

# UCUENCA

**Facultad de Ingeniería  
Carrera de Ingeniería de Sistemas**

## **DESARROLLO DE UN MODELO DE CALIDAD EN USO Y DE PRODUCTO DE SISTEMAS QUE UTILIZAN INTERFACES CEREBRO-COMPUTADOR (BRAIN COMPUTER INTERFACE).**

Trabajo de titulación previo a la obtención  
del título de Ingeniero de Sistemas

**Autores:**

Juan Manuel Cobos Quinde

**CI:** 0104679709

**Correo electrónico:** juancobos1605@gmail.com

Christian Alexander Moreira Jara

**CI:** 0105250674

**Correo electrónico:** chris\_alexis@live.com

**Tutor:**

Ing. Irene Priscila Cedillo Orellana, PhD.

**CI:** 0102815842

**Cuenca-Ecuador  
6-septiembre-2022**

---

## RESUMEN

En la actualidad, la tecnología se ha convertido en una parte fundamental en la vida cotidiana de todas las personas, con ella, se han descubierto diferentes maneras de interacción con el usuario. Entre las formas más innovadoras de interacción humano-computador están aquellas en las que interviene la vista, la voz, interacción mediante pantallas táctiles y en los últimos años ha ganado importancia la interacción cerebro-computador gracias a los dispositivos que promueven las interfaces cerebro computador (BCI-Brain Computer Interfaces); ya que, con esta interacción, la ciencia busca brindar ayuda a aquellas personas que sufren de ciertas discapacidades que dificultan su interacción con el entorno. Sin embargo, al implementar aplicaciones con dichas interfaces, se mejora la calidad de vida de estas personas, al permitirles interactuar con su entorno mediante el cerebro. Por tal motivo Brain Computer Interface ha ganado interés en diversos lugares del mundo, en varios países se desarrollan nuevos sistemas centrados en este tipo de tecnología; ya que el objetivo principal de un sistema BCI, consiste en crear una conexión especializada, que permita al usuario tener un control sobre diferentes dispositivos, por ejemplo: computadoras, prótesis neurológicas, tecnologías productoras de voz, etc.

El presente trabajo de titulación, propone un nuevo método para evaluar la calidad en uso y de producto, existente en los sistemas BCI, el cual tiene el nombre de BCIS-QUAM. Dicho método de evaluación emplea un modelo de calidad, elaborado a partir de una revisión sistemática de la literatura, en donde se analizan algunos aspectos que permiten comprender el avance científico en esta área de la ciencia y de esta manera, alcanzar una correcta evaluación del sistema BCI.

Finalmente, para mostrar la factibilidad del método propuesto, se desarrolló un sistema basado que hace uso de interfaces cerebro-computador, el cual fue empleado en

un cuasiexperimento para probar la viabilidad de la solución propuesta. El método de evaluación, tiene como público objetivo los ingenieros de software, cuya población se ha buscado representar con 20 ingenieros de software, como una forma de evaluación inicial al método, sin embargo, en trabajos futuros se busca alcanzar un mayor número de sujetos. Los participantes fueron preparados con los conocimientos necesarios para desarrollar el cuasiexperimento; dando como resultado que el método de evaluación es fácil de utilizar, útil y genera una intención de uso en el futuro. Además, se obtuvo información para trabajos futuros.

**Palabras clave:** Brain Computer Interface. BCI. Método de evaluación. Calidad de software. Modelo de calidad. HCI. Electrodo.

## ABSTRACT

Currently, technology has become a fundamental part of everyone's daily life, with it, different ways of interacting with the user have been discovered. Among the most innovative forms of human-computer interaction are those in which brain-computer interaction is involved, and in recent years brain-computer interaction has gained importance thanks to devices that promote brain-computer interfaces (BCI-Brain Computer Interfaces); since, with this interaction, science seeks to provide help to those people who suffer from certain disabilities that make it difficult for them to interact with the environment. However, by implementing applications with these interfaces, the quality of life of these people is improved, by allowing them to interact with their environment through the brain. For this reason, Brain Computer Interface has gained interest in various parts of the world, in several countries new systems focused on this type of interaction technology are being developed; since the main objective of a BCI system is to create a specialized connection that allows the user to have control over different devices, for example: computers, neurological prostheses, voice-producing technologies, etc.

The present titling work proposes a new method to evaluate the quality in use and of the product, existing in the BCI systems, which has the name of BCIS-QUAM. Said evaluation method uses a quality model, elaborated from a systematic review, where some aspects are analyzed that allow understanding the scientific advance in this area of science and in this way, achieve a correct evaluation of the BCI system.

Finally, to show the feasibility of the proposed method, a system based on brain-computer interaction interfaces was developed, which was used in a quasi-experiment to test the feasibility of the proposed solution. The evaluation method has software engineers as its target audience, whose population has been sought to represent with 20 software engineers, as a form of initial evaluation of the method, however, in future works it is sought to reach a greater number of subjects. The participants were prepared with the necessary knowledge to develop the quasi-experiment; resulting in the evaluation method being easy to use, useful and generating an intention to use in the future. In addition, information was obtained for future work.

**Keywords:** Brain Computer Interface. BCI. Evaluation method. Software quality. Quality model. HCI. Electrodes.

## ÍNDICE

|   |    |
|---|----|
| CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN                                  | 21 |
| 1.1 Antecedentes  | 21 |
| 1.2 Objetivos   | 22 |
| 1.2.1 Objetivo General                                    | 22 |
| 1.2.2 Objetivos Específicos                               | 22 |
| 1.3 Justificación   | 23 |
| 1.4 Alcance   | 24 |
| 1.5 Establecimiento de Hipótesis                          | 25 |
| 1.5.1 Hipótesis principal                                 | 25 |
| 1.5.2 Hipótesis secundarias                               | 25 |
| 1.6 Metodología empleada                                  | 25 |
| 1.7 Estructura del documento                              | 27 |
| CAPÍTULO 2: MARCO TECNOLÓGICO                             | 29 |
| 2.1 Brain Computer Interface (BCI)                        | 29 |
| 2.1.1 ¿Qué es Brain Computer Interface (BCI)?             | 29 |
| 2.1.2 Tipos de sistemas Brain Computer Interface          | 30 |
| 2.1.3 Estructura de un sistema Brain Computer Interface   | 33 |
| 2.1.4 Señales eléctricas cerebrales                       | 36 |
| 2.1.5 Métodos para registrar la actividad cerebral        | 37 |
| 2.1.6 Electroencefalografía (EEG)                         | 37 |
| 2.2 Calidad de Software                                   | 38 |
| 2.2.1 ¿Qué es la calidad de software?                     | 38 |
| 2.2.2 ¿Qué son los modelos de calidad?                    | 39 |
| 2.2.3 Estructura de un modelo de calidad                  | 40 |
| 2.2.4 Enfoque de los modelos de calidad                   | 40 |
| 2.2.5 ISO/IEC 25010                                       | 42 |
| CAPÍTULO 3: ESTADO DEL ARTE                               | 46 |
| 3.1 Introducción a las revisiones sistemáticas            | 46 |
| 3.2 Revisión sistemática de la literatura                 | 47 |
| 3.2.1 Evaluación de la calidad                            | 54 |
| 3.3 Ejecución de la revisión sistemática de la literatura | 54 |

|  |           |
|--|-----------|
| 3.3.1 Selección de estudios primarios  | 54        |
| 3.4 Difusión de los resultados   | 56        |
| 3.4.1 Resultados por año   | 56        |
| 3.4.2 Resultados de estudios primarios   | 57        |
| 3.4.3 Resultados de estudios primarios   | 59        |
| 3.4.4 Comparación de los criterios de extracción   | 63        |
| <b>CAPÍTULO 4: MÉTODO DE EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE SISTEMAS BRAIN<br/>COMPUTER INTERFACE</b> | <b>65</b> |
| 4.1 Contexto   | 65        |
| 4.2 Metodología propuesta  | 66        |
| 4.2.1. Actividad 1: Establecer requerimientos de evaluación                                    | 67        |
| 4.2.2. Actividad 2: Especificar la evaluación  | 70        |
| 4.2.3. Actividad 3: Diseñar la evaluación  | 71        |
| 4.2.4. Actividad 4: Ejecutar la evaluación   | 73        |
| 4.2.5. Actividad 5: Concluir la evaluación   | 76        |
| <b>CAPÍTULO 5: MODELO DE CALIDAD</b>   | <b>78</b> |
| 5.1 Calidad de Software  | 78        |
| 5.2 Modelo de calidad de software  | 78        |
| 5.3 Usabilidad   | 79        |
| 5.3.1 Inteligibilidad  | 79        |
| 5.3.2 Aprendizaje  | 80        |
| 5.3.3 Operabilidad   | 81        |
| 5.3.4 Protección contra errores de usuario   | 82        |
| 5.3.5 Estética   | 82        |
| 5.3.6 Experiencia de usuario   | 83        |
| 5.3.7 Accesibilidad  | 83        |
| <b>CAPÍTULO 6: CREACIÓN DE UN SISTEMA QUE HACE USO DE INTERFACES<br/>CEREBRO-COMPUTADOR</b>    | <b>85</b> |
| 6.1 Contexto   | 85        |
| 6.2 Estructura RaceBCI   | 85        |
| 6.2.1 Adquisición de la señal  | 86        |
| 6.2.2 Procesamiento de la señal  | 88        |
| 6.2.3 Aplicación   | 89        |
| <b>CAPÍTULO 7: EVALUACIÓN EMPÍRICA</b>   | <b>92</b> |

|  |  |     |
|--|--|-----|
| 7.1  | Contextualización  | 92  |
| 7.2  | Modelos teóricos de evaluación de ingeniería de software | 92  |
| 7.2.1.   | Modelo de aceptación de tecnología (TAM)                 | 92  |
| 7.3  | Cuasiexperimento dirigido a ingenieros de software       | 94  |
| 7.3.1.   | Adaptando MEM  | 94  |
| 7.3.2.   | Definición del alcance                                   | 97  |
| 7.3.3.   | Planificación del cuasiexperimento                       | 98  |
| 7.3.4.   | Ejecución y análisis del cuasiexperimento                | 102 |
| 7.4  | Empaquetado y presentación de los resultados             | 108 |
| 7.5  | Amenazas a la validez                                    | 117 |
| 7.5.1.   | Validez interna  | 117 |
| 7.5.2.   | Validez externa  | 118 |
| 7.5.3.   | Validez del constructo                                   | 118 |
| 7.5.4.   | Validez de la conclusión                                 | 118 |
| CAPÍTULO 8: CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO                        |  | 119 |
| 8.1.   | Conclusiones   | 119 |
| 8.1.1.   | Objetivo general   | 119 |
| 8.1.2.   | Objetivo específico 1                                    | 119 |
| 8.1.3.   | Objetivo específico 2                                    | 120 |
| 8.1.4.   | Objetivo específico 3                                    | 121 |
| 8.1.5.   | Objetivo específico 4                                    | 121 |
| 8.2.   | Trabajos futuros   | 122 |
| REFERENCIAS  |  | 124 |
| ANEXOS   |  | 128 |
| Anexo A: Referencias de la revisión sistemática de la literatura |  | 128 |
| A1.  | Estudios seleccionados en la revisión de la literatura   | 128 |
| A2.  | Estudios por criterio de extracción                      | 131 |
| Anexo B: Modelo de Calidad                                       |  | 134 |
| B1:  | Parte 1 Usabilidad                                       | 134 |
| B2:  | Parte 2 Experiencia de usuario                           | 135 |
| B3:  | Parte 3 Interfaz gráfica                                 | 135 |
| Anexo C: Sistema RaceBCI   |  | 136 |
| C1:  | Código del Sistema RaceBCI                               | 136 |
| C2.  | Presentaciones del sistema RaceBCI                       | 140 |

|   |     |
|---|-----|
| Anexo D: Cuasiexperimento dirigido a Ingenieros de Software           | 142 |
| D1. Página web del cuasiexperimento                                   | 142 |
| D2. Guía de la metodología presentada en el cuasiexperimento          | 145 |
| D3. Documento del cuasiexperimento                                    | 149 |
| D4. Encuesta  | 155 |
| D5. Resultados de la encuesta presentada a los Ingenieros de software | 158 |
| Anexo E: Contribuciones científicas aceptadas                         | 160 |
| E1: Artículo  | 160 |



## ÍNDICE DE TABLAS

|   |     |
|---|-----|
| <b>Tabla 1.</b> Características de los tipos de sistemas BCI según la naturaleza de la señal              | 32  |
| <b>Tabla 2.</b> Categorías de los sistemas BCI de acuerdo con las señales neuronales que utilizan         | 36  |
| <b>Tabla 3.</b> Tipos de ondas en base a su frecuencia  | 38  |
| <b>Tabla 4.</b> Características relacionadas a la calidad en uso.   | 42  |
| <b>Tabla 5.</b> Características y subcaracterísticas utilizadas en la ISO/IEC 25010.                      | 42  |
| <b>Tabla 6.</b> Preguntas de investigación  | 48  |
| <b>Tabla 7.</b> Bibliotecas digitales utilizadas  | 49  |
| <b>Tabla 8.</b> Cadena de búsqueda y sus conectores   | 50  |
| <b>Tabla 9.</b> Conferencias consideradas para la revisión de la literatura                               | 51  |
| <b>Tabla 10.</b> Revistas utilizadas en la revisión de la literatura                                      | 51  |
| <b>Tabla 11.</b> Criterios de extracción para RSQ1  | 52  |
| <b>Tabla 12.</b> Criterios de extracción para RSQ2  | 53  |
| <b>Tabla 13.</b> Criterios de extracción para RSQ3  | 53  |
| <b>Tabla 14.</b> Criterios de extracción para RQ4   | 53  |
| <b>Tabla 15.</b> Calidad de los artículos seleccionados en base al número de citas                        | 54  |
| <b>Tabla 16.</b> Número de documentos según el tipo de búsqueda   | 54  |
| <b>Tabla 17.</b> Cantidad de Búsquedas Automáticas  | 55  |
| <b>Tabla 18.</b> Cantidad de estudios según el tipo de búsqueda realizado en las librerías y conferencias | 55  |
| <b>Tabla 19.</b> Resultados obtenidos en base a cada criterio   | 57  |
| <b>Tabla 20.</b> Roles que intervienen en el método BCIS-QUAM   | 67  |
| <b>Tabla 21.</b> Goal-Question-Metric (GQM)   | 69  |
| <b>Tabla 22.</b> Sub-subcaracterísticas y atributos de Inteligibilidad                                    | 78  |
| <b>Tabla 23.</b> Sub-subcaracterísticas y atributos de Aprendizaje  | 79  |
| <b>Tabla 24.</b> Sub-subcaracterísticas y atributos de Operabilidad                                       | 80  |
| <b>Tabla 25.</b> Sub-subcaracterísticas y atributos de Protección contra errores de usuario               | 81  |
| <b>Tabla 26.</b> Sub-subcaracterísticas y atributos de Estética   | 81  |
| <b>Tabla 27.</b> Sub-subcaracterísticas y atributos de Experiencia de usuario                             | 82  |
| <b>Tabla 28.</b> Sub-subcaracterísticas y atributos de Accesibilidad                                      | 83  |
| <b>Tabla 29.</b> Cuestionario para medir las variables de percepción. Fuente: Elaboración propia          | 94  |
| <b>Tabla 30.</b> Preguntas abiertas del cuestionario. Fuente: Elaboración propia                          | 96  |
| <b>Tabla 31.</b> Objetivo del cuasiexperimento. Fuente: Elaboración propia.                               | 96  |
| <b>Tabla 32.</b> Variables independientes basadas en la percepción.                                       | 99  |
| <b>Tabla 33.</b> Descripción de las variables basadas en el rendimiento.                                  | 100 |
| <b>Tabla 34.</b> Prueba de Shapiro-Wilk. Fuente: Elaboración propia.                                      | 102 |
| <b>Tabla 35.</b> Estadística descriptiva para las variables basadas en la percepción del usuario.         | 103 |
| <b>Tabla 36.</b> Niveles de significancia propuestos por Moody. Fuente: (Moody, 2001)                     | 104 |
| <b>Tabla 37.</b> Regresión simple entre la eficiencia actual y la facilidad de uso percibida.             | 104 |
| <b>Tabla 38.</b> Regresión simple entre la efectividad actual y la utilidad percibida.                    | 105 |

|   |     |
|---|-----|
| <b>Tabla 39.</b> Regresión simple entre la facilidad de uso percibida y la utilidad percibida.      | 105 |
| <b>Tabla 40.</b> Regresión simple entre la intención de uso y la utilidad percibida.                | 106 |
| <b>Tabla 41.</b> Regresión lineal simple entre la intención de uso y la facilidad de uso percibida. | 107 |
| <b>Tabla 42.</b> Resumen del cuasiexperimento sobre el método propuesto                             | 114 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 1.</b> Modelo de investigación cuantitativo. Fuente: (Hernández et al., 2014).  | 26 |
| <b>Figura 2.</b> Esquema del documento. Fuente: Elaboración propia.   | 28 |
| <b>Figura 3.</b> Modelo de Interfaz Cerebro Computador. Fuente: (Araujo et al., 2016b)  | 30 |
| <b>Figura 4.</b> Tipos de sistemas BCI. Fuente: (Alonso-Valerdi et al., 2019)   | 31 |
| <b>Figura 5.</b> Tipos de sistemas BCI según la naturaleza del método de adquisición de la señal.<br>Fuente: Elaboración Propia                             | 33 |
| <b>Figura 6.</b> Estructura de un sistema BCI. Fuente: (Gutiérrez-martínez et al., 2013)  | 34 |
| <b>Figura 7.</b> Clasificación de los métodos para registrar la actividad cerebral en base a su categoría. Fuente: (Gutiérrez-martínez et al., 2013)        | 37 |
| <b>Figura 8.</b> Estructura de un modelo de calidad. Fuente: (Callejas-Cuervo et al., 2017a)  | 40 |
| <b>Figura 9.</b> Enfoques de calidad y su relación entre ellos. Fuente: (Moreno S. et al., 2008)  | 41 |
| <b>Figura 10.</b> Número de estudios incluidos y excluidos durante la ejecución de la revisión sistemática. Fuente: Elaboración Propia                      | 56 |
| <b>Figura 11.</b> Artículos seleccionados por años de publicación. Fuente: Elaboración propia   | 57 |
| <b>Figura 12.</b> Gráfica comparativa entre EC1: Contexto de investigación y EC2: Herramienta utilizada. Fuente: Elaboración propia                         | 63 |
| <b>Figura 13.</b> Gráfica comparativa de EC3: Tipos de usuario con EC2: Herramienta utilizada y EC6: Técnica aplicada Fuente: Elaboración propia            | 64 |
| <b>Figura 14.</b> Gráfica comparativa de EC8: Características de calidad de producto con EC7: Características de calidad de uso Fuente: Elaboración propia. | 64 |
| <b>Figura 15.</b> Método de evaluación de la calidad BCIS-QUAM. Fuente: Elaboración propia  | 66 |
| <b>Figura 16.</b> Fase 1: Establecer requerimientos de evaluación. Fuente: Elaboración propia.  | 68 |
| <b>Figura 17.</b> Fase 2: Especificar la evaluación. Fuente: Elaboración propia   | 70 |
| <b>Figura 18.</b> Fase 3: Diseñar la evaluación. Fuente: Elaboración propia.  | 72 |
| <b>Figura 19.</b> Fase 4: Ejecutar la evaluación. Fuente: Elaboración propia.   | 74 |
| <b>Figura 20.</b> Fase 5: Concluir la evaluación. Fuente: Elaboración propia.   | 75 |
| <b>Figura 21.</b> Logo del sistema RaceBCI. Fuente: Elaboración propia.   | 84 |
| <b>Figura 22.</b> Estructura del sistema RaceBCI Fuente: Elaboración propia.  | 85 |
| <b>Figura 23.</b> Casco Ultracórtex Mark IV de OpenBCI. Fuente: (OpenBCI, 2022).  | 85 |
| <b>Figura 24.</b> Electrodo utilizados en el casco Ultracórtex Mark IV de OpenBCI. Fuente: (OpenBCI, 2022).   | 86 |
| <b>Figura 25.</b> Placa OpenBCI CytonDaisy. Fuente: (OpenBCI, 2022).  | 86 |
| <b>Figura 26.</b> Ondas cerebrales en OpenBCI_GUI. Fuente: (OpenBCI, 2022).   | 87 |
| <b>Figura 27.</b> Funcionamiento de los umbrales en RaceBCI. Fuente: Elaboración propia.  | 88 |
| <b>Figura 28.</b> Estructura del Arduino Nano. Fuente: (MCI Electronics, n.d.)  | 89 |
| <b>Figura 29.</b> Código utilizado en el Arduino Nano. Fuente: Elaboración propia   | 90 |
| <b>Figura 30.</b> Modelo de aceptación tecnológica, TAM. Fuente: (Davis, 1989).   | 92 |
| <b>Figura 31.</b> Modelo de evaluación de métodos (MEM). Fuente: (Davis, 1989).   | 92 |
| <b>Figura 32.</b> Distribución de preguntas del cuestionario. Fuente: Elaboración propia.   | 95 |
|   | 10 |

|  |     |
|--|-----|
| <b>Figura 33.</b> Diagrama de cajas para las variables PEOU, PU e ITU. Fuente: Elaboración propia.             | 102 |
| <b>Figura 34.</b> Resultados de la primera pregunta del cuestionario. Fuente: Elaboración propia.              | 108 |
| <b>Figura 35.</b> Resultados de la segunda pregunta del cuestionario. Fuente: Elaboración propia.              | 108 |
| <b>Figura 36.</b> Resultados de la tercera pregunta del cuestionario. Fuente: Elaboración propia.              | 109 |
| <b>Figura 37.</b> Resultados de la cuarta pregunta del cuestionario. Fuente: Elaboración propia.               | 109 |
| <b>Figura 38.</b> Resultados de la quinta pregunta del cuestionario. Fuente: Elaboración propia.               | 110 |
| <b>Figura 39.</b> Resultados de la sexta pregunta del cuestionario. Fuente: Elaboración propia.                | 110 |
| <b>Figura 40.</b> Resultados de la séptima pregunta del cuestionario. Fuente: Elaboración propia.              | 111 |
| <b>Figura 41.</b> Resultados de la octava pregunta del cuestionario. Fuente: Elaboración propia.               | 111 |
| <b>Figura 42.</b> Resultados de la novena pregunta del cuestionario. Fuente: Elaboración propia.               | 112 |
| <b>Figura 43.</b> Resultados de la décima pregunta del cuestionario. Fuente: Elaboración propia.               | 112 |
| <b>Figura 44.</b> Resultados de la onceava pregunta del cuestionario. Fuente: Elaboración propia.              | 113 |
| <b>Figura 45.</b> Resultados de la doceava pregunta del cuestionario. Fuente: Elaboración propia.              | 113 |
| <b>Figura 46.</b> Resultados de la treceava pregunta del cuestionario. Fuente: Elaboración propia.             | 114 |
| <b>Figura 47.</b> Resultados de la catorceava pregunta del cuestionario. Fuente: Elaboración propia.           | 114 |
| <b>Figura 48.</b> Conclusiones obtenidas de aplicar el MEM en el método BCIS-QUAM. Fuente: Elaboración propia. | 115 |

## Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

---

Juan Manuel Cobos Quinde en calidad de autor/a y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Desarrollo de un modelo de calidad para la evaluación de calidad en uso y de producto de sistemas que utilizan interfaces cerebro-computador (Brain Computer Interface)", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 6 de septiembre del 2022



Juan Manuel Cobos Quinde  
C.I: 0104679709

## Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

---

Christian Alexander Moreira Jara en calidad de autor/a y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación “Desarrollo de un modelo de calidad para la evaluación de calidad en uso y de producto de sistemas que utilizan interfaces cerebro-computador (Brain Computer Interface)”, de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 6 de septiembre del 2022



Christian Alexander Moreira Jara  
C.I: 0105250674

## Cláusula de Propiedad Intelectual

---

Juan Manuel Cobos Quinde, autor del trabajo de titulación "Desarrollo de un modelo de calidad para la evaluación de calidad en uso y de producto de sistemas que utilizan interfaces cerebro-computador (Brain Computer Interface)", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor/a.

Cuenca, 6 de septiembre del 2022



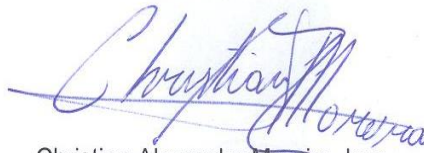
Juan Manuel Cobos Quinde  
C.I: 0104679709

## Cláusula de Propiedad Intelectual

---

Christian Alexander Moreira Jara, autor del trabajo de titulación "Desarrollo de un modelo de calidad para la evaluación de calidad en uso y de producto de sistemas que utilizan interfaces cerebro-computador (Brain Computer Interface)", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor/a.

Cuenca, 6 de septiembre del 2022



Christian Alexander Moreira Jara

C.I: 0105250674



## AGRADECIMIENTOS

Primeramente, quiero agradecer a Dios, por brindarme la oportunidad de crecer como persona y como profesional durante esta etapa de mi vida, por darme salud y fortaleza en cada momento.

Este trabajo de titulación, no hubiera sido posible si la Ing. Priscila Cedillo, no nos hubiera brindado su confianza y apoyo en cada una de las actividades desarrolladas, por lo que quiero expresar mi profundo agradecimiento por su apertura, su confianza y su profesionalismo, cada uno de los conocimientos brindados por ella, han sido de mucha ayuda en el desarrollo de este trabajo de titulación.

También quiero expresar mi agradecimiento al Ing. Paul Cárdenas, su apoyo y compromiso en cada una de las actividades planteadas fue de vital importancia para culminar este trabajo de titulación. Sus conocimientos y consejos fueron muy valiosos para solventar problemas que surgieron en el transcurso de este trabajo de titulación.

Agradezco a la Psic. Daniela Prado, quien con sus conocimientos fue de vital importancia para realizar la revisión sistemática presentada en este trabajo de titulación, por otro lado, agradezco a la Ing. Cristina Sánchez, por su paciencia y apoyo durante el desarrollo de la evaluación empírica, sus conocimientos fueron de mucha ayuda. Finalmente agradecer al Ing. Wilson Valdez, por su apoyo recibido al momento de dar a conocer el sistema desarrollado en este trabajo de comunicación.

Agradezco a la Universidad de Cuenca, por brindarme la oportunidad de pertenecer a esta institución y adquirir todos los conocimientos necesarios para desarrollar este trabajo de titulación.

Quiero expresar mi profundo agradecimiento a mis padres y mi hermana, por apoyarme en cada momento y no permitir que decaiga cuando las cosas se ponían difíciles, agradecer a toda mi familia , amigos y demás personas que formaron parte de esta etapa de mi vida.

Por último, agradecer a todas las personas que participaron de forma directa o indirecta en el desarrollo de este trabajo de titulación, todos los aportes recibidos fueron de vital importancia para culminar este trabajo de titulación.

**Juan Cobos**

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Ingeniera Priscila Cedillo, quien nos brindó su confianza y apoyo en todo este proceso. Ella ha sido un ejemplo de profesionalismo y calidad humana, con su continuo apoyo y guía se logró culminar este trabajo de titulación.

Agradezco al Ingeniero Paul Cárdenas, quien con sus conocimientos y consejos fue de gran valor para este trabajo de titulación. Un excelente profesional de su área quien supo ayudarnos a solventar los problemas presentados en el desarrollo del trabajo de titulación.

Agradezco a la Universidad de Cuenca, a toda la facultad de ingeniería y a los docentes y personal administrativo que la conforman, quienes con sus conocimientos hicieron que pueda crecer como profesional.

Agradezco a mis padres y familia que en todo este proceso me han brindado su apoyo incondicional, que a pesar de las circunstancias siempre han estado para mí, gracias por brindarme su confianza y cariño.

A todos ustedes mil gracias.

**Christian Moreira**

## DEDICATORIA

Quiero dedicar este trabajo de titulación a mis padres Manuel y Mariana, quienes me han inculcado valores y me han enseñado a luchar por mis sueños, sin importar las adversidades que se atraviesen en el camino, siempre me han apoyado en todo momento y han sido un pilar fundamental para ser el ser humano que soy hoy.

A mi hermana, Mariana, quien estuvo en cada paso, durante mi etapa universitaria, ella ha sido un pilar fundamental en cada etapa de mi vida y ha sido un ejemplo a seguir, gracias por apoyarme siempre y levantarme cuando las cosas se ponían difíciles.

A mi tía Rocío, por cuidarme desde pequeño e inculcarme los valores del sacrificio, del esfuerzo y responsabilidad, por apoyarme en cada momento, también a mi primo Eduardo, por su apoyo incondicional.

A mi abuelito Carlos, quien, desde el cielo, sé que celebra cada uno de mis triunfos como propios de él.

Finalmente, a toda mi familia y amigos, que han sido parte de esta etapa de mi vida y que, en cualquier momento de ella, han sido un apoyo para seguir adelante y culminar esta meta.

**Juan Cobos**

## DEDICATORIA

Quiero dedicar este trabajo a Dios que me permitió finalizar esta etapa en mi vida de la mejor manera, ya que me dio la fortaleza y vida para afrontar los retos y obstáculos presentes en mi vida estudiantil y profesional.

Dedico este trabajo a mis padres Ramón y Ana, quienes siempre me han brindado su apoyo incondicional tanto en la parte espiritual como en la económica; este logro también es de ustedes y sin su apoyo y amor no lo habría logrado. Me dieron la oportunidad de obtener las herramientas necesarias para poderme enfrentar a la vida.

También dedico este trabajo a mi hermano Danny y a su esposa Sandy que siempre me dieron ánimos para seguir adelante, y me hacían sentir que estaba por el camino correcto.

También a mis sobrinos Matías y Josseline, quienes fueron un motor importante en mi vida.

Para finalizar dedico este trabajo a mi hermana Josseline quien era un ejemplo de lucha y sabiduría, a su corta edad me enseñó muchas cosas las cuales fui poniendo en práctica en toda mi vida estudiantil y profesional.

**Christian Moreira**

## ACRÓNIMOS

### **B**

#### **BCI**

Brain Computer Interface (Interfaces cerebro ordenador)

### **E**

#### **EGG**

Electroencefalograma

### **H**

#### **HCI**

Interacción Humano Computador

### **I**

#### **ISO**

Organización Internacional de Normalización

#### **ITU**

Intención de Uso

### **P**

#### **PEOU**

Facilidad de Uso Percibida

#### **PU**

Utilidad Percibida

### **S**

#### **SNC**

Sistema Nervioso Central

## CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

Este capítulo tiene como objetivo presentar los antecedentes, justificación y alcance del este trabajo de titulación; también, se incluyen las hipótesis, objetivos generales y específicos. Finalmente, se detalla la estructura del documento con el fin de guiar al lector a lo largo de su contenido.

### 1.1 Antecedentes

En la actualidad, la tecnología se ha convertido en una parte fundamental en la vida las personas (Zapata et al., 2018); con ella, se han descubierto diferentes maneras de interacción con el usuario. Entre las formas de interacción, podemos destacar la interacción por medio de la vista, la interacción utilizando la voz, interacción mediante pantallas táctiles y en los últimos años ha ganado importancia la interacción cerebro-computador. Con esta interacción, la ciencia busca brindar una ayuda a aquellas personas que sufren de discapacidades motoras severas (García & Gentiletti, 2008); por ejemplo, esclerosis lateral amiotrófica, infarto cerebral o lesión medular. Al implementar aplicaciones con dicha interacción, se mejora la calidad de vida de estas personas, al permitirles interactuar con el entorno haciendo uso de las señales cerebrales (Arboleda et al., 2009), es importante mencionar que, en la actualidad, se está implementando esta interfaz para todo tipo de usuario final (González et al., 2018).

El progreso exponencial de las herramientas tecnológicas ha sido de gran importancia para que, las personas con discapacidad puedan potenciar su capacidad funcional (Gutiérrez et al., 2013). Durante los últimos años, BCI ha ganado interés en diversos lugares del mundo, en varios países, se desarrollan nuevos sistemas centrados en mejorar la rehabilitación de pacientes con desórdenes neuromusculares (Gutiérrez et al., 2013). Por otro lado, existe la posibilidad de usar electroencefalografía (EEG-*Electroencephalogram*), para descifrar intenciones; de tal manera que, el usuario pueda controlar dispositivos mediante la actividad cerebral. La mayoría de aplicaciones están orientadas a mejorar algún aspecto de la vida del usuario como puede ser la comunicación, las capacidades cognitivas, autonomía personal y por ende su calidad de vida, etc. (Hornero et al., 2012).

BCI es conocido como una interfaz asistida por computadora que permite la interacción directa entre el cerebro y el entorno de un sujeto, a través de actuadores enlazados al computador (Moreno et al., 2019). Estos sistemas descifran la intención del usuario de moverse o comunicarse; para ello, utilizan el análisis de señales eléctricas

cerebrales que, incluyen potenciales corticales lentos, potenciales evocados visuales, potencial P300 y ritmos beta o mu registrados sobre el cuero cabelludo (Gutiérrez et al., 2013).

El objetivo principal de un sistema BCI, consiste en crear una conexión especializada, que permita al usuario, tener un control sobre diferentes dispositivos, como por ejemplo computadoras, prótesis neurológicas, tecnologías productoras de voz, etc. (Araujo et al., 2016a); para ello, los sistemas BCI, primero se encargan de registrar la señal EEG, luego se procesa la información obtenida y se extrae la parte relevante para controlar una máquina o dispositivo, de la cual se obtiene un feedback (Nadal & Opisso, 2008). La base tecnológica de BCI radica en la noción de que la actividad cerebral puede proporcionar conocimientos únicos sobre las personas y su comportamiento, además estos conocimientos pueden ser utilizados para el desarrollo de sistemas mucho más complejos, permitiendo cambiar la forma de interacción entre los seres humanos y su entorno (Lance et al., 2012).

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivo General

Este trabajo tiene como objetivo general, crear una metodología de evaluación y un modelo de calidad que permitan evaluar la calidad en sistemas basados en “*Brain Computer Interface*”.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- Realizar una revisión sistemática sobre sistemas BCI y la calidad.
- Crear un modelo de calidad y un método de evaluación alineados con estándares de calidad.
- Aplicar la solución en la evaluación de un sistema BCI.
- Evaluar la solución con la ayuda de ingenieros de software.

## 1.3 Justificación

En la actualidad, la BCI, es una rama en potencial desarrollo, ya que el hecho de poder interactuar con el exterior utilizando sólo las señales emanadas del cerebro humano, ha captado la atención de diferentes áreas como la automática, robótica, informática, marketing y muchas más (González et al., 2018). La idea que presenta esta tecnología a la sociedad, puede resultar muy sencilla; esto es, conseguir transformar nuestros pensamientos en acciones reales, alrededor de nuestro entorno; sin embargo, cabe recalcar que el reto tecnológico es enorme, ya que involucra diversos problemas en su fase de desarrollo y ejecución (Minguez, 2013); esto debido a que, la actividad cerebral de cada usuario es diferente.

Los sistemas BCI empezaron su trayectoria desde la década de 1970 (Arboleda et al., 2009); al principio, estos sistemas fueron desarrollados para facilitar el día a día de las personas que presentaban una discapacidad, gracias a el EEG se han adaptado las interfaces cerebro computador a aplicaciones más generales como por ejemplo los videojuegos (Jain et al., 2015).

Por otro lado, para garantizar el éxito de cualquier software, se debe cumplir con tres criterios; éstos son confiabilidad, usabilidad y seguridad (Rodríguez et al., 2015); siendo la usabilidad una característica de calidad, que conlleva a un sistema percibido como eficaz, es decir altamente eficiente y efectivo; con una alta experiencia de usuario, fácil aprendizaje, operabilidad, entre otros aspectos que hacen que un sistema se utilizado por sus usuarios (ISO/IEC, 2011); sin embargo, al momento de evaluar la usabilidad de los sistemas BCI, se han empleado diferentes formas de evaluación de un sistema BCI, como por ejemplo, en Garzón & Tomás (2013), se realiza la comparación entre un sistema BCI desarrollado por ellos con un el sistema comercial USBamp para determinar su usabilidad, por otro lado en Ezquerro et al., (2018), evalúan la usabilidad percibida por los usuarios al momento de utilizar un sistema BCI y para ello recopilaron el tiempo de uso, la cantidad de errores, el número de veces que el usuario canceló una actividad, promedio de tareas no válidas y el número de tareas realizadas, estos valores fueron almacenados automáticamente y analizados para determinar la usabilidad del sistema, mientras que Corralejo et al (2015), evaluó los tiempos que requerían diferentes usuarios para utilizar un sistema BCI y realizar una determinada actividad, esto con la finalidad de evaluar la funcionalidad y eficacia del sistema.

Como podemos observar, se han empleado diferentes formas para evaluar la usabilidad de un sistema BCI; sin embargo, ninguna de ellas se alinea con un estándar de



calidad emitido por una organización normativa, lo que hace que la forma de evaluación pueda tener brechas o no sea repetitiva y replicable, características buscadas por la ciencia. (2011), por esta razón y al no existir una herramienta que facilite la evaluación de calidad existente en un sistema BCI, resulta importante crear un método de evaluación se vea alineado a un método de propósito general y que, además, se adapte a las necesidades de evaluación propias del dominio al que está orientado, y en donde, sus especificidades sean analizadas y tomadas en consideración.

Por lo tanto, con el desarrollo de este trabajo de titulación, se busca obtener un modelo de calidad y un método de evaluación, que permita evaluar tres puntos clave de un sistema BCI, la primera es la usabilidad, la segunda es la experiencia de usuario y la tercera es la interfaz gráfica, para la usabilidad se tomó como referencia el estándar ISO/IEC 25010; para la experiencia de usuario, se tomó como referencia la ISO/IEC 9241-210 y para la interfaz gráfica se tomó como referencia la Web Content Accessibility Guidelines (WCAG) 2.1.

Finalmente, en este trabajo de titulación se plantea una metodología que, abarque todos los pasos que se debe realizar para evaluar un sistema BCI y como artefacto principal, el modelo de calidad mencionado anteriormente. Para el desarrollo de esta metodología se tomó ha tomado como referencia la ISO/IEC 25040 (2011).

## 1.4 Alcance

1. **Fase exploratoria:** Estudio bibliográfico para determinar las necesidades de investigación y la brecha tecnológica. Se buscará determinar las métricas existentes para evaluar la calidad en uso y calidad de producto en sistemas BCI.
2. **Fase descriptiva:** Especificación de propiedades del dominio a solucionar, así como necesidades, restricciones y requerimientos relacionados a sistemas BCI.
3. **Fase de instanciación:** Se desarrollará una aplicación basada en BCI, con la finalidad de determinar y evaluar la metodología creada, la misma que, emplea el modelo de calidad, en un entorno y con una solución real como un insumo de entrada y además que, sigue un método de evaluación alineado con el estándar ISO 25010.
4. **Fase de evaluación:** Mediante un cuasiexperimento, ingenieros de software establecerán que tan eficiente o efectivo es la solución encontrada.

## 1.5 Establecimiento de Hipótesis

### 1.5.1 Hipótesis principal

Las hipótesis principales para este trabajo de titulación son las siguientes:

- El modelo de calidad propuesto conjuntamente con el método de evaluación, que permite a los ingenieros y desarrolladores de software determinar y evaluar la calidad de uso y calidad de producto presente en sistemas que utilizan interfaces cerebro-computador.
- El modelo de calidad propuesto que permite la utilización de métricas al momento de evaluar la calidad de uso y calidad de producto de manera eficaz y eficiente en los sistemas que utilizan interfaces cerebro-computador.

### 1.5.2 Hipótesis secundarias

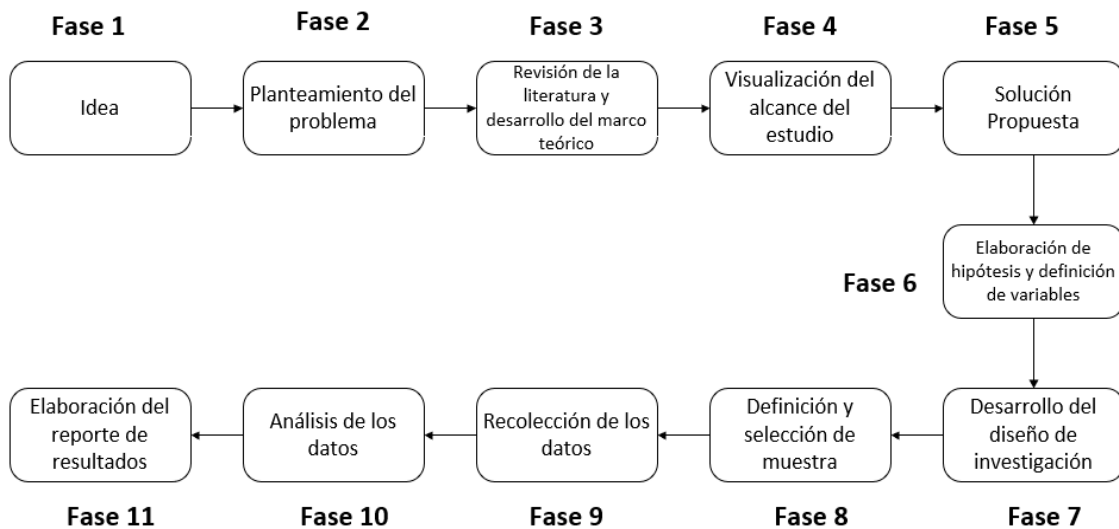
También se consideran las siguientes hipótesis secundarias, las mismas que conducen a la validación de las hipótesis principales mencionadas anteriormente:

- El modelo de calidad propuesto es consistente con métricas empleadas en sistemas que utilizan interfaces cerebro-computador documentados en material científico.
- El modelo de calidad provee a los ingenieros y desarrolladores de software una secuencia clara para realizar una evaluación de calidad en un sistema que utilice interfaces cerebro-computador

## 1.6 Metodología empleada

Para el desarrollo de este trabajo de titulación se escogió la metodología de investigación cuantitativa, esta consta de 10 fases propuestas por Hernández, Fernández y Baptista (2014), pero se integrará una fase adicional donde se especificará la solución propuesta dando así un total de 11 fases, las cuales se pueden observar en la siguiente

*Figura 1:*



**Figura 1.** Modelo de investigación cuantitativa. Fuente: (Hernández et al., 2014).

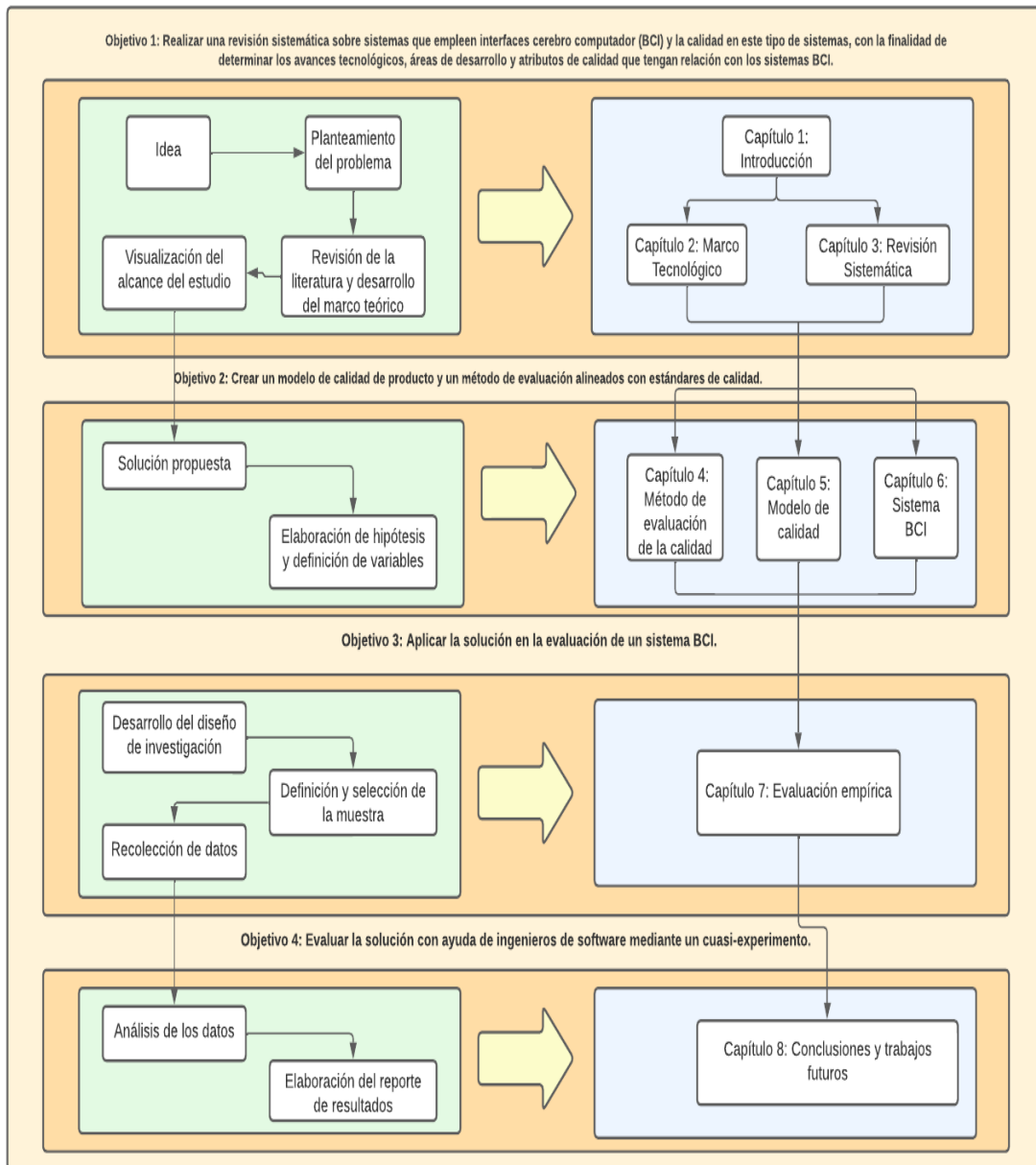
Cada fase se encuentra definida de la siguiente manera:

1. **Idea:** Consiste en originar las ideas de investigación sobre el diseño de un modelo de calidad para la evaluación de sistemas que utilizan interfaces cerebro-computador (Brain Computer Interface).
2. **Planteamiento del problema:** Se procede a plantear la problemática que origina la investigación, es importante tener en cuenta: los objetivos, la justificación, la motivación y la viabilidad de la misma. Para este caso se considera la falta de una herramienta que permita medir la calidad existente en los sistemas BCI.
3. **Desarrollo de la base tecnológica y revisión del estado del arte:** En esta fase se realiza una búsqueda de fundamentos teóricos, tecnológicos y del estado del arte, esto con el objetivo de presentar un trabajo autocontenido y posteriormente exponer los estudios que se están realizando sobre la problemática planteada. En esta ocasión el método seleccionado es una revisión sistemática de la literatura.
4. **Visualización del alcance del estudio:** El alcance de este estudio es correlacional, debido a que se cuantifican las relaciones entre conceptos y variables.
5. **Solución Propuesta:** La elaboración de un método de evaluación basado en la ISO/IEC 25040 y un modelo de calidad basado en la ISO/IEC 25010.
6. **Elaboración de hipótesis y definición de variables:** Establecer las hipótesis y con ellas se establecen variables dependientes e independientes.
  - **H1:** El modelo de calidad propuesto permite a los ingenieros y desarrolladores de software determinar y evaluar la calidad de uso y calidad de producto presente en sistemas que utilizan interfaces cerebro-computador (BCI).

