

**Centro de Investigación Científica y de Educación
Superior de Ensenada, Baja California**



**Maestría en Ciencias
en Ciencias de la Computación**

Diseño de diademas cerebrales para niños

Tesis
para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de
Maestro en Ciencias

Presenta:

Hugo Fernando Rodríguez Aguilar

Ensenada, Baja California, México
2017

Tesis defendida por
Hugo Fernando Rodríguez Aguilar

y aprobada por el siguiente Comité

Dra. Mónica Elizabeth Tentori Espinosa
Codirector de Tesis

Dra. Lizbeth Olivia Escobedo Bravo
Codirector de Tesis

Miembros del Comité

Dr. Pedro Gilberto López Mariscal

Dr. Rubén Darío Cadena Nava



Dr. Jesús Favela Vara

Coordinador del Posgrado en Ciencias de la Computación

Dra. Rufina Hernández Martínez

Directora de Estudios de Posgrado

Hugo Fernando Rodríguez Aguilar © 2017

Queda prohibida la reproducción parcial o total de esta obra sin el permiso formal y explícito del autor y director de la tesis.

Resumen de la tesis que presenta **Hugo Fernando Rodríguez Aguilar** como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Ciencias de la Computación.

Diseño de diademas cerebrales para niños

Resumen aprobado por:

Dra. Mónica Elizabeth Tentori Espinosa
Codirector de Tesis

Dra. Lizbeth Olivia Escobedo Bravo
Codirector de Tesis

Las interfaces cerebro-computadora han surgido como una nueva forma de interacción entre las personas y las computadoras. Dichas interfaces pueden leer la actividad eléctrica del cerebro del usuario, la cual procesan y traducen en comandos que se utilizan para realizar alguna acción o generar estímulos de retroalimentación. Estas interfaces han recibido gran atención en los últimos años, lo cual se refleja con el surgimiento de nuevos dispositivos cerebrales portables en forma de diademas que se utilizan con fines terapéuticos y de entretenimiento. Sin embargo, la investigación en interfaces cerebrales se ha enfocado principalmente en el procesamiento y clasificación de las señales; dejando de lado aspectos importantes como lo son la usabilidad y la experiencia de uso. En este sentido existen pocos trabajos que aborden aspectos como la comodidad, facilidad de uso, estímulos de retroalimentación, tiempos de colocación del dispositivo, entre otros. En cuanto al uso de estas diademas cerebrales por niños, se han utilizado para controlar ambientes inteligentes y para evaluar problemas de atención; sin embargo, se han encontrado los mismos problemas de usabilidad y experiencia de uso que con los dispositivos para adultos (*i.e.*, tiempos de colocación largos, dificultad de uso, falta de retroalimentación por parte del dispositivo, incomodidad). En esta tesis se describe el diseño, implementación y evaluación de un dispositivo cerebral para su uso por niños en edad escolar. Para diseñar el dispositivo se siguió una metodología de diseño centrado en el usuario donde los niños participaron en cada una de las etapas; desde las sesiones de diseño, hasta la evaluación del dispositivo. El dispositivo que se diseñó proporciona estímulos de retroalimentación al niño acerca de su actividad cerebral por medio de un estímulo auditivo y de luces de colores que indican diferentes estados de la actividad cerebral. Además, la forma del dispositivo puede ayudar a reducir los tiempos de colocación, a facilitar la misma y se adapta a la cabeza del niño para proporcionar más comodidad. Por otro lado, la apariencia puede personalizarse por medio de accesorios que se colocan sobre la superficie del dispositivo y se proporciona una mejor experiencia de uso para los niños por medio de luces que cambian de color, colocadas en la superficie del dispositivo. Se realizó una evaluación con treinta y un niños de edad escolar (de tercero a sexto grado de primaria), quienes realizaron una actividad de retroalimentación neuronal controlando un juego serio con el dispositivo propuesto y con la diadema cerebral MindWave de NeuroSky. Al terminar la actividad los niños respondieron cuestionarios de usabilidad y experiencia de uso y participaron en una entrevista semi-estructurada. Los resultados de la evaluación muestran que los niños percibieron al dispositivo propuesto como más fácil y rápido de colocar que la diadema MindWave de NeuroSky, además de percibirlo como más cómodo y con una mejor experiencia de uso gracias a los estímulos de retroalimentación y sus aspectos personalizables. Como trabajo futuro se propone mejorar el diseño del dispositivo junto con los niños y evaluar qué tipo de estímulo es el más adecuado para proporcionar la retroalimentación. Por otro lado, se propone trabajar con el procesamiento y clasificación de la señal para poder calibrar el dispositivo para cada usuario.

Palabras clave: Interfaces Cerebro-Computadora, dispositivos, niños, usabilidad, experiencia de uso.

Abstract of the thesis presented by **Hugo Fernando Rodríguez Aguilar** as a partial requirement to obtain the Master of Science degree in Computer Science.

Design of brain devices for children

Abstract approved by:

Dr. Mónica Elizabeth Tentori Espinosa

Thesis Advisor

Dr. Lizbeth Olivia Escobedo Bravo

Thesis Advisor

Brain-computer interfaces have emerged as a new way of interaction between people and computers. These interfaces can read the electrical activity of the user's brain, which processes and translates into commands that are used to perform some action or generate feedback stimuli. These interfaces have received great attention in the last years, which is reflected with the emergence of new portable brain devices in the form of diadems that are used for therapeutic and entertainment purposes. However, research on brain interfaces has focused primarily on signal processing and classification; leaving aside important features such as usability and user experience. In this sense, there are few works that deal with aspects such as comfort, ease of use, feedback stimuli, device placement times, among others. Regarding the use of these brain diadems by children, they have been used to control intelligent environments and to evaluate attention problems. However, the same usability and user experience problems have been encountered as with adult devices (i.e., long placement times, difficulty in use, lack of feedback by the device, discomfort). This thesis describes the design, implementation, and evaluation of a brain interface for its use by school children (i.e., enrolled in elementary). To design the interface, we followed a user-centered design methodology where children participated in every stage; from design sessions, to evaluation of the interface. The designed interface provides feedback stimuli to the child about his/her brain activity through an auditory stimuli and colored lights that indicate different states of the brain activity. In addition, the shape of the interface can help reduce the placement time, facilitate the same, and it adapts to the child's head to provide comfort. In the other hand, the appearance can be customized using accessories that are placed on the interface's surface, and a better user experience for children is provided by using lights that change color placed in the interface's surface. An evaluation was carried out with thirty-one school children, who performed a neuronal feedback activity controlling a serious game with the proposed device and NeuroSky MindWave brain diadem. At the end of the activity, the children answered usability and user experience questionnaires and participated in a semi-structured interview. The results of the evaluation show that children perceived the proposed device as easier and quicker to place than the NeuroSky MindWave brain diadem, in addition they perceived the proposed device as more comfortable and with a better user experience due to the stimuli of personalized feedback and customization aspects. As future work we propose to improve the design of the device with the participation of children, and to evaluate what kind of stimuli is most appropriate to provide feedback. In the other hand, it is proposed to work with the processing and classification of the signal to be able to calibrate the device for each user.

