduría y paciencia para sortear los momentos difíciles.

A Sandrita por enseñarme que las decisiones deben ser radicales y que siempre hay que mirar para adelante.

A la abuelita y yoyo por enseñarme la gran importancia de tener a Dios en primer lugar, el valor de la humildad, el sacrificarse por los demás y el amor a la familia

A mis hermanos David, Caro y Jona por ser mi compañía en este viaje.

A Aju quien con su cariño y motivación me dio la fuerza y determinación que necesitaba para terminar esta etapa y empezar a soñar con una nueva <3.

A toda mi familia quienes fueron mi motor e inspiración para salir adelante.

A mi compañero de proyecto porque no se rindió en ningún momento y perseveró hasta el final.

A cada persona con quien he podido compartir en el transcurso de mi carrera pues parte de lo que soy hoy es la suma de todo lo que he podido aprender de ustedes.

Rosalba, Alfonso, Sandra, Andrea, David, Carolina, Jonathan, Javier, Camilo, Samuel, Diego, Silvia, Juan y amigos. ¡Este triunfo también es de ustedes!

Daniel Silva

Primero que todo agradezco a Dios que me dio la fortaleza y las habilidades necesarias para completar este logro en mi vida, también reconocer el trabajo que realizo mi familia al brindarme el camino para ser la persona que soy hoy en día enseñándome valores y a jamás rendirme sin importar cual complicada sea la situación.

Agradezco también al profesor Javier Picón y su familia, personas incondicionales y con una gran bondad en sus corazones, que me hicieron crecer como persona, jugador y profesionalmente.

A las dos personas más importantes en mi vida mi abuela Ana Matilde Angulo y María Ximena Villamizar, no tengo palabras que logren enmarcar lo agradecido que estoy con ellas por todo el trabajo que han hecho para que esta meta se realizara de una manera satisfactoria, gracias por su apoyo y comprensión en cada etapa de mi vida donde en momentos de crisis y desesperación siempre mostraron su lado amable para recordarme que cuando el camino es difícil la recompensa es mayor.

A los profesores Jorge Quintero y Daniel Sierra quienes aportaron de su sabiduría, paciencia y lo más importante tiempo para guiarnos de la mejor manera posible para culminar satisfactoriamente esta tesis de grado.

A la vicerrectoría de investigación y extensión, a la Ingeniera María Otilia, la profesional Laura murillo y compañeros de trabajo como Nubia García, Neyla Galvis, Angie Acuña, Ernesto Canónigo, Luz Helena, Yina Anaya y Yeni Celis, mis más sinceros agradecimientos por brindarme esa compañía y apoyo incondicional, al igual por darme la oportunidad de aprender de cada uno de ustedes y permitirme compartir gran parte del día con esa otra familia espectacular de la coordinación de programas y proyectos VIE.

A Daniel Silva que no desistió a pesar de las adversidades e inconvenientes ocurridos en el desarrollo del proyecto.

A todos los que aportaron de manera indirecta y directa muchas gracias

Marlon Silva

CONTENIDO

| | Pág. |
|--|------|
| INTRODUCCIÓN | 17 |
| 1 MARCO TEÓRICO | 19 |
| 1.1 LA MÉDULA ESPINAL..... | 19 |
| 1.2 LESIONES MEDULARES | 20 |
| 1.3 SEÑALES EEG | 22 |
| 1.4 PATOLOGÍAS QUE AFECTAN LAS SEÑALES DE EEG | 23 |
| 1.5 TECNOLOGÍA DISPONIBLE EN EL MERCADO PARA PERSONAS MOVILIDAD REDUCIDA..... | 24 |
| 1.5.1 Head Want..... | 24 |
| 1.5.2 Sip/ Puff Switch..... | 25 |
| 1.5.3 Tobii | 26 |
| 1.5.4 Mouth Stick Keyboard..... | 26 |
| 1.6 ESTADO DEL ARTE EMOTIV EPOC SYSTEM | 27 |
| 1.6.1 Control parcial de una silla de ruedas por medio de ondas cerebrales..... | 27 |
| 1.6.2 Sistema para rehabilitación del síndrome del miembro fantasma | 28 |
| 1.6.3 Brazo robótico basado en BCI | 29 |
| 2 DISEÑO DE LA TECNOLOGÍA PROPUESTA..... | 31 |
| 2.1 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO | 31 |
| 2.2 ETAPA DE ADQUISICIÓN..... | 34 |
| 2.2.1 Emotiv Epoc System..... | 34 |
| 2.2.2 Descripción del sistema | 37 |
| 2.3 ETAPA DE COMUNICACIÓN | 42 |
| 2.3.1 Comunicación Computador-Microcontrolador..... | 43 |
| 2.3.2 Comunicación Microcontrolador-Transmisor RF..... | 55 |
| 2.3.3 Comunicación Transmisor RF-Receptor RF | 58 |
| 2.3.4 Comunicación Receptor RF- decodificador | 61 |
| 2.4 ETAPA DE ACTUACIÓN | 64 |
| 2.5 FABRICACIÓN MÓDULOS DE EMISIÓN Y RECEPCIÓN | 68 |
| 2.5.1 Módulo emisor | 69 |

| | | |
|-------|--|----|
| 2.5.2 | Módulos receptores | 72 |
| 2.6 | SISTEMA FINAL | 75 |
| 3 | PRUEBAS Y VALIDACIÓN | 77 |
| 3.1 | PRUEBAS EN EL SISTEMA | 77 |
| 3.1.1 | Prueba de funcionamiento del sistema | 78 |
| 3.1.2 | Prueba de conmutación | 79 |
| 3.1.3 | Prueba de alcance | 80 |
| 3.2 | Protocolo para el proceso de validación | 82 |
| 3.3 | Usuarios que intervinieron en el proceso de validación | 83 |
| 3.4 | Pruebas realizadas | 86 |
| 3.5 | Resultados obtenidos..... | 87 |
| 3.6 | Análisis de resultados | 90 |
| 4 | CONCLUSIONES | 92 |
| 5 | RECOMENDACIONES | 93 |
| | BIBLIOGRAFÍA | 94 |
| | ANEXOS | 98 |

LISTA DE TABLAS

| | Pág. |
|---|------|
| Tabla 1. Diagrama de funciones interfaz gráfica..... | 46 |
| Tabla 2. Esquema de funciones del microcontrolador | 54 |
| Tabla 3. Información general usuario 1 | 84 |
| Tabla 4. Información general usuario 2..... | 84 |
| Tabla 5. Información general usuario 3..... | 85 |
| Tabla 6. Información general usuario 4..... | 85 |
| Tabla 7. Asignación de teclas según el gesto seleccionado | 86 |
| Tabla 8. Información tabulada pruebas usuario 1 | 118 |
| Tabla 9. Información tabulada pruebas usuario 2 | 119 |
| Tabla 10. Información tabulada pruebas usuario 3 | 120 |
| Tabla 11. Información tabulada pruebas usuario 4 | 121 |
| Tabla 12. Datos de mejora diarios usuario 1..... | 122 |
| Tabla 13. Datos de mejora diarios usuario 2..... | 122 |
| Tabla 14. Datos de mejora diarios usuario 3..... | 123 |
| Tabla 15. Datos de mejora diarios usuario 4..... | 123 |
| Tabla 16. Promedio de aciertos general | 124 |
| Tabla 17. Función de los elementos usados en la tarjeta del módulo emisor | 126 |
| Tabla 18. Función de los elementos usados en la tarjeta del módulo receptor.... | 129 |

LISTA DE FIGURAS

| | Pág. |
|---|------|
| Figura 1. Médula espinal (distribución corporal) | 20 |
| Figura 2. Dermatoma del cuerpo humano..... | 21 |
| Figura 3. Patrones de ondas EEG | 23 |
| Figura 4. Patrones EEG para distintos tipos de epilepsia | 24 |
| Figura 5. Head Want..... | 25 |
| Figura 6. Sip/ Puff Switch..... | 25 |
| Figura 7. Tobii..... | 26 |
| Figura 8. Mouth Stick Keyboard..... | 27 |
| Figura 9. Sistema de silla de ruedas controlada por ondas cerebrales UFA (abajo izquierda), UPS (arriba izquierda) y UPB (derecha). | 28 |
| Figura 10. Sistema BCI para rehabilitación del síndrome de miembro fantasma...29 | |
| Figura 11. Control de brazo robótico mediante señales de EEG | 30 |
| Figura 12. Descripción general del sistema | 32 |
| Figura 13. Sistema general distribuido por etapas..... | 33 |
| Figura 14. Diadema Emotiv Epoc System..... | 35 |
| Figura 15. Comparación de señales tomadas por un EEG Clínico y por el Emotiv Epoc..... | 36 |
| Figura 16. Epoc Control Panel con todos los electrodos en línea..... | 37 |
| Figura 17. Expressive suite “Emotiv Epoc System” | 38 |
| Figura 18. Cognitive suite “Emotiv Epoc System” | 39 |
| Figura 19. Expressive suite con comandos y sensibilidad asignados..... | 41 |
| Figura 20. Diagrama de bloques de la etapa de adquisición | 41 |
| Figura 21. Ilustración comunicación entre PC y microcontrolador | 44 |
| Figura 22. Diagrama de flujo del código usado en la interfaz gráfica “Processing” | 48 |
| Figura 23. Interfaz gráfica programada en Processing | 49 |
| Figura 24. Interfaz gráfica programada en Processing luego de la secuencia “p” “1” y “3”..... | 49 |

| | |
|--|----|
| Figura 25. Conversor USB a serial / TTL | 50 |
| Figura 26. MSP430 Launchpad | 51 |
| Figura 27. Entradas y salidas usadas en el MSP430G2553..... | 52 |
| Figura 28. Diagrama de pines usados en el MSP430G2553 | 53 |
| Figura 29. Elementos que intervienen en la fase de comunicación entre el microcontrolador y el transmisor RF | 55 |
| Figura 30. Esquema de pines del circuito integrado HT12E | 56 |
| Figura 31. Diagrama para escoger la resistencia de oscilación en el circuito integrado HT12E..... | 57 |
| Figura 32. Codificación de bits en el circuito integrado HT12E..... | 58 |
| Figura 33. Sistema de comunicación inalámbrico..... | 58 |
| Figura 34. Módulos emisor XY-FST y receptor XY-MK-5V de radiofrecuencia..... | 60 |
| Figura 35. Medidas recomendadas para diferentes tipos de antena | 61 |
| Figura 36. Diagrama de pines del circuito integrado HT12D..... | 62 |
| Figura 37. Grafica para Resistencia de oscilación en el circuito integrado HT12D..... | 63 |
| Figura 38. Diagrama de bloques de la etapa de comunicación | 64 |
| Figura 39. Diagrama de bloques de la etapa de actuación | 65 |
| Figura 40. Funcionamiento del SSR | 66 |
| Figura 41. Esquemático para implementar un SSR | 66 |
| Figura 42. Esquemático usado para la tarjeta de circuito impreso del módulo emisor | 70 |
| Figura 43. Tarjeta de circuito impreso para el módulo emisor | 70 |
| Figura 44. Chasis de la tarjeta emisora con sus respectivas medidas..... | 71 |
| Figura 45. Resultado final del Chasis de la tarjeta transmisora | 72 |
| Figura 46. Esquemático usado en la tarjeta de circuito impreso del módulo receptor 1 | 73 |
| Figura 47. Tarjeta de circuito impreso del módulo receptor 1 | 74 |
| Figura 48. Chasis de la tarjeta receptora | 74 |
| Figura 49. Resultado final del chasis usado para los módulos receptores | 75 |
| Figura 50. Sistema completo | 76 |

| | |
|---|-----|
| Figura 51. Sistema conectado | 78 |
| Figura 52. Sistema con todos los dispositivos encendidos | 79 |
| Figura 53. Prueba de conmutación | 80 |
| Figura 54. Prueba de alcance | 81 |
| Figura 55. Resultados de las pruebas realizadas por el usuario 1..... | 88 |
| Figura 56. Resultados de las pruebas realizadas por el usuario 2..... | 88 |
| Figura 57. Resultados de las pruebas realizadas por el usuario 3..... | 89 |
| Figura 58. Resultados de las pruebas realizadas por el usuario 4..... | 89 |
| Figura 59. Eficacia promedio por día | 90 |
| Figura 60. Esquemático del módulo emisor | 109 |
| Figura 61. Esquemático del módulo receptor 1..... | 110 |
| Figura 62. Esquemático del módulo receptor 2..... | 110 |
| Figura 63. Esquemático del módulo receptor 3..... | 111 |
| Figura 64. Esquemático del módulo receptor 4..... | 111 |
| Figura 65. Tarjeta de circuito impreso del módulo emisor | 112 |
| Figura 66. Tarjeta de circuito impreso del módulo receptor 1 | 113 |
| Figura 67. Tarjeta de circuito impreso del módulo receptor 2 | 113 |
| Figura 68. Tarjeta de circuito impreso del módulo receptor 3 | 114 |
| Figura 69. Tarjeta de circuito impreso del módulo receptor 4 | 114 |
| Figura 70. Componentes notables de la tarjeta del módulo emisor | 125 |
| Figura 71. Esquemático del módulo receptor..... | 127 |
| Figura 72. Función de los elementos usados en la tarjeta del módulo receptor .. | 128 |
| Figura 73. Esquemático del módulo receptor 1..... | 130 |
| Figura 74. Panel de Control Emotiv Epoc | 132 |
| Figura 75. Ejemplo del Expressive suite con sensibilidad ajustada y teclas asignadas | 133 |
| Figura 76. Interfaz gráfica | 134 |
| Figura 77. Indicador visual del emisor | 137 |
| Figura 78. Módulos receptores | 138 |

LISTA DE ANEXOS

Pág.

| | |
|--|-----|
| ANEXO A. Especificaciones técnicas del Emotiv Epoc System..... | 98 |
| ANEXO B. Código usado para programar la interfaz gráfica basada en java en el software Processing para computador sin puerto serial físico | 100 |
| ANEXO C. Código usado para programar el microcontrolador MSP430G2553 de Texas Instruments en el entorno de programación "Energia" | 105 |
| ANEXO D. Esquemáticos usados en las tarjetas de circuito impreso en los módulos transmisor y receptor del proyecto | 109 |
| ANEXO E. Tarjetas de circuito impreso correspondientes a cada uno de los esquemáticos de los módulos transmisor y receptor | 112 |
| ANEXO F. Consentimiento informado | 115 |
| ANEXO G. Tabulación de los datos obtenidos en cada una de las rondas hechas en la validación | 118 |
| ANEXO H. Manual técnico..... | 125 |
| ANEXO I. Manual de usuario | 131 |

RESUMEN

TITULO: Interfaz hombre maquina basada en el EMOTIV EPOC SYSTEM para personas en condición de cuadriplejia*.

AUTORES: SILVA ROMERO, Marlon Andrés**
SILVA NUÑEZ, Daniel Javier**

PALABRAS CLAVES: Cuadriplejia, Interfaz hombre-máquina, Radiofrecuencia, Lesiones medulares.

DESCRIPCIÓN:

La condición de cuadriplejia es provocada por una lesión medular. Esta lesión es aquella en la que se ve afectada la médula espinal, llevando a que la persona tenga como consecuencia la parálisis total o parcial de su cuerpo. La mayoría de lesiones medulares son causadas por accidentes de tipo automovilístico o de traumas sufridos al caer desde una altura considerable, dando a entender que cualquier tipo de persona tiene algún riesgo de verse afectada por ello.

Las personas en condición de cuadriplejia ven disminuida su independencia, por ende el desarrollo del trabajo que se presenta tiene como objetivo ayudar y mejorar la calidad de vida de una persona en esta condición mediante una interfaz basada en la herramienta tecnológica Emotiv Epoc System, la cual toma señales de electroencefalografía y las envía a un ordenador encargado de coordinar el encendido y apagado de diferentes dispositivos eléctricos o electrónicos usados en la vida cotidiana como: un bombillo, un ventilador e incluso un sistema de ayuda sonora que le permita solicitar asistencia a la persona que esté acompañándole.

La orden de encendido y apagado es enviada vía radiofrecuencia por un dispositivo transmisor ubicado en el computador y se recibe en cada uno de los receptores. El resultado de esta interfaz permite al usuario tener una interacción de fácil manejo con su entorno logrando así mejorar la comodidad en su habitación. El sistema completo consiste en la diadema Emotiv Epoc, un computador con el software de la diadema y una interfaz que comunica con el módulo transmisor, un módulo transmisor de radiofrecuencia y cuatro receptores que realizan la conmutación de los dispositivos a controlar.

*Proyecto de grado

** Facultad de ingenierías de Físico-Mecánicas. Escuela de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Director: Jorge Eduardo Quintero Muñoz, Especialista en Telecomunicaciones. Codirector: Daniel Alfonso Sierra Bueno, PhD. en Ingeniería Biomédica.

SUMMARY

TITLE: Brain-Machine interface based on the EMOTIV EPOC SYSTEM for people in quadriplegia condition *.

AUTHORS: SILVA ROMERO, Marlon Andrés **
SILVA NUÑEZ, Daniel Javier **

KEYWORDS: Quadriplegia, Brain-machine interface, Radiofrequency, Spinal cord injury.

DESCRIPTION:

The quadriplegia condition is caused by a spinal cord injury. This injury is one in which the spinal cord is affected, leading to the person having total or partial paralysis of his body consequently. Most of spinal cord injuries are caused by automobile accidents or traumas suffered when falling from a considerable height, implying that any type of person has some risk of being affected by it.

People in a quadriplegia condition have diminished their independence, therefore the development of the work presented aims to help and improve the quality of life of a person in this condition through an interface based on the Emotiv EPOC System technological tool, which takes electroencephalography signals and sends them to a computer in charge of coordinating the switching of different electrical or electronic devices used in daily life, such as: a light bulb, a fan and even a sound aid system that allows you to request assistance from the person that is accompanying him. The on-off command is sent via radiofrequency by a transmitting device located in the computer and is received in each of the receivers.

The result of this interface allows the user to have an easy-to-use interaction with their surroundings, thus improving the comfort in their room. The complete system consists of the Emotiv EPOC headset, a computer with the headset software and an interface that communicates with the transmitter module, a radiofrequency transmitter module and four receivers that perform the switching of the devices to be controlled.

*Graduation project

** Faculty of Physical-Mechanical Engineering. School of Electrical, Electronics and Telecommunications. Director: Jorge Eduardo Quintero Muñoz specialist in telecommunications. Co-director: Daniel Alfonso Sierra Bueno, PhD Biomedical Engineering.

INTRODUCCIÓN

Los aportes hechos por la ingeniería en la evolución de la tecnología han permitido a la humanidad obtener innumerables opciones para mejorar su calidad de vida. La ingeniería de rehabilitación es una rama de la ingeniería biomédica que aplica los conceptos de la ingeniería en el campo de la medicina, con el fin de desarrollar proyectos que permiten al usuario recuperar parcial o totalmente el control de funciones corporales perdidas debido a algún accidente o enfermedad.

La cuadriplejía es una lesión medular ocasionada por alguno de los factores mencionados anteriormente. Esta condición impide a la persona mover su cuerpo a voluntad propia, por lo que necesita de asistencia para poder manejar los objetos que se encuentran en su entorno. Pensando en estas personas, surge la necesidad de implementar una herramienta tecnológica que les permita controlar electrodomésticos que se encuentren a su alrededor de manera fácil y asegurando el bienestar del usuario. Esto les dará la oportunidad de retomar actividades cotidianas como prender un bombillo, un ventilador o accionar una alarma para pedir ayuda. En este sentido, se garantiza una mejora notable de su calidad de vida ya que necesitará menos asistencia y será más autónomo.

El dispositivo que se va a utilizar como base para el presente proyecto es el EMOTIV EPOC SYSTEM, el cual permite reconocer expresiones faciales y comandos cognitivos, abriendo la posibilidad a un sinnúmero de aplicaciones.

Este proyecto cuenta con el apoyo de Neurotrauma Center¹, que es una IPS dedicada a la neurorrehabilitación especializada en personas que han adquirido lesiones medulares, cerebrales, o de algún otro tipo, en las que se vea afectado el cerebro.

El presente documento contiene conceptos previos necesarios relacionados con las lesiones medulares, las ondas EEG y el estado del arte de tecnologías basadas en el Emotiv Epoc System; cuenta también con un capítulo donde se detalla la estructura del sistema, los elementos utilizados y su proceso de fabricación y ensamble. Finalmente, el último capítulo contiene las pruebas realizadas al sistema y un proceso de validación mediante el cual se asegure la fiabilidad del sistema.

¹ Para más información de Neurotrauma Center acceder a:
<http://www.neurotraumacenter.org/quienes-somos.html>

1 MARCO TEÓRICO

El presente proyecto consiste en un sistema para personas con movilidad reducida ocasionada por lesiones medulares. Estas lesiones ocurren cuando se presenta un daño en la médula espinal. Para la realización del sistema se usan señales de electroencefalografía (EEG) tomadas por una diadema llamada Emotiv EPOC. Debido a esto, la actividad neuronal del usuario debe estar en óptimas condiciones.

1.1 LA MÉDULA ESPINAL

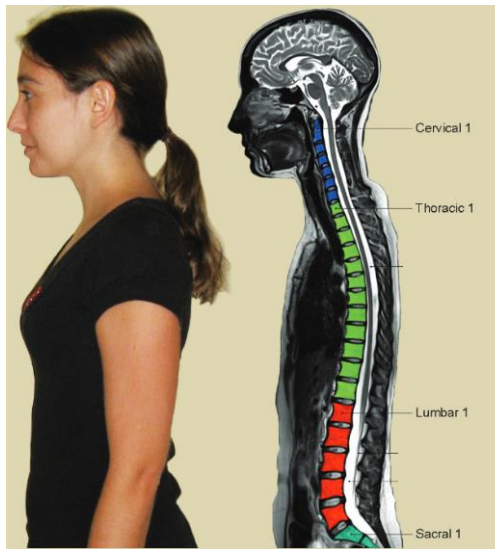
La médula espinal es el conducto por el cual fluye la información entre el cerebro y el resto del cuerpo. Esta comunicación se lleva a cabo gracias a vías medulares ascendentes, que llevan información sensorial hacia el cerebro, y las vías medulares descendentes, que llevan impulsos motores al organismo.

La médula espinal está compuesta por cuatro regiones comprendidas por un número determinado de pares nerviosos (Saladin, 2013):

- Cervical: compuesta por 7 pares.
- Torácica: compuesta por 12 pares.
- Lumbar: compuesta por 5 pares.
- Sacra: compuesta por 5 pares.

En la Figura 1 se observa la distribución corporal de estas 4 regiones y sus respectivos pares nerviosos.

Figura 1. Médula espinal (distribución corporal)



Fuente: (Rossignol, 2013)

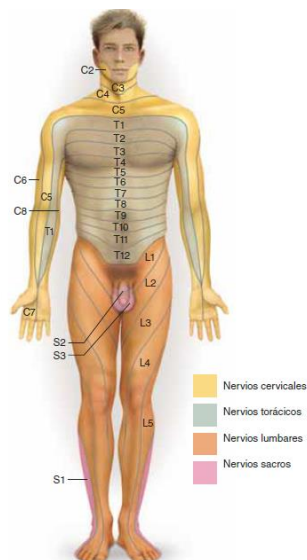
1.2 LESIONES MEDULARES

Las lesiones medulares ocurren cuando se presenta un daño en la médula espinal. Estos daños pueden ser ocasionados por traumatismos o por enfermedades degenerativas. Según reportes de la Organización Mundial de la Salud (OMS), la proporción de lesiones ocasionadas por causas traumáticas se aproximan al 90% de los casos, aunque el número de casos ocasionados por causas no traumáticas se encuentra en aumento (OMS, 2013).

Cuando la lesión medular es de origen traumático, la información que conduce las vías medulares no puede llegar a su destino, ocasionando pérdida de sensibilidad y/o parálisis motora temporal o permanente, dependiendo de la gravedad de la lesión. El grado de parálisis y pérdida de sensibilidad depende de la ubicación del par nervioso que fue afectado, es decir, desde ese punto hacia abajo afecta la lesión.

Las consecuencias más comunes de estas lesiones son la paraplejia y cuadriplejia. La primera ocurre cuando la lesión sucedió entre T1 y L1, y la segunda se presenta cuando la lesión ocurre desde C5 para arriba (Saladin, 2013). La Figura 2 muestra un dermatoma del cuerpo que permite conocer el área afectada dependiendo del par nervioso perjudicado.