- **H2:** EL modelo propuesto permite la utilización de métricas al momento de evaluar la calidad de uso y calidad de producto de manera eficaz y eficiente en los sistemas que utilizan interfaces cerebro-computador (BCI).
7. **Desarrollo del diseño de la investigación:** Mediante un cuasiexperimento se va a recopilar información destinada para verificar la validez de las hipótesis planteadas.
  8. **Definición y selección de la muestra:** El muestreo para este caso no va a ser aleatorio y estará conformado por alguno de estos profesionales: Ingenieros de software, ciencias de la computación, expertos en interfaz humano computador (HCI), ingenieros de sistemas y áreas relacionadas
  9. **Recolección de los datos:** Los datos serán recolectados a través de ejercicios que evalúen el modelo de calidad propuesto.
  10. **Análisis de los datos:** Analizar los datos a través de las siguientes actividades: seleccionar un software para el análisis de datos, ejecutar el software, explorar los datos, evaluar la confiabilidad y validez de los datos obtenidos. Método de evaluación para el modelo de calidad.
  11. **Elaboración del reporte de resultados:** Analizar el contexto y presentar los resultados obtenidos sobre el modelo de calidad como medio de soporte para evaluar la calidad en sistemas basados en BCI.

## 1.7 Estructura del documento

El presente trabajo de titulación establece la creación de un método de evaluación para sistemas BCI, el mismo empleará un modelo de calidad para la evaluación de la calidad en uso y de producto y la experiencia de usuario. Para ello, este trabajo se distribuye en ocho capítulos de la siguiente manera:



**Figura 2.** Esquema del documento. Fuente: Elaboración propia.

## CAPÍTULO 2: MARCO TECNOLÓGICO

Este capítulo tiene como objetivo, la introducción de diferentes conceptos que son fundamentales para la comprensión de este trabajo de titulación. Este capítulo está enfocado en dos áreas, la primera engloba todos los conceptos relacionados con *Brain Computer Interface* y la segunda engloba todos los conceptos relacionados con la calidad de software.

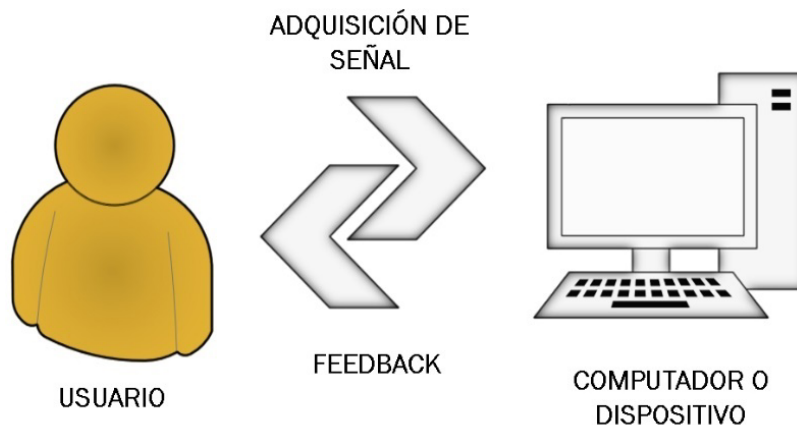
### 2.1 Brain Computer Interface (BCI)

#### 2.1.1 ¿Qué es Brain Computer Interface (BCI)?

Para comprender de mejor manera el concepto de BCI, se empezará definiendo el concepto de interfaz. Una interfaz es conocida como un dispositivo que permite la comunicación entre dos sistemas, para ello es necesario definir conexiones y el uso de dispositivos que hacen posible la comunicación entre los sistemas (Vela Dávila et al., 2017).

BCI es una interfaz asistida por el computador, que permite la interacción directa entre el cerebro y el entorno de un sujeto; esto es posible, gracias a actuadores enlazados al computador (Moreno et al., 2019). Estos sistemas se encargan de monitorizar la actividad cerebral y traducir determinadas características, que están asociadas a las intenciones del usuario, en comandos de control de dispositivos (Hornero et al., 2013), esta tecnología está basada en la adquisición de ondas cerebrales, que luego son procesadas e interpretadas mediante una computadora (Vela Dávila et al., 2017).

En sus inicios, el objetivo principal de las interfaces cerebro computador era crear una conexión especializada que permita a un individuo con discapacidad motora severa, tener un control sobre diferentes dispositivos como, por ejemplo: computadoras, aplicaciones, prótesis neurológicas o tecnologías productoras de voz (Araujo et al., 2016b). En la *Figura 3* se puede observar el modelo que se utiliza en una interfaz cerebro computadora.



**Figura 3.** Modelo de Interfaz Cerebro Computador. Fuente: (Araujo et al., 2016b)

## 2.1.2 Tipos de sistemas Brain Computer Interface

Los sistemas BCI se clasifican en cuatro tipos de interfaces: las activas, reactivas, pasivas e híbridas (Alonso-Valerdi et al., 2019). En la *Figura 4* se observa una esquematización de estas cuatro clases de sistemas BCI.

En Alonso-Valerdi et al, (2019) se describe los cuatro tipos de interfaces BCI más importantes, a continuación, se explicará cada uno de ellos:

- **Activas:** Los sistemas activos son aquellos que recuperan una salida mediante el control consciente por parte del usuario. Este tipo de sistema brinda una total libertad al usuario para manipular una aplicación o dispositivo externo.
- **Reactivas:** Los sistemas reactivos se caracterizan por ofrecer aplicaciones controladas mediante la reacción del usuario ante un estímulo sensorial externo, este puede ser: visual, auditivo, táctil y olfativo. Estos sistemas son controlados de forma externa, es decir dependen permanentemente de la emisión (sistema) y recepción (usuario). Los sistemas reactivos destacan por no necesitar un entrenamiento previo y es relativamente sencillo que el usuario produzca una respuesta neuronal deseada.
- **Pasivas:** Los sistemas pasivos se caracterizan por no controlar directamente un dispositivo objetivo. Estos sistemas realizan la adquisición y análisis de la actividad neuronal con el objetivo de descifrar un estado cognitivo del sujeto, por ejemplo: cansancio, sueño, nivel de atención, etc. Los sistemas pasivos han sido de gran utilidad para enriquecer la interacción humano-computadora (HCI).

- Híbridas:** Estos sistemas se caracterizan por fusionar mecanismos neurofisiológicos de sistemas BCI activos y reactivos con el objetivo de mejorar su desempeño. Los sistemas híbridos utilizan otros tipos de señales fisiológicas como el ritmo cardiaco, respiración o conductancia de la piel. Cabe recalcar que estos sistemas controlan directamente el dispositivo o aplicación objetivo, pero lo hacen a través de diversas fuentes fisiológicas.

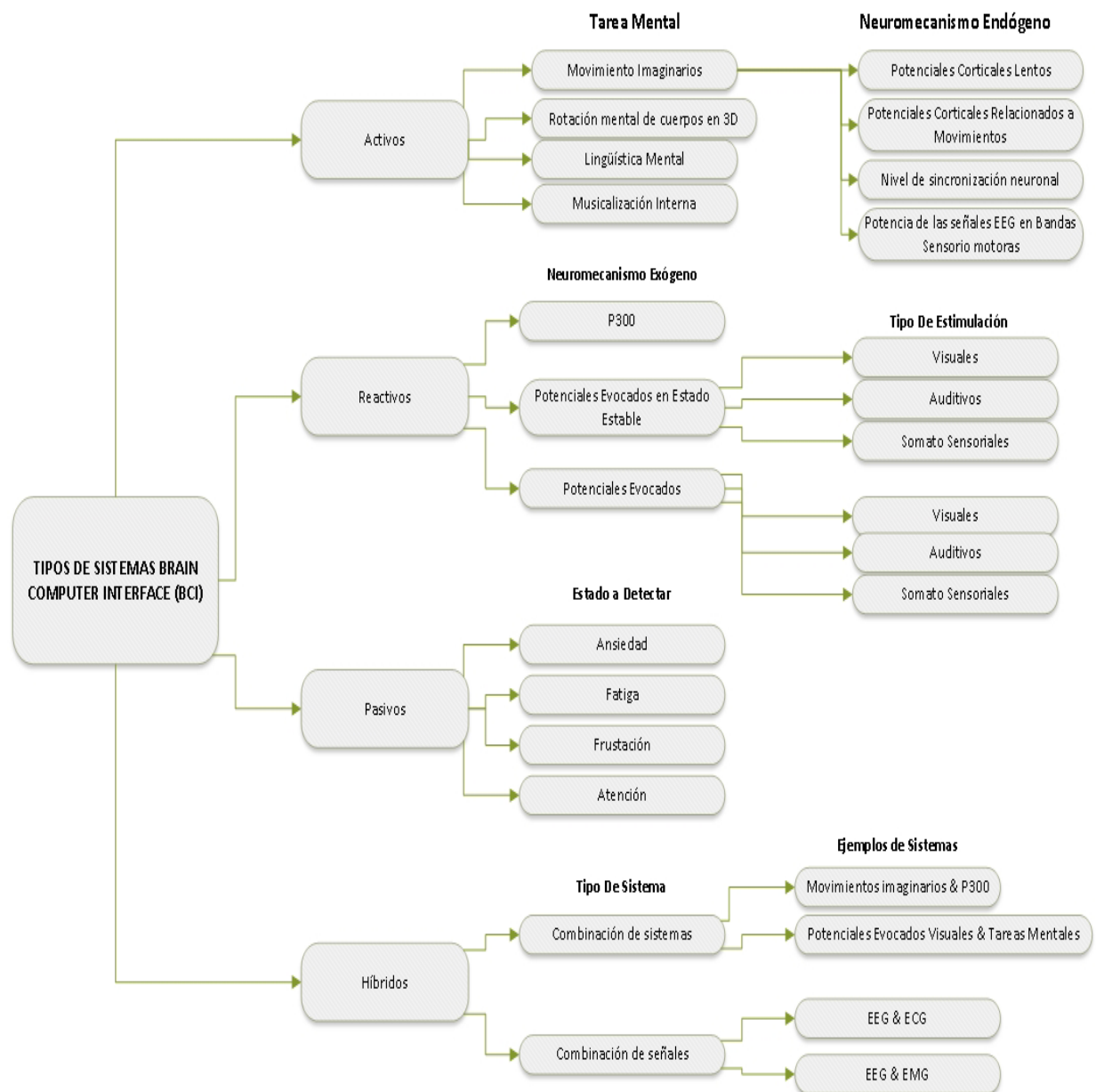


Figura 4. Tipos de sistemas BCI. Fuente: (Alonso-Valerdi et al., 2019)

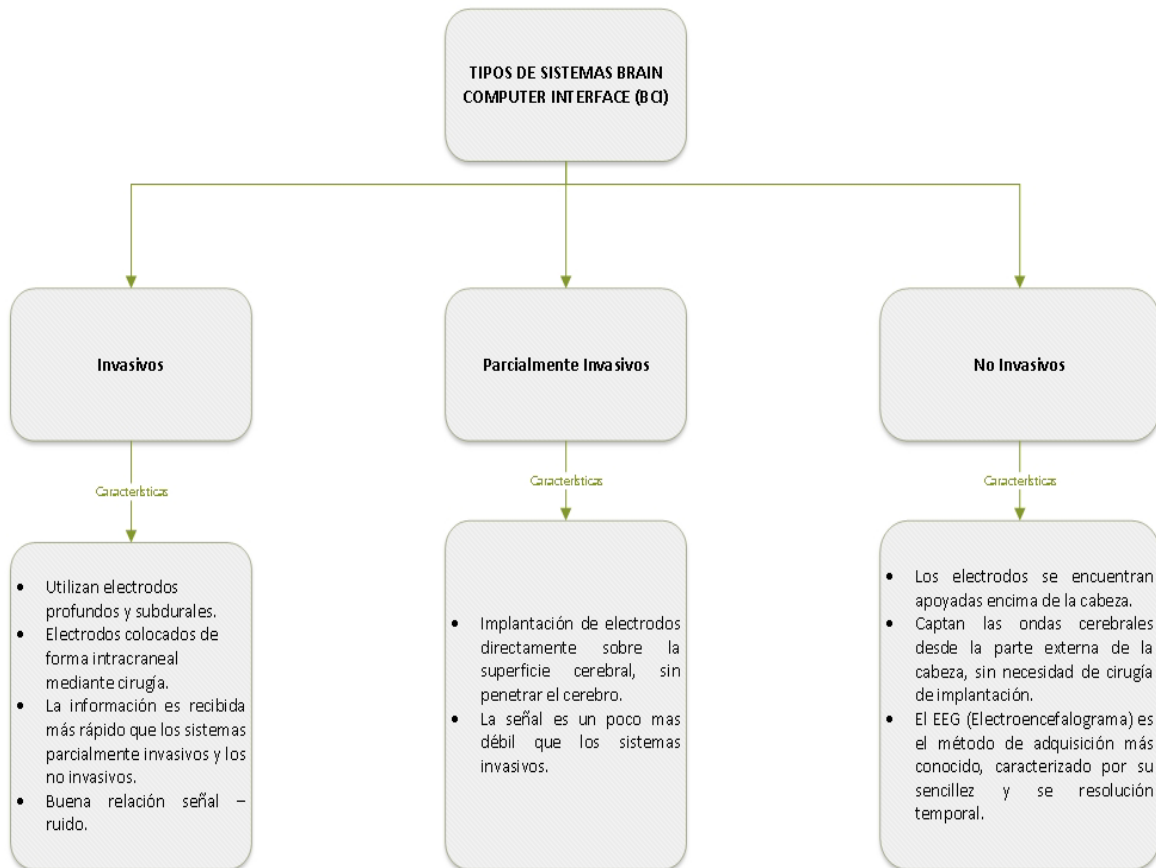


Por otro lado, los sistemas BCI se pueden clasificar en dos tipos, según la naturaleza y las tareas de control de la señal: endógenos y exógenos (Vela Dávila et al., 2017). En la *Tabla 1* se puede observar una comparativa con las características que posee cada uno de los tipos de sistemas BCI según la naturaleza de la señal, las características de los sistemas BCI endógenos fueron extraídas de (Vela Dávila et al., 2017), las características de los sistemas BCI exógenos fueron extraídas de (Sánchez, 2013) y de (Angevin & Málaga, 2004), este artículo, contiene información de ambos tipos.

**Tabla 1.** Características de los tipos de sistemas BCI según la naturaleza de la señal

| Sistemas BCI Endógenos   | Sistemas BCI Exógenos  |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Dependen de la capacidad del usuario para controlar su actividad electrofisiológica.</li> <li>• Las respuestas endógenas no requieren de un estímulo, sin embargo, utilizan claves para mejorar las características de la respuesta.</li> <li>• Requieren de un entrenamiento largo.</li> <li>• Estos sistemas se adaptan mejor a un modelo de control, este control es ejercido por el usuario final</li> <li>• Ejemplo: los sistemas BCI basados en imágenes motoras o ritmos sensoriomotores.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Dependen de la actividad electrofisiológica evocada por estímulos externos.</li> <li>• Las después exógenas requieren de un estímulo externo.</li> <li>• No requieren de una etapa intensiva de entrenamiento.</li> <li>• Para su implementación es necesario contar con un entorno que involucre al usuario final del sistema.</li> <li>• Ejemplo: Sistemas BCI basados en potenciales evocados P300.</li> </ul> |

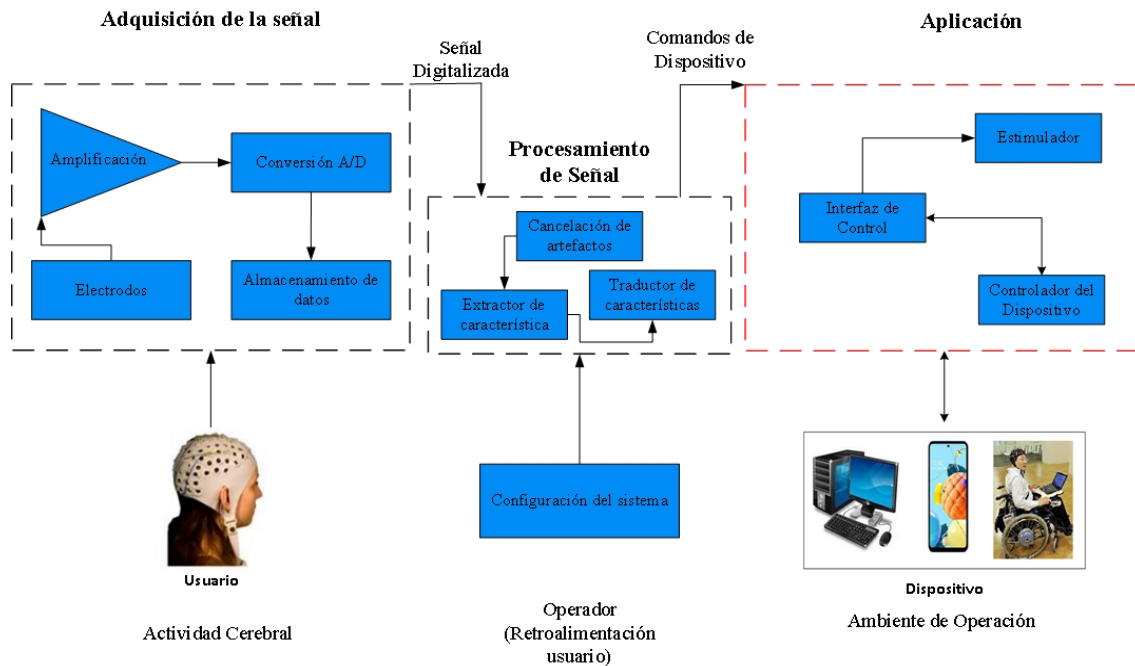
Con base en la naturaleza del método de adquisición de señales, podemos encontrar tres tipos de BCI; éstas pueden ser: invasivas, parcialmente invasivas y no invasivas (Moreno et al., 2019). En la *Figura 5* se observan los diferentes tipos junto a sus características más representativas; éstas fueron seleccionadas de Vela Dávila et al. (2017), Nadal & Opisso (2008) y Montalvo (2005).



**Figura 5.** Tipos de sistemas BCI según la naturaleza del método de adquisición de la señal. Fuente: Elaboración Propia

### 2.1.3 Estructura de un sistema Brain Computer Interface

Los sistemas BCI, independientemente del tipo, están compuestos por los siguientes componentes: adquisición de señales, preprocesamiento, extracción de características, clasificación, una interfaz de la aplicación y retroalimentación del sistema (Montalvo, 2005). En la *Figura 6* se muestra la estructura completa de un sistema BCI.



**Figura 6.** Estructura de un sistema BCI. Fuente: (Gutiérrez-Martínez et al., 2013)

En Gutiérrez-Martínez et al, (2013) se describe cada uno de los componentes de la siguiente manera:

1. **Adquisición y acondicionamiento de la señal:** El primer componente de un sistema BCI, es el encargado de capturar la actividad eléctrica cerebral mediante electrodos, los mismos que se encuentran colocados en el cuero cabelludo o implantado en la superficie de la corteza cerebral. En esta etapa, los desarrolladores tienen la opción de incluir un dispositivo para almacenar los datos.

En Moreno et al, (2019) clasifican los electrodos superficiales de la siguiente forma:

- **Electrodos de aguja:** Debido a su complejidad son los menos utilizados y se suele restringir su uso a neonatos y cuidados intensivos.
- **Electrodos adheridos:** Son pequeños discos metálicos que se caracterizan por tener baja resistencia en 1 a 2 K. Estos se pueden dividir en:
  - **Húmedos:** Utilizan una pasta o solución conductora para facilitar el intercambio de información.
  - **Activos-secos:** Utilizan materiales que tengan estabilidad química, resistencia mecánica y buenas propiedades eléctricas.

- Electrodos de casco o malla: Utilizan un casco elástico con ranuras para los electrodos y varía el tamaño con base en el paciente.
2. **Procesamiento de la señal**: En el segundo componente se recibe la señal eléctrica cerebral digitalizada y se encarga de transformarla en comandos que entiende el dispositivo y que el usuario desea controlar. Este bloque contiene las siguientes etapas:
    - a. Cancelación de artefactos: En esta etapa se elimina los artefactos creados por otro tipo de actividades eléctricas que son producto del movimiento ocular y muscular o el producto por la línea eléctrica.
    - b. Extracción de características: En esta etapa se traduce la señal cerebral de entrada en un conjunto de características correlacionado con el fenómeno asociado a la señal.
    - c. Traducción de características: En la etapa final, se procede a transformar el conjunto de características, obtenido en la etapa anterior, en una señal de control adecuada para el dispositivo que se desea controlar.
  3. **Interfaz de control**: Este bloque es el encargado de recibir los comandos de control y realizar las acciones pertinentes en el dispositivo. En este bloque se puede incorporar una pantalla para que el usuario reciba una retroalimentación de lo realizado.
  4. **Estimulador**: Este componente es opcional en los sistemas BCI y es manejado por la interfaz de control. En este, las señales de estimulación son enviadas al extractor de características para sincronizar la obtención de las mismas.
  5. **Configuración**: En este bloque se permite a un operador definir y ajustar los parámetros del sistema, para ello existe la posibilidad que el operador sea una persona técnica, el propio usuario o un algoritmo automático que ajuste el comportamiento del sistema en función de los resultados obtenidos y ofrecer la retroalimentación al usuario.
  6. **Dispositivo**: En este bloque, existe un rango limitado de dispositivos que pueden ser utilizados en un sistema BCI, algunos ejemplos pueden ser: computadoras, sintetizadores de voz, neuroprótesis y otros objetos en el ambiente del usuario como la televisión o encender o apagar la luz de la habitación. Los dispositivos utilizados en los sistemas BCI pueden ser físicos o virtuales.

7. **Ambiente de operación:** Este bloque hace referencia al ambiente físico, por ejemplo: paredes, piso, superficies, temperatura ambiental y ruido, dentro de ellos están incluidos los objetos y personas que se encuentran en el ambiente y afectan o pueden afectar en el funcionamiento del sistema.

## 2.1.4 Señales eléctricas cerebrales

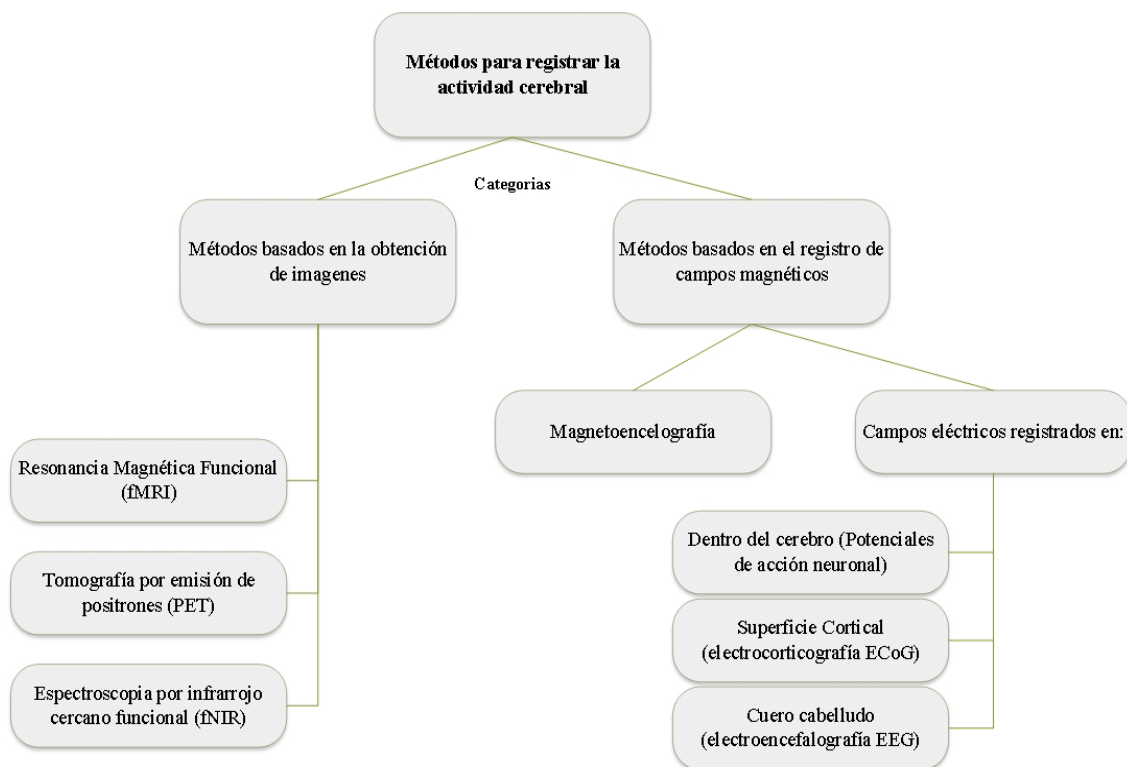
Los sistemas BCI se pueden agrupar en cinco categorías de acuerdo con las señales neuronales que utilizan (Gutiérrez-Martínez et al., 2013). En la *Tabla 2* se puede observar cada una de estas categorías junto a su descripción y un ejemplo.

**Tabla 2.** Categorías de los sistemas BCI de acuerdo con las señales neuronales que utilizan

| Categoría                                 | Descripción   | Ejemplo   |
|---|---|---|
| Potenciales evocados visuales (VEPS)      | Son potenciales registrados sobre la corteza visual, derivados de una respuesta cerebral a un estímulo visual.  | Los más utilizados en los sistemas BCI son los VEP de estado estable (Steady-State Visual Evoked Potential, SSVEP).                                     |
| Potenciales relacionados a eventos (ERPS) | Son patrones espacio-temporales de la actividad cerebral, los cuales ocurren sincronizados a un evento.   | Para generar el P300 el sujeto observa una secuencia aleatoria de dos tipos de estímulos.   |
| Ritmo sensorial - motores                 | La actividad cerebral oscilatoria ocurre en varias regiones del cerebro y cambia sus características de acuerdo al estado del usuario.                                  | El grupo de investigación de Wolpaw, en Estados Unidos, utilizó un ritmo sensorial-motor para lograr el control rápido de un cursor en dos dimensiones. |
| Potenciales corticales lentos (SCPS)      | Son corrimientos lentos de voltaje que se registran en el EG colocando electrodos en la zona del vértice de la cabeza. Existen dos tipos SCP positivos y SCP negativos. | Los pacientes con ALS pueden controlar un dispositivo al seleccionar letras de una pantalla y comunicarse con su entorno.                               |
| <b>Actividad neuronal</b>                 | Son considerados la unidad básica en el cerebro y son los que permiten la comunicación entre diferentes neuronas  | Una tasa de disparo de un conjunto de neuronas en la corteza motora y premotora puede ser utilizada para predecir la posición y                         |

## 2.1.5 Métodos para registrar la actividad cerebral

En Gutiérrez-Martínez et al, (2013) se explica que, las señales cerebrales se pueden detectar mediante varias técnicas, las mismas que se pueden agrupar en dos categorías, la primera, hace referencia a los métodos basados en obtención de imágenes y el segundo a métodos basados en el registro de campos magnéticos. En la *Figura 7* se puede observar un mapa conceptual con los diferentes métodos que pertenecen a cada categoría.



**Figura 7.** Clasificación de los métodos para registrar la actividad cerebral con base en su categoría. Fuente: (Gutiérrez-Martínez et al., 2013)

## 2.1.6 Electroencefalografía (EEG)

En el ámbito de la medicina podemos definir la electroencefalografía como una técnica conocida de exploración funcional del sistema nervioso central (SNC) mediante la cual se obtiene el registro de la actividad eléctrica cerebral en tiempo real (Ramos-Argüelles et al., 2009).

Dentro de los sistemas de interfaz cerebro computador, EEG es una técnica que permite registrar la actividad eléctrica cerebral de un usuario, para ello se utilizan electrodos, los mismos que están colocados en el cuero cabelludo (Vela Dávila et al., 2017).

Los EEG se pueden clasificar con base en el método que se utiliza para la adquisición de las señales, estos pueden ser: invasivo, parcialmente invasivo y no invasivo. El tipo más utilizado en los sistemas BCI son los no invasivos y para ello utilizan electrodos ubicados en diferentes lugares del cuero cabelludo (Montalvo, 2005).

Desde la aplicación de la EEG, por primera vez en 1992 por Hans Berger (Vela Dávila et al., 2017), esta se ha convertido en el método más utilizado en los sistemas BCI, esto se debe a que es una técnica sencilla, no invasiva, portátil y su costo es relativamente asequible (Sánchez, 2013).

El ancho de banda del EEG va de 0 Hz. a 100 Hz, con el mayor porcentaje de potencia entre 0.5 Hz. y 60 Hz. según la actividad cerebral del usuario (Insight, 2018). En la *Tabla 3* se explican las diferentes bandas de frecuencia junto a sus características.

**Tabla 3.** Tipos de ondas con base en su frecuencia

| Onda         | Frecuencia        | Característica   |
|--------------|-------------------|--|
| <b>Delta</b> | Entre 0.5 a 4 Hz. | Común en infantes que están en profundo sueño o desórdenes cerebrales.   |
| <b>Theta</b> | Entre 4 y 8 Hz.   | Es común en los niños y en los adultos cuando están despiertos dado que presentan componentes transitorios de actividad.   |
| <b>Alfa</b>  | Entre 8 y 13 Hz.  | Se sitúa en el lóbulo occipital, es la onda más común en personas normales.  |
| <b>Beta</b>  | Entre 13 y 22 Hz. | Se divide en dos regiones: Beta I y Beta II, siendo la segunda con mayor frecuencia, la misma que aparece durante una intensa activación del sistema nervioso central. |
| <b>Gamma</b> | Mayor a 22 Hz.    | Se relaciona a las tareas con un alto procesamiento cognitivo y la forma de aprendizaje y la capacidad de asentar nueva información.                                   |

## 2.2 Calidad de Software

### 2.2.1 ¿Qué es la calidad de software?

Antes de conocer el concepto de calidad de software, es fundamental conocer la definición de la palabra calidad, según la Real Academia Española, calidad está definida

como: "Propiedad o conjunto de propiedades inherentes a algo, que permiten juzgar su valor" (López Echeverry et al., 2008).

La organización internacional de estándares (*ISO-Standards Organization*), en su norma 8402:1994, define la palabra calidad como la "totalidad de propiedades y características de un producto, proceso o servicio que le confiere su aptitud para satisfacer unas necesidades expresadas o implícitas" (López Echeverry et al., 2008).

De estas dos definiciones se puede observar que ambas incluyen la satisfacción del cliente al momento de utilizar un determinado producto o servicio, por lo que podemos decir que la calidad busca solventar estos objetivos:

- Satisfacción de los consumidores
- Eficiencia en la utilización de los recursos humanos
- Reducción en el costo de las operaciones.

Llevando estas definiciones al campo de la ingeniería de software, nos encontramos con la IEEE Std 610, donde se señala que "la calidad del software es el grado con el que un sistema, componente o proceso cumple los requerimientos especificados y las necesidades o expectativas del cliente o usuario" (Estayno et al., 2009).

Por otro lado, Pressman (2013), se refiere a la calidad de software como "la concordancia con los requisitos funcionales y de rendimientos explícitamente documentados y características implícitas que se espera de todo software desarrollado profesionalmente" (Pressman et al., 2013).

## **2.2.2 ¿Qué son los modelos de calidad?**

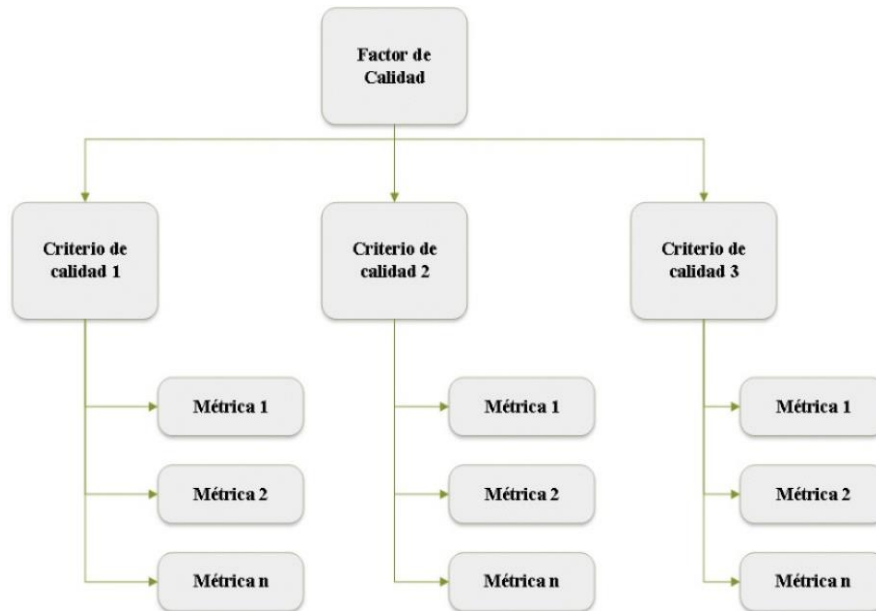
Los modelos de calidad son documentos que contienen un conjunto de factores de calidad y de relaciones entre ellos, estos proporcionan una base para la especificación de requisitos de calidad y para la evaluación de la calidad de los componentes de software (Carvallo, Franch, Quer, 2010).

Dentro del ámbito del desarrollo del software, un modelo de calidad permite evaluar el sistema, ya sea cualitativa o cuantitativamente, y de acuerdo con esta evaluación la organización estará en condiciones de proponer e implementar estrategias que permitan mejorar cada proceso dentro de las etapas de análisis, diseño, desarrollo y pruebas del software (Callejas-Cuervo et al., 2017).



## 2.2.3 Estructura de un modelo de calidad

Los modelos de calidad de software suelen tener la estructura presentada en la *Figura 8*, donde se puede observar que un modelo de calidad contiene diversos factores, que a su vez se componen en criterios a ser evaluados mediante una métrica (Callejas-Cuervo et al., 2017).



**Figura 8.** Estructura de un modelo de calidad. Fuente: (Callejas-Cuervo et al., 2017)

## 2.2.4 Enfoque de los modelos de calidad

Los modelos de calidad se clasifican de acuerdo con el enfoque de evaluación que presentan, estos pueden ser a nivel de proceso, producto o calidad en uso (Callejas-Cuervo et al., 2017). En la *Figura 9* se muestran los diferentes enfoques que tiene un modelo de calidad y la relación que existe entre ellos.

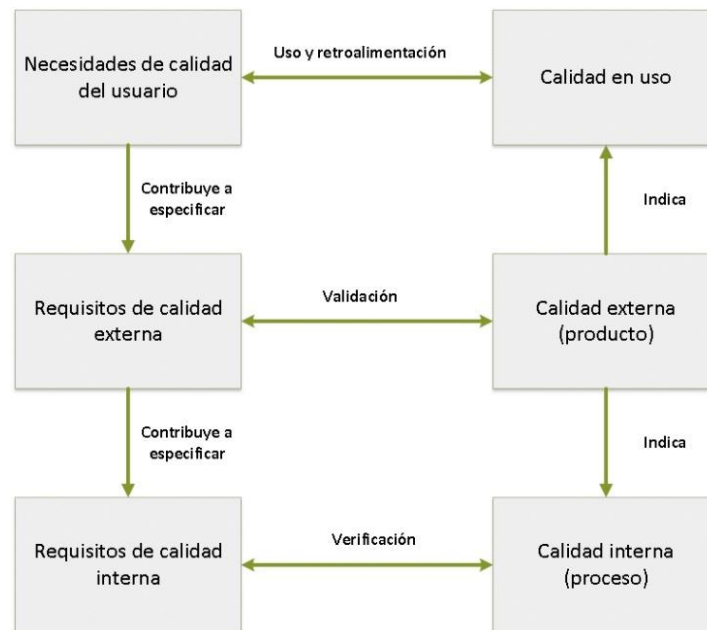


Figura 9. Enfoques de calidad y su relación entre ellos. Fuente: (Moreno S. et al., 2008)

- **Calidad a nivel de proceso**

La calidad de un sistema de software debe considerarse desde el inicio del proyecto. En cada una de las etapas de su desarrollo, se lleva un control y seguimiento de los aspectos de calidad. Al realizar esta actividad de forma continua, se garantiza una calidad alta en cada proceso y un producto final que cumple los factores de calidad establecidos (Callejas-Cuervo et al., 2017a).

Es importante recalcar que, un proceso de desarrollo malo, mal concebido e implementado, tendrá como resultado productos de software de mala calidad, pero si un proceso de desarrollo es bueno, bien concebido e implementado, este generará una gran cantidad de productos de buena calidad (Fitria, 2013).

En la actualidad, existe una gran cantidad de modelos reconocidos por la industria, que tienen como objetivo común proveer una evaluación de la calidad de software a nivel de procesos, en (Pérez Castillo & Orantes Jiménez, 2019) destacan los siguientes modelos:

- ISO/IEC 15504 (SPICE)
- BOOTSTRAP
- DROMEY
- IEEE/EIA 12207
- COBIT (Control Objectives for Information and related Technology)

- **Calidad a nivel de producto de software**

El objetivo principal de los modelos de calidad a nivel de producto de software es especificar y evaluar el cumplimiento de criterios del producto, para ello se aplican medidas internas y/o externas (Callejas-Cuervo et al., 2017).

- **Calidad en uso**

De acuerdo a la ISO/IEC-9126-1 la calidad en uso es la capacidad que tiene un producto de software de facilitar a los usuarios el alcance de metas específicas con efectividad, productividad, seguridad y satisfacción en un contexto de uso específico (Moreno S. et al., 2008). En la *Tabla 4* se puede observar la definición de cada una de estas características.

**Tabla 4.** Características relacionadas a la calidad en uso.

| <b>Característica</b> | <b>Definición</b>   |
|-----------------------|---|
| Efectividad           | Capacidad del software para permitir a los usuarios obtener metas específicas con precisión.  |
| Productividad         | Característica del software que permite su utilización en su máxima capacidad, en relación a la efectividad alcanzada en un contexto específico de uso. |
| Seguridad             | Capacidad del producto software para alcanzar niveles aceptables de riesgo de dañar a las personas, negocio o software.                                 |
| Satisfacción          | Capacidad del software para satisfacer a los usuarios en un contexto de uso.  |

## 2.2.5 ISO/IEC 25010

La ISO/IEC 25010 describe el modelo de calidad para el producto software y para la calidad en uso, en este modelo se determinan las características de calidad que se deben tener en cuenta al momento de evaluar las propiedades de un producto software determinado (ISO/IEC, 2011). En la *Tabla 5* se muestran las características y sub-características contenidas en este estándar de calidad.

**Tabla 5.** Características y sub-características utilizadas en la ISO/IEC 25010.

| <b>Característica</b>       | <b>Sub característica</b> | <b>Definición</b>   |
|-----------------------------|---------------------------|---|
| <b>Adecuación Funcional</b> | Complejidad Funcional     | Grado en el cual el conjunto de funcionalidades cubre todas las |

|                                |  |  |
|--------------------------------|--|--|
|                                | Corrección Funcional                   | tareas y los objetivos del usuario especificados.<br>Capacidad del producto o sistema para proveer resultados correctos con el nivel de precisión requerido.   |
|                                | Pertinencia Funcional                  | Capacidad del producto de software para proporcionar un conjunto apropiado de funciones para tareas y objetivos de usuario especificados.  |
| <b>Eficiencia de desempeño</b> | Comportamiento temporal                | Los tiempos de respuesta y procesamiento y los porcentajes de rendimiento de un sistema cuando lleva a cabo sus funciones bajo condiciones determinadas en relación con un banco de pruebas ( <i>benchmark</i> ) establecido |
|                                | Utilización de recursos                | Las cantidades y tipos de recursos utilizados cuando el software se ejecuta bajo condiciones determinadas.   |
|                                | Capacidad                              | Grado en que los límites máximos de un parámetro de un producto o sistema software cumplen con los requisitos.   |
| <b>Compatibilidad</b>          | Coexistencia                           | Capacidad del producto para coexistir con otro software independiente, en un entorno común, compartiendo recursos comunes sin detrimento.  |
|                                | Interoperabilidad                      | Capacidad de dos o más sistemas o componentes para intercambiar información y utilizar la información intercambiada.   |
| <b>Usabilidad</b>              | Capacidad para reconocer su adecuación | Capacidad del producto que permite al usuario entender si el software es adecuado para sus necesidades.  |
|                                | Capacidad de aprendizaje               | Capacidad del producto que permite al usuario aprender su aplicación.  |
|                                | Capacidad para ser usado               | Capacidad del producto que permite al usuario operarlo y controlarlo con facilidad.  |
|                                | Protección contra errores de usuario   | Capacidad del sistema para proteger a los usuarios de errores.   |
|                                | Estética de la interfaz de usuario     | Capacidad de la interfaz de usuario de agrandar y satisfacer la interacción con el usuario.  |
|                                | Accesibilidad                          | Capacidad del producto que permite que sea utilizado por usuarios con determinadas características y discapacidades.   |
| <b>Fiabilidad</b>              | Madurez                                | Capacidad del sistema para satisfacer las necesidades de fiabilidad en condiciones normales.   |
|                                | Disponibilidad                         | Capacidad del sistema o componente de estar operativo y  |

|                       |                               |  |
|-----------------------|-------------------------------|--|
|                       |                               | <p>accesible para su uso cuando se requiere.</p> <p>Capacidad del sistema o componente para operar según lo previsto en presencia de fallos hardware o software.</p> <p>Capacidad del producto software para recuperar los datos directamente afectados y restablecer el estado deseado del sistema en caso de interrupción o fallo.</p> |
|                       | Tolerancia a fallos           |  |
|                       | Capacidad de recuperación     |  |
| <b>Seguridad</b>      | Confidencialidad              | Capacidad de protección contra el acceso de datos e información no autorizados, ya sea accidental o deliberadamente.   |
|                       | Integridad                    | Capacidad del sistema o componente para prevenir accesos o modificaciones no autorizados a datos o programas de ordenador.   |
|                       | No repudio                    | Capacidad de demostrar las acciones o eventos que han tenido lugar, de manera que dichas acciones o eventos no puedan ser repudiados posteriormente.   |
|                       | Responsabilidad               | Capacidad de rastrear de forma inequívoca las acciones de una entidad.   |
|                       | Autenticidad                  | Capacidad de demostrar la identidad de un sujeto o un recurso.   |
| <b>Mantenibilidad</b> | Modularidad                   | Capacidad de un sistema o programa de ordenador (compuesto de componentes discretos) que permite que un cambio en un componente tenga un impacto mínimo en los demás.  |
|                       | Reusabilidad                  | Capacidad de un activo que permite que sea utilizado en más de un sistema software o en la construcción de otros activos.  |
|                       | Analizabilidad                | Facilidad con la que se puede evaluar el impacto de un determinado cambio sobre el resto del software, diagnosticar las deficiencias o causas de fallos en el software, o identificar las partes a modificar.  |
|                       | Capacidad para ser modificado | Capacidad del producto que permite que sea modificado de forma efectiva y eficiente sin introducir defectos o degradar el desempeño.   |
|                       | Capacidad para ser probado.   | Facilidad con la que se pueden establecer criterios de prueba para un sistema o componente y con la que se pueden llevar a cabo las pruebas para determinar si se  |

---

|                     |                                |  |
|---------------------|--------------------------------|--|
|                     |                                | cumplen dichos criterios.  |
| <b>Portabilidad</b> | Adaptabilidad                  | Capacidad del producto que le permite ser adaptado de forma efectiva y eficiente a diferentes entornos determinados de hardware, software, operacionales o de uso. |
|                     | Capacidad para ser instalado   | Facilidad con la que el producto se puede instalar y/o desinstalar de forma exitosa en un determinado entorno.   |
|                     | Capacidad para ser reemplazado | Capacidad del producto para ser utilizado en lugar de otro producto software determinado con el mismo propósito y en el mismo entorno.                             |

---

## CAPÍTULO 3: ESTADO DEL ARTE

En este capítulo se presenta una revisión sistemática de la literatura que abarca los sistemas basados en interfaces cerebro computador o sistemas BCI. Durante esta revisión, se recolectaron métricas de calidad, mismas que se emplean en los sistemas BCI; así como también, sus aplicaciones e investigaciones realizadas hasta la actualidad. De esta manera, se extrajeron métricas que se encuentran dispersas en la literatura existente, para condensarlas a lo largo de este trabajo y que permitan construir el modelo de calidad esperado como uno de los objetivos de este estudio.

### 3.1 Introducción a las revisiones sistemáticas

La revisión sistemática de literatura es el proceso mediante el cual se consulta, extrae y recopila la información considerada relevante sobre una interrogante de investigación específica, área temática o fenómeno de interés (Cortés & León, 2011).

Kitchenham & Charters, (2007), plantean lineamientos que tienen como objetivo reflejar los problemas o necesidades específicas (brechas) sobre un tema determinado, así como también aquellas investigaciones científicas existentes que evidencian el avance científico en un dominio específico, proponiendo tres fases comunes en revisiones sistemáticas: i) planificación, ii) conducción o ejecución de la revisión y iii) difusión de resultados.

Los objetivos asociados a la planeación de la revisión son:

- Identificar la necesidad de una revisión
- Identificar el propósito de la revisión
- Especificar las preguntas de investigación
- Desarrollar el protocolo de revisión
- Evaluar el protocolo de revisión

Los objetivos asociados a la ejecución de la revisión son:

- Seleccionar estudios primarios
- Evaluar la calidad de los estudios primarios
- Extraer datos y monitorizarlos
- Sintetizar los datos extraídos

Los objetivos asociados con la difusión de los resultados son:

- Especificar mecanismos de disseminación
- Elaborar un reporte
- Evaluar el reporte

## 3.2 Revisión sistemática de la literatura

En esta sección se presenta el protocolo de revisión a seguir. Según Kitchenham & Charters, (2007), para llevar a cabo una revisión sistemática, es necesario confirmar, en primera instancia, la necesidad de dicha revisión. Para esto, se toman en cuenta las actividades más importantes previas a la revisión, que son: definir las preguntas de investigación y elaborar un protocolo, es decir, un plan que defina los procedimientos de revisión básicos. Para la elaboración del protocolo se realizan además tres actividades importantes: i) identificación de la necesidad de la revisión, ii) formulación de las preguntas y sub-preguntas investigación, y iii) la elaboración de la estrategia de búsqueda. Estas fases son abordadas a continuación.