Keywords: Brain-computer interfaces, devices, children, usability, user experience

Dedicatoria

A mis padres, mis maestros de vida. Por su amor y apoyo incondicional.

Agradecimientos

A mis padres:

Por su respaldo, por estar siempre ahí, por apoyarme en todas y cada una de mis decisiones. Gracias por siempre creer en mí y por darme fuerzas en los momentos más difíciles. Gracias por todos sus consejos, sus palabras de aliento y por su amor incondicional. Aún a la distancia, jamás me sentí lejos de casa. Son todo para mí.

A mis asesoras:

***Dra. Lizbeth**, gracias por sus enseñanzas, su paciencia, su apoyo y sus recomendaciones. Por creer en mí y darme la oportunidad de ser su estudiante. Valoro cada uno de los consejos que recibí de usted para mejorar este trabajo.*

***Dra. Mónica**, agradezco cada consejo, enseñanza y cada oportunidad que me ha brindado. Por la confianza que tuvo para conmigo, por escucharme siempre y ayudarme a mejorar como estudiante, como profesionista y como persona.*

La alegría con la que ambas realizan su trabajo, así como la dedicación y profesionalismo que ponen en él, son un gran ejemplo para mí.

A los miembros de mi comité:

***Dr. Gilberto** y **Dr. Rubén**, gracias por cada comentario, cada observación, sugerencia y por su apertura para resolver mis dudas. Su guía ha sido de gran ayuda para mejorar este trabajo.*

A José Mercado Chan:

Gracias por ayudarme desde el inicio de este trabajo de tesis. Por tu disponibilidad para resolver las dudas, estar al tanto del progreso del trabajo y sobre todo por tus consejos y tu tiempo para compartirme tus conocimientos.

A mis compañeros:

***Vianey, Judith, Chan, Linney, Oscar** gracias por su ayuda y consejos en las diferentes etapas de esta tesis. Son un gran equipo de trabajo, pero sobre todo son unos compañeros y amigos excelentes.*

A mis amigos:

***Antonio, Vianey, Luis Carlos, Selene, Irma, Judith, Roberto, David**, gracias por la compañía, las risas, los momentos de relajación a la hora de la comida, las reuniones, las salidas, gracias por estar ahí en los momentos difíciles. Ustedes ayudaron a que los momentos de estrés fueran más ligeros, agradezco sus consejos, sus palabras de aliento y sobre todo su amistad.*

A CICESE y CONACyT:

*Gracias por brindarme la oportunidad de realizar mis estudios de posgrado. A **CICESE** por proporcionarme un excelente espacio y ambiente de trabajo. A **CONACyT** agradezco el apoyo económico brindado para poder realizar mi maestría.*

Tabla de contenido

	Página
Resumen en español.....	ii
Resumen en inglés.....	iii
Dedicatorias.....	iv
Agradecimientos.....	v
Lista de figuras.....	viii
Lista de tablas.....	ix
Capítulo 1. Introducción	
1.1 Antecedentes.....	1
1.1.1 Biorretroalimentación.....	1
1.1.2 Retroalimentación Neuronal.....	2
1.1.3 Mediciones Cerebrales.....	4
1.1.4 Interfaces Cerebro-Computadora.....	5
1.2 Planteamiento del problema.....	9
1.2.1 Preguntas de investigación.....	10
1.2.2 Objetivos.....	10
1.3 Metodología.....	11
Capítulo 2. Trabajos Relacionados	
2.1 Diseño en Interacción Humano-Computadora.....	13
2.1.1 Diseño con niños.....	14
2.1.2 Obtención de prototipos mediante impresoras 3D.....	17
2.2 Interfaces Cerebrales.....	18
2.2.1 Evaluación de dispositivos cerebrales.....	19
2.2.2 Uso de interfaces cerebrales por niños.....	21
Capítulo 3. Diseño y desarrollo	
3.1 Colección de datos.....	24
3.1.1 Uso de BCIs.....	25
3.1.2 Sesiones de Juego Dramático.....	26
3.2 Análisis de datos.....	29
3.3 Resultados.....	30

3.3.1 Características de diseño.....	30
3.3.1.1 Aspecto entretenido y atractivo.....	30
3.3.1.2 Fácil y rápida colocación.....	31
3.3.1.3 Comodidad.....	32
3.3.1.4 Retroalimentación.....	33
3.4 Sesiones de Diseño.....	33
3.4.1 Sesión de diseño participativa: Bosquejos.....	34
3.4.1.1 Sesión de diseño participativa: Bosquejos personalización.....	37
3.4.2 Prototipos.....	40
3.5 Diseño del prototipo de alta fidelidad.....	43
3.5.1 Diseño y especificación del prototipo.....	43
3.5.2 Escenario de uso del prototipo de alta fidelidad.....	47
3.6 Implementación del prototipo de alta fidelidad.....	49
3.6.1 Arquitectura del prototipo de alta fidelidad.....	49
3.6.2 Procesamiento de la señal.....	50
3.7 Resumen y conclusiones.....	53
Capítulo 4 . Evaluación y resultados	
4.1 Objetivo.....	55
4.2 Diseño del experimento.....	55
4.2.1 Participantes.....	55
4.2.2 Instalación	56
4.2.3 Procedimiento.....	57
4.2.4 Captura de datos.....	58
4.3 Desarrollo del experimento.....	60
4.4 Análisis de datos.....	61
4.4.1 Usabilidad.....	62
4.4.1.1 Facilidad de colocación.....	62
4.4.1.2 Tiempo de colocación.....	64
4.4.2 Experiencia de uso.....	66
4.4.2.1 Apariencia.....	67
4.4.2.2 Comodidad.....	69
4.4.2.3 Personalización.....	72
4.4.2.4 Retroalimentación.....	74

4.4.3 Cuestionario de salida.....	75
4.5 Resumen y conclusiones.....	77
Capítulo 5 . Conclusiones, aportaciones y trabajo futuro	
5.1 Conclusiones.....	79
5.2 Aportaciones.....	81
5.3 Limitaciones.....	82
5.4 Trabajo futuro.....	82
Literatura citada.....	85
Anexos.....	89

