

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA MADRE Y MAESTRA
Facultad de Ciencias e Ingeniería
Escuela de Ingeniería en Computación y Telecomunicaciones



**Diseño e implementación de un sistema BCI (Brain – Computer Interface) para
el control de un dron mediante comandos mentales**

**Un proyecto presentado como requisito parcial para optar por el título de
Ingeniero en Telemática en la Pontificia Universidad Católica Madre y Maestra**

por

Darío Ezequiel Núñez Castillo & James Di Giacomo Rodríguez
(2018-1018 y 2018-1573)

Asesora: Ing. Arlene Elizabeth Estévez Colón
Coordinadora de Proyectos de Acreditación y Profesora Tiempo Completo,
Departamento de Ingeniería Telemática

Santiago de los Caballeros, República Dominicana
Diciembre de 2023

AGRADECIMIENTOS

En este momento de culminación, queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento a dos personas excepcionales que han sido pilares fundamentales en el desarrollo de este proyecto de grado en el ámbito de la Ingeniería Telemática. Sus conocimientos, orientación y apoyo han sido invaluable.

A nuestra profesora y asesora Arlene Estévez, gracias por guiar nuestros pasos a lo largo de este viaje académico. Su dedicación y paciencia han sido inspiradoras. Cada reunión, cada corrección, cada consejo han contribuido significativamente a la calidad de nuestro proyecto. Su compromiso con la excelencia y su pasión por la enseñanza han dejado una huella imborrable en nuestra formación profesional.

Profesor Rafael Omar Batista, fue usted quien nos iluminó con la idea de utilizar el Insight 2.0 en nuestro proyecto. Su visión audaz y su entusiasmo por la tecnología nos motivaron a explorar nuevas fronteras en el campo de las interfaces cerebro – computadora (BCI). Gracias por compartir su experiencia y por ser parte integral de nuestra asesoría técnica.

Este proyecto, centrado en un sistema BCI para el manejo de un dron mediante comandos mentales, no habría sido posible sin la guía, sabiduría y dedicación de ustedes. A ambos, les extendemos profundamente nuestros agradecimientos por su compromiso con nuestro crecimiento, tanto académico, como profesional.

Darío Ezequiel Núñez Castillo

En primer lugar, a Dios, por habernos dado la suficiente capacidad para como equipo poder discernir que decisiones tomar, y poner en nuestro camino personas que nos sirvieron de gran ayuda para lograr los objetivos planteados, y, por consiguiente, obtener los resultados deseados. Además, de ser un gran soporte en los momentos más agobiantes y difíciles del presente proyecto.

A mis padres, Lic. Darío P. Núñez L. y Lic. Floralba M. Castillo T., por haberme dado la vida, y por nunca dejarme solo en los momentos donde más les he necesitado. Gracias por ser un gran soporte, tanto en lo emocional, motivacional y lo económico. Siempre tendré en mi memoria esos momentos donde creía que no podía más, pero ustedes siempre me motivaron a seguir adelante y no desmayar, son y seguirán siendo siempre mi brújula para yo encontrar mi norte. Gracias por ser siempre unos padres presentes y no ausentes.

A mi compañero de proyecto James Di Giacomo Rodríguez, por ser parte de este importante proceso y estar en cada paso de este, y llevarlo junto conmigo hasta el final, sin descansar, hasta su realización. Destaco su responsabilidad y puntualidad al momento de cada reunión y actividad. Además, por dar siempre lo mejor de ti.

A mis abuelos, en especial a mi abuela Mercedes García, cariñosamente Merced, la cual me brindó siempre su apoyo y amor incondicional. Siempre estuvo presente, y sé que, aunque ya no está físicamente, sé que está muy orgullosa de mí.

A mis tíos, tanto del lado materno como paterno, ya que ustedes me han servido de gran soporte en los momentos más difíciles de mi carrera. Muy especialmente, a mi fenecida tía, Eridania Mercedes Castillo, cariñosamente Nana.

A mis primos, por brindarme su cariño y siempre apoyarme.

A mi padrino Blas Saturnino Hernández Japa, por su aporte desinteresado y absoluto, por siempre estar presente, cuando más lo he necesitado.

A mis amigos, sin excepción, por su disponibilidad e inmenso apoyo.

James Di Giacomo Rodríguez

Siendo parte esencial de este proyecto además de nuestros queridos asesores, tengo que dar agradecimiento a mi madre Zenaida Rodríguez, quien fue parte de este proceso en especial cuando las cosas no salían como lo esperado, ella me apoyaba y me daba esa paz necesaria para seguir hacia adelante enfocándome más en la solución que en el problema.

Agradecimientos a Darío Ezequiel Núñez Castillo, por siempre estar presente en el proyecto, dando la milla extra cuando fue necesario, por colaborar de forma responsable y demostrando el arduo trabajo, que de no haber sido por ser responsable este proyecto no se hubiese culminado de forma satisfactoria.

Agradecimientos a Waldry Díaz que en su momento fue de gran ayuda para trabajar en el área de la programación, orientándome y aconsejándome de cómo podría hacer las cosas técnicas del proyecto, motivándome a la vez a incursionar más en el mundo de Python y JSON para que se me hiciera más fácil el manejo de la API del Insight 2.0, además de su apoyo motivacional a la hora de mostrar resultados.

Agradecimientos también a Esmeralda Estrella, quien también estuvo presente durante el proceso, para motivarme a seguir trabajando con el proyecto, consultando también con personas expertas en Python y forzándome a seguir hacia adelante.

Para concluir con esto, quiero que este proyecto sea de motivación para esos estudiantes de Ingeniería Telemática que quieran innovar, y que se motiven a lanzarse en proyectos de esta índole, cosas que no son muy comunes, ya que no se sabe si puedes volverte pionero y precursor de una nueva tecnología.

Contenido

Resumen Ejecutivo	13
Executive Summary	14
Introducción	16
Antecedentes del problema	16
Antecedentes del proyecto	17
Descripción del problema	18
Objetivos del proyecto	19
Objetivo General	19
Objetivos Específicos.....	19
Justificación del proyecto.....	20
Limitaciones del proyecto	21
1. Capítulo I – Marco Teórico	24
1.1. Marco Teórico	24
1.2. Definición de Términos y Glosario.....	29
2. Capítulo II – Solución Propuesta	31
2.1. Definición del Proyecto	31
2.2. Productos del Proyecto.....	31
2.2.1. Delimitación del proyecto, qué hace y qué no hace.....	31
2.2.2. Defina los entregables de su proyecto para cada etapa.....	32
2.3. Cronograma del proyecto.....	33
2.4. Plan de Administración de Riesgos.....	39
2.4.1. Enfoque metodológico para evaluación de riesgos.....	39
2.4.2. ¿Cómo manejará sus riesgos?	40
2.5 Presupuesto	40

2.6 Definición de la demostración	41
2.7 Análisis y Diseño	41
2.7.1. Análisis.....	41
2.7.2. Diseño	42
Desarrollo e Implementación	44
Funcionamiento del código desde el lado de la diadema Insight 2.0.....	45
Inicialización del websocket	45
Manejo de las funciones para el manejo de los datos	46
Funcionamiento del código desde el lado del Crazyflie 2.1	47
Configuración del Socket del Servidor	47
Funciones para manejar comandos y conexiones	47
Función para manejar comandos.....	48
Función para manejar conexiones.....	48
Inicio de hilos y ejecución principal	49
Armado del Crazyflie 2.1	50
Mantenimiento del Insight 2.0	53
Entrenamientos de los comandos mentales.....	57
Consejos para obtener unos resultados óptimos durante los entrenamientos:	58
Entrenamiento del primer comando	60
Aceptar o rechazar la formación	60
Comentarios de entrenamiento.....	60
Nivel de comando	61
Diagrama del espacio cerebral	62
Modos de entrenamientos	62
Ajuste de la sensibilidad	63
Análisis de los Resultados.....	65

Prueba de colocación del Insight 2.0	65
Prueba de comunicación entre el Insight 2.0 y el Crazyflie 2.1.....	65
Prueba de carga del Crazyflie 2.1	67
Prueba de sincronización del dron mediante la API del Crazyflie 2.1.....	67
Pruebas de vuelo del Crazyflie 2.1, usando el Insight 2.0	68
Precisión del proyecto haciendo uso del Insight 2.0	70
Escenario 1: Gel lubricante no aplicado a los electrodos/sensores del EMOTIV Insight 2.0.	71
Escenario 2: Gel lubricante aplicado a los electrodos/sensores del EMOTIV Insight 2.0.	75
Conclusiones respecto a los resultados obtenidos.....	77
Conclusiones y Recomendaciones	79
Referencias Bibliográficas	81

Índice de Tablas

Tabla 1. Resumen de las acciones por cada onda.....	27
Tabla 2. Presupuesto, a una tasa de cambio de \$56.50 dólares.....	40
Tabla 3. Lista de comandos generados por el Insight 2.0, sin aplicar gel lubricante a los electrodos/sensores.	73
Tabla 4. Lista de comandos generados por el Insight 2.0, con gel lubricante aplicado a los electrodos/sensores.....	76

Índice de Ilustraciones

Ilustración 1. Electroencefalógrafo por utilizar y los electrodos.	27
Ilustración 2. Distribución de la corteza cerebral.	28
Ilustración 3. Inicialización del websocket desde el lado de la diadema.	46
Ilustración 4. Funciones importantes del código del lado de la diadema.	46
Ilustración 5. Inicialización del websocket desde el lado del dron.	47
Ilustración 6. Función para manejo de los comandos.	48
Ilustración 7. Función para manejo de conexiones.	49
Ilustración 8. Uso de hilos y ejecución principal.	49
Ilustración 9. Chasis del Crazyflie 2.1.	50
Ilustración 10. Motores del dron y cables trenzados para armado.	50
Ilustración 11. Montaje de las patas.	51
Ilustración 12. Sentido de las hélices y esquemático.	51
Ilustración 13. Hélices puestas.	51
Ilustración 14. Conexión de batería y armado final.	52
Ilustración 15. Comprobación de las hélices.	53
Ilustración 16. Hélices bien balanceadas.	53
Ilustración 17. Kit de mantenimiento de la diadema.	54
Ilustración 18. Gel lubricante ALFA de 120 gramos.	54
Ilustración 19. Comparación de diademas con electrodos corroídos.	55
Ilustración 20. Vista superior de la diadema con electrodos corroídos.	55
Ilustración 21. Electrodos cambiados en nuestra diadema.	56
Ilustración 22. Calidad común cuando se tiene electrodos en mal estado.	56
Ilustración 23. Calidad común cuando se tiene electrodos en perfecto estado.	57

Ilustración 24. Entrenamiento del primer comando.	60
Ilustración 25. Comentarios durante el entrenamiento.	61
Ilustración 26. Nivel de comando (flecha verde).	62
Ilustración 27. Diagrama del espacio cerebral.	62
Ilustración 28. Ajuste de la sensibilidad de los comandos entrenados.....	63
Ilustración 29. Colocación correcta del Insight 2.0 en la cabeza del usuario.	65
Ilustración 30. Comprobación de la exitosa comunicación entre APIs.....	66
Ilustración 31. Funcionamiento del Flow deck v2, desde el cliente del Crazyflie 2.1.	66
Ilustración 32. Crazyflie 2.1 en su estado inicial (posición de despegue).	66
Ilustración 33. Crazyflie 2.1 cargando la batería.	67
Ilustración 34. Prueba de sincronización con la API del Crazyflie 2.1.....	67
Ilustración 35. Posición inicial del dron.....	68
Ilustración 36. Desde la posición inicial, se desplazó hacia la derecha.	68
Ilustración 37. Desde la derecha, se desplazó hacia la izquierda.....	69
Ilustración 38. Desde su estado neutral, se desplazó hacia arriba.....	69
Ilustración 39. Desde arriba, bajó su altura.....	70
Ilustración 40. Escenario donde no se les aplicó gel lubricante a los electrodos/sensores.	71
Ilustración 41. Escenario donde se les aplicó gel lubricante a los electrodos/sensores.	75

RESUMEN EJECUTIVO

Resumen Ejecutivo

El proyecto se enfoca en el desarrollo de un sistema de interfaz cerebro – computadora (BCI) para mejorar la interacción entre el dron y el usuario. El objetivo principal es utilizar el análisis de las ondas cerebrales para controlar de manera precisa y confiable un dron.

Para llevar a cabo este proyecto, se utilizará el dispositivo Insight 2.0, de la compañía EMOTIV, el cual permite la adquisición de señales cerebrales a través de electrodos colocados en el cuero cabelludo. El software proporcionado por el dispositivo será utilizado para analizar la información proporcionada por las señales cerebrales captadas.

El EMOTIV Insight 2.0 será integrado con el sistema de control del dron, estableciendo una conexión confiable y estable. Se desarrollará un aplicativo local en Windows para adquirir, procesar y analizar las señales cerebrales captadas por el dispositivo EEG. Este aplicativo permitirá la detección y clasificación de comandos de control basados en las señales cerebrales, lo que permitirá controlar el dron de manera precisa. Además, se establecerá una comunicación inalámbrica mediante Bluetooth 5.0 entre el EMOTIV Insight 2.0 y el aplicativo local, garantizando una conexión segura y confiable.

Executive Summary

The project focuses on the development of a brain – computer interface (BCI) system to improve the interaction between the drone and user. The main objective is to use brainwave analysis to control a drone accurately and reliably.

To conduct this project, the EMOTIV Insight 2.0 device will be used, which allows the acquisition of brain signals through electrodes placed on the scalp. The software provided by the device will be used to analyze the information provided by the captured brain signals.

The EMOTIV Insight 2.0 will be integrated with the drone control system, establishing a reliable and stable connection. A local Windows application will be developed to acquire, process, and analyze the brain signals captured by the EEG device. This application will allow the detection and classification of control commands based on the brain signals, which will allow precise control of the drone. In addition, wireless communication via Bluetooth 5.0 will be established between the EMOTIV Insight 2.0 and the local application, ensuring a secure and reliable connection.

INTRODUCCION

Introducción

Antecedentes del problema

El desarrollo de interfaces cerebro – computadora (BCI) o interfaces cerebrales ha sido un campo de investigación en curso durante varias décadas. Los avances en neurociencia, tecnología de sensores y procesamiento de señales han contribuido al progreso de esta área.

Uno de los hitos importantes en la investigación de BCI fue el desarrollo del electroencefalograma (EEG), que registra la actividad eléctrica del cerebro a través de electrodos colocados en el cuero cabelludo. El EEG ha sido ampliamente utilizado en la investigación de las ondas cerebrales y ha facilitado el estudio de la relación entre los estados mentales y los patrones de actividad cerebral.

En la década de 1970, el profesor Jacques Vidal acuñó el término "interfaz cerebro – computadora" y propuso la idea de que los patrones de ondas cerebrales podrían usarse para controlar dispositivos externos, como computadoras. Desde entonces, ha habido un creciente interés y avance en la investigación y desarrollo de BCI.

En los últimos años, se han realizado avances significativos en la tecnología de sensores EEG, lo que ha permitido una mayor precisión y comodidad en la adquisición de señales cerebrales. También ha habido mejoras en los algoritmos de procesamiento de señales y aprendizaje automático, lo que ha permitido una interpretación más precisa de las señales cerebrales y la traducción de esas señales en comandos para controlar dispositivos externos.

En cuanto a los drones, han ganado popularidad en diversas aplicaciones, como la fotografía aérea, la entrega de paquetes y la vigilancia. El control de drones mediante BCI representa una extensión natural de las investigaciones en interfaces cerebro-computadora y ofrece nuevas posibilidades en términos de accesibilidad y control preciso de estos dispositivos.