### A. Identificación de la necesidad

Con el fin de identificar la necesidad de una revisión sistemática que aporte de manera significativa al trabajo de titulación, se realizó una búsqueda de revisiones sistemáticas basadas en: *Brain computer-interface*, *Brain machine-interface*, *calidad en sistemas BCI y aplicaciones e investigaciones sobre sistemas BCI*. De igual manera, se encontraron otras revisiones sistemáticas, las cuales fueron consideradas importantes para identificar las preguntas de investigación, en las cuales se va a enfocar esta revisión sistemática, sus criterios de extracción y la justificación de la necesidad de la misma.

Algunas revisiones sistemáticas, S01,S05,S12,S13 y S18, solo se basan en recolectar información sobre los sistemas BCI, es decir se recolecta información basada en las señales EEG no invasivas empleadas en sistemas que utilizan interfaces cerebro computador. Los autores se enfocan en brindar información sobre las electroencefalografías (EEG), la actividad cerebral, artefactos de EEG y la estructura básica de un sistema BCI (Lance et al., 2012b). Describen de una manera correcta cada tema mencionado y aportan información para enriquecer el conocimiento con en base en sistemas BCI, pero los autores no abordan las cuestiones de calidad relacionados con este tipo de sistemas. Además, es importante mencionar que, dicho trabajo no brinda información sobre el proceso que los autores realizaron para recolectar la información. Así mismo, varios autores, se enfocan solo en recolectar información de la estructura de los sistemas basados en interfaces



cerebro-computador. Por lo que, realizan un análisis de cómo se encuentra la investigación en la actualidad (Lupu et al., 2019).

De lo que se conoce por medio de las búsquedas preliminares, no existe revisiones de la literatura enfocadas a la calidad de producto y uso de los sistemas basados en interfaces cerebro-computador, evidenciando la necesidad de elaborar esta revisión sistemática, mediante la cual se consulte, extraiga y recopile información relevante sobre el tema planteado en este trabajo de titulación para su posterior desarrollo y aporte científico sobre el tema asociado.

Lo que busca esta revisión sistemática de la literatura es identificar y recolectar la mayor cantidad de información relacionada a los sistemas BCI, teniendo como tópico principal la evaluación de la calidad de producto y uso en este tipo de sistemas, dentro de la información a recolectar se busca identificar modelos de calidad empleados, métricas utilizadas, técnicas de evaluación empleadas. Todo esto con la finalidad de emplear toda la información recolectada para la creación de un modelo de calidad que sirva para evaluar la calidad existente en diferentes sistemas BCI.

## **B. Formulación de las preguntas y sub preguntas de investigación**

Se plantea la siguiente pregunta, como objetivo principal de la revisión sistemática efectuada:

***RQ: ¿Existen modelos de calidad para evaluar sistemas basados en interfaces cerebro-computador?***

El objetivo de la revisión sistemática es conocer qué son los sistemas BCI, cuáles son sus limitantes y retos que afrontan hoy en día los desarrolladores. Además, que problemas o dificultades se encuentran al momento de desarrollar un sistema basado BCI. Al mismo tiempo se busca recopilar información sobre métricas que pueden ser empleadas al momento de evaluar la calidad de uso y calidad de producto en sistemas con BCI.

**Tabla 6.** Preguntas de investigación

| Sub-pregunta de Investigación   | Motivación  |
|---|---|
| <b>RQ1: ¿En qué contextos, con qué herramientas y a qué tipo de usuarios están orientadas las aplicaciones BCI?</b> | El objetivo es identificar todos los contextos en los que se emplean sistemas BCI, con la finalidad de considerar los factores existentes en dichos contextos. Además, permite tener una idea del enfoque de las herramientas y al tipo de usuario al |

**RQ2: ¿Qué arquitecturas, herramientas y metodologías se han creado en entorno a BCI y cómo se ha llevado su desarrollo?**

que son dirigidas.

El objetivo es conocer cómo está la investigación en la actualidad sobre sistemas BCI y que tipo de arquitecturas, herramientas y metodologías se han creado. Además, un tema importante a considerar es cómo se lleva a cabo el desarrollo de proyectos relacionados con BCI. Responder a esta pregunta nos permitirá saber dónde se necesita más trabajo, más estudio, más investigación y qué nuevas áreas se pueden explorar.

**RQ3 ¿Qué características de calidad de uso y producto se abordan en las aplicaciones BCI para ofrecer una calidad aceptable tanto en el ámbito de la calidad en uso y la calidad en producto?**

El objetivo es conocer los atributos de calidad que permiten incrementar de manera positiva la experiencia del usuario al emplear sistemas BCI. Además, permite conocer cuáles son los mejores dispositivos de extracción de señal y cuáles resultan más eficientes y usables para el usuario. Responder a esta pregunta también permitirá conocer qué atributos de calidad se descuidan en los estudios e investigaciones realizadas hasta la actualidad, pero que podrían ser empleados para medir la calidad existente en los sistemas BCI.

**RQ4. ¿En qué fase se encuentra el desarrollo del estudio y qué tipo de validación utiliza este estudio, y qué tipo de estudio es?**

El objetivo es conocer en qué fase de desarrollo se centran las diferentes investigaciones e identificar el tipo de estudio que se está realizando.

## C. Protocolo de búsqueda

Con el objetivo de obtener la mayor cantidad de estudios relevantes, se consideraron búsquedas automáticas en diferentes bibliotecas digitales y se consideran también búsquedas manuales en conferencias ranqueadas de categorías A, B y C.

### I. Búsquedas Automáticas

Para el proceso de búsqueda automática se han considerado las siguientes bibliotecas digitales, seleccionadas con base en una búsqueda preliminar, las cuales arrojaron los mejores resultados pueden ser visualizadas en la *Tabla 7*.

**Tabla 7.** Bibliotecas digitales utilizadas

| Nº | Recurso Electrónico           |
|----|-------------------------------|
| 1  | ACM - Digital Library         |
| 2  | IEEE Xplore - Digital Library |

Para el proceso no se consideraron las bibliotecas Springer Link y ScienceDirect, debido a que los filtros de búsqueda no eran los óptimos y se obtenía una gran cantidad de resultados los cuales no tenían gran relevancia con el tema propuesto en este trabajo de titulación; consecuentemente, las búsquedas automáticas hacen uso de una cadena de búsqueda establecida para todas las bibliotecas digitales. Considerando la búsqueda únicamente sobre los metadatos:

- i. título del documento
- ii. palabras clave
- iii. Resumen o abstract.

En esta etapa se definen los términos de búsqueda y las bases de datos electrónicas. Para esta investigación los términos de búsqueda se generaron con base en las preguntas de investigación y la búsqueda se realizó en los recursos electrónicos ya mencionados. Esto con la finalidad de obtener la mayor cantidad de artículos referentes al tema de la revisión sistemática de literatura. Para determinar la cadena de búsqueda se basó en conocimientos previos relacionados a: Brain Computer-Interface, Brain Machine-Interface, calidad de software; además, se realizaron varias pruebas de búsqueda usando la combinación de estos términos con el fin de seleccionar la mejor combinación que provea los mejores resultados. El conjunto de palabras para la selección de estudios primarios se muestra en la *Tabla 8*.

**Tabla 8.** Cadena de búsqueda y sus conectores

| Concepto                 | Sub-cadena   | Conector |
|--------------------------|--|----------|
| BCI                      | BCI  | OR       |
| Brain Computer Interface | Brain computer interface   | AND      |
| BMI                      | BMI  | OR       |
| Brain Machine Interface  | Brain machine interface  | AND      |
| DBIs                     | DBIs   | OR       |
| Direct Brain Interfaces  | <i>Direct brain interfaces</i>   | OR       |
| Software quality         | Software quality   | OR       |
| QOS                      | QOS  | OR       |
| Quality                  |  | AND      |
| Cadena de búsqueda       | (“Brain Computer Interface” OR “BCI” OR “Brain Machine interface” OR “Direct Brain Interfaces”)<br>AND (“Software Quality” OR “QOS” OR “Quality” OR “Quality Model”)<br> |          |

## II. Búsquedas Manuales

Para las búsquedas manuales, se tomaron en cuenta las conferencias o revistas que fueron seleccionadas a través de una búsqueda de los términos Brain Computer-Interface, Brain Machine-Interface, calidad de uso y de producto en sistemas BCI, etc. De donde las conferencias y revistas seleccionadas en la búsqueda manual, fueron calificadas según su título, abstract, conclusiones y un vistazo breve a sus contenidos. Los resultados de esta selección pueden ser visualizados en la *Tabla 9* y *Tabla 10*.

**Tabla 9.** Conferencias consideradas para la revisión de la literatura

| N.º | Título Conferencia  | Acrónimo |
|-----|---|----------|
| C1  | International Winter Workshop on Brain-Computer Interface                               | BCI      |
| C2  | International Symposium on Computer, Consumer and Control                               | IS3C     |
| C3  | IEEE Symposium on Computational Intelligence and Games                                  | CIG      |
| C4  | Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society | EMBC     |
| C5  | Simposio CEA de Bioingeniería, Interfaces Cerebro-Máquina                               | CEA      |

**Tabla 10.** Revistas utilizadas en la revisión de la literatura

| N.º | Título Revista           | Ranking |
|-----|--------------------------|---------|
| J1  | Brain-Computer Interface | Q1      |

## III. Periodo de búsqueda

El periodo de tiempo considerado para la selección de artículos es en relación a la última década. Es decir, para esta revisión sistemática de literatura el periodo de tiempo que se consideró es del año 2010 hasta la actualidad. Este periodo se define debido a que en la última década el tema de sistemas BCI ha tenido mayor desarrollo e interés por el campo de la investigación.

## IV. Planificación de selección de estudio primarios

Cada resultado obtenido de la búsqueda ha sido evaluado por dos investigadores con base en el título, resumen y palabras claves, a fin de decir si se debe incluir o no. En el caso de discrepancias en la selección del estudio, se resolverá por consenso, una vez

revisado el artículo completo. Además, para la toma de decisiones en cuanto a aprobar o descartar los artículos encontrados en la revisión sistemática de literatura se aplicarán criterios de inclusión y exclusión, garantizando la obtención de artículos óptimos para la investigación planteada.

Se incluirán los estudios que cumplieron al menos uno de los siguientes criterios de inclusión:

- Estudios que presentan información con respecto a sistemas de BCI y calidad.
- Estudios que presentan información tratamientos o interpretación de señales cerebrales usando BCI orientada a la informática.
- Estudios que presentan información de cómo implementar un sistema BCI.
- Estudios que presentan información sobre la estructura de los sistemas BCI.

Se excluirán los estudios que cumplan con al menos uno de los siguientes criterios de exclusión:

- Artículos introductorios para ediciones especiales, libros y talleres.
- Informes duplicados del mismo estudio en diferentes fuentes.
- Artículos cortos de menos de cinco páginas.
- Artículos que no estén escritos en inglés o castellano.
- Artículos que no den información sobre métricas de calidad para sistemas BCI.

Para responder las subpreguntas de investigación planteadas anteriormente, se definen criterios de extracción (EC), los cuales son presentados a continuación. Es importante definir estos criterios ya que ayudan a evitar el sesgo de los investigadores para que sus expectativas no influyan en los análisis de los estudios.

## **RQ1: ¿En qué contextos, con qué herramientas y a qué tipo de usuarios están orientadas las aplicaciones BCI?**

**Tabla 11.** Criterios de extracción para RSQ1

| <b>EC1 Contexto</b>   | <b>EC2 Herramientas</b>                                  | <b>EC3 Usuarios</b>  |
|---|--|--|
| Aplicaciones en neurociencias<br>Tecnologías que utilizan procesamiento de estímulos cerebrales<br>HCI<br>Calidad de vida<br>Juegos | Casco / Electrodos<br>Software de procesamiento<br>Otros | Usuarios con discapacidad<br>Usuarios sanos<br>Usuarios en general |

|  |
|--|
| Comunicación<br>Rehabilitación y<br>entrenamiento<br>Otros |
| <b>EC4 Alcance de la<br/>investigación</b>                 |
| Orientación académica<br>Orientación industrial            |

**RQ2: ¿Qué arquitecturas, herramientas y metodologías se han creado en entorno a BCI y cómo se ha llevado su desarrollo?**

**Tabla 12.** Criterios de extracción para RSQ2

| <b>EC5 Etapas de una estructura BCI</b> | <b>EC6 Técnicas Aplicadas</b>                     |
|---|---|
| Adquisición de señales                  | Tarea en particular                               |
| Procesamiento de señales                | Imágenes motoras - Sistema perceptivo motor       |
| Aplicación – Interacción con el usuario | Metodologías de imágenes cerebrales – Neuroimagen |
| Retroalimentación                       | Potenciales P300                                  |
|   | Ninguno   |

**RQ3: ¿Qué características de calidad de uso y producto se abordan en las aplicaciones BCI para ofrecer una calidad aceptable tanto en el ámbito de la calidad en uso y la calidad en producto?**

**Tabla 13.** Criterios de extracción para RSQ3

| <b>EC7 Características de Calidad de uso</b> | <b>EC8 Características de calidad de producto</b> |
|--|---|
| Eficacia                                     | Útil  |
| Eficiencia                                   | Deseable  |
| Satisfacción                                 | Aceptable   |
| Seguridad                                    | Ninguno   |
| Usabilidad                                   |   |
| Ninguno                                      |   |

**RQ4. ¿En qué fase se encuentra el desarrollo del estudio y qué tipo de validación utiliza este estudio, y qué tipo de estudio es?**

**Tabla 14.** Criterios de extracción para RQ4

| <b>EC9 Fase de estudio</b> | <b>EC10 Tipo de validación</b> |
|----------------------------|--------------------------------|
| Análisis                   | Encuesta                       |
| Diseño                     | Cuasiexperimento               |
| Implementación             | Experimento                    |
| Prueba                     | Prototipo                      |
|                            | Prueba de conceptos            |
|                            | Caso de estudio                |
|                            | Otros                          |

---

## EC11 Tipo de estudio

---

Estudio nuevo

Extensión de un estudio previo

---

### 3.2.1 Evaluación de la calidad

Para verificar la calidad de los estudios seleccionados, se consideró una escala de Likert de tres puntos para evaluar la calidad de los artículos en función del número de citas (Ospina B et al., 2003), los resultados obtenidos se presentan en la *Tabla 15*.

**Tabla 15.** Calidad de los artículos seleccionados con base en el número de citas

| Categoría | Puntaje | Criterio                                   | Cantidad | Porcentaje |
|-----------|---------|--|----------|------------|
| Alta      | 10      | Artículos con más de cinco citaciones      | 34       | 89,47%     |
| Media     | 5       | Artículos con citaciones entre uno y cinco | 4        | 10,53%     |
| Baja      | 0       | Artículos no citados                       | 0        | 0%         |

### 3.3 Ejecución de la revisión sistemática de la literatura

Esta fase consiste en establecer las pautas para seleccionar los estudios relevantes de manera adecuada y evaluarlos por su calidad. De esta manera, esta etapa consiste de tres pasos: i) selección de estudios primarios, ii) evaluación de calidad y iii) método de análisis y síntesis.

#### 3.3.1 Selección de estudios primarios

Como resultado de la ejecución de las búsquedas automáticas se obtuvieron 943 estudios, como se indica en la *Tabla 16*, respectivamente a cada librería digital. Debido a que los resultados obtenidos manualmente ya constaban en los resultados de la búsqueda automática no fueron considerados.

**Tabla 16.** Número de documentos según el tipo de búsqueda

| Búsquedas Automáticas |                                  |
|-----------------------|----------------------------------|
| Biblioteca digital    | Cantidad de estudios encontrados |
| ACM Digital Library   | 651                              |
| IEEE Xplore           | 292                              |

De los 943 estudios resultantes, tanto de búsquedas automáticas como manuales, se realiza una preselección de estudios primarios, revisando de forma manual los

metadatos (título, abstract y palabras claves del documento). De esta manera de obtienen 38 documentos preseleccionados, como se muestra a continuación en la *Tabla 17*.

**Tabla 17.** Cantidad de Búsquedas Automáticas

| <b>Búsqueda Automática (documentos preseleccionados)</b> |  |
|--|--|
| <b>Biblioteca Digital</b>                                | <b>Cantidad de estudios preseleccionados</b> |
| IEEE Xplore  | 24   |
| ACM Digital Library                                      | 14   |
| Total (Búsquedas automáticas)                            | 38   |

Con un total de 38 documentos comprendidos entre búsquedas manuales y búsquedas automáticas, se procede a realizar el siguiente paso, el protocolo de revisión, planteado en el capítulo 3 de este documento, en donde se debe evaluar de manera manual cada uno de los documentos recopilados. Todos los documentos que se han incluido dentro de esta revisión debían cumplir al menos uno de los criterios de inclusión para ser considerado elegible; además, no se consideró ninguno de los documentos que cumplan al menos uno de los criterios de exclusión ya que podían causar sesgos o problemas durante la ejecución del siguiente paso de la revisión sistemática, dando como consecuencia, resultados erróneos para las siguientes fases, además, en el caso de que exista alguna discrepancia entre los investigadores, se examinó el estudio en conflicto y se buscó un consenso entre todos los investigadores.

En la *Tabla 18* se muestra de manera detallada cuantos estudios fueron elegidos de cada una de las búsquedas automáticas, este tipo de procesos demuestran cuán importante es realizar este tipo de revisiones sistemáticas.

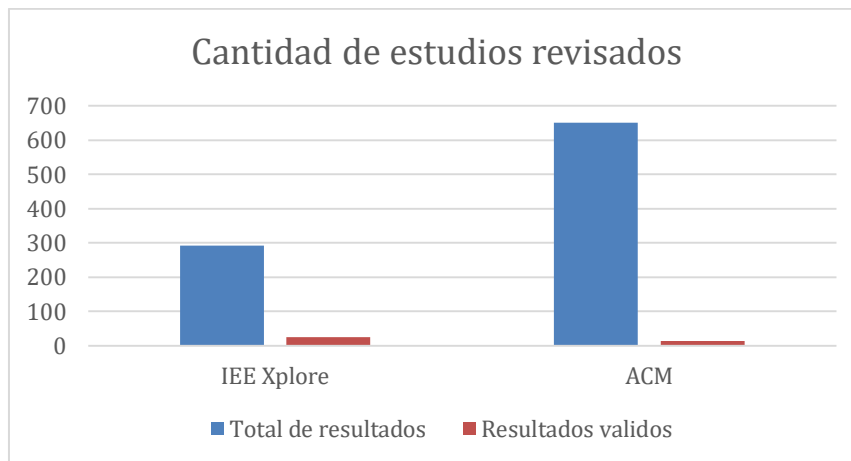
**Tabla 18.** Cantidad de estudios según el tipo de búsqueda realizado en las librerías y conferencias

| <b>Estudios Primarios seleccionados de la Búsqueda Automática</b> | <b>Porcentaje Estudios Incluidos</b> |                    |                    |                    |
|---|--------------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
|   | <b>Biblioteca digital</b>            | Estudios excluidos | Estudios Incluidos | Estudios Primarios |
| <b>IEEE Xplore</b>  |                                      | 267                | 25                 | 8,21%              |
| <b>ACM</b>  |                                      | 638                | 13                 | 2,15%              |
| <b>Total</b>  |                                      | 905                | 38                 | 4,03%              |

Del total de 943 estudios analizados, 905 han sido rechazados o excluidos por no cumplir con los criterios de inclusión, mientras que, 38 estudios han sido aceptados en la



revisión sistemática. Una vez seleccionados estos estudios, se aplica el protocolo que se planteó en secciones anteriores. De esta manera, se muestra un resumen de los estudios analizados con relación en los estudios incluidos y excluidos, en una escala adecuada; de tal manera que, se puedan visualizar y presentar los datos de la mejor manera. Los datos obtenidos para esta revisión están disponibles bajo petición a los autores.



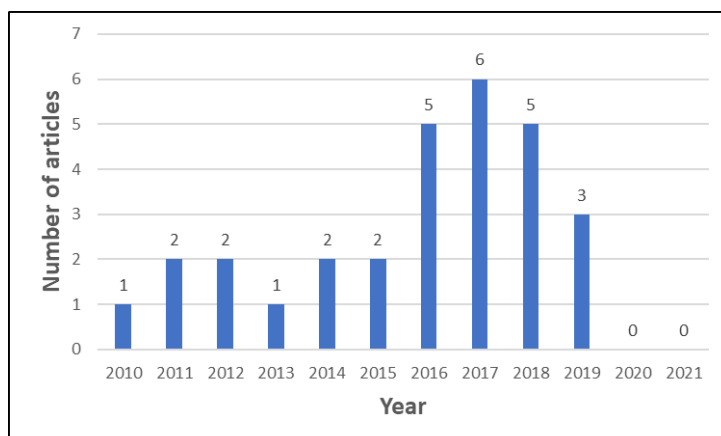
**Figura 10.** Número de estudios incluidos y excluidos durante la ejecución de la revisión sistemática.  
Fuente: Elaboración Propia

### 3.4 Difusión de los resultados

En esta fase, se tiene como objetivo dar a conocer los resultados obtenidos en esta revisión sistemática de la literatura, así como establecer las conclusiones de la misma y presentar posibles líneas de investigación para trabajos futuros.

#### 3.4.1 Resultados por año

En la *Figura 11*, se presenta el número de artículos seleccionados por año de publicación. Al respecto, se pueden destacar tres años, 2016, 2017 y 2018, pues en estos tres años se tiene el mayor promedio de publicaciones. El año con mayor número de artículos es el 2017 con seis artículos y los años 2010 y 2013 son los de menor número de publicaciones con un solo artículo. Cabe señalar que, dentro de esta revisión sistemática de la literatura, no se encontraron artículos relevantes en los años 2020 y 2021.



**Figura 11.** Artículos seleccionados por años de publicación. Fuente: Elaboración propia

### 3.4.2 Resultados de estudios primarios

En la *Tabla 19*, se presentan los resultados obtenidos con base en cada criterio de extracción y cada posible respuesta en cada uno de ellos, esta contiene la cantidad de estudios y su equivalente en porcentaje.

**Tabla 19.** Resultados obtenidos con base en cada criterio

| Criterio de extracción   | #  | %     |
|--|----|-------|
| <b>EC1. Contexto</b>   |    |       |
| Aplicaciones en neurociencias                                  | 10 | 26.00 |
| Tecnologías que utilizan procesamiento de estímulos cerebrales | 24 | 63.16 |
| HCI  | 12 | 31.6  |
| Calidad de vida  | 13 | 34.20 |
| Juegos   | 5  | 13.20 |
| Comunicación   | 7  | 18.40 |
| Rehabilitación y entrenamiento                                 | 3  | 7.89  |
| Otros  | 3  | 7.89  |
| <b>EC2. Herramientas</b>                                       |    |       |
| Casco / Electrodo  | 24 | 63,2  |
| Software de procesamiento                                      | 20 | 52,63 |
| Otros  | 4  | 10,53 |
| <b>EC3. Usuarios</b>   |    |       |
| Usuarios con discapacidad                                      | 14 | 36,84 |

|  |    |       |
|--|----|-------|
| Usuarios Sanos                                     | 25 | 65,79 |
| Usuarios en general                                | 6  | 15,79 |
| <b>EC4. Alcance de la investigación</b>            |    |       |
| Orientación académica                              | 28 | 73,68 |
| Orientación Industrial                             | 10 | 26,30 |
| <b>EC5. Etapas de una estructura BCI</b>           |    |       |
| Adquisición de señales                             | 26 | 68,42 |
| Procesamiento de señales                           | 29 | 76,32 |
| Aplicación – Interacción con el usuario            | 15 | 39,47 |
| Retroalimentación                                  | 9  | 23,68 |
| <b>EC6. Técnicas aplicadas</b>                     |    |       |
| Tarea en particular                                | 13 | 34,21 |
| Imágenes motoras - Sistema perceptivo motor        | 23 | 60,53 |
| Metodologías de imágenes cerebrales – Neuroimagen  | 17 | 44,74 |
| Potenciales P300                                   | 9  | 23,68 |
| Ninguno  | 1  | 2,63  |
| <b>EC7. Características de Calidad de uso</b>      |    |       |
| Eficacia   | 11 | 28,95 |
| Eficiencia   | 20 | 52,63 |
| Satisfacción                                       | 17 | 44,74 |
| Seguridad  | 1  | 2,63  |
| Usabilidad   | 18 | 47,37 |
| Ninguno  | 6  | 15,79 |
| <b>EC8. Características de calidad de producto</b> |    |       |
| Útil   | 27 | 71,05 |
| Deseable   | 8  | 21,05 |
| Aceptable  | 5  | 13,16 |
| Ninguno  | 4  | 10,53 |
| <b>EC9. Fase de estudio</b>                        |    |       |
| Análisis   | 24 | 63,16 |
| Diseño   | 20 | 52,63 |

|                                 |    |       |
|---------------------------------|----|-------|
| Implementación                  | 19 | 50,00 |
| Prueba                          | 11 | 28,95 |
| <b>EC10. Tipo de validación</b> |    |       |
| Encuesta                        | 13 | 34,21 |
| Cuasiexperimento                | 6  | 15,79 |
| Experimento                     | 25 | 65,79 |
| Prototipo                       | 1  | 2,63  |
| Prueba de conceptos             | 2  | 5,26  |
| Caso de estudio                 | 2  | 5,26  |
| Otros                           | 5  | 13,16 |
| <b>EC11. Tipo de estudio</b>    |    |       |
| Estudio Nuevo                   | 30 | 78,95 |
| Extensión de un estudio previo  | 8  | 21,05 |

### 3.4.3 Resultados de estudios primarios

El *Anexo A* contiene la relación de todos los artículos que forman parte de la revisión sistemática de la literatura. Con base en estos estudios, se ha realizado la siguiente discusión en la que se hace referencia al artículo numerado con SX donde X representa el número de estudio.

*EC1. Contexto de investigación:* Los resultados obtenidos de la revisión sistemática indican que el contexto de investigación más utilizado en el conjunto de artículos son las tecnologías que utilizan el procesamiento de estímulos cerebrales (63,16%). Además, también se pueden destacar los contextos de calidad de vida y HCI, con un 34,2% y un 31,6%, respectivamente.

Finalmente, el contexto menos utilizado fue el de rehabilitación y entrenamiento, con un 7,89%; solo tres artículos (S22, S27 y S29) cubrían un contexto diferente a los planteados en la EC1. Los artículos S01, S06, S07, S09, S11, S14, S16, S18, S20, S23, S24, S31, S32, S33, S34, S38, utilizan el contexto de tecnologías que utilizan el procesamiento de estímulos cerebrales y también para desarrollar estas investigaciones utilizaron un casco o electrodos como herramienta. Como se mencionó en capítulos anteriores, el BCI tiene como objetivo mejorar la calidad de vida de las personas que padecen una determinada enfermedad; un claro ejemplo de lo mencionado son los artículos S07, S10, S16, S17, S19,

S21, S23, S26, S28, S35, S36, S37, S38, en los que predomina el segundo contexto más utilizado, calidad de vida.

*EC2. Herramienta utilizada:* En el segundo criterio de extracción, el 63,2% de los artículos revisados, S01, S03, S06, S07, S09, S10, S11, S14, S16, S18, S20, S22, S23, S24, S26, S27, S28, S29, S31, S32, S33, S34, S37 y S38 usan un casco o electrodos como herramienta; es fundamental señalar que la mayoría de los cascos utilizados en BCI contienen electrodos en su estructura, los mismos que se utilizan para tomar la señal cerebral del usuario.

Finalmente, la segunda herramienta más utilizada fue el software de procesamiento, el 52,63% de los artículos utilizaron al menos un software de procesamiento, siendo la segunda herramienta más utilizada. Algunos artículos como S06, S07, S11, S18, S20, S22, S24, S29, S31 y S33 utilizaron las herramientas mencionadas anteriormente. Finalmente, cuatro ítems, S21, S25, S30 y S35, usaron otras herramientas o ninguna herramienta; por ejemplo, S25 cubre el desarrollo de un algoritmo enfocado en la banda espectral Gamma, por otro lado, S30 da información sobre la construcción de un electrodo de contacto seco.

*EC3. Tipo de usuarios:* En cuanto a los tipos de usuarios utilizados en los diferentes artículos de investigación, destaca la participación de usuarios sanos en el 65,79% de los trabajos (S01, S02, S05, S06, S07, S08, S09, S10, S11, S12, S13, S14, S15, S18, S19, S21, S24, S25, S27, S28, S30, S31, S33, S35 y S38). Por otro lado, el 36,84% de las investigaciones encontradas (S10, S16, S17, S20, S21, S22, S24, S26, S28, S33, S35, S36, S37, S38) trabajaron con personas con una enfermedad específica. Finalmente, se trabaja en sistemas BCI útiles para las personas en general en el 15,79% de los artículos (S03, S04, S23, S29, S32 y S34).

*EC4. Alcance de la investigación:* Este criterio analiza el enfoque de la investigación; en este caso, puede ser académico o industrial. Hay una significativa superioridad de los artículos con orientación académica (73,68%), lo que indica que el BCI es una tecnología de interés para el desarrollo y la investigación en las instituciones académicas. Por otra parte, los siguientes artículos (S07, S21, S23, S27, S28, S29, S30, S31, S35 y S37), tienen una orientación industrial; la mayoría de estos artículos se centran en productos que están en el mercado o que saldrán próximamente. Además, muchos artículos con orientación académica se enfocan en la imaginación motriz, por ejemplo, los siguientes artículos (S01, S02, S03, S04, S05, S06, S08, S09, S11, S13, S15, S16, S17, S18, S20, S22, S26, S32, S38).

*EC5. Etapas de la arquitectura de un sistema BCI:* Para este criterio se consideraron cuatro etapas de la arquitectura de un sistema BCI i) Adquisición de señal, ii)

Procesamiento de señal, iii) Retroalimentación, y iv) Aplicación – Interacción con el usuario. La etapa más utilizada fue la etapa de procesamiento de señales; esta etapa se encontró en los siguientes artículos S01, S02, S04, S05, S06, S07, S08, S09, S11, S12, S13, S14, S15, S16, S17, S18, S19, S22, S23, S24, S26, S27, S30, S31, S33, S34, S35, S37 y S38. Por otro lado, la segunda etapa más utilizada fue la adquisición de señales; el 68,42% de los artículos revisados incluyeron esta etapa. En cuanto a la interacción aplicación-usuario y la etapa de procesamiento de señales se utilizan en un gran número de artículos relacionados con el paradigma de la imaginación motora o el paradigma del sistema perceptivo motor; en este contexto se encuentra los siguientes artículos S01 S02, S03, S04, S05, S06, S07, S08, S09, S11, S13, S15, S16, S17, S18, S22, S26, S30, S31 y S38. Finalmente, la retroalimentación fue la etapa menos utilizada en las diferentes investigaciones; 9 artículos en total, S10, S19, S20, S26, S28, S30, S31, S33 y S37, lo usaron.

*EC6. Técnicas aplicadas:* Este criterio analiza los diversos paradigmas que se pueden utilizar en los sistemas BCI; la selección del paradigma adecuado depende del objetivo del sistema BCI. Se consideraron cuatro paradigmas para este criterio: i) Tarea en particular, ii) Imagen motora - Sistema motor perceptivo, iii) Neuroimagen y iv) Potenciales P300. En esta revisión el paradigma más utilizado en los artículos seleccionados es la imaginación motriz, el 60,53% de los artículos (S01, S02, S03, S04, S05, S06, S07, S08, S09, S11, S13, S15, S16, S17, S18, S20, S22, S26, S28, S30, S31, S32 y S38) utilizan este paradigma. Por otro lado, el paradigma de neuroimagen es el segundo más utilizado en los artículos seleccionados, S06, S07, S11, S18, S23, S24, S26, S27, S28, S29, S30, S33, S34, S35, S36, S37 y S38 úsalo. Finalmente, cabe destacar que S25 es el único artículo que no explica la herramienta utilizada en su estudio.

*EC7. Características de calidad de uso:* Este criterio consideró cinco características para ayudar a evaluar la calidad de uso del software, estas fueron: i) Eficacia, ii) Eficiencia, iii) Satisfacción, iv) Seguridad y v) Usabilidad. En este sentido, la revisión de artículos mostró que la eficiencia es la característica más utilizada; 20 artículos (S01, S02, S03, S04, S05, S06, S07, S08, S09, S10, S11, S12, S15, S17, S18, S19, S22, S28, S30 y S36) lo utilizaron. Por otro lado, la usabilidad es la segunda característica más utilizada, los artículos S02, S03, S04, S10, S12, S13, S14, S15, S16, S17, S18, S19, S20, S23, S24, S27, S32 y S36. Mencionan esta característica. Asimismo, la satisfacción es la tercera característica más mencionada en los artículos; 17 lo mencionan. Finalmente, no se menciona ninguna característica para evaluar la calidad de uso en los sistemas BCI en los artículos S25, S31, S33, S34, S35 y S38.

*EC8. Características de la calidad del producto:* Para este criterio se consideraron tres características: i) Útil, ii) Deseable, y iii) Alcanzable. En esta revisión se pudo identificar a la utilidad como la característica más utilizada; los artículos S01, S03, S04, S05, S06, S07, S08, S09, S10, S12, S13, S14, S15, S16, S17, S18, S20, S22, S24, S26, S27, S28, S30, S32, S33, S36 y S37, teniendo en cuenta esta característica. Asimismo, la deseabilidad es la segunda característica más utilizada en los artículos; esto busca relacionar que el software debe generar un deseo de utilizar dicho producto; en los artículos S01, S05, S06, S07, S21, S23, S35 y S38; se menciona esta característica. Finalmente, la accesibilidad se encontró en el 13,16% de los artículos.

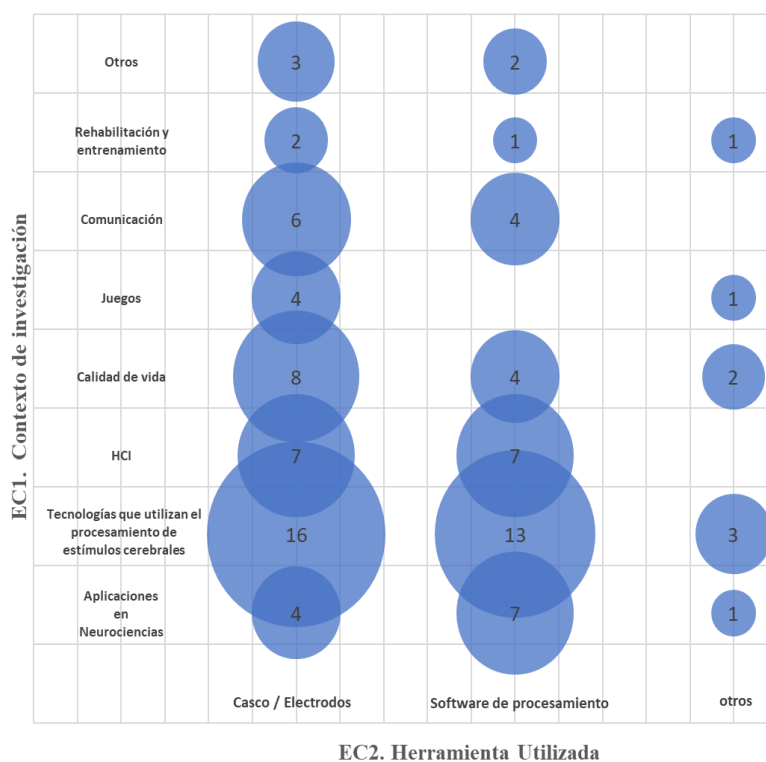
*EC9. Fase de estudio:* Este criterio involucra las fases de estudio descritas en cada uno de los artículos; se puede destacar que el 63,16% de los artículos (S01, S02, S03, S04, S05, S08, S11, S12, S13, S14, S15, S16, S17, S19, S20, S21, S22, S23, S24, S25, S29, S32, S34 y S38), explican la fase de análisis de su investigación. Por otro lado, 20 artículos (S01, S02, S03, S04, S05, S06, S07, S08, S09, S10, S11, S12, S13, S14, S15, S16, S17, S18, S22 y S37) explican la fase de diseño de su investigación. Finalmente, la fase de implementación se explicó en el 50% de los artículos revisados, mientras que la fase de prueba se explicó en 11 artículos (S03, S05, S07, S09, S10, S18, S19, S22, S26, S27 y S28).

*EC10. Tipo de validación:* Este criterio analiza el tipo de validación utilizado en los diferentes artículos revisados. La validación a través de experimentos es la más utilizada; 25 artículos aplican este tipo de validación en sus investigaciones. En cambio, en los artículos S01, S03, S04, S05, S06, S07, S08, S09, S11, S13, S14, S18 y S19, se utilizan encuestas para la validación. Además, el cuasiexperimento se utiliza en el 15,79% de los trabajos. Finalmente, el prototipo fue el tipo de validación menor utilizado; S07 fue el único artículo que lo usó. Además, al comparar los criterios EC11 con EC12, podemos ver que el experimento se utiliza principalmente en nuevos estudios; así, sólo ocho artículos (S06, S10, S18, S20, S26, S27, S31 y S36) de los revisados son artículos que continúan un estudio y utilizan el experimento como forma de validación.

*EC11. Tipo de estudio:* Este criterio analiza si los artículos son estudios nuevos o ampliaciones de un estudio anterior. De esta forma, los resultados muestran que el 78,95% de los artículos revisados son temas nuevos, y solo los artículos S06, S10, S18, S20, S26, S27, S31 y S36 son la continuación de un estudio desarrollado previamente.

### 3.4.4 Comparación de los criterios de extracción

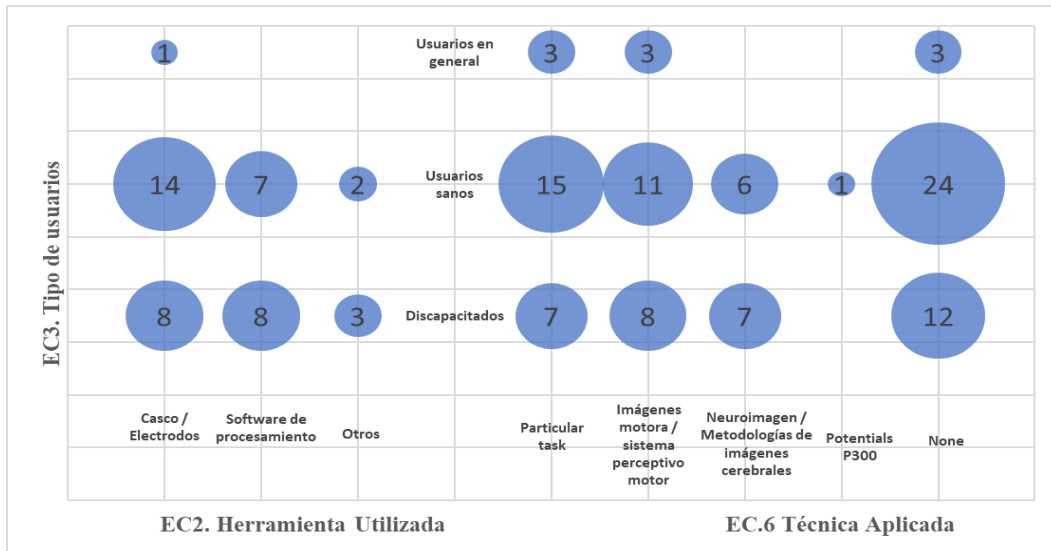
En la *Figura 12* se puede observar la comparación en el EC1: Contexto de investigación y el EC2: Herramienta utilizada, se puede destacar que 16 artículos utilizan Casco/Electrodos en un contexto de tecnologías que utilizan el procesamiento de estímulos cerebrales, en este mismo contexto 11 artículos utilizan un software de procesamiento. El segundo contexto más utilizado es la calidad de vida y para su desarrollo, 8 artículos utilizan Casco/Electrodos y 4 artículos un software de procesamiento.



**Figura 12.** Gráfica comparativa entre EC1: Contexto de investigación y EC2: Herramienta utilizada. Fuente: Elaboración propia

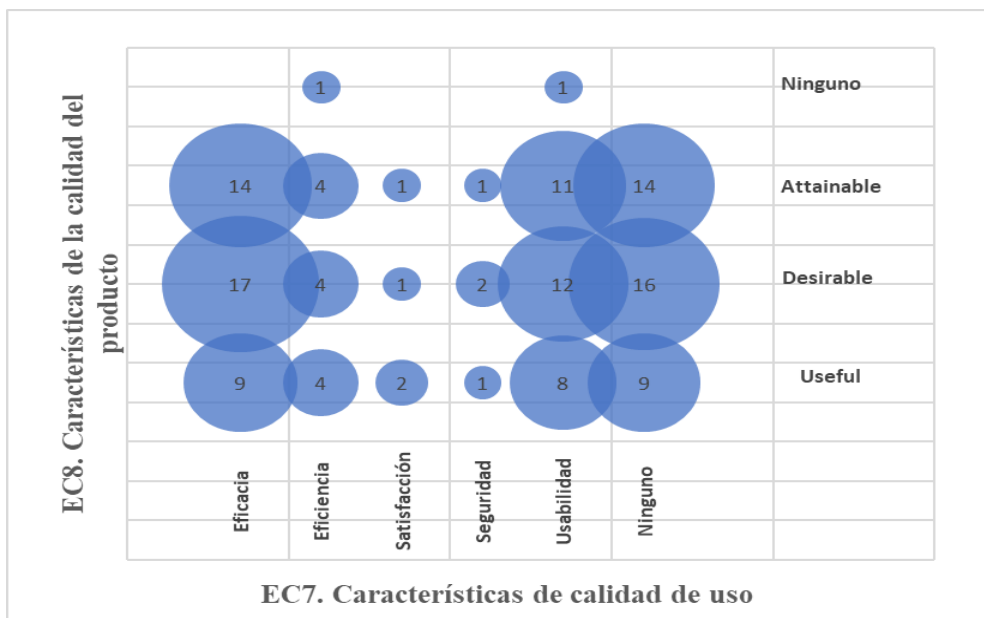
En la *Figura 13* se puede observar la comparación del EC3: Tipo de usuario con EC2: Herramienta utilizada y EC6: Técnica aplicada, se puede destacar que 14 artículos trabajaron con usuarios sanos utilizando un casco/electrodos, por otro lado, un total de 24 artículos trabajo con usuarios sanos, pero no utilizo o no explicó una determinada técnica. Se puede destacar que existen artículos que trabajaron con usuarios sanos o discapacitados y entre ellos utilizaron todas las herramientas tomadas en cuenta para esta revisión, pero existe un solo artículo que trabajo con usuarios en general y solo utilizo un casco/electrodos.





**Figura 13.** Gráfica comparativa de EC3: Tipos de usuario con EC2: Herramienta utilizada y EC6: Técnica aplicada Fuente: Elaboración propia

En la *Figura 14* se puede observar la comparación entre EC7: Características de calidad de uso con EC8: Características de calidad de producto, se puede destacar la característica de calidad de uso, eficacia que es utilizada en 17 artículos junto con la calidad de producto deseable.



**Figura 14.** Gráfica comparativa de EC8: Características de calidad de producto con EC7: Características de calidad de uso Fuente: Elaboración propia.

## CAPÍTULO 4: MÉTODO DE EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE SISTEMAS

### BRAIN COMPUTER INTERFACE

En el siguiente capítulo, se presenta el método BCIS-QUAM, el mismo que tiene por objetivo evaluar la calidad de uso y de producto y la experiencia de usuario de los sistemas BCI en general, independientemente de su finalidad o herramientas de uso. Este método está especificado utilizando el lenguaje de meta-modelado Software and System Process Engineer Method (SPEM 2.0) creado por Object Management Group (OMG) y basado en MetaObject Facility (MOF) y en Uniform Model Language (UML) (Menéndez & Bolaños, 2015).

#### 4.1 Contexto

En la actualidad, BCI es un tema que ha ganado popularidad entre la sociedad y a diario existen nuevas investigaciones, desarrollo de aplicaciones, trabajos, etc. Con el estado del arte realizado en el Capítulo 2, se identificó la necesidad de crear un método que permita evaluar la calidad de los sistemas que utilizan esta tecnología.

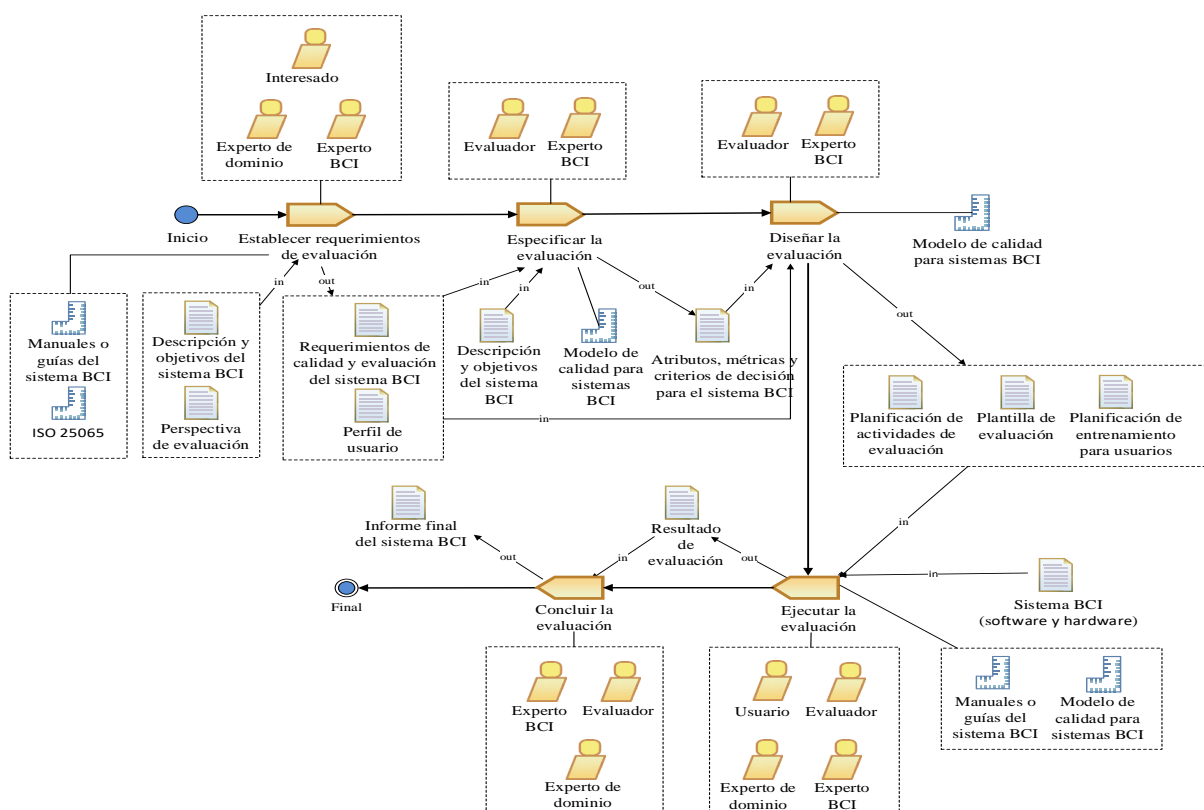
El método propuesto permite a los ingenieros de software, computación o afines, evaluar cualquier sistema BCI, independientemente de su finalidad o herramienta de uso. Este permitirá evaluar la usabilidad desde el punto de vista de calidad del sistema BCI como un producto de software y desde el punto de vista de ingenieros de software o usuario final, también permite evaluar la experiencia de usuario desde el punto de vista de usuario final.