Lista de figuras

Figura		Página
1	Niño en terapia de retroalimentación neuronal.....	3
2	Elementos de una BCI.....	6
3	BCI Activa.....	7
4	BCI Reactiva.....	8
5	Metodología utilizada en el proyecto.....	11
6	Niño realizando actividad de <i>Comicboarding</i>	14
7	Niños participando en los talleres.....	15
8	Prototipo de una pluma inteligente.....	16
9	Los 4 prototipos que se obtuvieron en el proceso de diseño.....	17
10	Diseño de un dispositivo cerebral para adultos.....	19
11	Dispositivos utilizados en el estudio.....	20
12	Niño utilizando FOCUS.....	22
13	Ambiente inteligente que se controla por medio de la diadema cerebral.....	23
14	Diadema NeuroSky + casco de juguete.....	23
15	Diademas utilizadas en la sesión de uso de BCIs.....	26
16	Niños realizando sesiones de Juego Dramático.....	28
17	Primer equipo especificando su bosquejo.....	35
18	Bosquejos de los niños.....	36
19	Participantes identificando características positivas y negativas de sus bosquejos....	37
20	Bosquejo del equipo 1.....	38
21	Bosquejos del equipo 2.....	39
22	Bosquejo del equipo 3.....	39
23	Prototipos de baja fidelidad.....	41
24	Vista general del prototipo.....	43
25	Accesorios que se colocan sobre la superficie del prototipo.....	44
26	Ejemplo de accesorios existentes.....	44
27	Sistema de colocación de electrodos 10/20.....	45
28	Malla para electrodos.....	46
29	Interior del casco.....	46
30	Prototipo listo para colocarse.....	47
31	Arquitectura del prototipo.....	50
32	Programa para procesar la señal.....	51

33	Instalación del experimento.....	57
34	Tabla de Ordenamiento divertido y tabla Otra vez-Otra vez.....	59
35	Esquema de codificación.....	59
36	Desarrollo del experimento.....	60
37	Gráfica de percepción de facilidad de colocación.....	63
38	Gráfica de percepción de tiempo de colocación	64
39	Gráfica de tiempo de colocación promedio.....	65
40	Comparativa del tiempo de colocación de cada participante en ambos dispositivos.	66
41	Gráficas de percepción de aspectos de apariencia.....	68
42	Gráficas de percepción de comodidad.....	70
43	Total de movimientos de cabeza y total de veces que se tocaron la cabeza.....	71
44	Total de muestras de interés de los niños en cada dispositivo.....	72
45	Total de niños que se mostraron motivados a realizar la actividad con cada dispositivo.....	73
46	Resultados de la tabla Otra vez-Otra vez.....	76
47	Resultado de la tabla de Ordenamiento divertido.....	77

Lista de tablas

Tabla		Página
1	Frecuencias utilizadas en la EEG.....	4
2	Diademas comerciales más utilizadas.....	5
3	Sesiones de Uso de BCIs y Juego dramático.....	25
4	Sesiones de Juego dramático.....	27
5	Sesiones de Diseño.....	34

Capítulo 1. Introducción

1.1 Antecedentes

En la actualidad, con el constante avance de la tecnología han surgido diversos enfoques que han cambiado la forma en la que interactuamos con las computadoras. La interacción “tradicional” humano-computadora a través del uso del teclado y el ratón se ha movido hacia afuera del escritorio evolucionando una interacción más “natural” (Weiser, 1990).

En los últimos años han surgido dispositivos cuyos modelos de interacción imitan la manera en la que el ser humano interactúa con el mundo real con el fin de proporcionar una mejor experiencia a los usuarios para interactuar con un sistema ubicuo de manera más natural (Norman, 2010). Recientemente se ha explorado el utilizar las señales fisiológicas de los usuarios como dispositivos de entrada para controlar sistemas ubicuos (Magerkurth et al., 2005).

El cuerpo del ser humano genera una serie de señales (*e.g.*, eléctrica muscular, la respiración e incluso hasta la presión sanguínea) por medio de las cuales se puede inferir si una persona está realizando alguna actividad específica, identificar comportamientos, emociones, o incluso padecimientos (Moss, 2014).

Existen técnicas que permiten al usuario aprender a cómo autorregular estas señales fisiológicas. Algunas de estas técnicas como la biorretroalimentación emplean el uso de tecnología de cómputo para proporcionar al usuario retroalimentación en tiempo real acerca de dichos aspectos fisiológicos (Moss, 2014). Gracias al uso de la tecnología para proporcionar retroalimentación acerca de estos aspectos fisiológicos, han surgido diversas aplicaciones tanto terapéuticas como de entretenimiento que hacen uso de estas señales.

1.1.1 Biorretroalimentación

Una técnica que utiliza las señales fisiológicas para controlar dispositivos de cómputo es la biorretroalimentación. La biorretroalimentación se define como: *“Un enfoque de entrenamiento para modificar el comportamiento humano, neurofisiología y estados de conciencia”* (Moss, 2014).

Esta técnica se enfoca en el uso de tecnología para medir procesos fisiológicos y proporcionar al usuario retroalimentación en tiempo real acerca de los mismos (Figura 1). Por medio de esta retroalimentación, el usuario aprende a tener control sobre estos aspectos fisiológicos (*e.g.* respiración, actividad eléctrica del cerebro) e incluso modificarlos.

Cualquier persona puede realizar el entrenamiento de biorretroalimentación para ayudar a mejorar algunos aspectos de su fisiología. Sin embargo, Moss (2014) menciona que los niños son sujetos más apropiados para practicar la biorretroalimentación ya que existe evidencia de que los niños se entusiasman al descubrir que pueden controlar aspectos de su cuerpo. Existen también investigaciones que señalan que los niños dominan la biorretroalimentación de manera más efectiva que los adultos (Attanasio et al., 1985). Además, Moss (2014) menciona que *“La biorretroalimentación es una herramienta efectiva para enseñar a los niños a reconocer la conexión entre el cuerpo y su mente y entre sus emociones y el cuerpo”*. Gracias a esto los niños modifican con éxito aspectos de su fisiología con gran rapidez y con mayor facilidad en comparación con los adultos (Attanasio, 1985). Por otro lado, en la actualidad los niños son más afines a la tecnología y usarla les parece emocionante, por lo cual practicar la técnica de biorretroalimentación con ayuda de tecnología podría parecerles algo llamativo (Moss, 2014).

Una de las ramas de la biorretroalimentación que ha recibido atención en los últimos años es la retroalimentación neuronal la cual utiliza la señal eléctrica del cerebro a manera de entrada para producir como salida alguna acción deseada (*e.g.* introducir texto con un teclado ó mover un brazo robótico) o generar algún estímulo de retroalimentación como lo son visualizaciones sencillas como barras que suben y bajan, hasta juegos formativos (*serious games*) que funcionan con base en la actividad eléctrica del cerebro.

1.1.2 Retroalimentación Neuronal

La actividad eléctrica producida en el cerebro es una de las señales fisiológicas que han sido objeto de estudio desde hace casi 90 años. Hans Berger (1929), un científico alemán, fue el primero en descubrir señales eléctricas provenientes del cerebro. Esto lo logró por medio del uso de la electroencefalografía (EEG) la cual es una tecnología ampliamente utilizada hoy en día.

Recientemente la investigación en neurociencias ha propuesto métodos para ayudar a mejorar algunos aspectos fisiológicos mediante la autorregulación de la actividad eléctrica del cerebro (Perronnet et al., 2016). Uno de estos métodos es la retroalimentación neuronal.