A pesar de los avances logrados, todavía existen desafíos técnicos y prácticos que deben abordarse para lograr una implementación efectiva y segura de la tecnología de control de drones mediante ondas cerebrales. Estos desafíos incluyen la mejora de la precisión

y la confiabilidad de las interfaces cerebrales, la minimización de la interferencia y el ruido de las señales, y la garantía de la seguridad y privacidad de los datos cerebrales.

Antecedentes del proyecto

En la tesis titulada “Desarrollo de una interfaz cerebral utilizando herramientas IoT para el control de dispositivos ON-OFF orientado a personas con capacidades limitadas”, presentada por Luis Alberto Montalván Tandazo y Christian Fernando Quinte Caiza, en julio del año 2021, se aborda el tema del control de dispositivos electrónicos vía ondas cerebrales utilizando la diadema EMOTIV Insight 2.0, donde se le quiere facilitar el estilo de vida a las personas con ciertas limitaciones físicas, y por ende, brindarles comodidad y mejorar su *modus vivendi* en su día a día.

En ese mismo año, dígame 2021, también se llevó a cabo un proyecto muy similar, titulado: “Desarrollo de un sistema BCI basado en redes neuronales y movimientos de la cabeza para el manejo de un ordenador”, el cual lleva por autor a Eddy Fabian Corrales Bastidas, donde se abarca esta idea, la cual se enfoca en el manejo de un ordenador en personas con movimiento reducido en sus extremidades superiores.

Por otro lado, en la tesis titulada “Implementación de un sistema de control para el manipulador Mitsubishi RV-2AJ, mediante ondas cerebrales empleando el sensor EMOTIV Insight”, presentada por Francisco Andrés Gómez Pineda y Stalin Gabriel Yaguana Torres, en julio del año 2018, se discute la problemática sobre la exclusión o limitación de acceso a tecnologías innovadoras de manipulación de robots para personas que no tienen conocimientos de programación de estos dispositivos o que tienen alguna discapacidad motriz. Por tanto, los autores plantean como solución a esta problemática, la implementación de un sistema que permita controlar los movimientos del brazo robótico Mitsubishi RV-2AJ de la marca Festo, utilizando señales cerebrales, mediante la interpretación de señales cerebrales recopiladas por la diadema EEG EMOTIV Insight 1.0, las cuales serán procesadas y analizadas a través de una tarjeta LattePanda, un dispositivo con capacidades de microcomputador y conectividad inalámbrica.

Descripción del problema

La problemática del proyecto es la necesidad de mejorar la interacción entre los drones y los usuarios mediante el desarrollo de un sistema de interfaz cerebro – computadora (BCI). Aunque se han realizado avances significativos en la tecnología de sensores EEG y en los algoritmos de procesamiento de señales, aún existen desafíos técnicos y prácticos que deben abordarse para lograr una implementación efectiva y segura de la tecnología de control de drones mediante ondas cerebrales.

Precisión y confiabilidad: Es necesario mejorar la precisión y confiabilidad de las interfaces cerebrales para garantizar una interpretación precisa de las señales cerebrales y una traducción confiable de esas señales en comandos para controlar los drones. Esto implica desarrollar algoritmos sofisticados y técnicas de procesamiento de señales que puedan identificar de manera precisa los patrones de ondas cerebrales asociados con diferentes comandos.

Interferencia y ruido de las señales: Las señales cerebrales pueden verse afectadas por la interferencia y el ruido, lo que puede dificultar su interpretación precisa. Es necesario desarrollar técnicas de filtrado y procesamiento de señales que permitan minimizar la interferencia y el ruido, mejorando así la calidad de las señales cerebrales adquiridas y su utilidad para controlar los drones.

Seguridad y privacidad de los datos cerebrales: El uso de BCI implica la adquisición y procesamiento de datos cerebrales de los usuarios. Es fundamental garantizar la seguridad y privacidad de estos datos, evitando cualquier tipo de acceso no autorizado o uso indebido. Esto implica implementar medidas de seguridad robustas en el sistema BCI, como el cifrado de datos y la protección de la transmisión de información.

Extrapolando la problemática a personas que tienen dificultades físicas utilizar una interfaz cerebro – computadora, se busca proporcionarles una forma alternativa de control que les permita superar estas limitaciones físicas y tener mayor autonomía. Sin embargo, es necesario abordar los desafíos anteriormente mencionados. Al superar estos desafíos, el sistema BCI puede mejorar la accesibilidad y el control preciso de los drones, brindando a las personas con deficiencia motora o problemas físicos nuevas oportunidades de exploración, entretenimiento y participación en actividades que antes

les resultaban inaccesibles, lo que tendría un impacto significativo en su calidad de vida.

Objetivos del proyecto

A continuación, se describen los objetivos del proyecto centrados en el desarrollo de un sistema BCI (Brain – Computer Interface) para mejorar la interacción con un dron mediante comandos mentales. El enfoque principal es emplear la tecnología del dispositivo EEG EMOTIV Insight 2.0 para contribuir a resolver el problema de la complejidad en la operación de drones. Se busca integrar el EMOTIV Insight 2.0 con el sistema de control del dron, estableciendo una conexión confiable y estable para permitir un control más intuitivo y preciso basado en las señales cerebrales del usuario. Además, se desarrollará un aplicativo local en Windows para adquirir, procesar y analizar estas señales. La evaluación exhaustiva del sistema BCI con el EMOTIV Insight 2.0 permitirá medir la precisión y confiabilidad del sistema, asegurando su eficiencia y seguridad en la interacción con el dron.

Objetivo General

Desarrollar un sistema BCI (Brain – Computer Interface) que mejore la interacción con un dron mediante el uso de comandos mentales con el fin de reemplazar los controles físicos de vuelo.

Objetivos Específicos

- Analizar la información proporcionada por el dispositivo EEG EMOTIV Insight 2.0, mediante el empleo del software del dispositivo para el desarrollo del sistema BCI.
- Integrar el EMOTIV Insight 2.0 con el sistema de control del dron para establecer una conexión confiable y estable.
- Desarrollar un aplicativo local en Windows para adquirir, procesar y analizar las señales cerebrales captadas por el EMOTIV Insight 2.0.
- Establecer una comunicación inalámbrica mediante Bluetooth 5.0 entre el EMOTIV Insight 2.0 y el aplicativo local.
- Evaluar la precisión y confiabilidad del sistema BCI utilizando el EMOTIV Insight 2.0 en la interacción con el dron.

Justificación del proyecto

La investigación sobre el desarrollo de un sistema BCI para mejorar la interacción con los drones es altamente conveniente debido a varias razones. En primer lugar, este tipo de tecnología proporciona una alternativa de control para personas con dificultades físicas, lo que les permite superar sus limitaciones y tener mayor autonomía en el manejo de drones. Esto es conveniente desde una perspectiva de accesibilidad, ya que brinda a estas personas nuevas oportunidades y posibilidades que antes les resultaban inaccesibles.

En términos de relevancia social, el proyecto tiene una trascendencia significativa. Los resultados de la investigación beneficiarán a las personas con limitaciones físicas, permitiéndoles participar en actividades que antes eran difíciles o imposibles de realizar. Esto puede tener un impacto positivo en su calidad de vida al proporcionarles una mayor independencia y la capacidad de explorar nuevas experiencias. Además, el uso de drones controlados mediante BCI puede tener aplicaciones en campos como la asistencia médica, la seguridad y la investigación científica, lo que beneficia a la sociedad en general.

Desde el punto de vista del valor teórico, este proyecto contribuirá al avance del conocimiento existente en el desarrollo de sistemas BCI para control de drones. Los resultados obtenidos en esta investigación pueden ser generalizables a principios más amplios en el campo de las interfaces cerebro – computadora, lo que podría impulsar el avance de esta tecnología en diferentes aplicaciones y contextos. La información recopilada durante la investigación también puede servir para revisar, desarrollar o apoyar teorías existentes sobre la relación entre las señales cerebrales y el control de dispositivos externos.

Para concluir, en términos de utilidad metodológica, este proyecto puede ayudar a crear nuevos instrumentos y técnicas para la recolección y análisis de datos cerebrales. Al integrar el dispositivo EEG EMOTIV Insight 2.0 con el sistema de control del dron, se establecerá una conexión confiable y estable, lo que requerirá el desarrollo de métodos y protocolos de comunicación específicos. Estos avances metodológicos pueden tener aplicaciones más amplias en la investigación y desarrollo de sistemas BCI en general, mejorando la eficiencia y precisión de la adquisición y análisis de señales cerebrales.

Limitaciones del proyecto

Dentro de las limitaciones que podrían surgir durante este proyecto son las siguientes:

- **Mala lectura de las ondas cerebrales debido al cabello:** El cabello puede interferir con la adecuada colocación y contacto de los sensores del modelo EEG (Electroencefalograma) en el cuero cabelludo, lo que puede generar ruido y dificultar la captura precisa de las señales cerebrales.
- **Interferencia y ruido de las señales:** Las señales cerebrales pueden verse afectadas por la interferencia y el ruido externos, lo que puede dificultar su adquisición y procesamiento adecuado. La presencia de interferencia y ruido puede afectar la calidad de las señales cerebrales captadas, lo que puede llevar a resultados inexactos o imprecisos en el control del dron.
- **Limitaciones del dispositivo EEG, que solo posee cinco sensores:** El dispositivo EEG utilizado, en este caso el EMOTIV Insight 2.0, puede tener limitaciones técnicas en términos de resolución, cantidad de electrodos o sensibilidad. Estas limitaciones podrían afectar la calidad de las señales cerebrales adquiridas y, por lo tanto, influir en la precisión y confiabilidad del sistema BCI. Una alternativa para esto podría ser el EMOTIV EPOC que tiene un costo de 1000 dólares y cuenta con 14 electrodos o también el EMOTIV Flex que cuesta 2200 dólares, con 32 electrodos.
- **Limitaciones de la API del fabricante:** Adicionalmente, otra limitación se refiere a las restricciones de la API proporcionada por el fabricante del equipo de EEG. Estas limitaciones pueden incluir la disponibilidad de funciones, la frecuencia de muestreo, la capacidad de procesamiento, entre otros aspectos técnicos. También un tema de licenciamiento podría afectar directamente el buen desarrollo del proyecto y la constante evolución de la API de EMOTIV que sigue siendo trabajada hoy día mediante actualizaciones.
- **Desgaste en la diadema:** los electrodos de la diadema poseen unos sensores de goma y cobre que sufren desgaste al ser usados, además de que estos ante lo que es el gel lubricante que ayuda a mejorar la precisión son afectados por el sodio que poseen y los corroen, se adjuntará más adelante como sufren y afectan en la captura de datos

- **Entrenamientos de muchos comandos:** Ya que la diadema permite que se le entrene muchos movimientos, mientras mayor sea la cantidad de comandos, más difícil se le hará a la diadema saber diferenciar cual comando es cual, debido a esto, se asoció el pensamiento a un gesto para que así se le facilitara más a la hora de diferenciarlos. Nótese, que la diadema no posee cámara que se fije en el gesto, sino que cada gesticulación o movimiento de un musculo representa una pulsación eléctrica en el cerebro y además de eso actividad cerebral.

CAPITULO I

MARCO TEORICO

1. Capítulo I – Marco Teórico

1.1. Marco Teórico

El presente proyecto tiene como objetivo crear una interfaz BCI para el manejo de un dron mediante comandos mentales, el cerebro es como un musculo que emite pulsos eléctricos casi imperceptibles para nosotros y que cada uno corresponde a un sentido del ser humano.

Interfaz BCI

Por sus siglas, (Brain – Computer Interfaces), abarca los conceptos, principios y tecnologías que subyacen en el campo de estudio que busca establecer una comunicación directa entre el cerebro humano y los sistemas computacionales. Estas interfaces permiten la adquisición de señales cerebrales y su traducción en comandos o acciones para controlar dispositivos externos. [1]

Fundamentos neurofisiológicos: El cerebro humano, una visión general de su estructura y funciones, destacando áreas relevantes para las interfaces BCI, como la corteza cerebral, la corteza motora y las áreas asociadas con la percepción y la cognición. [1]

Señales cerebrales: revisión de las señales electrofisiológicas utilizadas en las interfaces BCI, como los electroencefalogramas (EEG), las señales de potenciales evocados (ERP), los potenciales de campo magnético (MCP) y los potenciales de campo eléctrico (ECP). [1]

Métodos de adquisición de señales:

Para capturar las señales cerebrales, los sistemas BCI utilizan electrodos colocados en el cuero cabelludo o, en algunos casos, interfaces cerebro – electrodo implantadas de manera segura. Estos electrodos recopilan la actividad cerebral y transmiten las señales a un dispositivo de procesamiento y clasificación, que interpreta los patrones cerebrales relevantes para controlar el dron. [1]

Procesamiento y análisis de señales

Extracción de características: métodos para identificar y extraer características relevantes de las señales cerebrales, como la potencia espectral, los ritmos cerebrales (p. ej., alfa, beta, gamma) y los potenciales relacionados con eventos (ERP). [22]

Clasificación: algoritmos de aprendizaje automático utilizados para clasificar y reconocer patrones en las señales cerebrales, como máquinas de vectores de soporte (SVM), redes neuronales y análisis discriminante. [2]

Paradigmas de interacción

Imaginería motora: utilización de la actividad cerebral asociada con la planificación y ejecución de movimientos para controlar dispositivos externos. [4]

Potenciales relacionados con eventos: aprovechamiento de respuestas cerebrales específicas (por ejemplo, el potencial P300) generadas por estímulos relevantes para la interacción con interfaces BCI. [4]

Interfaces invasivas: introducción a las interfaces BCI implantables, que registran señales directamente del cerebro mediante electrodos intracraneales. [4]

El uso efectivo de un BCI para manejar drones con la mente requiere un proceso de calibración y entrenamiento. Durante la calibración, el sistema recopila datos de referencia para establecer una relación entre las señales cerebrales y los comandos deseados, como movimientos específicos del dron. El entrenamiento implica que el usuario realice tareas específicas para que el algoritmo aprenda a reconocer y asociar los patrones cerebrales adecuados con los comandos esperados. [5]

Aplicaciones de las interfaces BCI

Militares y de seguridad: Los drones controlados por la mente podrían ser utilizados para misiones de vigilancia, reconocimiento y búsqueda y rescate en situaciones peligrosas, donde los operadores humanos podrían estar en riesgo. [5]

Entretenimiento y deportes: En el ámbito del entretenimiento, se pueden diseñar competiciones de carreras de drones donde los pilotos controlen los dispositivos únicamente con la mente. Esto podría generar un nuevo tipo de entretenimiento emocionante y atractivo para el público. [5]

Accesibilidad: Las interfaces cerebro – computadora para drones podrían ofrecer nuevas posibilidades de movilidad para personas con discapacidades físicas, permitiéndoles disfrutar de la experiencia de pilotar un dron y explorar el mundo desde una perspectiva aérea. [5]

Ondas cerebrales

Ondas Delta (0.5 - 4 Hz): Son las ondas de menor frecuencia y mayor amplitud. Se asocian principalmente con el sueño profundo y la regeneración física. [5]

Ondas Theta (4 - 8 Hz): Estas ondas se observan en estados de relajación profunda, meditación, sueño ligero y también pueden estar presentes durante algunos procesos creativos. [5]

Ondas Alpha (8 - 13 Hz): Las ondas Alpha se generan cuando el cerebro está en un estado relajado y despierto, pero en reposo. Son comunes cuando los ojos están cerrados y se asocian con la relajación, la calma mental y el estado de atención sin esfuerzo. [5]

Ondas Beta (13 - 30 Hz): Son ondas de mayor frecuencia y están relacionadas con la actividad mental activa, la concentración, la atención focalizada y el procesamiento cognitivo. [5]

Ondas Gamma (30 - 100 Hz): Las ondas gamma son las de mayor frecuencia y están asociadas con procesos cognitivos complejos, la integración sensorial, la memoria de trabajo y la actividad neuronal coordinada. [5]

Ondas Mu (8-12 Hz): Las ondas mu, mencionadas anteriormente, están asociadas con la actividad motora y la supresión de la actividad motora durante la imaginación o la observación de movimientos. Al modular las ondas mu, es posible utilizar la intención de movimiento imaginado para controlar el dron. Por ejemplo, al imaginar mover una mano hacia la derecha, se podría utilizar la detección de las ondas mu asociadas para enviar una señal al dron para que se mueva hacia la derecha. [5]

ONDAS	FRECUENCIA (Hz)	PROPIEDADES	ACTIVIDAD MENTAL RELACIONADO
DELTA (Δ)	0.2Hz - 4Hz	Sección frontal en Adultos. Sección posterior en niños. Ondas de alta amplitud.	Ondas lentas relacionadas a la etapa de sueño profundo
THETA (Θ)	4Hz – 8Hz	Sección Frontal Media (Fz a Cz)	Inconciencia, meditación y somnolencia.
ALPHA (α)	8Hz - 12Hz	Región posterior de la cabeza, ambos lados, amplitud alta en el lado dominante	Relajación y concentración.
MU(μ)	8Hz - 13Hz	Corteza sensorial-motora	Indicador de que las neuronas se encuentran trabajando.
BETA(β)	12Hz - 30Hz	Corteza sensorial – motora, entre C3 y C4, distribución simétrica, más evidente en la parte frontal, ondas de amplitud baja.	Estado de alerta, pensativo y concentración activa.