Esta contribución es un buen inicio para derivar a dominios específicos mecanismos de evaluación, ya que esta contribución establece un primer paso, hacia la evaluación de la calidad de este tipo de soluciones que, por sus características, dista de un sistema tradicional. Uno de los puntos neurálgicos de diferenciación, está en el uso del hardware vinculado, mismo que al día de hoy presenta aún muchas dificultades, tales como niveles altos de interferencia, falta de repetitividad lo que resta confiabilidad al sistema, usabilidad dependiente del usuario, dominio, entre otros. Siendo así que, se requieren este tipo de soporte hacia la evaluación de la calidad con el fin de que el avance en dichas brechas sea fácil de comprobar. Cabe destacar que por delante queda aún mucho trabajo que recorrer, haciendo que de esta contribución deriven aspectos relacionados con dominios específicos tales como la salud, neuropsicología, neuromarketing, entre otras.

Este método está alineado con el estándar ISO/IEC 25040, que propone un proceso de referencia para la evaluación de productos software.

## 4.2 Metodología propuesta

El método propuesto está conformado por cinco actividades: i) establecer requerimientos de evaluación, ii) especificar la evaluación, iii) diseñar la evaluación, iv) ejecutar la evaluación y v) concluir la evaluación, en la *Figura 15*, se puede visualizar el diagrama general del método propuesto.



**Figura 15.** Método de evaluación de la calidad BCIS-QUAM. Fuente: Elaboración propia

En cada actividad, intervienen diferentes roles, en la *Tabla 20*, se encuentra detallado cada uno de los diferentes roles que intervienen en el método de evaluación.

**Tabla 20.** Roles que intervienen en el método BCIS-QUAM

| Rol               | Descripción   | Función   |
|-------------------|---|---|
| <b>Interesado</b> | Entidad que está interesada en realizar la evaluación del sistema seleccionado. | <ul style="list-style-type: none"> <li>Indica el sistema BCI a evaluar.</li> <li>Aclara el objetivo de la evaluación.</li> <li>Determina los objetivos de la evaluación.</li> </ul> |

|                                |   |  |
|--------------------------------|---|--|
| <b>Experto de dominio</b>      | Persona que tiene conocimiento del dominio aplicado en el sistema BCI         | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ayuda en la especificación de requerimientos</li> <li>• Soporte en la ejecución de la evaluación</li> <li>• Ayuda en el análisis y conclusión de la evaluación</li> </ul>   |
| <b>Experto en sistemas BCI</b> | Persona que posee un nivel alto de conocimientos en el área BCI               | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ayuda en la especificación de requerimientos</li> <li>• Ayuda en la especificación de la evaluación</li> <li>• Ayuda en el diseño de la evaluación</li> <li>• Ayuda en el análisis y conclusión de la evaluación</li> </ul> |
| <b>Evaluador</b>               | Persona que se encarga de ejecutar las actividades definidas en la evaluación | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ayuda en la especificación de la evaluación</li> <li>• Ayuda en el diseño de la evaluación</li> <li>• Ayuda en la ejecución de la evaluación</li> <li>• Ayuda en el análisis y conclusión de la evaluación</li> </ul>       |
| <b>Usuario</b>                 | Persona que utiliza el sistema BCI utilizado en la evaluación                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Interviene en la ejecución de la evaluación</li> </ul>  |

#### 4.2.1. Actividad 1: Establecer requerimientos de evaluación

La primera actividad del método tiene como objetivo definir el alcance que tendrá la evaluación de calidad; para ello, la entidad interesada en la evaluación, el experto en sistemas BCI y el experto del dominio, son los encargados de elaborar un documento con los requerimientos de evaluación e identifican el perfil del usuario que hará uso del sistema BCI a evaluar.

Como se puede observar en la *Figura 16*, en esta fase se realizan cinco tareas: i) Identificar elementos, características y restricciones del sistema BCI, ii) Establecer objetivos de evaluación, iii) Establecer requisitos no funcionales, iv) Definición de partes a evaluar, v) Definir perfil de usuario.

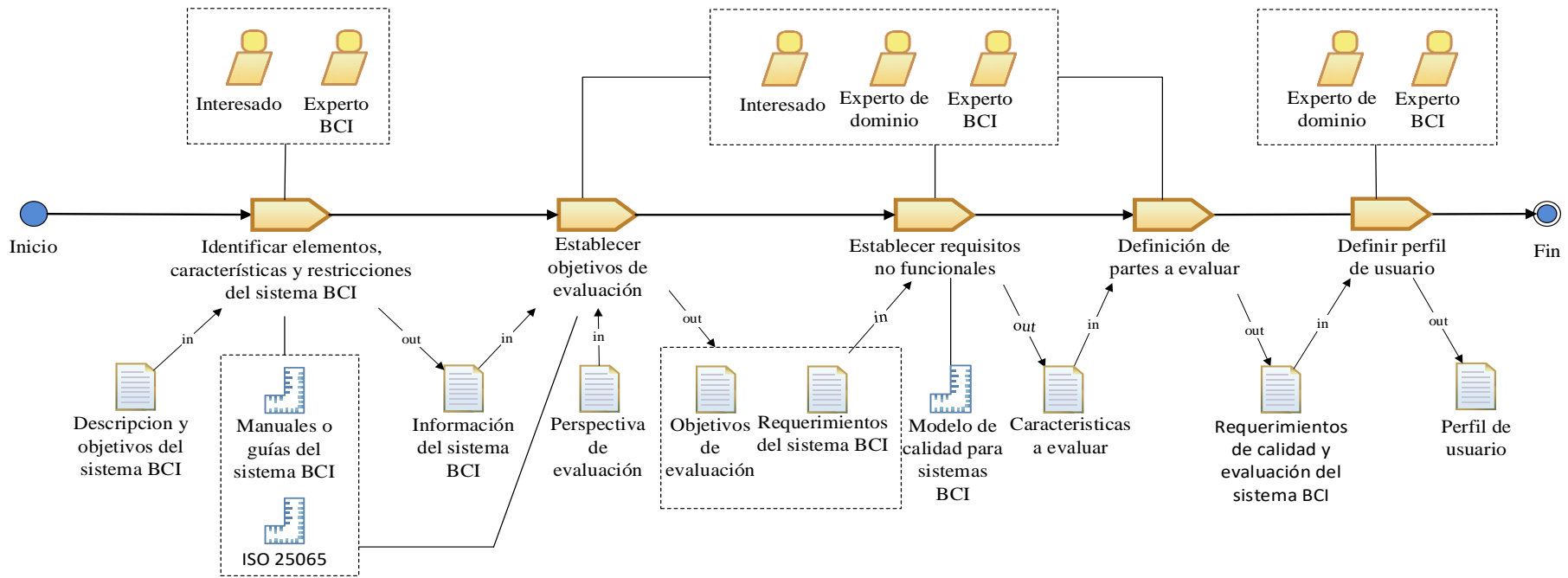


Figura 16. Actividad 1: Establecer requerimientos de evaluación. Fuente: Elaboración propia.

## 4.2.1.1 Identificar elementos, características y restricciones del sistema BCI

En esta primera tarea, la entidad interesada en la evaluación, conjuntamente con el experto en BCI, revisan el manual y guía del sistema BCI a evaluar; esto, con la finalidad de extraer la información más relevante del mismo, entre esta información se debe destacar las características del sistema, su estructura, sus elementos y sus restricciones. En esta actividad intervienen dos guías, el manual del sistema BCI y la ISO/IEC 25065, además hacen uso de un artefacto, que es el documento con la descripción y objetivos del sistema BCI. El resultado de esta tarea es un documento con la información extraída por los implicados.

## 4.2.1.2 Establecer objetivos de evaluación

En la segunda tarea, la entidad interesada, el experto en sistemas BCI y el experto en el dominio son los encargados en definir los objetivos de la evaluación, para ello pueden utilizar el esquema de marco de trabajo de Basili, Caldiera, & Rombach (1994) llamado Goal-Question-Metric (GQM), el mismo que engloba los puntos de la *Tabla 21*. Para esta tarea utilizan el documento resultado de la tarea anterior y un documento con la perspectiva que tiene la evaluación a realizar, como resultado se generan dos documentos, uno con los objetivos establecidos y otro con los requerimientos del sistema.

**Tabla 21.** Goal-Question-Metric (GQM)

|                                   |  |
|-----------------------------------|--|
| <b>Analizar</b>                   | ¿Qué es lo que se analiza?   |
| <b>Con el propósito de</b>        | ¿Qué intención tiene el estudio?                                   |
| <b>Con respecto a</b>             | ¿Cuál es el efecto estudiado?                                      |
| <b>Desde el punto de vista de</b> | ¿Quién se ve afectado?   |
| <b>En el contexto de</b>          | ¿Cuál es el contexto en el cual se va a desarrollar la evaluación? |

## 4.2.1.3 Establecer requisitos no funcionales

En la tercera tarea, la entidad interesada en la evaluación, el experto en sistemas BCI y el experto del dominio son los encargados de definir las características a evaluar en el sistema BCI, para ello utilizan una guía, el modelo de calidad, detallado en el *Capítulo 5*.

## 4.2.1.4 Definir las partes a evaluar

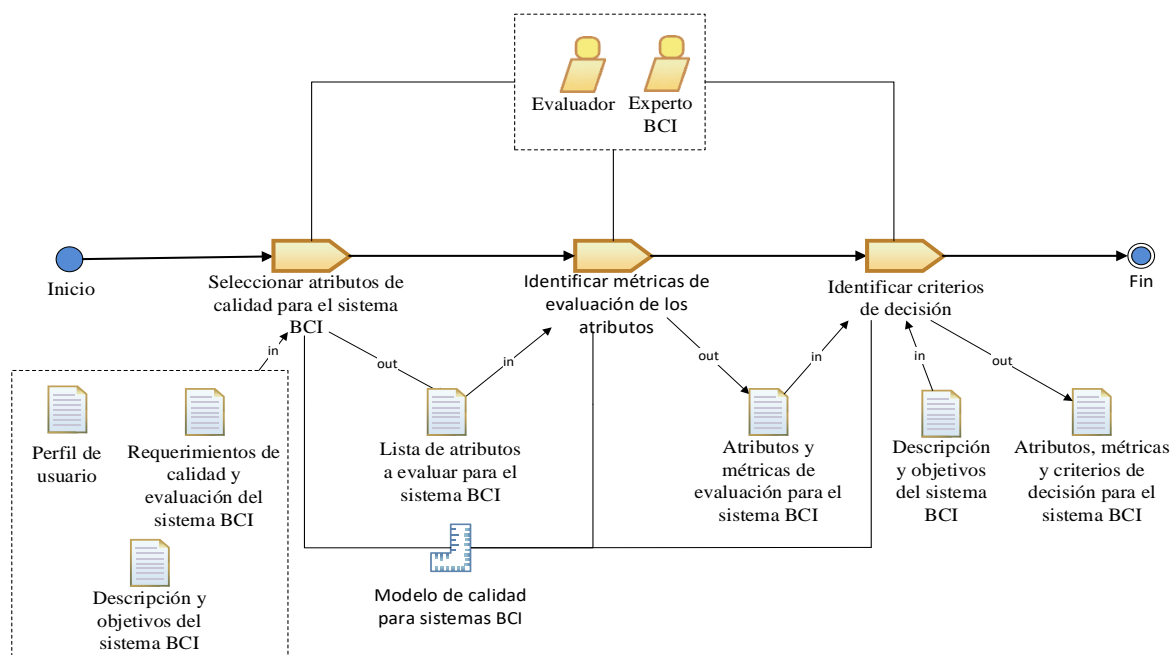
En la cuarta tarea, la entidad interesada en la evaluación, el experto en sistemas BCI y el experto del dominio, son los encargados de definir si se va a evaluar un elemento del sistema BCI o se va a evaluar todo el sistema. Para ello utilizan el documento con las características a evaluar y generan un nuevo documento con los requerimientos de calidad y evaluación del sistema BCI.

## 4.2.1.5 Definir el perfil de usuario

En la última tarea de la actividad 1 del método de evaluación, el experto en sistemas BCI y el experto del dominio, son los encargados de identificar el perfil de usuario, dicho perfil hace referencia al usuario que hará uso del sistema BCI.

## 4.2.2. Actividad 2: Especificar la evaluación

En la segunda actividad, el evaluador y experto en BCI, son los encargados de generar de manera teórica lo que se tiene que evaluar en el sistema BCI. Como se puede observar en la *Figura 17*, en esta actividad se realizan tres tareas: i) Seleccionar atributos de calidad para el sistema BCI, ii) Identificar métricas de evaluación de los atributos y iii) Identificar criterios de decisión.



**Figura 17.** Actividad 2: Especificar la evaluación. Fuente: Elaboración propia

## **4.2.2.1 Seleccionar atributos de calidad para el sistema BCI**

En esta tarea el evaluador y experto en sistemas BCI son los encargados de generar un documento con los atributos que faciliten la evaluación del sistema BCI, para ello se basan en documentos generados en la fase anterior como el perfil de usuario, los requerimientos de calidad, evaluación, la descripción y objetivos del sistema BCI, además utilizan el modelo de calidad para la selección de atributos.

## **4.2.2.2 Identificar métricas de evaluación de los atributos**

En esta tarea el evaluador y experto de sistemas BCI, son los encargados de identificar las métricas a utilizar para cada atributo seleccionado en la actividad anterior, en esta actividad el usuario tiene la opción de eliminar cualquier atributo que considere innecesario para la evaluación. Para ello utilizan el modelo de calidad y generan una nueva lista de atributos junto a su métrica de evaluación.

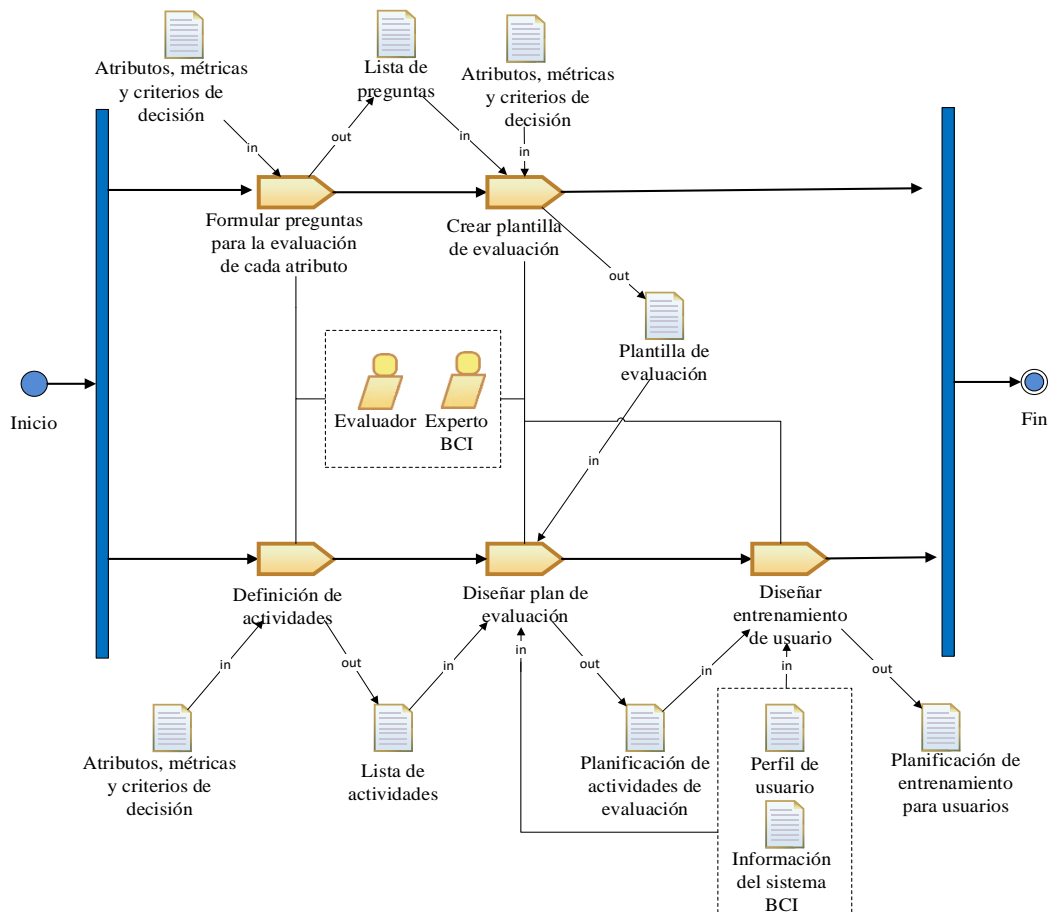
## **4.2.2.3 Identificar criterios de decisión**

En esta tarea el evaluador y experto en BCI son los encargados de identificar la forma en cómo se va a evaluar el atributo seleccionado y cómo se va a clasificar el resultado que se obtenido de la métrica aplicada. Para ello utilizan la lista generada en la tarea anterior y se genera un documento más completo, con los atributos, métricas y criterios de decisión.

## **4.2.3. Actividad 3: Diseñar la evaluación**

En la tercera actividad del método BCIS-QUAM, el evaluador y el experto en BCI realizan cinco tareas, como se puede observar en la *Figura 18*, dos de estas tareas se pueden realizar de forma independiente o al mismo tiempo que realizan las otras tres. Las tareas a realizar son las siguientes: i) Formular preguntas para la evaluación de cada atributo, ii) Crear plantilla de evaluación, iii) Definición de actividades, iv) Diseñar plan de evaluación y v) Diseñar entrenamiento de usuario.





**Figura 18.** Actividad 3: Diseñar la evaluación. Fuente: Elaboración propia.

### 4.2.3.1 Formular preguntas para la evaluación de cada atributo

En esta tarea el evaluador y el experto en sistemas BCI, son los encargados de revisar el documento que contiene los atributos, métricas y criterios de decisión, que se van a evaluar en el sistema BCI, y generar las preguntas para evaluar cada uno de los atributos, con base en la métrica que utilice el atributo, esta pregunta puede ser cerrada, de cálculo o abierta. Al finalizar esta tarea se obtiene un documento con todas las preguntas a realizar en la evaluación.

### 4.2.3.2 Crear plantilla de evaluación

En esta tarea el evaluador y el experto en sistemas BCI, son los encargados en crear la plantilla que se va a utilizar para evaluar el sistema, en esta actividad identifican que preguntas son para el usuario y que preguntas para el evaluador, la diferencia entre las plantillas es que las preguntas para el usuario las puede responder después de utilizar el sistema, con base en su experiencia, mientras que la otra plantilla contiene preguntas

netamente que un profesional podría responder con base en sus conocimientos y el seguimiento a la ejecución de la actividad 4 del método.

#### **4.2.3.3 Definición de actividades**

En esta tarea, el evaluador y el experto en sistemas BCI son los encargados de identificar las actividades que debe realizar el usuario al utilizar el sistema, para ello toman en cuenta el documento con los atributos que se van a evaluar, como resultado se obtiene un documento con todas las actividades que debe realizar el usuario.

#### **4.2.3.4 Diseñar el plan de evaluación**

En esta tarea, el evaluador y el experto en sistema BCI son los encargados de planificar como se va a realizar la evaluación, en esta actividad elaboran los anexos necesarios, identifican las herramientas necesarias y detallan cada una de las actividades que debe realizar el usuario. El resultado de esta tarea es un documento con toda la planificación de la evaluación.

#### **4.2.3.5 Diseñar entrenamiento de usuarios**

En esta tarea, el evaluador y el experto en sistemas BCI son los encargados de definir qué actividad se va a realizar como entrenamiento para el usuario, por lo general, en esta actividad se decide si el sistema se va a acoplar a la actividad cerebral del usuario o si se va a clasificar al usuario en apto o no para realizar la evaluación.

#### **4.2.4. Actividad 4: Ejecutar la evaluación**

En esta actividad, se tiene como objetivo, efectuar la evaluación del sistema BCI, para ello el usuario se encarga de ejecutar las actividades planteadas en la actividad anterior, mientras que el evaluador y experto en BCI se encargan de dar un valor a los atributos seleccionados con base en cómo el usuario se desenvuelve con el sistema. En la *Figura 19*, se puede observar que en esta actividad se realizan seis tareas: i) Ejecución entrenamiento usuario, ii) Preparación adquisición de la señal, iii) Procesamiento de la señal, iv) Preparación de la aplicación, v) Ejecución y vi) Evaluación del sistema BCI.

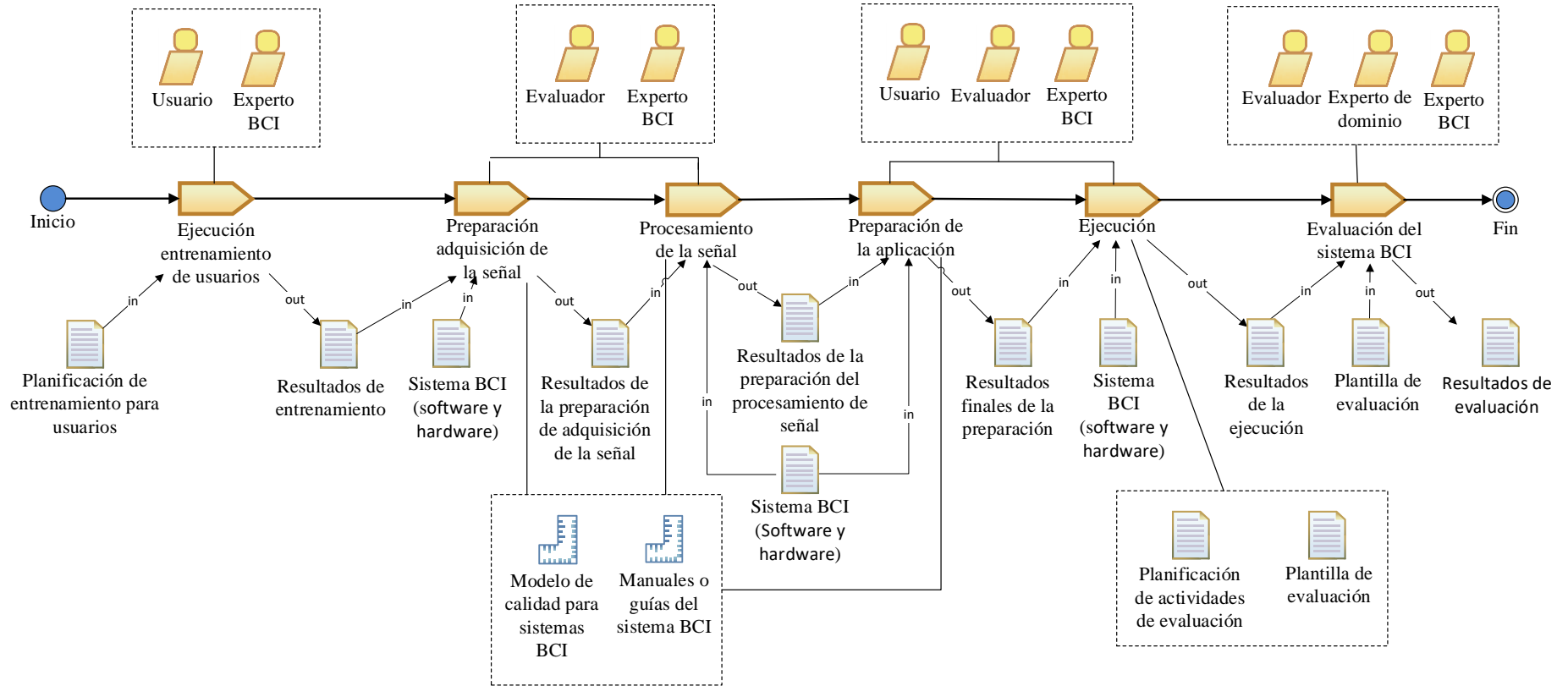


Figura 19. Actividad 4: Ejecutar la evaluación. Fuente: Elaboración propia.

#### **4.2.4.1 Ejecutar entrenamiento de usuario**

En esta tarea el usuario realiza las actividades de la planificación de entrenamiento, esto con el objetivo de que el usuario conozca el sistema y se verifique si es capaz o no de cumplir una determinada tarea, en algunas ocasiones, esta tarea puede ser utilizada para que el sistema se adapte a la actividad mental del usuario.

#### **4.2.4.2 Preparación de la adquisición de la señal.**

En esta tarea el evaluador y experto en BCI son los encargados de verificar que el sistema BCI reciba correctamente las señales cerebrales que emite el usuario.

#### **4.2.4.3 Verificar el procesamiento de la señal**

En esta tarea, el evaluador y experto en BCI se encarga de revisar que el dispositivo está recibiendo correctamente la orden que se genera al procesar las señales cerebrales del usuario.

#### **4.2.4.4 Preparación de la aplicación**

En esta tarea, el evaluador y el experto en sistemas BCI, son los encargados en alistar todos los elementos necesarios que conforman el sistema BCI y comprobar su correcto funcionamiento, en esta tarea es necesario que tengan en cuenta posibles problemas que se puedan dar al momento de que el usuario utilice el sistema, por ejemplo, si necesita pilas, la distancia máxima entre el usuario y el computador que recibe las señales etc.

#### **4.2.4.5 Ejecutar la evaluación**

En esta tarea el evaluador y el experto en sistemas BCI, son los encargados en alistar todos los elementos necesarios que conforman el sistema BCI y comprobar su correcto funcionamiento, en esta actividad es necesario que tengan en cuenta posibles problemas que se puedan dar al momento de que el usuario utilice el sistema, por ejemplo, si necesita pilas, la distancia máxima entre el usuario y la aplicación, etc.

#### **4.2.4.6 Evaluación del sistema BCI**

En esta tarea el evaluador, experto de dominio y experto en sistemas BCI, son los encargados de llenar la plantilla de evaluación, generada en la actividad anterior, y generar un documento con estos resultados.

## 4.2.5. Actividad 5: Concluir la evaluación

En esta actividad, el evaluador y experto en sistemas BCI, son los encargados de generar los resultados finales y la conclusión sobre la evaluación al sistema BCI. En la *Figura 20*, se pueden observar las tareas que se realizan en esta actividad: i) Calcular indicadores, ii) Revisar y analizar los resultados de evaluación y iii) Elaborar el informe. Al final de la fase, el informe es entregado a la entidad interesada de la evaluación.



**Figura 20.** Fase 5: Concluir la evaluación. Fuente: Elaboración propia.

### 4.2.5.1 Calcular indicadores

En esta tarea, el evaluador y experto en BCI son los encargados de reunir todos los resultados de la evaluación y realizar los respectivos cálculos para obtener el valor en cada característica y sub-característica que se evaluó del sistema BCI. En la descripción del modelo de calidad, se describe la fórmula que se debe utilizar.

### 4.2.5.2 Revisar y analizar los resultados de la evaluación

En esta tarea, el evaluador y experto en sistema BCI son los encargados de analizar todos los resultados obtenidos de la ejecución de la evaluación y del cálculo de indicadores, en esta actividad tiene una gran importancia los criterios de calidad, seleccionados en fases anteriores.

### **4.2.5.3 Elaborar informes**

Finalmente, el evaluador y experto en sistemas BCI elaboran un informe con todos los resultados obtenidos y generan las conclusiones del sistema BCI, este informe es entregado a la entidad interesada en la evaluación.

## CAPÍTULO 5: MODELO DE CALIDAD

Este capítulo describe todas las características y sub-características que conforman un modelo de calidad, el cual tiene como objetivo ser un artefacto fundamental para la evaluación de la calidad de producto, la calidad en uso y la experiencia de usuario de un sistema BCI. Este modelo ha sido desarrollado con base en tres normas, la primera es la ISO/IEC 25010 (ISO/IEC, 2011), la cual presenta características fundamentales al momento de evaluar un producto software, la segunda es la ISO/IEC 9241-210 (ISO/IEC, 2010), la cual fue adaptada para realizar la evaluación de la experiencia de usuario. Finalmente, para evaluar la interfaz del sistema BCI se utilizó la Web Content Accessibility Guidelines (WCAG) 2.1 (W3C Recommendation, 2018), esta norma se consideró en caso de que el sistema BCI utilice una pantalla de interacción con el usuario. El modelo de calidad se puede observar íntegramente en el *Anexo B*.

### 5.1 Calidad de Software

Según Callejas-Cuervo et al (2017), el término de calidad de software hace referencia al nivel de desempeño de las características que un sistema debe cumplir durante todo su ciclo de vida. Estas características garantizan que el usuario se sienta más satisfecho frente a la funcionalidad y eficiencia del sistema.

### 5.2 Modelo de calidad de software

Para que la calidad de software sea garantizada es necesario implementar un modelo de calidad el cual permita la gestión de los atributos presentes en el software. En este sentido, el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos define calidad de software como "el grado con el que un sistema, componente o proceso cumple los requerimientos especificados y las necesidades o expectativas del cliente o usuario", destacando que el énfasis radica en los requisitos específicos del sistema y en la búsqueda de la satisfacción del cliente.

Los modelos de calidad son aquellos documentos que integran la mayor parte de las mejores prácticas, proponen temas de administración en los que cada organización debe hacer énfasis, integran diferentes prácticas dirigidas a los procesos clave y permiten medir los avances en calidad (Callejas-Cuervo et al., 2017)

Por tal motivo en esta sección se describen las sub-características y sus atributos necesarios para la evaluación de un sistema BCI, cada una de ellas contiene su métrica y

criterio de evaluación, lo que facilita realizar la evaluación de un sistema BCI haciendo uso de esta herramienta. Es importante mencionar que algunas características y atributos han sido seleccionados gracias a la revisión sistemática realizada en el *Capítulo 3* y es importante recalcar que ningún artículo revisado tenía como tema central realizar un modelo de calidad.

Para elaborar el modelo de calidad se consideró la usabilidad de la norma ISO/IEC 25010 como la característica principal para la calidad de sistemas BCI (ISO/IEC, 2011). Sin embargo, se consideran dos características adicionales las cuales son la experiencia de usuario y la accesibilidad. La experiencia de usuario se basa en la ISO/IEC 9241-210 (ISO/IEC, 2010) mientras que la accesibilidad a nivel de interfaces se basa en Web Content Accessibility Guidelines (WCAG) 2.1 (W3C Recommendation, 2018).

## 5.3 Usabilidad

Según la ISO/IEC 25010, se describe a la usabilidad como la capacidad que tiene un producto de software para ser entendido, aprendido, usado y resultar atractivo para los usuarios que lo utilicen, bajo determinadas condiciones. Estas características contienen un total de seis sub-características, de las cuales la sub característica estética de la interfaz de usuario, no fue tomada en cuenta en esta parte del modelo de calidad; esto debido a que no todos los sistemas BCI contienen una interfaz de usuario. Por tal motivo la mayoría de sistemas BCI buscan centrar toda la concentración del usuario en el objetivo del sistema BCI y no causar una distracción externa al usuario (ISO/IEC, 2011).

### 5.3.1 Inteligibilidad

En la ISO/IEC 25010 se define inteligibilidad como la capacidad de un producto que permite al usuario entender si el software es adecuado para sus necesidades.

En la *Tabla 22* se describe cada una de las sub-características y atributos asociados a la inteligibilidad.

**Tabla 22.** Sub-subcaracterísticas y atributos de Inteligibilidad

| Sub-subcaracterística | Atributo            | Métrica  |
|-----------------------|---------------------|--|
| Legibilidad visual    | Tamaño de elementos | Relación del número de elementos con tamaño apropiado ( $N_a$ ) entre el número total de elementos ( $N_t$ ) dentro de la interfaz del sistema BCI |



---

Visualización completa de los elementos      Nivel de satisfacción visual sobre los elementos del sistema BCI

---

## 5.3.2 Aprendizaje

La ISO/IEC 25010 define el aprendizaje como la capacidad del producto que permite al usuario aprender su aplicación, en la *Tabla 23* se describe cada una de las subcaracterísticas y atributos asociados al aprendizaje.

**Tabla 23.** Sub-subcaracterísticas y atributos de Aprendizaje

| Sub-subcaracterística | Atributo                                      | Métrica  |
|-----------------------|---|--|
| <b>Comprensión</b>    | Facilidad de comprensión de interfaz          | Relación entre el número de elementos de elementos comprendidos (Ne) por el usuario y el número total de elementos (Nt) existentes en el sistema BCI |
|                       | Nivel de entrenamiento                        | Nivel de entrenamiento que se requiere para que los usuarios puedan aprender el manejo del sistema BCI   |
| <b>Ayuda</b>          | Efectividad de la documentación               | Necesidad de utilizar la documentación para el uso del sistema BCI   |
|                       | Guía de actividades                           | Nivel de retroalimentación hacia el usuario de las acciones que se pueden o se están llevando a cabo en el sistema BCI                               |
| <b>Previsibilidad</b> | Previsibilidad de las acciones                | Relación entre el número de elementos con acciones previsibles (Ep) y el número total (Et) de elementos del sistema BCI                              |
|                       | Determinación de posibles acciones permitidas | Relación entre el número total de acciones permitidas (Ap) en una sección del sistema BCI y  |

el número total (At) de acciones disponibles

### 5.3.3 Operabilidad

La ISO/IEC 25010 define la operabilidad como la capacidad del producto que permite al usuario operarlo y controlarlo con facilidad, en la *Tabla 24* se describe cada una de las subcaracterísticas y atributos asociados a la operabilidad.

**Tabla 24.** Sub-subcaracterísticas y atributos de Operabilidad

| Sub-subcaracterística | Atributo                       | Métrica  |
|-----------------------|--------------------------------|--|
| <b>Adaptabilidad</b>  | Frecuencia de uso              | Frecuencia con la que el sistema BCI será utilizado por el usuario   |
|                       | Instalación y preparación      | Nivel de instalación del sistema BCI para su utilización   |
|                       | Comodidad                      | Nivel de comodidad que sintió el usuario al utilizar el sistema BCI  |
|                       | Satisfacción                   | Nivel de satisfacción al utilizar el sistema BCI   |
| <b>Manejabilidad</b>  | Complejidad                    | Nivel de complejidad del sistema BCI percibido por parte del usuario   |
| <b>Fiabilidad</b>     | Madurez                        | Relación del número de acciones realizadas con errores (Ae) y el número de acciones realizadas en total (At).                |
|                       | Confiabilidad                  | El grado en que un programa satisface sus especificaciones y consigue los objetivos de la misión encomendada por el usuario. |
|                       | Tiempo de registro de la señal | Relación entre la precisión y el tiempo requerido  |
| <b>Portabilidad</b>   | Autonomía                      | Nivel de la autonomía del usuario al utilizar el sistema BCI   |

## 5.3.4 Protección contra errores de usuario

En la ISO/IEC 25010 se define la protección contra errores de usuario como la capacidad del sistema para proteger a los usuarios de hacer errores, en la *Tabla 25* se describe cada una de las sub-subcaracterísticas y atributos asociados.

**Tabla 25.** Sub-subcaracterísticas y atributos de Protección contra errores de usuario

| Sub-subcaracterística        | Atributo               | Métrica  |
|------------------------------|------------------------|--|
| <b>Prevención de errores</b> | Validación de acciones | Relación entre el número de acciones realizadas con errores (Ae) y el número total de acciones realizadas (At).                              |
|                              | Errores de movilidad   | Relación entre el número de acciones realizadas con errores (Ae) y el número total de acciones realizadas con movimientos del hardware (At). |
| <b>Reversibilidad</b>        | Estado previo          | Relación del número total de acciones que permiten retroceso (Ar) y el número total de acciones (At) que permite el sistema BCI              |

## 5.3.5 Estética

En la ISO/IEC 25010, se define la estética como la capacidad de la interfaz de usuario de agradar y satisfacer la interacción con el usuario, en la *Tabla 26* se describe cada una de las sub-subcaracterísticas y atributos asociados.

**Tabla 26.** Sub-subcaracterísticas y atributos de Estética

| Sub-subcaracterística      | Atributo   | Métrica  |
|----------------------------|--|--|
| <b>Proporcionalidad</b>    | Relación de tamaño entre los elementos y la pantalla | Relación proporcional entre el área que ocupa un elemento en la pantalla del sistema BCI y el área total de la pantalla del sistema BCI. |
| <b>Consistencia Visual</b> | Organización de los elementos                        | Nivel de identificabilidad y accesibilidad a los diferentes elementos del sistema BCI de una   |

|  |   |
|--|---|
|  | forma organizada  |
| Calidad Multimedia                                   | Nivel de calidad percibida por el usuario con respecto a los elementos multimedia presentes en el sistema BCI         |
| Distribución de los elementos en la interfaz gráfica | Relación de la disposición de los elementos en la pantalla (Ep) con el número total de elementos (Et) del sistema BCI |

### 5.3.6 Experiencia de usuario

La experiencia de usuario se define como el conjunto de factores y elementos que se relacionan con la interacción del usuario con respecto a productos o servicios (Córdoba, 2013), en este caso la interacción del sistema BCI.

**Tabla 27.** Sub-subcaracterísticas y atributos de Experiencia de usuario

| Sub-subcaracterística | Atributo                         | Métrica   |
|-----------------------|----------------------------------|---|
| <b>Autonomía</b>      | Tiempo de colocación             | Tiempo que se demora el usuario en colocarse las herramientas necesarias para utilizar el sistema BCI |
|                       | Asistencia                       | Evalúa si el usuario necesita ayuda de otra persona para colocarse las herramientas                   |
| <b>Ergonomía</b>      | Comodidad al usar el sistema BCI | Evalúa si el usuario se sintió cómodo o no al momento de utilizar el sistema BCI                      |
|                       | Tiempo de uso                    | Tiempo que el usuario puede utilizar el sistema sin sentir incomodidad.                               |
|                       | Ajustable                        | Nivel de regulación del sistema BCI a nivel de hardware para adaptarse a las necesidades del usuario. |

### 5.3.7 Accesibilidad

La accesibilidad es la parte que facilita la inclusión de todos los potenciales clientes o usuarios de un producto digital. Hay personas con discapacidad visual o auditiva que, si no está contemplada esta dificultad, no tienen las mismas garantías de acceso y pueden

perderse nuestro mensaje o contenido comercial. Por tanto, la accesibilidad debe ser un objetivo claro, para garantizar el acceso a todos en las mismas condiciones evitando errores comunes que añadirían dificultades para esa experiencia de usuario satisfactoria.

**Tabla 28.** Sub-subcaracterísticas y atributos de Accesibilidad

| Sub-subcaracterística   | Atributo                                | Métrica   |
|-------------------------|---|---|
| <b>Perceptibilidad</b>  | Color de elementos                      | Nivel de aceptación y apreciación sobre el uso de colores empleados en la interfaz del sistema BCI                              |
|                         | Tamaño de elementos                     | Relación del número de elementos con tamaño apropiado entre el número total de elementos dentro del sistema BCI                 |
|                         | Visualización completa de los elementos | Nivel de satisfacción visual sobre los elementos del sistema BCI  |
| <b>Comprensibilidad</b> | Popularidad de los elementos            | Relación entre el número total de elementos conocidos por el usuario y el número total de elementos presentes en el sistema BCI |
|                         | Compresión de la información textual.   | Nivel de comprensión de la información textual existente en el sistema BCI  |

## CAPÍTULO 6: CREACIÓN DE UN SISTEMA QUE HACE USO DE INTERFACES CEREBRO-COMPUTADOR

En este capítulo se describe el sistema RaceBCI, el cual fue elaborado con el propósito de ser el sistema al cual se le va a aplicar el método de evaluación, descrito en el *Capítulo 4*. Como se había mencionado en capítulos anteriores un sistema BCI se compone de varias partes que son la adquisición de la señal, el procesamiento de la señal y la aplicación. A continuación, se detalla cada una de estas partes y los elementos que son empleados en el sistema RaceBCI.

### 6.1 Contexto

En la actualidad, existe una gran variedad de sistemas BCI, por ejemplo: sistema para controlar un teléfono móvil (Santamaría, 2016), sistema BCI de navegación web orientado a personas con grave discapacidad, sistema BCI para el control ambiental (Aloise, 2009) entre otras. Para el desarrollo de esta tesis, se elaboró un sistema BCI orientado al público en general que consiste en medir el nivel de excitación cerebral con el objetivo de mover hacia adelante o hacia atrás un vehículo a control remoto. En el *Anexo C*, se encuentran diversas actividades realizadas con este sistema BCI. En la *Figura 21*, se puede observar el logo de presentación de RaceBCI.

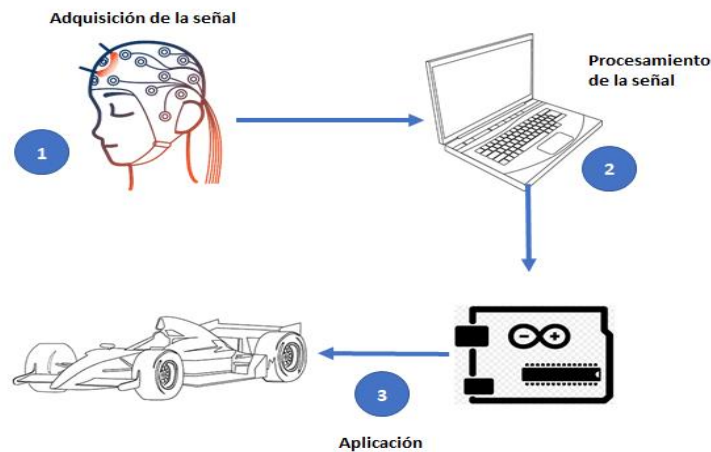


**Figura 21.** Logo del sistema RaceBCI. Fuente: Elaboración propia.

Con base en la estructura de un sistema BCI, descrito en el *Capítulo 3*, a continuación, se detalla cada una de estas partes y los elementos que son empleados en el sistema RaceBCI.

### 6.2 Estructura RaceBCI

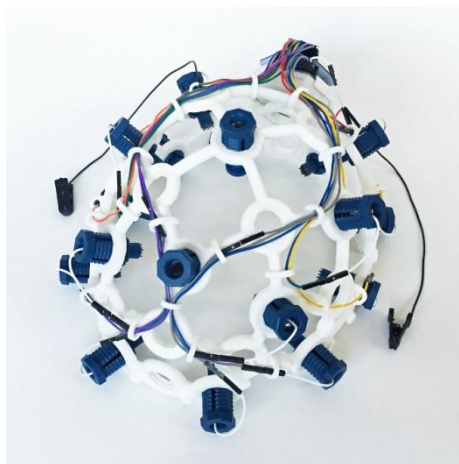
En la *Figura 22*, se puede observar la estructura que tiene el sistema RaceBCI y los elementos que intervienen en cada una de ella.



**Figura 22.** Estructura del sistema RaceBCI Fuente: Elaboración propia.

## 6.2.1 Adquisición de la señal

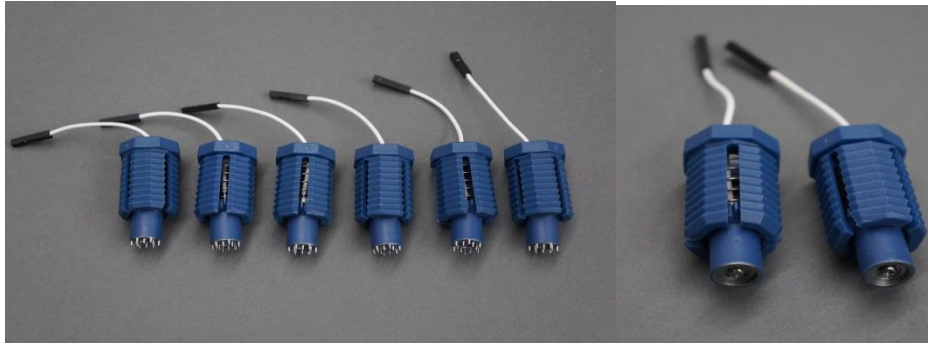
En un sistema BCI, una de las etapas iniciales y una de las más importantes es la adquisición de las señales cerebrales, para ello se emplea un tipo de hardware especialmente diseñado para obtener las señales cerebrales del usuario. En la *Figura 23* se puede observar el casco Ultracórtex Mark IV el cual es parte de la tecnología que nos ofrece OpenBCI y es utilizado en esta fase del sistema RaceBCI.



**Figura 23.** Casco Ultracórtex Mark IV de OpenBCI. Fuente: (OpenBCI, 2022).

El casco Ultracórtex Mark IV está formado por un marco de plástico adaptado para alojar porta electrodos y electrodos; los cuales son colocados de manera estratégica para obtener las señales cerebrales de una manera adecuada y eficiente (OpenBCI, 2022). Este tipo de casco nos permite realizar la obtención de las señales cerebrales de una manera no invasiva, es decir, que el usuario no sufre ningún tipo de daño al utilizar el casco. Los

electrodos empleados son de tipo secos, es decir que estos no necesitan ninguna preparación adicional para poder captar la señal cerebral del usuario; basta con que el electrodo entre en contacto con el cuero cabelludo del usuario para lograr la recepción de la señal. En la *Figura 24* se puede visualizar este tipo de electrodos.



**Figura 24.** Electrodo utilizado en el casco Ultracortex Mark IV de OpenBCI. Fuente: (OpenBCI, 2022).

Por otro lado, en la *Figura 25* se puede observar una pieza fundamental del casco Ultracortex Mark IV es su placa OpenBCI CytonDaisy de 16 canales, la cual es la encargada de recolectar las señales cerebrales y transmitir las al Dongle programable OpenBCI mediante comunicación bluetooth. El sistema RaceBCI emplea 8 canales de la placa CytonDaisy, esto debido a que con 8 canales se optimizó la adquisición de las señales y a su vez el procesamiento de las mismas; ya que un factor importante en este sistema es que la recolección de las señales cerebrales del usuario.



**Figura 25.** Placa OpenBCI CytonDaisy. Fuente: (OpenBCI, 2022).

Para comprobar la adquisición de las señales OpenBCI ofrece un sistema llamado OpenBCI GUI el cual permite analizar la recepción de las señales, este software permite cuenta con varias funcionalidades y un de ellas es el test de cada uno de los diferentes electrodos, A continuación, en la *Figura 26* se puede observar donde se encuentra el testeo de cada uno de los 8 canales empleados en el sistema RaceBCI, además brinda un gráfico



de barras donde se puede observar las diferentes ondas cerebrales, permitiendo que el usuario tenga una idea más acertada de cómo funciona la excitación o relajación cerebral.