La retroalimentación neuronal (RN) es una técnica que utiliza el enfoque de la biorretroalimentación, en la cual se realizan mediciones de la actividad cerebral por medio de dispositivos de adquisición y diversos algoritmos de procesamiento de esta señal. Una vez hecho este procesamiento se proporciona información al usuario acerca de lo que está pasando con su actividad cerebral. Esta información se presenta en forma de retroalimentación visual, auditiva o táctil, y se proporciona en tiempo real (Moss, 2014).



Figura 1. Niño en terapia de retroalimentación neuronal (Coben et al., 2010)

La RN permite que el usuario pueda conocer y explotar su habilidad para la autorregulación de señales fisiológicas con la finalidad de desarrollar capacidades para alcanzar un objetivo en términos de actividad cerebral (*e.g.* aumentar el nivel de atención o relajación). Para lograrlo, se debe informar al usuario si la actividad cerebral está cerca o lejos de lograr el objetivo. La autorregulación se logra mediante la retroalimentación que se proporciona al usuario por medio de estímulos (Perronnet, 2016).

1.1.3 Mediciones Cerebrales

El cerebro produce actividad eléctrica que nos permite saber cómo responde a ciertos estímulos sensoriales (*i.e.* visuales, auditivos, táctiles), y cómo se comporta al realizar distintas actividades o en determinados estados mentales.

Actualmente existen tecnologías como la magnetoencefalografía (MEG) espectroscopía funcional de infrarrojo cercano (fNIRS) y la Imagen por resonancia magnética funcional (fMRI), las cuales ayudan a identificar algunas características de la actividad cerebral, pero ninguna de ellas es una solución portable.

Una de las técnicas que más se utilizan para medir la actividad cerebral es la electroencefalografía (EEG). La EEG sirve para obtener lecturas de la actividad eléctrica en el cerebro basadas en diferentes tipos de frecuencias (Tabla 1). Estas frecuencias están relacionadas con diferentes estados mentales (Coben et al., 2010).

Tabla 1. Frecuencias utilizadas en la EEG (Coben et al., 2010)

Nombre	Frecuencia	Ocurrencia normal	Significado
Delta	0.5-3.5 Hz	Sueño profundo en infantes	Signo de disfunción cerebral significativa, letargo/somnolencia o deterioro cognitivo
Theta	4-7.5 Hz	Algunos aspectos del aprendizaje, somnolencia y en niños pequeños	Frecuentemente relacionado con la atención/deterioro cognitivo, enfoque interno
Alfa	8-13 Hz	Ojos cerrados, relajación, conciencia de sí mismo	El exceso de esta frecuencia durante estados de demanda puede ser un signo de dificultades con el aprendizaje y la estabilidad emocional
Beta	13-30 Hz	Actividad rápida asociada con el estado de alerta y actividad	La Beta excesiva se asocia a menudo con la ansiedad, irritabilidad y mala integración.
Gamma	>30 Hz	Puede estar asociado con la resolución de problemas y consolidación de la memoria	Desconocido

Actualmente la EEG se utiliza en forma de tratamientos no-farmacológicos, como la retroalimentación neural, para el tratamiento de síntomas asociados al trastorno de déficit de atención e hiperactividad (TDAH), o el diagnóstico de trastornos neurológicos como el autismo o alzheimer (Mihajlovic et al., 2015). Además, con los avances tecnológicos más recientes la EEG se ha miniaturizado e implementado en

dispositivos comerciales en forma de diademas (Tabla 2) que permiten medir la actividad cerebral de las personas de manera más portable y a bajo costo.

Tabla 2. Diademas comerciales más utilizadas

Dispositivo	Nombre	Fabricante	No. de Electrodos	Tipo de Electrodos	Protocolo de comunicación
	MindWave	NeuroSky	1	Secos	Bluetooth
	EPOC	Emotiv	14	Húmedos	Propietario
	Muse	Interaxon	5	Secos	Bluetooth

Por otro lado, las diademas cerebrales han permitido la aplicación de la EEG en áreas como el apoyo para alguna discapacidad, juegos serios, e incluso el control de otros dispositivos como brazos robóticos (Roy et al., 2016).

1.1.4 Interfaces Cerebro-Computadora

La idea de controlar un dispositivo por medio del pensamiento no es una idea nueva. Jacques Vidal propuso esta idea en su trabajo titulado *“Toward Direct Brain-Computer Communications”* (Vidal, 1973). En dicho trabajo se describe la arquitectura de hardware y el procesamiento que se requiere para crear

una interfaz cerebro-computadora (BCI, por sus siglas en inglés, Brain-Computer Interface) por medio de señales electroencefalográficas.

Una BCI se define como un sistema que traduce la actividad cerebral de un usuario en mensajes o comandos en una aplicación interactiva (Clerc et al., 2016). Una BCI se compone de distintos elementos: Adquisición de la señal, procesamiento (*i.e.*, Preprocesamiento, extracción de características y clasificación), traducción de la señal en un comando y la retroalimentación (Figura 2):



Figura 2. Elementos de una BCI

Como menciona Clerc et al. (2016), primero se adquiere la señal, en la cual mediante electrodos que hacen contacto con la cabeza del usuario se realiza la captura la señal eléctrica del cerebro. Una vez que se

adquiere esta señal, se realiza el procesamiento de la misma; dentro del procesamiento de la señal se realizan actividades como el preprocesamiento, en el cual se filtra la señal y se elimina el ruido. También se tiene la extracción de características como la potencia de la señal las cuales se asocian con algún estado mental, y la clasificación, en la cual se asigna un conjunto de características a una clase que corresponde a un estado de actividad cerebral (*e.g.*, la característica del aumento de la frecuencia Beta que se presenta al imaginar el movimiento de las manos).

Al terminar el procesamiento de la señal, ésta se traduce en comandos para producir algún estímulo o una acción deseada (*e.g.*, mover un brazo robótico hacia la izquierda o derecha de acuerdo con el movimiento en el que el usuario se encuentra pensando).

Finalmente se provee al usuario con retroalimentación acerca de su actividad cerebral con la finalidad de que el usuario pueda aprender a regular su actividad cerebral para tener un mejor control sobre la BCI (*e.g.*, cuando el usuario tiene que mantenerse concentrado para mover un objeto en la pantalla por medio de su nivel de atención).

A su vez las BCIs se pueden clasificar en diferentes categorías de acuerdo con su funcionamiento, que pueden ser:

- **Activas:** aquellas BCIs en las que el usuario participa llevando a cabo tareas mentales de manera voluntaria (Figura 3). Es decir, dichas interfaces reaccionan a la actividad cerebral del usuario para producir la acción que se desea.

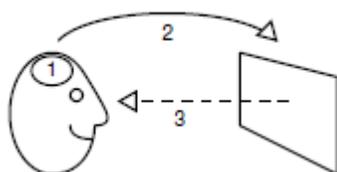


Figura 3. BCI Activa (Cabestaing y Derambure, 2016)

- **Reactivas:** Son aquellas BCIs que utilizan las reacciones del cerebro del usuario a un estímulo dado (Figura 4). Por ejemplo, cuando se desea conocer cómo reacciona el cerebro a diferentes imágenes que se le presentan.