Tabla 1. Resumen de las acciones por cada onda.

EMOTIV Systems

Esta es una empresa en el campo de la neurotecnología. Fundada en 2011, se dedican a la investigación, desarrollo y fabricación de interfaces cerebro – computadora (BCI, por sus siglas en inglés) y software relacionado. El producto más conocido de EMOTIV es el Insight 2.0.

EMOTIV Insight 2.0



Ilustración 1. Electroencefalógrafo por utilizar y los electrodos.

El dispositivo EMOTIV Insight, brinda la posibilidad de registrar e interpretar las ondas cerebrales en datos que el operador pueda utilizar para establecer una comunicación entre usuarios y otros sistemas como los informáticos, sin la necesidad de usar otros dispositivos, ni una interacción muscular para resolver comandos, además cuenta con

Otra mejora significativa es el alcance. Bluetooth 5.0 puede alcanzar distancias de hasta 240 metros en condiciones ideales, lo cual es considerablemente mayor que las versiones anteriores. Esto es especialmente beneficioso en entornos grandes o al aire libre, donde se requiere una conectividad confiable a largas distancias. [7]

Bluetooth 5.0 también ofrece mejoras específicas para la compatibilidad con el Internet de las cosas (IoT). Proporciona un mejor soporte para la conexión y control de dispositivos IoT, lo que facilita la interconexión y la comunicación entre diferentes dispositivos inteligentes. [7]

1.2. Definición de Términos y Glosario

1. **BCI:** Interfaz cerebro – computadora (BCI, por sus siglas en inglés) es un sistema que permite la comunicación directa entre el cerebro humano y una computadora u otro dispositivo electrónico, sin la necesidad de utilizar los canales tradicionales como el teclado o el ratón. Esto se logra mediante la detección y la interpretación de las señales cerebrales, como las ondas cerebrales, para controlar o interactuar con dispositivos o software.
2. **Ondas Cerebrales:** son las señales eléctricas generadas por la actividad neuronal del cerebro.
3. **No Invasivo:** es algo que se pone en los tejidos circundantes a la piel.
4. **Análisis Discriminante:** análisis estadístico para separar observaciones.
5. **Electroencefalografía:** es una técnica de registro y análisis de la actividad eléctrica del cerebro.
6. **Prótesis:** es una herramienta o dispositivo que se pone para sustituir algo que tuvo que ser quitado.
7. **Corteza del cerebro:** Capa más externa del cerebro.
8. **Electrodos:** Dispositivos usados para medir o estimular la actividad eléctrica.
9. **Diadema:** Dispositivo usado para escuchar por computadora y que es conectado por vía remota.

CAPITULO II

SOLUCION PROPUESTA

2. Capítulo II – Solución Propuesta

2.1. Definición del Proyecto

El proyecto consiste en integrar un dispositivo electroencefalógrafo junto a un dron, para que este sea manejado por medio de las ondas cerebrales que los seres humanos generamos cuando pensamos en una acción. Se propone como una alternativa para ayudar al desarrollo de los sistemas BCI junto su interacción con los dispositivos IoT, vehículos aéreos no tripulados y cualquier dispositivo que sirva para facilitar la interacción de los humanos con los medios de transporte por interfaces cerebro – computador.

En el mismo se planea utilizar los siguientes componentes, con su respectiva aplicación:

Crazyflie 2.1: es un pequeño dron de código abierto desarrollado por Bitcraze. Es una versión mejorada y más avanzada de su predecesor, el Crazyflie 2.1 original. A pesar de su diminuto tamaño, el Crazyflie 2.1 está repleto de características y capacidades impresionantes. Este se puede programar utilizando lenguajes como Python y C, lo que brinda una gran flexibilidad para personalizar su comportamiento y desarrollar nuevas funciones.

EMOTIVBCI: es el software que permite enviar los datos de las señales tomadas por la diadema, para que así sean procesadas por la BCI y luego ser programadas para que el dispositivo ejecute la acción pensada.

2.2. Productos del Proyecto

- Prototipo en el cual se tomen y demuestren los comandos pensados.
- Aplicativo a nivel local
- Ejecución de comandos pensados en el Dron

2.2.1. Delimitación del proyecto, qué hace y qué no hace

El presente proyecto presenta desafíos y ventajas únicas en el ámbito del control de vuelo mediante tecnologías BCI. Aunque se le brindará un único y cuidadoso entrenamiento, se enfrenta a limitaciones en las acciones disponibles para el piloto: solo podrá dirigirse hacia arriba, abajo, derecha e izquierda. A pesar de contar con controles

finos, las acciones abruptas siguen siendo una posibilidad, lo que destaca la importancia de una ejecución precisa y un enfoque concentrado. Además, se ha restringido tanto el tiempo de vuelo como el área de operación, aspectos cruciales para garantizar la seguridad y el rendimiento óptimo del sistema. Aunque las tecnologías BCI han abierto una puerta a nuevas oportunidades, su comunicación aún requiere perfeccionamiento. Asimismo, la fatiga mental se plantea como un obstáculo significativo, pues la toma de decisiones complejas demanda una atención constante por parte del piloto. A pesar de estos desafíos, el Insight 2.0 se presenta como un logro destacado en la industria, un paso firme hacia el futuro del vuelo controlado por la mente, cuyos beneficios y posibilidades trascienden las limitaciones actuales.

2.2.2. Defina los entregables de su proyecto para cada etapa

PROYECTO 1
Entrenamiento de los comandos mentales
Procesamiento y pruebas de los comandos
Creación del aplicativo local
Integrar los comandos mentales en la interfaz creada para su muestreo en tiempo real

PROYECTO 2
Integración del dron al aplicativo local
Pruebas de que los comandos sean transmitidos de un ambiente a otro
Pruebas de vuelo con comandos mentales básicos (arriba, abajo, derecha e izquierda)
Proyecto completado

2.3. Cronograma del proyecto

Fecha de inicio de proyecto: 27 abril del 2023

Actividad y descripción	Fecha inicio	Fecha entrega	Encargados	Porcentaje	Comentario
Fase 1- Equipos y materiales	8/05/2023	9/05/2023	James/Darío	100%	Lista realizada y sometida en la propuesta
Investigar los equipos y cambios en precios	9/05/2023	10/05/2023	James	100%	
Pedir Insight 2.0 vía Amazon	17/05/2023	30/05/2023	James	100%	
Revisar si hay algún micro facilitado por la universidad	31/05/2023	02/06/2023	Darío	100%	
Sintetizar los gastos de operación y cálculos financieros	11/05/2023	12/05/2023	Darío	100%	
Terminar de comprar materiales gastables y	14/05/2023	31/05/2023	Darío	100%	

pedir los equipos restantes					
Documentación					
Fase 2 - Introducción					
Preparar estructura del documento	15/05/2023	17/05/2023	Darío	100%	
Redactar antecedentes del problema	17/05/2023	19/05/2023	Darío	100%	
Redactar antecedentes del proyecto	20/05/2023	22/05/2023	Darío	100%	
Redactar Descripción del problema	23/05/2023	25/05/2023	James	100%	
Planteamiento inicial de la solución	26/05/2023	27/05/2023	James	100%	
Objetivos justificación y limitaciones del proyecto	28/05/2023	28/05/2023	James	100%	
Fase 3 - Capítulo I					

Redactar Marco Teórico	30/05/2023	01/06/2023	James	100%	
Redactar Glosario y Términos	02/06/2023	04/06/2023	James	100%	
Revisar avance de redacción del Capítulo II	04/06/2023	05/06/2023	Darío	100%	
Fase 4 - Capítulo II					
Redactar la definición del proyecto	05/06/2023	07/06/2023	James/Darío	100%	
Redactar productos del proyecto	08/06/2023	13/06/2023	James/Darío	100%	
Cronograma del proyecto	05/05/2023	12/05/2023	James/Darío	100%	
Redactar plan de administración de riesgo	15/06/2023	19/06/2023	James/Darío	100%	
Presupuesto	20/06/2023	23/06/2023	James/Darío	100%	
Definición de demostración	23/06/2023	25/06/2023	James	100%	

Análisis y diseño	25/06/2023	26/06/2023	Darío	100%	
Revisar avance del capítulo II	26/06/2023	27/06/2023	Darío	100%	
Fase 5 - Prototipo					
Instalación de paquetes o frameworks para la programación	28/06/2023	30/06/2023	James/Darío	100%	
Capacitación suplementaria para el proyecto: JSON, Python, EMOTIV GUI, Arduino, C++	28/05/2023	1/07/2023	James/Darío	100%	Esta capacitación está siendo utilizada para poder trabajar de manera eficaz y mejorar las habilidades
Identificar actualizaciones de firmware o actualizar los equipos	02/07/2023	04/07/2023	James/Darío	100%	

Familiarización con el entorno EMOTIV	4/07/2023	7/07/2023	James/Darío	100%	
Creación de la interfaz del aplicativo local	8/07/2023	16/07/2023	James/Darío	100%	
Enlace de EMOTIV Insight 2.0 con el aplicativo local	17/07/2023	20/07/2023	Darío	100%	
Muestreo de comandos mentales en la interfaz	21/07/2023	21/07/2023	James/Darío	100%	
Fase 6 - Proyecto 2					
Enlace del Crazyflie 2.1 con la información del aplicativo local	27/09/2023	03/10/2023	James	100%	
Pruebas de vuelo del dron junto al Insight 2.0	03/10/2023	10/10/2023	James/Darío	100%	

Calibración de los comandos mentales	17/10/2023	24/10/2023	Darío	100%	Se tratará de ver el delay que existe entre todos los equipos con los comandos mentales
Revisiones de códigos y pruebas	24/11/2023	30/11/2023	Darío	100%	
Conclusiones de los vuelos	01/11/2023	02/11/2023	James/Darío	100%	
Corrección de detalles	03/11/2023	05/11/2023	James/Darío	100%	
Selección de lugar para presentación del vuelo	05/11/2023	06/11/2023	James/Darío	100%	
Ensayo de presentación de proyecto	06/11/2023	07/12/2023	James/Darío	100%	

2.4. Plan de Administración de Riesgos

Un riesgo que tomar en cuenta es la fragilidad que suelen tener los drones, ya que este dron al ser pequeño y tener poco peso, es muy propenso a que choque con alguna pared, árbol u objeto.

Para esto estamos planeando realizar el vuelo de presentación en un aula espaciosa, dentro de un límite de espacio para que el dron no exceda X distancia de vuelo.

Otro sería el estrés, las ondas cerebrales son muy sensibles ante situaciones en la que la mente no está relajada, lo cual crea imprecisión de los comandos mentales y puede ser que cuando estés pensando en subir este no haga nada o interprete otro comando.

Electrodos de la diadema, el material lubricante que se está usando es basado en sodio y sal, resulta que este componente o lubricante si llega a contactar la parte metálica que posee puede sulfatarlos.

2.4.1. Enfoque metodológico para evaluación de riesgos

Un plan de respuesta a los riesgos sería lo siguiente:

Volar el dron en un área segura, puede ser un laboratorio de los que están en construcción aun, debido a que no hay obstáculos, además de tratar de limitar la distancia de vuelo que puede recorrer para que así en caso de quedaros enganchados con un comando no siga volando hasta que se estrelle.

Para el día de la presentación, tratar de dormir bien para evitar percances por falta de concentración y que la interfaz no malinterprete los comandos mentales. Los ensayos de vuelo deberán hacerse al menos una semana antes de presentar, para así practicar bien y entender que vuelo le podríamos hacer.

No hay otra opción que seguir usando el gel, ya que permite buena conductividad entre los electrodos/sensores y el cráneo, la medida a tomar es que después de cada práctica o uso de la diadema, hacer una limpieza para que el gel no los corra.

2.4.2. ¿Cómo manejará sus riesgos?

Para este proyecto se aceptará el riesgo planteado, teniendo en cuenta un plan de acción a este posible problema, en el mejor de los casos todo funcionará de manera correcta, pero al tomar en cuenta estos riesgos se planea lo siguiente:

- Evitar el uso de dispositivos electrónicos que crean interferencia por la RF.
- Período de descanso al usar el dispositivo electroencefalógrafo.
- Manejar el dispositivo en una zona segura que no provoque choques.
- Limitaciones de vuelo (No permitir que se vaya lejos volándolo).
- Medida de seguridad física para el equipo.

2.5 Presupuesto

PRESUPUESTO				
Descripción	Cantidad	Costo por unidad (US\$)	Total (RD\$)	Total (US\$)
EMOTIV Insight 2.0	1	US\$489.05	RD\$27,631.33	US\$489.05
Dron Crazyflie 2.1 (Prestado por la PUCMM)	1	US\$225.00	RD\$12,712.50	US\$225.00
Licencia EMOTIVPRO (Student)	1	US\$29.00	RD\$1,638.50	US\$29.00
Crazyradio 2.0	1	US\$40.00	RD\$2,260.00	US\$40.00
Flow deck v2	1	US\$50.00	RD\$2,825.00	US\$50.00
Gel lubricante ALFA 120GRS	1	US\$3.98	RD\$225.00	US\$3.98
Hélices extras	1	US\$6.00	RD\$339.00	US\$6.00
			RD\$47,631.33	US\$843.03

Tabla 2. Presupuesto, a una tasa de cambio de \$56.50 dólares.

2.6 Definición de la demostración

Este proyecto será mostrado en un lugar cerrado preferiblemente entre el multi usos o un salón de clases espacioso que no cuente con tantos obstáculos para que este vuele sin problemas, además de esto se espera que por medio de los comandos mentales se vea evidenciado que el dispositivo puede ser operado remotamente. En adición, la interfaz perteneciente al aplicativo local demostrara en tiempo real las acciones que el usuario está pensando, demostrando así la efectividad del proyecto.

2.7 Análisis y Diseño

En este acápite se muestran los diagramas correspondientes al diseño del sistema planteado.