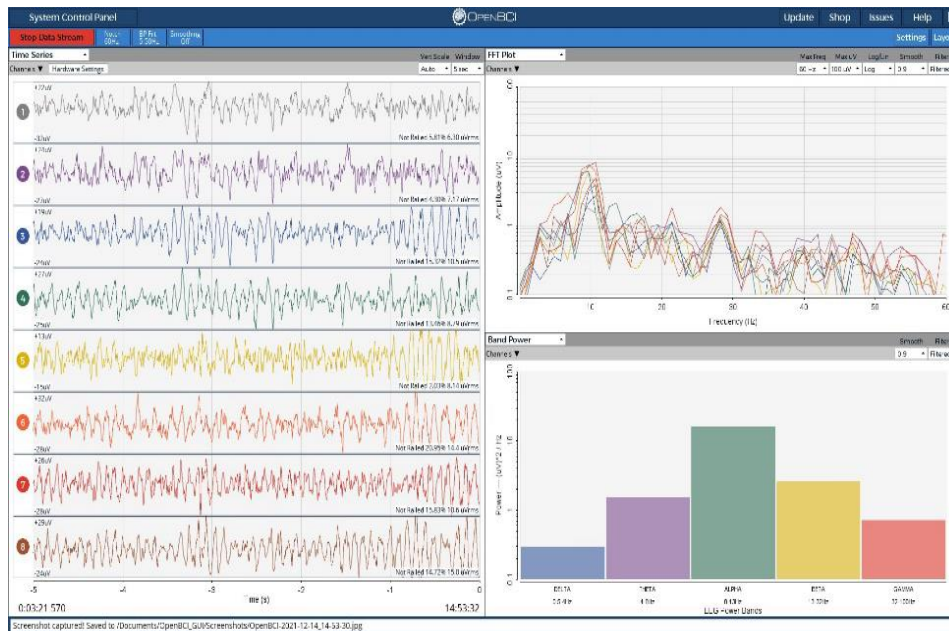


Figura 26. Ondas cerebrales en OpenBCI\_GUI. Fuente: (OpenBCI, 2022).

## 6.2.2 Procesamiento de la señal

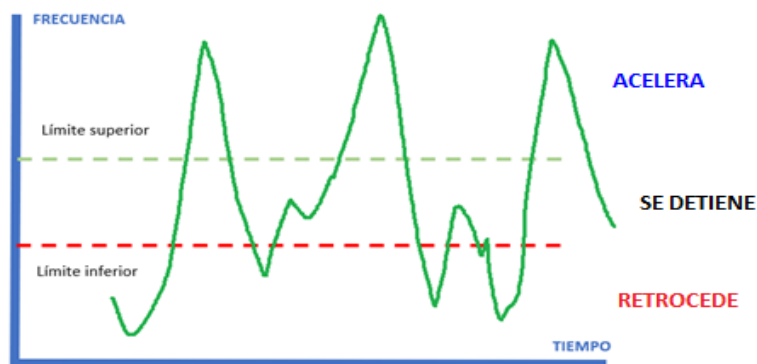
Para el procesamiento de señales cerebrales, el sistema RaceBCI hace uso de un algoritmo implementado en el lenguaje de programación Python. Este programa hace uso de la transformada de Fourier para convertir las señales de amplitud a frecuencia, esta transformación se la realiza para que puedan ser interpretadas de una manera adecuada por la aplicación. Todo el código puede ser revisado en el Anexo C.

Como se había mencionado en el Capítulo 3, existen varias ondas cerebrales, las cuales difieren en frecuencia, para el sistema RaceBCI se utiliza la onda beta, ya que la onda beta se encuentra en una frecuencia aproximada de 12 a 33 Hz (Wan et al., 2019) y tiene mayor variación cuando el usuario realiza actividades cotidianas donde pone toda su atención, cuando se mantiene alerta y necesita a su vez estar pendiente de múltiples estímulos; es decir existe mayor variación en la onda con la excitación cerebral.

Por otro lado, un nivel bajo de la onda beta, hace referencia a un estado de relajación. Un nivel óptimo de estas ondas nos ayuda a estar mucho más receptivos, enfocados a mejorar incluso nuestra capacidad para resolver problemas. De esta manera

RaceBCI hace uso de la excitación o relajación cerebral para manipular un prototipo de vehículo a control remoto.

Otro punto importante del procesamiento de señales del sistema RaceBCI, es el manejo de umbrales en la banda Beta. Dichos umbrales determinan qué acción realiza el prototipo de vehículo basándose en la excitación o relajación cerebral. Estos umbrales se conforman por un límite superior y un límite inferior. El límite inferior como su nombre lo indica limita la interpretación de la señal cerebral como el retroceso del vehículo prototipo. Por otro lado, el límite superior delimita la interpretación de la señal cerebral como una aceleración del vehículo prototipo, es decir que si la señal cerebral excede este límite el vehículo acelerará hacia adelante, así mismo si la señal cerebral es menor al límite inferior este retrocederá. En la *Figura 27* se observa el funcionamiento de los umbrales dentro del procesamiento de señal.

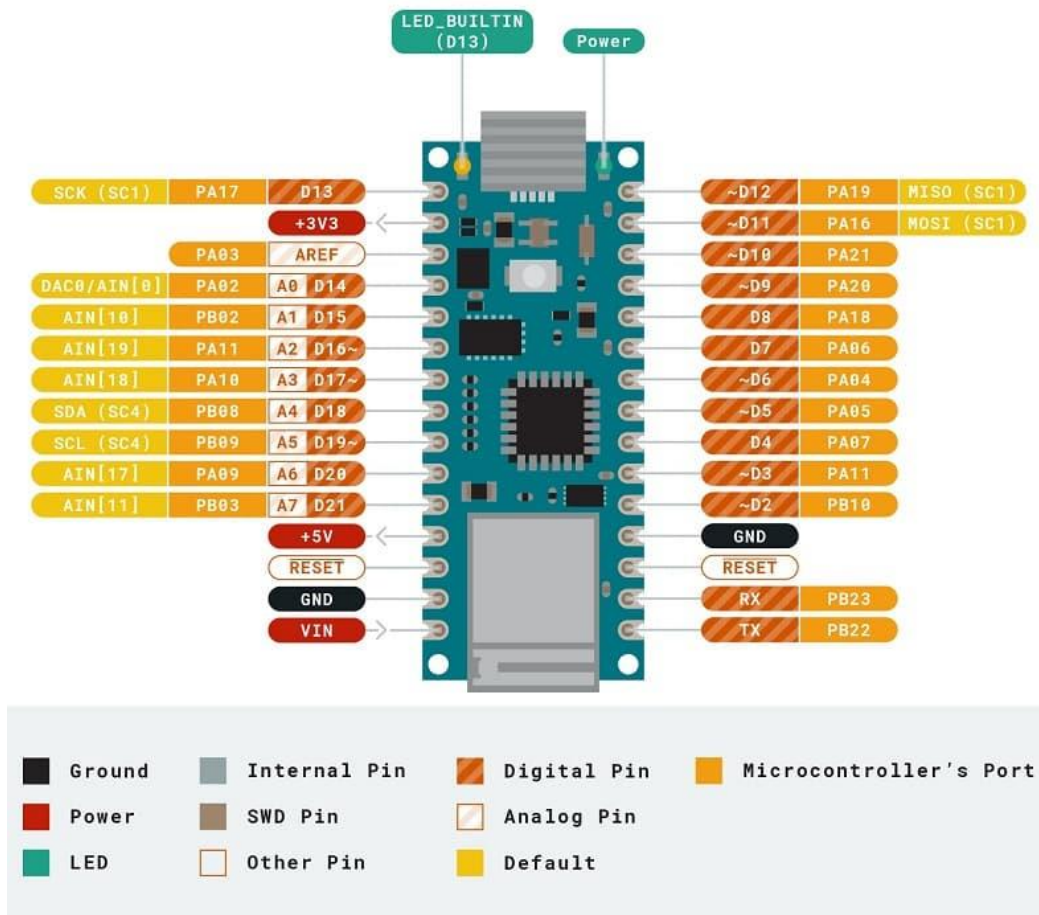


**Figura 27.** Funcionamiento de los umbrales en RaceBCI. Fuente: Elaboración propia.

### 6.2.3 Aplicación

La parte final del sistema RaceBCI tiene como finalidad realizar cierta acción dependiendo de los resultados obtenidos en el procesamiento de la señal. Dicha acción es realizada en el vehículo a control remoto, dando como feedback el movimiento del mismo ya sea acelerando o retrocediendo. Para esta comunicación entre el software desarrollado en Python y el auto a control remoto se realiza a través de un Arduino Nano.

El Arduino Nano es una placa de desarrollo de tamaño compacto y se basa en el microcontrolador ATmega328P (MCI Electronics, 2006). El Arduino nos permite obtener la señal de respuesta del programa en Python y luego de cumplir ciertas condiciones envía una señal al control del vehículo a control remoto para que la acción se complete. En la *Figura 28* se puede observar la estructura de este dispositivo.



**Figura 28.** Estructura del Arduino Nano. Fuente: (MCI Electronics, 2006)

El Arduino Nano necesita de un código para realizar las acciones ya mencionadas, por lo que este código se divide en dos partes. La primera parte es la encargada de realizar la conexión a través de un puerto USB con el software de procesamiento de señal. Una vez realizada la conexión entra en ejecución la segunda parte donde se realizan los diferentes condicionales para determinar qué acción realizar con base en la respuesta obtenida por la excitación o relajación del usuario. El código utilizado en el arduino nano se puede visualizar en la *Figura 29*.

```
void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  pinMode(pinLED, OUTPUT);
  pinMode(pinLED1, OUTPUT);
}

void loop()
{
  if (Serial.available()>0)
  {
    char option = Serial.read();

    if(option == '1')
    {
      digitalWrite(pinLED, HIGH);
      delay(200);
      digitalWrite(pinLED, LOW);
      delay(200);
    }
    else if(option == '3')
    {
      digitalWrite(pinLED1, HIGH);
      delay(200);
      digitalWrite(pinLED1, LOW);
      delay(200);
    }
    else{
      digitalWrite(pinLED, LOW);
      delay(200);
      digitalWrite(pinLED1, LOW);
      delay(200);
    }
  }
}
```

**Figura 29.** Código utilizado en el Arduino Nano. Fuente: Elaboración propia

Finalmente, al realizar todas estas etapas de un sistema BCI el usuario podrá manipular el vehículo prototipo a control remoto empleando la excitación o relajación cerebral. De esta forma se emplea la interacción haciendo uso de las interfaces cerebro computador.

## CAPÍTULO 7: EVALUACIÓN EMPÍRICA

Con el objetivo de evaluar empíricamente el método propuesto, el presente capítulo expone la evaluación realizada, para ello se presenta un cuasiexperimento en el ámbito de la Ingeniería de Software para evaluar las fases de especificación y ejecución de la evaluación del método BCIS-QUAM, con la participación de profesionales y estudiantes del último año de la carrera Ciencias de la computación, además se utilizó el sistema RACEBCI, presentado en el Capítulo 6.

### 7.1 Contextualización

En la actualidad, existe un gran incremento de investigaciones de los sistemas de información, por ello se ha impulsado el desarrollo de nuevas metodologías y evaluación para las mismas. El rol del usuario juega un papel muy importante en el proceso de adopción de una solución tecnológica en particular; en este sentido, existen modelos que incorporan constructos para medir las reacciones psicológicas del usuario de manera sistemática (Cedillo, 2016).

Por un lado, podemos encontrar el Technology Acceptance Model (TAM), un modelo propuesto por Davis (1986), utilizado desde la perspectiva general de un sistema. También es posible medir el rendimiento actual, y la posible adopción de un método en el futuro, para esto, Moody (2001) presenta una serie de mecanismos a través del Method Evaluation Model (MEM).

### 7.2 Modelos teóricos de evaluación de ingeniería de software

Para realizar la evaluación empírica del método propuesto, se utilizará el modelo de aceptación tecnológica (TAM), y el modelo de evaluación de métodos (MEM).

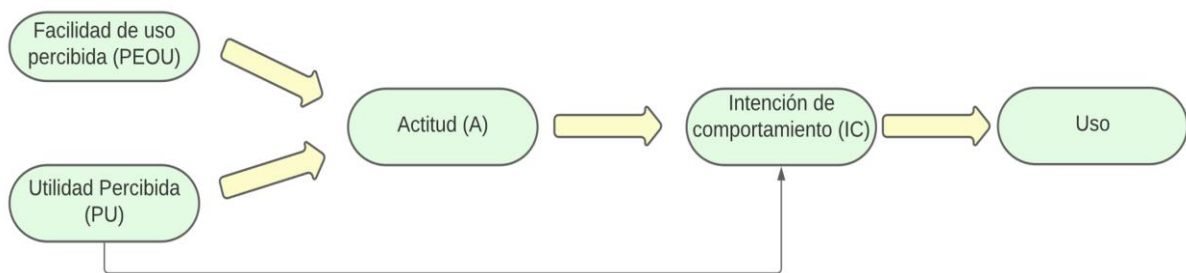
#### 7.2.1. Modelo de aceptación de tecnología (TAM)

El TAM fue propuesto por Davis (1989) y es uno de los métodos más utilizados para predecir y explicar el comportamiento en el uso de la tecnología.

El modelo TAM constituye una adaptación de la teoría Theory of Reasoned Action (TRA) propuesta por Fishbein & Ajzen (1975). El TAM utiliza TRA como fundamento teórico para definir los vínculos causales entre dos pensamientos claves, la utilidad percibida y la facilidad de uso al emplear una solución informática.

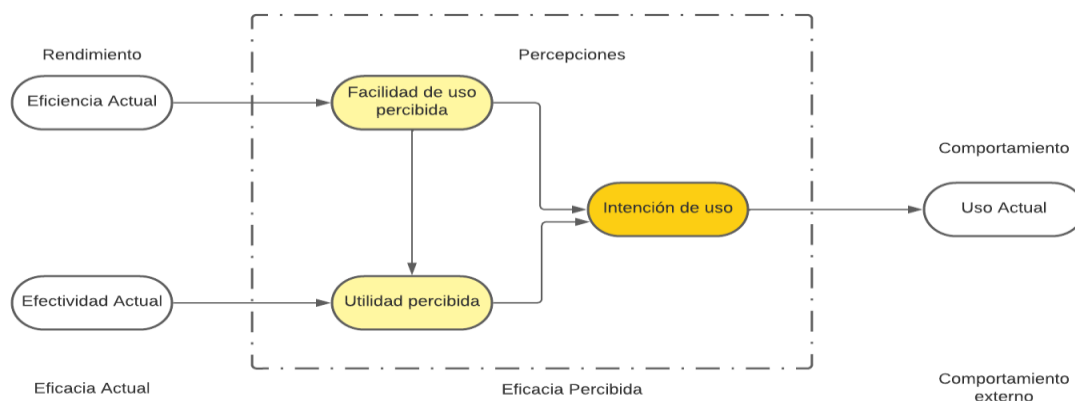
En la *Figura 30*, se encuentra el modelo TAM y el significado de cada constructor es:

- Facilidad de uso percibida (PEOU): Grado en el cual un usuario cree que al utilizar un sistema se libera del esfuerzo.
- Utilidad percibida (PU): Grado en el cual un usuario cree que utilizando un sistema lo destaca a él o su trabajo realizado.
- Actitud (A): deseo del usuario de utilizar el sistema.
- Intención de comportamiento (IC): Medida de la resistencia a ejecutar un comportamiento específico. A y PU influyen al sujeto de IC a usar el sistema.
- Uso: Uso del sistema, es predicho por intención de comportamiento (IC).



**Figura 30.** Modelo de aceptación tecnológica, TAM. Fuente: (Davis, 1989).

Method Evaluation Model (MEM), presenta un modelo de evaluación que permite evaluar métodos, está basado en el TAM, para analizar la eficacia actual, eficacia percibida y el comportamiento externo al utilizar un método en particular (Moody, 2001). En la *Figura 31*, se presentan los constructores y las relaciones causales entre estos.



**Figura 31.** Modelo de evaluación de métodos (MEM). Fuente: (Davis, 1989).

## 7.3 Cuasiexperimento dirigido a ingenieros de software

Ohlin et al. (2012) define un cuasiexperimento como una investigación empírica, donde la selección de los sujetos de prueba no es basada en la aleatoriedad, pero si en las características de los usuarios y objetos.

Para la ejecución del cuasiexperimento, se ha adaptado MEM, que establece las bases para realizar el rendimiento y las percepciones de los usuarios sobre la forma y proceso de evaluación aplicado.

### 7.3.1. Adaptando MEM

Para adaptar MEM, se debe partir definiendo los objetivos específicos en el dominio de la evaluación de la calidad de los sistemas BCI. Estos objetivos son:

1. Identificar los atributos de calidad, que permitan evaluar correctamente la calidad de uso y producto y la experiencia de usuario de un determinado sistema BCI.
2. Evaluar un sistema BCI.
3. Presentar los resultados obtenidos del proceso de evaluación, llegar a una conclusión del sistema BCI evaluado.

Este cuasiexperimento se centra en la segunda y cuarta etapa del método BCIS-QUAM, las cuales consisten en la fase de especificación y la fase de ejecución de la evaluación. Se busca evaluar el rendimiento y percepciones del usuario al aplicar dicha evaluación. Para cumplir con este proceso se requiere:

- Medir la cantidad de esfuerzo requerido al aplicar el método y la calidad de los resultados.
- La eficiencia actual puede ser medida como el tiempo utilizado para realizar un conjunto de actividades.
- La efectividad actual, se refiere a la calidad que el método presenta, la cual se mide mediante la capacidad del usuario para ejecutar una actividad y comprobar que esta se realizó exitosamente o no.

La eficiencia actual y la efectividad se definen de la siguiente forma:

- Eficiencia actual: tiempo requerido al momento de ejecutar una tarea.

$$Eficiencia\ actual = \sum_{i=1}^n (Tiempo\ en\ que\ le\ toma\ al\ usuario\ completar\ una\ tarea)$$

- Efectividad actual: relación entre el número de tareas realizadas correctamente y el total de tareas.

$$Eficiencia\ actual = \frac{\sum_{i=1}^n (Tarea_i\ realizada\ correctamente)}{n}$$

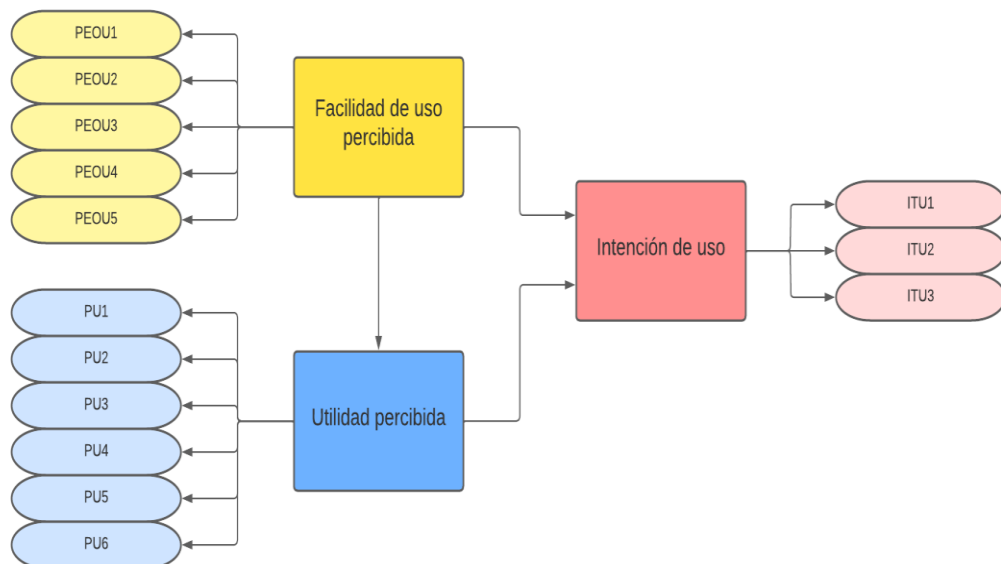
Para realizar esta evaluación, se han propuesto una serie de preguntas para poder medir los tres constructores de percepción e intención, Facilidad de uso percibida (PEOU), Utilidad Percibida (PU), Intención de Uso (ITU), utilizando MEM. En la *Tabla 29*, se visualizan las preguntas planteadas y en la *Figura 32*, se puede observar la relación de estas preguntas con los tres constructores.

**Tabla 29.** Cuestionario para medir las variables de percepción. Fuente: Elaboración propia

| Pregunta | Declaración positiva  |
|----------|---|
| PEOU1    | Pregunta 1. El método BCIS-QUAM en su fase de especificación y ejecución de la evaluación es complejo y difícil de seguir.  |
| PEOU2    | Pregunta 2. De manera general, el método BCIS-QUAM en su fase de especificación y ejecución de la evaluación es fácil de entender.  |
| PEOU3    | Pregunta 3. Los pasos a seguir para completar la metodología de evaluación para sistemas BCI en su fase de especificación y ejecución son confusos y difíciles de entender. |
| PEOU4    | Pregunta 4. El método BCIS-QUAM en su fase de especificación y ejecución es fácil de aprender.  |
| PEOU5    | Pregunta 5. Pienso que sería difícil evaluar un sistema BCI empleando la fase de especificación y ejecución de esta metodología.  |
| PU1      | Pregunta 6. Considero que las metodologías de evaluación para sistemas BCI reducirían el tiempo, y el esfuerzo requerido para evaluar este tipo de sistemas.                |
| PU2      | Pregunta 7. De manera general, considero que la metodología de evaluación para sistemas BCI en su fase de especificación y ejecución es inútil.                             |
| PU3      | Pregunta 8. Considero que las metodologías de evaluación para sistemas BCI son  |



|             |  |
|-------------|--|
|             | útiles para evaluar la usabilidad y la experiencia de usuario.   |
| <b>PU4</b>  | Pregunta 9. Pienso que la metodología de evaluación de sistemas BCI en su fase de especificación y ejecución y el modelo de calidad utilizado NO abarca las métricas de evaluación necesarias para este proceso. |
| <b>PU5</b>  | Pregunta 10. El uso de la fase de especificación y ejecución de la evaluación de este método, mejoraría la evaluación de usabilidad un sistema BCI.  |
| <b>PU6</b>  | Pregunta 11. De manera general, pienso que con la fase de especificación y ejecución de esta metodología se puede evaluar cualquier sistema BCI sin importar la utilidad del sistema.                            |
| <b>ITU1</b> | Pregunta 12. Si tuviera que evaluar un sistema BCI en el futuro, consideraría este método de evaluación.   |
| <b>ITU2</b> | Pregunta 13. De ser necesario, utilizará este método de evaluación en el futuro.   |
| <b>ITU3</b> | Pregunta 14. Recomendaría el uso de este método en su fase de especificación y ejecución de la evaluación para evaluar un sistema BCI.   |



**Figura 32.** Distribución de preguntas del cuestionario. Fuente: Elaboración propia.

Además, se plantearon dos preguntas abiertas sobre sugerencias, las mismas que sirven para ayudar a mejorar el proceso de evaluación de la fase de especificación y ejecución del método BCIS-QUAM. Estas preguntas se pueden visualizar en la *Tabla 30*.

**Tabla 30.** Preguntas abiertas del cuestionario. Fuente: Elaboración propia

| Pregunta | Pregunta Abierta (PA)   |
|----------|---|
| PA1      | Pregunta 15. ¿Tiene alguna sugerencia sobre cómo hacer que esta metodología de evaluación sea más fácil de usar?                                |
| PA2      | Pregunta 16. ¿Cuáles son las razones por las que tiene o no la intención de usar esta metodología de evaluación para sistemas BCI en un futuro? |

### 7.3.2. Definición del alcance

Considerando el paradigma Goal-Question Metric (GQM) propuesto por Basili (1992), el objetivo del cuasiexperimento es definido al tener en cuenta los parámetros presentados en la *Tabla 31*

**Tabla 31.** Objetivo del cuasiexperimento. Fuente: Elaboración propia.

|                                     |   |
|-------------------------------------|---|
| <b>Evaluar:</b>                     | Las fases de especificación y ejecución del método de evaluación BCIS-QUAM.   |
| <b>Con el propósito de:</b>         | Analizar la aplicación de las fases de especificación y ejecución del método de evaluación propuesto.                       |
| <b>Con respecto a</b>               | La efectividad y eficiencia del método, además la utilidad percibida, facilidad de uso percibida e intención de uso futura. |
| <b>Desde el punto de vista del:</b> | Ingenieros de software  |
| <b>En el contexto de:</b>           | Grupo de alumnos egresados, de último ciclo y profesionales en Ingeniería del Software o disciplinas relacionadas.          |

Teniendo en cuenta lo presentado en la *Tabla 31*, se plantea las siguientes preguntas de investigación:

- **RQ1:** ¿La metodología BCIS-QUAM es percibida como fácil de usar y útil? De ser así, ¿las percepciones de los usuarios son el resultado de su eficiencia cuando utilizan la metodología para diseñar la evaluación de usabilidad de un sistema BCI y ejecutar la misma?

- **RQ2:** ¿Existe una intención de uso de la metodología BCIS-QUAM en el futuro? De ser así, ¿estas intenciones de uso son el resultado de las percepciones de los participantes?

Con base en las preguntas de investigación se establece una serie de hipótesis para analizar la posibilidad de que el método en su etapa de especificación y ejecución de la evaluación sea aceptado en la práctica.

- $H1_0$ : BCIS-QUAM es percibido como una metodología difícil de usar,  $H1_0 = \neg H1_1$
- $H2_0$ : BCIS-QUAM no es percibido como una metodología útil,  $H2_0 = \neg H2_1$
- $H3_0$ : No existe intención de utilizar la metodología BCIS-QUAM en el futuro,  $H3_0 = \neg H3_1$
- $H4_0$ : La facilidad de uso percibida no puede verse determinada por la eficiencia actual,  $H4_0 = \neg H4_1$
- $H5_0$ : La percepción de la utilidad no está determinada por la efectividad actual,  $H5_0 = \neg H5_1$
- $H6_0$ : La utilidad percibida no es determinada por la facilidad de uso percibida,  $H6_0 = \neg H6_1$
- $H7_0$ : La intención de uso percibida no es determinada por la facilidad de uso percibida,  $H7_0 = \neg H7_1$
- $H8_0$ : La intención de uso percibida no está determinada por la utilidad percibida,  $H8_0 = \neg H8_1$

Las hipótesis  $H1$ ,  $H2$ ,  $H4$  y  $H5$  nos permiten evaluar la primera pregunta de investigación planteada, mientras que las hipótesis  $H3$ ,  $H6$ ,  $H7$  y  $H8$  nos permiten evaluar la segunda pregunta de investigación.

### 7.3.3. Planificación del cuasiexperimento

#### Selección del contexto

El contexto está determinado por las etapas del método a ser evaluadas, el sistema BCI a evaluar y la selección de los participantes.

De las cinco etapas que conforman el método de evaluación de la calidad de sistemas BCI, se seleccionaron dos etapas a evaluar, la primera consiste en la especificación de la evaluación, ya que es de vital importancia seleccionar adecuadamente los atributos que van a ser evaluados en el sistema BCI, la segunda es la ejecución de la evaluación, ya es importante verificar la correcta evaluación del sistema BCI.

En la fase de especificación intervienen las siguientes actividades: i) Seleccionar atributos de calidad, ii) Identificar las métricas de evaluación y iii) Identificar el criterio de decisión, de esta etapa, el participante evaluará todas las actividades y para ello es importante conocer información del sistema BCI a evaluar, el perfil de usuario que utilizara el sistema BCI y los requerimientos de calidad y evaluación que se deben verificar en el sistema.

Para realizar cada una de las actividades, el sujeto deberá utilizar el modelo de calidad presentado en el *Capítulo 5*, donde se incluyen las características, sub-características, atributos de calidad, métrica, forma de evaluación y criterio de calidad.

En la fase de ejecución de la evaluación intervienen las siguientes actividades: i) Ejecución entrenamiento de usuario, ii) Preparación adquisición de la señal, iii) Procesamiento de la señal, iv) Preparación de la aplicación, v) Ejecución y vi) Evaluación del sistema BCI, de esta etapa, el participante evaluará la última actividad, esto se debe, a que las actividades anteriores son realizadas por los expertos y el evaluador sólo visualiza el procedimiento. Para realizar esta actividad, el participante contará con un video, que tendrá todos los pasos previos y visualiza al usuario utilizando el sistema BCI, además, utilizará una plantilla de evaluación, definida en la fase 3 del método BCIS-QUAM.

Se evaluará el sistema RACEBCI, el mismo se encuentra detallado en el *Capítulo 6*.

## **Tareas experimentales**

El cuasiexperimento consiste en 4 pasos, cada uno correspondiente a una actividad a ser evaluada, los tres primeros pasos corresponden a la fase de especificación de la evaluación y la última, corresponde a la fase de ejecución de la evaluación del método BCIS-QUAM.

- Paso 1: El primer paso consiste en seleccionar los atributos de calidad que van a ser evaluados en el sistema RACEBCI, para esto deben tener conocimiento de los

requisitos de calidad establecidos en la fase 1 del método y deberán verificar información como la descripción del sistema BCI y del perfil de usuario que utilizará el sistema.

- Paso 2: El segundo paso consiste en identificar las métricas a ser utilizadas en cada atributo seleccionado en el paso anterior, para ello deberán utilizar el modelo de calidad descrito en el capítulo 5. Al visualizar la métrica, el participante tiene la opción de continuar con toda la lista de atributos o eliminar los que crea innecesarios.
- Paso 3: El tercer paso consiste en identificar cómo se va a evaluar el atributo seleccionado y en identificar el criterio de decisión que se aplicará al resultado que se obtenga. Para ello, el participante deberá utilizar nuevamente el modelo de calidad.
- Paso 4: El cuarto paso consiste en evaluar el sistema RACEBCI, para ello el participante deberá visualizar un video que contiene todos los pasos previos a ejecutar la evaluación, después deberá utilizar una plantilla para evaluar al sistema BCI.

## Variables

En la *Tabla 32* se presentan las variables dependientes usadas para evaluar el método BCIS-QUAM.

**Tabla 32.** Variables independientes basadas en la percepción.

| Variable                          | Descripción   |
|-----------------------------------|---|
| Facilidad de uso percibida (PEOU) | El grado en el cual los participantes creen que al aprender y usar el método BCIS-QUAM estarán libres de esfuerzo.  |
| Utilidad percibida (PU)           | El grado en el cual los participantes creen que usando BCIS-QUAM se incrementará su rendimiento.  |
| Intención de uso (ITU)            | El grado en el cual los participantes piensan usar el método BCIS-QUAM de necesitar un método de evaluación de calidad de sistemas BCI. Esto representará un juicio de la eficacia del método y puede ser utilizado para predecir la aceptación del método en |

Estas variables se miden utilizando un cuestionario de 14 preguntas cerradas, de las cuales cinco son para PEOU, 6 son para PU y 3 son para ITU. Las preguntas cerradas fueron formuladas utilizando una escala de Likert de 5 puntos donde 1 significaba que estaban en desacuerdo con la declaración positiva, y 5 significa que están totalmente de acuerdo con la declaración positiva de la pregunta.

En la *Tabla 33* se muestran las variables basadas en el rendimiento de interés y la función de medición usada para determinar sus valores.

**Tabla 33.** Descripción de las variables basadas en el rendimiento.

| Variable    | Descripción   |
|-------------|---|
| Efectividad | $\frac{\sum_{i=1}^n \text{Tarea}_i \text{ ejecutada correctamente}}{n}$ |
| Eficiencia  | $\sum_{i=1}^n \text{Tiempo ejecutando la tarea}_i$                      |

## Material experimental

Los documentos necesarios para realizar el cuasiexperimento son los siguientes:

1. Descripción del método BCIS-QUAM: Este documento contiene el proceso a realizar en cada una de las cinco etapas planteadas; se han colocado, de manera detallada, los pasos de la tarea correspondiente a la actividad de ejecución de la evaluación; con la finalidad de realizar la evaluación de la calidad de sistemas BCI; además, se describen los artefactos y guías necesarios para realizar cada una de las tareas especificadas.
2. Modelo de calidad para sistemas BCI: Este documento contiene una recopilación de las características, atributos y métricas necesarias para evaluar la usabilidad, la experiencia de usuario y la interfaz del sistema BCI. Cabe recalcar que, la interfaz del sistema se puede aplicar en herramientas que tengan dicho elemento.
3. Descripción del casco Open BCI: Este documento contiene toda la información, características, observaciones y sugerencias que debe tener en cuenta el usuario al momento de utilizar el casco Open BCI.
4. Descripción del Sistema BCI a utilizar: Este documento contiene la estructura, funcionamiento y diseño del sistema BCI que será utilizado en la experimentación.

5. Perfil de usuario: Este documento contiene las características que debe cumplir el usuario para utilizar el sistema RaceBCI.
6. Video Informativo: Este video brinda información sobre el sistema BCI que será empleado en la experimentación de una manera resumida y adecuada para que se adquiera los conocimientos necesarios para la experimentación.
7. Video, Usuario utilizando el sistema RaceBCI: Este video contiene todos los pasos que se desarrollan con el usuario en la fase de ejecución de la evaluación, el mismo servirá como instrumento para que el evaluador pueda rellenar la plantilla entregada.

Para recolectar el tiempo se pidió en el documento del cuasiexperimento, colocar el tiempo de inicio y finalización de cada tarea, así como la hora de inicio del cuasiexperimento. Por otro lado, se recolectaron los datos de la encuesta mediante la herramienta de formularios de Google.

Todo el material de instrumentación del cuasiexperimento puede ser accedido mediante el siguiente enlace: <https://sites.google.com/ucuenca.edu.ec/racebci/experimento> y se puede observar en el *Anexo D*.

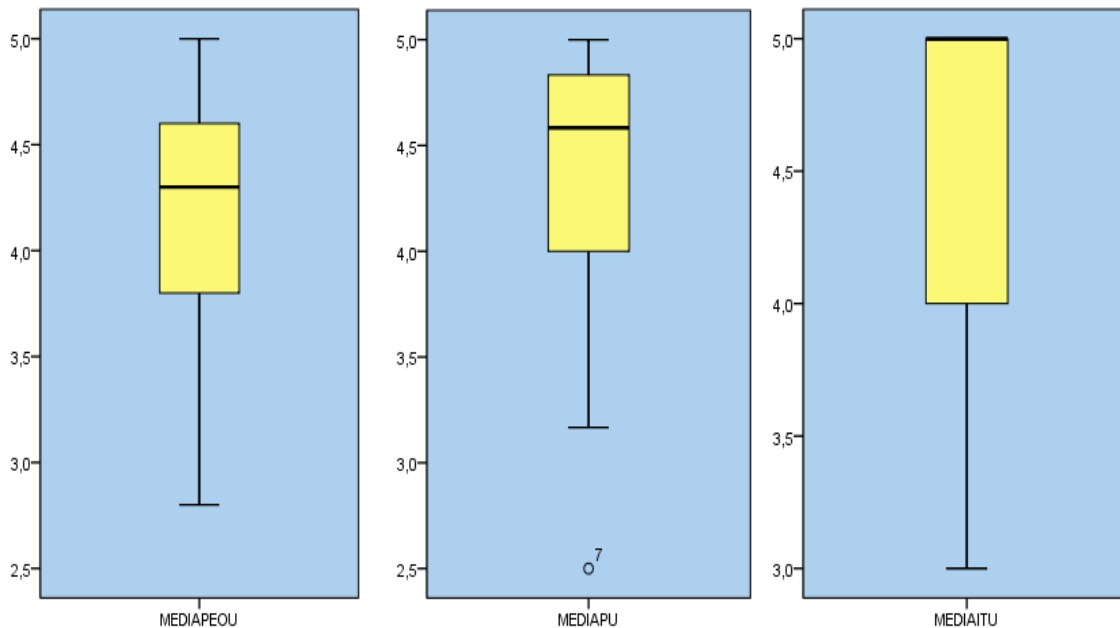
### **7.3.4. Ejecución y análisis del cuasiexperimento**

Los cuasiexperimentos son esquemas de investigación no aleatorios (Bono, 2012), por lo que se seleccionó una muestra a conveniencia para el desarrollo del mismo, esta muestra se conformó por 20 personas, entre ellos, estudiantes egresados de la carrera de ingeniería de sistemas y profesionales de la Universidad de Cuenca, esta muestra es una forma de evaluación inicial al método; sin embargo, en trabajo futuro se busca alcanzar un mayor número de sujetos. Es importante mencionar que el desarrollo del cuasiexperimento fue de manera virtual.

Para el análisis de los resultados se utilizó el programa IBM SPSS Statistic v20, donde se realizó pruebas estadísticas descriptivas y diagramas de cajas. Los resultados de la encuesta realizada a cada uno de los participantes, pueden ser visualizados en el *Anexo D5*.

#### **7.3.4.1 Análisis de la percepción del usuario**

En la *Figura 33* se puede observar los diagramas de caja para cada variable de percepción, en las cuales podemos ver que la media para cada variable es superior a los 4 puntos, es decir por encima del valor neutro de la escala de Likert.



**Figura 33.** Diagrama de cajas para las variables PEOU, PU e ITU. Fuente: Elaboración propia.

En el diagrama de caja de PU, se puede observar un dato anómalo en el cuasiexperimento, este dato hace referencia al sujeto 7 del grupo de participantes. Al verificar las actividades desarrolladas por este participante, se puede identificar que no cumplió correctamente el rol de evaluador, ya que en una de las preguntas abiertas menciona, que no puede evaluar un sistema BCI si no lo utiliza con anterioridad.

A continuación, se aplicó la prueba de Shapiro-Wilk para comprobar si los datos estaban distribuidos normalmente para seleccionar el test que podría usarse para chequear las hipótesis H1, H2 y H3. En la *Tabla 34* se presentan los resultados obtenidos para las variables estudiadas. También se aplicaron pruebas para verificar las hipótesis comparando si la media de las respuestas a las preguntas relacionadas con una variable dada, fueron significativamente más altas que el valor neutro de la escala de Likert.

**Tabla 34.** Prueba de Shapiro-Wilk. Fuente: Elaboración propia.

| Var  | Min  | Max | Mean | Std. Dev. | Std. E. | Shapiro-Wilk test p-value |
|------|------|-----|------|-----------|---------|---------------------------|
| PEOU | 2.80 | 5   | 4.16 | 0.54134   | 0.12105 | 0.217                     |
| PU   | 2.5  | 5   | 4.32 | 0.66771   | 0.14930 | 0.010                     |
| ITU  | 3.00 | 5   | 4.53 | 0.59628   | 0.13333 | 0.000                     |



Al observar los valores obtenidos en la prueba de Shapiro-Wilk, podemos observar que PU y ITU no tienen una distribución normal, es decir, sus valores no superan un p de 0.05, por lo que podemos rechazar las hipótesis nulas  $H_{2_0}$  y  $H_{3_0}$ , lo que significa que los participantes percibieron este método como útil y lo consideran en un futuro si tuvieran que evaluar un sistema BCI.

Por otro lado, el valor obtenido en la prueba de Shapiro-Wilk de PEOU supera un p de 0.05 por lo que no rechazamos la hipótesis nula  $H_{1_0}$ , lo que significa que los participantes percibieron a BCIS-QUAM como un método difícil de utilizar.

### 7.3.4.2 Análisis del rendimiento del usuario

En la *Tabla 35* se pueden observar los valores estadísticos para cada variable basadas en el rendimiento. La efectividad total fue en promedio del 83,75%, lo que indica que gran parte de los participantes fueron capaces de ejecutar los pasos de la especificación y ejecución de la evaluación del sistema BCI.

La eficacia fue calculada como el esfuerzo requerido, en minutos, para aplicar el método, los resultados obtenidos muestran que la eficiencia de los participantes fue de 14 a 65 minutos, con un promedio de 25,4 minutos.

**Tabla 35.** Estadística descriptiva para las variables basadas en la percepción del usuario.

| Variable    | Min   | Max   | Media  | Desviación Std |
|-------------|-------|-------|--------|----------------|
| Efectividad | 0.5   | 1.00  | 0.8375 | 0.14679        |
| Eficiencia  | 14.00 | 65.00 | 25,4   | 10.56509       |

### 7.3.4.2 Análisis de las relaciones causales

En esta sección se valida la parte estructural del MEM en términos de las relaciones causales entre sus constructores, con la excepción del uso actual. Para esto se ha utilizado análisis de regresión para evaluar la operacionalización del MEM realizada, ya que las hipótesis a ser probadas son relaciones causales entre variables continuas. Para realizar este análisis, se han utilizado los niveles de significancia sugeridos por Moody (2001), los cuales se muestran en la *Tabla 36*.

**Tabla 36.** Niveles de significancia propuestos por Moody. Fuente: (Moody, 2001)

| Valor de significancia | Rango       |
|------------------------|-------------|
| No significativo       | $p > 0.1$   |
| Baja significancia     | $p < 0.1$   |
| Media significancia    | $p < 0.05$  |
| Alta significancia     | $p < 0.01$  |
| Muy alta significancia | $p < 0.001$ |

## A. Eficiencia vs Facilidad de uso percibida (PEOU)

La hipótesis H4 ha sido probada para comprobar si las percepciones de Facilidad de Uso Percibida (PEOU) son determinadas por la Eficiencia de los participantes al aplicar el método. Para ejecutar este análisis se ha construido un modelo de regresión simple en el cual la eficiencia fue usada como la variable independiente (predictora) y PEOU como la variable dependiente (predicha). La ecuación de regresión resultante es la siguiente:

$$PEOU = 4.906 + (-0.29) * Eficiencia$$

**Tabla 37.** Regresión simple entre la eficiencia actual y la facilidad de uso percibida.

| Reg. Element | Coef (b) | Std. E. | Std. Coef | t      | Sig (p) | R                  | R2    |
|--------------|----------|---------|-----------|--------|---------|--------------------|-------|
| Constante    | 4.906    | 0.271   |           | 18.086 | 0.000   |                    |       |
| Eficiencia   | -0.29    | 0.010   | -0.573    | -2.967 | 0.008   | 0.573 <sup>a</sup> | 0.328 |

El modelo de regresión representa un valor de significancia, Alto con  $p < 0.01$ . El valor de  $R^2$  muestra que la variable Eficiencia es capaz de explicar el 32.8% de varianza en PEOU, indicando que ciertas percepciones de los participantes con respecto a PEOU están determinadas por la eficiencia. Estos resultados nos permiten rechazar la  $H4_0$  y aceptar su hipótesis alternativa, lo que significa que hemos corroborado empíricamente que PEOU está determinada por la Eficiencia.

## B. Efectividad vs Utilidad percibida (PU)

La hipótesis H5 ha sido probada para verificar si las percepciones de la utilidad percibida (PU) están determinadas por la efectividad de los participantes. Similarmente, se ha construido un modelo de regresión simple en el cual la efectividad fue usada como la variable independiente mientras que la PU fue usada como la variable dependiente. La ecuación obtenida es la siguiente:

$$PU = 4.210 + (1.072) * Efectividad$$

**Tabla 38.** Regresión simple entre la efectividad actual y la utilidad percibida.

| Reg. Element | Coef (b) | Std. E. | Std. Coef | t     | Sig (p) | R                  | R2    |
|--------------|----------|---------|-----------|-------|---------|--------------------|-------|
| Constante    | 4.210    | 0.911   |           | 4.624 | 0.000   |                    |       |
| Efectividad  | 0.137    | 1.072   | 0.030     | 0.128 | 0.899   | 0.030 <sup>a</sup> | 0.001 |

El modelo de regresión no presenta significancia con  $p > 0.1$ . El valor de  $R^2$ , muestra que la Efectividad es capaz de explicar solo un 0.1% de varianza de PU, indicando que la efectividad actual de los participantes no influencia sus percepciones de la utilidad percibida (PU). Estos resultados nos permiten aceptar la  $H5_0$ , lo que significa que hemos corroborado empíricamente que la utilidad percibida (PU) no está determinada por la Efectividad.

### C. Facilidad de uso percibida (PEOU) vs Utilidad percibida (PU)

La hipótesis h6 ha sido probada para verificar si las percepciones de la utilidad percibida (PU) están determinadas por la facilidad de uso percibida (PEOU). Se construyó un modelo de regresión en la cual la variable PEOU fue utilizada como variable independiente y PU fue utilizado como la variable dependiente. La ecuación resultante es la siguiente:

$$PU = -0.227 + 1.094 * PEOU$$

**Tabla 39.** Regresión simple entre la facilidad de uso percibida y la utilidad percibida.

| Reg. Element | Coef (b) | Std. E. | Std. Coef | t      | Sig (p) | R                  | R2    |
|--------------|----------|---------|-----------|--------|---------|--------------------|-------|
| Constante    | -0.227   | 0.562   |           | -0.405 | 0.691   |                    |       |
| PEOU         | 1.094    | 0.134   | 0.887     | 8.160  | 0.000   | 0.887 <sup>a</sup> | 0.775 |

El modelo de regresión representa un valor de significancia, Muy Alto con  $p < 0.001$ . El valor de  $R^2$  muestra que la variable Facilidad de uso percibida es capaz de explicar el 77.5% de varianza en PU, indicando que ciertas percepciones de los participantes con respecto a PU están determinadas por PEOU. Estos resultados nos permiten rechazar la  $H_{0}$  y aceptar su hipótesis alternativa, lo que significa que hemos corroborado empíricamente que PU está determinado por PEOU.

#### D. Intención de uso (ITU) vs Utilidad percibida (PU)

La hipótesis H7 ha sido probada para verificar si las percepciones de la Intención de Uso (ITU) están actualmente determinadas por la utilidad percibida (PU) cuando se aplica el método. La ejecución de este análisis fue construida a partir de un modelo simple de regresión en el cual la variable PU fue usada como variable independiente mientras ITU fue usada como variable dependiente, la ecuación obtenida del modelo es como sigue:

$$ITU = 1.396 + 0.725 * PU$$

**Tabla 40.** Regresión simple entre la intención de uso y la utilidad percibida.

| Reg. Element | Coef (b) | Std. E. | Std. Coef | t     | Sig (p) | R                  | R2    |
|--------------|----------|---------|-----------|-------|---------|--------------------|-------|
| Constante    | 1.396    | 0.537   |           | 2.600 | 0.018   |                    |       |
| PU           | 0.725    | 0.123   | 0.812     | 5.908 | 0.000   | 0.812 <sup>a</sup> | 0.660 |

Con el modelo de regresión se encontró un valor de significancia, Muy Alto con  $p < 0.001$ . El valor de  $R^2$  muestra que la variable PU es capaz de explicar el 66% de la varianza en ITU, lo cual representa un alto valor dado que podrían existir otros factores que influyen la intención de los participantes de usar un método. Estos resultados permiten rechazar  $H_{70}$  y aceptar su hipótesis alternativa, lo que significa que se ha corroborado que ITU está determinado por PU.