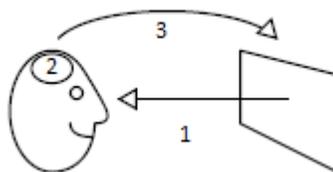


Figura 4. BCI Reactiva (Cabestaing y Derambure, 2016)

- **Pasivas:** Son aquellas BCIs que analizan el estado mental del usuario en tiempo real, pero que no controlan una aplicación o producen algún estímulo al usuario. Por ejemplo, un electroencefalograma que se toma de un paciente en un hospital.

En cuanto a las aplicaciones de las BCIs, éstas han mostrado un gran avance en años recientes. A pesar de tener presencia en el campo de la investigación desde hace más de 40 años, las BCIs no habían recibido tanta atención hasta hace algunos años, esto es debido a que se han diversificado las aplicaciones y usos de este tipo de interfaces.

Actualmente existen investigaciones y aplicaciones de BCIs en áreas como el apoyo a personas con algún tipo de discapacidad, por ejemplo, como apoyo para personas cuadripléjicas, ya que existen diversos trabajos que muestran que es posible producir texto (An et al., 2012) e incluso controlar prótesis y sillas de ruedas por medio de la actividad cerebral (Clerc et al., 2016).

Más recientemente estas interfaces han sido utilizadas en apoyo a las terapias de retroalimentación neuronal en apoyo a niños con autismo (Coben et al., 2010) y otros trastornos que afectan la salud mental, incluso se ha propuesto el uso de estos dispositivos para controlar ambientes inteligentes (Garzotto et al., 2016).

Además, en los últimos años las BCIs han probado también tener usos interesantes no relacionadas con la salud, por ejemplo, aplicaciones como videojuegos (Nijholt, 2008) ó la interacción con algún sistema automatizado como por ejemplo brazos robóticos (Wang et al., 2011).

1.2 Planteamiento del problema

En los últimos años se puede observar un crecimiento significativo en cuanto al desarrollo e investigación relacionadas con las Interfaces cerebrales (Hamadicharef et al., 2010).

Actualmente existen dispositivos comerciales que utilizan EEG tradicionales que son de bajo costo y que permiten monitorear la actividad cerebral. Por ejemplo, EPOC de Emotiv (Tabla 2) es una diadema que utiliza 18 sensores (14 Electrodo y 4 referencias), los cuales antes de colocarse se preparan con solución salina para medir la actividad cerebral de los individuos. En contraste, MindWave de NeuroSky y Muse de Interaxon son diademas que utilizan menos electrodos (*i.e.* Mindwave 1 electrodo y una referencia, y Muse 4 electrodos y 1 referencia) y que se pueden utilizar en seco. El trabajo de investigación en esta área se ha enfocado en utilizar las diademas como mecanismos de entrada para adaptar las aplicaciones de atención y meditación (Marshall et al., 2013) o controlar video juegos (Mihajlovic et al., 2015). Es decir, se han abocado a buscar las “visualizaciones cerebrales” que permitan mantener la atención del usuario dentro de la terapia. Sin embargo, existen muy pocos trabajos que estudien y evalúen el diseño de los dispositivos de adquisición dadas las necesidades del usuario.

Mihajlovic et al. (2015) mencionan que estos dispositivos de adquisición deben satisfacer las necesidades del usuario tales como conveniencia y comodidad. Además, hacen observaciones como que las diademas que se encuentran actualmente en el mercado son muy pesadas y difíciles de utilizar. Como una solución se propone el uso de diseños ligeros, amigables con el usuario, fáciles de utilizar, y con electrodos que hagan un buen contacto con el cuero cabelludo y tengan una distribución adecuada. Por ejemplo, enfatizan que los electrodos deberían adherirse de manera natural al momento de colocar el dispositivo.

En cuanto a la configuración de electrodos, Hairston et al. (2014), mencionan que estos dispositivos presentan algunos problemas referentes a las posiciones fijas que tiene cada electrodo, lo cual representa un problema de adaptabilidad a distintos tipos y tamaños de cabeza. Además, estas configuraciones fijas de electrodos limitan la capacidad de monitorear características en regiones distintas del cerebro. Ekanem et al. (2012) realizaron un estudio para evaluar la ergonomía de las diademas comerciales Mindwave de NeuroSky y EPOC de Emotiv. Los resultados de este estudio indican que Mindwave se considera fácil de colocar, pero incómodo debido a la presión que ejerce el electrodo que se coloca en la frente y la pinza de referencia que se coloca en la oreja. Por otro lado, EPOC fue considerado más cómodo, pero más difícil de colocar; ya que posee más electrodos (14 en total) y se requiere que los electrodos se coloquen con solución salina. Si bien en años recientes distintos proyectos han estudiado potenciales

aplicaciones de BCIs en la práctica diaria [ref]; en la literatura no ha sido muy explorado el espacio de diseño de este tipo de dispositivos para niños. Por lo cual no se tiene claro cuáles son las características de diseño que debe tener un dispositivo cerebral adecuado para su uso por niños. Algunos investigadores han tratado de adaptar el diseño de dispositivos cerebrales comerciales para que luzcan más atractivos para los niños (Garzotto et al., 2016), pero no se ha logrado mucho éxito. Además, únicamente se tiene evidencia del diseño de dispositivos de adquisición que usan EEG para adultos (Perego et al., 2015).

Por otro lado, Evain et al. (2016) menciona que: *“Diseñar una BCI es una tarea compleja y difícil que requiere conocimiento de varias disciplinas como lo son las Ciencias de la Computación, Ingeniería eléctrica, Procesamiento y análisis de señales, Neurociencias y Psicología”*. Adicionalmente, la investigación en BCIs se enfoca frecuentemente en el procesamiento y clasificación de las señales del cerebro con el objetivo de mejorar el desempeño de la interfaz en términos de la velocidad y la precisión. El progreso en estas áreas sin duda ha permitido tener mejores aplicaciones de este tipo de interfaces, sin embargo, hace falta trabajo para mejorar las interacciones que se presentan con las mismas. En este trabajo se hipotetiza que diseñar y desarrollar una diadema cerebral de manera participativa con niños proporciona una mejor usabilidad y experiencia de uso a dicho dispositivo.

1.2.1 Preguntas de investigación

Dada la problemática planteada surgen las siguientes preguntas de investigación:

[P1]. ¿Cuáles son las características de diseño que debe de tener una diadema cerebral para su uso por niños?

[P2]. ¿Cuál es la experiencia de uso y la usabilidad de la diadema propuesta para su uso por niños?

1.2.2 Objetivos

Con base en las preguntas de investigación que se plantearon, el proyecto está enfocado en el siguiente objetivo general:

Diseñar y desarrollar una diadema cerebral de manera participativa con niños de edad escolar y evaluar su usabilidad y experiencia de uso.