Figura 2. Dermatoma del cuerpo humano



Fuente: (Saladin, 2013)

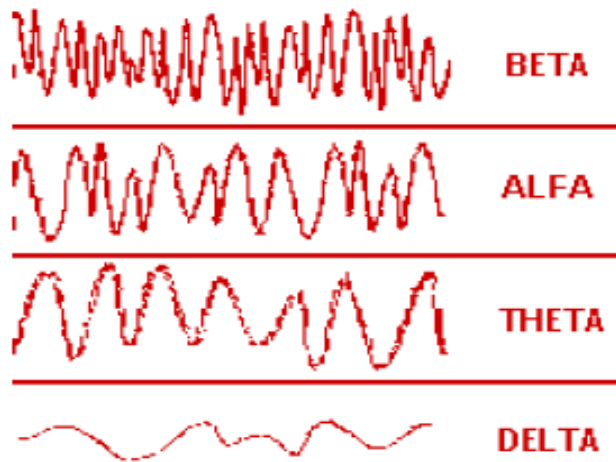
1.3 SEÑALES EEG

Son ondas eléctricas de baja frecuencia producidas por el cerebro. sus patrones comúnmente son senoidales y tienen una amplitud pico-pico entre 0.5 y 100 μV . Las ondas cerebrales se han dividido en cuatro grupos:

- Beta: frecuencias mayores a 13 Hz. Asociadas a etapas de sueño nulo, un estado alerta y consiente.
- Alpha: frecuencias entre 8-13 Hz. Asociadas a un estado de relajación.
- Theta: frecuencias entre 4-8 Hz. Asociadas a las primeras etapas del sueño.
- Delta: frecuencias entre 0.5-4 Hz. Asociadas a la etapa de sueño profundo.

El estudio de las ondas de EEG ha permitido desarrollar aplicaciones que permiten diagnosticar enfermedades de nivel neurológico, determinar estados de coma, muerte cerebral, desordenes en el sueño e incluso controlar dispositivos electrónicos mediante comandos cognitivos. En la Figura 3 se muestra un ejemplo de los patrones de cada uno de los tipos de ondas EEG mencionadas anteriormente (Teplan, 2002).

Figura 3. Patrones de ondas EEG



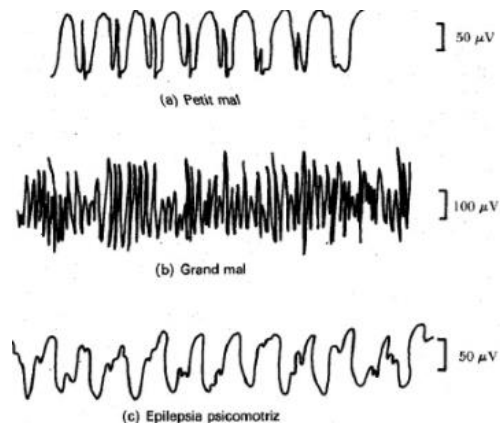
Fuente: (Teplan, 2002)

1.4 PATOLOGÍAS QUE AFECTAN LAS SEÑALES DE EEG

Como se dijo anteriormente, uno de los usos de las señales de EEG es determinar enfermedades a nivel neurológico. Por ejemplo, la epilepsia se diagnostica en base a los resultados obtenidos por un EEG, dado que su origen está en la activación excesiva parcial o total del sistema nervioso central. En la Figura 4 se observan patrones EEG para distintos tipos de epilepsia (Ariza, 2009).

Enfermedades como la demencia, el alzhéimer, tumores cerebrales y párkinson también presentan secuencias anormales en los patrones de las ondas de EEG, (Bonnani, y otros, 2008).

Figura 4. Patrones EEG para distintos tipos de epilepsia



Fuente: (Ariza, 2009)

1.5 TECNOLOGÍA DISPONIBLE EN EL MERCADO PARA PERSONAS MOVILIDAD REDUCIDA

En el mercado se encuentran numerosas aplicaciones que permiten mejorar la calidad de vida de personas que se ven afectadas por limitaciones en su movilidad causadas por lesiones medulares o enfermedades. Estas aplicaciones van desde prender y usar un computador hasta salir a dar un paseo en la calle. Algunos ejemplos de éstas se muestran a continuación.

1.5.1 Head Want. El Head Want es una vara integrada a un casco (Figura 5) que está diseñado para personas con movilidad de los hombros hacia arriba. Es ideal para pulsar teclas, navegar por la web y demás, sin la necesidad de invertir en software o hardware de alto nivel (Ortega, 2013).

Figura 5. Head Want



Fuente: (Ortega, 2013)

1.5.2 Sip/ Puff Switch. Es un dispositivo diseñado para personas que han perdido su capacidad motora. Este dispositivo sensa los movimientos de lengua y la respiración (Figura 6), los cuales funcionan como señales de control, permitiendo el accionar cerraduras y manejar el computador. Se puede adaptar para el manejo de una silla de ruedas (Ortega, 2013).

Figura 6. Sip/ Puff Switch



Fuente: (Ortega, 2013)

1.5.3 Tobii. Es una empresa enfocada a desarrollar tecnologías basadas en seguimiento visual. Una de estas tecnologías es el *Tobii PC eye*, el cual convierte el movimiento de los ojos en un mouse virtual, permitiendo al usuario con limitaciones de movilidad acceder al computador (Ortega, 2013).

Figura 7. Tobii



Fuente: (Ortega, 2013)

1.5.4 Mouth Stick Keyboard. Es un teclado poco convencional que ha sido diseñado para personas que han perdido movilidad tanto en sus brazos como en sus piernas (Figura 8). Es un teclado cuya posición principal es vertical (a diferencia de los teclados convencionales), sus teclas tienen un ancho y largo considerable y es manejado por una vara denominada Mouth Stick (este también puede ser maniobrado por el Head Want) (Ortega, 2013).

Figura 8. Mouth Stick Keyboard



Fuente: (Ortega, 2013)

1.6 ESTADO DEL ARTE EMOTIV EPOC SYSTEM

El desarrollo de tecnologías BCI (*Brain Computer Interface*) ha permitido utilizar las ondas EEG para controlar diversos dispositivos desde sillas de ruedas hasta prototipos de automóviles. El Emotiv Epoc System es una BCI de fácil manejo por parte del usuario que permite ser utilizada para diversas aplicaciones; este sistema se caracteriza por la interacción permanente entre el usuario y el ordenador pues se logra realizar lecturas en tiempo real de las actividades eléctricas del cerebro (EMOTIV, s.f.). Algunas aplicaciones desarrolladas son:

1.6.1 Control parcial de una silla de ruedas por medio de ondas cerebrales.

Sistema basado en el Emotiv Epoc System y las suite expresiva y cognitiva mediante la asignación de comandos que ofrece la interfaz. Esta aplicación ha sido

desarrollada en diferentes universidades del mundo entre las cuales se encuentra la Universidad de las Fuerzas Armadas (Lasluisa, 2015), la Universidad Politécnica Salesiana (Guevara, 2012) y la Universidad Pontificia Bolivariana (García, 2015). En la Figura 9 se observa el sistema que cada universidad desarrolló.

Figura 9. Sistema de silla de ruedas controlada por ondas cerebrales UFA (abajo izquierda), UPS (arriba izquierda) y UPB (derecha).



Fuente: (Lasluisa, 2015), (Guevara, 2012) y (García, 2015)

1.6.2 Sistema para rehabilitación del síndrome del miembro fantasma. Sistema desarrollado por la Escuela de Ingeniería de Antioquia para tratamiento del dolor en pacientes con síndrome del miembro fantasma. Mediante realidad aumentada y las

señales EEG captadas por el Emotiv permite la visualización de un modelo virtual de una mano o una prótesis virtual adherida a la persona mediante realidad aumentada contribuyendo a la rehabilitación del paciente (Arango, Cárdenas, & Peña, 2013). En la Figura 10 se observa el sistema de realidad aumentada en funcionamiento.

Figura 10. Sistema BCI para rehabilitación del síndrome de miembro fantasma



Fuente: (Arango, Cárdenas, & Peña, 2013)

1.6.3 Brazo robótico basado en BCI. Una herramienta asistiva para personas con discapacidad de miembros superiores, desarrollada por la Universidad de las Fuerzas Armadas en Ecuador. Permite al usuario tener el control de un brazo robótico mediante ondas EEG usadas por el Emotiv Epoc System (Solís, 2015).

Figura 11. Control de brazo robótico mediante señales de EEG



Fuente: (Solís, 2015)

2 DISEÑO DE LA TECNOLOGÍA PROPUESTA

Considerando la necesidad expuesta en el capítulo anterior, el proyecto busca implementar una tecnología dirigida a personas que presenten movilidad reducida como consecuencia de una lesión medular; especialmente aquellas en condición de cuadriplejia. La implementación de este sistema pretende brindar una mejora en la calidad de vida del usuario, permitiéndole recuperar cierto grado de independencia al poder manipular el encendido y apagado de electrodomésticos con los cuales se relaciona cotidianamente: un bombillo, un ventilador, un televisor y una alarma.

El presente capítulo contiene la descripción general del proyecto seguida por una descripción detallada del desarrollo de cada una de las etapas que conforma el mismo. También contiene la descripción y funcionamiento de cada uno de los elementos que conforman los módulos de transmisión y recepción para finalizar con la fabricación de los chasis para cada uno de ellos junto con sus pruebas correspondientes.

2.1 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

El sistema comienza con la adquisición de señales electroencefalográficas (EEG) por medio de la diadema Emotiv EPOC System, estas se procesan mediante un ordenador y se envían a un módulo transmisor de radiofrecuencia, el cual se encuentra enlazado a cuatro receptores encargados del accionamiento de los

electrodomésticos. La descripción general de los elementos que interactúan en el sistema se presenta en la Figura 12.

Figura 12. Descripción general del sistema

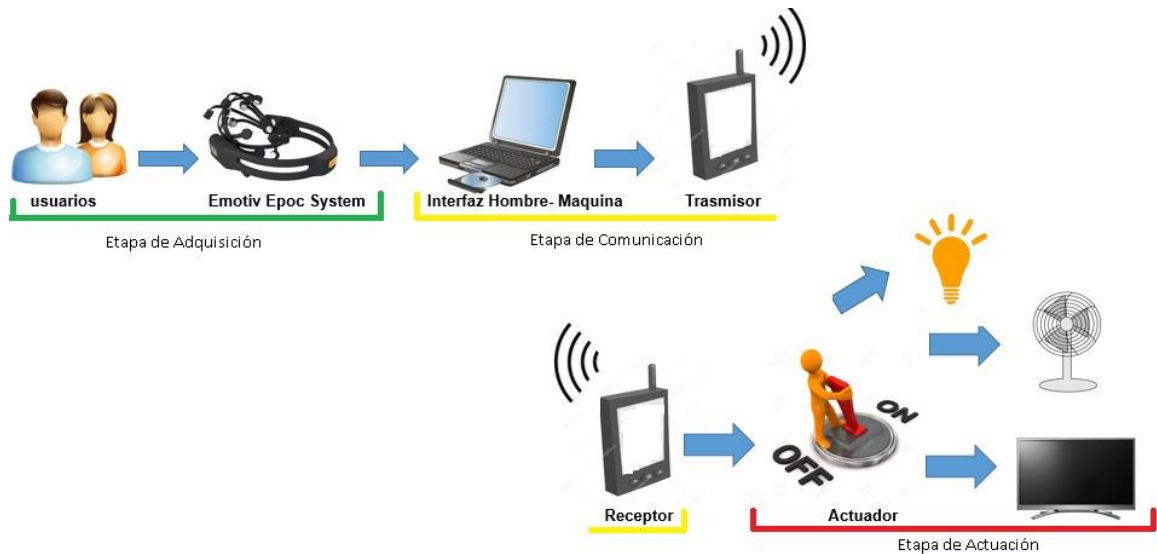


Fuente: Autores

El sistema se distribuye en tres etapas para así delimitar las partes clave que lo componen. De esta manera se puede abordar la descripción del proyecto de una manera más detallada, pues la delimitación de funciones de cada una de estas etapas permite seguir la secuencia del proceso que lleva a cabo el sistema implementado. Dicho esto, se presentan las etapas del sistema general. Una etapa de adquisición, una etapa de comunicación y la etapa final de actuación.

Para un desarrollo más estructurado, se ha dividido el proyecto en tres etapas: adquisición, comunicación y actuación. La delimitación de las funciones de cada etapa permite seguir la secuencia del proceso que se lleva a cabo en el sistema implementado. Las tres etapas están relacionadas entre sí de manera secuencial, es decir, La señal de salida de una etapa es la señal de entrada de la siguiente. Esta estructura permite que se pueda trabajar cada etapa de manera individual y posteriormente unir las para obtener el sistema total como se muestra en la Figura 13.

Figura 13. Sistema general distribuido por etapas



Fuente: Autores

Esta sección presentó una breve descripción de cómo funciona toda la interfaz ahora se procede a dar una descripción más detallada de cada una de las etapas,

como es el progreso del proceso que se está llevando a cabo, los elementos que intervienen en cada una de las etapas, los detalles de programación e implementación, los procedimientos realizados y los resultados obtenidos.

2.2 ETAPA DE ADQUISICIÓN

En esta etapa hay una interacción entre el usuario y la diadema Emotiv Eloc System, la cual será la encargada de captar los gestos faciales del usuario mediante el software que acompaña a la diadema, el Eloc Control Panel, el cual permite asignar comandos alfanuméricos a cada uno de los gestos.

2.2.1 Emotiv Eloc System. Es un dispositivo de reconocimiento neuronal de alta resolución como el observado en la Figura 14. Cuenta con 16 canales encargados de realizar la toma de las señales eléctricas producidas por el cerebro en tiempo real, permitiendo asociarlos con más de treinta estados diferentes entre los cuales se encuentran sentimientos, expresiones y pensamientos del usuario (EMOTIV Inc., s.f.).

Tiene una amplia gama de aplicaciones, desde el manejo de juegos hasta aplicaciones médicas como el control de una silla de ruedas (Lasluisa, 2015) y la rehabilitación en pacientes con el síndrome del miembro fantasma (Arango, Cárdenas, & Peña, 2013).

Figura 14. Diadema Emotiv Epoc System



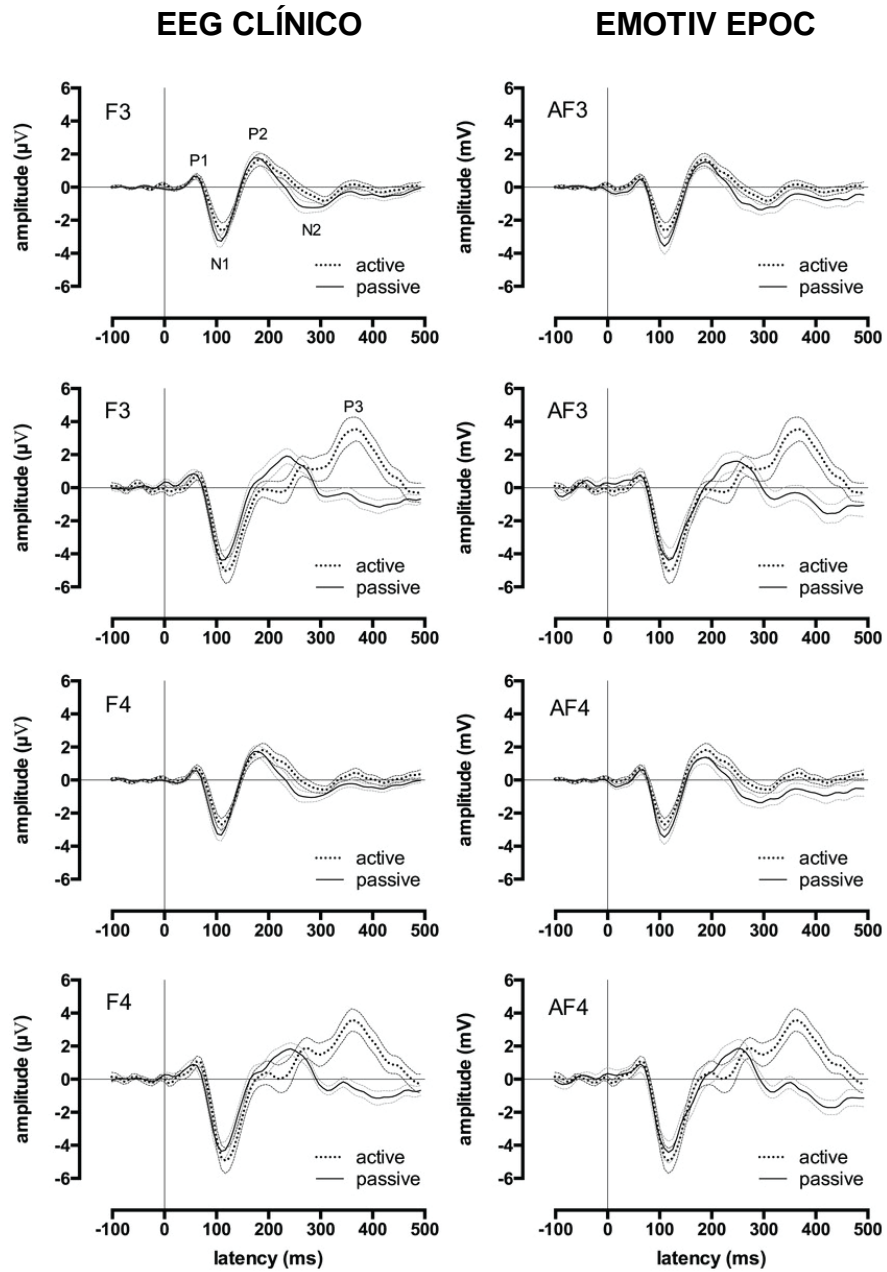
Fuente: (EMOTIV Inc., s.f.)

La diadema se comunica por medio de Bluetooth® Smart, e incluye una batería cuya duración permite un uso continuo de alrededor de 12 horas y también puede ser maniobrada de manera cableada por un puerto USB 2.0.

La precisión del Emotiv, cuyo costo es de USD \$799, es estadísticamente comparable con un sistema EEG clínico de USD \$60000 (EMOTIV Inc., s.f.). Una comparación de ambos sistemas se observa en la Figura 15 . Las demás especificaciones técnicas se pueden encontrar en el ANEXO A.

Figura 15. Comparación de señales tomadas por un EEG Clínico y por el Emotiv

Epoc

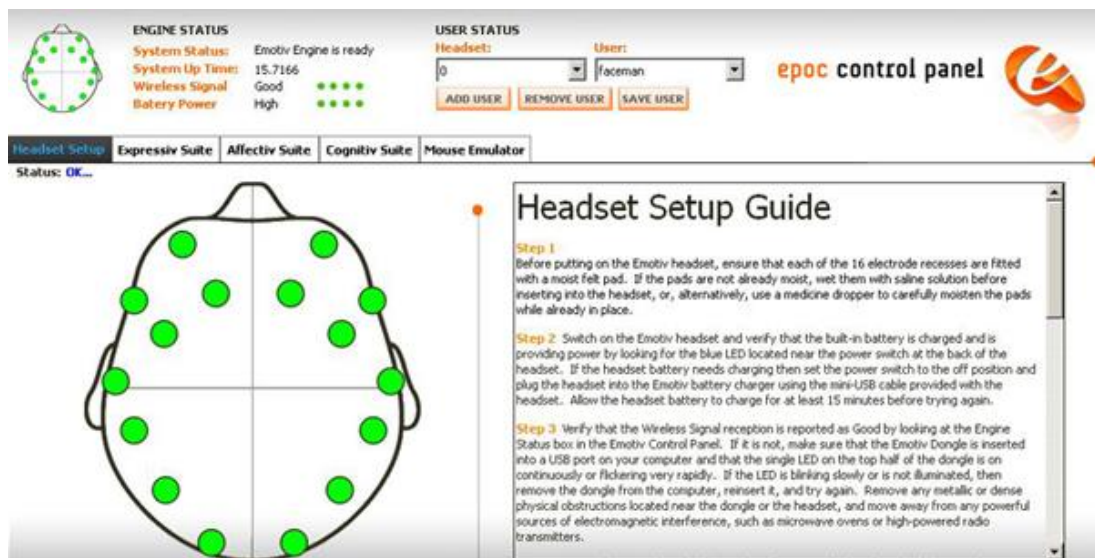


Fuente: (EMOTIV Inc., s.f.)

2.2.2 Descripción del sistema. El Emotiv Epoc System cuenta con un software compatible con los principales sistemas operativos: Windows y Mac (EMOTIV Inc., s.f.). El software permite conocer de manera directa el estado de cada uno de los sensores conectados por medio de una ayuda visual con colores básico como lo son: el verde para indicar una conexión eficiente; amarillo para una conexión normal; Naranja para una conexión débil; rojo para una conexión muy débil y negro para la desconexión total del sensor.

Aparte del estado de los sensores, también se puede acceder a sus tres principales funciones: la Expressive Suite, Cognitive Suite y la Affective suite. El panel de control del Emotiv cuando todos los sensores están haciendo un óptimo contacto, se observa en la Figura 16.

Figura 16. Epoc Control Panel con todos los electrodos en línea

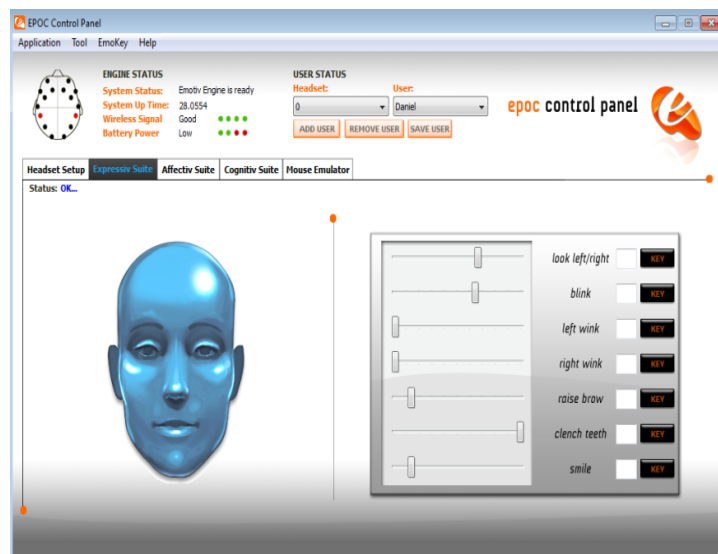


Fuente: Autores

El expressive suite como su nombre lo indica relaciona las señales electroencefalográficas con expresiones faciales tales como: el movimiento de los ojos, alzar las cejas, guiñar los ojos, sonreír y apretar la mandíbula. Estas expresiones faciales pueden tener una asignación alfanumérica o acciones predeterminadas las cuales se asignan en el panel de control de esta suite. Esto permite a la diadema realizar una tarea específica en el ordenador de acuerdo con el comando asignado.

Esta suite también cuenta con un avatar que permite calibrar la diadema, permitiendo así, aumentar la precisión. La Figura 17 muestra el panel de control de esta suite, donde las barras situadas al lado derecho son las encargadas del proceso de calibración por medio de una asignación de sensibilidad de los sensores.

Figura 17. Expressive suite “Emotiv Eloc System”

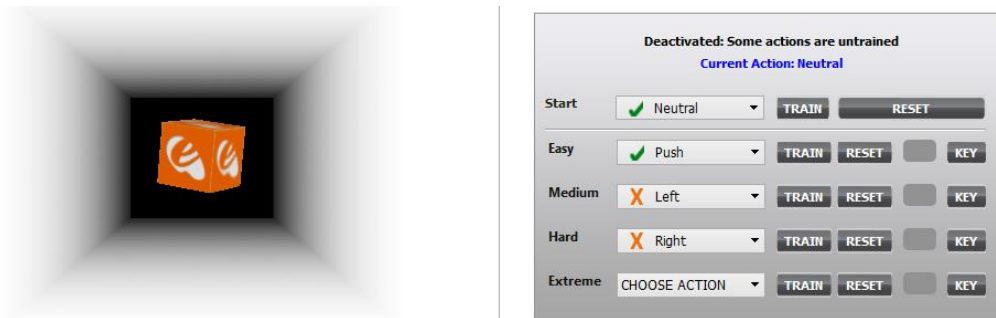


Fuente: Autores

La cognitive suite a diferencia de la anterior depende de la concentración del usuario. Permite sensor los pensamientos de este por medio de asignaciones de movimientos enfocados en un objeto específico, en este caso la suite presenta un cubo. Entre las acciones predeterminadas se encuentra: girar el cubo a los lados ya sea derecha o izquierda, alejar o acercar, subir o bajar, rotar hacia adelante y hacia atrás; estas acciones pueden ser configuradas en el panel de control de esta suite.

Otra diferencia significativa con respecto a la expressive suite, es el número de comandos de ejecución; mientras la primera presenta un total de ocho comandos funcionales, la segunda se ve reducida a la mitad. La Figura 18 presenta el panel de control de la cognitive suite.

Figura 18. Cognitive suite “Emotiv Epoc System”



Fuente: Autores

La affective suite sensa únicamente el estado anímico del usuario y no permite asignar comandos a estos estados, por ello, queda descartada para el sistema a implementar. Dicho esto, solo las dos primeras suites pueden asignar comandos

alfanuméricos simulando un teclado, por lo tanto, se debe escoger la que mejor se adapte a la interfaz que se quiere implementar.