#### E. Intención de uso (ITU) vs facilidad de uso percibida (PEOU)

La hipótesis H8 ha sido probada para verificar si la intención de uso está actualmente determinada por la facilidad de uso percibida. Para ello, se construyó un modelo de regresión simple en el cual la variable PEOU fue usada como una variable independiente e ITU como una variable dependiente. La ecuación obtenida desde el modelo es la siguiente:

$$ITU = 1.126 + 0.819 * PEOU$$

**Tabla 41.** Regresión lineal simple entre la intención de uso y la facilidad de uso percibida.

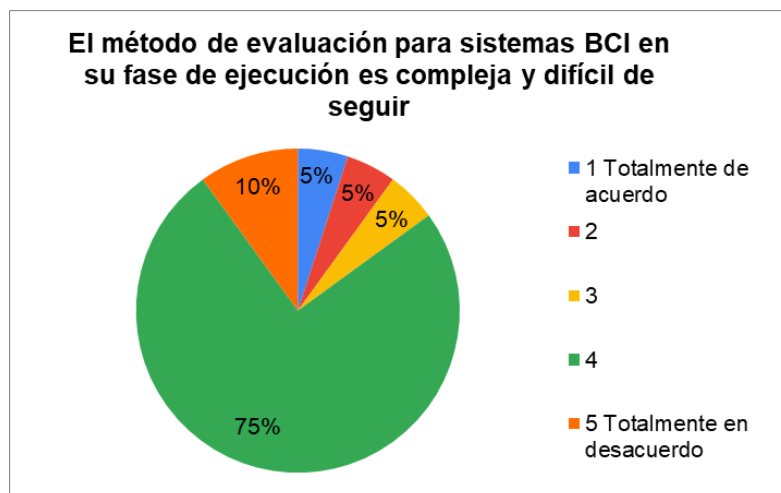
| Reg. Element | Coef (b) | Std. E. | Std. Coef | t     | Sig (p) | R                  | R2    |
|--------------|----------|---------|-----------|-------|---------|--------------------|-------|
| Constante    | 1.126    | 0.728   |           | 1.547 | 0.139   |                    |       |
| PEOU         | 0.819    | 0.174   | 0.744     | 4.717 | 0.000   | 0.744 <sup>a</sup> | 0.533 |

A través de este análisis se encontró un valor de significancia, Muy Alto con  $p < 0.001$ . El valor de  $R^2$  muestra que la variable ITU es capaz de explicar el 53.3% de la varianza en PEOU, lo cual representa un alto valor dado que podrían existir otros factores que influyen la intención de los participantes de usar un método. Estos resultados permiten rechazar  $H_{0}$  y aceptar su hipótesis alternativa, lo que significa que se ha corroborado que ITU está determinado por PEOU.

## 7.4 Empaquetado y presentación de los resultados

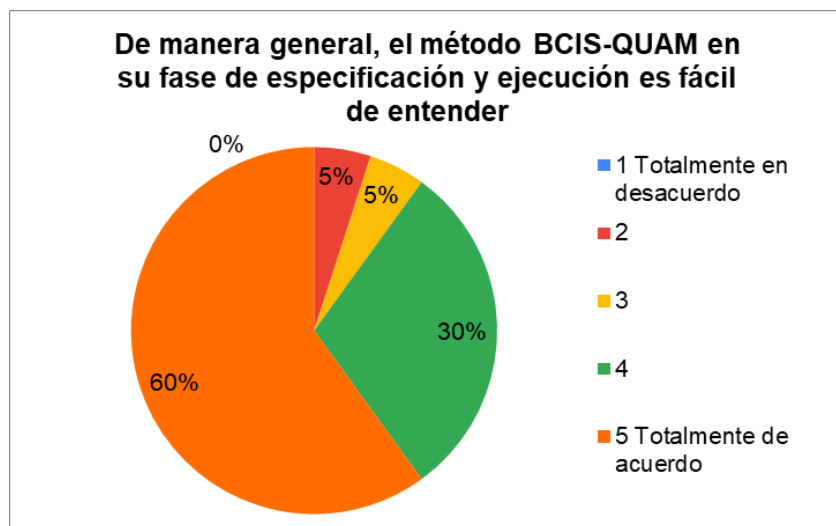
De la *Figura 34* hasta la *Figura N* se representan los resultados obtenidos de las preguntas del cuestionario realizado a cada participante del cuasiexperimento.

En la *Figura 34* se pueden observar los resultados obtenidos con respecto a la primera pregunta del cuestionario, el 85% de los participantes consideran que las fases evaluadas del método BCIS-QUAM es sencilla y fácil de utilizar, el 5% de participantes seleccionaron la opción neutra como respuesta y el 10% de los participantes consideran que las fases evaluadas son complejas y difíciles de seguir.



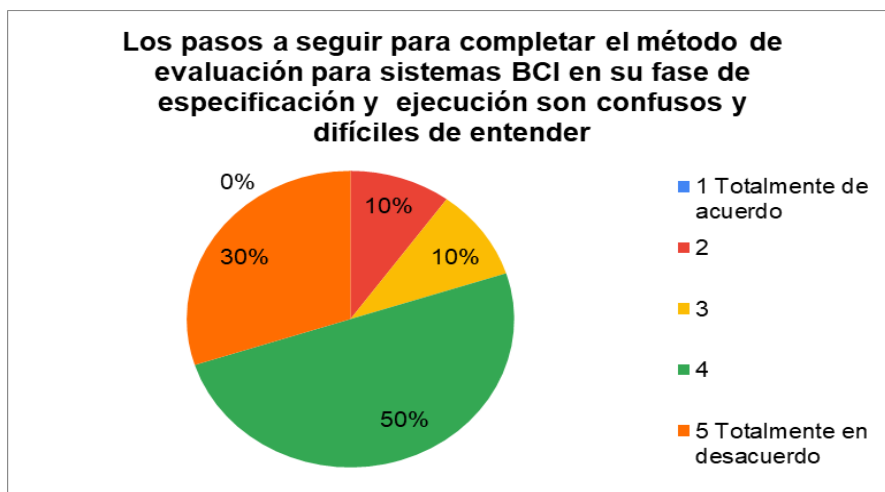
**Figura 34.** Resultados de la primera pregunta del cuestionario. Fuente: Elaboración propia.

En la *Figura 35* se puede observar los resultados obtenido de la pregunta dos del cuestionario, se puede destacar que el 90% de los participantes consideran que las fases evaluadas del método BCIS-QUAM son fáciles de entender, el 5% de los participantes seleccionaron el valor neutro como respuesta, mientras que el 5% restante escogió el valor 2, es decir lo consideraron difícil de entender.



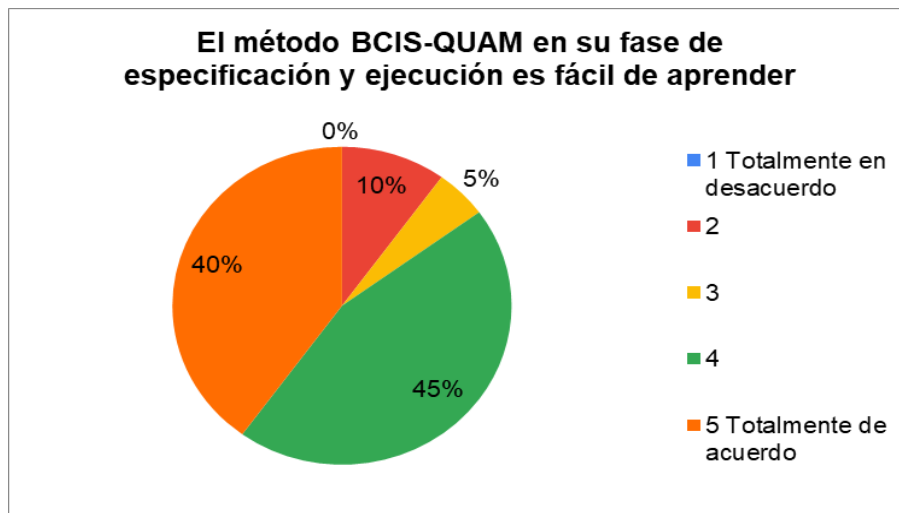
**Figura 35.** Resultados de la segunda pregunta del cuestionario. Fuente: Elaboración propia.

En la *Figura 36* se puede observar los resultados obtenidos de la tercera pregunta realizada en la encuesta, podemos destacar que el 80% de los participantes considera que los pasos a seguir en el método son fáciles de entender, el 10% seleccionó la variable neutra como respuesta y el otro 10% seleccionó la variable 2, lo que significa que están parcialmente de acuerdo en que son difíciles de entender abarca las métricas necesarias



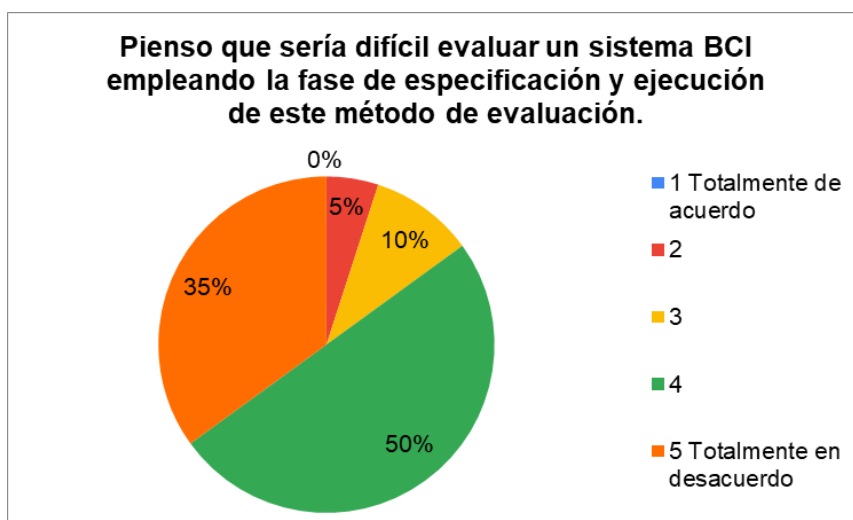
**Figura 36.** Resultados de la tercera pregunta del cuestionario. Fuente: Elaboración propia.

En la *Figura 37* se observan los resultados obtenidos de la pregunta cuatro realizada en el cuestionario, podemos destacar que el 85% de los participantes consideran que las fases evaluadas son fáciles de aprender, solo el 5% seleccionó la variable neutra como respuesta y el 10% restante escogió la variable 2, lo que significa que están parcialmente de acuerdo en que las fases son difíciles de aprender.



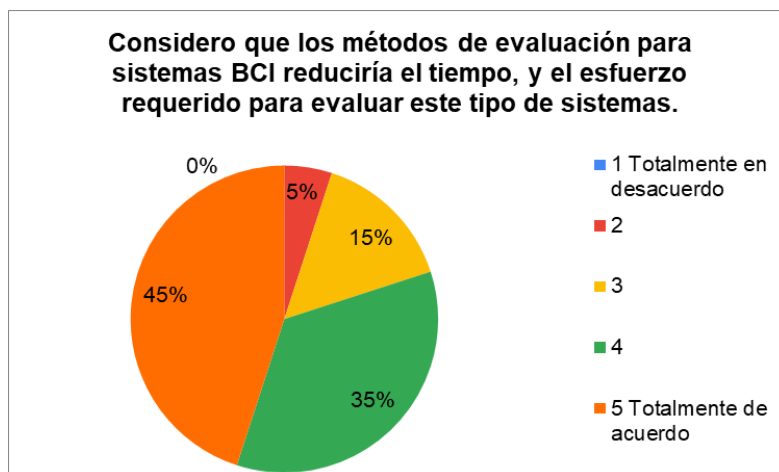
**Figura 37.** Resultados de la cuarta pregunta del cuestionario. Fuente: Elaboración propia.

En la *Figura 38* se puede observar los resultados obtenidos de la quinta pregunta del cuestionario realizado a todos los participantes de cuasiexperimento, podemos destacar que el 85% de participantes consideran fácil emplear las fases evaluadas para evaluar un sistema BCI, el 10% eligió la variable neutra como respuesta y solo el 5% respondió que está parcialmente de acuerdo en que sería difícil emplear las fases evaluadas.



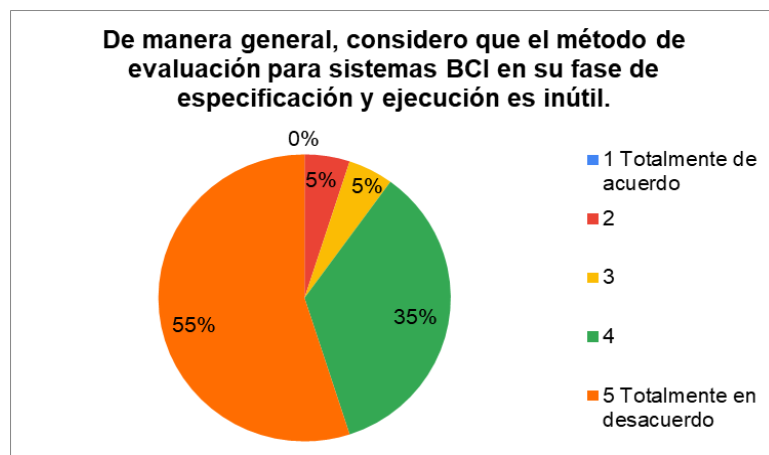
**Figura 38.** Resultados de la quinta pregunta del cuestionario. Fuente: Elaboración propia.

En la *Figura 39*, se puede observar los resultados obtenidos con respecto a la sexta pregunta realizada en el cuestionario, podemos destacar que el 80% considera que este tipo de métodos de evaluación reduciría el tiempo y esfuerzo al momento de evaluar un sistema BCI, por otro lado, el 15% utilizó la variable neutra para responder esta pregunta y solo el 5% respondió que está parcialmente en desacuerdo.



**Figura 39.** Resultados de la sexta pregunta del cuestionario. Fuente: Elaboración propia.

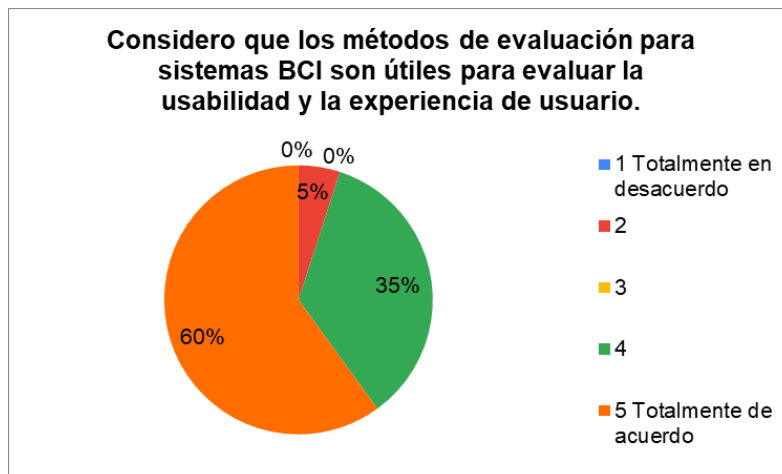
En la *Figura 40*, se puede observar los resultados obtenidos con respecto a la séptima pregunta realizada en el cuestionario, podemos destacar que el 90% de los participantes considera que el método BCIS-QUAM en su fase de especificación y ejecución es útil, por otro lado, el 5% utilizó la variable neutra como respuesta y solo el 5% respondió que está parcialmente de acuerdo en que este método es inútil.



**Figura 40.** Resultados de la séptima pregunta del cuestionario. Fuente: Elaboración propia.

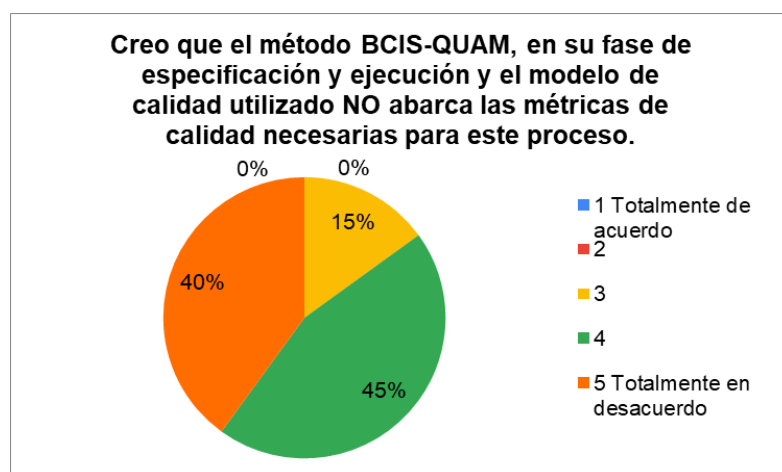


En la *Figura 41*, se puede observar los resultados obtenidos con respecto a la octava pregunta realizada en el cuestionario, podemos destacar que el 95% de los participantes considera que este tipo de métodos de evaluación para sistemas BCI son útiles para evaluar la usabilidad y la experiencia de usuario, mientras que el 5% respondió que está parcialmente en desacuerdo.



**Figura 41.** Resultados de la octava pregunta del cuestionario. Fuente: Elaboración propia.

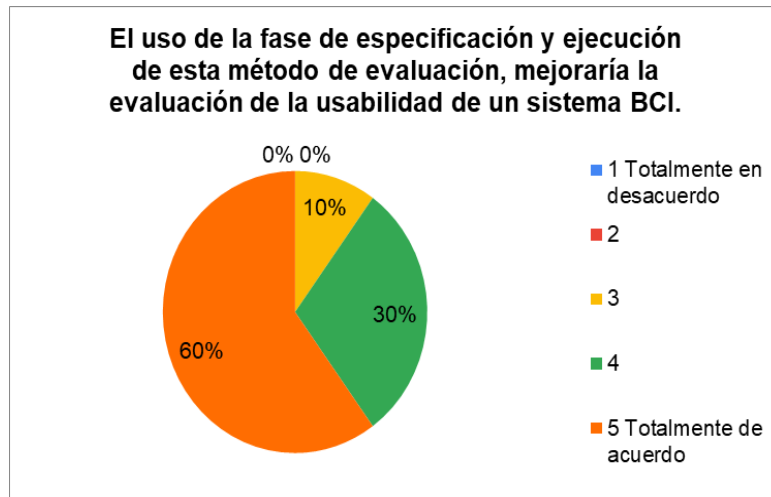
En la *Figura 42*, se puede observar los resultados obtenidos con respecto a la novena pregunta realizada en el cuestionario, podemos destacar que el 85% de los participantes consideran que el método BCIS-QUAM en las fases evaluadas y el modelo de calidad utilizado, abarcan las métricas de calidad necesarias, mientras que el 15% restante, utilizó la variable neutra para responder esta pregunta.



**Figura 42.** Resultados de la novena pregunta del cuestionario. Fuente: Elaboración propia.

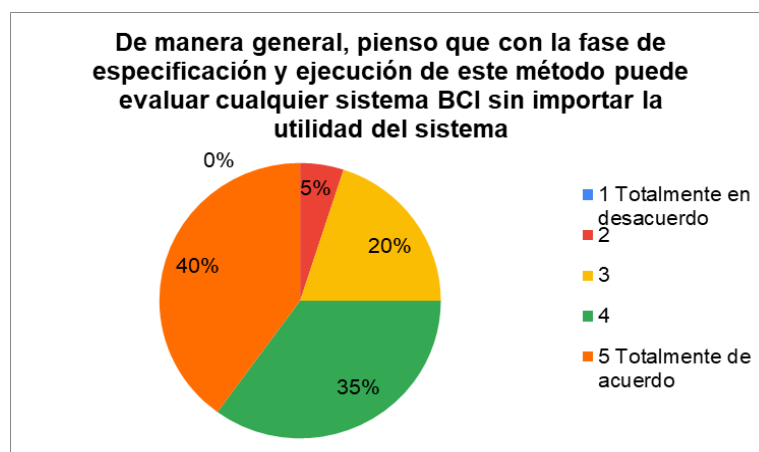
En la *Figura 43*, se puede observar los resultados obtenidos de la décima pregunta realizada en el cuestionario, podemos destacar que el 90% de los participantes está de

acuerdo en que el uso de las fases evaluadas del método BCIS-QUAM, mejoraría la evaluación de la usabilidad de un sistema BCI, mientras que el 10% restante utilizó la variable neutra para responder esta pregunta.



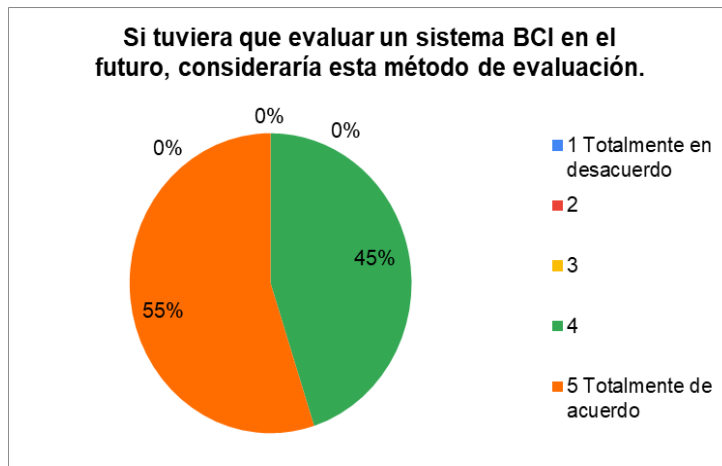
**Figura 43.** Resultados de la décima pregunta del cuestionario. Fuente: Elaboración propia.

En la *Figura 44*, se puede observar los resultados obtenido de la onceava pregunta realizada en el cuestionario, podemos destacar que el 75% de los participantes está de acuerdo en que las fases evaluadas pueden evaluar a cualquier sistema BCI sin importar la utilidad del mismo, por otro las el 20% utilizó la variable neutra para responder esta pregunta y solo el 5% respondió que está parcialmente en desacuerdo.



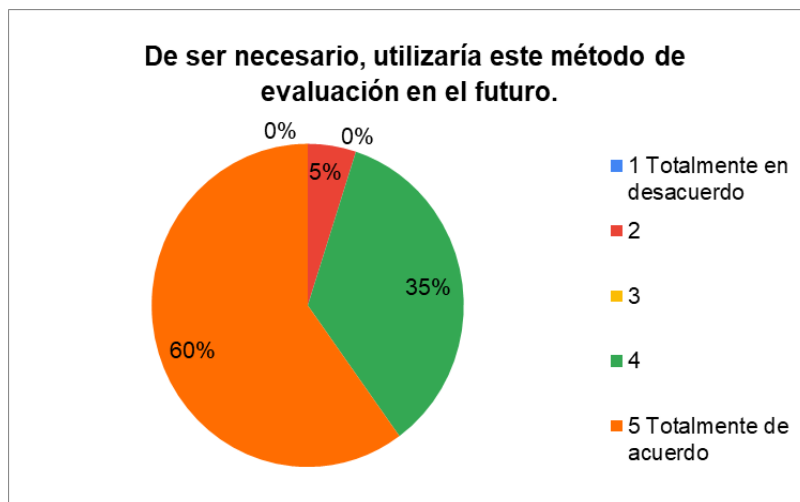
**Figura 44.** Resultados de la onceava pregunta del cuestionario. Fuente: Elaboración propia.

En la *Figura 45*, se puede observar los resultados obtenidos en la doceava pregunta realizada en el cuestionario, podemos destacar que el 100% de los participantes respondió por encima de la variable neutra, lo que significa que, si tuvieran que evaluar un sistema BCI, consideran este método para hacerlo.



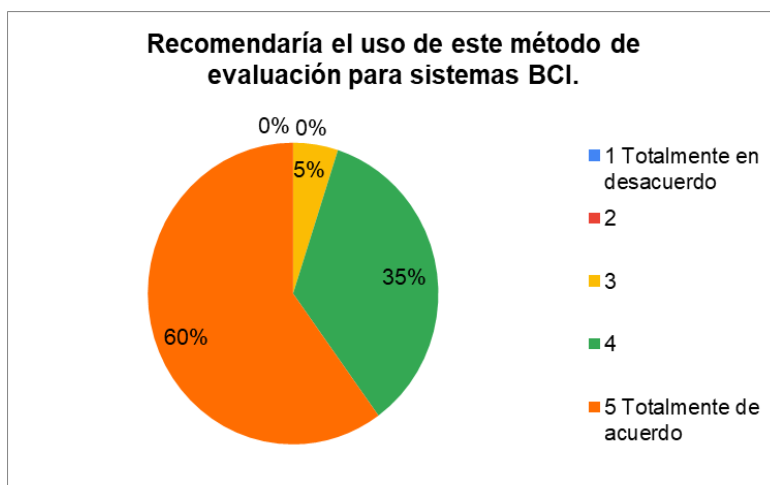
**Figura 45.** Resultados de la doceava pregunta del cuestionario. Fuente: Elaboración propia.

En la *Figura 46*, se puede observar los resultados obtenidos de la treceava pregunta realizada en el cuestionario, podemos destacar que el 95% de los participantes están de acuerdo en que, de ser necesario, si utilizarían este método en el futuro, mientras que el 5% restante está parcialmente en desacuerdo.



**Figura 46.** Resultados de la treceava pregunta del cuestionario. Fuente: Elaboración propia.

En la *Figura 47*, se puede observar los resultados obtenidos de la catorceava pregunta realizada en el cuestionario, podemos destacar que el 95% de los participan están de acuerdo en que recomendarían el uso del método BCIS-QUAM, mientras que el 5% restante, utilizó la variable neutra para responder esta pregunta.



**Figura 47.** Resultados de la catorceava pregunta del cuestionario. Fuente: Elaboración propia.

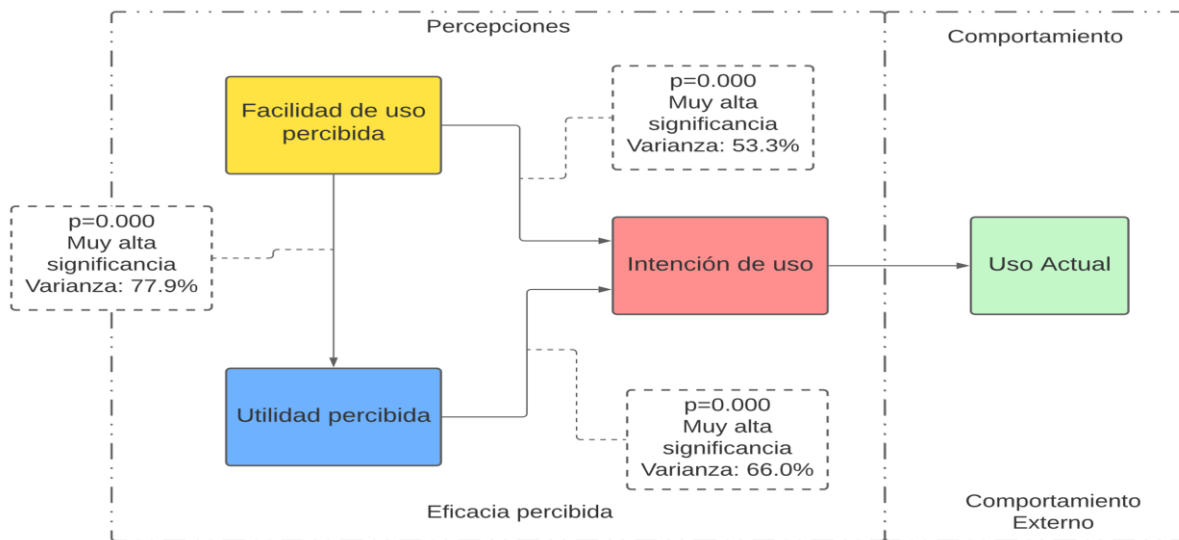
Como parte de los resultados de la evaluación, en la *Tabla 42* se indican las hipótesis planteadas, y la acción llevada a cabo, es decir, si la hipótesis en cuestión fue aceptada o rechazada, junto con el resultado obtenido.

**Tabla 42.** Resumen del cuasiexperimento sobre el método propuesto

| Hipótesis       | Rango | Significancia    | Acción    | Resultado   |
|-----------------|-------|------------------|-----------|---|
| H1 <sub>0</sub> | _____ | _____            | Aceptada  | El método BCIS-QUAM es difícil de utilizar.             |
| H2 <sub>0</sub> | _____ | _____            | Rechazada | El método BCIS-QUAM es considerado útil.                |
| H3 <sub>0</sub> | _____ | _____            | Rechazada | Existe la intención de uso futuro del método BCIS-QUAM. |
| H4 <sub>0</sub> | 0.008 | Alta             | Rechazada | PEOU está determinada por la Eficiencia                 |
| H5 <sub>0</sub> | 0.899 | No significativa | Aceptada  | PU no está determinada por la Efectividad               |
| H6 <sub>0</sub> | 0.000 | Muy Alta         | Rechazada | PU está determinada por PEOU                            |
| H7 <sub>0</sub> | 0.000 | Muy Alta         | Rechazada | ITU está determinada por PU                             |
| H8 <sub>0</sub> | 0.000 | Muy Alta         | Rechazada | ITU está determinada por PEOU                           |

En la *Figura 48* podemos observar las conclusiones obtenidas al aplicar MEM al método BCIS-QUAM, esto hace referencia a las hipótesis H4<sub>0</sub>, H5<sub>0</sub>, H6<sub>0</sub>, H7<sub>0</sub>, y H8<sub>0</sub>, donde sólo la hipótesis H5<sub>0</sub> ha sido aceptada y las demás hipótesis fueron rechazadas, por lo que se ha podido corroborar que la Utilidad Percibida (PU) está determinada por la Facultad de Uso Percibida (PEOU), la Intención de Uso Percibida (ITU) se encuentra determinada por la

Facilidad de Uso Percibida (PEOU), y la Intención de Uso Percibida (ITU) se encuentra determinada por la Utilidad Percibida (PU).



**Figura 48.** Conclusiones obtenidas de aplicar el MEM en el método BCIS-QUAM. Fuente: Elaboración propia.

Con respecto a las preguntas planteadas en este cuasiexperimento, podemos concluir lo siguiente, de cada una de ellas:

- **RQ1:** ¿La metodología BCIS-QUAM es percibida como fácil de usar y útil? De ser así, ¿las percepciones de los usuarios son el resultado de su eficiencia cuando utilizan la metodología para diseñar la evaluación de usabilidad de un sistema BCI y ejecutar la misma?

Con base en los resultados obtenidos por los participantes podemos determinar que para la mayoría de ellos el método BCIS-QUAM es fácil de usar y útil, para el objetivo que tiene el mismo, cabe recalcar que la hipótesis  $H1_0$  ha sido aceptada, debido a que un participante tuvo una percepción diferente al resto y expresó que el método propuesto es difícil de usar. En el *ANEXO D5*, se pueden visualizar las observaciones que respondieron los usuarios en las preguntas abiertas. Con respecto a las preguntas realizadas, en una escala del uno al cinco, en promedio, los participantes calificaron con 4.11/5 al método como fácil de usar, por otro lado, los participantes calificaron con 4,37/5 al método como útil. Por otro lado, con respecto a la influencia del rendimiento de los participantes, se determinó que la Facilidad de Uso Percibida (PEUO) está determinada por la eficiencia, pero la Utilidad Percibida (PU) no se encuentra determinada por la efectividad. Con estas consideraciones, las

hipótesis  $H1_0$  y  $H4_0$  han sido rechazadas, mientras que la  $H2_0$  y la  $H5_0$  han sido aceptadas.

- **RQ2:** ¿Existe una intención de uso de la metodología BCIS-QUAM en el futuro? De ser así, ¿estas intenciones de uso son el resultado de las percepciones de los participantes?

Con base en las respuestas obtenidas en la encuesta del cuasiexperimento, la totalidad de los participantes han mostrado su intención de uso futuro de las fases evaluadas del método BCIS-QUAM. En el *ANEXO D5*, se puede visualizar los comentarios del porque utilizarían este método, además, considerando la variable sobre la intención de Uso Futura (ITU), en una escala del uno al cinco, los participantes han considerado un promedio de 4.53/5 utilizar el método en un futuro. Por otro lado, se ha descubierto que las intenciones de uso son el resultado de las percepciones que tienen los participantes al utilizar el método, es decir, la Utilidad Percibida (PU) está determinada por la Facilidad de Uso Percibida (PEUO), a su vez, la Intención de Uso (ITU) está determinada por la Utilidad Percibida (PU) y por último, la Intención de Uso (ITU) está determinada por la Facilidad de Uso Percibida (PEOU) , por lo mencionado anteriormente, las hipótesis  $H3_0$ ,  $H6_0$ ,  $H7_0$  y  $H8_0$  han sido rechazadas, aceptando así sus hipótesis alternativas.

## 7.5 Amenazas a la validez

Cook & Campbell (1979), consideran cuatro tipos de amenaza que pueden poner en peligro la validez de un cuasiexperimento: validez interna, validez externa, validez del constructor y validez de la conclusión, a continuación, se explicara cada una de ellas.

### 7.5.1. Validez interna

La principal amenaza a la validez interna, para este cuasiexperimento, estuvo relacionada a la falta de experiencia de los participantes, para reducir esta amenaza, se prepararon videos informativos del método y del sistema a evaluar, además, los participantes contaban con todos los anexos necesarios y de una explicación previa del cuasiexperimento y de las actividades a realizar en él. Es importante mencionar, que debido a la falta de otro sistema BCI, no se realizó una fase de entrenamiento para los usuarios.

## **7.5.2. Validez externa**

La principal amenaza a la validez externa fue la modalidad virtual del cuasiexperimento, donde los participantes podían presentar problemas de conectividad. Para solventar este problema, se desarrolló una página web que contenía los videos informativos, la guía del cuasiexperimento y los anexos necesarios para desarrollarlo, de esta manera, los participantes podían acceder a ellos en todo momento del desarrollo del mismo.

Otra de las amenazas a tomar en cuenta, fue el tamaño y la complejidad de las tareas, para ello se realizó una prueba piloto con cinco participantes para medir la dificultad y el tiempo aproximado en realizar todas las actividades.

## **7.5.3. Validez del constructo**

La principal amenaza de constructo es la confiabilidad del cuestionario que respondieron los participantes después de realizar las actividades, para solventar esta amenaza se realizó la prueba de confiabilidad de alfa de Cronbach para cada conjunto de preguntas relacionadas con las variables PEOU, PU y ITU.

Para la Facilidad de Uso Percibida (PEOU) se obtuvo un  $\alpha=0.728$ , para la Utilidad Percibida (PU) se obtuvo un  $\alpha=0.910$  y para la Intención de Uso (ITU) se obtuvo un  $\alpha=0.935$ , los valores obtenidos están por encima del umbral mínimo aceptado, que es 0.7, por lo que podemos concluir, que el cuestionario realizado es confiable.

## **7.5.4. Validez de la conclusión**

La principal amenaza a la validez de la conclusión estadística es el tamaño de la muestra, para solventar esta amenaza, se seleccionaron 20 participantes y para cada uno de ellos, se aplicó el mismo procedimiento y se aseguró que las variables dependientes se calculen utilizando la misma función de medición. Sin embargo, no queda del todo mitigada la validez, por lo que como trabajo futuro se plantea dentro del grupo de investigación, seguir con replicaciones de este experimento.

## CAPÍTULO 8: CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

En este capítulo, se realiza una discusión sobre cada uno de los capítulos a manera de conclusiones, con respecto a su cumplimiento, posibles trabajos a realizarse, limitaciones, ventajas e integración de la teoría con la práctica.

### 8.1. Conclusiones

A continuación, se detalla las conclusiones obtenidas de cada objetivo de investigación, los mismos que fueron planteados al inicio de este trabajo de titulación.

#### 8.1.1. Objetivo general

El objetivo general del trabajo de titulación fue *crear una metodología de evaluación y un modelo de calidad que permitan evaluar la calidad en sistemas basados en “Brain Computer Interface”*.

El objetivo general se cumplió en su totalidad, debido a que unos de los principales resultados de este trabajo de titulación es el método de evaluación para sistemas BCI, el cual a su vez hace uso como herramienta principal el modelo de calidad para sistemas BCI. Tomando en cuenta estas consideraciones, se obtuvieron las siguientes conclusiones:

1. Al finalizar la revisión sistemática de la literatura con respecto a sistemas BCI y a métodos de evaluación de calidad para sistemas BCI, se determinó que no existen métodos y metodologías que sirvan para evaluar la calidad de uso y de producto existentes en este tipo de sistemas. Por lo cual, se concluye que este método de evaluación es la primera propuesta de una herramienta que permite evaluar la calidad de los sistemas BCI.
2. Con base en los resultados obtenidos en la evaluación empírica, podemos concluir que el método de evaluación, es útil y fácil de utilizar, además existe una intención de uso en el futuro por parte de los participantes, este punto es muy importante, debido a que el método de evaluación puede ser utilizado para diversos sistemas BCI, sin importar su dominio, finalidad o herramientas que utilice.

#### 8.1.2. Objetivo específico 1

*Realizar una revisión sistemática sobre sistemas BCI y la calidad.*



Este objetivo fue cubierto en su totalidad mediante la revisión sistemática de la literatura con respecto a Brain Computer Interface, calidad en uso y de producto en sistemas BCI, métodos y metodologías en el área de evaluar la calidad de uso y de producto existente en sistemas BCI. Al iniciar esta etapa de la revisión se obtuvieron 943 estudios, a los cuales se realizó una especie de filtrado y posterior selección, dando como resultado 38 estudios, los cuales fueron empleados en el trabajo de titulación y evidenciando la falencia de métodos de evaluación de calidad para sistemas BCI. Además, se puede concluir que:

- La mayoría de sistemas se basan en mejorar la calidad de vida de las personas con discapacidad, por lo que los estudios resultantes se enfocan en un público con ciertas características físicas.
- Los sistemas BCI son sistemas que están en pleno desarrollo tanto en la parte de hardware y software, por lo que la información existente no es suficiente para el desarrollo de estos sistemas, sin embargo, esto indica que existe un gran camino por delante con lo que respecta a la investigación y desarrollo en la interacción cerebro-computador.
- De los estudios seleccionados, la mayoría de estudios no hacen evaluaciones de calidad de los sistemas BCI; dejando de lado una parte fundamental de todo sistema, ya que si un sistema no es usable no cumplirá con su objetivo. Por otro lado, los estudios que sí hacen evaluaciones de calidad se basan en la experiencia de usuario y su criterio, por lo que no es una evaluación netamente confiable.

### **8.1.3. Objetivo específico 2**

*Crear un modelo de calidad de producto y un método de evaluación alineados con estándares de calidad.*

Este objetivo fue cubierto en su totalidad al elaborar un nuevo método que permita evaluar sistemas BCI, sin importar su finalidad y las herramientas que utiliza, además, este método utiliza como artefacto principal un modelo de calidad, elaborado con base en las características y atributos, obtenidos de la revisión sistemática realizada.

El modelo de calidad, utilizado en varias fases del método propuesto, está dividido en tres partes, la primera evalúa la usabilidad de un sistema BCI, en esta parte se contempla cinco subcaracterísticas, inteligibilidad, aprendizaje, operabilidad, protección contra errores de usuario y estética, y se evalúa un total de veinte y dos atributos de calidad.

Por otro lado, tenemos la parte para evaluar la experiencia de usuario al utilizar un sistema BCI, como sub característica principal tenemos a la satisfacción y este se divide en dos sub-sub-características, autonomía y ergonomía, finalmente esta parte del modelo, permite evaluar cinco atributos de calidad.

Por último, tenemos las partes para evaluar la interfaz de usuario de un sistema BCI, es importante recalcar, que no todos los sistemas BCI cuentan con una, ya que su retroalimentación se puede dar por medio de la acción de un determinado dispositivo, esta parte del modelo tiene como característica principal la accesibilidad, de esta se tiene dos sub características, perceptibilidad y comprensibilidad, finalmente, con esta parte se puede evaluar cinco atributos de calidad.

### **8.1.4. Objetivo específico 3**

*Aplicar la solución en la evaluación de un sistema BCI.*

Para cumplir este objetivo, se procedió a desarrollar un sistema Brain Computer Interface, el sistema RaceBCI cumple con la estructura determinada para este tipo de sistemas, donde a través del Casco Ultracórtex Mark IV de OpenBCI, se captan las señales cerebrales del usuario, luego estas son procesadas en un programa desarrollado en el lenguaje de programación Python, y según la frecuencia obtenida en la onda beta, se transmite una determinada señal a un vehículo a control remoto.

El sistema desarrollado fue presentado en diversos medios de comunicación, como un sistema novedoso y que llamó la atención de muchas personas, detrás de este sistema, se encuentran varias horas de investigación, programación, y sobre todo de pruebas. En el Capítulo 6, de este trabajo de titulación, se detalla el sistema desarrollado.

De manera general, se puede afirmar que la elaboración de dicho sistema, ha permitido aplicar el método BCIS-QUAM, para evaluar su calidad, lo que esta instancia constituye una solución para un escenario real, dando como resultado la evaluación de la calidad de un sistema BCI, independientemente de su finalidad y herramientas que utiliza.

### **8.1.5. Objetivo específico 4**

*Evaluar la solución con la ayuda de ingenieros de Software.*

Este objetivo ha sido cubierto en su totalidad por medio de un cuasiexperimento dirigido a Ingenieros de Software, entre ellos estudiantes del último año de la carrera de Ingeniería de Sistemas y profesionales de esta área.

Para este cuasiexperimento, los participantes realizaron las actividades correspondientes a la fase de especificación y ejecución de la evaluación del método propuesto, luego, a través de la adaptación de MEM, se pudo verificar la aceptación o rechazo de ocho hipótesis planteadas, destacando que el método BCIS-QUAM es percibido por los participantes como útil pero difícil de usar, además se puede destacar que los participantes consideran utilizar las fases evaluadas en el futuro cuando se presente la evaluación de un sistema BCI.

## 8.2. Trabajos futuros

Con base en el trabajo de titulación realizado y los objetivos planteados en el mismo, se proponen los siguientes trabajos futuros siguiendo la misma línea de investigación:

- A. Mejorar el modelo de calidad para sistemas BCI, aplicando pesos a los diferentes atributos del mismo. Esto con la finalidad de que la evaluación considere la importancia del atributo dentro del sistema BCI, a su vez se deberá modificar el método de evaluación para que se considere una actividad donde se permita a los evaluadores asignar la importancia a cada atributo a evaluar basándose en el peso del mismo.
- B. Desglosar el método de evaluación, considerando que un sistema BCI se compone por varios componentes y la calidad de cada uno de estos, puede ser evaluada por separado empleando diferentes criterios de evaluación. Esto con la finalidad de desglosar los resultados obtenidos al aplicar el método de evaluación.
- C. Mejorar el sistema RaceBCI, esto con la finalidad de reconocer la intencionalidad del usuario de movilizar el vehículo a control remoto hacia adelante o hacia atrás, para ello se haría uso de redes neuronales en el procesamiento de las señales cerebrales.
- D. Realizar un caso de estudio con usuarios en general, donde se utilice el método propuesto, pero con la finalidad de evaluar la experiencia de usuario al utilizar el sistema RaceBCI.
- E. Desarrollar un sistema BCI más complejo y completo, el cual pueda ser evaluado de manera más detallada. Además, que este sistema sea para mejorar la calidad de vida del usuario.

- F. Completar la fase de difusión de los resultados obtenidos en este trabajo de titulación, para ello es necesario difundir la metodología BCIS-QUAM y su modelo de calidad a través de artículos de investigación.
- G. Aplicar el método BCIS-QUAM a diferentes sistemas BCI y con una muestra significativa de participantes para verificar su utilidad y funcionamiento.

## **IMPLICACIONES DE LA TEORIA EN LA PRÁCTICA**

El desarrollo de este trabajo de titulación, puede generar un gran impacto en el desarrollo industrial y científico, ya que la aplicación del método propuesto en los sistemas BCI existentes y futuros, ayudaría enormemente en la calidad obtenida en los mismos.

El desarrollo de este método y del modelo de calidad es un pequeño pero gran paso a la vez, ya que al no existir una herramienta para evaluar sistemas BCI, se convertiría en un punto de partida para mejorarlo u obtener nuevos métodos de evaluación.