Partiendo de este objetivo general se plantean los siguientes objetivos específicos:

[Oe1]. Identificar las características de diseño que deben tomarse en cuenta para diseñar diademas cerebrales apropiadas para niños

[Oe2]. Diseñar e implementar un prototipo de alta fidelidad de una diadema para uso por niños, funcional, cómoda y fácil de colocar.

[Oe3]. Realizar un estudio comparativo con niños para obtener la usabilidad y la experiencia de uso del prototipo de alta fidelidad propuesto

1.3 Metodología

Para el desarrollo de este dispositivo se siguió una metodología iterativa centrada en el usuario. El proceso que se siguió fue el siguiente (Figura 5):

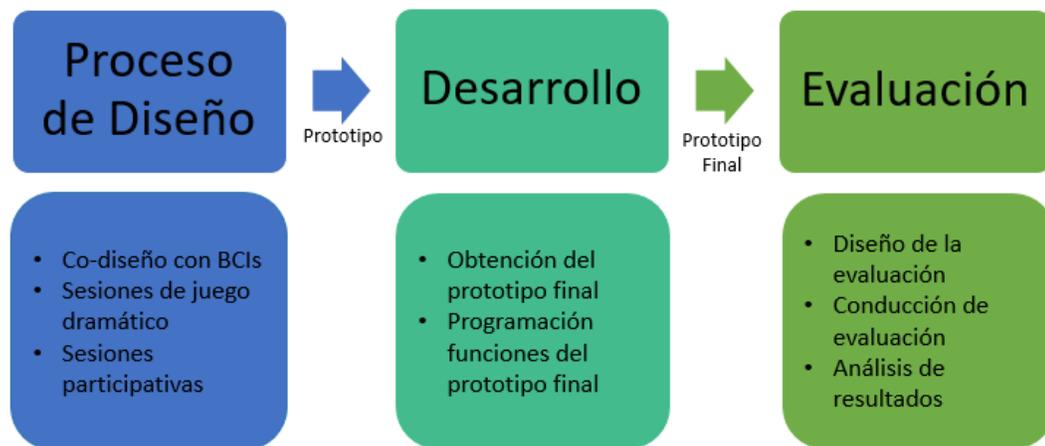


Figura 5. Metodología utilizada en el proyecto

1.- Proceso de Diseño. El proceso de diseño tiene como objetivo principal el obtener las características de diseño que debe tener una diadema cerebral adecuada para su uso por niños. Para esto, primero se realizaron sesiones de co-diseño con los niños, en las cuáles interactuaron con algunos dispositivos cerebrales comerciales y dieron su opinión acerca de ellos. Después, los niños realizaron sesiones de Juego

dramático en las cuáles por medio de una historia base actuaron situaciones que involucraban a un niño que debía fabricar y utilizar un dispositivo cerebral. Al finalizar las sesiones de juego dramático, los niños realizaron sesiones participativas de diseño en las cuales elaboraron sus visiones y prototipos de baja fidelidad. Todas las actividades que se realizaron durante esta etapa se grabaron y analizaron posteriormente con ayuda de técnicas cualitativas a través de transcripciones y un diagrama de afinidad. El proceso de diseño nos permitirá obtener: (1) las características de diseño del prototipo y (2) prototipos de baja fidelidad hechos por los niños

2.- Desarrollo. El objetivo de esta etapa fue el de definir, especificar y obtener el prototipo de alta fidelidad con base en los prototipos de baja fidelidad que los niños propusieron y las características de diseño que emergieron del proceso de diseño. Primero se elaboraron bosquejos de baja fidelidad de los cuales, se eligió el que se consideró que adoptaba mejor las características que emergieron del trabajo de diseño con los niños. Después de esto se trabajó en conjunto con un experto en diseño gráfico para obtener el modelo 3D del bosquejo final. Posteriormente se desarrolló el prototipo por medio de software y hardware específicos para trabajar con interfaces cerebrales. Este prototipo es capaz de leer la actividad cerebral del usuario y proporcionar estímulos que le informen acerca de su nivel de atención. Como resultado de esta fase se obtuvo un prototipo de alta fidelidad de un casco cerebral.

3.- Evaluación. En esta etapa se realizó una evaluación en sitio con la finalidad de conocer la experiencia de uso y la usabilidad del dispositivo propuesto. Para ello se realizó un estudio intra-sujetos en la cual participaron 31 niños de una escuela primaria rural en Ensenada, B.C., México. Para ello todos los participantes realizaron una actividad de entrenamiento de retroalimentación neuronal con el dispositivo propuesto y con un dispositivo comercial presente en la literatura (Mindwave de NeuroSky). Después de cada actividad, los niños respondieron cuestionarios de usabilidad, experiencia de uso y una entrevista que fue grabada en audio. Estos resultados se analizaron posteriormente por medio de estadística descriptiva y análisis estadístico. Además, se utilizaron técnicas cualitativas para el análisis de las entrevistas. La evaluación se video grabó para su posterior análisis por medio de observación indirecta y un esquema de codificación. Como resultado de esta etapa se obtuvieron: (1) Datos cualitativos y cuantitativos acerca de la usabilidad y experiencia de uso de los dispositivos.

Capítulo2. Trabajos Relacionados

En este capítulo se presenta la investigación existente acerca del diseño de dispositivos con niños. También se presentan algunos trabajos relacionados donde se generan prototipos mediante impresoras 3D de los cuales se muestran algunos ejemplos. Finalmente se abordan los trabajos referentes a las interfaces cerebrales los cuales se centran en el diseño, la evaluación y el uso por niños.

2.1 Diseño en Interacción Humano-Computadora

La Interacción Humano-Computadora (HCI por sus siglas en inglés) es una disciplina que se preocupa por el diseño, la implementación y la evaluación de sistemas interactivos para su uso por las personas. Dentro de la HCI se encuentra el diseño de interacción, el cual se enfoca en diseñar sistemas interactivos que apoyan la manera en que las personas se comunican e interactúan en su vida diaria (Rogers et al., 2002).

El diseño de estos sistemas interactivos es de gran importancia para el desarrollo de nuevas tecnologías y paradigmas de interacción. Como menciona Wobbrock (2012), una de las contribuciones que se pueden realizar en HCI son los llamados artefactos. Estos artefactos se definen como contribuciones que involucran nuevos sistemas, arquitecturas, herramientas o diseños que revelen oportunidades de mejora, que aporten nuevos resultados y que proporcionen otra perspectiva de algún problema de investigación en particular. En cuanto a los nuevos diseños, se consideran como aportación nuevos prototipos, bosquejos, maquetas, demostraciones u otras visiones que busquen aportar nuevas ideas o motivar con nuevos problemas de investigación. Además, se menciona que con estos nuevos diseños la forma tiene prioridad sobre el funcionamiento (Wobbrock, 2012).

Hoy en día el diseño de sistemas interactivos se enfoca en incluir a los usuarios desde las etapas más tempranas del diseño. Esto con la finalidad de obtener sistemas con una mejor usabilidad y experiencia de uso. Este enfoque de incluir al usuario se conoce como Diseño centrado en el usuario. Dicho enfoque incluye distintas técnicas como la etnografía y el diseño contextual rápido (Rogers et al., 2002; Beyer y Holzblatt, 1999).