2.7.1. Análisis

En el diagrama #1, se muestran la composición del proyecto según las tres partes necesarias para su funcionamiento: la diadema Insight 2.0, la API de Cortex y la API de Bitcraze.

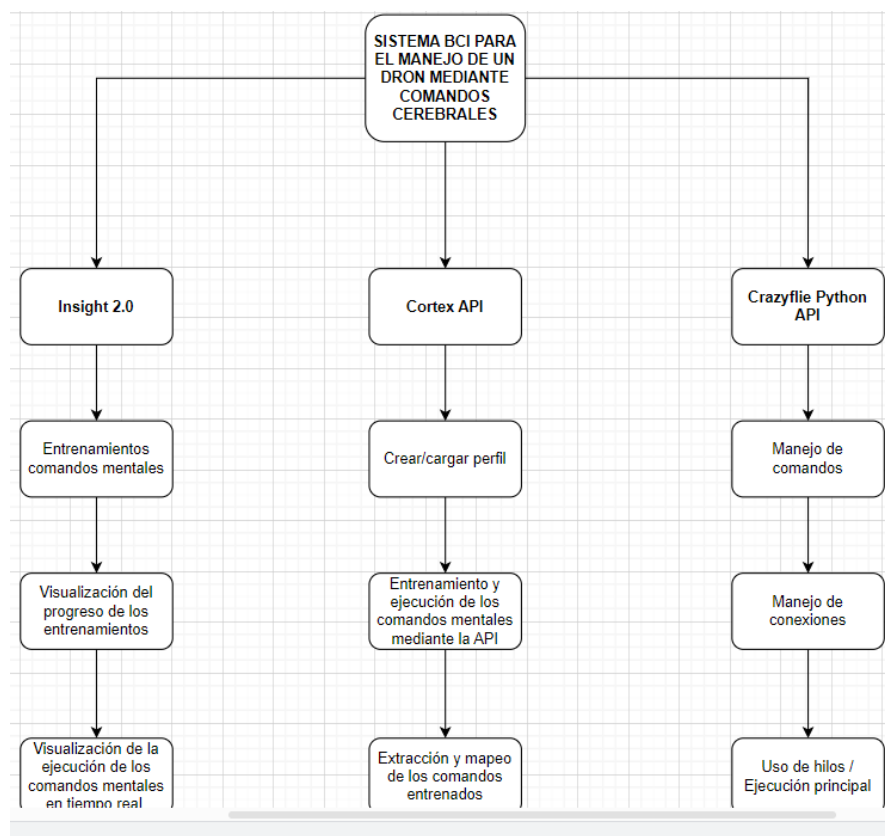


Diagrama #1. Esquema de análisis del sistema.

2.7.2. Diseño

En el diagrama #2, se ilustra la comunicación existente entre los componentes o partes esenciales en el proyecto, tales como: el Insight 2.0 para los entrenamientos de los comandos mentales y captura de la data EEG generada en tiempo real, el software provisto por EMOTIV para los entrenamientos (EMOTIVBCI), las APIs de Cortex y Bitcraze, el dongle y el Crazyflie 2.1.

En primera instancia, se conecta el Insight 2.0 mediante Bluetooth 5.0.0 al computador, luego el sujeto se coloca la diadema, se realiza una calibración de los sensores, de tal modo que la calidad sea 95% o mayor. Luego, mediante el EMOTIV Launcher, se inicia el software EMOTIVBCI, el cual es el encargado de los entrenamientos de los comandos mentales. Mediante la API de Cortex, se adquieren los datos EEG, utilizando las credenciales otorgadas por EMOTIV. Por otro lado, dentro de la API de Bitcraze, se programan las instrucciones necesarias para que el Crazyflie 2.1 ejecute los comandos recibidos de la manera deseada. Ya teniendo esto listo, para comunicar ambas APIs, y enviar los comandos mentales generados por el Insight 2.0, se implementa un websocket en cada API. Por último, el aplicativo local, registra y muestra los comandos mentales que se están ejecutando en tiempo real por el sujeto, y los va mostrando en el computador.

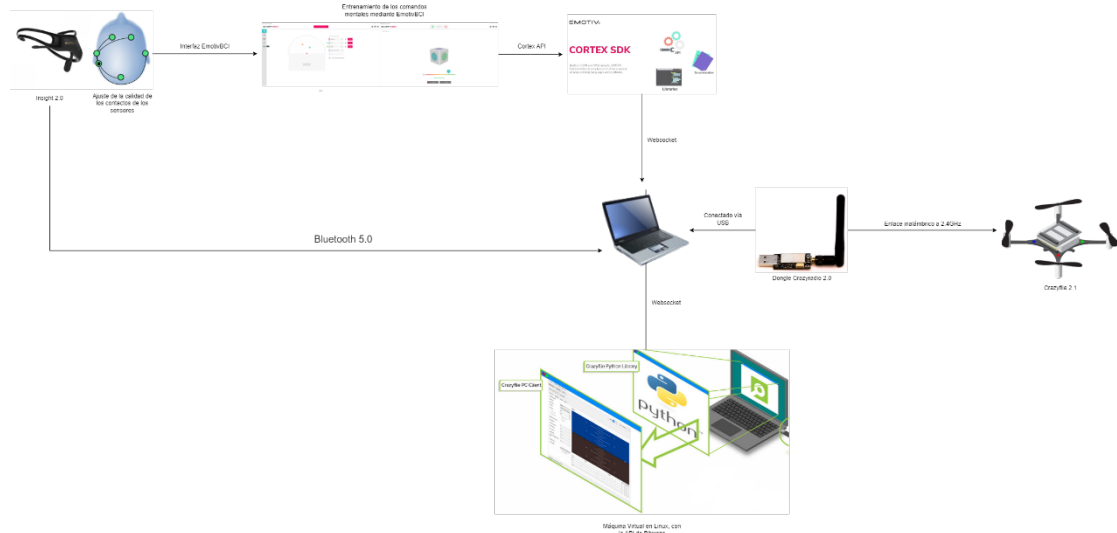


Diagrama #2. Esquema de comunicación del sistema.

DESARROLLO E IMPLEMENTACION

Desarrollo e Implementación

La diadema Insight 2.0 como medio de comunicación utiliza Bluetooth 5.0. Dicha diadema posee una suite de programas proporcionados por la compañía EMOTIV, los cuales una vez instalados, dan cabida al manejo de esta. Para trabajar con el kit de desarrollo de software, y respectivamente, con su API, denominada Cortex SDK, se requiere instalar una serie de dependencias requeridas en base a que lenguaje de programación se quiera usar, en este caso, se eligió Python. Este mismo proceso aplica para lo que es el dron Crazyflie 2.1, debido a que se requiere de instalar un controlador, además una máquina virtual proporcionada por Bitcraze, la cual posee la API integrada y facilita la integración.

El dron a su vez requiere de un dongle de radio USB, el cual permite establecer una buena conexión para controlar el Crazyflie 2.1 desde la computadora. Para conseguir un vuelo estable, se utiliza un accesorio denominado Flow deck v2, el cual está equipado con un sensor óptico de flujo, que permite al dron realizar tareas de posicionamiento y vuelo estacionario.

Ambas APIs están enlazadas por vía de un socket que va dirigido por una dirección IP y un puerto; en el lado del Insight 2.0, se realiza un promedio de comandos, debido a que este va capturando cada 0.125 segundos, luego toma una muestra de cuarenta comandos que equivale a ocho segundos y se manda la palabra que más se repita en ese flujo de datos como si fuere un solo comando.

En el otro lado del Crazyflie 2.1, se tiene un hilo que se mantiene ejecutándose, es decir, esperando el comando, y al recibirlo, ejecuta un movimiento hasta una distancia “X” medida en centímetros, así mismo se tiene implementado un límite de comandos hacia una dirección, y esa restricción dependerá del escenario donde se quiera volar el dron. A su vez, el usuario tiene una interfaz bastante eficaz y fluida, proporcionada por uno de los programas de la suite de EMOTIV, llamado EMOTIVBCI, la cual muestra automáticamente un cubo que se va moviendo en tiempo real, según el usuario vaya deseando, dígame, respecto a que pensamiento y/o comando mental desea efectuar.

En el código del lado del dispositivo EMOTIV (EEG EMOTIV Insight 2.0), hay varias partes importantes que juegan roles fundamentales en la comunicación y el

procesamiento de los comandos mentales para controlar el dron, dentro de los cuales se pueden enumerar los siguientes:

- **Función `on_new_com_data`:** Esta función maneja los datos de los comandos mentales recibidos desde el dispositivo EMOTIV Insight 2.0. Aquí se procesan los datos emitidos por Cortex y se extrae la información sobre el comando mental capturado.
- **Envío de comandos a través del socket:** La función *envioporsocket* es crucial, ya que envía los comandos recogidos desde el dispositivo EMOTIV Insight 2.0 a una dirección IP y puerto específicos a través de un socket. Estos comandos son luego recibidos por el servidor (Crazyflie 2.1) para controlar el dron.
- **Lógica de procesamiento de comandos:** Hay una lógica de procesamiento en el código que parece verificar si se han recibido suficientes comandos de cierto tipo antes de enviar el comando a través del socket. Esta lógica determina la mayoría de los comandos recibidos y envía el comando más frecuente al dron. Es importante revisar esta lógica para asegurarse de que la interpretación de los comandos sea precisa y útil para el control del dron.
- **Uso de threads:** El código se ejecuta en un hilo separado para manejar la conexión del dispositivo EMOTIV y la lógica de procesamiento de datos. Esto puede ser importante para asegurar que la recepción y procesamiento de los comandos no interfieran con otras operaciones en el sistema.
- **Interfaz con el dron:** La comunicación a través del socket es fundamental para la interacción entre el dispositivo EMOTIV y el dron. Los comandos enviados a través del socket se reciben y procesan en el servidor (Crazyflie 2.1) para controlar el movimiento del dron basado en los comandos mentales capturados.

Funcionamiento del código desde el lado de la diadema Insight 2.0

Inicialización del websocket

Este bloque de código define una función llamada *envioporsocket* que toma un comando como argumento y lo envía a través de un socket TCP a una dirección IP (192.168.1.123) y un puerto (5000). Utiliza la librería socket de Python para crear un socket, establecer una conexión al servidor especificado, y enviar el comando utilizando *s.sendall(comando)*.

```
def envioporsocket(self,comando): #Aqui seremos el cliente, el servidor sera la VM
    host = '192.168.1.123'
    port = 5000
    with socket.socket(socket.AF_INET, socket.SOCK_STREAM) as s:
        s.connect((host, port))
        s.sendall(comando)
```

Ilustración 3. Inicialización del websocket desde el lado de la diadema.

Manejo de las funciones para el manejo de los datos

La función *on_new_com_data*, se encarga de manejar los datos de los comandos mentales recibidos desde el dispositivo EMOTIV Insight 2.0. Cuando se recibe un nuevo *dato (data)*, se extrae el comando (*'action'*) y se convierte a minúsculas.

Luego, se agrega el comando a un historial (*self.command_history*) y se verifica si ha pasado suficiente tiempo desde la última acción impresa en la consola (8 segundos en este caso). Si es así, cuenta la cantidad de veces que aparece cada palabra clave (*self.target_words*) en el historial de comandos.

Si una palabra clave ocurre al menos 20 veces en las últimas 40 muestras, se considera como la acción predominante. Entonces se guarda en un archivo CSV (*self.guardar_datos_en_csv*) y se imprime en la consola. Después, se codifica el comando en **UTF-8** y se envía a través de *envioporsocket*.

```
def on_new_com_data(self, *args, **kwargs):
    """
    To handle mental command data emitted from Cortex

    Returns
    -----
    data: dictionary
        the format such as {'action': 'neutral', 'power': 0.0, 'time': 1590736942.8479}
    """
    data = kwargs.get('data')
    #print(data['mc data: {}'.format(data)])
    if data:
        # self.guardar_datos_en_csv(data, 'C:/Users/James/Desktop/cortex-v2-example-master/datos.txt')

        # Agregar el comando actual al historial
        command = data.get('action', '').lower() # Asegurarse de que la primera letra esté en mayúscula
        self.command_history.append(command)

        # Verificar si ha pasado al menos 8 segundos desde la última impresión
        current_time = time.time()
        if current_time - self.last_print_time >= 8:
            # Contar la cantidad de veces que aparecen las palabras objetivo
            counts = {word: self.command_history.count(word) for word in self.target_words}
            # Verificar si la mayoría de los comandos son alguna de las palabras objetivo
            majority_word = max(counts, key=counts.get)
            majority_count = counts[majority_word]

            if majority_count >= 20: # Si 20 o más de las últimas 40 muestras son de alguna palabra objetivo
                self.guardar_datos_en_csv(majority_word, 'C:/Users/James/Desktop/cortex-v2-example-master/datos.txt')
                print(f"La mayoría de los comandos son: {majority_word}")
                comando = majority_word
                comando_encoded = comando.encode('utf-8')
                """self.command_queue.put(comando_encoded)
                sender = SocketSender(host="192.168.1.123", port=5000)
                sender.start()
                while not self.command_queue.empty():
                    message = self.command_queue.get()
                    sender.send_message(message)"""

                self.envioporsocket(comando_encoded)
                self.last_print_time = current_time # Actualizar el registro del último momento de impresión
```

Ilustración 4. Funciones importantes del código del lado de la diadema.

Funcionamiento del código desde el lado del Crazyflie 2.1

Configuración del Socket del Servidor

- Se importan los módulos necesarios: socket, time, Queue y varios módulos de cflib para la interacción con el dron Crazyflie 2.1.
- Se define el URI del Crazyflie 2.1 (URI = uri_helper.uri_from_env(default='radio://0/80/2M/E7E7E7E7E7')) y se configura un Queue para almacenar los comandos que se recibirán.
- Se configura un socket de servidor (server_socket) que escucha en la dirección IP 0.0.0.0 y el puerto 5000 para recibir comandos del cliente.

```
# Importa los módulos necesarios
import socket
import time
from queue import Queue
import cflib.crtip
from cflib.crazyflie import Crazyflie
from cflib.crazyflie.syncCrazyflie import SyncCrazyflie
from cflib.positioning.motion_commander import MotionCommander
from cflib.utils import uri_helper
import threading

# Configura el URI del Crazyflie
URI = uri_helper.uri_from_env(default='radio://0/80/2M/E7E7E7E7E7')
comandos_queue = Queue()

# Configurar el socket
server_socket = socket.socket(socket.AF_INET, socket.SOCK_STREAM)
server_socket.bind(('0.0.0.0', 5000))
server_socket.listen(1)
print("Servidor socket activo. Esperando comandos...")
```

Ilustración 5. Inicialización del websocket desde el lado del dron.

Funciones para manejar comandos y conexiones

manejar_comandos(): Este hilo o función maneja los comandos que se recibirán del cliente y controlará el dron. Dentro de un bucle infinito, obtiene comandos de la cola (comandos_queue) y ejecuta acciones en el dron según los comandos recibidos.

manejar_conexion(): Este hilo o función maneja las conexiones entrantes de los clientes. Acepta conexiones entrantes, recibe comandos del cliente a través del socket

y los coloca en la cola `comandos_queue` para su procesamiento por el hilo `manejar_comandos`.