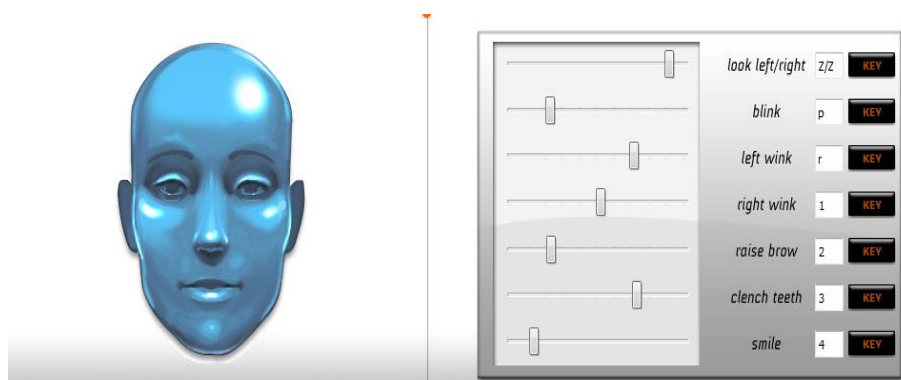
Un estudio realizado en la universidad de Canterbury en el 2012 indaga acerca de la precisión en los comandos de la cognitive suite de la diadema después de un entrenamiento previo con 10 personas de distintas características. Cabe resaltar que las personas que realizaron la prueba no habían tenido contacto alguno con dispositivo EEG (Lang, 2012). Los resultados observados muestran que el porcentaje de acierto en cada uno de los participantes luego de 24 intentos para probar 3 acciones específicas están en un rango medio, pues en el estudio el porcentaje de éxito va desde el 25% hasta el 66.7% con una media de 45.85%. Es de aclarar que para este estudio se limitó el tiempo de entrenamiento.

En el artículo "*Analysis of Brain Activity while Performing Cognitive Actions to Control a Car*" se explica el control de un carro de juguete mediante ambas Suite (Nisar, Yeoh, Balasubramanium, Wei, & Malik, 2014). El resultado de este artículo muestra que luego de los experimentos realizados el porcentaje de acierto al usar el cognitive suite no supera el 80% pero al usar el expressive suite el porcentaje de acierto es más del 90%. Basado en estos datos y en pruebas hechas en la diadema se decide usar la expressive Suite.

El sistema está planteado para controlar un habilitador, un reinicio y cuatro dispositivos. Debido a esto, se deben escoger seis de los gestos predeterminados

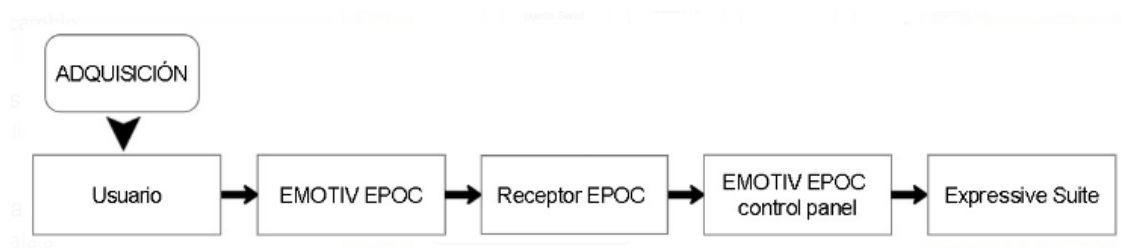
del expressive suite y asignarles los comandos: p, r, 1, 2, 3 y 4 para su posterior uso. El software de Emotiv distingue mayúsculas y minúsculas. Para gestos como parpadear la condición de activación es si ocurre o no ocurre dicho gesto. Para expresiones como sonreír o apretar los dientes la condición de activación es si se supera un umbral asignado por el usuario en la calibración del software. Luego de asignar los gestos y la sensibilidad la suite se ve como en la Figura 19. El diagrama de bloques correspondiente a la etapa de adquisición se observa en la Figura 20.

Figura 19. Expressive suite con comandos y sensibilidad asignados



Fuente: Autores

Figura 20. Diagrama de bloques de la etapa de adquisición



Fuente: Autores

2.3 ETAPA DE COMUNICACIÓN

Luego de obtener los comandos provenientes del panel de control del Expressive Suite del Emotiv Control Panel, se debe implementar un sistema de comunicación desde el computador hasta la etapa de actuación.

Los datos provenientes de la etapa de adquisición deben enviarse a un microcontrolador que reciba esa información y genere las distintas señales que serán enviadas a los receptores. Estas señales deben ser codificadas para ser enviadas de manera inalámbrica hacia el módulo receptor y finalmente ser decodificadas y entregadas a la etapa de actuación. Dicho esto, se divide la etapa de comunicación en cuatro fases:

- Comunicación Computador-Microcontrolador
- Comunicación Microcontrolador-Transmisor Inalámbrico
- Comunicación Inalámbrica
- Comunicación Receptor inalámbrico- Decodificador

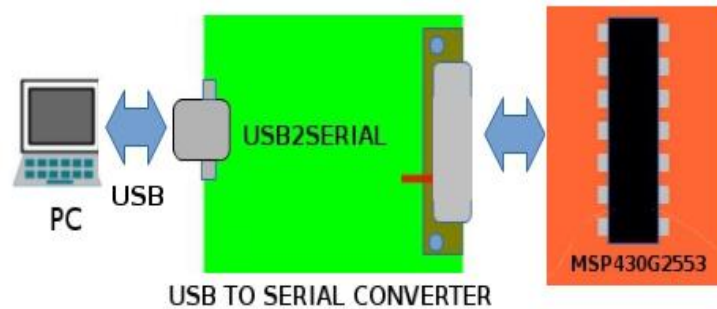
Para implementar estas fases, se usa comunicación serial entre el computador y el microcontrolador mientras que para la comunicación inalámbrica se opta por radiofrecuencia debido a que es una tecnología de fácil manejo, bajo costo, buen rango de cobertura y versátil.

2.3.1 Comunicación Computador-Microcontrolador. Esta etapa tiene como objetivo enviar los comandos alfanuméricos recibidos por el Epc Control Panel al microcontrolador que se va a usar. Se requiere un microcontrolador versátil, de bajo costo, que pueda recibir una señal serial y que tenga mínimo seis puertos I/O para las salidas que se van a usar: cuatro dispositivos de control, dos indicadores para inicio y reinicio. En la Figura 21 se observan los elementos que intervienen en esta sección.

El microcontrolador que se adapta mejor a las necesidades es el MSP430G2553 de Texas Instruments debido a las características que posee (Texas Instruments, 2011):

- Circuito integrado de 20 pines
- Compatible con comunicación serial
- Muy bajo consumo de potencia
- Más de 8 puertos I/O
- Bajo rango de fuente de tensión: 1,8 a 3,6 V
- Cristal de 32 kHz
- Bajo costo y alta funcionalidad

Figura 21. Ilustración comunicación entre PC y microcontrolador



Fuente: Autores

Para que el envío de información al microcontrolador pueda hacerse desde cualquier computador, se debe implementar el uso de un puerto serial virtual vía USB, ya que no todos cuentan con un puerto serial físico. Existen varios programas que permiten realizar esta función, como Virtual Terminal o Serial Port Monitor, sin embargo, la desventaja que poseen es que, para enviar los comandos, estos deben estar seguidos de la tecla *ENTER*.

Usando el software Processing, que es un entorno de programación basado en lenguaje JAVA, es posible enviar los comandos directamente, ya que posee una función que permite enviar información por el puerto serial seleccionado (K) en el momento exacto que Processing detecta que una tecla es presionada. Esta función es *Void keyPressed* y su estructura es²:

² Para más información del software Processing y sus respectivos tutoriales se puede consultar la página: <https://processing.org/examples/>>

```
void keyPressed(){  
    if(key == 'p'){  
        portK.write("p");  
    }  
}
```

Processing se usa en su versión 3.3. Adicionalmente, este programa permite generar una interfaz gráfica en la que el usuario puede observar el estado en el que se encuentra cada uno de los elementos del sistema; esto es posible ya que es un programa de fácil manejo. Se pueden encontrar muchos ejemplos de las funciones que tiene el programa en la página web de sus desarrolladores.

En la etapa de adquisición se escogieron seis expresiones faciales y se relacionaron con un comando alfanumérico. Las expresiones faciales escogidas determinan el estado de seis variables: los cuatro receptores, el encendido del dispositivo transmisor y el reinicio del mismo. Para la etapa de comunicación se definen estas variables como: p, r, 1, 2 3 y 4. Para la interfaz gráfica se asocian las variables anteriores respectivamente con: Encendido, Reinicio, D1, D2, D3 y D4.

De esta manera el usuario podrá hacer seguimiento del estado de cada uno de los elementos del sistema. Adicionalmente se puede ingresar manualmente el comando “z” para sincronizar todo el sistema en caso de alguna anomalía.

Se requiere que el envío de información entre emisor y receptor ocurra únicamente cuando el usuario lo quiera, así que se realiza la interfaz de manera que los estados de los dispositivos cambien solo cuando está habilitado mediante un comando

accionado por el usuario. La relación entre los comandos alfanuméricos de entrada, las condiciones necesarias para ejercer algún cambio y los cambios generados en la interfaz gráfica se observan en la Tabla 1.

Tabla 1. Diagrama de funciones interfaz gráfica

| Comando | Acción | Condicionante |
|---------|---|------------------------------------|
| z | Sincroniza la interfaz y reinicia todo el sistema, apaga todos los círculos | No tiene |
| p | Habilitador. Enciende/Apaga el círculo P | No tiene |
| r | Enciende/Apaga el círculo R, Si se enciende, apaga D1, D2, D3 y D4 | P debe estar encendido |
| 1 | Enciende/Apaga el círculo D1 | P debe estar encendido y R apagado |
| 2 | Enciende/Apaga el círculo D2 | P debe estar encendido y R apagado |
| 3 | Enciende/Apaga el círculo D3 | P debe estar encendido y R apagado |
| 4 | Enciende/Apaga el círculo D4 | P debe estar encendido y R apagado |

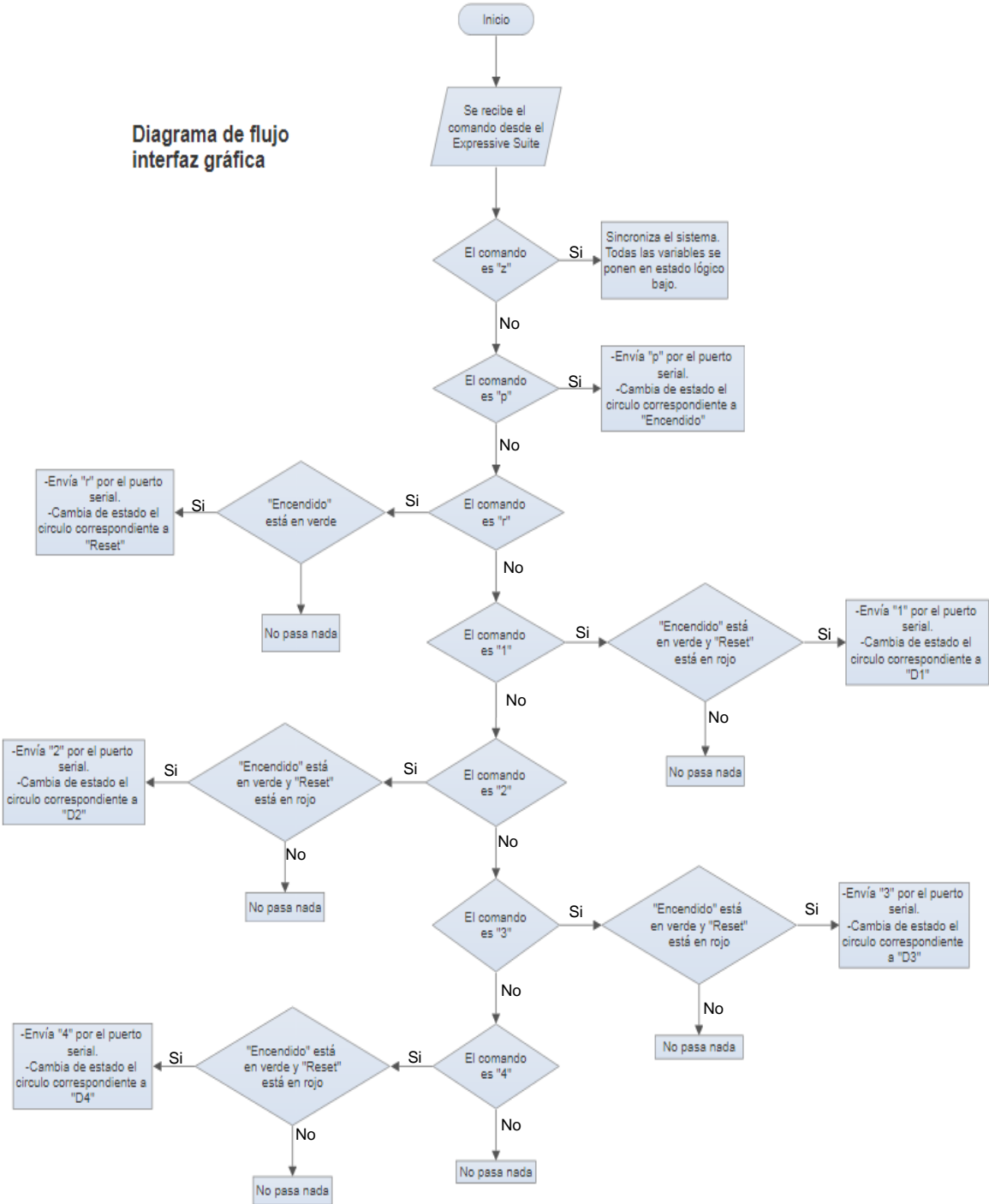
El programa distingue mayúsculas, de manera que no es lo mismo ingresar “p” a ingresar “P”, en el sistema planteado se trabaja solo con minúsculas. Cuando se oprime “p” el programa espera alguna de las otras instrucciones para hacerla efectiva, esto se hace con el objetivo de evitar envíos involuntarios por parte del usuario. Si se quiere encender D4, primero se debe ingresar “p” y luego “4”. Después de esto el usuario puede escoger dejar “p” encendido para ingresar otro comando o pulsar nuevamente “p” para indicar que no va a enviar más datos por el momento. Para que cualquiera de los comandos sea efectivo y cambie el estado de las variables, es necesario que “p” se encuentre activo.

Es de importancia aclarar que el código cambia dependiendo de las características del computador, ya que el programa lista los puertos seriales existentes (físicos y virtuales). Cuando un computador no tiene puerto serial incorporado, el puerto serial virtual es el primer puerto listado. En computadores que tienen incorporado un puerto serial físico, el puerto virtual es el segundo en la lista.

En el ANEXO B se encuentra el código usado para programar la interfaz gráfica en un computador que no cuenta con un puerto serial físico incorporado y dentro del mismo, se especifica la línea de código que hay que adaptar para usarlo en un computador que tenga puerto serial físico incorporado.

El diagrama de flujo correspondiente a la programación realizada se encuentra en la Figura 22.

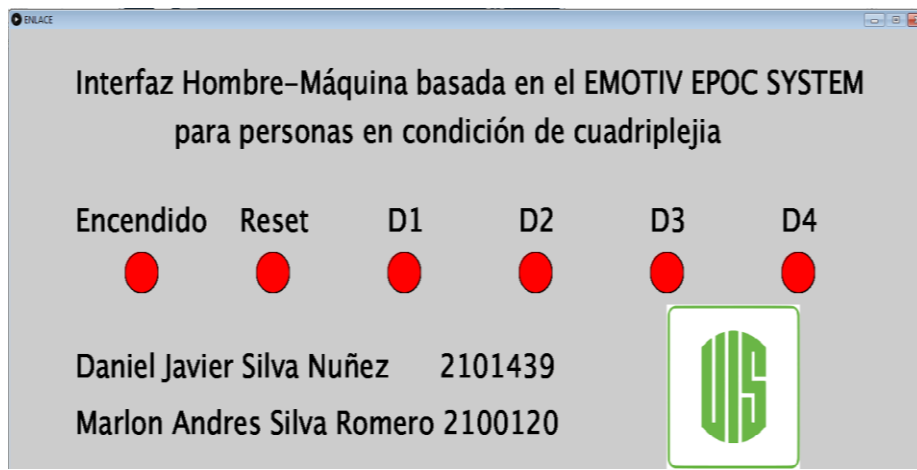
Figura 22. Diagrama de flujo del código usado en la interfaz gráfica “Processing”



Fuente: Autores

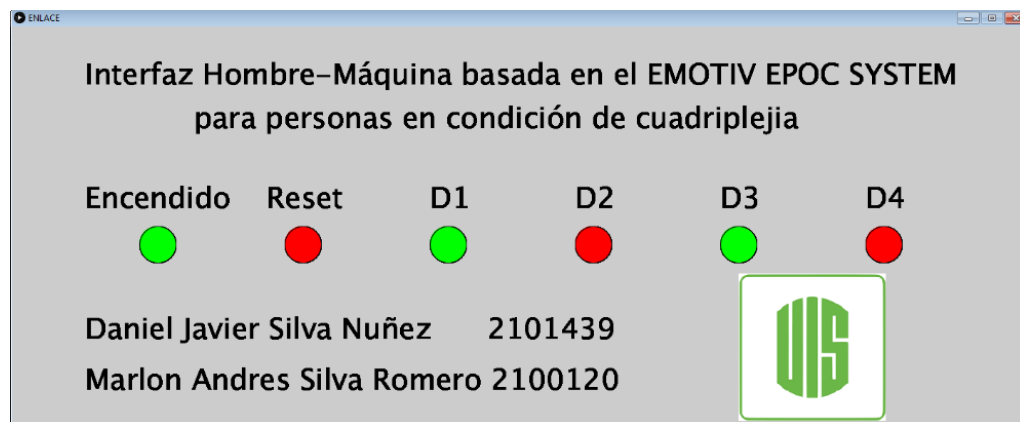
El resultado de la interfaz se puede observar en la Figura 23 y en la Figura 24 se observa el estado de la interfaz luego de ingresar la secuencia de comandos “p”, “1” y “3” en ese orden.

Figura 23. Interfaz gráfica programada en Processing



Fuente: Autores

Figura 24. Interfaz gráfica programada en Processing luego de la secuencia “p”
“1” y “3”.



Fuente: Autores

También se requiere un convertidor USB A Serial, que obtenga la información suministrada por el computador desde el puerto USB y la envíe al microcontrolador de manera serial/TTL; para ello se usa el módulo convertidor PL2303 (Figura 25) que contiene el circuito integrado PL2303HX.

El módulo permite la conversión de USB a serial entregando 5 pines: dos de datos y tres para alimentación. Los pines seriales de Tx y Rx trabajan con niveles de tensión TTL (0-5 V). Una ventaja de este conversor es que entrega 2 niveles de tensión DC: 3.3 y 5 V ya que el microcontrolador trabaja a 3.3V y se puede usar el pin de 5V para alimentar el módulo emisor de RF y ampliar su rango de alcance.

El módulo PL2303 es compatible con sistemas operativos Windows y Linux, además de un Led indicador de transmisión de datos (Prolific Technology Inc, 2013).

Figura 25. Conversor USB a serial / TTL



Fuente: (Kalyan & Shankar, 2017)

Luego de definir la manera como se va a enviar la información desde el computador hasta el microcontrolador, éste se debe programar para ser usado en el sistema general.

Para la programación del microcontrolador se utilizó el launchpad MSP430G2 (Figura 26), El cual es la herramienta generada por el fabricante para programar este tipo de chip; Se eligió que el chip fuera de inserción para su fácil traslado entre el launchpad y la placa ubicada en el módulo emisor. Hay 2 programas con los cuales se puede programar el MSP430G2553: *Code Composer* y *ENERGIA*.

Figura 26. MSP430 Launchpad



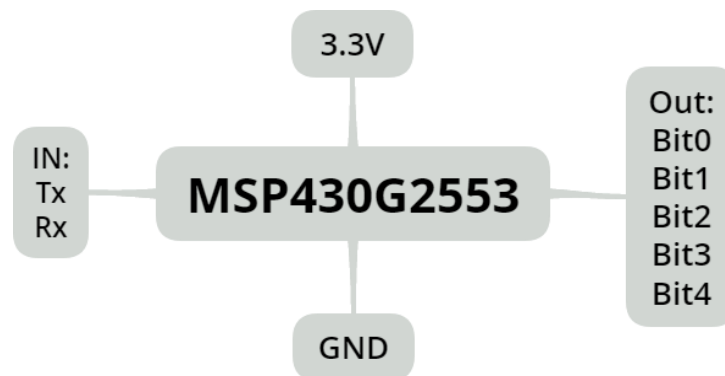
Fuente: (Gunaseelan & R, 2014)

Para la programación se decidió trabajar en ENERGIA debido a su facilidad y versatilidad. Se utiliza un lenguaje de programación basado en C++ similar al que

usa la consola de Arduino para la programación de sus circuitos integrados. Esta plataforma de desarrollo es gratuita y es open-source por lo que es posible encontrar tutoriales en línea³.

Es necesario definir las entradas y salidas que se van a utilizar, para de esta manera programar el microcontrolador. La entrada es serial y se usan seis salidas de control (las mencionadas en la programación de la interfaz gráfica en processing). Las entradas y salidas a usar se observan en la Figura 27.

Figura 27. Entradas y salidas usadas en el MSP430G2553



Fuente: Autores

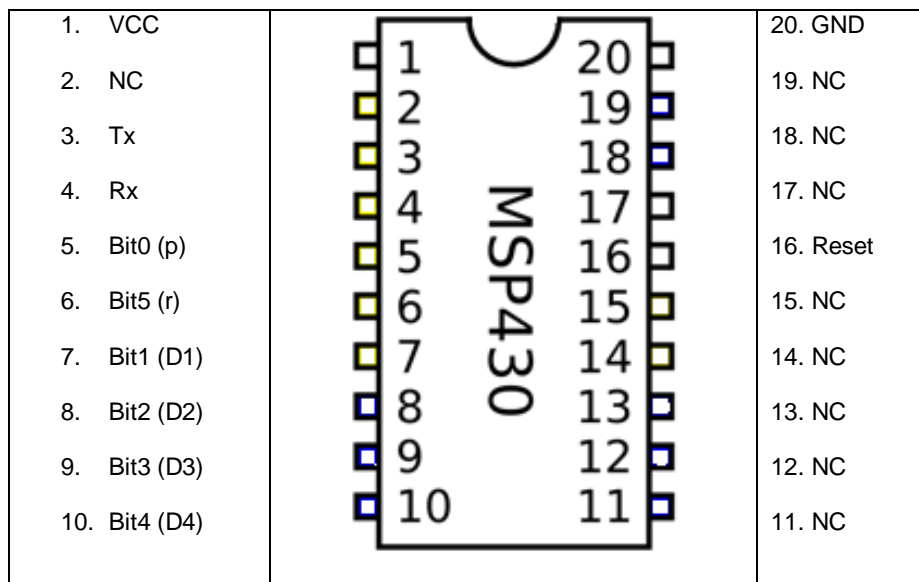
Los pines que van a 3.3V y GND son entradas de alimentación. Las entradas de datos son Tx y Rx para la comunicación serial del microcontrolador y se cuenta con seis salidas. El bit0 cumple la función de habilitar el circuito integrado codificador y

³ Para más información del software Energia y sus respectivos tutoriales se puede consultar la página oficial http://energia.nu/Tutorial_Blink.html

dependiendo de su estado permite o no el envío de datos. El siguiente bit es el indicador de reinicio y los otros bits son bit de datos que controlan el encendido o apagado de los receptores.

El código usado es correspondiente con el código planteado en la interfaz gráfica de processing dado que usa las mismas variables de entrada y de control. En la Figura 28, se observa el esquema de pines del microcontrolador a usar.

Figura 28. Diagrama de pines usados en el MSP430G2553



Fuente: autores

El código implementado hará que el microcontrolador realice acciones determinadas dependiendo de los comandos alfanuméricos que reciba. Las funciones de cada elemento se describen en la Tabla 2. El código completo puede encontrarse en el ANEXO C.

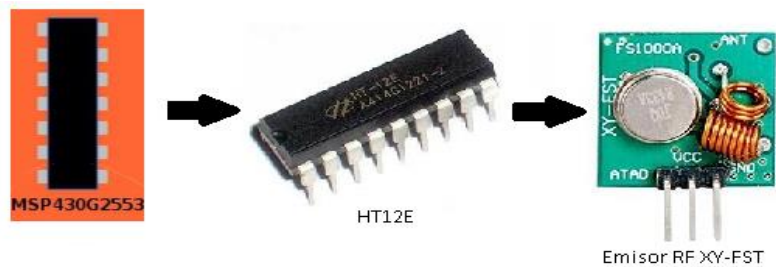
Tabla 2. Esquema de funciones del microcontrolador

| Comando Serial a la entrada | Acción | Condicionante | Función |
|--------------------------------------|---|------------------------------|---------------------------|
| Z | Sincroniza el microcontrolador con la interfaz Reinicia el microcontrolador y todos los bits de salida son iguales a 0 | No tiene | Función de sincronización |
| P | Cambia de estado Bit0 | No tiene | Salida |
| R | Bit1, Bit2, Bit3 y Bit4=0 Cambia de estado Bit5 | Bit0=1 Bit auxiliar=0 | Salida |
| 1 | Cambia de estado Bit1 | Bit0=1 Bit auxiliar=0 | Salida |
| 2 | Cambia de estado Bit2 | Bit0=1 Bit auxiliar=0 | Salida |
| 3 | Cambia de estado Bit3 | Bit0=1 Bit auxiliar=0 | Salida |
| 4 | Cambia de estado Bit4 | Bit0=1 Bit auxiliar=0 | Salida |

Como se mencionó anteriormente, el código usado en el microcontrolador corresponde con el usado en la interfaz gráfica. Debido a eso, el diagrama de flujo tiene la misma estructura que el observado en la Figura 22.