La técnica de diseño contextual rápido (Beyer y Holtzblatt, 1999) se enfoca en diseñar sistemas mediante el entendimiento del comportamiento y las características del usuario a través de entrevistas u

observaciones. Para ello, primeramente, se hace un estudio para obtener datos acerca de las necesidades, características e incluso el entorno en el que se desenvuelve el usuario. Después, se realiza una interpretación de estos datos para luego elaborar bosquejos y finalmente prototipos ya sea de baja, media o alta funcionalidad del sistema que se está diseñando. Este proceso se realiza de manera iterativa.

Gracias al Diseño centrado en el usuario y sus técnicas, se pueden conocer mejor las características y necesidades de la población que estará en contacto directo con el sistema, por lo cual se pueden definir mejor los requerimientos de cada sistema en particular. A continuación, se muestran un par de ejemplos de diseño con niños.

2.1.1 Diseño con niños

En la literatura existe gran cantidad de trabajos que incluyen a los usuarios en el proceso de diseño de sistemas interactivos.

Respecto al diseño con niños existen diferentes enfoques para obtener bosquejos y prototipos que cubran las necesidades y las características de los niños hacia los que va dirigido el uso de estos sistemas. Uno de ellos es el *Comicboarding* (Moraveji et al., 2007) en la cual durante sesiones participativas de diseño se utilizan pequeñas historietas elaboradas especialmente para dichas sesiones con el fin de obtener ideas de diseño directamente de los niños; estas historietas se elaboran con ayuda de un experto y están relacionados con el contexto de lo que se busca diseñar (Figura 6).



Figura 6. Niño realizando actividad de *Comicboarding* (Moraveji et al., 2007)

Con el *Comicboarding* se busca que los niños proporcionen ideas de diseño de una manera más espontánea. Esto se logra mediante una historia ya empezada que los niños tienen que completar a través de su propia narración. Para ello se necesita de una persona que a través del dibujo vaya completando la historia según se va desarrollando; esto se hace con la finalidad de que el niño se concentre más en la narración y en generar ideas que en dibujarlas y describirlas. Aunque solo se obtienen bosquejos del diseño, éstos se complementan con las ideas expresadas por los niños mediante el desarrollo de la historia.

Otros trabajos se enfocan en que los niños obtengan prototipos de baja fidelidad de un sistema o alguna tecnología en particular mediante. Por ejemplo, Mann et al. (2014) realizó un taller llamado “La pluma del futuro” con la finalidad de obtener de los niños ideas de diseño para un dispositivo que ayude a los niños más pequeños a aprender a escribir.

En estos talleres se incluyó la participación de 12 niños de 11 a 12 años quienes realizaron una lluvia de ideas las cuales discutieron como grupo, además de elegir sus materiales y elaborar sus prototipos (Figura 7).



Figura 7. Niños participando en los talleres: Haciendo lluvia de ideas, eligiendo materiales y presentando sus prototipos. (Mann et al., 2014)

Finalmente, los niños pasaron frente al grupo uno a uno y presentaron los prototipos que elaboraron y describieron su funcionamiento. Por ejemplo, un niño elaboró una pluma con botones y diferentes funciones para por ejemplo cambiar de idioma o autoescritura (Figura 8).

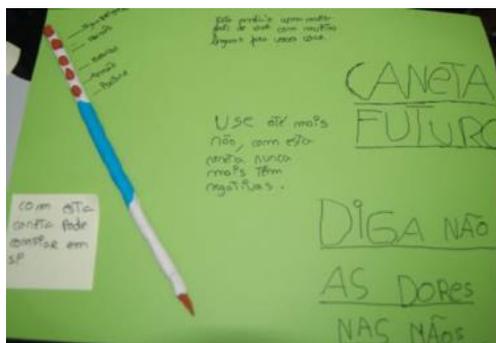


Figura 8. Prototipo de una pluma inteligente con botones con distintas funciones (Mann et al., 2014)

Este taller de “La pluma del futuro” refleja el interés que tuvieron los niños en participar en el diseño de nuevas tecnologías ya que se obtuvieron 11 prototipos, algunos de ellos con características futuristas, como escribir por si mismas. Además, estos prototipos proporcionan algunas ideas ó características que pudieran ser útiles para diseñar este tipo de herramientas de escritura para niños.

Frauenberger et al. (2016) muestra que también es posible realizar sesiones de diseño y obtener prototipos de baja fidelidad trabajando con niños de un sector vulnerable de la población. En este trabajo se buscaba diseñar objetos inteligentes para niños con autismo; para ello se reclutaron a 4 niños con autismo de alta funcionalidad quienes realizaron sesiones de diseño durante un año a lo largo del cual realizaron entre 10 y 14 sesiones de diseño.

En estas sesiones de diseño se obtuvieron 4 prototipos de dispositivos inteligentes (Figura 9) que cuentan con características que los niños propusieron o que aprovechan alguna de las habilidades de los niños. Por ejemplo, uno de ellos es un par de audífonos con una cámara que ayudan al niño a recordar y comprender situaciones que lo rodean; esto lo hace mediante la videograbación de ciertas situaciones que alteran al niño para poder reproducirlas después con la finalidad de identificarlas. Otro ejemplo consiste en un dispositivo con una superficie táctil interactiva sobre la cual el niño puede dibujar para después animar y compartir sus dibujos.



Figura 9. Los 4 prototipos que se obtuvieron del proceso de diseño (Frauenberger et al., 2016)

2.1.2 Obtención de prototipos mediante impresoras 3D

En la literatura se ha explorado no sólo la obtención de prototipos de baja fidelidad sino también de prototipos de alta fidelidad. Uno de los métodos que se utilizan para fabricar prototipos y/o dispositivos tecnológicos son las impresoras 3D.

Las impresoras 3D han ganado popularidad en los últimos años; para su uso en la fabricación de dispositivos electrónicos (Mellis y Buechley, 2012), elaboración de tecnologías de asistencia (McDonald et al., 2016) e incluso se utilizan para elaborar prototipos en actividad extracurriculares en escuelas primarias (Zhaochen, 2017).

Un ejemplo de elaboración de prototipos mediante impresoras 3D en el proyecto *Enabling The Future*¹ la cual es una comunidad que se dedica al diseño, personalización, fabricación y distribución de prótesis de manos para niños; dichas prótesis se obtienen mediante el uso de impresoras 3D. Esta comunidad está formada por padres de familia, niños, profesores, investigadores, y diseñadores. Por ejemplo, existen profesores que ayudan a los niños en las escuelas a diseñar prótesis para otros niños al igual que existen grupos que realizan talleres para difundir y enseñar cómo se lleva a cabo la elaboración de estos prototipos

Por otro lado, en la actualidad existen propuestas para la fabricación de dispositivos cerebrales por medio de impresoras 3D. Un ejemplo es el dispositivo cerebral SIMON², el cual es un casco interactivo que lee la actividad cerebral del usuario para detectar su estado mental. Este estado mental se representa por medio

¹Proyecto Enabling the Future - <http://enablingthefuture.org/>

² Casco SIMON - <http://jerviny.com/simon>

de colores para cada estado. Además, los datos que detecta el casco se envían hacia una aplicación en un teléfono inteligente para proporcionar retroalimentación al usuario acerca de su estado mental.