## REFERENCIAS

- Aloise, F. (2009). *Sviluppo di un sistema Brain-Computer Interface per il controllo ambientale*.
- Alonso-Valerdi, L. M., Arreola-Villarruel, M. A., & Argüello-García, J. (2019). Interfaces Cerebro-Computadora: conceptualización, retos de rediseño e impacto social. In *Revista Mexicana de Ingeniería Biomédica* (Vol. 40, Issue 3, pp. 1–18).
- Angevin, R. R., & Málaga, U. De. (2004). Problemática de las Interfaces Cerebro-Computador. *Universidad de Málaga, June 2014*, 48–51.
- Araujo, M., González, N., & Pose, F. (2016a). Evaluación y detección de potenciales evocados sobre una interfaz cerebro computadora. *Ingeniería Biomédica*, 7(October). [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1909-97622013000200006](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-97622013000200006)
- Araujo, M., González, N., & Pose, F. (2016b). *Evaluación y detección de potenciales evocados sobre una interfaz cerebro computadora. October*.
- Arboleda, C., García, E., Posada, A., & Torres, R. (2009). Diseño y construcción de un prototipo de Interfaz Cerebro-Computador para facilitar la comunicación de personas con discapacidad motora. *Revista EIA*, 11, 105–115.
- Callejas-Cuervo, M., Alarcón-Aldana, A. C., & Álvarez-Carreño, A. M. (2017a). Modelos de calidad del software, un estado del arte. *Entramado*, 13(1), 236–250. <https://doi.org/10.18041/entramado.2017v13n1.25125>
- Callejas-Cuervo, M., Alarcón-Aldana, A. C., & Álvarez-Carreño, A. M. (2017b). Modelos de calidad del software, un estado del arte. *ENTRAMADO*, 13(1), 236–250. <https://doi.org/10.18041/entramado.2017v13n1.25125>
- Cedillo, P. (2016). *Monitorización de calidad de servicios cloud mediante modelos en tiempo de ejecución*.
- Córdoba, C. (2013). La experiencia de usuario: de la utilidad al efecto. *ICONOFACTO*, 9, 56–70.
- Corralejo, R., Álvarez, D., & Homero, R. (2015). *Evaluación de un sistema BCI de control domótico basado en potenciales P300 aplicado a usuarios con grave discapacidad*. 11–18.
- Cortés, M., & León, M. (2011). Generalidades sobre Metodologías de la Investigación. *Universidad Autónoma Del Carmen*, 174 p.
- Davis, F. D. (1989). Perceived usefulness, perceived ease of use, and user acceptance of information technology. *MIS Quarterly: Management Information Systems*, 13(3), 319–339. <https://doi.org/10.2307/249008>
- Estayno, M. G., Dapozo, G. N., Cuenca Pletsch, L. R., & Greiner, C. L. (2009). Modelos y métricas para evaluar calidad de software. In *XI Workshop de Investigadores en Ciencias de la Computación*.
- Ezquerro, S., Bertomeu Motos, A., Barios, J. A., Lledó Pérez, L. D., Catalá Orts, J. M., & García Aracil, N. (2018). Control de entorno virtual mediante interfaz híbrido BCI usando señales EOG/EEG durante imaginación motora. *Actas de Las XXXIX Jornadas de Automática*, 108–113. <https://doi.org/10.17979/spudc.9788497497565.0108>
- Fitria. (2013). Calidad en el desarrollo de software. In *Journal of Chemical Information and Modeling* (Vol. 53, Issue 9).
- García, E., & Gentiletti, G. (2008). Interfaz cerebro computadora (ICC) basada en el potencial relacionado con eventos P300: análisis del efecto de la dimensión de la matriz de estimulación sobre su desempeño. *Revista Ingeniería Biomedica*, 2, 26–33. <http://www.scielo.org.co/pdf/rinbi/v2n4/v2n4a05.pdf>

- Garzón, J., & Tomás, U. S. (2013). Uso de una BCI ( Brain Computer Interface ) como enlace interactivo , terapéutico y de aprendizaje dirigido a personas con discapacidad cognitiva y motora. *Laccej 2013*, 1–10.
- González, L., Prieto, J., & Martínez, H. (2018). *Desarrollo de una Interfaz Cerebro-Ordenador (BCI) para Aplicaciones de Robótica*.
- Gutiérrez, J., Cantillo, J., Cariño, R. I., & Elías, D. (2013). Los sistemas de interfaz cerebro-computadora: una herramienta para apoyar la rehabilitación de pacientes con discapacidad motora. *Investigación En Discapacidad*, 2(2), 62–69. <https://www.medigraphic.com/pdfs/invdis/ir-2013/ir132c.pdf>
- Gutiérrez-martínez, J., Cantillo-negrete, J., Cariño-escobar, R. I., & Elías-viñas, D. (2013). Los sistemas de interfaz cerebro-computadora: una herramienta para apoyar la rehabilitación de pacientes con discapacidad motora. *Investigación En Discapacidad*, 2(2), 62–69.
- Hornero, R., Corralejo, R., Álvarez, D., & Martín, L. (2013). Diseño, desarrollo y evaluación de un sistema Brain Computer Interface (BCI) aplicado al control de dispositivos domóticos para mejorar la calidad de vida de las personas con grave discapacidad. *Trauma (Spain)*, 24(2), 117–125.
- Hornero, R., Corralejo, R., & Álvarez González, D. (2012). Brain-Computer Interface (BCI) aplicado al entrenamiento cognitivo y control domótico para prevenir los efectos del envejecimiento. *Lychnos*, 8, 29–34.
- Insight, E. (2018). Interfaz cerebro ordenador BCI mediante el uso de Emotiv Insight BCI computer brain interface by using Emotiv Insight. *Benjamín Miguel Villegas Méndez1 & Marcelo Greby Rojas Fernández2 1Av.*, 9(1), 3–31.
- ISO. (2011a). *ISO/IEC 25010:2011 Systems and software engineering — Systems and software Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE) — System and software quality models*. <https://www.iso.org/standard/35733.html>
- ISO. (2011b). *ISO/IEC 25010:2011 Systems and software engineering — Systems and software Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE) — System and software quality models*. <https://www.iso.org/standard/35733.html>
- ISO/IEC. (2010). *ISO/IEC 9241-210: Ergonomics of human–system interaction Part 210: Human-centred design for interactive systems*.
- ISO/IEC. (2011). *ISO / IEC 25010: 2011 Systems and software engineering — Systems and software Quality Requirements and Evaluation ( SQuaRE ) — System and software quality models*. <https://doi.org/https://doi.org/10.3403/30215101>
- Jain, M., Chhabra, D., & Singh, A. (2015). Evaluation and Comparison of a Multimodal Combination of BCI Paradigms and Eye Tracking With Affordable Consumer-Grade Hardware in a Gaming Context. *IEEE TRANSACTIONS ON COMPUTATIONAL INTELLIGENCE AND AI IN GAMES*, 5(2), 221–224. <https://doi.org/10.1145/2821650.2821678>
- Kitchenham, B., & Charters, S. (2007). *Guidelines for performing Systematic Literature Reviews in SE*. 1–44. <https://doi.org/10.1145/1134285.1134500>
- Lance, B. J., Kerick, S. E., Ries, A. J., Oie, K. S., & McDowell, K. (2012a). Brain-Computer interface technologies in the coming decades. *Proceedings of the IEEE, 100(SPL CONTENT)*, 1585–1599. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2012.2184830>

- Lance, B. J., Kerick, S. E., Ries, A. J., Oie, K. S., & McDowell, K. (2012b). Brain-computer interface technologies in the coming decades. *Proceedings of the IEEE*, 100(SPL CONTENT), 1585–1599. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2012.2184830>
- López Echeverry, A., Valencia Ayala, L., & Cabrera, C. (2008). Introducción a la calidad de software. *Scientia Et Technica*, XIV(39), 326–331. <https://doi.org/10.22517/23447214.3241>
- Lupu, R. G., Ungureanu, F., & Cimpanu, C. (2019). Brain-computer interface: Challenges and research perspectives. *Proceedings - 2019 22nd International Conference on Control Systems and Computer Science, CSCS 2019*, 387–394. <https://doi.org/10.1109/CSCS.2019.00071>
- MCI Electronics. (n.d.). *Arduino Nano | Arduino.cl - Compra tu Arduino en Línea*. Retrieved August 28, 2022, from <https://arduino.cl/arduino-nano/>
- Montalvo, M. (2005). *Estado del Arte : Interfaces Cerebro Computadora*. 1–5.
- Moody, D. L. (2001). *A Practical Method for Representing Large Entity Relationship Models*.
- Moreno, I., Batista, E., Serracin, S., Moreno, R., Gómez, L., Serracin, J., Quintero, J., & Boya, C. (2019a). Los sistemas de interfaz cerebro-computadora basado en EEG: características y aplicaciones. *I+D Tecnológico*, 15(2), 13–26. <https://doi.org/10.33412/idt.v15.2.2230>
- Moreno, I., Batista, E., Serracin, S., Moreno, R., Gómez, L., Serracin, J., Quintero, J., & Boya, C. (2019b). Los sistemas de interfaz cerebro-computadora basado en EEG: características y aplicaciones. *I+D Tecnológico*, 15(2), 13–26. <https://doi.org/10.33412/idt.v15.2.2230>
- Moreno S., M. R., González C., G. U., & Echartea C., D. C. (2008). Evaluación de la Calidad en Uso de Sitios Web Asistida por Software: SW AQUA Software Aided Quality in Use Assessment: SW AQUA. *Revista Avances En Sistemas e Informática*, 5(1), 147–154.
- Nadal, J., & Opisso, E. (2008). Interfaces cerebro-ordenador. *A Fondo*, 1–4.
- OpenBCI. (2022). *Ultracortex Mark IV*. <https://docs.openbci.com/AddOns/Headwear/MarkIV/>
- Ospina B, Sandoval J, Aristizabal C, & Ramirez M. (2003). *La escala de Likert en la valoración de los conocimientos y las actitudes de los profesionales de enfermería en el cuidado de la salud. Antioquia, 2003*.
- Pérez Castillo, Y. J., & Orantes Jiménez, S. D. (2019). Estudio de herramientas para alcanzar niveles de calidad de software a nivel de proceso. *Research in Computing Science*, 148(10), 117–127. <https://doi.org/10.13053/rcs-148-10-10>
- Pressman, R., Tobergte, D. R., & Curtis, S. (2013). Ingeniería de Software un enfoque práctico. In *Journal of Chemical Information and Modeling* (7ma ed., Vol. 53, Issue 9).
- Ramos-Argüelles, F., Morales, G., Egozcue, S., Pabón, R. M., & Alonso, M. T. (2009). Técnicas básicas de electroencefalografía: principios y aplicaciones clínicas. *Anales Del Sistema Sanitario de Navarra*, 32 Suppl 3, 69–82. <https://doi.org/10.4321/s1137-66272009000600006>
- Rodríguez, P., Jiménez, A., & Paterno, F. (2015). *Monitoreo de la actividad cerebral para a evaluacion de la satisfaccion* (p. 7). <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.16924/riua.v0i42.750>
- Sánchez, R. H. (2013). *Brain Computer Interface for cognitive training and domotic assistance against the effects of ageing ( BCI- - Ageing )*. 1–4.
- Santamaría, E. (2016). *DISEÑO Y DESARROLLO DE UNA APLICACIÓN PARA CONTROLAR UN TELÉFONO MÓVIL MEDIANTE SISTEMAS BRAIN COMPUTER INTERFACE (BCI) ORIENTADA A PERSONAS CON GRAVE DISCAPACIDAD*.
- Scalone, F. (2006). *ESTUDIO COMPARATIVO DE LOS MODELOS Y ESTANDARES DE CALIDAD DEL SOFTWARE*. Universidad Tecnologica Nacional - Buenos Aires.

- Vela Dávila, J. A., Velásquez Macías, J., & Veyna Lamas, M. (2017). Videojuegos basados en BCI (Interface cerebro computadora): Revisión Sistemática Literaria. *Programación Matemática y Software*, 9(2), 10–23.
- W3C Recommendation. (2018). *Web Content Accessibility Guidelines (WCAG) 2.1*. <https://www.w3.org/TR/2018/REC-WCAG21-20180605/>
- Wan, X., Zhang, K., Ramkumar, S., Deny, J., Emayavaramban, G., Siva Ramkumar, M., & Hussein, A. F. (2019). A Review on Electroencephalogram Based Brain Computer Interface for Elderly Disabled. *IEEE Access*, 7(c), 36380–36387. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2903235>
- Zapata, L., Karam, J., & Gutiérrez, D. (2018). La tecnología y su impacto en la vida cotidiana. Revisión y comentarios del libro: “Silicon Valley vs Hollywood: cuando las empresas de tecnología y sus medios se confunden.” *Palermo Business Review*, 17, 43–53. [https://www.palermo.edu/economicas/cbrs/pdf/pbr17/PBR\\_17\\_03.pdf](https://www.palermo.edu/economicas/cbrs/pdf/pbr17/PBR_17_03.pdf)



### Anexo A: Referencias de la revisión sistemática de la literatura

#### A1. Estudios seleccionados en la revisión de la literatura

- S01** Dollman, G. J., de Wet, L., & Beelders, T. R. (2015). Commercial Brain Computer Interface: Potential as a Natural User Interface. ACM International Conference Proceeding Series, 28-30-September-2015. <https://doi.org/10.1145/2815782.2815797>
- S02** Wang, A., Song, C., Jin, Z., & Xu, W. (2015). Adaptive compressed sensing architecture in wireless brain-computer interface. Proceedings - Design Automation Conference, 2015-July. <https://doi.org/10.1145/2744769.2744792>
- S03** Crawford, C. S., & Gilbert, J. E. (2019). Brains and blocks: Introducing novice programmers to brain-computer interface application development. ACM Transactions on Computing Education, 19(4). <https://doi.org/10.1145/3335815>
- S04** Georgiadis, C. K., Kefalas, P., Stamatis, D., Diamantaras, K., Evangelidis, G., Manolopoulos, Y., Greek Computer Society. Macedonia-Thrace Chapter, Association for Computing Machinery, & ACM Digital Library. (2013). An Application of Data Envelopment Analysis to Software Quality Assessment. ACM Transactions on Computing Education, 293.
- S05** Putze, F., Schünemann, M., Schultz, T., & Stuerzlinger, W. (2017). Automatic classification of auto-correction errors in predictive text entry based on EEG and context information. ICMI 2017 - Proceedings of the 19th ACM International Conference on Multimodal Interaction, 2017-January, 137-145. <https://doi.org/10.1145/3136755.3136784>
- S06** Tirupattur, P., Spampinato, C., Rawat, Y. S., & Shah, M. (2018). ThoughtViz: Visualizing human thoughts using generative adversarial network. MM 2018 - Proceedings of the 2018 ACM Multimedia Conference, 950-958. <https://doi.org/10.1145/3240508.3240641>
- S07** Jiang, S., Li, Z., Zhou, P., & Li, M. (2019). Memento: An emotion-driven lifelogging system with wearables. ACM Transactions on Sensor Networks, 15(1). <https://doi.org/10.1145/3281630>
- S08** Vortmann, L. M., & Putze, F. (2021). Exploration of Person-Independent BCIs for Internal and External Attention-Detection in Augmented Reality. Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies, 5(2). <https://doi.org/10.1145/3463507>
- S09** Kosmyna, N., Morris, C., Nguyen, T., Zepf, S., Hernandez, J., & Maes, P. (2019). Attentivu: Designing EEG and EOG compatible glasses for physiological sensing and feedback in the car. Proceedings - 11th International ACM Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications, AutomotiveUI 2019, 355-368. <https://doi.org/10.1145/3342197.3344516>
- S10** Fouché, R. C. (2017). Head mouse: Generalisability of research focused on the disabled to able bodied users. ACM International Conference Proceeding Series, Part F130806. <https://doi.org/10.1145/3129416.3129442>
- S11** Mohedano, E., Giró-I-nieto, X., Healy, G., O'Connor, N. E., McGuinness, K., & Smeaton, A. F. (2014). Object segmentation in images using EEG signals. MM 2014 - Proceedings of the 2014 ACM Conference on Multimedia, 417-426.

- <https://doi.org/10.1145/2647868.2654896>
- S12** Sohankar, J., Sadeghi, K., Banerjee, A., & Gupta, S. K. S. (2015). E-BIAS: A pervasive EEG-based identification and authentication system. *Q2SWinet 2015 - Proceedings of the 11th ACM Symposium on QoS and Security for Wireless and Mobile Networks*, 165–172. <https://doi.org/10.1145/2815317.2815341>
- S13** Putze, F., Amma, C., & Schultz, T. (2015). Design and evaluation of a self-correcting gesture interface based on error potentials from EEG. *Conference on Human Factors in Computing Systems - Proceedings, 2015-April*, 3375–3384. <https://doi.org/10.1145/2702123.2702184>
- S14** Pike, M., & Ch'ng, E. (2016). Evaluating Virtual Reality experience and performance: A brain based approach. *Proceedings - VRCAI 2016: 15th ACM SIGGRAPH Conference on Virtual-Reality Continuum and Its Applications in Industry*, 1, 469–474. <https://doi.org/10.1145/3013971.3014012>
- S15** Wan, X., Zhang, K., Ramkumar, S., Deny, J., Emayavaramban, G., Siva Ramkumar, M., & Hussein, A. F. (2019). A Review on Electroencephalogram Based Brain Computer Interface for Elderly Disabled. *IEEE Access*, 7, 36380–36387. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2903235>
- S16** Lin, C. T., Chiu, C. Y., Singh, A. K., King, J. T., Ko, L. W., Lu, Y. C., & Wang, Y. K. (2019). A Wireless Multifunctional SSVEP-Based Brain-Computer Interface Assistive System. *IEEE Transactions on Cognitive and Developmental Systems*, 11(3), 375–383. <https://doi.org/10.1109/TCDS.2018.2820153>
- S17** Touyama, H., & Maeda, K. (2013). Ambulatory brain-computer interface in outdoor environment toward indexing of lifelog. *Proceedings - 2013 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, SMC 2013*, 3396–3401. <https://doi.org/10.1109/SMC.2013.579>
- S18** Wang, Y. te, Nakanishi, M., Wang, Y., Wei, C. S., Cheng, C. K., & Jung, T. P. (2017). An Online Brain-Computer Interface Based on SSVEPs Measured from Non-Hair-Bearing Areas. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 25(1), 14–21. <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2016.2573819>
- S19** Hassan, A., Nurul, M., Sarker, F., & Mamun, K. (2016). An overview of brain machine interface research indeveloping countries: opportunities and challenges. *2016 5th International Conference on Informatics, Electronics and Vision (ICIEV)*.
- S20** Penalozza, C. I., Alimardani, M., & Nishio, S. (2018). Android feedback-based training modulates sensorimotor rhythms during motor imagery. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 26(3), 666–674. <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2018.2792481>
- S21** Bonaci, T., Calo, R., & Chizeck, H. (2014). App Stores for the Brain: Privacy & Security in Brain-Computer Interfaces. *ETHICS 2014 : 2014 IEEE International Symposium on Ethics in Engineering, Science, and Technology : Final Program*.
- S22** Ortiz, M., Iáñez, E., Gaxiola, J., Kilicarlsan, A., & Azorín, J. (2019). Assessment of motor imagery ingamma band using a lower limb exoskeleton. *2019 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC) : Bari, Italy. October 6-9, 2019*.
- S23** Liao, L. de, Lin, C. T., McDowell, K., Wickenden, A. E., Gramann, K., Jung, T. P., Ko, L. W., & Chang, J. Y. (2012). Biosensor technologies for augmented brain-computer interfaces in the next decades. *Proceedings of the IEEE*, 100(SPL CONTENT), 1553–1566. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2012.2184829>
- S24** Kalagi, S., Machado, J., Carvalho, V., Soares, F., & Matos, D. (2017). Brain Computer Interface Systems Using Non-Invasive Electroencephalogram Signal: A Literature Review. *2017 International Conference on Engineering*,

- Technology and Innovation (ICE/ITMC): “Engineering, Technology & Innovation Management beyond 2020: New Challenges, New Approaches”: Conference Proceedings.
- S25** Bosse, S., Muller, K.-R., Wiegand, T., & Same, W. (2016). Brain-Computer Interfacing for Multimedia Quality Assessment. 2016 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC): 9-12 Oct. 2016.
- S26** Sheng, S., Song, P., Xie, L., Luo, Z., Chang, W., Jiang, S., & Yu, H. (2017). Design of an SSVEP-based BCI System with Visual Servo Module for a Service Robot to Execute Multiple Tasks. ICRA2017: IEEE International Conference on Robotics and Automation: Program: May 29-June 3, 2017, Singapore.
- S27** Chi, Y. M., Wang, Y. te, Wang, Y., Maier, C., Jung, T. P., & Cauwenberghs, G. (2012). Dry and noncontact EEG sensors for mobile brain-computer interfaces. IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, 20(2), 228–235. <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2011.2174652>
- S28** Kumarasinghe, K., Owen, M., Taylor, D., & Kasabov, N. (2018). FaNeuRobot: A Framework for Robot and Prosthetics Control using the NeuCube Spiking Neural Network Architecture and Finite Automata Theory. 2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA).
- S29** Fickling, S., Liu, C., D’Arcy, R., Hajra, S., & Song, X. (2019). Good data? The EEG Quality Index for Automated Assessment of Signal Quality. 2019 IEEE 10th Annual Information Technology, Electronics and Mobile Communication Conference (IEMCON).
- S30** Duan, S., Wang, C., Li, M., Long, X., Wu, X., & Feng, W. (2019). Haptic and Visual Enhance-based Motor Imagery BCI for Rehabilitation Lower-Limb Exoskeleton. 2019 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO).
- S31** Liao, L.-D., Wang, I.-J., Chang, C.-J., Lin, B.-S., Lin, C.-T., & Tseng, K. (2010). Human Cognitive Application by Using Wearable Mobile Brain Computer Interface. TENCON 2010 2010 IEEE Region 10 Conference.
- S32** Nik Aznan, N. K., Bonner, S., Connolly, J., al Moubayed, N., & Breckon, T. (2019). On the Classification of SSVEP-Based Dry-EEG Signals via Convolutional Neural Networks. Proceedings - 2018 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, SMC 2018, 3726–3731. <https://doi.org/10.1109/SMC.2018.00631>
- S33** Castermans, T., Duvinage, M., Petieau, M., Hoellinger, T., Saedeleer, C. de, Seetharaman, K., Bengoetxea, A., Cheron, G., & Dutoit, T. (2011). Optimizing the performances of a P300-based brain-computer interface in ambulatory conditions. IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems, 1(4), 566–577. <https://doi.org/10.1109/JETCAS.2011.2179421>
- S34** Maswanganyi, C., Tu, C., Owolawi, P., & Du, S. (2018). Overview of Artifacts Detection and Elimination Methods for BCI Using EEG. 2018 3rd IEEE International Conference on Image, Vision and Computing (ICIVC 2018): June 27-29, 2018, Chongqing, China.
- S35** Kobayash, N., & Sato, K. (2017). P300-based Control for Assistive Robot for Habitat. 2017 IEEE 6th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE): 24-27 Oct. 2017.
- S36** Alrajhi, W., Alaloola, D., & Albarqawi, A. (2017). Smart Home: Toward Daily Use of BCI-Based Systems. 2017 International Conference on Informatics, Health & Technology (ICIHT): 21-23 Feb. 2017.
- S37** Lopetegui, E., Garcia, B., & Mendez, A. (2011). Tennis computer game with brain control using EEG signals. Proceedings of CGAMES '2011 USA: 16th

International Conference on Computer Games : AI, Animation, Mobile, Interactive Multimedia, Educational, and Serious Games : 27th July-30th July 2011.

- S38** Udovii, G., Topi, A., & Russo, M. (n.d.). Wearable Technologies for Smart Environments: A Review with Emphasis on BCI.

## A2. Estudios por criterio de extracción

| Criterio de extracción   | #  | %      | Artículos   |
|--|----|--------|---|
| <b>EC1. Contexto de investigación</b>                          |    |        |   |
| Aplicaciones en neurociencias                                  | 10 | 26.00  | S05, S06, S09, S12, S13, S15, S17, S18, S21, S23  |
| Tecnologías que utilizan procesamiento de estímulos cerebrales | 24 | 63.16  | S01, S02, S05, S06, S07, S08, S09, S11, S13, S14, S16, S17, S18, S20, S21, S23, S24, S25, S31, S32, S33, S34, S35, S38                          |
| HCI  | 12 | 31.6   | S01, S02, S03, S04, S07, S08, S09, S10, S14, S15, S18, S19  |
| Calidad de vida  | 13 | 34.20  | S07, S10, S16, S17, S19, S21, S23, S26, S28, S35, S36, S37, S38   |
| Juegos   | 5  | 13.20  | S10, S21, S23, S37, S38   |
| Comunicación   | 7  | 18.40  | S03, S04, S06, S11, S14, S16, S33   |
| Rehabilitación y entrenamiento                                 | 3  | 7.89   | S20, S23, S30   |
| Otros  | 3  | 7.89   | S22, S27, S29   |
| <b>EC2. Herramientas</b>                                       |    |        |   |
| Casco / Electrodo  | 24 | 63,2   | S01, S03, S06, S07, S09, S10, S11, S14, S16, S18, S20, S22, S23, S24, S26, S27, S28, S29, S31, S32, S33, S34, S37, S38                          |
| Software de procesamiento                                      | 20 | 52,63  | S02, S04, S05, S06, S07, S08, S11, S12, S13, S15, S17, S18, S19, S20, S22, S24, S29, S31, S33, S36  |
| Otros  | 4  | 10,53  | S21, S25, S30, S35  |
| <b>EC3. Usuarios</b>   |    |        |   |
| Usuarios con discapacidad                                      | 14 | 36,84  | S10, S16, S17, S20, S21, S22, S24, S26, S28, S33, S35, S36, S37, S38  |
| Usuarios Sanos   | 25 | 65,79  | S01, S02, S05, S06, S07, S08, S09, S10, S11, S12, S13, S14, S15, S18, S19, S21, S24, S25, S27, S28, S30, S31, S33, S35, S38                     |
| Usuarios en general  | 6  | 15,79  | S03, S04, S23, S29, S32, S34  |
| <b>EC4. Alcance de la investigación</b>                        |    |        |   |
| Orientación académica  | 28 | 73,68  | S01, S02, S03, S04, S05, S06, S08, S09, S10, S11, S12, S13, S14, S15, S16, S17, S18, S19, S20, S22, S24, S25, S26, S32, S33, S34, S36, S38      |
| Orientación Industrial   | 10 | 26,30  | S07, S21, S23, S27, S28, S29, S30, S31, S35, S37  |
| <b>EC5. Etapas de una estructura BCI</b>                       |    |        |   |
| Adquisición de señales   | 26 | 68, 42 | S01, S02, S03, S04, S05, S06, S07, S08, S09, S12, S13, S14, S15, S18, S22, S24, S25, S27, S28, S29, S30, S31, S32, S33, S36, S38                |
| Procesamiento de señales                                       | 29 | 76,32  | S01, S02, S04, S05, S06, S07, S08, S09, S11, S12, S13, S14, S15, S16, S17, S18, S19, S22, S23, S24, S26, S27, S30, S31, S33, S34, S35, S37, S38 |
| Aplicación – Interacción con el usuario                        | 15 | 39, 47 | S03, S09, S10, S11, S16, S17, S21, S24, S25, S26, S30, S31, S35, S36, S37   |
| Retroalimentación  | 9  | 23,68  | S10, S19, S20, S26, S28, S30, S31,  |

S33, S37

| EC6. Técnicas aplicadas                           |    |        |   |
|---|----|--------|---|
| Tarea en particular                               | 13 | 34,21  | S02, S03, S04, S08, S09, S10, S12, S13, S14, S15, S19, S24, S27   |
| Imágenes motoras - Sistema perceptivo motor       | 23 | 60, 53 | S01, S02, S03, S04, S05, S06, S07, S08, S09, S11, S13, S15, S16, S17, S18, S20, S22, S26, S28, S30, S31, S32, S38                     |
| Metodologías de imágenes cerebrales – Neuroimagen | 17 | 44,74  | S06, S07, S11, S18, S23, S24, S26, S27, S28, S29, S30, S33, S34, S35, S36, S37, S38   |
| Potenciales P300                                  | 9  | 23,68  | S01, S14, S16, S17, S21, S26, S28, S33, S35   |
| Ninguno   | 1  | 2,63   | S25   |
| EC7. Características de calidad de uso            |    |        |   |
| Eficacia  | 11 | 28,95  | S01, S04, S05, S06, S07, S11, S12, S14, S16, S26, S29   |
| Eficiencia  | 20 | 52,63  | S01, S02, S03, S04, S05, S06, S07, S08, S09, S10, S11, S12, S15, S17, S18, S19, S22, S28, S30, S36                                    |
| Satisfacción                                      | 17 | 44,74  | S01, S02, S03, S04, S05, S07, S08, S09, S10, S14, S15, S17, S18, S19, S21, S36, S37   |
| Seguridad   | 1  | 2,63   | S21   |
| Usabilidad  | 18 | 47,37  | S02, S03, S04, S10, S12, S13, S14, S15, S16, S17, S18, S19, S20, S23, S24, S27, S32, S36  |
| Ninguno   | 6  | 15,79  | S25, S31, S33, S34, S35, S38  |
| EC8. Características de calidad de producto       |    |        |   |
| Útil  | 27 | 71,05  | S01, S03, S04, S05, S06, S07, S08, S09, S10, S12, S13, S14, S15, S16, S17, S18, S20, S22, S24, S26, S27, S28, S30, S32M S33, S36, S37 |
| Deseable  | 8  | 21,05  | S01, S05, S06, S07, S21, S23, S35, S38  |
| Aceptable   | 5  | 13,16  | S02, S13, S16, S29, S31   |
| Ninguno   | 4  | 10, 53 | S11, S19, S25, S34  |
| EC9. Fase de estudio                              |    |        |   |
| Análisis  | 24 | 63,16  | S01, S02, S03, S04, S05, S08, S11, S12, S13, S14, S15, S16, S17, S19, S20, S21, S22, S23, S24, S25, S29, S32, S34, S38                |
| Diseño  | 20 | 52,63  | S01, S02, S03, S04, S05, S06, S07, S08, S09, S10, S11, S12, S13, S14, S15, S16, S17, S18, S22, S37                                    |
| Implementación                                    | 19 | 50,00  | S03, S05, S06, S07, S09, S10, S13, S14, S16, S26, S27, S28, S30, S31, S32, S33, S35, S36, S37   |
| Prueba  | 11 | 28,95  | S03, S05, S07, S09, S10, S18, S19, S22, S26, S27, S28   |
| EC10. Tipo de validación                          |    |        |   |
| Encuesta  | 13 | 34,21  | S01, S03, S04, S05, S06, S07, S08, S09, S11, S13, S14, S18, S19   |
| Cuasiexperimento                                  | 6  | 15,79  | S03, S04, S08, S11, S13, S16  |
| Experimento                                       | 25 | 65,79  | S02, S05, S06, S07, S09, S10, S12, S14, S15, S17, S18, S19, S20, S23, S25, S26, S27, S28, S30, S31, S32, S33, S35, S36, S37           |
| Prototipo   | 1  | 2,63   | S07   |
| Prueba de conceptos                               | 2  | 5,26   | S24, S28  |
| Caso de estudio                                   | 2  | 5,26   | S01, S03  |
| Otros   | 5  | 13,16  | S21, S22, S29, S34, S38   |

| EC11. Tipo de estudio          |    |       |  |
|--------------------------------|----|-------|--|
| Estudio Nuevo                  | 30 | 78,95 | S01, S02, S03, S04, S05, S07, S08, S09, S11, S12, S13, S14, S15, S16, S17, S19, S21, S22, S23, S24, S25, S28, S29, S30, S32, S33, S34, S35, S37, S38 |
| Extensión de un estudio previo | 8  | 21,05 | S06, S10, S18, S20, S26, S27, S31, S36   |

## Anexo B: Modelo de Calidad

### B1: Parte 1 Usabilidad

| MODELO DE CALIDAD PARA SISTEMAS BCI BASADO EN LA ISO 9250 |                       |  |  |   |   |   |  |
|---|-----------------------|--|--|---|---|---|--|
| Característica  | Sub-característica    | Sub-sub-característica                                       | Atributo   | Métrica   | Fórmula   | Cómo  |  |
| Usabilidad  | Inteligibilidad       | Legibilidad Visual   | Tamaño de elementos  | Relación del número de elementos con tamaño percibido (Nt) entre el número total de elementos (N) dentro de la interfaz del sistema BCI             | $valor = \frac{Nt}{N}$  | Problema de usabilidad es:<br>- Mayor si 0<= valor < 0.40<br>- Medio si 0.40<= valor < 0.75<br>- Menor si 0.75<= valor < 1<br>- Ninguno si 1  |  |
|   |                       |  | Visualización completa de los elementos  | Nivel de satisfacción visual sobre los elementos del sistema BCI  |   | Empleando la escala de Likert con límites del 1 al 5, donde 1 representa un bajo nivel de satisfacción y 5 representa un alto nivel de satisfacción. El problema de usabilidad puede ser:<br>- No satisfecho 1<br>- Moderadamente satisfecho 2<br>- Muy satisfecho 3<br>- Extremadamente satisfecho 4<br>- Extremadamente satisfecho 5                                |  |
|   |                       | Compensación   | Facilidad de comprensión de interfaz   | Relación entre el número de elementos de elementos comprendidos (Nc) por el usuario y el número total de elementos (N) existentes en el sistema BCI | $valor = \frac{Nc}{N}$  | Menor el problema de usabilidad.<br>- Mayor si 0<= Valor < 0.40<br>- Medio si 0.40<= Valor < 0.75<br>- Menor si 0.75<= Valor < 1<br>- Cuando el valor de la relación está más cerca de 1, es mucho mejor.   |  |
|   |                       |  | Nivel de entrenamiento   | Nivel de entrenamiento que se requiere para que los usuarios puedan aprender el manejo del sistema BCI  |   | Empleando la escala de Likert con límites del 1 al 3, donde 1 representa un nivel de entrenamiento y 3 bajo nivel de entrenamiento. El problema de usabilidad puede ser:<br>- Poco satisfactorio 1<br>- Regular tiempo de entrenamiento 2<br>- Poca tiempo de entrenamiento 3   |  |
|   | Aprendizaje           | Ayuda  | Efectividad de la documentación  | Necesidad de utilizar la documentación para el uso del sistema BCI  |   | Esta métrica se analiza según las siguientes opciones:<br>- SI: Es necesario utilizar la documentación para utilizar el sistema BCI<br>- ND: No es necesario utilizar la documentación para utilizar el sistema BCI   |  |
|   |                       |  | Guía de actividades  | Nivel de retroalimentación hasta el usuario de las acciones que se pueden o se están llevando a cabo en el sistema BCI                              |   | Empleando una escala de Likert con límites del 1 al 5, donde 1 representa bajo nivel de retroalimentación y 5 representa alto nivel de retroalimentación. El problema de usabilidad puede ser:<br>- Totalmente en desacuerdo si es 1<br>- En desacuerdo si es 2<br>- Neutro si es 3<br>- De acuerdo si es 4<br>- Totalmente de acuerdo si es 5                        |  |
|   |                       | Previsibilidad   | Previsibilidad de las acciones   | Relación entre el número de elementos con acciones previsible (Ea) y el número total (Et) de elementos del sistema BCI                              | $valor = \frac{Ea}{Et}$   | Problema de usabilidad es:<br>- Mayor si 0<= valor < 0.40<br>- Medio si 0.40<= valor < 0.75<br>- Menor si 0.75<= valor < 1<br>- Ninguno si 1  |  |
|   |                       |  | Determinación de posibles acciones permitidas  | Relación entre el número total de acciones permitidas (Ap) en una sección del sistema BCI y el número total (At) de acciones disponibles            | $valor = \frac{Ap}{At}$   | Problema de usabilidad es:<br>- Mayor si 0<= valor < 0.40<br>- Medio si 0.40<= valor < 0.75<br>- Menor si 0.75<= valor < 1<br>- Ninguno si 1  |  |
|   | Adaptabilidad         | Frecuencia de uso  | Frecuencia de uso  | Frecuencia con la que el sistema BCI será utilizado por el usuario  |   | Empleando una escala de Likert con límites del 1 al 5, donde 1 representa una frecuencia baja del uso del sistema BCI y 5 representa una frecuencia alta de usar el sistema BCI. El problema de usabilidad puede ser:<br>- Totalmente en desacuerdo si es 1<br>- En desacuerdo si es 2<br>- Neutro si es 3<br>- De acuerdo si es 4<br>- Totalmente de acuerdo si es 5 |  |
|   |                       |  |  | Instalación y preparación   | Tiempo de instalación y preparación   | Nivel de instalación del sistema BCI para su utilización  | Empleando una escala de Likert con límites del 1 al 3, donde 1 representa una rápida instalación del sistema BCI y 3 representa una demorada instalación del sistema BCI. El problema de usabilidad puede ser:<br>- Menor si es 1<br>- Medio si es 2<br>- Mayor si es 3  |
|   |                       |  |  | Comodidad   |   | Nivel de comodidad que sintió el usuario al utilizar el sistema BCI   | Empleando una escala de Likert con límites del 1 al 5, donde 1 representa una incomodidad muy alta del usuario al momento de utilizar el sistema BCI y 5 representa una comodidad alta al momento de utilizar el sistema BCI. El problema de usabilidad puede ser:<br>- Demasiado incómodo si es 1<br>- Incómodo si es 2<br>- Neutro si es 3<br>- Comodo si es 4<br>- Muy comodo si es 5 |
|   |                       |  |  | Satisfacción  |   | Nivel de satisfacción al utilizar el sistema BCI  | Empleando una escala de Likert con límites del 1 al 3, donde 1 representa un nivel bajo de satisfacción sobre el sistema BCI y 3 representa un nivel alto de satisfacción sobre el sistema BCI. El problema de usabilidad puede ser:<br>- Baja si es 1<br>- Medio si es 2<br>- Alta si es 3  |
| Manejabilidad   |                       | Complejidad  | Complejidad  | Nivel de complejidad del sistema BCI percibido por parte del usuario  |   | Empleando una escala de Likert con límites del 1 al 5, donde 1 representa un nivel bajo de complejidad y 5 representa un nivel alto de complejidad. El problema de usabilidad puede ser:<br>- Totalmente en desacuerdo si es 1<br>- En desacuerdo si es 2<br>- Neutro si es 3<br>- De acuerdo si es 4<br>- Totalmente de acuerdo si es 5                              |  |
|   |                       |  |  | Madurez   | Relación del número acciones realizadas con errores (Ae) y el número de acciones realizadas en total (At)   | $valor = \frac{Ae}{At}$   | Problema de usabilidad es:<br>- Mayor si 0.75<= valor <= 1<br>- Medio si 0.35<= valor <= 0.70<br>- Menor si 0<= valor <= 0.35<br>- Ninguno si es 0<br>- El valor más cercano a 0 es el mejor.  |
|   |                       |  |  |   | Confiablez  | El grado en que un programa satisface sus especificaciones y cumple los objetivos de la misión encomendada por el usuario.  |  |
|   |                       |  |  | Confiablez  | Fidelidad   | Fidelidad   | Relación entre la precisión y el tiempo requerido  |
| Portabilidad  | Autonomía             | Nivel de la autonomía del usuario al utilizar el sistema BCI | Empleando la escala de Likert con límites del 1 al 3, donde 1 representa una autonomía baja al usar el sistema BCI y 3 alto nivel de autonomía al usar el sistema BCI. El problema de usabilidad puede ser:<br>- Mayor si es 1<br>- Medio si es 2<br>- Menor si es 3 |   |   |   |  |
| Protección contra errores de usuario                      | Prevención de errores | Validación de acciones                                       | Relación entre el número de acciones realizadas con errores (Ae) y el número total de acciones realizadas (At)   | $valor = \frac{Ae}{At}$   | Problema de usabilidad es:<br>- Mayor si 0.75<= valor <= 1<br>- Medio si 0.35<= valor <= 0.70<br>- Menor si 0<= valor <= 0.35<br>- Ninguno si es 0<br>- El valor más cercano a 0 es el mejor. |   |  |
|   |                       |  | Errores de movilidad   | Relación entre el número de acciones realizadas con errores (Ae) y el número total de acciones realizadas con movimientos del hardware (At)         | $valor = \frac{Ae}{At}$   | Problema de usabilidad es:<br>- Mayor si 0.75<= valor <= 1<br>- Medio si 0.35<= valor <= 0.70<br>- Menor si 0<= valor <= 0.35<br>- Ninguno si es 0<br>- El valor más cercano a 0 es el mejor.   |  |
|   | Reversibilidad        | Estado previo  | Relación del número total de acciones que permiten restaurar (Ar) y al número total de acciones (At) que permite el sistema BCI  | $valor = \frac{Ar}{At}$   | Problema de usabilidad es:<br>- Mayor si 0.40<= valor < 0.75<br>- Menor si 0.75<= valor < 1<br>- Ninguno si 1   |   |  |
| Estética  | Proporcionalidad      | Relación de tamaño entre los elementos y la pantalla         | Relación de tamaño entre los elementos y la pantalla   | Relación proporcional entre el área que ocupa un elemento en la pantalla del sistema BCI y el área total de la pantalla del sistema BCI             |   | Esta métrica se analiza según las siguientes opciones:<br>- SI: El tamaño de los componentes es proporcional al tamaño de la pantalla del sistema BCI<br>- ND: El tamaño de los componentes no es proporcional al tamaño de la pantalla del sistema BCI   |  |
|   |                       |  | Organización de los elementos  | Nivel de identificabilidad y accesibilidad a los diversos elementos del sistema BCI de una forma organizada   |   | Empleando la escala de Likert con límites del 1 al 3, donde 1 representa bajo nivel de identificabilidad y accesibilidad y 3 alto nivel de identificabilidad y accesibilidad. El problema de usabilidad puede ser:<br>- Mayor si es 1<br>- Medio si es 2<br>- Menor si es 3   |  |
|   | Consistencia Visual   | Calidad Multimedia   | Calidad Multimedia   | Nivel de calidad percibida por el usuario con respecto a los elementos multimedia presentes en el sistema BCI                                       |   | Empleando la escala de Likert con límites del 1 al 3, donde 1 representa bajo nivel de calidad multimedia presente en el sistema BCI y 3 alto nivel de calidad multimedia presente en el sistema BCI. El problema de usabilidad puede ser:<br>- Mayor si es 1<br>- Medio si es 2<br>- Menor si es 3   |  |
|   |                       |  |  | Distribución de los elementos en la interfaz gráfica  | Relación de la disposición de los elementos en la pantalla (Eg) con el número total de elementos (Et) del sistema BCI   | $valor = \frac{Eg}{Et}$   | Problema de usabilidad es:<br>- Mayor si 0<= valor < 0.40<br>- Medio si 0.40<= valor < 0.75<br>- Menor si 0.75<= valor < 1<br>- Ninguno si 1   |

## B2: Parte 2 Experiencia de usuario

| MODELO PARA EVALUAR LA EXPERIENCIA DE USUARIO PARA SISTEMAS BCI - BASADO EN LA ISO 9241-210 |                    |                        |                                  |              |   |         |  |
|---|--------------------|------------------------|----------------------------------|--------------|---|---------|--|
| Característica  | Sub-característica | Sub-sub-característica | Atributo                         | Sub-atributo | Métrica   | Fórmula | Cómo   |
| Experiencia de usuario  | Autonomía          |                        | Tiempo de colocación             |              | Tiempo que se demora el usuario en colocarse las herramientas necesarias para utilizar el sistema BCI |         | Empleando una escala de Likert con límites del 1 al 3, donde 1 es un alto tiempo de colocación y 3 un bajo tiempo de colocación de las herramientas del sistema BCI según la percepción del usuario, el problema de usabilidad puede ser:<br>- Alto si es 1<br>- Medio si es 2<br>- Bajo si es 3   |
|   |                    |                        | Asistencia                       |              | Evalúa si el usuario necesita ayuda de otra persona para colocarse las herramientas                   |         | Esta métrica se evalúa según las siguientes opciones:<br>¿Es necesaria la ayuda de otro usuario para colocarse las herramientas del sistema BCI?<br>a) Si<br>b) No   |
|   | Satisfacción       | Ergonomía              | Comodidad al usar el sistema BCI |              | Evalúa si el usuario se sintió cómodo o no al momento de utilizar el sistema BCI                      |         | Empleando una escala de Likert con límites del 1 al 5, donde 1 representa una incomodidad muy alta del usuario al momento de utilizar el sistema BCI y 5 representa una comodidad alta al momento de utilizar el sistema BCI. El problema de usabilidad puede ser:<br>- Demasiado incómodo si es 1<br>- Incómodo si es 2<br>- Neutro si es 3<br>- Comodo si es 4<br>- Muy comodo si es 5 |
|   |                    |                        | Tiempo de uso                    |              | Tiempo que el usuario puede utilizar el sistema sin sentir incomodidad.                               |         | Esta métrica se evalúa según las siguientes opciones:<br>Del tiempo total utilizando el sistema ¿Cuánto tiempo se sintió comodo utilizando el sistema BCI?   |
|   |                    |                        | Ajustable                        |              | Nivel de regulación del sistema BCI a nivel de hardware para adaptarse a las necesidades del usuario. |         | Empleando la escala de Likert con límites del 1 al 3, donde 1 No regulable y 3 Regulable. El problema puede ser:<br>- Alto si es 1<br>- Medio si es 2<br>- Bajo si es 3  |

## B3: Parte 3 Interfaz gráfica

| MODELO PARA EVALUAR LA ACCESIBILIDAD DE LAS INTERFACES DE USUARIO PARA SISTEMAS BCI - BASADO EN LA WEB CONTENT ACCESSIBILITY GUIDELINES (WCAG) 2.1 |                    |                        |   |              |   |                                  |  |
|--|--------------------|------------------------|---|--------------|---|----------------------------------|--|
| Característica   | Sub-característica | Sub-sub-característica | Atributo                                | Sub-atributo | Métrica   | Fórmula                          | Cómo   |
| Accesibilidad  | Perceptibilidad    | Distinguible           | Color de elementos                      |              | Nivel de aceptación y apreciación sobre el uso de colores empleados en la interfaz del sistema BCI                              |                                  | Empleando una escala de Likert con límites del 1 al 5, donde 1 representa una incomodidad muy alta del usuario al momento de utilizar el sistema BCI y 5 representa una comodidad alta al momento de utilizar el sistema BCI. El problema de accesibilidad puede ser:<br>- Pesimo si es 1<br>- Malo si es 2<br>- Regular si es 3<br>- Bueno si es 4<br>- Excelente si es 5 |
|  |                    |                        | Tamaño de elementos                     |              | Relación del número de elementos con tamaño apropiado entre el número total de elementos dentro del sistema BCI                 | $\text{valor} = \frac{N_e}{N_t}$ | Problema de accesibilidad es:<br>Mayor si 0<= valor < 0.40<br>Medio si 0.40<= valor < 0.75<br>Menor si 0.75<= valor < 1<br>ninguno si 1  |
|  |                    |                        | Visualización completa de los elementos |              | Nivel de satisfacción visual sobre los elementos del sistema BCI  |                                  | Empleando la escala de Likert con límites del 1 al 3, donde 1 representa un bajo nivel de satisfacción y 3 representa un alto nivel de satisfacción. El problema de accesibilidad puede ser:<br>- Mayor si es 1<br>- Medio si es 2<br>- Menor si es 3  |
|  | Comprensibilidad   | Previsible             | Popularidad de los elementos            |              | Relación entre el número total de elementos conocidos por el usuario y el número total de elementos presentes en el sistema BCI | $\text{valor} = \frac{N_e}{N_t}$ | Niveles del problema de accesibilidad:<br>Mayor si 0<= Valor < 0.40<br>Medio si 0.40<= Valor < 0.75<br>Menor si 0.75<= Valor < 1<br>Cuando el valor de la relación está más cerca de 1, es mucho mejor.  |
|  |                    |                        | Comprensión de la información textual.  |              | Nivel de comprensión de la información textual existente en el sistema BCI  |                                  | Utilizando la escala Likert con límites del 1 al 3, donde 1 representa información textual no comprensible y 3 completamente comprensible. El problema de accesibilidad puede ser:<br>- Mayor si es 1<br>- Medio si es 2<br>- Menor si es 3  |



## Anexo C: Sistema RaceBCI

### C1: Código del Sistema RaceBCI

```
#UNIVERSIDAD DE CUENCA
#FACULTAD DE INGENIERIA - ESCUELA DE SISTEMAS
#SISTEMA BASADO EN BRAIN COMPUTER INTERFACE
#AUTORES: COBOS JUAN - MOREIRA CHRISTIAN
#Importacion de las librerias
from pyOpenBCI import OpenBCICyton
from scipy import signal
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
import statistics as stats
import serial
import time
```

```
#Definimos la frecuencia de registro de cyton
fs=200
chunk_lenght = 500 #Longitud de la muestra
datos=[]
ciclos=0
lista=[]

bandera=0
Umbral_maximo=0
Umbral_minimo=0
contador=0
umbral1=0
umbral2=0
```

```
#Funcion para el paso de banda start=limite inferior de la banda y stop=limite superior de la frecuencia de la banda
def bandpass(start, stop, data, fs):
    bp_Hz = np.array([start, stop])
    b, a = signal.butter(5, bp_Hz / (fs / 2.0), btype='bandpass') #Se aplica un filtro analogico empleando signal
    return signal.lfilter(b, a, data, axis=0)

#funcion para el corte
def notch(val, data, fs):
    bp_stop_Hz = [float(val)] + 3.0 * np.array([-1, 1])
    b, a = signal.butter(3, bp_stop_Hz / (fs / 2.0), 'bandstop') #Se aplica un filtro analogico empleando signal
    fin = signal.lfilter(b, a, data)
    return fin

#Funcion para la transformada
def fft(data, fs):
    L = len(data)
    freq = np.linspace(0.0, 1.0 / (2.0 * fs **-1), int(L / 2))
    yi = np.fft.fft(data)#[1:]
    y = yi[range(int(L / 2))]
    return freq, abs(y)

#Funcion para separar datos
def split(channel_data, chunk_len, fs):
    chunks = len(channel_data) // chunk_len
    if chunks == 0:
        chunks = 1
    data = np.array_split(channel_data, chunks)
    return data
```