2.3.2 Comunicación Microcontrolador-Transmisor RF. Al momento de codificar la señal que va a ser enviada se reduce el efecto de posibles interferencias. Se tienen 4 señales diferentes de control suministradas por el microcontrolador que deben codificarse de manera serial para ser enviadas vía RF. En esta sección actúan: el microcontrolador, el codificador y el transmisor RF. La manera cómo interactúan estos elementos se observan en la Figura 29.

Figura 29. Elementos que intervienen en la fase de comunicación entre el microcontrolador y el transmisor RF

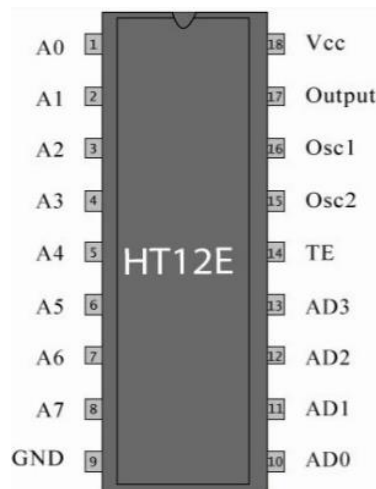


Fuente: Autores

El HT12E es un circuito integrado de 18 pines como el que se aprecia en la Figura 30. Cuenta con 8 pines de dirección que se usan para enlazar el codificador con el decodificador correspondiente, si en ambos, la combinación de 8 bits es idéntica.

También cuenta con 4 pines de datos de salida. Esto es importante para la codificación (Holtek Semiconductor Inc., 2009).

Figura 30. Esquema de pines del circuito integrado HT12E



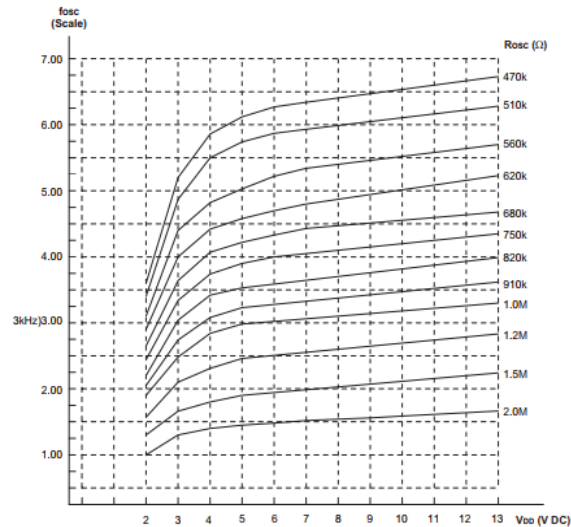
Fuente: (Kushagra, 2012)

En total se cuenta con 12 bits de codificación: ocho de dirección y cuatro de datos. Esto representa una ventaja para el sistema ya que los ocho bits de dirección permiten hasta 256 canales de comunicación y los cuatro bits de datos permiten 16 diferentes combinaciones.

Para los bits de dirección se utiliza un DIP SWITCH de ocho switches como seleccionador manual de los ocho bits de dirección del codificador. Para el correcto funcionamiento de este circuito integrado es necesaria una resistencia de oscilación que se usa teniendo en cuenta las instrucciones dadas por el fabricante (Holtek Semiconductor Inc., 2009).

El diagrama de la Figura 31 muestra que los parámetros para escoger la resistencia de oscilación son la tensión de alimentación y la frecuencia que se quiere usar en la codificación. El circuito integrado se va a alimentar con 5V dado que es la tensión que entrega el PL2303. La frecuencia de oscilación recomendada por el fabricante es de 3kHz.

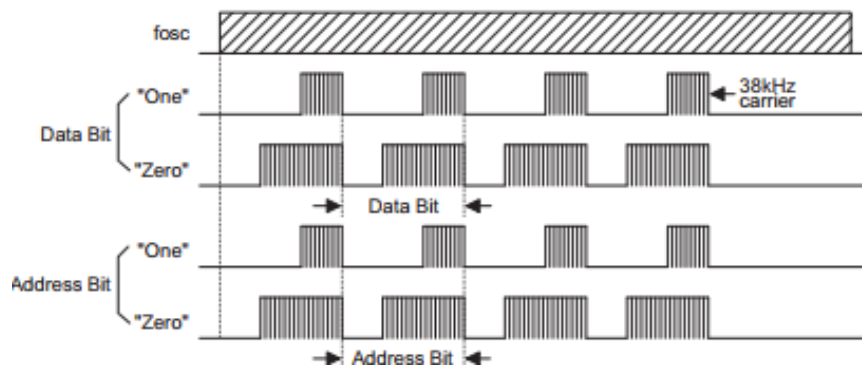
Figura 31. Diagrama para escoger la resistencia de oscilación en el circuito integrado HT12E



Fuente: (Holtek Semiconductor Inc., 2009)

La manera como el HT12E realiza la codificación se encuentra en la hoja de datos. Consiste en tomar los 8 bit de dirección y los 4 bit de datos que están en paralelo y convertirlos a serial. La manera como se realiza la codificación se observa en la Figura 32.

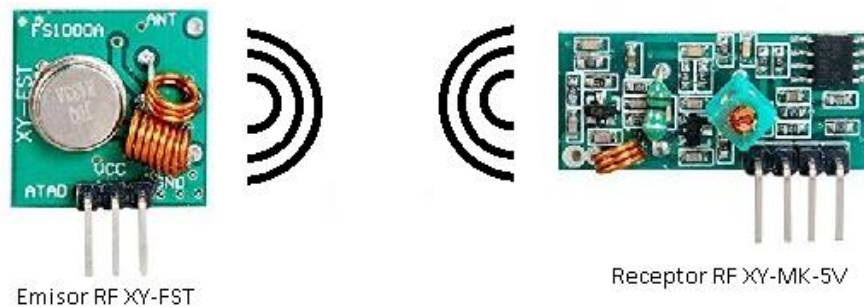
Figura 32. Codificación de bits en el circuito integrado HT12E



Fuente: (Holtek Semiconductor Inc., 2009)

2.3.3 Comunicación Transmisor RF-Receptor RF. En esta sección se describe la comunicación entre los módulos transmisor y receptor de RF. Estos son los únicos elementos que intervienen en esta fase (Figura 33).

Figura 33. Sistema de comunicación inalámbrico



Fuente: Autores

El codificador entrega una trama serial bits que deben ser enviados mediante un sistema inalámbrico de RF. Para la comunicación RF se usó el módulo comercial

RF de 433 MHz XY-FST como emisor. Es un módulo de 3 pines: ATAD, VCC y GND. Las características más importantes de este dispositivo (Rawashdeh, 2013) son:

- Distancia de transmisión: 20-200 metros (A mayor tensión, mayor alcance)
- Corriente de trabajo: 20-28 mA
- Tensión de trabajo: 3-12 V
- Tasa de transferencia: 0-10 Kbps
- Potencia de transmisión: 10-40 mW
- Frecuencia de transmisión: 315, 330, 433.92 MHz
- Modulación: OOK (ASK)
- Temperatura de trabajo: -10°C a +70°C
- Requiere antena externa.

Sin embargo, al usar estos módulos, solo puede transmitir un emisor a la vez. De lo contrario, la comunicación no sería efectiva. Esto podría mejorarse cambiando la comunicación utilizada.

El módulo emisor envía datos siempre y cuando el HT12E esté habilitado. Simultáneamente hay 4 receptores esperando instrucciones para modificar el estado del respectivo electrodoméstico conectado. El módulo receptor de radiofrecuencia usado es el XY-MK-5V, el cual está enlazado con el módulo emisor

XY-FST. Ambos módulos trabajan a una frecuencia de 433 MHz, es decir, que un emisor puede establecer comunicación con más de módulo receptor a la vez. Estos módulos se observan en la Figura 34. El módulo receptor tiene las mismas condiciones de funcionamiento del emisor y cuenta con una sensibilidad +105DB (Rawashdeh, 2013). Como se dijo anteriormente, no puede haber más de un módulo XY-FST transmitiendo, ya que todos trabajan en la frecuencia de 433MHz y esta situación generaría interferencia en la comunicación. Pero sí puede existir más de un módulo receptor funcionando a la par, por ello en el presente proyecto se usan un módulo transmisor y cuatro módulos receptores.

Figura 34. Módulos emisor XY-FST y receptor XY-MK-5V de radiofrecuencia

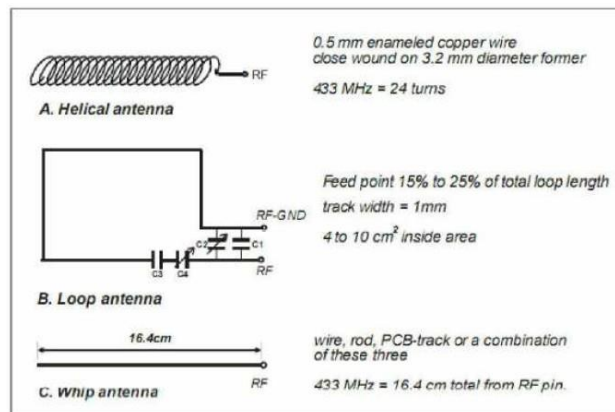


Fuente: (Vahora, Patel, Goradiya, & Desai, 2014)

Los módulos de RF requieren una antena para cubrir una distancia mayor. Es posible usar 3 tipos de antenas: helicoidal, de lazo y de $\frac{1}{4}$ de onda. Para los receptores se usa antenas helicoidales y para el emisor se usa una antena de $\frac{1}{4}$ de onda, de las que son utilizadas para radio (Rawashdeh, 2013). En la Figura 35, se

observan algunas recomendaciones de tipos de antena con sus respectivas medidas.

Figura 35. Medidas recomendadas para diferentes tipos de antena

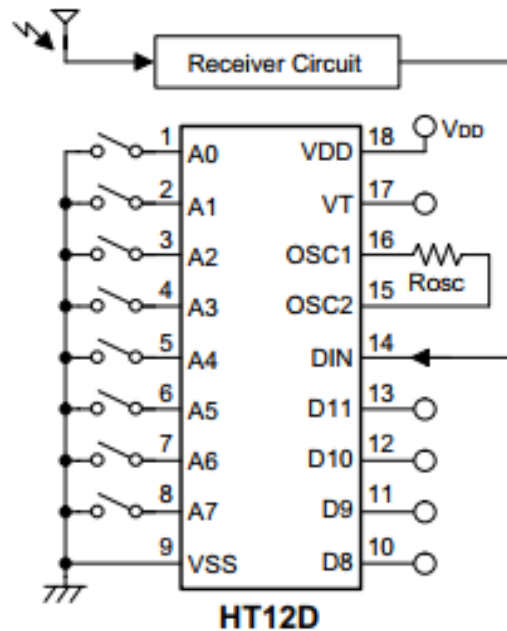


Fuente: (Tecnimikro, s.f.)

2.3.4 Comunicación Receptor RF- decodificador. Para la última fase de la etapa de comunicación se requiere un decodificador que tome la señal entregada por el receptor de RF y la entregue a la etapa de actuación. Para esta función se debe usar el circuito integrado compatible con el usado en la codificación, por ello se usa el HT12D. El HT12D al igual que el HT12E tiene 8 bits de dirección cuyos estados son seleccionados con un DIP SWITCH (pines 1 al 8). La alimentación positiva y negativa están respectivamente en los pines 18 y 9; La entrada de datos, corresponde al pin 14; los pines de datos se encuentran entre el pin 10 y el pin13; El pin 17, es la confirmación de enlace con receptor y los pines 15 y 16 están

dispuestos para la resistencia de oscilación. El esquema se puede observar en la Figura 36 (Holtek Semiconductors Inc., 2002).

Figura 36. Diagrama de pines del circuito integrado HT12D



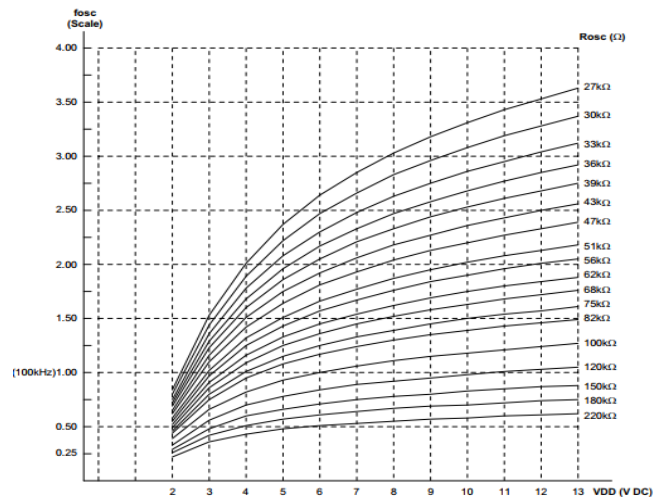
Fuente: (Holtek Semiconductors Inc., 2002)

Este dispositivo también requiere una resistencia de oscilación. Para definir qué valor se debe usar, se utiliza el diagrama que se encuentra en la hoja de datos de Holtek encontrado en la Figura 37 (Holtek Semiconductors Inc., 2002). Para determinar la resistencia de oscilación se debe determinar primero la frecuencia de oscilación. El fabricante sugiere la siguiente relación entre la frecuencia del codificador y la del decodificador:

$$f_{osc-dec} \geq 50 * f_{osc-enc}$$

Teniendo en cuenta que la frecuencia del oscilador del codificador usada es de 3 kHz, la frecuencia del oscilador del decodificador debe ser de 150 kHz.

Figura 37. Grafica para Resistencia de oscilación en el circuito integrado HT12D



Fuente: (Holtek Semiconductors Inc., 2002)

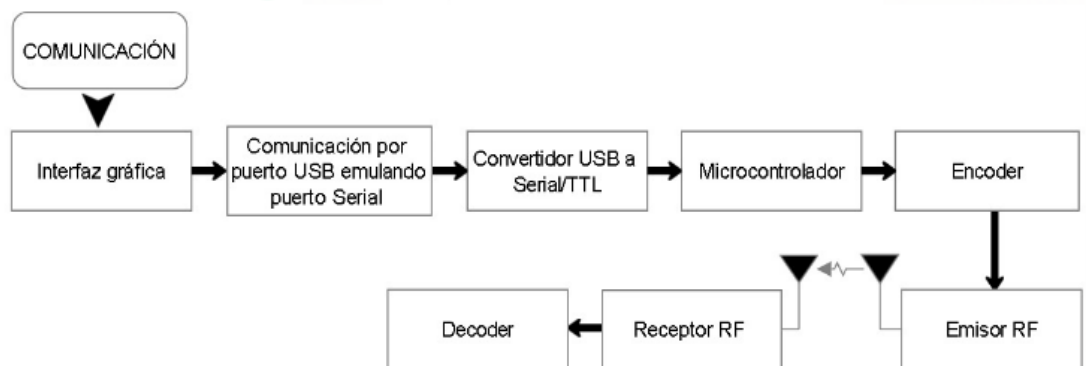
Del diagrama se obtiene que una resistencia de 51K satisface las condiciones, así que se utiliza la resistencia comercial más cercana, la de 46K. Hay en total 4 receptores, también hay 4 señales de control.

Cada receptor está relacionado a una señal de control, lo que significa que el estado de cada una de esas señales, controla el estado de uno de los receptores. De esta manera se tienen 8 bits de dirección y 4 bit de datos que controlan a los receptores. el bit 1 controla el receptor 1 y así sucesivamente.

La condición para realizar la decodificación es que la configuración de bits de dirección del decodificador sea la misma que el codificador; de no cumplirse la condición no habrá cambios en los bits de datos.

Un resumen de los elementos que intervienen en la etapa de comunicación se observa en el diagrama de bloques de la Figura 38.

Figura 38. Diagrama de bloques de la etapa de comunicación



Fuente: Autores

2.4 ETAPA DE ACTUACIÓN

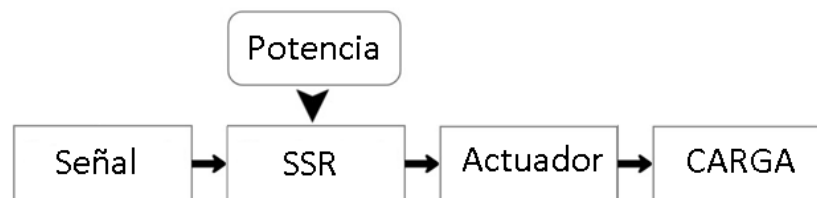
La etapa anterior entrega un bit de datos encargado de controlar el encendido o apagado de los electrodomésticos. Por lo cual, es necesario implementar una etapa de actuación que permita realizar esta función.

El acoplamiento entre el sistema de baja potencia del bit de entrada y el de alta potencia de la actuación de los dispositivos electrónicos se realiza por medio de un

relevador. Hay dos tipos de relevadores que se pueden utilizar: los electromecánicos y los *Solid State Relay* (SSR). Se escoge trabajar con relevadores de estado sólido debido a sus ventajas sobre relevadores electromecánicos. El diagrama de bloques correspondiente a esta etapa se observa en la Figura 39. Algunas ventajas de los SSR son (IXYS Integrated Circuits Division, 2014):

- No tienen interacción magnética
- Son de menor tamaño
- No generan y no son sensibles a interferencias electromagnéticas
- No generan ruido eléctrico

Figura 39. Diagrama de bloques de la etapa de actuación

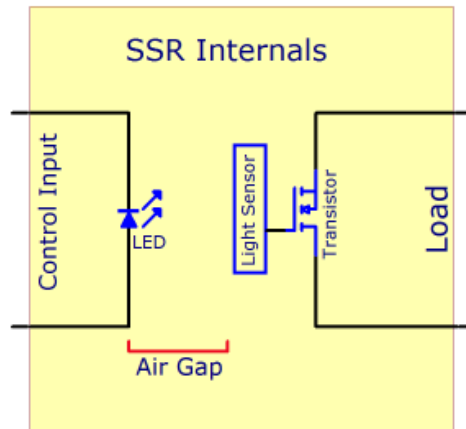


Fuente: Autores

El SSR tiene un acoplamiento óptico mediante un LED y un sensor de luminosidad. La conmutación a encendido se activa si la señal de DC de entrada hace que el LED se encienda; y si se apaga hace la acción contraria.

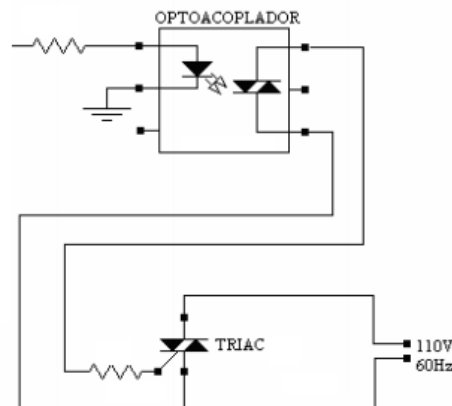
La manera en que funciona el SSR se observa en la Figura 40. Para implementar un sistema de potencia basado en SSR se debe usar un optoacoplador y un triac como se observa en el esquemático de la Figura 41.

Figura 40. Funcionamiento del SSR



Fuente: (Phidgets, 2017)

Figura 41. Esquemático para implementar un SSR



Fuente: (Casa & Regalado, 2007)

El Código Eléctrico Colombiano (CEC) contemplado en la Norma Técnica Colombiana (NTC) 2050, expone que la carga de pequeños electrodomésticos se calcula a 1.5 KVA, en esta clasificación entran dispositivos como computadores, televisores, ventiladores y se excluyen dispositivos de cargas más elevadas como lo son las secadoras y estufas eléctricas (ICONTEC, 2002). En Colombia la red eléctrica opera a 110V 60Hz, por lo cual, el sistema debe soportar tensiones de 110V y niveles de corriente cercanos a los 13.6A.

Teniendo en cuenta lo anterior se escoge la referencia del optoacoplador y el triac que se van a utilizar. Inicialmente se busca un optoacoplador que cumpla la función de aislar eléctricamente el circuito de control con el de potencia. El MOC3021 es un circuito integrado de 6 pines cuyo circuito interno es un optoacoplador con características que satisfacen la necesidad (Fairchild, 2015) :

- Tensión pico de bloqueo: 400V. Esta característica asegura que no habrá conmutación siempre y cuando no se exceda ese nivel de tensión
- El diodo emisor tiene baja degradación
- Aprobación de seguridad UL1577. Certifica un aislamiento eléctrico seguro. Dentro de los datos se encuentra que la tensión de aislamiento V_{ISO} es de 4170 VAC_{RMS}

Luego de escoger el MOC3021 como el optoacoplador a usar, se procede a escoger el triac para la conmutación. Se debe escoger un triac de potencia debido a la

función que debe realizar este elemento, así que se escoge El BT-138 pues entre sus características se encuentra que soporta tensiones desde 600 a 800 V (V_{drm}) y corriente de 12 A (NXP Semiconductors, 2001). Con esto se puede controlar sin problemas cargas domesticas de 1.5 KW. En resumen, las características más importantes de este elemento son:

- VDRM: 600 a 800 V
- IT(RMS): 12 A
- ITSM: 95 A
- Cargas: 7,6 a 9,2 KW

En aplicaciones con cargas altamente inductivas como motores, es necesario usar una red Snubber para suprimir los picos de tensión y amortiguar la oscilación transitoria provocada por la inductancia, logrando así evitar daños en el sistema (Fairchild Semiconductor, 2014). Para los dispositivos electrónicos que se quieren controlar en esta aplicación no es necesaria dicha red.

2.5 FABRICACIÓN MÓDULOS DE EMISIÓN Y RECEPCIÓN

El proceso de fabricación de los módulos de emisión y recepción tiene como primer paso realizar la distribución de los elementos que estarán en cada módulo mediante un esquemático. Posterior a ello, se procede a desarrollar el circuito impreso de

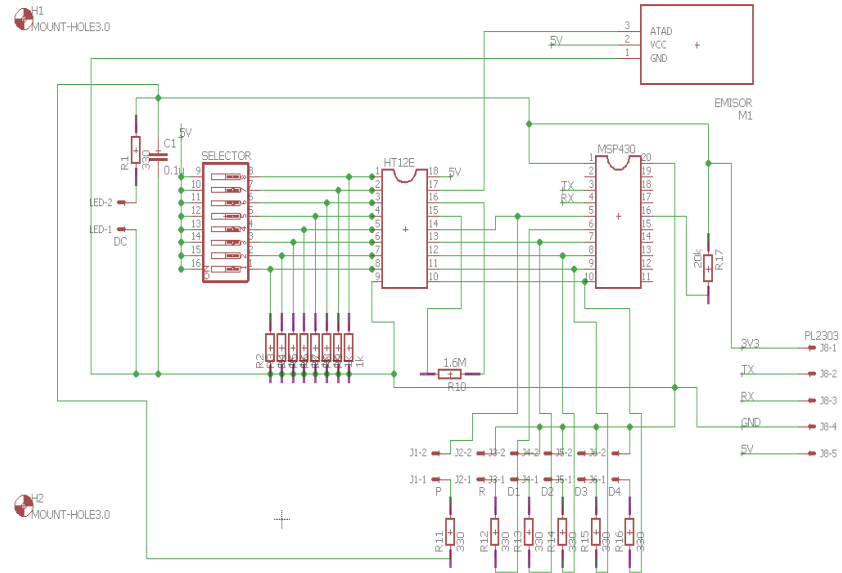
manera virtual para su fabricación. Y finalmente, se realiza un chasis que proporcione facilidad de uso por parte del usuario y proteja el módulo.

El desarrollo de las acciones mencionadas anteriormente se realizó mediante el uso de dos softwares, para el esquemático y el circuito impreso se utilizó la versión 7.6.0 de Eagle en su versión de prueba y para los chasis se usó Solidworks.

2.5.1 Módulo emisor. Contiene con los elementos que interactúan desde la conexión al computador hasta el emisor de radiofrecuencia. Este módulo contiene el microcontrolador, el circuito integrado codificador, selector de bits de dirección, el convertidor USB a serial, el emisor de RF y siete indicadores Led que permiten al usuario saber si el dispositivo está conectado al computador y el estado de cada una de las variables de la interfaz. El esquemático de la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** muestra los elementos que se usan en el dispositivo. La alimentación para este módulo es obtenida por el convertidor USB a serial que va conectado mediante una extensión USB al computador.