Función para manejar comandos

- La función `manejar_comandos()` maneja los comandos que se recibirán y controla el dron Crazyflie 2.1.
- Se inicializa una conexión con el Crazyflie 2.1 (`SyncCrazyflie 2.1`) y se crea un `MotionCommander (mc)` para controlar el dron.
- El dron despegue (`mc.take_off()`) y luego entra en un bucle infinito para recibir y procesar comandos.
- La función extrae un comando de la cola (`comandos_queue`) y ejecuta acciones específicas en el dron según el comando recibido. Por ejemplo, si se recibe "neutral", el dron se detiene.

```
def manejar_comandos():
    with SyncCrazyflie(URI, cf=Crazyflie(rw_cache='./cache')) as scf:
        mc = MotionCommander(scf)
        mc.take_off()
        while True:
            # Obtener el próximo comando de la cola
            command = comandos_queue.get()

            # Procesar y ejecutar el comando
            if command == "neutral":
                print("No hago nada")
                mc.stop()

            elif command == "right":
                mc.right(0.5)
                print("Girando a la derecha")
            elif command == "left":
                mc.left(0.5)
                print("Girando a la izquierda")
            else:
                mc.land()
```

Ilustración 6. Función para manejo de los comandos.

Función para manejar conexiones

- La función `manejar_conexion()` maneja las conexiones entrantes de los clientes.
- Dentro de un bucle infinito, acepta las conexiones entrantes (`server_socket.accept()`), espera comandos del cliente y los coloca en la cola `comandos_queue` para ser procesados por `manejar_comandos()`.
- Cuando no se reciben más datos del cliente, el cliente se desconecta y el socket se cierra.


```

def manejar_conexion():
    while True:
        # Aceptar una conexión
        client_socket, client_address = server_socket.accept()
        print("Cliente conectado desde:", client_address)

        while True:
            # Recibir el comando
            command_bytes = client_socket.recv(1024)
            if not command_bytes:
                break # Si no se reciben datos, salimos del bucle interno

            command = command_bytes.decode('utf-8')
            print(f"Comando recibido: {command}")

            # Añadir el comando a la cola
            comandos_queue.put(command)

        print("Cliente desconectado.")
        client_socket.close()

```

Ilustración 7. Función para manejo de conexiones.

Inicio de hilos y ejecución principal

El código principal verifica si se está ejecutando directamente (`__name__ == '__main__'`) e inicializa los controladores de Crazyflie 2.1.

Luego, se inician dos hilos: uno para manejar las conexiones (`manejar_conexion`) y otro para manejar los comandos y controlar el dron (`manejar_comandos`).

```

# Iniciar los hilos

if __name__ == '__main__':
    cflib.crtp.init_drivers()
    threading.Thread(target=manejar_conexion).start()
    threading.Thread(target=manejar_comandos).start()

```

Ilustración 8. Uso de hilos y ejecución principal.

Armado del Crazyflie 2.1

El Crazyflie 2.1 viene completamente desarmado, por lo tanto, a la hora de armarse hay que tomar en cuenta muchas cosas para que no influyan de manera negativa en la estabilidad del vuelo.



Ilustración 9. Chasis del Crazyflie 2.1.

Aquí se tiene lo que es la plataforma del dron. Antes de comenzar a ensamblar, se realiza la prueba de energía conectando el Crazyflie 2.1 a una fuente de alimentación USB. Los LED M1 y M4 indicarán el resultado de la prueba. Si el LED M4 parpadea en VERDE cinco veces rápidamente, entonces la prueba ha finalizado.

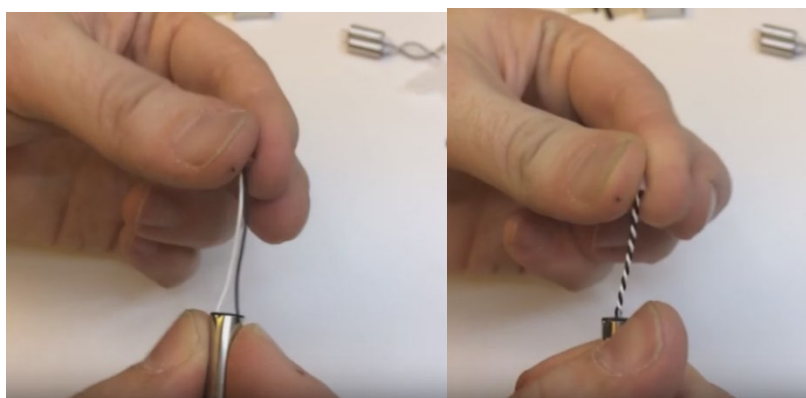


Ilustración 10. Motores del dron y cables trenzados para armado.

Esto reduce el ruido electrónico y hará que los cables encajen mejor en los “ganchos” del soporte del motor.

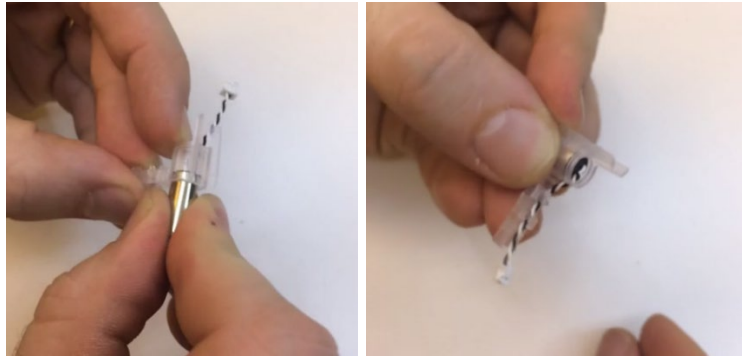


Ilustración 11. Montaje de las patas.

Se necesita fuerza para instalarlos, se debe intentar colocar la lata del motor hacia el borde de una mesa y presionar el soporte, con cuidado evitar presionar el eje del motor mientras los inserta, ya que podría dañar el motor.

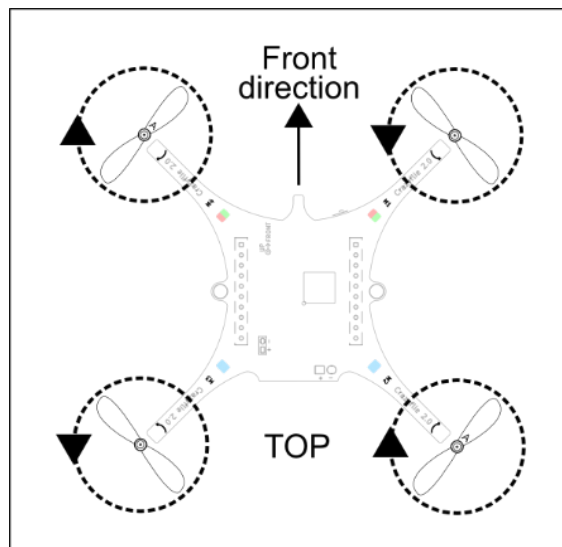


Ilustración 12. Sentido de las hélices y esquemático.

Aquí se presenta un esquemático del dron definiendo en qué dirección giran los motores y sentido.



Ilustración 13. Hélices puestas.

Para evitar que las hélices se rompan con demasiada facilidad, no se puede empujar la hélice hasta el fondo del eje. En lugar de eso, deténgase cuando la fuerza aumente y mantenga la hélice en su lugar.



Ilustración 14. Conexión de batería y armado final.

Se coloca la batería entre las puntas insertadas en el conector de expansión y se inserta la placa del soporte de la batería en los pines.

Balanceo de Hélices

Esto suele deberse a que todas estas piezas son impresas 3D y suelen tener muchas irregularidades al ser fabricadas, provocando así que el dron no sea completamente estable.

Se necesitaría:

- Un pequeño alfiler o aguja redonda.
- Cinta. La cinta transparente normal funciona bien.
- Un par de tijeras.

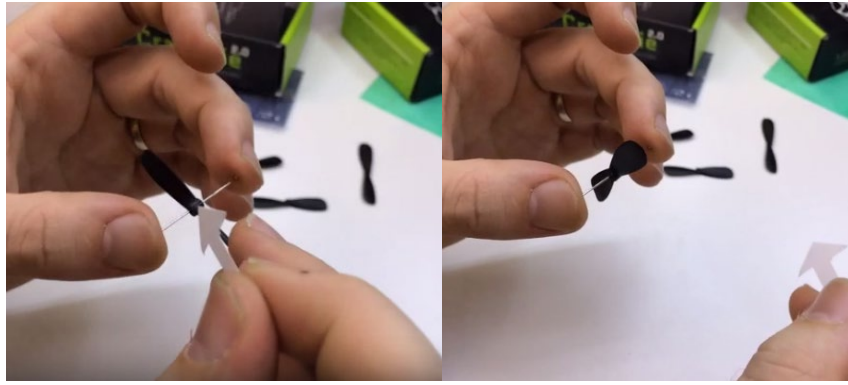


Ilustración 15. Comprobación de las hélices.

Se empieza comprobando si la hélice está bien equilibrada. Ponemos esto en una hélice con una aguja. Manteniendo la hélice en posición horizontal y luego soltándola. Si se inclina, está desequilibrada. Equilibre la hélice colocando un pequeño trozo de cinta en el lado que apunta hacia arriba.

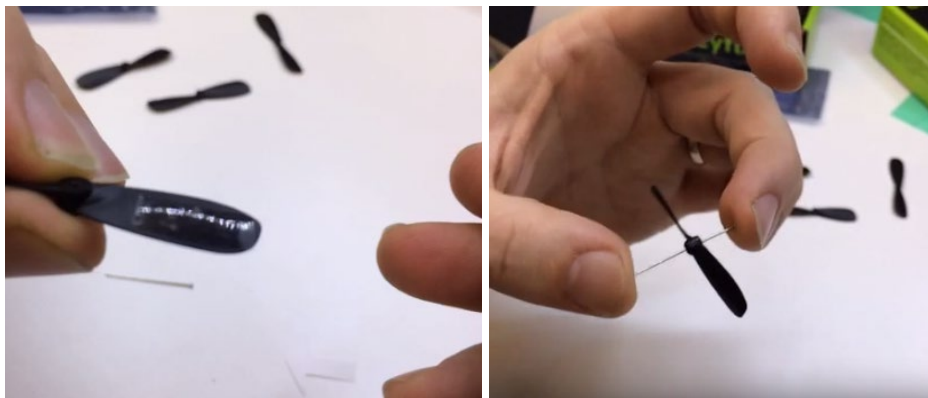


Ilustración 16. Hélices bien balanceadas.

Si la hélice está desequilibrada, se pone cinta en el lado convexo de la hélice. La cantidad de cinta que se debe usar varía y es posible que necesites algunos pedazos para encontrar la cantidad correcta. ¡Cuando se quede horizontalmente estable quiere decir que estamos listos!

Mantenimiento del Insight 2.0

A medida que se fue trabajando con el Insight 2.0 nos dimos cuenta de que el equipo y sus componentes sufren desgaste a medida que se va utilizando, puntualmente los electrodos, estos están compuestos de una goma de color transparente, interiormente están compuestos de cobre y exteriormente de plástico. Mientras el usuario lo usa con

[illegible]

el líquido se acabe, se puede recurrir a alternativas que contengan las indicaciones que el proporcionado por EMOTIV, en nuestro caso, se usó el llamado ALFA.

Este líquido que se puede apreciar en el kit, este compuesto de sales, gel, glicerol y sodio, es muy importante su aplicación, ya que ayuda a la buena conducción de las señales cerebrales, pero a la larga corroe los electrodos. Para evitar esto, se recomienda que luego de una sesión, limpiarlos con alcohol y guardarlos, así se evita que se oxiden y se pongan verdosos, como se puede apreciar en las siguientes imágenes.



Ilustración 19. Comparación de diademas con electrodos corroídos.

Aquí tenemos dos diademas de la misma marca, uno blanco y otro negro, siendo el de la derecha el nuestro, podemos apreciar que en el blanco los electrodos poseen algo verdoso que les rodea y eso es producto del uso del líquido/gel sin limpiarlos luego de usarlos. Nuestra diadema en cambio posee los electrodos limpios y transparentes, ya que son nuevos y recién cambiados.



Ilustración 20. Vista superior de la diadema con electrodos corroídos.



Ilustración 21. Electrodo cambiados en nuestra diadema.

Aquí podemos apreciar los repuestos cambiados, demostrando que evidentemente están en mal estado, obviamente esto afecta los entrenamientos de los comandos mentales, y consecuentemente, el uso durante las pruebas de vuelos con el dron.

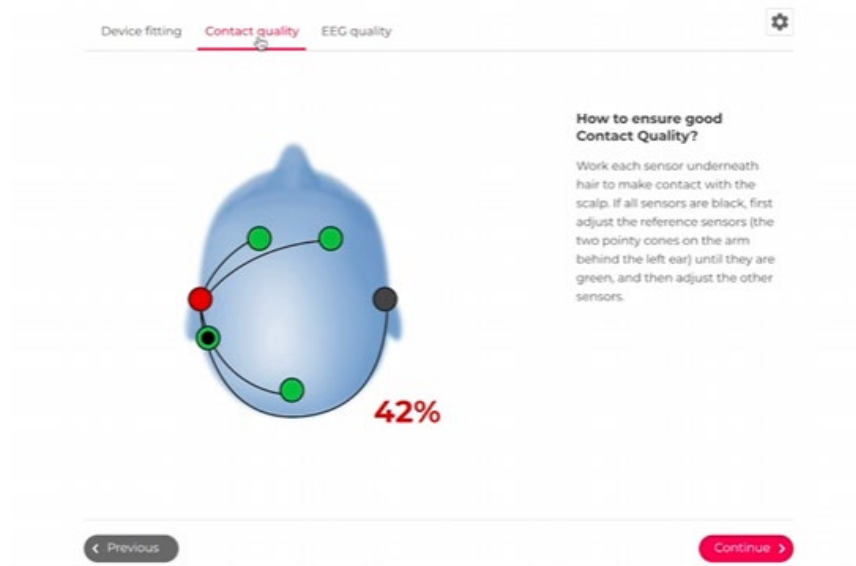


Ilustración 22. Calidad común cuando se tiene electrodos en mal estado.

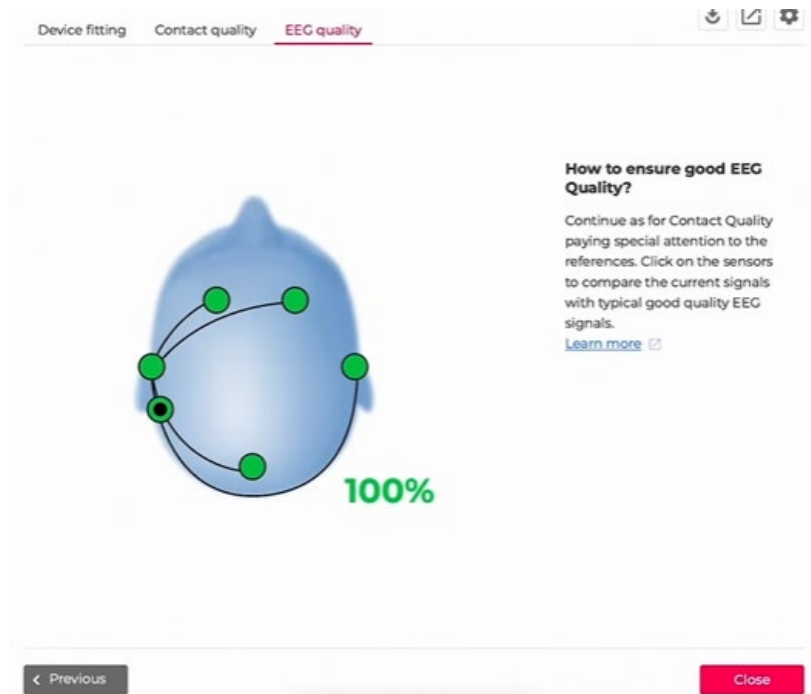


Ilustración 23. Calidad común cuando se tiene electrodos en perfecto estado.