# UCUENCA

```
#funcion para la transformada de todo los datos
def transformada(data_filt):
    global ciclos
    global bandera
    ffts = []
    fft_freq=[]
    fft_vals=[]
    splited = split(data_filt,chunk_lenght, fs)#split data into chunks
    for dat in splited:
        ffts.append(fft(dat,fs))#analyze frequency of each chunk
        fft_freq=fft(dat,fs)[0]
        fft_vals=fft(dat,fs)[1]

    eeg_bands = {'Delta': (0, 4),
                 'Theta': (4, 8),
                 'Alpha': (8, 12),
                 'Beta': (12, 30),
                 'Gamma': (30, 45)}

    eeg_band_fft = dict()
    for band in eeg_bands:
        freq_ix = np.where((fft_freq >= eeg_bands[band][0]) & (fft_freq <= eeg_bands[band][1]))[0]
        eeg_band_fft[band] = np.mean(fft_vals[freq_ix])

    df1mc0 = pd.DataFrame(columns=['band', 'val'])
    df1mc0['band'] = eeg_bands.keys()
    df1mc0['val'] = [eeg_band_fft[band] for band in eeg_bands]

    val=[]
    val.append(df1mc0['val'][0])
    val.append(df1mc0['val'][1])
    val.append(df1mc0['val'][2])
    val.append(df1mc0['val'][3])
    val.append(df1mc0['val'][4])

    datos.append(val)
    ciclos=ciclos+1

    df=pd.DataFrame(datos, columns=['Delta','Theta','Alpha','Beta','Gamma'])
    #df.to_csv("datos")

    if (bandera==0):
        definir_umbrales(df1mc0['val'][4])
    else:
        env_arduino(df1mc0['val'][4])

    #print(df1mc0)
```

```
def definir_umbralles(valor):  
    global contador  
    global Umbral_maximo  
    global Umbral_minimo  
    global umbral1  
    global umbral2  
    global bandera  
    global lista  
  
    if (contador < 20):  
        lista.append(valor)  
        contador=contador+1  
    else:  
        mat = np.array(lista)  
        q3, q1 = np.percentile(mat,[75,25])  
        iqr = q3 - q1  
        valor1=q1-(1.5*iqr)  
        valor2=q3+(1.5*iqr)  
  
        maximo=0  
        minimo=100000000000000000000  
  
        for i in mat:  
            if i<valor1 or i>valor2:  
                print("Eliminado")  
            else:  
                if i>maximo: maximo=i  
                elif i<minimo: minimo=i
```

```
diferencia=maximo-minimo  
pmedio= (minimo+maximo)/2  
umbral1=pmedio-(diferencia*0.1)  
umbral2=pmedio+(diferencia*0.1)  
  
print("Minimo:")  
print(minimo)  
print("Maximo:")  
print(maximo)  
print("Umbral1:")  
print(umbral1)  
print("Umbral2:")  
print(umbral2)  
bandera=1
```

```
#Funcion para enviar la orden al arduino en base al valor obtenido del casco  
  
def env_arduino(valor):  
    print("-----")  
    print(valor)  
  
    arduino = serial.Serial("COM4", 9600)  
  
    if valor<=umbral1:  
        time.sleep(2)  
        print("Desacelera")  
        arduino.write(b'3')  
    elif valor >= umbral2:  
        time.sleep(2)  
        print("Acelera")  
        arduino.write(b'1')  
    else:  
        time.sleep(2)  
        arduino.write(b'3')  
  
    arduino.close()
```

```
#Funcion para vaciar el vector que contiene los valores en el buffer
def vaciar():
    global c1
    c1=[]

#Funcion la que recibe los valores del canal
def graficar_datos(channel):
    time = np.linspace(0, len(channel)/fs, len(channel))

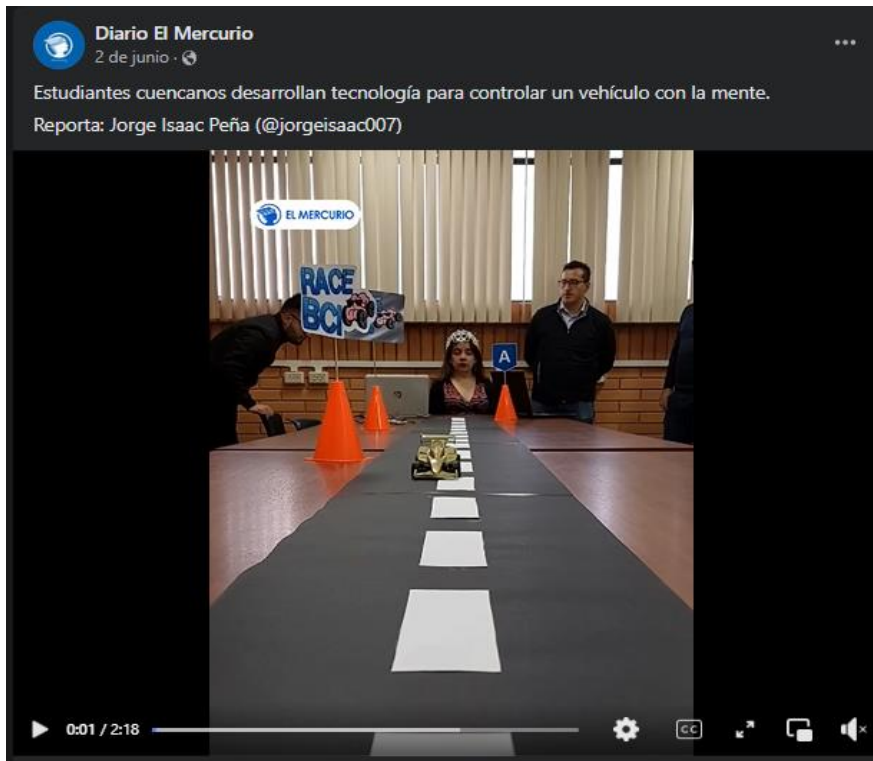
    notch_val = 50 #Valor para el corte
    band = (15,32) #bandas de onda alpha estan entre 7 y 13
    data_filt_band = bandpass(band[0], band[1], channel, fs) #paso de banda aplicado en datos brutos
    data_filt_notch = notch(notch_val, channel, fs) #corte aplicada en datos brutos
    data_filt = notch(notch_val,data_filt_band, fs) #datos filtrados
    transformada(data_filt)#Pasamos los datos filtrados a la funcion para obtener su transformada

#Funcion que obtiene o imprime los valores de los canales del casco
def print_raw(sample):
    #Condicional que cada 1000 datos mande a graficar y a vaciar los vectores del buffer
    #Obtencion del promedio de los valores de todos los canales.
    valores = [sample.channels_data[0],sample.channels_data[1],sample.channels_data[2],sample.channels_data[3],sample.channels_data[4],sample.cha
    valor_promedio= stats.mean(valores)
    if len(c1)%800 == 0 and len(c1)>0:
        graficar_datos(c1)
        vaciar()
        c1.append(valor_promedio)
        #c1.append(sample.channels_data[0]/10000) #Si los valores obtenidos son microvolitos dividimos para 10000
    else:
        c1.append(valor_promedio)
        #c1.append(sample.channels_data[0]/10000)

#Arreglos para almacenar todos los valores de los canales
c1=[]

#Ejecucion de la funcion de OpenBCI para obtencion de las senales
board = OpenBCICyton(daisy=False)
board.start_stream(print_raw)
```

## C2. Presentaciones del sistema RaceBCI



Link: <https://www.facebook.com/elmercurioec/videos/569290358137147>



Link: <https://www.facebook.com/ucuenca/videos/561425848659688>



Link: <https://www.facebook.com/LavozdelAustro/photos/a.125675079261976/533384668491013/>



Link:

[https://www.telerama.ec/estaestucasa?v=9FDrlj&fbclid=IwAR1jt90pzTCUkizGq\\_rgN4weA42ylivAGqRxt\\_hyWjjaPim4LWISD0TES60](https://www.telerama.ec/estaestucasa?v=9FDrlj&fbclid=IwAR1jt90pzTCUkizGq_rgN4weA42ylivAGqRxt_hyWjjaPim4LWISD0TES60)



## Anexo D: Cuasiexperimento dirigido a Ingenieros de Software

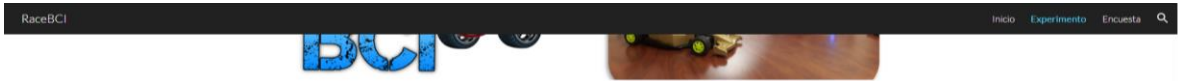
### D1. Página web del cuasiexperimento





## Ejecución de la Aplicación

En esta sección encontrará el ejercicio de experimentación con el nombre de "Plantilla de Experimento", el cual debe realizar considerando las explicaciones anteriormente brindadas, dicho documento contiene los pasos y guías, en los cuales debe registrar su hora de inicio y hora fin para cada una de las tareas que debe ser realizadas.



Anexo 6 - Video Informativo



|   |  |   |
|---|--|---|
| <p>Guía del Experimento</p> <p>Descargar</p>                    | <p>Anexo 1 - Descripción Método BCIS-QUAM</p> <p>Descargar</p> | <p>Anexo 2 - Modelo de calidad</p> <p>Descargar</p> |
| <p>Anexo 3 - Descripción del Casco OPENBCI</p> <p>Descargar</p> | <p>Anexo 4 - Sistema RaceBCI</p> <p>Descargar</p>              | <p>Anexo 5 - Perfil de usuario</p> <p>Descargar</p> |

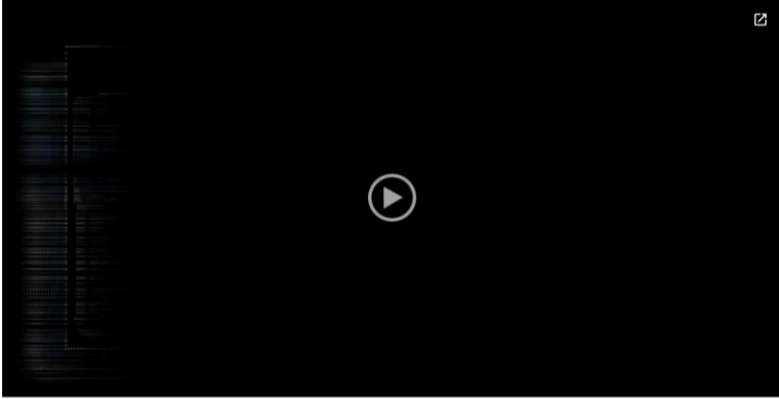


RaceBCI Inicio Experimento Encuesta

Anexo 3 - Descripción del Casco OPENBCI Descargar

Anexo 4 - Sistema RaceBCI Descargar

Anexo 5 - Perfil de usuario Descargar



Anexo 7 - Usuario utilizando RaceBCI

⊙

## D2. Guía de la metodología presentada en el cuasiexperimento

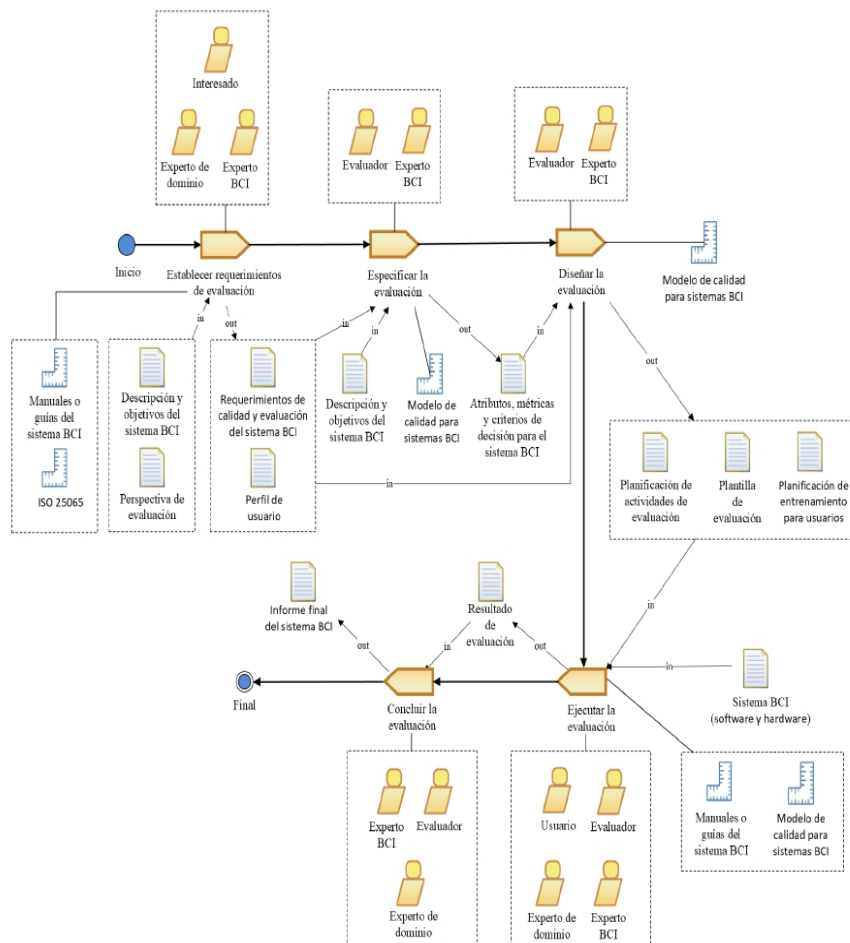
### ANEXO 1 – MÉTODO BCIS-QUAM

Brain Computer Interface o Interfaz Cerebro Computador, es un sistema de comunicación que monitoriza la actividad cerebral y traduce determinadas características que corresponden a las intenciones del usuario, esta traducción es enviada a un determinado dispositivo para realizar la acción deseada por el usuario.

BCIS-QUAM es un método de evaluación que tiene como objetivo evaluar la calidad de uso y producto y la experiencia de usuario en cualquier sistema BCI, independientemente de su finalidad o herramientas de uso. Esta metodología está alineada con el estándar ISO/IEC 25040, que propone un proceso de referencia para la evaluación de productos de software.

#### Método Propuesto

En la Figura 1 se muestra en detalle las fases, roles, guías y artefactos que forman parte de la metodología propuesta denominada BCIS-QUAM



1. Las fases que forman parte del método son: Establecer los requerimientos de evaluación, Especificar la evaluación, Diseñar la evaluación, Ejecutar la evaluación y Concluir la evaluación.

2. Los roles que intervienen en el método se describen en la tabla 1-

Tabla 1: Roles que intervienen en el método BCIS-QUAM

| Rol                     | Descripción   | Función  |
|-------------------------|---|--|
| Interesado              | Entidad que está interesada en realizar la evaluación del sistema seleccionado. | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Indica el sistema BCI a evaluar.</li> <li>• Aclara el objetivo de la evaluación.</li> <li>• Determina los objetivos de la evaluación.</li> </ul>  |
| Experto de dominio      | Persona que tiene conocimiento del dominio aplicado en el sistema BCI           | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ayuda en la especificación de requerimientos</li> <li>• Soporte en la ejecución de la evaluación</li> <li>• Ayuda en el análisis y conclusión de la evaluación</li> </ul>   |
| Experto en sistemas BCI | Persona que posee un nivel alto de conocimientos en el área BCI                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ayuda en la especificación de requerimientos</li> <li>• Ayuda en la especificación de la evaluación</li> <li>• Ayuda en el diseño de la evaluación</li> <li>• Ayuda en el análisis y conclusión de la evaluación</li> </ul> |
| Evaluador               | Persona que se encarga de ejecutar las actividades definidas en la evaluación   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ayuda en la especificación de la evaluación</li> <li>• Ayuda en el diseño de la evaluación</li> <li>• Ayuda en la ejecución de la evaluación</li> <li>• Ayuda en el análisis y conclusión de la evaluación</li> </ul>       |
| Usuario                 | Persona que utiliza el sistema BCI utilizado en la evaluación                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Interviene en la ejecución de la evaluación</li> </ul>  |

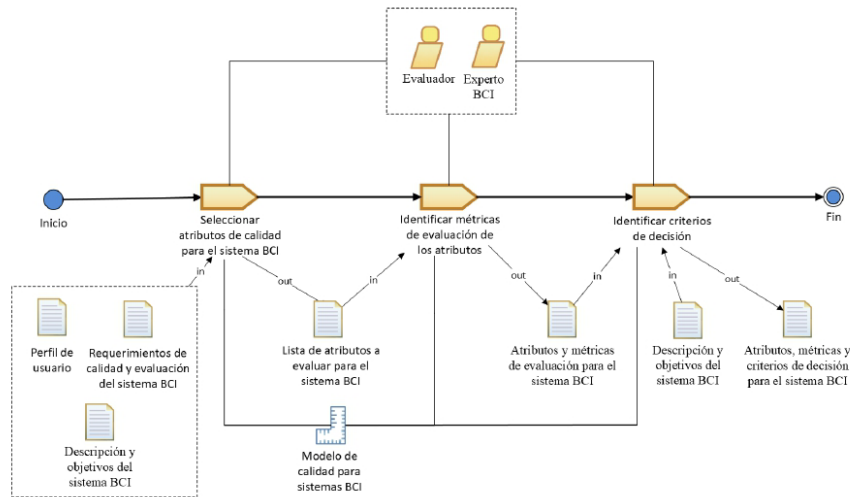
A continuación, se explicará brevemente cada una de las etapas que intervienen en el método BCIS-QUAM

- **Establecer requerimientos de evaluación**

En la primera fase del método interviene la entidad interesada en la evaluación, el experto en sistemas BCI y el experto en dominio, ellos son los encargados de elaborar un documento de requerimientos de evaluación e identifican el perfil del usuario que utilizara el sistema, para ello se realizan las siguientes actividades: i) Identificar elementos, características y restricciones del sistema BCI, ii) Establecer objetivos de evaluación, iii) Establecer requisitos no funcionales, iv) Definir las partes a evaluar y v) Definir el perfil de usuario. En esta fase se utilizan los manuales o guías del sistema BCI, la ISO/IEC 25065, la cual brinda pautas para la definición de

requisitos de evaluación de calidad del producto de software y el modelo de calidad para sistemas BCI descrito en el Anexo 2.

- **Especificar la evaluación**



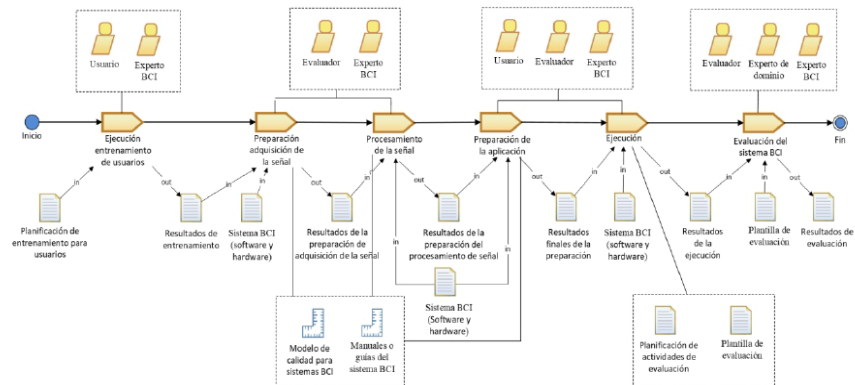
En la segunda fase del método BCIS-QUAM, el evaluador y experto en sistemas BCI se encargan de generar un documento que contenga los atributos, métricas y criterios de decisión que se van a utilizar para evaluar el sistema BCI, para ello realizan las siguientes actividades:

- 1) **Seleccionar atributos de calidad para el sistema BCI**  
En esta actividad el evaluador y experto en sistemas BCI son los encargados de generar un documento con los atributos que faciliten la evaluación del sistema BCI, para ello se basan en documentos generados en la fase anterior como el perfil de usuario, los requerimientos de calidad y evaluación y la descripción y objetivos del sistema BCI y hacen uso del modelo de calidad (Anexo 2).
- 2) **Identificar métricas de evaluación de los atributos**  
En esta actividad el evaluador y experto de sistemas BCI, son los encargados de identificar las métricas a utilizar para cada atributo seleccionado en la actividad anterior, en esta actividad el usuario tiene la opción de eliminar cualquier atributo que considere innecesario para la evaluación. Para ello utilizan el modelo de calidad y generan una nueva lista de atributos junto a su métrica de evaluación.
- 3) **Identificar criterios de decisión**  
En esta actividad el evaluador y experto en BCI son los encargados de identificar la forma en cómo se va a evaluar el atributo seleccionado y cómo se va a clasificar el resultado que se obtenga de aplicar el cómo. Para ello utilizan la lista generada en la actividad anterior y se genera un documento más completo, con los atributos, métricas y criterios de decisión.

- **Definir la evaluación**

En esta fase el evaluador y experto en sistemas BCI, son los encargados de especificar las actividades que realizará el usuario al utilizar el sistema BCI, además se encargan de elaborar la plantilla de evaluación y elaborar un entrenamiento previo para el usuario. Para ello utilizan el documento generado en la fase anterior, con los atributos, métricas y criterios de decisión, se toma en cuenta el perfil de usuario y la información del sistema BCI. Como resultado de esta fase se tiene la plantilla de evaluación, la lista de actividades a realizar en la evaluación y la planificación de entrenamiento.

- **Ejecutar la evaluación**



En esta fase, se tiene como objetivo, efectuar la evaluación del sistema BCI, para ello el usuario se encarga de ejecutar las actividades planteadas en la fase anterior, mientras que el evaluador y experto en BCI se encargan de dar un valor a los atributos seleccionados en base a cómo el usuario se desenvuelve con el sistema. Para ello se realizan las siguientes actividades:

- 1) Ejecutar entrenamiento de usuario  
En esta actividad el usuario realiza las actividades de la planificación de entrenamiento, esto con el objetivo de que el usuario conozca el sistema y se verifique si es capaz o no de cumplir una determinada tarea, en algunas ocasiones, esta actividad puede ser utilizada para que el sistema se adapte a la actividad mental del usuario.
- 2) Preparación de la adquisición de la señal  
En esta actividad el evaluador y experto en BCI son los encargados de verificar que el sistema BCI reciba correctamente las señales cerebrales que emite el usuario.
- 3) Verificar el procesamiento de la señal  
En esta actividad, el evaluador y experto en BCI se encargan de revisar que el dispositivo está recibiendo correctamente la orden que se genera al procesar las señales cerebrales del usuario.
- 4) Ejecutar la evaluación  
En esta actividad el usuario se encarga de utilizar el sistema BCI y de ejecutar las actividades planificadas en la fase anterior, mientras que el evaluador y experto en BCI visualizan detenidamente todo el proceso.
- 5) Evaluación del sistema BCI

En esta actividad el evaluador, experto de dominio y experto en sistemas BCI, son los encargados de llenar la plantilla de evaluación, generada en la fase anterior, y generar un documento con estos resultados.

- **Concluir la evaluación**

En esta fase el evaluador y experto en sistemas BCI, son los encargados de generar los resultados finales y la conclusión sobre la evaluación al sistema BCI. Para ello se realizan las siguientes actividades: i) Calcular indicadores, ii) Revisar y analizar los resultados de evaluación y iii) Elaborar el informe. Finalmente el informe es entregado a la entidad interesada de la evaluación.

## D3. Documento del cuasiexperimento

### Brain Computer Interface System Quality Assessment Method (BCIS-QUAM)

En primer lugar, queremos agradecer su participación en el presente ejercicio. Para empezar, por favor complete los datos que se piden a continuación.

|   |  |
|---|--|
| <b>Nombres y Apellidos</b>  |  |
| <b>Por favor, indique si es estudiante universitario, egresado o graduado</b> |  |
| <b>Especialidad (ya sea en curso o culminados)</b>                            |  |

#### Objetivos del método

El método propuesto BCIS-QUAM permite a los ingenieros de calidad de software y a los expertos en sistemas Brain Computer Interface (BCI) evaluar la calidad de producto (usabilidad) y calidad en uso de un sistema BCI; además, este método cuenta con la posibilidad de evaluar la experiencia de usuario, después de utilizar dicho sistema. Brain Computer Interface o Interfaz Cerebro Computador, es una tecnología que monitoriza la actividad cerebral y traduce determinadas características, que corresponden a las señales del sistema nervioso central; estas características son enviadas a un determinado dispositivo para realizar una determinada acción. Esta metodología está alineada con el estándar ISO/IEC 25040 que se relaciona con el proceso de evaluación de la calidad de producto de software, La descripción del método propuesto se encuentra especificada en el *Anexo 1*.

#### Objetivo del ejercicio

Este ejercicio tiene como objetivo evaluar las fases de especificación y ejecución del método de evaluación BCIS-QUAM.

#### Guías y artefactos

A continuación, se describen los documentos adjuntos que serán necesarios a lo largo de la ejecución del experimento.

- Descripción del método BCIS-QUAM (Anexo 1)

Este documento contiene el proceso a realizar en cada una de las cinco etapas planteadas; se han colocado, de manera detallada, los pasos de la tarea correspondiente a la actividad de ejecución de la evaluación; con la finalidad de realizar la evaluación de la calidad de

sistemas BCI; además, se describen los artefactos y guías necesarios para realizar cada una de las tareas especificadas.

- Modelo de calidad para sistemas BCI (Anexo 2)

Este documento contiene una recopilación de las características, atributos y métricas necesarias para evaluar la usabilidad, la experiencia de usuario y la interfaz del sistema BCI. Cabe recalcar que, la interfaz del sistema se puede aplicar en herramientas que tengan dicho elemento.

- Descripción del casco Open BCI (Anexo 3)

Este documento contiene toda la información, características, observaciones y sugerencias que debe tener en cuenta el usuario al momento de utilizar el casco Open BCI.

- Descripción del Sistema BCI a utilizar (Anexo 4)

Este documento contiene la estructura, funcionamiento y diseño del sistema BCI que será utilizado en la experimentación.

- Perfil de usuario (Anexo 5)

Este documento contiene las características que debe cumplir el usuario para utilizar el sistema RaceBCI.

- Video Informativo (Anexo 6)

Este video brinda información sobre el sistema BCI que será empleado en la experimentación de una manera resumida y adecuada para que se adquiera los conocimientos necesarios para la experimentación.

- Video Usuario utilizando el sistema RaceBCI (Anexo 7)

Este video contiene todos los pasos que se desarrollan con el usuario en la fase de ejecución de la evaluación, el mismo servirá como instrumento para que el evaluador pueda rellenar la plantilla entregada.

## Problema planteado

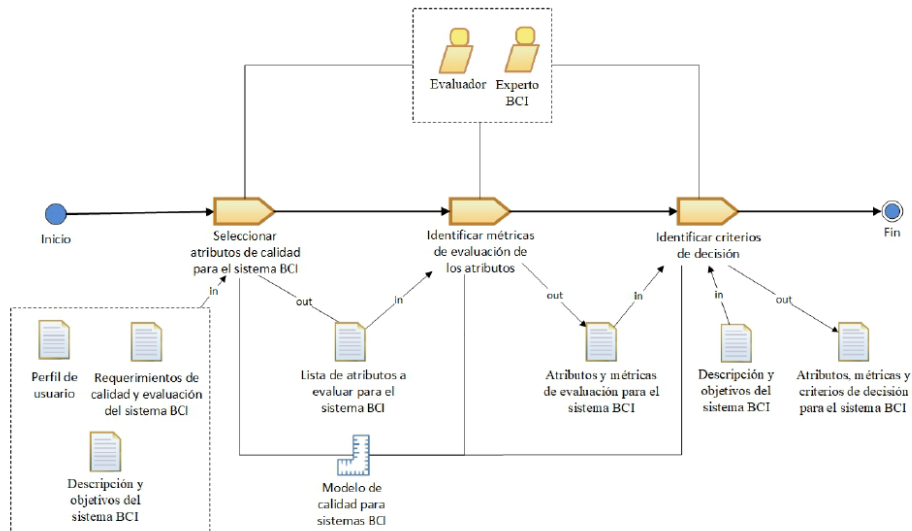
Para la evaluación del método BCIS-QUAM considere el siguiente problema:

Se desea evaluar la calidad de uso y de producto del sistema BCI llamado "RaceBCI". El sistema RaceBCI está orientado a movilizar un carro a control remoto con base en la señal emitida por el cerebro del usuario. Para la utilización del sistema es indispensable contar con el casco OPEN BCI ya que este es el encargado de obtener la señal emitida por el cerebro del usuario.



Antes de comenzar con las respectivas tareas se debe visualizar el anexo 6, que es un resumen de todos los anexos y conocimientos que debe tener para este experimento.

## ACTIVIDAD 2. Especificar la evaluación



### Tarea 1. Seleccionar atributos de calidad para el sistema RaceBCI

**Hora de inicio:**

Antes de empezar esta tarea, es necesario que conozca el perfil del usuario que va a utilizar el sistema, para ello puede acceder al anexo 5

Si requiere mayor información del sistema, puede acceder al Anexo 4 para revisar la descripción y objetivos del sistema RaceBCI

Como resultado de la actividad de establecer los requerimientos de evaluación se obtuvo los siguientes requerimientos de calidad y evaluación del sistema:

- El objetivo del sistema RaceBCI deberá ser fácil de entender para cualquier usuario que desee hacer uso del mismo.
- El sistema RaceBCI cuenta con los criterios de accesibilidad necesarios para que cualquier usuario pueda utilizarlo.
- El sistema RaceBCI deberá interpretar correctamente las señales cerebrales emitidas por el usuario.

A continuación encuentra una tabla con varios atributos de calidad, en base a la información revisada anteriormente y empleando el anexo 2, correspondiente al Modelo de calidad para evaluar sistemas BCI, marque con una X los atributos que crea necesarios para realizar una correcta evaluación de la calidad de uso y de producto al sistema RaceBCI. Recuerde que los resultados de esta evaluación deben satisfacer o solventar los requerimientos de calidad.



| Atributo   | ¿Es necesario? |
|--|----------------|
| Tamaño de los elementos                              |                |
| Facilidad de comprensión de interfaz                 |                |
| Estado previo  |                |
| Efectividad de la documentación                      |                |
| Determinación de posibles acciones permitidas        |                |
| Previsibilidad de las acciones                       |                |
| Satisfacción   |                |
| Instalación y preparación                            |                |
| Comodidad  |                |
| Frecuencia de uso                                    |                |
| Complejidad  |                |
| Autonomía  |                |
| Guía de actividades                                  |                |
| Distribución de los elementos en la interfaz gráfica |                |
| Validación de acciones                               |                |
| Nivel de entrenamiento                               |                |

**Hora de finalización:**

Tarea 2. Identificar métricas de evaluación de los atributos

-

**Hora de inicio:**

Para esta tarea deberá usar el anexo 2 correspondiente al modelo de calidad y la lista de atributos seleccionados de la tarea anterior.

- Paso 1: Copie los atributos seleccionados en la tarea 1, en la columna atributo de la nueva tabla.
- Paso 2: Utilizando el anexo 2, identifique la columna de métrica de cada uno de los atributos, lea detenidamente su contenido y coloque las métricas en la tabla.
- Paso 3: Con su nueva tabla, verifique los atributos que hay en ella, si cree que alguno de estos atributos de calidad no ayuda en el proceso de evaluación del sistema RaceBCI, proceda a eliminarlo de la tabla; caso contrario mantenga la lista de atributos original.

| Atributo   | Métrica   |
|------------|-----------|
| Atributo 1 | Métrica 1 |
|            |           |
|            |           |
|            |           |
|            |           |
|            |           |
|            |           |

**Hora de finalización:**

Tarea 3. Identificar Criterios de evaluación

**Hora de inicio:**

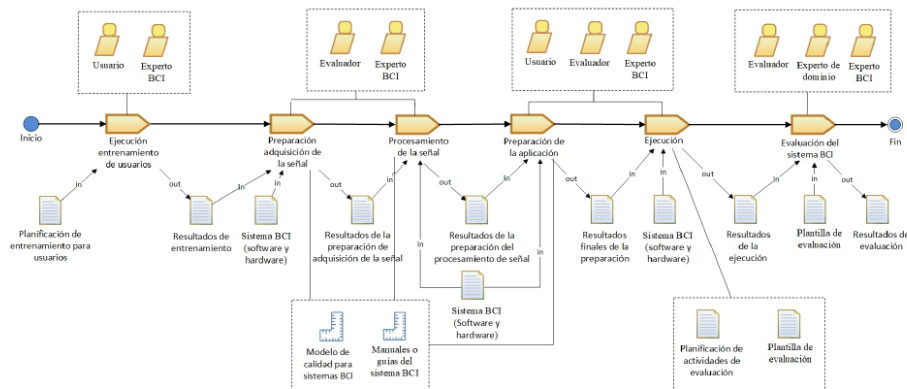
Para finalizar esta actividad, debe dirigirse al anexo 2, Modelo de Calidad,

- Paso 1: Copiar los atributos de calidad seleccionados en la tarea 2 en la nueva tabla.
- Paso 2: Con ayuda del anexo 2, identifique la columna "Cómo" e identifique el método de evaluación que se utilizara para cada atributo seleccionado.
- Paso 3: Con ayuda del anexo 2, identifique la columna "Criterio de decisión" y coloque en la tabla el criterio de decisión que corresponda a cada atributo.
- Paso 4: Con la tabla completada, proceda a verificar si los atributos que están en ella son los necesarios para evaluar el sistema RaceBCI, si cree que alguno de los atributos no ayuda en el proceso de evaluación del sistema, proceda a eliminarlo de la tabla.

| Atributo   | ¿Cómo se evaluará? | Criterio de decisión |
|------------|--------------------|----------------------|
| Atributo 1 | Fórmula 1          | Criterio 1           |
|            |                    |                      |
|            |                    |                      |
|            |                    |                      |
|            |                    |                      |
|            |                    |                      |
|            |                    |                      |

**Hora de finalización:**

**ACTIVIDAD 4: EJECUTAR LA EVALUACIÓN**



Para esta experimentación usted como evaluador solo se va a centrar en las tareas de ejecución y evaluación del sistema; para ello, las cuatro primeras tareas fueron realizadas previamente dando como resultado los documentos necesarios para que pueda realizar las tareas correspondientes.

## Tarea 5: EJECUCIÓN

**Hora de inicio:**

- Paso 1: Visualizar cómo el usuario hace uso del sistema RaceBCI; para ello haga uso del Anexo 7 que corresponde a un video donde se muestra todo el proceso de uso del sistema RaceBCI. Si presenta algún problema al visualizar el anexo 7 en la página web, puede acceder directamente con el siguiente link: [https://youtu.be/fsaUzfV5g\\_0](https://youtu.be/fsaUzfV5g_0)
- Paso 2: Contestar la plantilla de evaluación que se encuentra en el siguiente link: [https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLSdas4D7m7RZY4LY\\_okZMBEALfuNxIuk\\_vqZQRA3O9oZuVCKt2g/viewform?usp=sf\\_link](https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLSdas4D7m7RZY4LY_okZMBEALfuNxIuk_vqZQRA3O9oZuVCKt2g/viewform?usp=sf_link)

**Hora de finalización:**

## FINALIZACIÓN DEL EJERCICIO

Para finalizar, por favor cargue este documento con el siguiente formato de nombre "EX\_NOMBRE\_APELLIDO", ejemplo: "EX\_Juan\_Cobos" y en formato PDF:

<https://drive.google.com/drive/folders/1G4CtSkEvA1PQu3cvjNjivDtUZTUT8na?usp=sharing>

Por favor ingresar al siguiente enlace y llenar la encuesta:

<https://forms.gle/rM7imUWDMk8o1SWP6>

Muchas gracias por su colaboración.

## D4. Encuesta

### Encuesta para evaluar las fases de Especificar la evaluación y Ejecución de la evaluación del método BCIS-QUAM

Para cada una de las preguntas, por favor, marque el círculo que se encuentra lo más cerca posible de su opinión.

LEA POR FAVOR CADA PREGUNTA CUIDADOSAMENTE ANTES DE DAR SU RESPUESTA.

[Acceder a Google](#) para guardar el progreso. [Más información](#)

\*Obligatorio

Ingrese su nombre \*

Tu respuesta

Pregunta 1. La metodología de evaluación para sistemas BCI en su fase de ejecución es compleja y difícil de seguir. \*

1 2 3 4 5

Totalmente de Acuerdo      Totalmente en Desacuerdo

Pregunta 2. De manera general, la metodología de evaluación para sistemas BCI en su fase de ejecución es fácil de entender. \*

1 2 3 4 5

Totalmente de Desacuerdo      Totalmente de Acuerdo

Pregunta 3. Los pasos a seguir para completar la metodología de evaluación para sistemas BCI en su fase de ejecución son confusos y difíciles de entender. \*

1 2 3 4 5

Totalmente de Acuerdo      Totalmente de Desacuerdo

Pregunta 4. La metodología de evaluación para sistemas BCI en su fase de ejecución es fácil de aprender. \*

1 2 3 4 5

Totalmente de Desacuerdo      Totalmente de Acuerdo

Pregunta 5. Pienso que sería difícil evaluar un sistema BCI empleando la fase de ejecución de esta metodología de evaluación. \*

1 2 3 4 5

Totalmente de Acuerdo      Totalmente de Desacuerdo

Pregunta 6. Considero que las metodologías de evaluación para sistemas BCI reduciría el tiempo, y el esfuerzo requerido para evaluar este tipo de sistemas. \*

1 2 3 4 5

Totalmente de Desacuerdo      Totalmente de Acuerdo

Pregunta 7. De manera general, considero que la metodología de evaluación para sistemas BCI en su fase de ejecución es inútil. \*

1 2 3 4 5

Totalmente de Acuerdo      Totalmente de Desacuerdo

Pregunta 8. Considero que las metodologías de evaluación para sistemas BCI son útiles para evaluar la usabilidad y la experiencia de usuario. \*

1 2 3 4 5

Totalmente de Desacuerdo      Totalmente de Acuerdo

Pregunta 9. Creo que la metodología de evaluación de sistemas BCI en su fase de ejecución y el modelo de calidad utilizado NO abarca las métricas de evaluación necesarias para este proceso.

1 2 3 4 5

Totalmente de Acuerdo      Totalmente de Desacuerdo

Pregunta 10. El uso de la fase de ejecución de esta metodología, mejoraría la evaluación de usabilidad un sistema BCI. \*

1 2 3 4 5

Totalmente de Desacuerdo      Totalmente de Acuerdo

Pregunta 11. De manera general, pienso que con la fase de ejecución de esta metodología puede evaluar cualquier sistema BCI sin importar la utilidad del sistema. \*

1 2 3 4 5

Totalmente de Desacuerdo      Totalmente de Acuerdo

Pregunta 12. Si tuviera que evaluar un sistema BCI en el futuro, consideraría esta metodología de evaluación. \*

1 2 3 4 5

Totalmente de Desacuerdo      Totalmente de Acuerdo

Pregunta 13. De ser necesario, utilizaría esta metodología de evaluación en el futuro. \*

1 2 3 4 5

Totalmente de Desacuerdo      Totalmente de Acuerdo

Pregunta 14. Recomendaría el uso de esta metodología de evaluación para sistemas BCI. \*

1 2 3 4 5

Totalmente de Desacuerdo      Totalmente de Acuerdo

Pregunta 15. ¿Tiene alguna sugerencia sobre cómo hacer que esta metodología de evaluación sea más fácil de usar? \*

Tu respuesta

Pregunta 16. ¿Cuáles son las razones por las que tiene o no la intención de usar esta metodología de evaluación para sistemas BCI en un futuro? \*

Tu respuesta

[Enviar](#) [Borrar formulario](#)

## D5. Resultados de la encuesta presentada a los Ingenieros de software

| Sujeto | Preguntas Cerradas |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    | Preguntas Abiertas  |  |
|--------|--------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|---|--|
|        | 1                  | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15  | 16   |
| 1      | 4                  | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 5 | 5 | 4  | 3  | 5  | 5  | 5  | No  | Todo estuvo bastante claro   |
| 2      | 4                  | 2 | 2 | 2 | 2 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4  | 4  | 4  | 4  | 4  | No, todo esto fácil de seguir   | Por qué me parece que el modelo de calidad se adapta a cualquier escenario para los sistemas BCI   |
| 3      | 4                  | 4 | 3 | 4 | 3 | 3 | 2 | 4 | 3 | 4  | 3  | 4  | 4  | 4  | NO  | Creo que es una metodología bastante completa, por lo que creo que sería ideal para evaluar BCI.   |
| 4      | 4                  | 5 | 4 | 5 | 5 | 4 | 5 | 5 | 5 | 5  | 5  | 5  | 5  | 5  | No  | Por su facilidad de uso  |
| 5      | 4                  | 4 | 4 | 4 | 4 | 5 | 5 | 4 | 4 | 5  | 5  | 5  | 5  | 5  | Automatizar el proceso de selección de atributos de calidad   | Lo usaría en caso de trabajar en un área relacionada a BCI, para mejorar el producto final.  |
| 6      | 5                  | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5  | 5  | 5  | 5  | 5  | No.   | Por su facilidad de usar.  |
| 7      | 2                  | 3 | 2 | 3 | 4 | 2 | 3 | 2 | 3 | 3  | 2  | 4  | 2  | 3  | Hacer menos uso de los anexos, es decir en una sola tabla q se escojan los atributos y todos los valores necesarios | Falta de uso de la herramienta, es decir ver la interfaz y aplicar la metodología es diferente a tratar de aplicarla mientras otra persona hace uso de la misma.   |
| 8      | 4                  | 5 | 3 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 4 | 5  | 4  | 5  | 5  | 5  | no  | Para evaluar usabilidad algún tipo de casco BCI  |
| 9      | 3                  | 4 | 4 | 4 | 3 | 4 | 4 | 4 | 3 | 3  | 3  | 4  | 4  | 4  | no  | esta metodología para evaluar sistemas BCI me pareció interesante por las siguientes razones:<br>-fácil de entender<br>-Mide características que me servirían de gran ayuda en caso de utilizar esta metodología |
| 10     | 4                  | 4 | 4 | 4 | 4 | 3 | 4 | 4 | 4 | 4  | 4  | 4  | 4  | 4  | Ninguna   | Está bien estructurado, si lo utilizaría.  |
| 11     | 1                  | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5  | 5  | 5  | 5  | 5  | No, me parece una metodología correcta para evaluar este tipo de proyectos.   | Es fácil de usar y toma poco tiempo  |
| 12     | 4                  | 5 | 4 | 4 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5  | 3  | 5  | 5  | 5  | Ninguna   | Por su facilidad y utilidad para evaluar sistemas BCI  |
| 13     | 4                  | 4 | 4 | 2 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4  | 4  | 4  | 4  | 4  | Ninguna   | Me pareció novedosa y abarca muchos puntos que permiten una buena evaluación.  |
| 14     | 4                  | 5 | 4 | 4 | 4 | 3 | 5 | 5 | 5 | 4  | 4  | 5  | 5  | 5  | La metodología es buena sin embargo creo que los procesos se podrían reducir de acuerdo al caso de uso.             | Si desearía usar debido a que tiene la documentación y la solidez en cada aspecto que se evalúa.   |
| 15     | 5                  | 5 | 4 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5  | 5  | 5  | 5  | 5  | Ninguna, todo estuvo entendible   | Es una metodología fácil de entender y que ayuda a evaluar todo tipo de sistema BCI  |
| 16     | 4                  | 5 | 5 | 5 | 4 | 5 | 4 | 5 | 4 | 5  | 4  | 5  | 5  | 5  | Con una explicación más amplia previa a realizar el experimento   | Método bien explicado en todas sus fases y de fácil entendimiento para su explicación  |
| 17     | 4                  | 5 | 5 | 4 | 4 | 4 | 5 | 5 | 4 | 5  | 5  | 4  | 5  | 5  | Ninguna, está todo  | Fácil de usar y se entiende  |

|           |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   | entendible  | cada paso a realizar   |
|-----------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|--|
| <b>18</b> | 4 | 5 | 5 | 5 | 4 | 5 | 5 | 5 | 4 | 5 | 5 | 4 | 4 | 4 | 4 | No tengo sugerencias al respecto de la metodología  | Utilizaría esta metodología de evaluación ya que brinda las herramientas necesarias para evaluar ese tipo de sistemas                                  |
| <b>19</b> | 4 | 5 | 5 | 4 | 4 | 4 | 4 | 5 | 4 | 5 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | Brindar una mejor descripción de cada paso de la metodología para que esta pueda ser revisada y poder aclarar conceptos de ser necesario. | En caso de trabajar con sistemas de este tipo, si emplearía esta metodología ya que considero que abarca la evaluación a todas las partes del sistema. |
| <b>20</b> | 4 | 5 | 4 | 5 | 5 | 5 | 5 | 4 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | No, todo entendible   | Fácil de entender  |



## Anexo E: Contribuciones científicas aceptadas

### E1: Artículo

29<sup>TH</sup> INTERNATIONAL CONFERENCE ON INFORMATION SYSTEMS DEVELOPMENT (ISD2021 VALENCIA, SPAIN)

#### Evaluating the Usability in Domain-Specific Languages

**Christian Moreira**

Universidad de Cuenca  
Cuenca, Ecuador

*alexander.moreira@ucuenca.edu.ec*

**Juan Cobos-Q**

Universidad de Cuenca  
Cuenca, Ecuador

*juan.cobosq94@ucuenca.edu.ec*

**Wilson Valdez Solís**

Universidad de Cuenca  
Cuenca, Ecuador

*wilson.valdezs@ucuenca.edu.ec*

**Cristina Sánchez-Zhunio**

Universidad de Cuenca  
Cuenca, Ecuador

*cristina.sanchezz@ucuenca.edu.ec*

**Priscila Cedillo**

Universidad de Cuenca  
Cuenca, Ecuador

*priscila.cedillo@ucuenca.edu.ec*

#### Abstract

Domain-Specific Languages (DSL) represent software abstractions that provide semantic to a specific class or domain. DSLs use the concepts and rules from the field or domain to strengthen ties between the domain expert and the technology. Although several DSLs are modeled by considering quality features, most do not have high-quality characteristics related to their usability or do not address them. However, this characteristic constitutes a key aspect for software engineers and domain experts while designing their solutions. Therefore, this paper presents a usability quality model for DSLs aligned to the ISO / IEC 25010 standard and an evaluation model based on the ISO / IEC 25040 standard. Finally, the evaluation method was applied in order to show its feasibility by a case study that addresses the use of two DSLs (related to Ambient Assisted Living and Cloud Computing domain) and assesses their usability.

**Keywords:** Domain-Specific Languages, Usability, Quality Model, Evaluation Method.

#### 1. Introduction

The software has become a valuable tool to optimize efficiency and satisfy organizations' needs [26]. Hereof, software development has gained the interest of the research and industrial community. In this context, software engineering provides several methodologies to reduce the time spent developing an application and considering criteria to guarantee quality [2,3]. In this sense, to ensure quality, various criteria are defined according to each researcher or entity, and also quality standards must be implemented in each software development stage [21].

Nowadays, several types of software can be identified depending on their approach and generally can be separated into two types: General Purpose Languages (GPL) and Domain-Specific Languages (DSL) [5,6,7]. Regarding DSL, it is a formal limited expressiveness software language that processes algorithms of a specific domain [12]. DSLs could be divided into three categories (i.e., internal, external, language workbench). However, there are highlighted two of them. On the one hand, an internal DSL is the one that is developed in a general-purpose language but only uses a subset of the language's features in a particular style