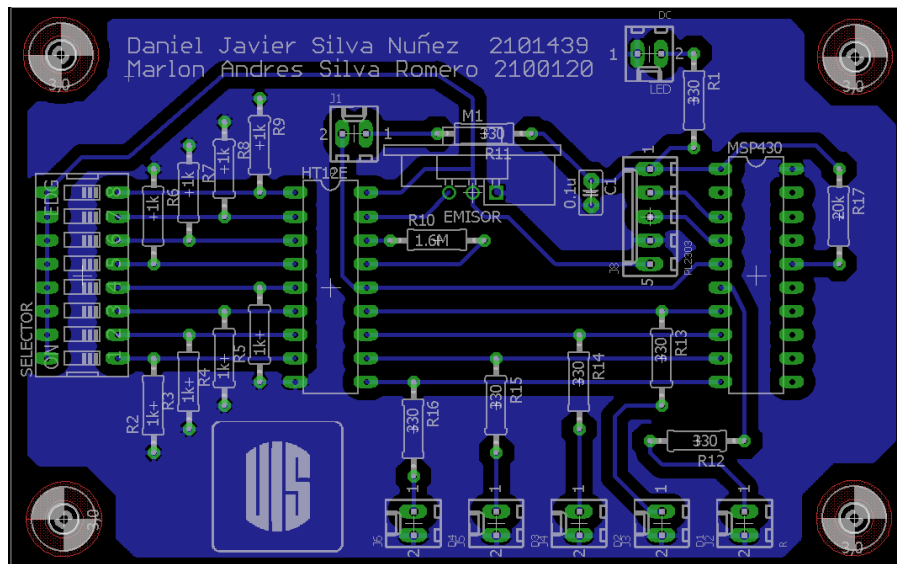
La tarjeta de circuito impreso se realizó de tal manera que se diferenciara cada una de las secciones que intervienen, a la vez que se minimizaba el área de uso; además se incluyeron cuatro orificios para que la tarjeta pueda ser asegurada al chasis y permanezca fija como se observa en la Figura 43.

Figura 42. Esquemático usado para la tarjeta de circuito impreso del módulo emisor



Fuente: Autores

Figura 43. Tarjeta de circuito impreso para el módulo emisor



Fuente: Autores

Las medidas obtenidas en la placa son de 6.2 x 15.8 [cm] y son utilizadas para realizar el chasis del módulo emisor. Se busca que ocupe el menor espacio posible y pueda ser ubicado en un lugar cómodo para el usuario.

Para aprovechar las medidas de la tarjeta, se optó por una compleción delgada y alargada. Adicionalmente, en la parte superior hay un orificio donde se ubica la antena de $\frac{1}{4}$ de onda que permite ampliar el alcance; también se incluyen los orificios para los Led de indicación visual que representan los estados del sistema. Esto se observa en la Figura 44.

Figura 44. Chasis de la tarjeta emisora con sus respectivas medidas



Fuente: Autores

El material usado para la fabricación de los módulos es acrílico de 5 [mm] de espesor. Las medidas finales del chasis son 7. 2 x 5 x 16.808 [cm]. En la Figura 45 se observa el resultado final de este módulo.

Figura 45. Resultado final del Chasis de la tarjeta transmisora

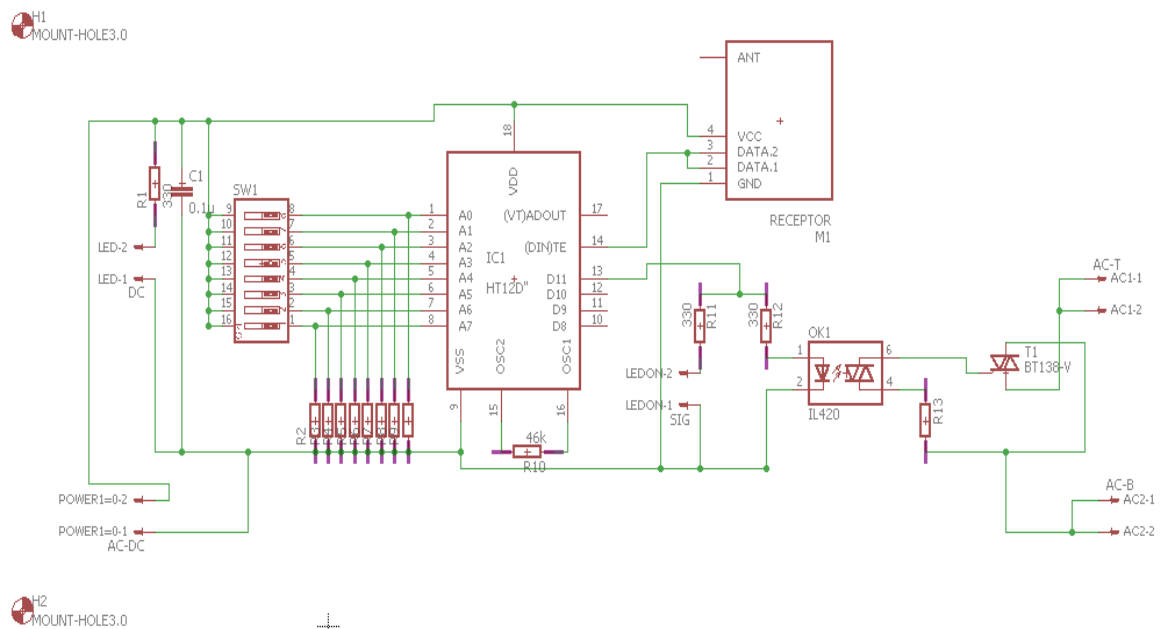


Fuente: Autores

2.5.2 Módulos receptores. Los elementos que se ubican en este módulo son el receptor RF, el decodificador con su respectivo selector de dirección, el optoacoplador y el triac. El esquemático correspondiente se observa en la Figura 46. Es de aclarar que hay 4 esquemáticos distintos, uno por cada receptor, ya que cada receptor está asociado a uno de los pines de salida de datos del HT12D que comunica con la etapa de actuación. En el ANEXO D se encuentran los 5 esquemáticos resultantes del proyecto: el del emisor y los 4 receptores. Para alimentar el módulo, éste se conecta mediante un enchufe a la red eléctrica. De allí

se toma la energía que necesita el electrodoméstico, para funcionar cuando se realice la conmutación y también se energiza la tarjeta mediante un convertidor AC-DC de 9V.

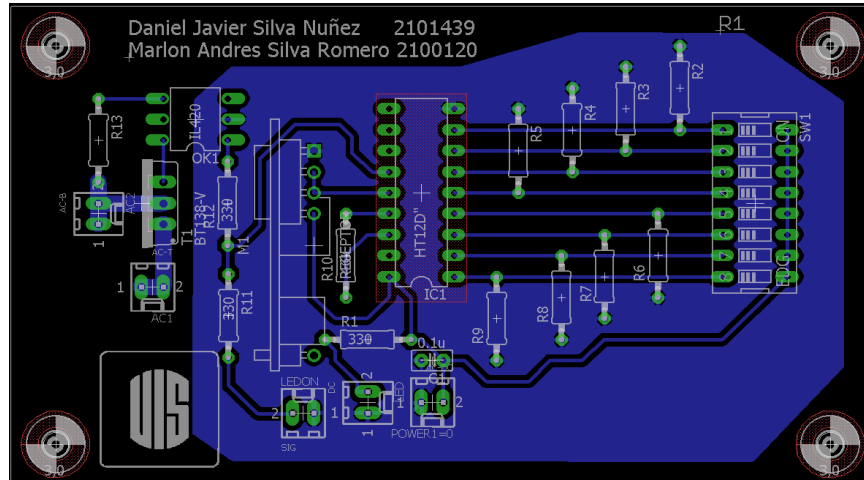
Figura 46. Esquemático usado en la tarjeta de circuito impreso del módulo receptor 1



Fuentes: Autores

Como se mencionó anteriormente, hay cuatro receptores y cada uno tiene un esquemático diferente. Esta situación se repite con las tarjetas de circuito impreso. En la Figura 47 se muestra el circuito impreso del receptor 1 y en el ANEXO E se encuentran las tarjetas correspondientes a los 4 módulos receptores de la interfaz junto con la tarjeta del módulo transmisor. Esta tarjeta también cuenta con orificios para asegurar la placa a un chasis.

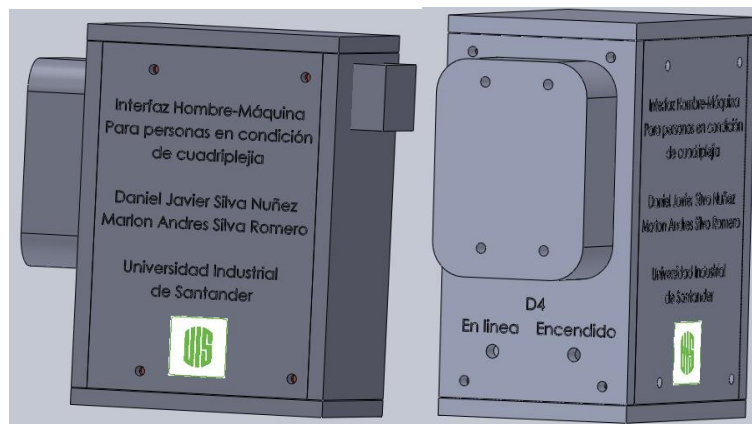
Figura 47. Tarjeta de circuito impreso del módulo receptor 1



Fuente: Autores

Para que el dispositivo receptor sea de fácil ubicación, se busca que pueda conectarse directamente a la red eléctrica, por lo cual, el sistema cuenta con un enchufe y un tomacorriente. Con las medidas de la tarjeta 10 x 7 [cm] se busca que el módulo sea lo más compacto posible. El resultado se observa en la Figura 48.

Figura 48. Chasis de la tarjeta receptora



Fuente: Autores

En la parte frontal de este chasis se ubica el enchufe y en la parte posterior, el tomacorriente donde irá conectado el dispositivo electrónico. Las medidas de este chasis son 6 x 8 x 11.5 [cm]. El resultado final de este módulo se muestra en la Figura 49.

Figura 49. Resultado final del chasis usado para los módulos receptores

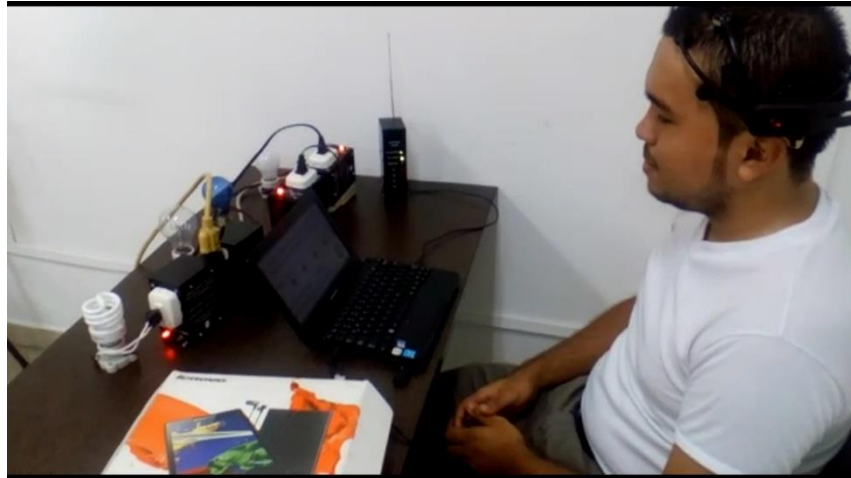


Fuente: Autores

2.6 SISTEMA FINAL

El sistema completo consta de: la diadema Emotiv Epoc, un computador que tenga instalada la interfaz de Emotiv y la interfaz realizada en Processing, Un módulo emisor conectado vía USB al computador y cuatro módulos receptores que deben ser conectados a la red eléctrica. Puede observarse en la Figura 50.

Figura 50. Sistema completo



Fuente: Autores

Adicionalmente se presenta un manual técnico y un manual de usuario con las instrucciones para el uso del sistema. El manual técnico se encuentra en el ANEXO H y el manual de usuario en el ANEXO I.

3 PRUEBAS Y VALIDACIÓN

Como parte final del proyecto es necesario realizar un proceso de validación, el cual permita determinar si el sistema funciona con los electrodomésticos planteados, si cumple los requerimientos de área de cobertura y adicionalmente, establecerá el porcentaje de acierto o fracaso logrando estimar que tan confiable es su funcionamiento. Primero se presentan las pruebas de funcionamiento, conmutación y alcance realizadas en el sistema para luego, realizar un proceso de verificación de fiabilidad del sistema.

El proceso de validación realizará un ensamble total de las etapas del proyecto, es decir, se unirán todos los dispositivos mencionados en el capítulo 2 partiendo de la diadema "*EMOTIV EPOC SYSTEM*" hasta llegar a las tarjetas receptoras que funcionarán como actuadores dependiendo de las instrucciones previamente ejecutadas por la diadema.

3.1 PRUEBAS EN EL SISTEMA

Se debe comprobar que el sistema funcione correctamente al realizar los gestos faciales, que se realice el encendido y apagado de los electrodomésticos a controlar y que tenga un rango de alcance mayor a 10 metros.

3.1.1 Prueba de funcionamiento del sistema. Esta prueba consiste en comprobar que la interfaz gráfica recibe los datos del expressive suite y los envía por el puerto serial emulado hacia el microcontrolador para luego encender el envío de datos y posteriormente encender todos los dispositivos. En la Figura 51 se observa el sistema conectado correctamente.

Figura 51. Sistema conectado



Fuente: Autores

Luego se ingresa la siguiente secuencia de comandos: “p”, “1”, “2”, “3”, “4” y “p” nuevamente. Con las acciones descritas anteriormente el sistema debe encender todos los dispositivos conectados. El resultado se encuentra en la Figura 52. Con esto se muestra que la interfaz funciona correctamente al ingresar los comandos.

Figura 52. Sistema con todos los dispositivos encendidos



Fuente: Autores

3.1.2 Prueba de conmutación. En la prueba de conmutación se usan los módulos receptores para verificar que puedan realizar la conmutación de distintos dispositivos electrónicos, entre ellos: Un televisor, un minicomponente, un ventilador y un bombillo. La prueba consiste en conectar cada uno de los receptores inalámbricos y enviar desde el transmisor la acción que ordena al receptor realizar la conmutación; haciendo que el dispositivo se encienda. De la Figura 53 se infiere que la prueba fue satisfactoria, debido a que los dispositivos encendieron correctamente.

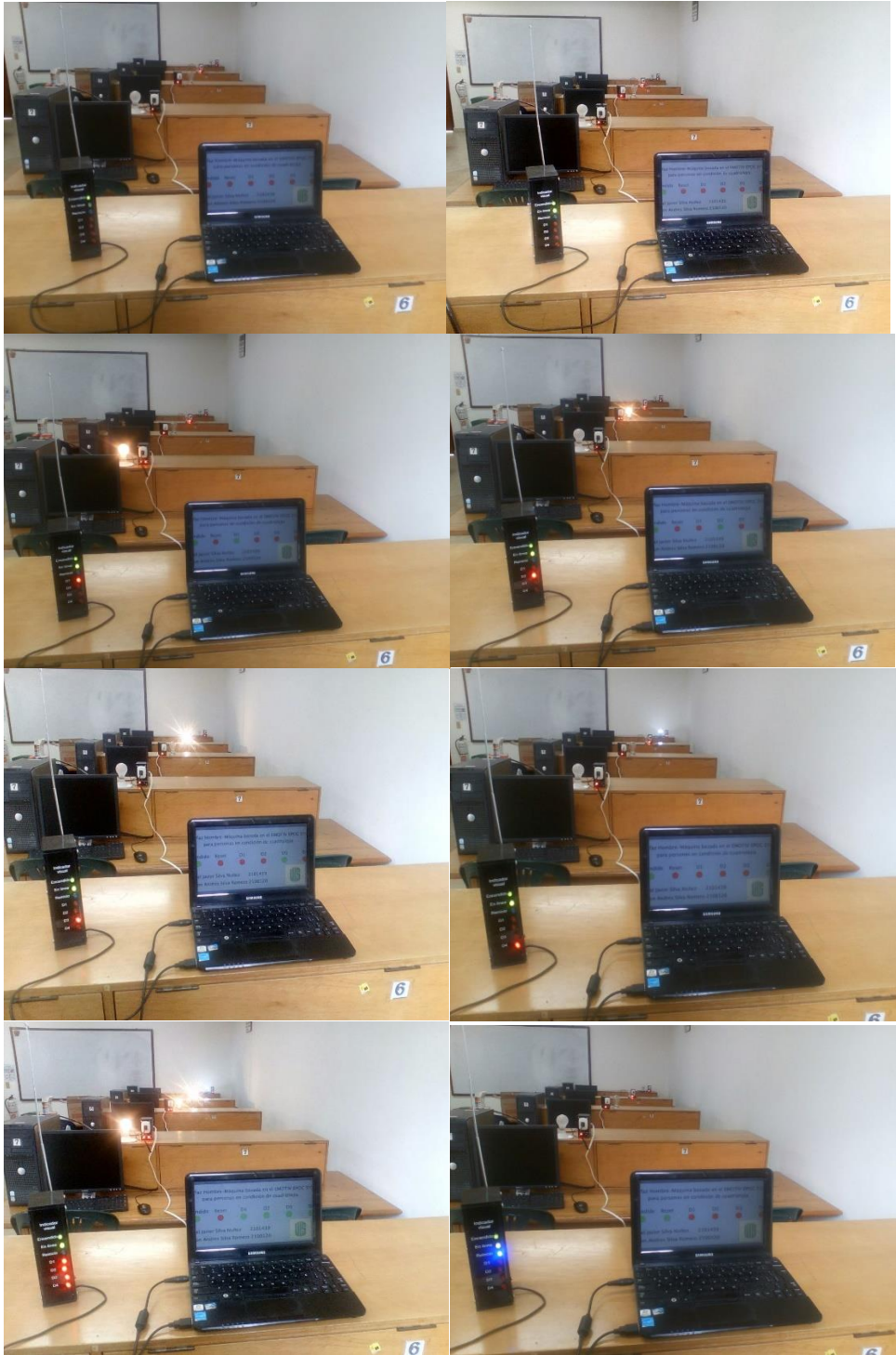
Figura 53. Prueba de conmutación



Fuente: Autores

3.1.3 Prueba de alcance. Para esta prueba se ubicó cada uno de los dispositivos dentro de un rango de 10 metros como se muestra en la Figura 54 y se ingresa la secuencia de comandos cuyo progreso se muestra de izquierda a derecha y de arriba abajo: Inicialmente el sistema está conectado; Se ingresa el comando “p”; Se ingresa el comando “1”; Se ingresa el comando “1” nuevamente y luego se ingresa el comando “2”; Se ingresa el comando “2” nuevamente y luego se ingresa el comando “3”; Se ingresa el comando “3” nuevamente y luego se ingresa el comando “4”; se ingresan los comandos “1”, “2” y “3” para que todos los dispositivos estén encendidos; finalmente se ingresa el comando “r” y con ello se apagan todos los dispositivos.

Figura 54. Prueba de alcance



Fuente: Autores

3.2 Protocolo para el proceso de validación

Para llevar a cabo el proceso de validación se debe informar a cada usuario de las actividades que se desarrollan en la prueba y como serán ejecutadas. Por ello, se implementó el siguiente protocolo:

- 1) Informar al paciente o el usuario las características generales del proyecto, es decir, una información resumida de los objetivos y el alcance del mismo.
- 2) Presentar el consentimiento informado al usuario.
- 3) Dar una breve iniciación sobre los esquemas y dispositivos que se van a implementar, entre los cuales se encuentra la Emotiv Epoc.
- 4) Realizar sesiones de entrenamiento para identificar las fortalezas y debilidades en los gestos faciales para determinar los comandos a usar.
- 5) Repetir los ejercicios de entrenamiento a lo sumo tres veces más, los cual le permitirá al usuario obtener una mayor efectividad en cuanto a la ejecución de las actividades presentadas en la interfaz.
- 6) Generar secuencias aleatorias para que el usuario las ejecute, midiendo el porcentaje de acierto y fracaso en cada una de las secuencias, realizar al

menos tres repeticiones en tiempo de espera diferentes para relacionar el tiempo y las repeticiones con la efectividad del usuario.

- 7) Procesamiento de los resultados y presentación de los mismos por medio de una tabla que presenta el porcentaje de acierto, determinando la eficiencia de la tecnología reflejada en la dificultad en el manejo de la interfaz para cada uno de los voluntarios. Como cada usuario presenta características diferentes se utilizan gestos que más se les faciliten, esto con el fin de mejorar la experiencia con la interfaz desarrollada.

3.3 Usuarios que intervinieron en el proceso de validación

Para el proceso de validación se contó con la colaboración de personas cuyas características difieren en cuanto sexo, edad, estilo de vida y condición física. Estas personas colaboraron voluntariamente a la validación del sistema y diligenciaron el consentimiento informado presentado en el ANEXO F. Las tablas Tabla 3 a Tabla 6 muestran características de los cuatro usuarios con quienes se validó el sistema.

Tabla 3. Información general usuario 1


| INFORMACIÓN DEL USUARIO | | |
|---|---|---------------|
|  | Usuario 1 | |
| | Sexo | Masculino |
| | Edad | 21 años |
| | Peso | 50 [Kg] |
| | Estatura | 1,68 [m] |
| | Estudio | Universitario |
| Patología. | Estilo de Vida | |
| <ul style="list-style-type: none"> - No presenta ningún tipo de alergia. - Primera vez que interactúa con el sistema. | <ul style="list-style-type: none"> - Estilo de vida sedentario, tendiendo a pasar el mayor tiempo del día sentado o acostado en la cama. | |

Tabla 4. Información general usuario 2


| INFORMACIÓN DEL USUARIO | | |
|---|--|-----------|
|  | Usuario 2 | |
| | Sexo | Femenino |
| | Edad | 25 años |
| | Peso | 43 [kg] |
| | Estatura | 1,50 |
| | Estudios | Tecnóloga |
| Patología. | Estilo de Vida | |
| <ul style="list-style-type: none"> - Saludable. - Ha interactuado en ocasiones anteriores con el sistema. | <ul style="list-style-type: none"> - Agitada con tendencia al estrés. | |

Tabla 5. Información general usuario 3

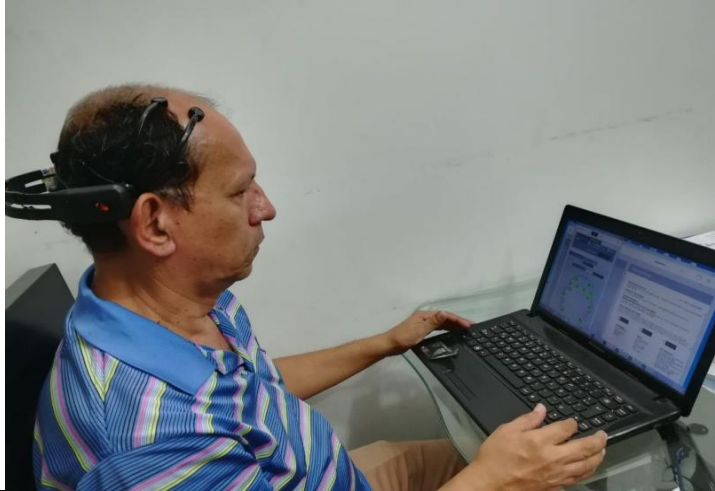

| INFORMACIÓN DEL USUARIO | | |
|--|--|------------|
|  | Usuario 3 | |
| | Sexo | Masculino |
| | Edad | 53 años |
| | Peso | 75 [Kg] |
| | Estatura | 1,70 [m] |
| | Estudios | Arquitecto |
| Patología. | Estilo de Vida | |
| <ul style="list-style-type: none"> - Lesiones en articulaciones debido al alto esfuerzo físico que maneja casi a diario. - No presenta ningún tipo de alergia. | <ul style="list-style-type: none"> - Maneja un estilo de vida saludable, realiza deporte competitivo como formativo varias veces a la semana. | |

Tabla 6. Información general usuario 4

| INFORMACIÓN DEL USUARIO | | |
|---|--|---------------|
|  | Usuario 4 | |
| | Sexo | Masculino |
| | Edad | 25 años |
| | Peso | 72 [Kg] |
| | Estatura | 1,69 [m] |
| | Estudios | Universitario |
| Patología. | Estilo de Vida | |
| <ul style="list-style-type: none"> - Saludable. - Ha interactuado con la interfaz desde hace más de 6 meses debido a que es uno de los autores. | <ul style="list-style-type: none"> - Estilo de vida saludable, realiza deporte durante la semana. | |

3.4 Pruebas realizadas

Previo desarrollo de las pruebas, se asignaron comandos alfanuméricos a cada una de las expresiones faciales del expressive suite; esto permite medir los resultados de cada intento en tiempo real y de una manera precisa.

Para el uso de la interfaz se ejecutó un entrenamiento previo donde se asignaron las variables de mejor desempeño en la práctica. En la Tabla 7 se muestran los gestos escogidos junto con su respectiva asignación alfanumérica.