Entrenamientos de los comandos mentales

La diadema Insight 2.0, permite el entrenamiento de los comandos mentales mediante un software proporcionado por la misma empresa (EMOTIV), denominado EMOTIVBCI, el cual es permite ver y entrenar los flujos de datos EMOTIV utilizados para BCI (Brain – Computer Interface). Estos flujos de datos incluyen:

- **Los comandos mentales**, los cuales permiten un control activo con pensamientos específicos que el usuario ha entrenado al sistema para reconocer.
- **Las métricas de rendimiento** permiten un control pasivo y continuo basado en su estado cognitivo en tiempo real, incluidas mediciones de concentración, entusiasmo, interés, compromiso, estrés y relajación. [9]

Además, de estos flujos de datos, hay dos más adicionales, los cuales son:

- **Las expresiones faciales**, desencadena eventos con movimientos de los músculos faciales y oculares. No se requiere capacitación, pero el usuario puede entrenar algunas expresiones para que sean más precisas y personalizadas. [9]
- **Los sensores de movimiento**, capturar los movimientos de la cabeza y pueden aplicarse para mover mouse o activar otros comandos. [9]

En este proyecto, el enfoque es el entrenamiento y uso de los comandos mentales. Por ende, aquí se explica su funcionamiento:

El algoritmo de EmotivBCI funciona mediante reconocimiento de patrones y requiere que el usuario entrene al menos un estado ‘neutral’, y un estado de ‘Comando’. El sistema aprende a reconocer los patrones de actividad cerebral relacionados con su estado de comando, en comparación con su estado neutral. Aunque se puede comenzar a usar un perfil después de entrenar un comando solo una vez, es recomendable repetir los entrenamientos para comando tantas veces sea necesario, hasta lograr la precisión deseada (el comando ‘neutral’ también es requerido entrenarlo varias veces, se recomienda el doble de las veces que se han entrenado los demás comandos). Es decir, cuantos más entrenamientos se hagan, mejor podrá el sistema detectar el patrón de actividad cerebral asociado con el pensamiento. [9]

Dentro de los comandos asociados a EMOTIVBCI, se encuentran incluidos: Empujar, Tirar, Izquierda, Derecha, Arriba, Abajo, Girar, Desaparecer. Dichos comandos pueden ser practicados en el ‘modo en vivo’, y recibir una retroalimentación sobre si está funcionando correctamente o no. [9]

Como ya se mencionó anteriormente, antes de poder entrenar cualquier comando, se necesita entrenar un estado neutral. La actividad cerebral neutral se utilizará como contraste con la actividad cerebral del usuario durante los entrenamientos de otros comandos. Lo más importante es que no piense en ningún otro comando que no sea neutral. Aparte de eso, puede pasar el rato relajado y dejar que la mente divague. [9]

Consejos para obtener unos resultados óptimos durante los entrenamientos:

Elegir tu pensamiento: El pensamiento en el que entrenar y utilizas para tus ordenes mentales puede ser cualquier cosa. Pueden ser literales (es decir, puedes intentar concentrarte en empujar la caja virtual) o pueden ser abstractos como quieras (es decir, donde empujar este asociado con visualizar una escena o contar hacia atrás desde 500 en pasos de 7). Las posibilidades son infinitas. Diferentes estrategias funcionan mejor para diferentes personas, así que el usuario se puede sentir libre de probar la que desee. [9]

Si está entrenando un perfil con un comando, querrá que ese comando sea lo más fuerte y distinto posible. Una forma de lograrlo es utilizar algo que sea multimodal, es decir, algo que contenga diferentes componentes sensores y cinemáticos (relacionados con los movimientos de los músculos) todos juntos. Si tiene una fuerte disposición hacia cualquiera de estas modalidades (por ejemplo, es músico, y, por lo tanto, puede imaginar fácilmente sonidos auditivos), es posible que centrarse en esta única modalidad funcione mejor para ese tipo de persona. [9]

Si está entrenando un perfil con múltiples comandos, es posible que obtenga mejores resultados si cada uno de sus comandos utiliza una modalidad sensorial o cinemática única (por ejemplo, una que sea visual, una auditiva y otra cinemática). Lo más importante es que son distintos entre sí y que puedes recrearlos con precisión en tu mente repetidamente. [9]

También una opción sería asociar diferentes gestos o posturas de las manos con un comando puede ayudar a reproducirlos mejor. [9]

Tomar en cuenta que:

Cuanto más comandos haya en un perfil, más difícil será activarlos de forma independiente. Para obtener mejores resultados, recomendamos tener confianza con un comando antes de probar un perfil con dos, y para tener confianza con dos comandos antes de probar un perfil con tres, etc. [9]

Secuencia de entrenamiento: si estás entrenando un perfil con un comando, se recomienda alternar el entrenamiento del comando con el entrenamiento del estado neutral. Esto proporcionará el mejor contraste para su perfil. [9]

Si planea desarrollar un perfil con múltiples comandos, le recomendamos agregar todos los comandos en una etapa temprana del proceso de capacitación, en lugar de perfeccionar un comando antes de agregar los demás. De esta forma se podrá, desde el principio, asegurarse de que los comandos estén bien separados entre sí y funcionen bien juntos. Es posible que recorrerlos en secuencia para entrenar dará un mejor resultado. [9]

Entrenamiento del primer comando

Una vez que se haya entrenado el comando neutral, el usuario estará listo para entrenar el primer comando. Los comandos son pensamientos que se recrearan en la mente cuando se quiera desencadenar la acción asociada a ellos. El objetivo es realizar pensamientos que sean: [9]

(1) Reproducible, para que pueda crear el mismo “estado cerebral” según sea necesario, y (2) separable (si su perfil contiene más de un comando), para que los algoritmos de aprendizaje automático del sistema puedan reconocer fácilmente cada acción y distinguirlas entre sí. [9]

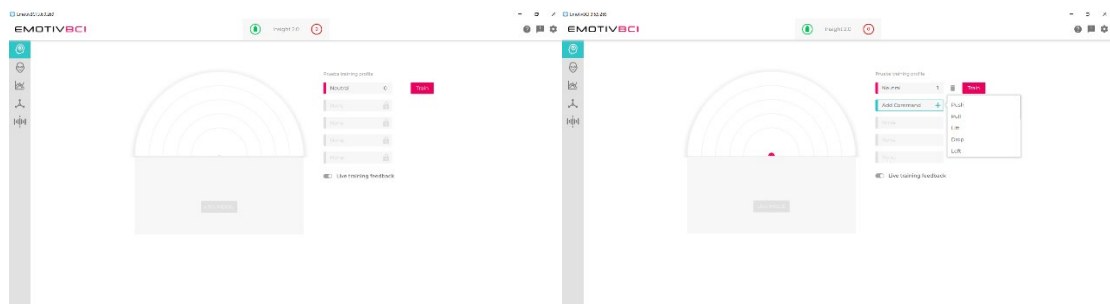


Ilustración 24. Entrenamiento del primer comando.

Aceptar o rechazar la formación

El usuario tiene la opción de Aceptar o Rechazar cada entrenamiento que realice. Las capacitaciones aceptadas se agregarán al perfil actual, y el perfil se actualizará inmediatamente. Las capacitaciones rechazadas se descartarán y no se agregarán a su perfil. [9]

Las dos primeras capacitaciones de cada perfil sentaran las bases de su perfil. Si cree que puede mantener adecuadamente su pensamiento de comando en su mente durante cada uno de estos dos entrenamientos, seleccione Aceptar. De lo contrario, puede seleccionar Rechazar e intentar nuevamente. [9]

Comentarios de entrenamiento

Después de dos entrenamientos de comando, la aplicación (EMOTIVBCI) proporciona comentarios sobre cada entrenamiento para ayudarlo a identificar un buen entrenamiento de uno malo e informar su decisión de aceptarlo o rechazarlo. Estos comentarios se muestran en una escala del 1 al 100, y se basan en que tan consistente

es la capacitación que acaba de realizar con las capacitaciones anteriores de su perfil.
[9]

El marcador de meta (en el 75%) indica donde aterrizaría un buen entrenamiento. Cualquier entrenamiento por encima del objetivo es muy probable que mejore tu perfil. Cualquier entrenamiento significativamente por debajo del objetivo probablemente reduzca la calidad de su perfil. Si obtiene puntuaciones bajas repetidamente, es posible que desee comenzar de nuevo con otra estrategia. Un pensamiento diferente puede resultarle más fácil para reproducir el resultado de forma más consistente en su mente.
[9]

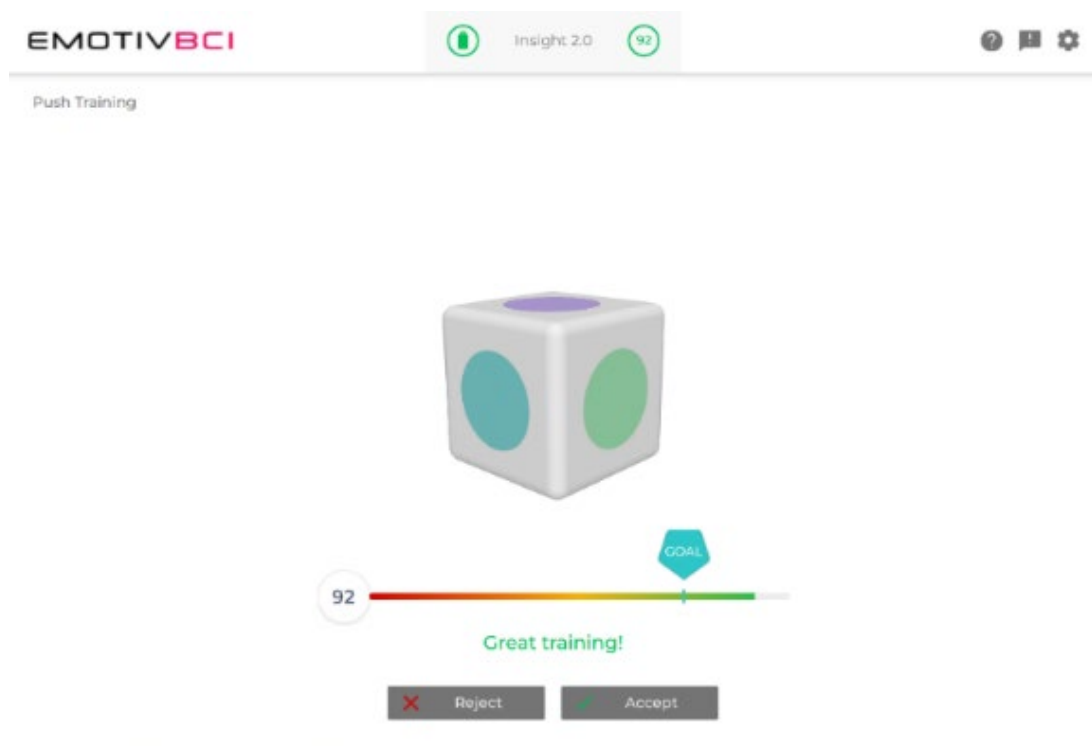


Ilustración 25. Comentarios durante el entrenamiento.

Nivel de comando

Cada vez que el usuario acepta un comando y se agrega a su perfil, este comando aumentara su nivel en uno. Los niveles de comando aparecen al lado del cuadro de comando en la pantalla comandos mentales y son iguales a la cantidad de entrenamientos aceptados. [9]

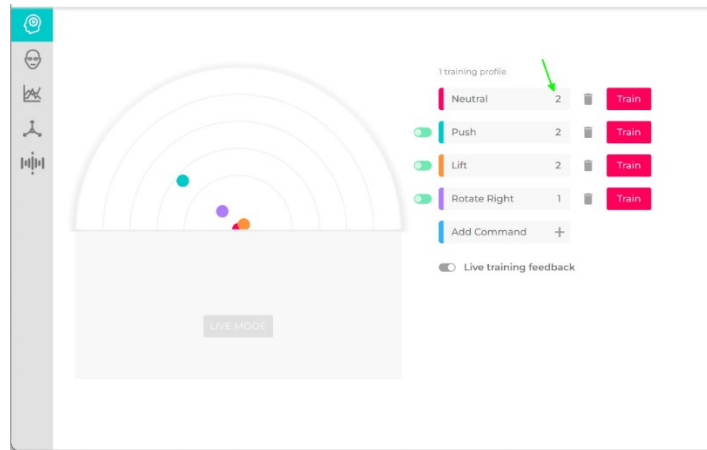


Ilustración 26. Nivel de comando (flecha verde).

Diagrama del espacio cerebral

Este diagrama brinda información sobre la calidad del perfil de capacitación, y puede guiar su proceso de capacitación. En el diagrama, los puntos de colores representan el estado neutro (rosa) y cada uno de los comandos entrenados para el perfil de entrenamiento actual. Cuanto más separados estén los puntos, mejor separados estarán los comandos en el perfil de entrenamiento y más fácil resultara activarlos de forma más independiente. Cuanto más cerca estén entre sí, más similares serán y más difícil resultara activarlos de forma aislada. [9]

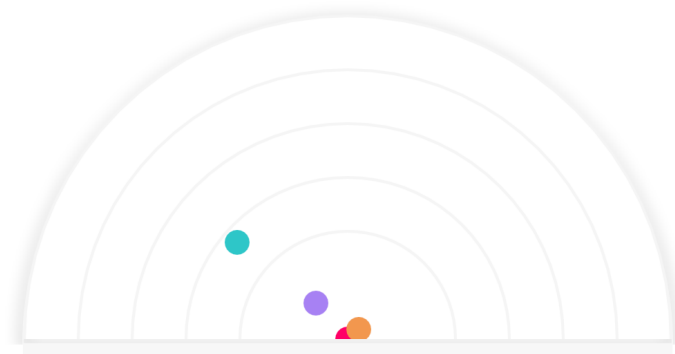


Ilustración 27. Diagrama del espacio cerebral.

Modos de entrenamientos

- **Modo animado**, anima el cubo de la misma manera cada vez según la acción que ese está entrenando (desactivación de “retroalimentación de entrenamientos en vivo”). [9]
- **Modo en vivo**, mueve el cubo durante la sesión de entrenamiento según lo bien

que estés activando ese comando. (Activación de “comentarios de entrenamiento en vivo”). Se puede acceder a este modo una vez que haya entrenado un comando. [9]

Modo en vivo

Si desea probar los comandos que ya ha entrenado y ver como funcionaban, puede hacerlo accediendo al modo en vivo. Para acceder al modo en vivo en la pantalla comandos mentales. Una vez dentro del modo en vivo, el cubo responderá a tu actividad cerebral en tiempo real, según tu perfil de entrenamiento actual. [9]

En este modo también se verá un medidor de potencia, que muestra la detección en tiempo real de los comandos en el perfil. Dado que este medido no incluye las animaciones ni la física que incluye el cubo, es una representación más cuantitativa de su desempeño. [9]

Ajuste de la sensibilidad

Si desea ajustar la sensibilidad de los comandos mentales individuales en el modo en vivo, puede hacerlo haciendo clic en el icono de ‘configuración’ en el modo en vivo, y ajustándolo los controles deslizantes contra los comandos individuales. [9]

Mover el control deslizante hacia la derecha (10) aumentara la sensibilidad del comando, lo que facilitara su activación. Mover el control deslizante hacia la izquierda (1) hará que el comando sea más difícil de activar. [9]

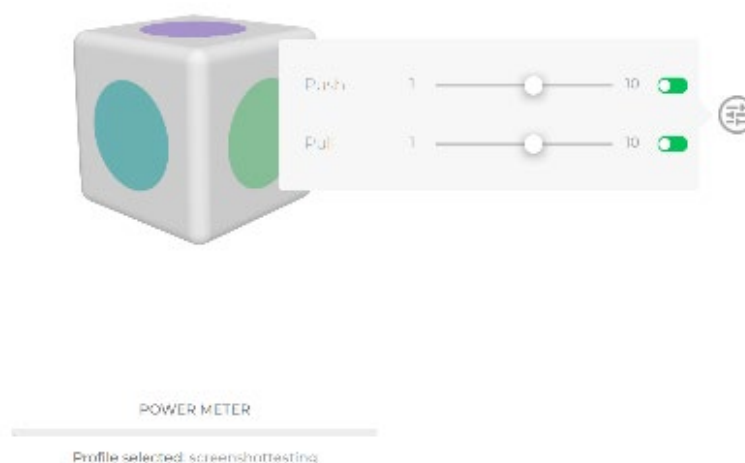


Ilustración 28. Ajuste de la sensibilidad de los comandos entrenados.