Tabla 7. Asignación de teclas según el gesto seleccionado

| Ordenes | Comando asignado |
|-----------------------|------------------|
| Parpadear | 1 |
| Levantar las cejas | 2 |
| Fruncir el Ceño | 3 |
| Sonreír | 4 |
| Apretar la mandíbula. | P |

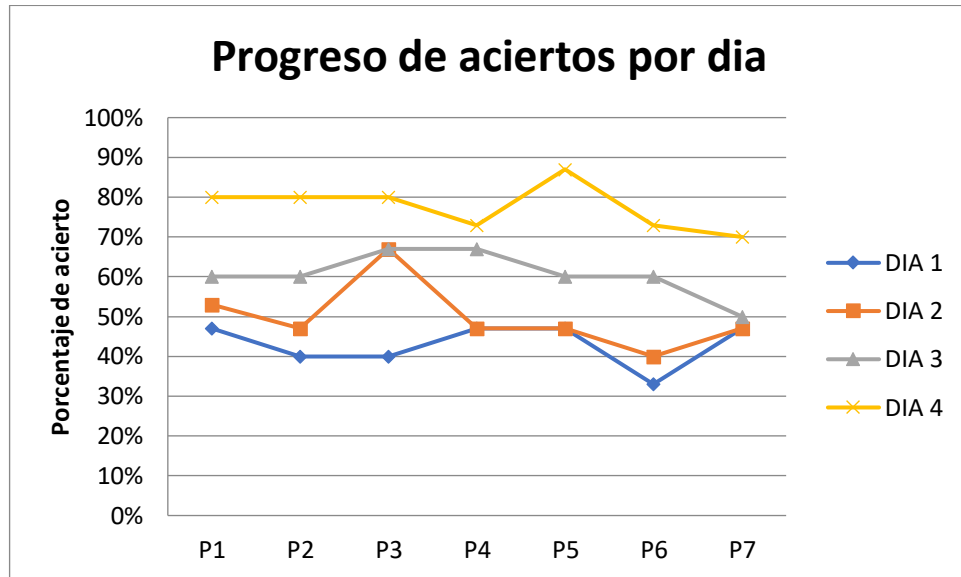
Las pruebas usadas en el proceso de validación se dividen en siete pruebas distribuidas en tres secciones que permiten visualizar la evolución de la eficacia en los resultados al usar desde uno hasta cuatro de los dispositivos. Las pruebas se clasifican de la siguiente manera:

- En las pruebas uno a cuatro solo se ejecutan acciones de control en un solo dispositivo según la asignación establecida. Se proporcionó una secuencia por cada número alternándola con el comando “p”.
- En las pruebas cinco y seis se combinan acciones de control con dos y tres dispositivos combinando secuencias de encendido y apagado.
- La prueba número siete simula acciones de control real donde se usan todos los dispositivos. Esto se hace por medio de una secuencia de treinta caracteres aleatorios donde, las asignaciones numéricas establecen el control de la estación, mientras que la asignación alfabética inhabilita o habilita el envío de señales hacia los receptores.

3.5 Resultados obtenidos

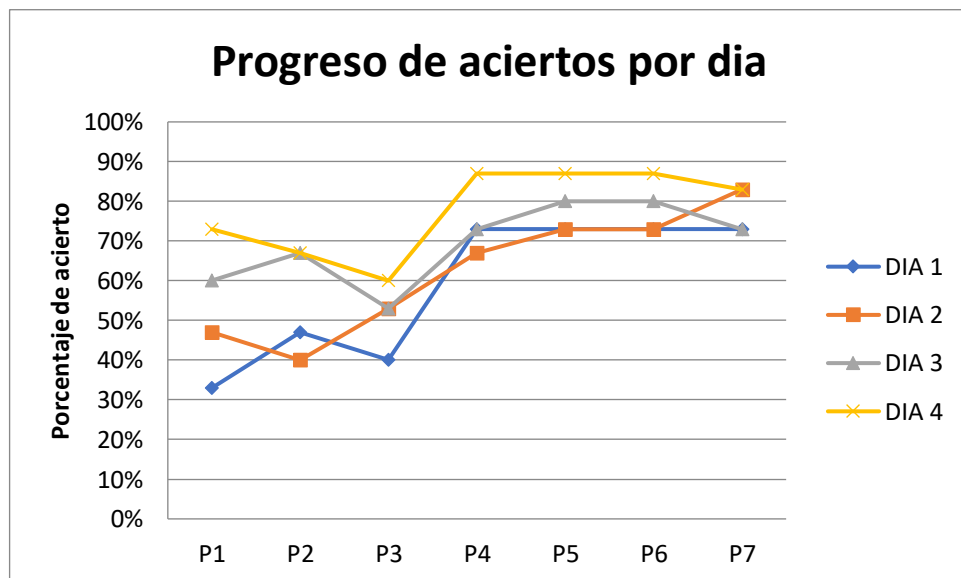
Para la validación de los resultados se trabajó en un lapso de 4 días. Cada día se realizaban las siete pruebas en cada uno de los usuarios (P1 a P7), midiendo el porcentaje de acierto de acuerdo con el número de veces que interactuaba con el sistema. Las Figura 55 a Figura 58 muestran los resultados obtenidos por cada usuario. La tabulación de los datos respectivos se encuentra en el ANEXO G.

Figura 55. Resultados de las pruebas realizadas por el usuario 1



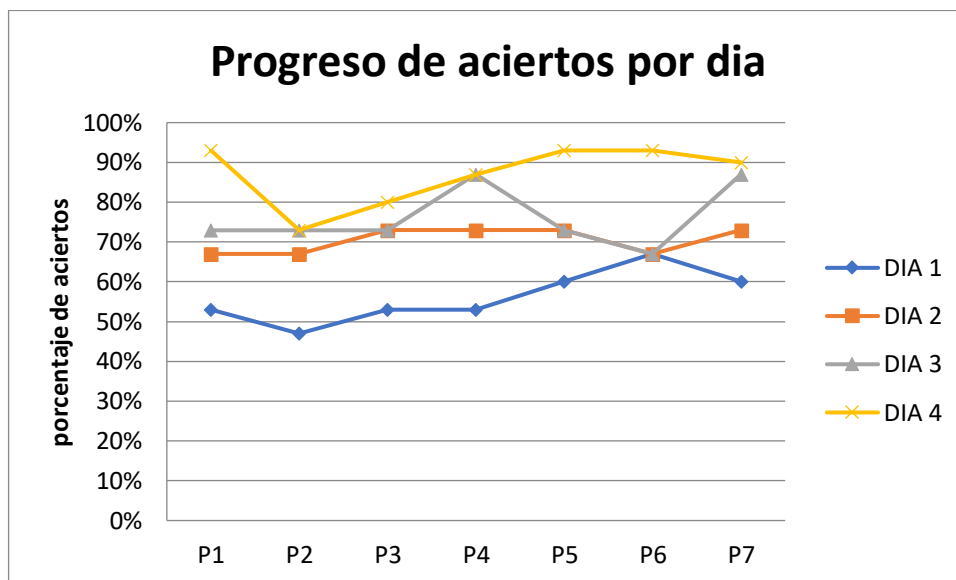
Fuente: Autores

Figura 56. Resultados de las pruebas realizadas por el usuario 2



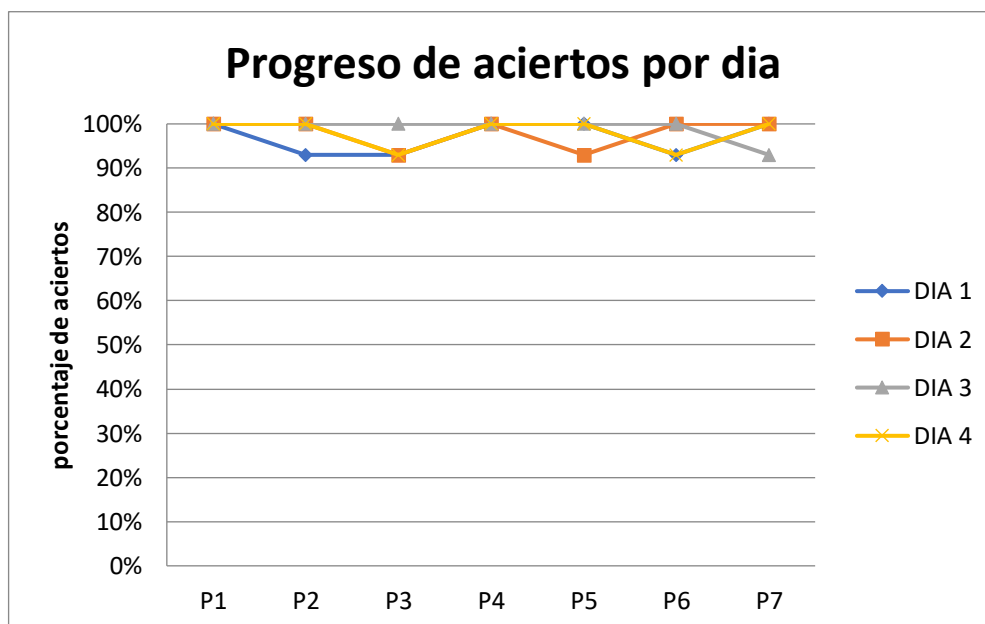
Fuente: Autores

Figura 57. Resultados de las pruebas realizadas por el usuario 3



Fuente: Autores

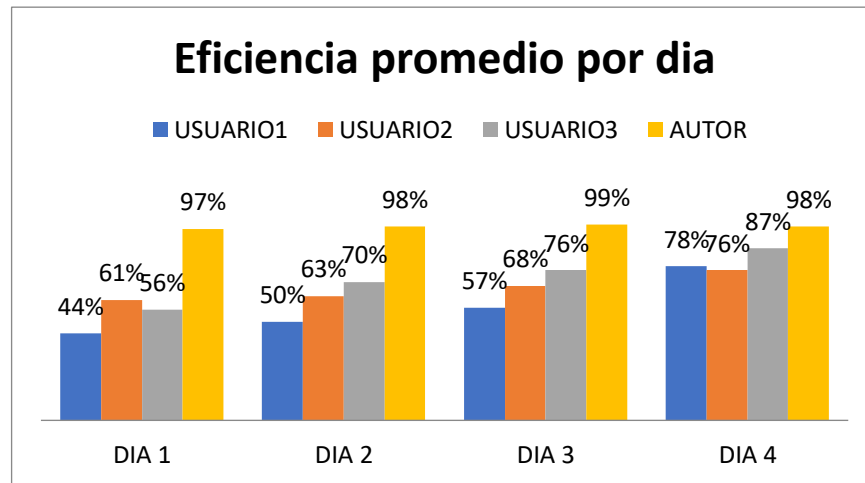
Figura 58. Resultados de las pruebas realizadas por el usuario 4



Fuente: Autores

Finalmente se realiza una comparación del progreso diario de cada uno de los usuarios en la Figura 59.

Figura 59. Eficacia promedio por día



Fuente: Autores

3.6 Análisis de resultados

Las gráficas denotan una tendencia de aumento progresivo. Se observa como aumenta el porcentaje de acierto a medida que los usuarios adquieren experiencia al interactuar con el sistema. Promediando los resultados de cada una de las pruebas se observa que los mejores resultados se lograron en el cuarto día. Al comparar todos los resultados, se denota que el usuario 4 (uno de los autores) posee un porcentaje de acierto superior comparado con los demás usuarios. Esto se debe a que posee más experiencia gracias a que lleva más de seis meses haciendo uso de la interfaz.

Se encuentra que el porcentaje de éxito puede ser superior al 80% y en algunos casos se alcanzan porcentajes mayores al 90% a medida que el adquiera experiencia mediante la interacción con el sistema. Este entrenamiento permite desarrollar memoria muscular para ejecutar cada expresión facial con más facilidad; lo cual mejora las curvas de desempeño al manejar el sistema logrando, que el paciente o el usuario pueda tener una buena experiencia en cuanto al uso diario del mismo.

4 CONCLUSIONES

La calibración y estado de la diadema son de vital importancia para un enlace óptimo con el panel de control de EMOTIV; para lograr mejores resultados se requiere de un tiempo de entrenamiento para que el usuario adquiriera experiencia en el uso de la interfaz.

Se implementó una comunicación inalámbrica eficiente el cual logra ejecutar un control on-off de más cuatro dispositivos, permitiendo una interacción más amena del usuario con su entorno.

Esta tecnología también puede ser usada para personas que han perdido parte de su capacidad cognitiva ya que implementando un trabajo dinámico de ordenes estructuradas de prender y apagar bombillos estratégicamente ubicados permite que el usuario cree nuevas rutas de información cerebral, mitigando las zonas no funcionales de su cerebro con el uso de las regiones sanas.

En general la tecnología desarrollada presenta un manejo sencillo que puede ser maniobrado por un paciente en condición de cuadriplejía que tenga intacta su condición cognitiva.

5 RECOMENDACIONES

El resultado de la interfaz es el punto de partida para nuevas aplicaciones y proyectos aplicados al área de Ingeniería biomédica con el fin de mejorar la calidad de vida a pacientes que puedan tener su movilidad limitada. El alcance puede proyectarse en un futuro a situaciones como el control total de un hogar o al manejo de prótesis por medio de mapeos cerebrales.

La interfaz presentada puede mejorar su alcance y efectividad cambiando el sistema de comunicación inalámbrica, también se puede reducir el tamaño de las unidades mejorando la programación del microcontrolador para omitir el uso de elemento del hardware que puedan ser remplazados por software.

Adicional a lo mencionado anteriormente se puede ampliar el número de dispositivos controlados implementados microcontroladores en los receptores con el objetivo de que estos puedan leer trama de datos seriales y con ello mejorar el sistema de cuatro bits implementado. De esta manera se podría añadir más funciones aparte del encendido y el apagado logrando maximizar el control de los dispositivos.

BIBLIOGRAFÍA

- Arango, J., Cárdenas, J., & Peña, A. (2013). Sistema para Rehabilitación del Síndrome del Miembro Fantasma utilizando Interfaz Cerebro-Computador y Realidad Aumentada. *RISTI - Revista Ibérica de Sistemas e Tecnologías de Informação*, 93-106.
- Ariza, A. (2009). Electroencefalografía. En A. Ariza, *Introducción a la ingeniería biomédica* (págs. 117-130). Bucaramanga: Universidad Pontificia Bolivariana.
- Bonnani, L., Thomas, A., Tiraboschi, P., Perfetti, B., Varanese, S., & Onofri, M. (Marzo de 2008). EEG comparisons in early Alzheimer's disease, dementia with Lewy bodies and Parkinson's disease with dementia patients with a 2-year follow-up. *Brain: A journal of neurology*, 131, 609-705.
- Casa, D., & Regalado, A. (2007). *MÓDULO DIDÁCTICO PARA CONTROL ELECTRÓNICO DE POTENCIA DEL TRIAC (TESIS DE PREGRADO)*. Escuela Politécnica Nacional, Quito.
- EMOTIV. (s.f.). *EMOTIV*. Recuperado el 11 de Enero de 2018, de EMOTIV: www.emotiv.com
- EMOTIV Inc. (s.f.). *EMOTIV*. Recuperado el 19 de Enero de 2018, de EMOTIV: <https://www.emotiv.com/the-science/>
- Fairchild. (2015). *MOC301XM, MOC302XM SERIES DATASHEET*. FAIRCHILD.
- Fairchild Semiconductor. (6 de Agosto de 2014). *Digi-Key Electronics*. Recuperado el 16 de Enero de 2018, de Digi-Key Electronics: <https://www.digikey.com/es/articles/techzone/2014/aug/resistor-capacitor-rc-snubber-design-for-power-switches>
- García, B. (16 de Septiembre de 2015). *Vanguardia.com*. Recuperado el 10 de Enero de 2018, de Vanguardia.com: <http://www.vanguardia.com/area-metropolitana/floridablanca/327895-upb-diseno-silla-de-ruedas-que-se-mueve-con-el-pensamiento>

- Guevara, S. (2012). *Adquisición de señales electroencefalográficas para el movimiento de un prototipo de silla de ruedas en un sistema BCI (Tesis de pregrado)*. Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca.
- Gunaseelan, P., & R, D. (2014). Microcontroller Based X-Y Plotter. *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering (IJAREEI)*, Volumen 3, Número especial 3.
- Holtek Semiconductor Inc. (2009). *HT12A/HT12E 2¹² Series of Encoders Datasheet*. Holtek Semiconductor Inc.
- Holtek Semiconductors Inc. (2002). *HT12D/HT12F 2¹² Series of Decoders Datasheet*. Holtek Semiconductors Inc.
- ICONTEC. (2002). *Código Eléctrico Colombiano NTC 2050*. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, ICONTEC.
- IXYS Integrated Circuits Division. (2014). *Ventajas de los Relés de Estado Sólido respecto a los Relés Electromecánicos*. IXYS.
- Kalyan, P., & Shankar, G. (December de 2017). IOT Based Heart Function Monitoring and Heart. *International Journal for Science and Advance Research in Technology (IJSART)*, Volumen 3, Numero 12.
- Kushagra. (2012). *Engineers Garage*. Recuperado el 19 de Enero de 2018, de Engineers Garage: <https://www.engineersgarage.com/electronic-components/ht12e>
- Lang, M. (2012). *Investigating the Emotiv EPOC for cognitive control in limited training time (Tesis de pregrado)*. Universty of Canterbury.
- Lasluisa, N. (2015). *DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA SILLA DE RUEDAS AUTÓNOMA ACCIONADA MEDIANTE ONDAS CEREBRALES, PARA LA ASOCIACIÓN DE LIMITADOS PLÉJICOS DE TUNGURAHUA (ASOPLEJICAT) (Tesis de pregrado)*. Universidad de las Fuerzas Armadas, Latacunga.
- Nisar, H., Yeoh, Q., Balasubramanium, H., Wei, W., & Malik, A. (2014). *Analysis of Brain Activity while Performing Cognitive Actions to Control a Car*. In: Goh J.

(eds) *The 15th International Conference on Biomedical Engineering. IFMBE Proceedings, vol 43. Springer, Cham.*

NXP Semiconductors. (2001). *Datasheet BT138 Series*. NXP.

OMS. (Noviembre de 2013). *Organizacion Mundial de la Salud*. Recuperado el 5 de Enero de 2018, de Organizacion Mundial de la Salud: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs384/es/>

Ortega, C. (2 de Diciembre de 2013). *YoungMarketing.com*. Recuperado el 1 de Enero de 2018, de YoungMarketing.com: <http://www.youngmarketing.co/tecnologia-asistiva-para-personas-con-discapacidad-motora/>

Phidgets. (7 de Junio de 2017). *Phidgets*. Recuperado el 16 de Enero de 2018, de Phidgets: https://www.phidgets.com/docs21/Solid_State_Relay_Primer

Prolific Technology Inc. (2013). *PL-2303HX Edition (Chip Rev D) USB to Serial Bridge Controller Product Datasheet*. Prolific Technology Inc.

Rawashdeh, M. (2013). *Instructables*. Recuperado el 19 de Enero de 2018, de Instructables: <http://www.instructables.com/id/RF-315433-MHz-Transmitter-receiver-Module-and-Ardu/>

Rossignol, S. (2013). Anatomy and Physiology of the Spinal Cord. En A. Burns, J. Ditunno, S. Rossignol, M. Boakye, A. Vaccaro, & M. Fehlings, *Essentials of Spinal Cord Injury* (págs. 3-16). New York: Thieme.

Saladin, K. (2013). Médula espinal, nervios raquídeos y reflejos somáticos. En K. Saladin, *Anatomía y Fisiología* (págs. 478-506). Mexico D.F.: Mc Graw Hill .

Solís, L. (2015). *SISTEMA DE CONTROL DE BRAZO ROBÓTICO MEDIANTE ONDAS CEREBRALES DESARROLLADO EN SOFTWARE LIBRE PARA ASISTENCIA A PERSONAS CON CAPACIDADES ESPECIALES*. Universidad de las Fuerzas Armadas, Lacadunga.

Tecmikro. (s.f.). *Tecmikro*. Recuperado el 17 de Enero de 2018, de Tecmikro: <http://programarpicenc.com/articulos/radiofrecuencia-sistema-tx-rx-a-433mhz>

- Teplan, M. (2002). *Measurement Science Review*. Recuperado el 5 de Enero de 2018, de Measurement Science Review: <http://www.measurement.sk/2002/S2/Teplan.pdf>
- Texas Instruments. (2011). *MSP430G2x53, MSP430G2x13 Datasheet*. Texas Instruments.
- Vahora, A., Patel, R., Goradiya, B., & Desai, A. (2014). Heart Beat Monitoring And Wireless Data Logging Using Arm Cortex A8. *International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication (IJRITCC)*, Volumen 2, Numero 8.

ANEXOS

ANEXO A. Especificaciones técnicas del Emotiv Epoc System

A continuación, se presentan las especificaciones técnicas del Emotiv Epoc System encontradas en la página del fabricante.

Características:

- Diseño flexible y fácil de montar
- Inalámbrico y recargable
- Resolución espacial de matriz densa que garantiza la medición del "cerebro completo"
- Sensores húmedos a base de salina (no geles pegajosos)
- Batería de litio que proporciona hasta 12 horas de uso continuo
- Compatible con Windows, OSX, Linux, Android e iOS
- Proporciona acceso a datos de EEG sin procesar con suscripción de software
- Acceda a métricas de rendimiento, comandos mentales y expresiones faciales

Especificaciones Técnicas:

Señales

- 14 canales: AF3, F7, F3, FC5, T7, P7, O1, O2, P8, T8, FC6, F4, F8, AF4

- Referencias: en la configuración de cancelación de ruido CMS / DRL ubicaciones P3 / P4

Resolución de señal

- Método de muestreo: muestreo secuencial. Solo ADC
- Velocidad de muestreo: 128 SPS o 256 SPS * (2048 Hz interno)
- Resolución: 14 bits 1 LSB = $0.51\mu\text{V}$ (ADC de 16 bits, piso de ruido instrumental de 2 bits descartado) o 16 bits *
- Ancho de banda: 0.2 - 43Hz, filtros digitales de muesca a 50Hz y 60Hz
- Filtrado: construido en filtro digital Sinc de 5^o orden
- Rango dinámico (entrada referida): $8400\mu\text{V}$ (pp)
- Modo de acoplamiento: AC acoplado

Conectividad

- Inalámbrico: Bluetooth® Smart
- Inalámbrico patentado: banda de 2,4 GHz

Poder

- Batería: batería interna de polímero de litio 640mAh
- Duración de la batería: hasta 12 horas con un cable de conexión exclusivo, hasta 6 horas con Bluetooth® Smart

ANEXO B. Código usado para programar la interfaz gráfica basada en java en el software Processing para computador sin puerto serial físico

```
import processing.serial.*;

Serial portA;

PImage logo;

int V11=255;
int V12=0;
int V21=255;
int V22=0;
int V31=255;
int V32=0;
int V41=255;
int V42=0;
int V51=255;
int V52=0;
int V61=255;
int V62=0;

String Nombre= "ENLACE";

String Autor1= "Daniel Javier Silva
Nuñez 2101439";

String Autor2= "Marlon Andres Silva
Romero 2100120";

String Titulo1= "Interfaz Hombre-
Máquina basada en el EMOTIV EPOC
SYSTEM";

String Titulo2= "para personas en
condición de cuádrupleja";

String P= "Encendido";

String R= "Reset";

String L1= "D1";

String L2= "D2";

String L3= "D3";

String L4= "D4";

void setup () {

    surface.setTitle(Nombre);

    size(1400,550);

    logo = loadImage("logo1.png");
```

```

    portA= new Serial(this, Serial.list()[0]
    , 9600);
//para PC con Puerto serial fisico
cambiar a
// portA= new Serial(this, Serial.list()[1]
, 9600);

}

void draw () {

    fill(V11,V12,0);
    ellipse (200,300,50,50);
    fill(V21,V22,0);
    ellipse (400,300,50,50);
    fill(V31,V32,0);
    ellipse (600,300,50,50);
    fill(V41,V42,0);
    ellipse (800,300,50,50);
    fill(V51,V52,0);
    ellipse (1000,300,50,50);
    fill(V61,V62,0);
    ellipse (1200,300,50,50);
    fill(0,0,0);

    textSize(40);
    text(Autor1,100,430);
    fill(0,0,0);
    textSize(40);
    text(Autor2,100,500);
    fill(0,0,0);
    textSize(40);
    text(P,100,250);
    fill(0,0,0);
    textSize(40);
    text(R,350,250);
    fill(0,0,0);
    textSize(40);
    text(L1,575,250);
    fill(0,0,0);
    textSize(40);
    text(L2,775,250);
    fill(0,0,0);
    textSize(40);
    text(L3,975,250);
    fill(0,0,0);
    textSize(40);
    text(L4,1175,250);

```

```

fill(0,0,0);
textSize(40);
text(Titulo1,100,80);
fill(0,0,0);
textSize(40);
text(Titulo2,250,140);
image(logo,1000,340);
}

void keyPressed (){
  if(key == 'z'){
    portA.clear();
    portA.stop();
    portA= new Serial(this,
Serial.list()[1] , 9600);
    portA.write("z");
    V11=255;
    V12=0;
    V21=255;
    V22=0;
    V31=255;
    V32=0;
    V41=255;
    V42=0;
    V51=255;
    V52=0;
    V61=255;
    V62=0;
  } else {
    if(key == 'p'){
      portA.write("p");
      if (V11==0){
        V11 = 255;
        V12 = 0;
        V21 = 255;
        V22 = 0;
      } else {
        V11 = 0 ;
        V12 = 255;
      }
    }
    if(key == 'r' && V12 == 255){
      portA.write("r");
      if (V21==0){
        V21 = 255;
        V22 = 0;

```

```

} else {
    V21 = 0 ;
    V22 = 255;
    V31 = 255;
    V32 = 0;
    V41 = 255;
    V42 = 0;
    V51 = 255;
    V52 = 0;
    V61 = 255;
    V62 = 0;
}
}
if(key == '1' && V12 == 255 && V21
== 255){
    portA.write("1");
    if (V31==0){
        V31 = 255;
        V32 = 0;
    } else {
        V31 = 0 ;
        V32 = 255;
    }
}
}
}
}
if(key == '2' && V12 == 255 && V21
== 255 ){
    portA.write("2");
    if (V41==0){
        V41 = 255;
        V42 = 0;
    } else {
        V41 = 0 ;
        V42 = 255;
    }
}
}
if(key == '3' && V12 == 255 && V21
== 255){
    portA.write("3");
    if (V51==0){
        V51 = 255;
        V52 = 0;
    } else {
        V51 = 0 ;
        V52 = 255;
    }
}
}
}
}

```

```
if(key == '4' && V12 == 255 && V21
== 255){
    portA.write("4");
    if (V61==0){
        V61 = 255;
        V62 = 0;
    } else {
        V61 = 0 ;
        V62 = 255;
    }
}
}
}
}
void keyReleased(){
}
```

ANEXO C. Código usado para programar el microcontrolador MSP430G2553 de Texas Instruments en el entorno de programación "Energia"

```
//Código Interfaz Hombre-Máquina para MSP430
char input ; // Variable donde se almacenará el dato introducido por teclado
int led0=5 ; //revisar salida
int led1=6; //revisar salida
int led2=7; //revisar salida
int led3=8; //revisar salida
int led4=9; //revisar salida
int led5=10; //revisar salida
int a0=1;
int a1=0;
int a2=0;
int a3=0;
int a4=0;
int a5=0;

void setup(){
    Serial.begin(9600); // Se inicia la comunicación serial
    pinMode(led0, OUTPUT); // Se configura el pin0 como salida
    pinMode(led1, OUTPUT); // Se configura el pin1 como salida
    pinMode(led2, OUTPUT); // Se configura el pin2 como salida
    pinMode(led3, OUTPUT); // Se configura el pin3 como salida
    pinMode(led4, OUTPUT); // Se configura el pin4 como salida
    pinMode(led5, OUTPUT); // Se configura el pin4 como salida
    digitalWrite(led0, LOW);
    digitalWrite(led1, LOW);
    digitalWrite(led2, LOW);
    digitalWrite(led3, LOW);
    digitalWrite(led4, LOW);
    digitalWrite(led5, LOW);
}
```

```

delay(500);
digitalWrite(led0,HIGH);
}

void loop(){
  if(Serial.available(>0){ // Si existen
datos de entrada en la comunicaci3n
serial hacer lo siguiente

  input=Serial.read(); // Guardamos
el dato introducido

  if(input=='p'){ // Si el dato es igual a P
(POWER)

    if(a0 == 0){
      digitalWrite(led0, HIGH);
      digitalWrite(led1, LOW);
      a0=1;
      a1=0;
    }
    else{
      digitalWrite(led0, LOW);
      a0=0;
    }
  }

  else{ // De lo contrario
    if(input=='r' && a0==0){ // Si el dato
es igual a R (RESET) y power=ON

      if(a1==0){
        digitalWrite(led1, HIGH); //
        a1=1;
        digitalWrite(led2, LOW); //
        a2=0;
        digitalWrite(led3, LOW); //
        a3=0;
        digitalWrite(led4, LOW); // SE
APAGAN TODOS LOS LED
        a4=0;
        digitalWrite(led5, LOW); // SE
APAGAN TODOS LOS LED
        a5=0;
      }
      else{
        digitalWrite(led1, LOW);
        a1=0;
      }
    }
  }
  else{ // De lo contrario

```

```
if(input=='1' && a0==0){ // Si el dato
es igual a 1 (Receptor1) y power=ON
```

```
    if(a2==0){
        digitalWrite(led2, HIGH);
        a2=1;
    }
    else{
        digitalWrite(led2, LOW);
        a2=0;
    }
}
```

```
else{ // De lo contrario
```

```
if(input=='2' && a0==0){ // Si el dato
es igual a 2 (Receptor2) y power=ON
```

```
    if(a3==0){
        digitalWrite(led3, HIGH);
        a3=1;
    }
    else{
        digitalWrite(led3, LOW);
        a3=0;
    }
}
```

```
else{ // De lo contrario
```

```
if(input=='3' && a0==0){ // Si el dato
es igual a 3 (Receptor3) y power=ON
```

```
    if(a4==0){
        digitalWrite(led4, HIGH);
        a4=1;
    }
    else{
        digitalWrite(led4, LOW);
        a4=0;
    }
}
```

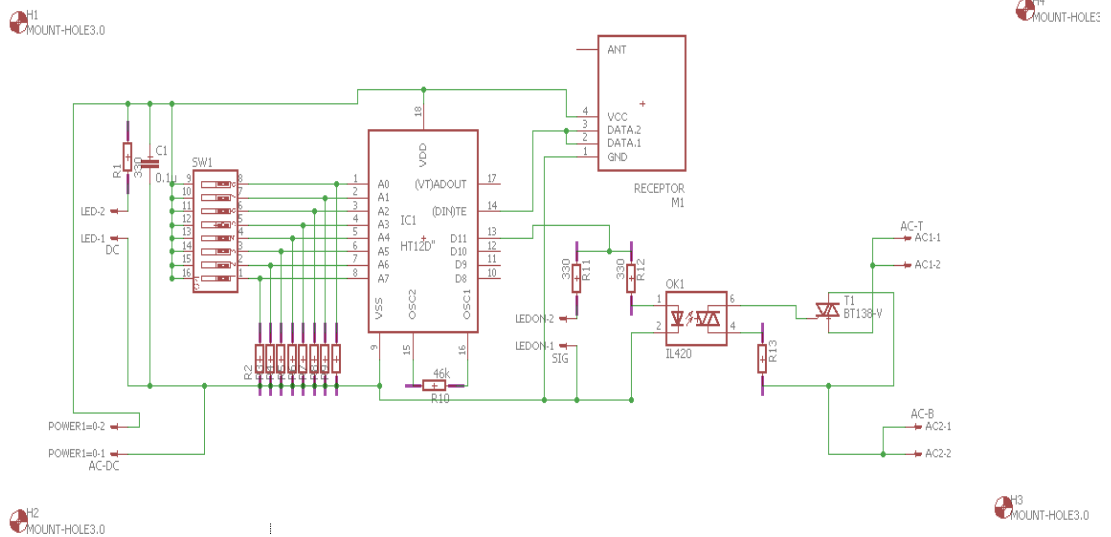
```
}
```

```
else{ // De lo contrario
```

```
if(input=='4' && a0==0){ // Si el dato
es igual a 4 (Receptor4) y power=ON
```

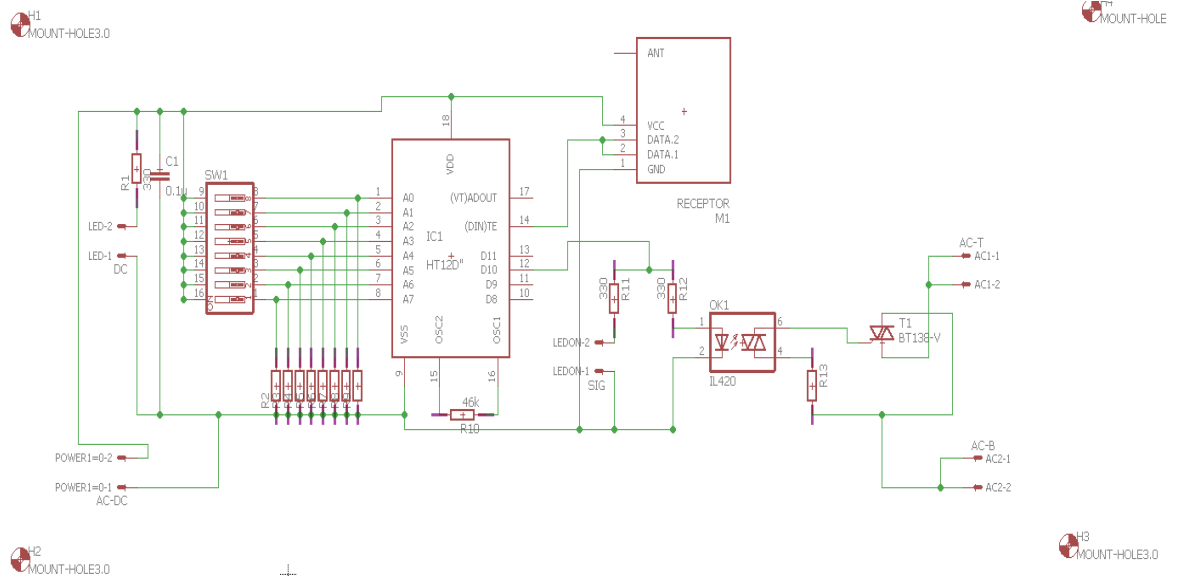
```
    if(a5==0){
        digitalWrite(led5, HIGH);
        a5=1;
    }
    else{
        digitalWrite(led5, LOW);
        a5=0;
    }
}
```


Figura 61. Esquemático del módulo receptor 1



Fuente: Autores

Figura 62. Esquemático del módulo receptor 2



Fuentes: Autores

ANEXO F. Consentimiento informado

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA
Y TELECOMUNICACIONES**

**FORMATO DE CONSENTIMIENTO INFORMADO PARA LA PARTICIPACIÓN
EN INVESTIGACIONES**

TITULO:

Interfaz hombre-máquina basada en la *EMOTIV EPOC SYSTEM* para personas en condición de cuádrupleja.

Ciudad y fecha: Bucaramanga 15 de octubre del 2017

Yo, _____ una vez informado sobre los propósitos, objetivos, procedimientos y evaluación que se llevara a cabo en esta investigación y los posibles riesgos que se puedan generar de ella, autorizo a los estudiantes de Ingeniería Electrónica de la universidad industrial de Santander: Marlon Andrés Silva Romero y Daniel Javier Silva Núñez a realizar los siguientes procedimientos:

- 1) Entrenamiento y familiarización de la diadema “*Emotiv Epoc System*”.
- 2) Toma y recolección de datos de acuerdo con el desempeño ejecutando cada una de las validaciones de la Interfaz.

Adicionalmente se me informó que:

- Mi participación en esta investigación es completamente libre y voluntaria, estoy en libertad de retirarme de ella en cualquier momento.
- No recibiré beneficio personal de ninguna clase por la participación en este proyecto de investigación. Sin embargo, se espera que los resultados obtenidos permitirán mejorar los procesos de evaluación de pacientes con condiciones clínicas similares a las mías.
- Toda la información obtenida y los resultados de la investigación serán tratados confidencialmente. Esta información será archivada en papel y medio electrónico. El archivo del estudio se guardará en la Universidad Industrial de Santander bajo la responsabilidad de los investigadores.
- Puesto que toda la información en este proyecto de investigación es llevada al anonimato, los resultados personales no pueden estar disponibles para terceras personas como empleadores, organizaciones gubernamentales, compañías de

seguros u otras instituciones educativas. Esto también se aplica a mi cónyuge, a otros miembros de mi familia y a mis médicos.

Hago constar que el presente documento ha sido leído y entendido por mí en su integridad de manera libre y espontánea.

Firma

Documento de identidad _____ No. _____ de _____

Huella:

ANEXO G. Tabulación de los datos obtenidos en cada una de las rondas hechas en la validación

Se muestran las tablas de relación obtenidas por cada usuario (1= correcto, 0=incorrecto).

Tabla 8. Información tabulada pruebas usuario 1

| | | RESULTADOS | | | | | | | | | | | | | | ✓ | % | | | RESULTADOS | | | | | | | | | | | | | | ✓ | % | | | | | | |
|----------|---|------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|-----|----------|------------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|-----|-----|-----|---|----|-----|-----|-----|-----|---|-----|-----|
| DIA | | P | 1 | P | 1 | P | P | 1 | 1 | 1 | P | P | 1 | P | 1 | P | | | DIA | 2 | P | P | 2 | P | P | P | 2 | P | 2 | 2 | P | P | 2 | 2 | | | | | | | |
| PRUEBA 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 7 | 47% | PRUEBA 2 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 6 | 40% |
| | 2 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 8 | 53% | | 2 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 7 | 47% | | | | |
| | 3 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 9 | 60% | | 3 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 9 | 60% | | | | | |
| | 4 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 12 | | 80% | 4 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 12 | 80% | | | | | |
| DIA | | 3 | 3 | P | P | 3 | P | P | 3 | P | P | P | 3 | 3 | 3 | P | | | DIA | | P | P | 4 | 4 | P | 4 | P | P | 4 | P | P | 4 | P | P | | | | | | | |
| PRUEBA 3 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 6 | 40% | PRUEBA 4 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 7 | 47% |
| | 2 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 10 | 67% | | 2 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 7 | 47% | | | |
| | 3 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 10 | 67% | | 3 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 10 | 67% | | | | | |
| | 4 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 12 | 80% | | 4 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 11 | 73% | | | | | |
| DIA | | P | 1 | P | P | 2 | P | P | 3 | P | P | 4 | P | P | 1 | P | | | DIA | | P | 1 | P | P | 1 | P | P | 2 | P | P | 3 | P | P | 3 | P | | | | | | |
| PRUEBA 5 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 7 | 47% | PRUEBA 6 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 5 | 33% | |
| | 2 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 7 | 47% | | 2 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 6 | 40% | | | | | |
| | 3 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 9 | 60% | | 3 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 9 | 60% | | | | | |
| | 4 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 13 | 87% | | 4 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 11 | 73% | | | | | | |
| DIA | | P | 2 | P | P | 2 | P | P | 1 | P | P | 4 | P | P | 1 | P | P | 3 | P | P | | 2 | P | P | 3 | P | P | 4 | P | 4 | 4 | P | | | | | | | | | |
| 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 14 | 47% | | | | | | | | | |
| 2 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 14 | 47% | | | | | | | | | | |
| 3 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 15 | 50% | | | | | | | | | | |
| 4 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 21 | 70% | | | | | | | | | | | |

Tabla 9. Información tabulada pruebas usuario 2

| | RESULTADOS | | | | | | | | | | | | | | | ü | % | | RESULTADOS | | | | | | | | | | | | | | | ü | % | | | | | | | | | | | |
|----------|------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|-----|----------|------------|-----|---|---|---|---|---|----|-----|----|-----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | DIA | P | 1 | P | 1 | P | P | 1 | 1 | 1 | P | P | 1 | P | 1 | | | | P | DIA | 2 | P | P | 2 | P | P | P | 2 | P | 2 | 2 | P | P | | | 2 | 2 | | | | | | | | | |
| PRUEBA 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 5 | 33% | PRUEBA 2 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 7 | 47% | | |
| | 2 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 7 | | 47% | 2 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 6 | 40% | | | | | |
| | 3 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 9 | | 60% | 3 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 10 | 67% | | | |
| | 4 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 11 | | 73% | 4 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 10 | 67% | | | |
| | DIA | 3 | 3 | P | P | 3 | P | P | 3 | P | P | P | 3 | 3 | 3 | P | | | DIA | P | P | 4 | 4 | P | 4 | P | P | 4 | P | P | 4 | P | P | | | | | | | | | | | | | |
| PRUEBA 3 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 6 | 40% | PRUEBA 4 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 11 | 73% |
| | 2 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 8 | 53% | | 2 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 10 | 67% | | | | |
| | 3 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 8 | 53% | | 3 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 11 | 73% | | | |
| | 4 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 9 | 60% | | 4 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 13 | 87% | | |
| | DIA | P | 1 | P | P | 2 | P | P | 3 | P | P | 4 | P | P | 1 | P | | | DIA | P | 1 | P | P | 1 | P | P | 2 | P | P | 3 | P | P | 3 | P | | | | | | | | | | | | |
| PRUEBA 5 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 13 | 87% | PRUEBA 6 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 11 | 73% | |
| | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 12 | | 80% | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 11 | 73% | | |
| | 3 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 12 | | 80% | 3 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 12 | 80% | |
| | 4 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | | 11 | 73% | 4 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 13 |
| | DIA | P | 2 | P | P | 2 | P | P | 1 | P | P | 4 | P | P | 1 | P | P | 3 | | | P | P | 2 | P | P | 3 | P | P | 4 | P | P | 4 | P | | | | | | | | | | | | | |
| PRUEBA 7 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 22 | 73% | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 2 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 25 | 83% | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 3 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 22 | 73% | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 4 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 25 | 83% | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Tabla 10. Información tabulada pruebas usuario 3

| | | RESULTADOS | | | | | | | | | | | | | | | ✓ | % | | | RESULTADOS | | | | | | | | | | | | | | | ✓ | % | | |
|----------|---|------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|-----|----------|-----|------------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|-----|----|-----|---|----|-----|-----|----|-----|
| | | DIA | P | 1 | P | 1 | P | P | 1 | 1 | 1 | 1 | P | P | 1 | P | 1 | P | | | DIA | 2 | P | P | 2 | P | P | P | 2 | P | 2 | 2 | P | P | 2 | 2 | | | |
| PRUEBA 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 8 | 53% | PRUEBA 2 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 7 | 47% |
| | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 10 | 67% | | 2 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 10 | 67% | | |
| | 3 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 11 | 73% | | 3 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 11 | 73% | | |
| | 4 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 14 | 93% | | 4 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 11 | 73% | | |
| | | DIA | 3 | 3 | P | P | 3 | P | P | 3 | P | P | P | 3 | 3 | 3 | P | | | DIA | P | P | 4 | 4 | P | 4 | P | P | 4 | P | P | 4 | P | P | | | | | |
| PRUEBA 3 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 8 | 53% | PRUEBA 4 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 8 | 53% |
| | 2 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 11 | 73% | | 2 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 11 | 73% | | |
| | 3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 11 | 73% | | 3 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 13 | 87% | | | |
| | 4 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 12 | 80% | | 4 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 13 | 87% | | |
| | | DIA | P | 1 | P | P | 2 | P | P | 3 | P | P | 4 | P | P | 1 | P | | | DIA | P | 1 | P | P | 1 | P | P | 2 | P | P | 3 | P | P | 3 | P | | | | |
| PRUEBA 5 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 9 | 60% | PRUEBA 6 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 10 | 67% |
| | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 11 | 73% | | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 10 | 67% | | |
| | 3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 11 | 73% | | 3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 10 | 67% | | |
| | 4 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 14 | 93% | | 4 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 14 | 93% | | |
| | | DIA | P | 2 | P | P | 2 | P | P | 1 | P | P | 4 | P | P | 1 | P | P | 3 | P | P | 2 | P | P | 3 | P | P | 4 | P | 4 | 4 | P | | | | | | | |
| PRUEBA 7 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 18 | 60% | | | | | | |
| | 2 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 22 | 73% | | | | | | | | |
| | 3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 26 | 87% | | | | | | |
| | 4 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 27 | 90% | | | | | | |

Tabla 11. Información tabulada pruebas usuario 4

| | RESULTADOS | | | | | | | | | | | | | | | | | ✓ | % | | RESULTADOS | | | | | | | | | | | | | | | | | ✓ | % | | | | | | | | | | | | |
|----------|------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|------|----------|----------|---|------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|------|------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|------|-----|------|------|------|-----|------|
| | DIA | P | 1 | P | 1 | P | P | 1 | 1 | 1 | P | P | 1 | P | 1 | P | | | | | DIA | 2 | P | P | 2 | P | P | P | 2 | P | 2 | 2 | P | P | 2 | 2 | | | | | | | | | | | | | | | |
| PRUEBA 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 15 | 100% | PRUEBA 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 14 | 93% |
| | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 15 | 100% | | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 15 | 100% | | | | |
| | 3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 15 | 100% | | 3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 15 | 100% | | | |
| | 4 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 15 | 100% | | 4 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 15 | 100% | | |
| | DIA | 3 | 3 | P | P | 3 | P | P | 3 | P | P | P | 3 | 3 | 3 | P | | DIA | P | P | 4 | 4 | P | 4 | P | P | 4 | P | P | 4 | P | P | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| PRUEBA 3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 14 | 93% | PRUEBA 4 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 15 | 100% |
| | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 14 | 93% | | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 15 | 100% | | | | |
| | 3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 15 | 100% | | 3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 15 | 100% | | | | |
| | 4 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 14 | 93% | | 4 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 15 | 100% | | | | |
| | DIA | P | 1 | P | P | 2 | P | P | 3 | P | P | 4 | P | P | 1 | P | | DIA | P | 1 | P | P | 1 | P | P | 2 | P | P | 3 | P | P | 3 | P | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| PRUEBA 5 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 15 | 100% | PRUEBA 6 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 14 | 93% | |
| | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 14 | 93% | | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 15 | 100% | | | | | | |
| | 3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 15 | 100% | | 3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 15 | 100% | | | | | | |
| | 4 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 15 | 100% | | 4 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 14 | 93% | | | | | |
| | DIA | P | 2 | P | P | 2 | P | P | 1 | P | P | 4 | P | P | 1 | P | 3 | P | P | 2 | P | P | 3 | P | P | 4 | P | P | 4 | P | P | 3 | P | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| PRUEBA 7 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 30 | 100% | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 30 | 100% | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 28 | 93% | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 4 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 30 | 100% | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Tabla 12. Datos de mejora diarios usuario 1

| Usuario 1 | DIA 1 | DIA 2 | DIA 3 | DIA 4 |
|-----------|-------|-------|-------|-------|
| PRUEBA 1 | 47% | 53% | 60% | 80% |
| PRUEBA 2 | 40% | 47% | 60% | 80% |
| PRUEBA 3 | 40% | 67% | 67% | 80% |
| PRUEBA 4 | 47% | 47% | 67% | 73% |
| PRUEBA 5 | 47% | 47% | 60% | 87% |
| PRUEBA 6 | 33% | 40% | 60% | 73% |
| PRUEBA 7 | 47% | 47% | 50% | 70% |
| promedio | 43% | 50% | 61% | 78% |

Tabla 13. Datos de mejora diarios usuario 2

| Usuario 2 | DIA 1 | DIA 2 | DIA 3 | DIA 4 |
|-----------|-------|-------|-------|-------|
| PRUEBA 1 | 33% | 47% | 60% | 73% |
| PRUEBA 2 | 47% | 40% | 67% | 67% |
| PRUEBA 3 | 40% | 53% | 53% | 60% |
| PRUEBA 4 | 73% | 67% | 73% | 87% |
| PRUEBA 5 | 87% | 80% | 80% | 73% |
| PRUEBA 6 | 73% | 73% | 80% | 87% |
| PRUEBA 7 | 73% | 83% | 73% | 83% |
| promedio | 61% | 63% | 69% | 76% |

Tabla 14. Datos de mejora diarios usuario 3

| Usuario 3 | DIA 1 | DIA 2 | DIA 3 | DIA 4 |
|-----------|-------|-------|-------|-------|
| PRUEBA 1 | 53% | 67% | 73% | 93% |
| PRUEBA 2 | 47% | 67% | 73% | 73% |
| PRUEBA 3 | 53% | 73% | 73% | 80% |
| PRUEBA 4 | 53% | 73% | 87% | 87% |
| PRUEBA 5 | 60% | 73% | 73% | 93% |
| PRUEBA 6 | 67% | 67% | 67% | 93% |
| PRUEBA 7 | 60% | 73% | 87% | 90% |
| promedio | 56% | 70% | 76% | 87% |

Tabla 15. Datos de mejora diarios usuario 4

| Usuario 4 | DIA 1 | DIA 2 | DIA 3 | DIA 4 |
|-----------|-------|-------|-------|-------|
| PRUEBA 1 | 100% | 100% | 100% | 100% |
| PRUEBA 2 | 93% | 100% | 100% | 100% |
| PRUEBA 3 | 93% | 93% | 100% | 93% |
| PRUEBA 4 | 100% | 100% | 100% | 100% |
| PRUEBA 5 | 100% | 93% | 100% | 100% |
| PRUEBA 6 | 93% | 100% | 100% | 93% |
| PRUEBA 7 | 100% | 100% | 93% | 100% |
| promedio | 97% | 98% | 99% | 98% |

Tabla 16. Promedio de aciertos general

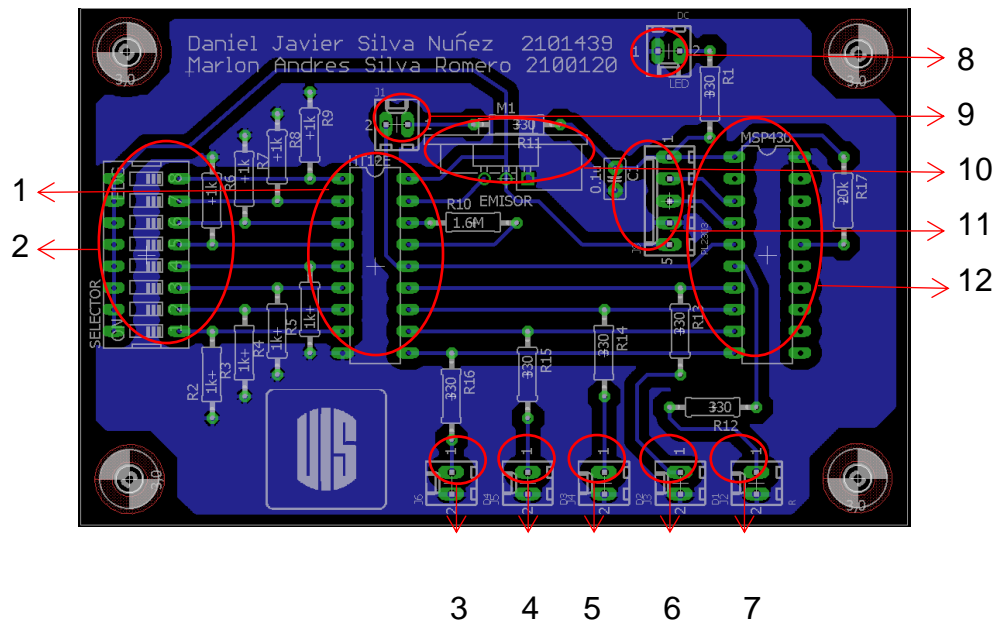
| | PROMEDIO ACIERTOS | | | |
|-----------|-------------------|-------|-------|-------|
| | DIA 1 | DIA 2 | DIA 3 | DIA 4 |
| Usuario 1 | 44% | 50% | 57% | 78% |
| Usuario 2 | 61% | 63% | 68% | 76% |
| Usuario 3 | 56% | 70% | 76% | 87% |
| Usuario 4 | 97% | 98% | 99% | 98% |
| PROMEDIO | 65% | 70% | 75% | 85% |

ANEXO H. Manual técnico

Manual básico para mantenimiento. Para extraer la tarjeta en caso de que deba revisarse su funcionamiento se debe iniciar desatornillando la cara lateral en el emisor y la cara frontal en los receptores.