ANALISIS DE LOS RESULTADOS

Análisis de los Resultados

Prueba de colocación del Insight 2.0

Aquí se aprecia como la diadema es puesta en la cabeza del usuario, cerciorándose que los cinco electrodos estén colocados correctamente, y evitando que el pelo obstaculice la señal, ya que el mismo, funciona como si fuese una resistencia, y puede provocar “interferencia”. Para esto se podría peinar la zona, y añadir del gel lubricante, el cual ayuda a la buena conducción de las señales.



Ilustración 29. Colocación correcta del Insight 2.0 en la cabeza del usuario.

[Sujeto de prueba: James Di Giacomo Rodríguez]

Prueba de comunicación entre el Insight 2.0 y el Crazyflie 2.1

Se procedió a probar la conexión existente entre la diadema Insight 2.0 y el dron Crazyflie 2.1, intercomunicados mediante websockets.

```

PROBLEMS OUTPUT DEBUG CONSOLE TERMINAL
self.radio = crazyradio(device=device)
File ~/home/bitcraze/projects/crazyflie-lib-python/cflib/drivers/crazyradio.py, line 129, in __init__
raise Exception('Cannot find a Crazyradio Dongle')
Exception: Cannot find a Crazyradio Dongle

bitcraze@ubuntu:~/Desktop/projects/crazyflie-lib-python/examples/autonomy$ /bin/python3 /home/bitcraze/Desktop/projects/crazyflie-lib-python/examples/autonomy/motion_commander_demo.py
Servidor socket activo. Esperando comandos...
Cliente conectado desde: ('192.168.1.127', 57436)
Despegando
Comando recibido: neutral
No hago nada
Comando recibido: right
Girando a la derecha
Comando recibido: left
Girando a la izquierda
Comando recibido: right
Girando a la derecha
Comando recibido: land
Aterrizando por comando desconocido
Cliente desconectado

```

Ilustración 30. Comprobación de la exitosa comunicación entre APIs.

Se tuvo que incorporar un sensor estabilizador (Flow deck v2) para lograr vuelos estables. Ver siguiente ilustración para corroborar la implementación de este (Ilustración extraída desde el 'PC Client' del Crazyflie 2.1).

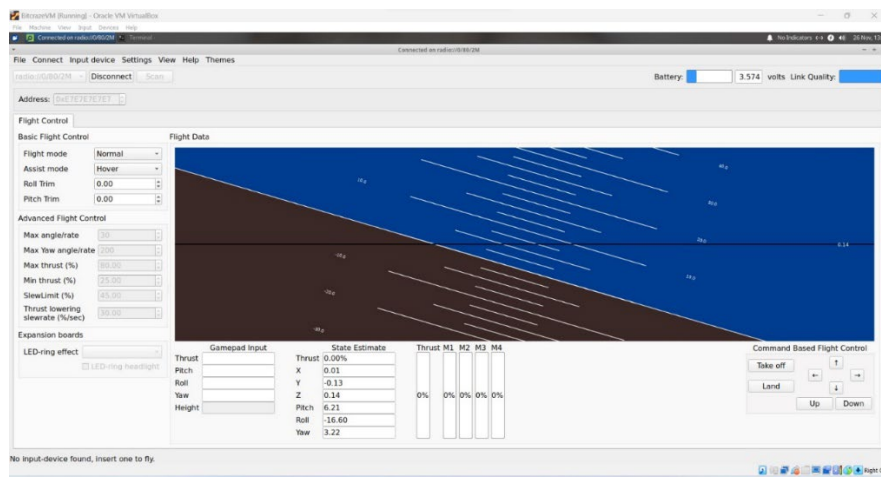


Ilustración 31. Funcionamiento del Flow deck v2, desde el cliente del Crazyflie 2.1.

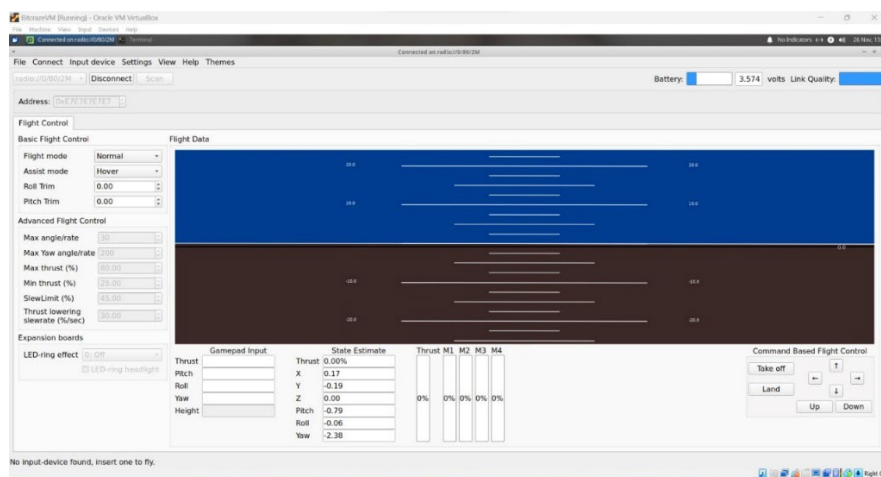


Ilustración 32. Crazyflie 2.1 en su estado inicial (posición de despegue).

Prueba de carga del Crazyflie 2.1

Demostración de cómo carga el dron la batería, el dispositivo debe estar encendido, y luego, debe ser conectado por el USB tipo A. Cuando está cargando, uno de los dos leds azules se mantiene parpadeando de manera simultánea con el led rojo.



Ilustración 33. Crazyflie 2.1 cargando la batería.

Prueba de sincronización del dron mediante la API del Crazyflie 2.1

Aquí se puede apreciar que el dongle enciende una luz verde, y el dron una luz anaranjada, lo cual indica que se vincularon satisfactoriamente. Durante el vuelo, el se mantendrá con esas dos luces encendidas.



Ilustración 34. Prueba de sincronización con la API del Crazyflie 2.1.

Pruebas de vuelo del Crazyflie 2.1, usando el Insight 2.0



Ilustración 35. Posición inicial del dron.

[Sujeto de prueba: Darío Ezequiel Núñez Castillo]



Ilustración 36. Desde la posición inicial, se desplazó hacia la derecha.



Ilustración 37. Desde la derecha, se desplazó hacia la izquierda.

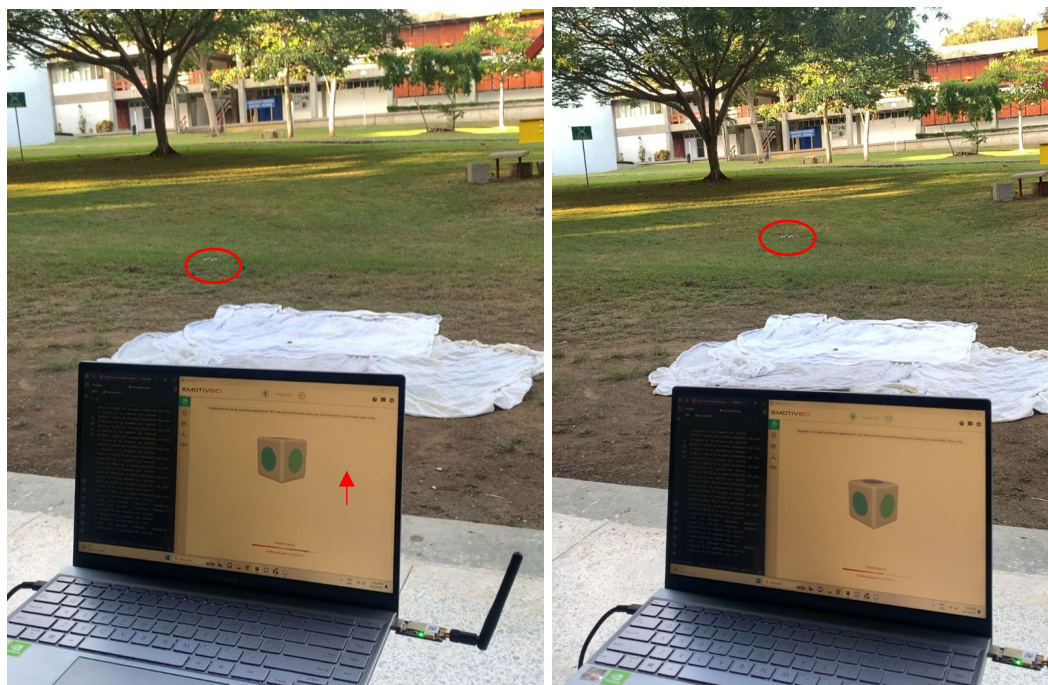


Ilustración 38. Desde su estado neutral, se desplazó hacia arriba.

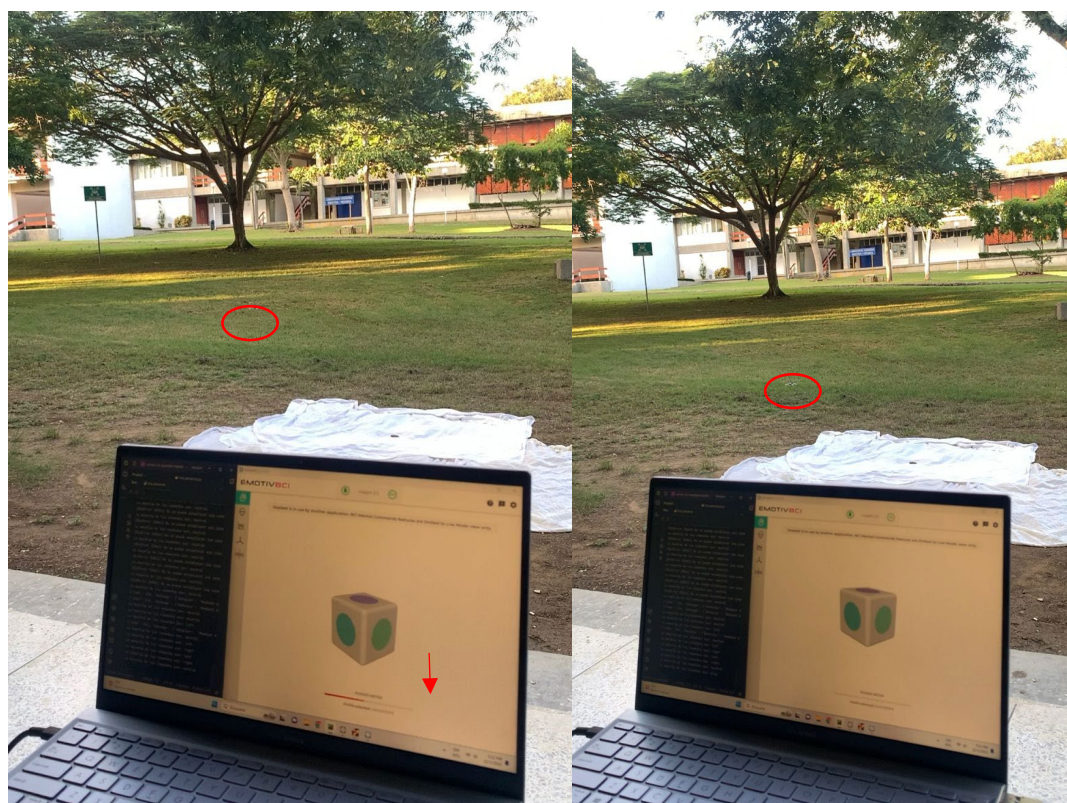


Ilustración 39. Desde arriba, bajó su altura.

Para la validación de las pruebas de vuelo realizadas, se puede comprobar fijándose en la manta que tenemos debajo, comprobándose así que tanta distancia se ha trasladado el Crazyflie 2.1. Además de esto si nos fijamos en los cirulos rojos, la acción del cubito en la interfaz y el césped de fondo, podremos apreciar el efectivo éxito de nuestro proyecto al poder moverse en todos sus sentidos. Recordando que cada movimiento fue programado para que se desplazara un total de 30cm por motivos de seguridad.

Precisión del proyecto haciendo uso del Insight 2.0

En este apartado, se realizaron pruebas para comprobar la precisión y confiabilidad del sistema BCI utilizando el EMOTIV Insight 2.0 en la interacción con el Crazyflie 2.1. Para comprobar el desempeño, se dividió en dos posibles escenarios, donde en el primero no se les aplicó el gel lubricante ALFA a los electrodos/sensores del EMOTIV Insight 2.0, en contraste con el segundo, donde si se les aplicó el gel lubricante ALFA a los electrodos/sensores del EMOTIV Insight 2.0.

A continuación, se demuestra mediante cálculos y tablas, lo descrito anteriormente:

Escenario 1: Gel lubricante no aplicado a los electrodos/sensores del EMOTIV Insight 2.0.

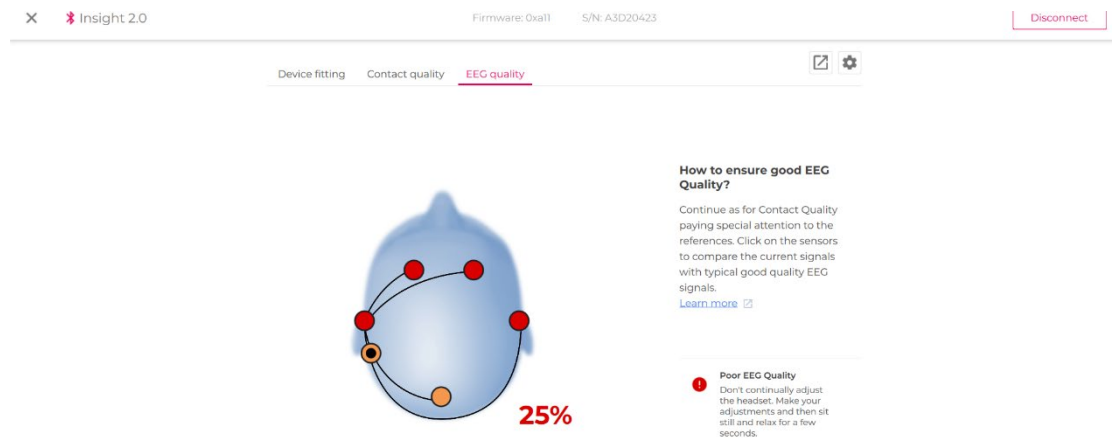


Ilustración 40. Escenario donde no se les aplicó gel lubricante a los electrodos/sensores.

Como se puede observar, sin la aplicación del gel lubricante, la calibración de los electrodos/sensores es prácticamente imposible, ya que no es posible obtener más de un 80% de sincronización, lo cual es lo requerido para un entorno ideal, al momento que el usuario quiera hacer uso de la diadema.