Luego de eso desatornillar la placa y extraerla. Luego de tener la placa se puede proceder a desconectar cada uno de los conectores para poder analizarla de mejor manera. Ambas tarjetas de circuito impreso tienen componentes extraíbles e importantes los cuales van a ser señalados en la Figura 70 para el emisor y en la Figura 72 para los receptores con el objetivo de mostrar sus respectivas conexiones.

Figura 70. Componentes notables de la tarjeta del módulo emisor



Fuente: Autores

En la Tabla 17 se observa la función de cada uno de los elementos señalados en la figura anterior.

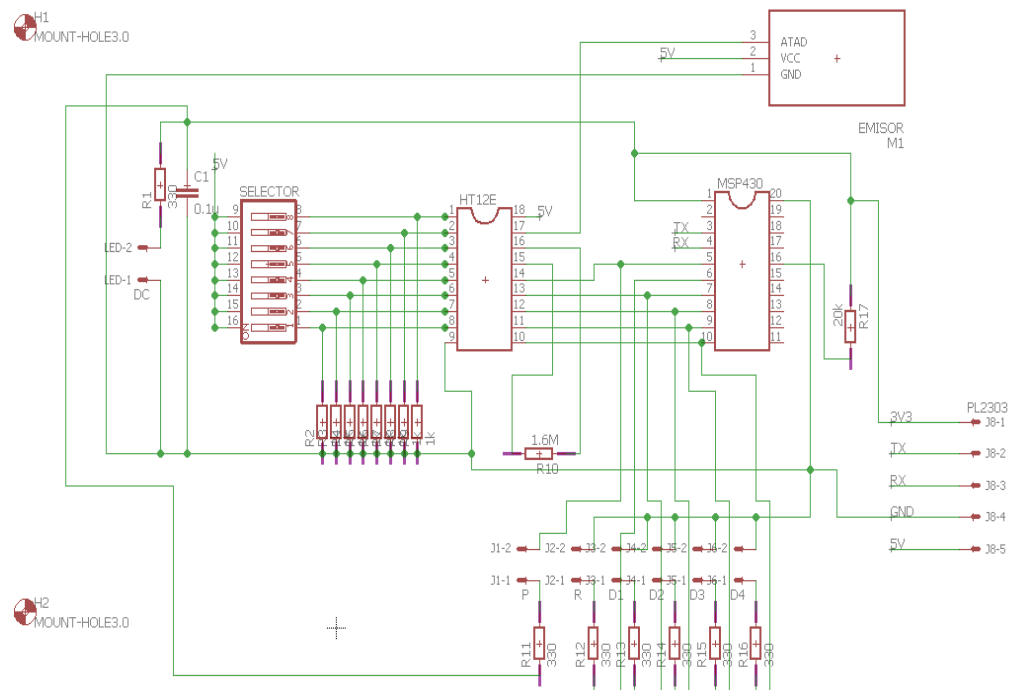
Tabla 17. Función de los elementos usados en la tarjeta del módulo emisor

| Numero | Elemento | Función |
|---------------|--------------------|--|
| 1* | HT12E | Codificador para adecuar y transmitir la señal de RF |
| 2 | DIP Switch 8 | Selector de dirección para el codificador |
| 3* | Conector Mol | Conecta a LED para D4 |
| 4* | Conector Mol | Conecta a LED para D3 |
| 5* | Conector Mol | Conecta a LED para D2 |
| 6* | Conector Mol | Conecta a LED para D1 |
| 7* | Conector Mol | Conecta a LED para Reinicio |
| 8* | Conector Mol | Conecta a LED para En línea |
| 9* | Conector Mol | Conecta a LED para encendido |
| 10* | Módulo XY-FST | Emisor de RF |
| 11* | Convertidor PL2303 | Convertidor USB a Serial/TTL |
| 12* | MSP430G2553 | Microcontrolador de señal |

*elemento removible

Es necesario entender cómo van las conexiones de cada uno de los elementos, por lo tanto, se debe tener presente el esquemático de la tarjeta a trabajar. En el caso del emisor se aprecia en la Figura 71.

Figura 71. Esquemático del módulo receptor



Fuente: Autores

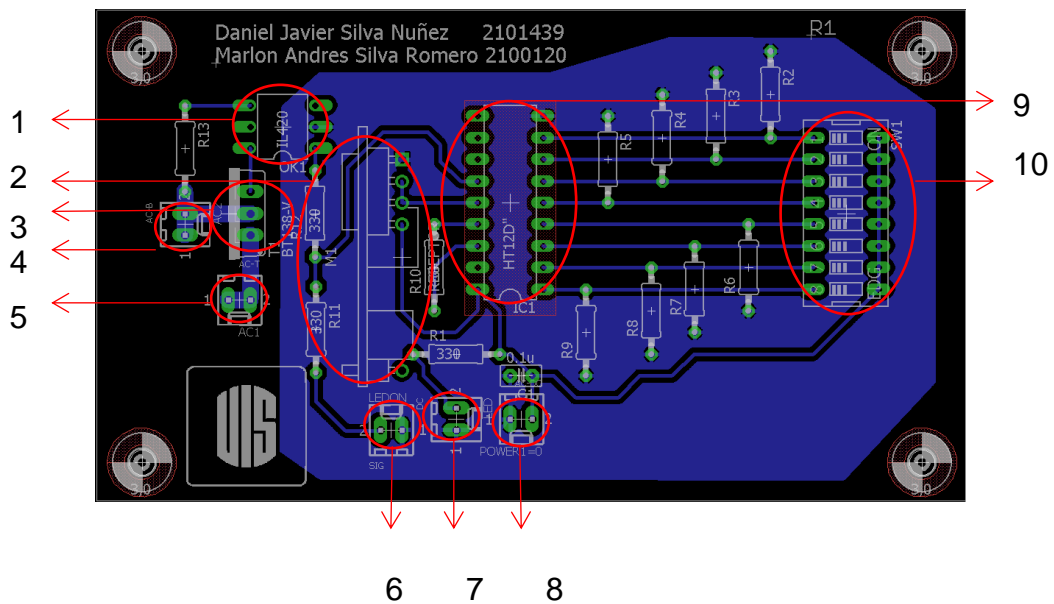
Algunos problemas comunes que pueden presentar con el emisor:

- Desconexión del módulo PL2303. La solución es fijar bien el módulo

- Interrupción de la comunicación (la interfaz gráfica cambia los estados, pero no pasa lo mismo con la tarjeta). La solución es, previamente de cerciorar la conexión, oprimir Z para sincronizar ambas cosas y continuar trabajando.
- Los LED no están funcionando. En este caso se debe asegurar si alguno está defectuoso y si se debe cambiar debe tenerse cuidado para conectarlo igual a como estaba.

Ahora se muestran los elementos importantes del receptor y en la Tabla 18 la función de los mismos.

Figura 72. Función de los elementos usados en la tarjeta del módulo receptor



Fuente: Autores

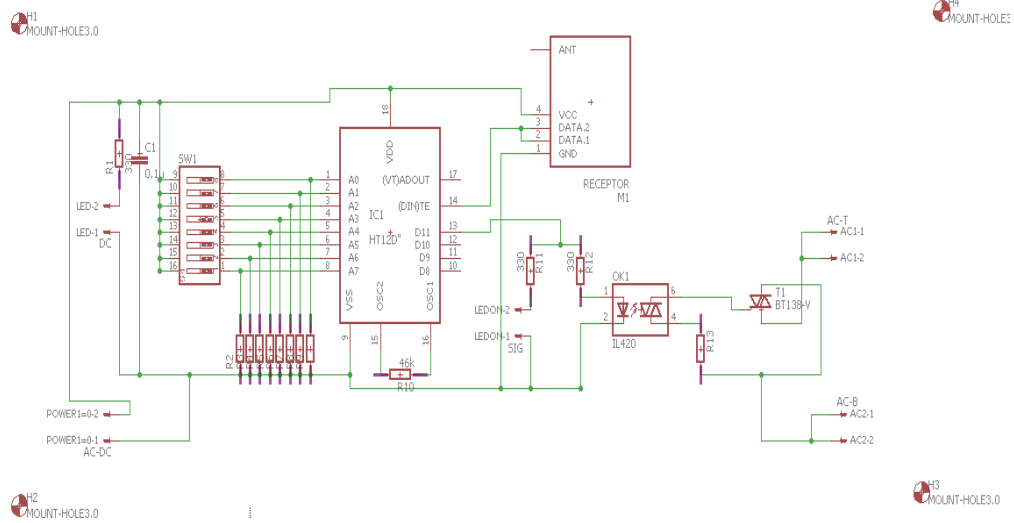
Tabla 18. Función de los elementos usados en la tarjeta del módulo receptor

| Numero | Elemento | Función |
|---------------|-----------------|--|
| 1* | MOC3021 | Relevador de estado solido |
| 2* | XY-MK-5V | Módulo Receptor de RF |
| 3 | BT138 | Triac para la etapa de potencia |
| 4* | Conector Mol | Conecta a una de las terminales AC |
| 5* | Conector Mol | Conecta a tomacorriente contraria a terminal AC |
| 6* | Conector Mol | Conecta a LED para En línea |
| 7* | Conector Mol | Conecta a LED para Encendido |
| 8* | Conector Mol | Conecta a tensión de alimentación |
| 9* | HT12D | Decodificador para recepción de datos RF |
| 10 | DIP Switch 8 | Selector de dirección para el decodificador |

*Objeto extraíble

En el receptor es importante conocer el esquemático para saber las conexiones. En cada receptor hay un cambio, el pin de salida, en el receptor 1 el pin de salida es el 13, en el receptor 2 es el 12, en el receptor 3 es el 11 y en el receptor 4 es el 10. El resto de conexiones son iguales para todos los receptores como se observa en la Figura 73.

Figura 73. Esquemático del módulo receptor 1



Fuente: Autores

Algunos problemas comunes que pueden presentarse son:

- Problemas de alcance. Para este problema se debe revisar la antena y adecuarla.
- Los LED no están funcionando. En este caso se debe asegurar si alguno está defectuoso y si se debe cambiar debe tenerse cuidado para conectarlo igual a como estaba.

ANEXO I. Manual de usuario

Manual básico para uso por parte del usuario: El sistema se entrega con los siguientes elementos:

- 1 diadema EMOTIV EPOC
- 1 cargador para la diadema
- 1 receptor del sistema EMOTIV EPOC
- 1 CD de instalación del software del EMOTIV EPOC
- Caja de electrodos para la diadema y su respectivo manual
- 1 CD con el software para conexión de la interfaz grafica
- 1 módulo emisor para conectar mediante USB
- 4 módulos receptores para conectar directamente a la red.

Debido a que se tienen varios elementos en el sistema total se divide el procedimiento de conexión y puesta en marcha en 3 partes:

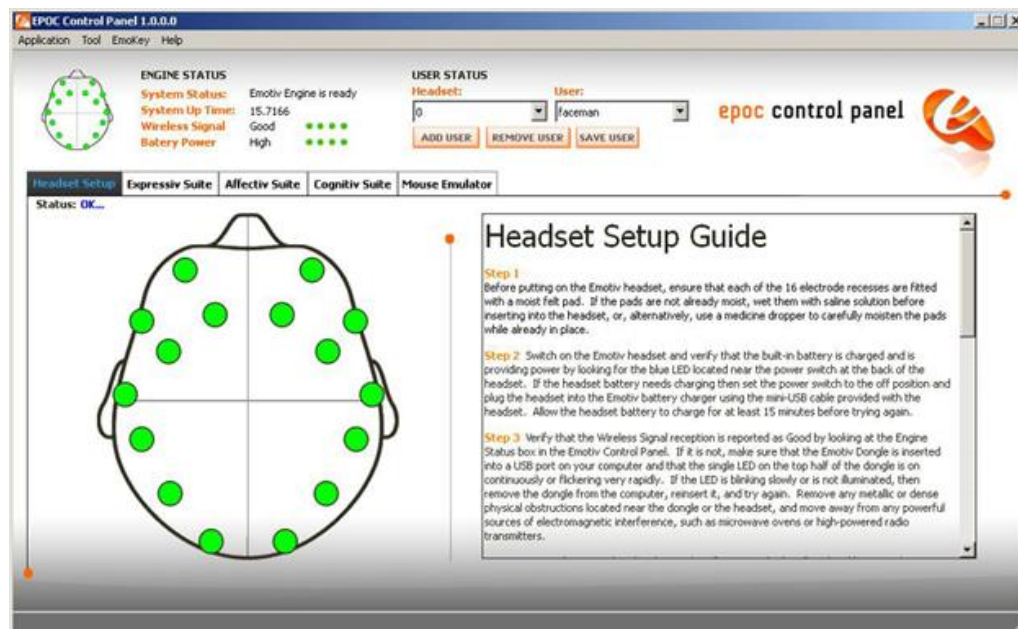
1. Conexión y calibración de la diadema: Inicialmente se debe asegurar que la diadema tenga carga completa, el tiempo de uso que se puede tener va de 6 a 12 horas luego de lo cual debe ponerse a cargar nuevamente.

En el CD que trae el EMOTIV EPOC se encuentra el EPOC PANEL que debe instalarse en el computador. El EMOTIV Epoc+ es compatible con computadores,

tablets y smartphones con sistema operativo Windows, Linux, MAC OSX, Android o iOS. Para ver las características específicas de cada uno de estos sistemas debe dirigirse a la página del fabricante: www.emotiv.com/epoc

Los electrodos deben ser previamente hidratados usando solución salina (este paso es muy importante pues de no hacerlo lo más probable es que no exista contacto en los electrodos). Después debe conectarse el receptor del EMOTIV EPOC en unos de los puertos USB del computador pues Luego se debe ubicar la diadema en el usuario de tal forma que todos los electrodos estén haciendo buen contacto (esto ocurre cuando se observa en el panel de EMOTIV todos los círculos en verde como se observa en la Figura 74.

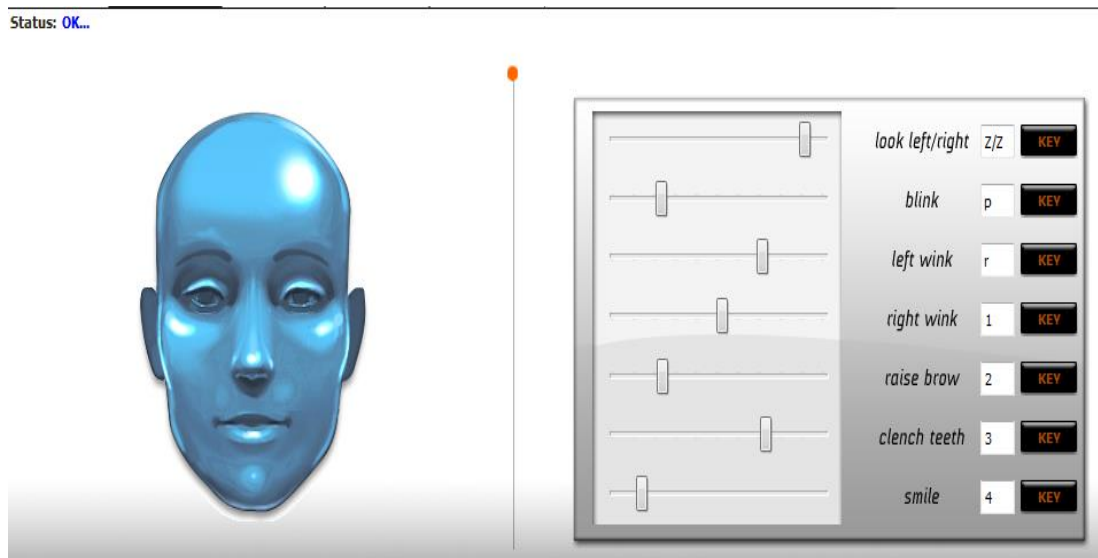
Figura 74. Panel de Control Emotiv Epoc



Fuente: autores

Luego de tener todos los electrodos haciendo buen contacto se pasa el Expressive suite incluido en el EPOC CONTROL PANEL y se procede a hacer la calibración de los gestos a usar, hay disponible 8 expresiones (mirar a la izquierda, mirar a la derecha, parpadear, guiño izquierdo, guiño derecho, levantar las cejas, apretar los dientes y sonreír) de estas se debe escoger 6 comando, calibrarlos mediante el aumento o disminución de la sensibilidad y asignarlos (p, r, 1, 2, 3 y 4), un ejemplo es el encontrado en la Figura 75.

Figura 75. Ejemplo del Expressive suite con sensibilidad ajustada y teclas asignadas

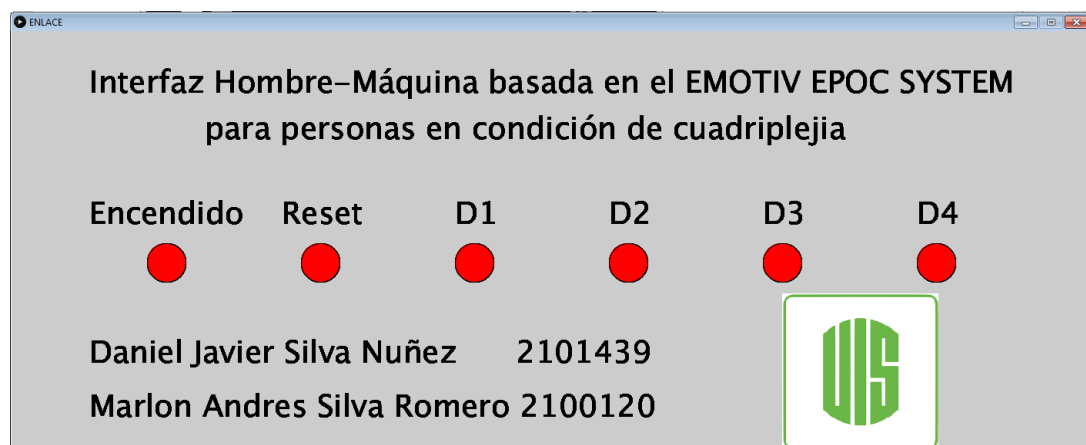


Fuente: Autores

2. Instalación y conexión de la interfaz gráfica y el dispositivo de emisión: En el CD de instalación de la interfaz gráfica se encuentra la aplicación de la interfaz gráfica. Debe conocerse las especificaciones del computador en el que se está

trabajando para saber que App es la que se debe usar. Si el computador cuenta con un puerto serial, si es así se debe entrar en la carpeta “PC con puerto serial”; en caso contrario se debe entrar en la carpeta “PC sin puerto serial”. Luego se debe escoger a que carpeta entrar bajo el criterio de que sistema operativo usa el computador que se está utilizando, Windows o Linux (aún no se debe acceder a la App). En caso de que el sistema operativo no cuente con Windows de 64 bit debe instalarse JAVA 8 que puede ser encontrado en la página oficial de JAVA. En el mismo CD de instalación de la interfaz gráfica se encuentra el instalador del driver PL2303 necesario para un correcto funcionamiento del módulo emisor. Luego de tener el driver instalado se puede conectar el dispositivo emisor en uno de los puertos USB del computador, extender su antena y posteriormente entrar a la App “processing” ubicada anteriormente y se encontrara con la interfaz gráfica encontrada en la Figura 76.

Figura 76. Interfaz gráfica



Fuentes: Autores

Luego de dar click a alguna parte de la pantalla ya se encuentra listo el sistema para ubicarse. Siguiendo las indicaciones previas de asignación de comandos (p, r, 1, 2, 3 y 4) se muestra la relación de cada uno de estos comandos con la interfaz donde se muestran 6 círculos, si su estado es rojo significa que está apagado, si está en verde significa que está encendido:

- p = Encendido -> al activar este comando cambia el estado del círculo, para que alguno de los otros círculos pueda cambiar de color este debe estar encendido. En otras palabras, si este círculo está en rojo y acciono cualquiera de los otros comandos, no va a pasar nada.
- r = Reset -> al activar este comando cambia el estado del círculo si “Encendido” está en verde. Cuando este comando está en verde apaga los círculos D1, D2, D3 y D4 y evita que puedan prenderse nuevamente.
- 1 = D1 -> al activar este comando cambia el estado del círculo si “Encendido está en verde y “Reset está en rojo”. Cuando este círculo está en verde significa que se envía la señal para mantener encendido el dispositivo 1, si está en rojo significa que se envía la señal para mantenerlo apagado.

- 2 = D2 -> al activar este comando cambia el estado del círculo si “Encendido está en verde y “Reset está en rojo”. Cuando este círculo está en verde significa que se envía la señal para mantener encendido el dispositivo 1, si está en rojo significa que se envía la señal para mantenerlo apagado.
- 3 = D3-> al activar este comando cambia el estado del círculo si “Encendido está en verde y “Reset está en rojo”. Cuando este círculo está en verde significa que se envía la señal para mantener encendido el dispositivo 1, si está en rojo significa que se envía la señal para mantenerlo apagado.
- 4 = D4-> al activar este comando cambia el estado del círculo si “Encendido está en verde y “Reset está en rojo”. Cuando este círculo está en verde significa que se envía la señal para mantener encendido el dispositivo 1, si está en rojo significa que se envía la señal para mantenerlo apagado.

El dispositivo emisor cuenta con un indicador gráfico de 7 LED que indica el estado en el que se encuentra. El primer LED indica que el módulo emisor está correctamente conectado; este es de color verde. El segundo está relacionado con “Encendido” de la interfaz gráfica y es de color verde, el tercero está

relacionado con “Reset” de la interfaz gráfica y es de color azul, el cuarto está relacionado con “D1” de la interfaz gráfica y es de color rojo, el quinto está relacionado con “D2” de la interfaz gráfica y es de color rojo, el sexto está relacionado con “D3” de la interfaz gráfica y es de color rojo, finalmente se tiene el séptimo relacionado con “D4” de la interfaz gráfica y también es de color rojo. En otras palabras, si todo está correctamente sincronizado, el estado de las variables de la interfaz gráfica está relacionado con el estado de los LED en el módulo emisor que se observa en la Figura 77.

Figura 77. Indicador visual del emisor



Fuente: Autores

3. Conexión de los dispositivos receptores: Luego de tener el sistema de emisión en línea se debe proceder conectando cada uno de los receptores a la red. En estos elementos se puede conectar en la parte posterior el dispositivo electrónico a controlar que cumpla con las condiciones de funcionamiento 120V/60Hz. Estos dispositivos tienen 2 LED de indicación como se puede observar en la Figura 78. El primero estará encendido si está correctamente conectado, el segundo LED se enciende cuando se da la señal de encendido desde el dispositivo emisor.

Figura 78. Módulos receptores



Fuente: Autores