Se hizo una captura de 163 muestras, donde cada comando fue generado cada ocho (08) segundos, haciendo un total de 1,304 segundos, es decir, 22 minutos para esta sesión.

Nota: El comando "neutral" representa instancias donde el usuario estaba intentando generar un comando (lift, drop, left, right), pero el dispositivo no lo detectó correctamente, debido a la mala conducción de los electrodos/sensores.

Por lo tanto, se interpretaron como "falsos negativos" - casos donde el dispositivo debió identificar un comando, pero falló.

neutral	lift	neutral	neutral
neutral	drop	neutral	neutral
neutral	drop	neutral	neutral
neutral	neutral	neutral	neutral
neutral	neutral	neutral	neutral
neutral	lift	neutral	neutral
neutral	neutral	neutral	neutral
neutral	neutral	neutral	neutral
neutral	neutral	neutral	neutral
neutral	neutral	neutral	neutral
neutral	neutral	neutral	neutral
neutral	neutral	neutral	neutral
neutral	neutral	neutral	neutral
neutral	neutral	neutral	neutral
neutral	neutral	neutral	neutral
neutral	neutral	neutral	neutral
neutral	neutral	neutral	neutral
neutral	neutral	neutral	neutral
neutral	neutral	neutral	neutral
neutral	neutral	neutral	neutral
neutral	neutral	neutral	neutral
neutral	neutral	neutral	neutral
right	neutral	neutral	neutral
neutral	neutral	neutral	neutral
neutral	neutral	neutral	neutral
neutral	neutral	neutral	neutral

[illegible]

Resumen de los datos:

- **Total, de comandos intentados** = 163
- **Comandos detectados correctamente** = 05
- **Comandos no detectados (falsos negativos)** = 150

Cálculos:

- **Precisión global** = $05 / 163 = 0.031 = 3.10\%$
- **Tasa de error global** = $(150 / 163) \times 100 = 92.02\%$

La precisión global es de un **3.10%**, indicando un pobre desempeño general del dispositivo para identificar correctamente los comandos.

Asimismo, la tasa de error es muy alta, de **92.02%**, es decir, 150 de los 163 comandos intentados no fueron detectados correctamente por la diadema.

La baja sincronización refleja que el dispositivo tiene problemas para detectar apropiadamente la mayoría de los comandos generados, cuando no se le aplica el gel lubricante.

En conclusión, los resultados confirman que la falta de lubricante en los electrodos afecta severamente la efectividad de la diadema EMOTIV Insight 2.0 para distinguir los comandos mentales generados por el usuario. Se recomienda enfáticamente utilizar el lubricante para mejorar el contacto sensor – piel y así aumentar significativamente la precisión y utilidad del sistema BCI.

Escenario 2: Gel lubricante aplicado a los electrodos/sensores del EMOTIV Insight 2.0.

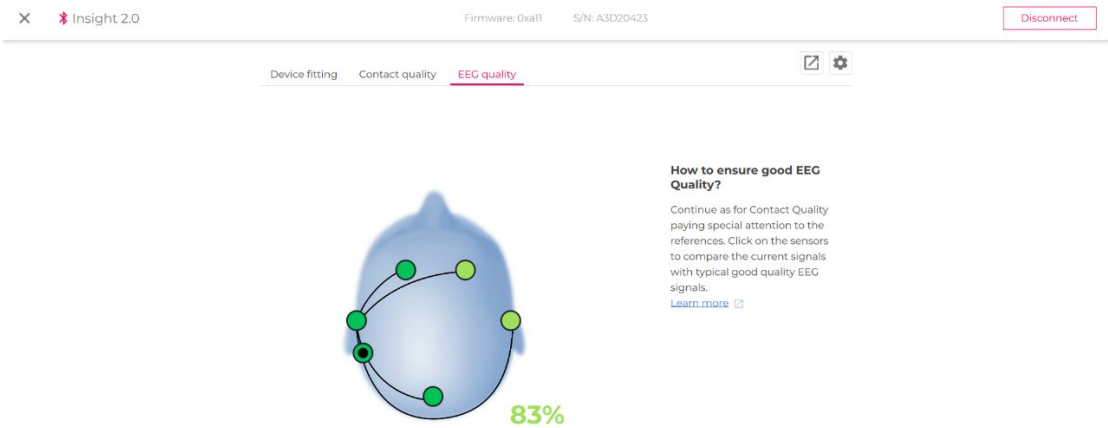


Ilustración 41. Escenario donde se les aplicó gel lubricante a los electrodos/sensores.

Como se puede observar, con la aplicación del gel lubricante, la calibración/sincronización de los electrodos/sensores presenta una mejora significativa, ya que es posible obtener más de un 80% de sincronización, lo cual es lo requerido para un entorno donde el usuario quiera hacer uso de la diadema.

Se hizo una captura de 68 muestras, donde cada comando fue generado cada ocho (08) segundos, haciendo un total de 544 segundos, es decir, 09 minutos para esta sesión.

Nota: El comando "neutral" representa instancias donde el usuario no estaba intentando generar un comando (lift, drop, left, right), es decir, estaba quieto.

Por lo tanto, se interpretaron como "verdaderos positivos" - casos donde el dispositivo identificó de la manera correcta cada acción deseada.

neutral	drop	right	neutral
neutral	neutral	right	neutral
neutral	neutral	right	neutral
right	drop	left	neutral
right	neutral	left	neutral

right	neutral	right	drop
left	lift	neutral	neutral
left	lift	neutral	drop
left	lift	neutral	neutral
left	neutral	neutral	neutral
neutral	neutral	neutral	neutral
neutral	neutral	neutral	right
lift	neutral	neutral	neutral
lift	neutral	neutral	right
lift	neutral	lift	left
lift	neutral	neutral	neutral
drop	neutral	drop	neutral

Tabla 4. Lista de comandos generados por el Insight 2.0, con gel lubricante aplicado a los electrodos/sensores.

Resumen de los datos:

- **Total, de comandos intentados = 68**
- **Comandos detectados correctamente = 58**
- **Comandos no detectados (falsos negativos) = 10**

Cálculos:

- **Precisión global** = $58 / 68 = 0.852 = 85.3\%$
- **Tasa de error global** = $(10 / 68) \times 100 = 14.7\%$

Con una precisión global del **85.3%**, se evidencia una mejora muy significativa en la capacidad del sistema BCI para detectar correctamente los comandos mentales generados por el usuario al aplicar el gel conductor.

Asimismo, la tasa de error se reduce grandemente hasta un **14.7%**. Esto quiere decir que solo 10 de los 68 comandos intentados no fueron identificados adecuadamente.

Se confirma que el uso de lubricante para mejorar la conductividad en los electrodos aumenta drásticamente la efectividad de la diadema EMOTIV Insight 2.0, llegando a niveles muy altos de precisión en la detección de intenciones del usuario.

Conclusiones respecto a los resultados obtenidos

El objetivo de este proyecto es desarrollar un sistema BCI (Interfaz Cerebro – Computadora) capaz de controlar un dron Crazyflie 2.1 utilizando únicamente comandos mentales enviados desde la diadema EMOTIV Insight 2.0. Específicamente, se busca demostrar la viabilidad de controlar el despegue, movimientos horizontales y verticales, y aterrizaje del dron con este sistema.

Luego de la implementación, se llevaron a cabo una serie de pruebas del sistema para determinar su capacidad de controlar los movimientos del dron mediante comandos mentales. Los resultados mostraron que el dron fue capaz de recibir y ejecutar los comandos mentales enviados y generados por el Insight 2.0, según lo deseado por el usuario, demostrando así el cumplimiento total de los objetivos planteados.

En cuanto al desempeño del sistema, se observó que el tiempo de respuesta del dron ante un comando mental fue en promedio de doce (12) segundos. Asimismo, el porcentaje de precisión en la interpretación de los comandos mentales fue del 85.30%. Esto indica un desempeño favorable y adecuado del sistema BCI bajo estas condiciones de prueba.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones y Recomendaciones

Una vez culminado este arduo trabajo y proyecto de grado, podemos decir que muchas veces cuando se quiere innovar o hacer algo diferente, ahí es donde más dedicación se debe dar, debido a que existe poca documentación, poca ayuda externa o incluso los mismos creadores de los equipos no pueden darte una asesoría muy precisa. Esto motiva al estudiante a “sacar de abajo”, como solemos decir, y probar con todo lo que esté al alcance, hasta llegar a la solución, siendo esto una de las bases de lo que es ser ingeniero, explotar el ingenio, dígame, esas habilidades obtenidas durante todos esos años de estudio.

Durante la fase de vuelos, cuando se realizaron las pruebas se apreció que el dron es un dispositivo muy sensible a lo que son las interferencias, y a cambios bruscos en el terreno. El Crazyradio 2.0 de Bitcraze trabaja en la frecuencia de 2,4GHz, y se sabe que gran parte de la red, juntamente con los AP (Access Point) que posee la universidad trabajan en esa misma frecuencia, por tanto, al solaparse dichas señales, el dron pierde el control, y, por ende, colisiona sufriendo daños en su estructura física. Se llegó a tener que reemplazar cuatro hélices en distintas ocasiones. Pero como ya se sabía que eran frágiles, se procedió a comprar reemplazos para prevenir imprevistos, a pesar de que se perdió mucho tiempo esperando los equipos de este proyecto, se trabajó arduamente para recuperarlo y se lograron resolver los problemas presentados durante el proceso.

Cuando se integra el Insight 2.0 con el Crazyflie 2.1 es evidente que los comandos mentales deben ejercer varios saltos desde un API a otra API, y agregándole a eso el procesamiento que conllevan para enviarse y ser ejecutados, la distancia del router, limitando así el acceso a internet, es propicio mencionar que existe un delay de al menos tres segundos al momento de ejecutarse cada uno individualmente, provocando que haya un tipo de desfase entre ellos. Todo esto se puede solucionar con una red de buen alcance hasta la zona donde se presente el proyecto. Para el manejo de la secuencia de los comandos que se envían desde el Insight 2.0, se usaron técnicas como el uso colas e hilos, ya que eficientizan el procesamiento/ejecución de dichos comandos.

Dentro de las recomendaciones, se puede sugerir el uso de otras diademas que existen en el mercado, debido a que la que se utilizó en este proyecto es bastante costosa. Existen las siguientes opciones: 1) Muse 2 Headband, 2) Mindwave Neurosky, y una

gran variedad que son más asequibles en cuanto a precio y duración de los materiales. Cabe mencionar que en el Insight 2.0, los electrodos se oxidan y desgastan con facilidad, por lo que es requerido una constante limpieza, y pedir un paquete de sustitución si se desea utilizar la diadema por mucho tiempo. Una ventaja es que son modulares, y, por ende, se pueden reemplazar con mucha facilidad.

En el contexto del dron (Crazyflie 2.1), se considera un modelo muy pequeño y frágil, pero a la misma vez tiene bastante áreas de aplicaciones. Dentro de las limitantes están: la batería, ya que solo tiene una duración de siete (07) minutos, la fragilidad de las hélices, su estructura física, debido a que su hardware está muy expuesto, pero los reemplazos se consiguen fácilmente. Es un dron con un costo también elevado, pero la universidad posee dicho dispositivo, y puede facilitar un préstamo de este.

Por último, pero no menos importante, hay que mencionar el tiempo de espera para recibir los componentes, el cual es bastante largo, debido a que la empresa del Insight 2.0, dígase EMOTIV, está en Filipinas y la empresa del Crazyflie 2.1, dígase Bitcraze, se encuentra en Suecia, por lo tanto, se pierde aproximadamente un mes para que llegue el equipo o repuesto, por lo que, es mejor buscar algo que se pueda conseguir en Estados Unidos de Norteamérica (EEUU), que se tomaría aproximadamente una semana.

Referencias Bibliográficas

- [1] J. Wolpaw y E. W. Wolpaw, Brain-Computer Interfaces: Principles and Practice. Oxford University Press, 2012.
- [2] G. Pfurtscheller, B. Graimann y B. Allison, Brain-computer interfaces: Revolutionizing human-computer interaction. Heidelberg: Springer, 2010.
- [3] Millán, J.R., Rupp, R., Müller-Putz, G.R., Murray-Smith, R., Giugliemma, C., Tangermann, M., Vidaurre, C., Cincotti, F., Kübler, A., Leeb, R., Neuper, C., Müller, K.R. (2010). Combining Brain-Computer Interfaces and Assistive Technologies: State-of-the-Art and Challenges. *Frontiers in Neuroscience*, 4, 161. doi: 10.3389/fnins.2010.00161
- [4] Lebedev, M.A., Nicolelis, M.A.L. (2006). Brain-Machine Interfaces: Past, Present, and Future. *Trends in Neurosciences*, 29(9), 536-546. doi: 10.1016/j.tins.2006.07.004
- [5] McFarland, D.J., Wolpaw, J.R. (2011). Brain-Computer Interfaces for Communication and Control. *Communications of the ACM*, 54(5), 60-66. doi: 10.1145/1941487.1941506
- [6] "INSIGHT - 5 Channel EEG Brainwear®". EMOTIV. <https://www.EMOTIV.com/insight/> (accedido el 19 de mayo de 2023).
- [7] "Specifications | Bluetooth® Technology Website". Bluetooth® Technology Website. <https://www.bluetooth.com/specifications/bluetooth-core-specification/> (accedido el 25 de mayo de 2023).
- [8] Vidaurre, C., Sannelli, C., Müller, K.R. (2011). Brain-Computer Interfaces: A Gentle Introduction. *IEEE Signal Processing Magazine*, 28(3), 26-37. doi: 10.1109/MSP.2011.941097
- [9] "EMOTIVBCI - EMOTIVBCI," Gitbook.io, 2023. <https://EMOTIV.gitbook.io/EmotivBCI/>.
- [10] H. H. Manupati. "Brain Computer Interface Drone." IntechOpen - Open Science Open Minds | IntechOpen. Accedido el 24 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible: <https://www.intechopen.com/chapters/76834>

- [11] M. Molinas. “Experience designing a BCI for flying a drone based on the use of Empirical Mode Decomposition.” Research Gate. Accedido el 26 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible: https://www.researchgate.net/publication/317579079_Experience_designing_a_BCI_for_flying_a_drone_based_on_the_use_of_Empirical_Mode_Decomposition
- [12] A. Parande. “Flying a Drone with Python: Designing the Control System.” <https://blog.devgenius.io/flying-a-drone-with-python-designing-the-control-system-385ff0beba2b>
- [13] I. Marin. “Drone Control based on Mental Commands and Facial Expressions”. arXiv.org e-Print archive. Accedido el 24 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/2102/2102.01429.pdf>
- [14] S. K. Swee, D. T. K. Kho and L. Z. You, “Evaluation of ConsumerGrade EEG Headsets for BCI Drone Control,” International Conference on Mechanic
- [15] K. Mcguire. “Bitcraze drone API”. GitHub. Accedido el 26 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible: <https://github.com/orgs/bitcraze/discussions>.
- [16] “Getting started with the Crazyflie 2.1 2.X | Bitcraze,” [www.bitcraze.io](https://www.bitcraze.io/documentation/tutorials/getting-started-with-Crazyflie-2.1-2-x/). <https://www.bitcraze.io/documentation/tutorials/getting-started-with-Crazyflie-2.1-2-x/> (accessed Nov. 26, 2023).
- [17] F. A. Gómez Pineda, S. G. Yaguana Torres, “IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL PARA EL MANIPULADOR MITSUBISHI RV-2AJ, MEDIANTE ONDAS CEREBRALES EMPLEANDO EL SENSOR EMOTIV INSIGHT,” PDF, UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA, 2018.