Sin embargo, el dispositivo cerebral SIMON aún se encuentra en etapa de desarrollo e implementación y no ha sido evaluado en términos de precisión de la señal y/o aspectos como usabilidad y experiencia de uso.

2.2 Interfaces cerebrales

En recientes años algunos proyectos han estudiado potenciales aplicaciones de BCIs en la práctica diaria. Por ejemplo, Sas y Chopra (2015) utilizaron una diadema cerebral comercial (Emotiv de EPOC) para desarrollar el sistema MeditAid. Este sistema apoya la autorregulación de la atención durante sesiones de meditación. MeditAid funciona identificando diferentes estados de meditación de los usuarios y proporcionándoles retroalimentación dependiendo de este estado. Dicha retroalimentación se proporciona por medio de estímulo auditivos rítmicos; se eligió este tipo de retroalimentación debido a que las sesiones de meditación se realizan con los ojos cerrados. De este modo la persona puede recibir dicha retroalimentación sin interrumpir su actividad.

La evaluación del sistema mostró que este tipo de estímulos de retroalimentación ayudó principalmente a las personas que eran principiantes en la meditación a autorregular sus niveles de atención durante este estado.

Por otro lado, mencionan que la implementación de este tipo de prototipos abre las puertas para nuevas aplicaciones de las interfaces cerebro-computadora más allá de los videojuegos y el uso clínico.

Sin embargo, en la literatura no ha sido muy explorado el espacio de diseño para interfaces cerebrales para niños y únicamente se tiene evidencia del diseño de sistemas EEG para su uso por adultos. Por ejemplo, Perego et al. (2015) proponen un diseño de un dispositivo cerebral para adultos (Figura 10). Además, proponen un concepto inicial del dispositivo el cual cuenta con características como: una interfaz de usuario intuitiva, fácil y rápida colocación, un diseño ligero y con estabilidad al momento de usarlo, adaptabilidad a diferentes tamaños de cabeza, así como múltiples posiciones para la colocación de

electrodos. Sin embargo, la obtención de un prototipo de este diseño propuesto sigue en proceso al igual que la evaluación del mismo.



Figura 10. Diseño de un dispositivo cerebral para adultos; propuesto por Perego et al. (2015)

2.2.1 Evaluación de dispositivos cerebrales

Respecto al diseño de las diademas, Mihajlović et al. (2015) menciona que estos dispositivos deben satisfacer las necesidades del usuario tales como conveniencia y comodidad. Además, hace observaciones como que las diademas o lectores de actividad cerebral que se encuentran actualmente en el mercado son muy pesadas y difíciles de utilizar. Como una solución se propone el uso de diseños ligeros, amigables con el usuario, fáciles de utilizar, con electrodos que hagan un buen contacto con el cuero cabelludo y tengan una distribución adecuada. Por ejemplo, enfatizan que los electrodos deberían adherirse de manera natural al momento de colocar el dispositivo.

Ekandem et al. (2012) realizaron un estudio con 13 participantes adultos para evaluar la ergonomía de las diademas comerciales Mindwave de NeuroSky y Epoc de Emotiv. Este estudio consistió en utilizar las diademas para realizar una actividad de retroalimentación neuronal durante 15 minutos. Se evaluó la comodidad de los dispositivos, además de que se midieron los tiempos de colocación de cada dispositivo.

Los resultados de este estudio indican que Mindwave se considera rápido de colocar, pero algo incómodo debido a la presión que ejerce el electrodo que se coloca en la frente y la pinza de referencia que se coloca en la oreja. Por otro lado, Epoc fue considerado más cómodo, pero más lento de colocar; ya que posee más electrodos (14 en total) y se requiere que los electrodos se coloquen con solución salina.

Por otro lado, Hairston et al. (2014) evaluaron la usabilidad de 4 dispositivos cerebrales comerciales (BioSemi Active two, ABM B-Alertx10, Quasar HSM, Emotiv EPOC; Figura 11).



Figura 11. Dispositivos utilizados en el estudio (Hairston et al., 2014)

Para evaluar la usabilidad se realizó un estudio con 16 participantes voluntarios de entre 19 y 45 años quienes realizaron diversas actividades durante una hora. Dichas actividades incluían tareas de procesamiento visual, tareas para ejercitar la memoria y actividades para inducir ruido en la señal; en éstas últimas, se les pedía a los participantes que realizaran acciones como gestos con la cara, parpadeos o movimientos de la mandíbula.

Una vez que los participantes realizaron las actividades con los 4 dispositivos, los calificaron en cuanto a comodidad y preferencia por medio de cuestionarios de usabilidad en donde se midió comodidad y preferencia por los dispositivos.

Los resultados de este estudio indican en general que para este tipo de dispositivos existen diversos problemas de usabilidad. Primero existe un problema con la adaptabilidad de los dispositivos a distintos tipos de cabeza. Referente a lo anterior, existen problemas con el contacto que hacen los electrodos con la cabeza, pues en las cabezas más pequeñas los electrodos no hacen un buen contacto con el cuero cabelludo. Aunado al problema de contacto de los electrodos, se presentaron problemas para mantener a los electrodos en su posición, por lo cual no se tiene una señal confiable. Además, se encontró que con algunos de estos dispositivos si se presenta movimiento por parte del usuario, los dispositivos se moverán de su posición afectando así la estabilidad de la señal.

2.2.2 Uso de interfaces cerebrales por niños

Respecto al uso de interfaces cerebrales por niños, existen pocos trabajos que reflejen cómo es la interacción de los niños con este tipo de interfaces además de que no se han encontrado trabajos que evalúen su usabilidad y la experiencia de uso.

Por un lado, existen trabajos que emplean el uso de interfaces cerebrales como una herramienta para mejorar algún aspecto mental de por ejemplo los niveles de atención de los niños con autismo. Sin embargo, existen pocos trabajos que empleen el uso de este tipo de interfaces con niños típicos.

Huang et al. (2014) utilizan el dispositivo cerebral Emotiv EPOC para controlar un sistema llamado FOCUS que ayuda a mejorar la comprensión lectora de los niños.

El dispositivo FOCUS puede detectar en un niño cuando su nivel de atención baja durante una lectura. Cuando esto sucede, el sistema proyecta una visualización con una imagen que responde a la actividad cerebral del niño (Figura 12). Dicha visualización está relacionada con la temática de la lectura y se proyecta con la finalidad de que el usuario recupere su nivel de atención (*e.g.*, en la lectura relacionada con las estaciones del año, la proyección consiste en una planta que al detectar un buen nivel de atención florece).

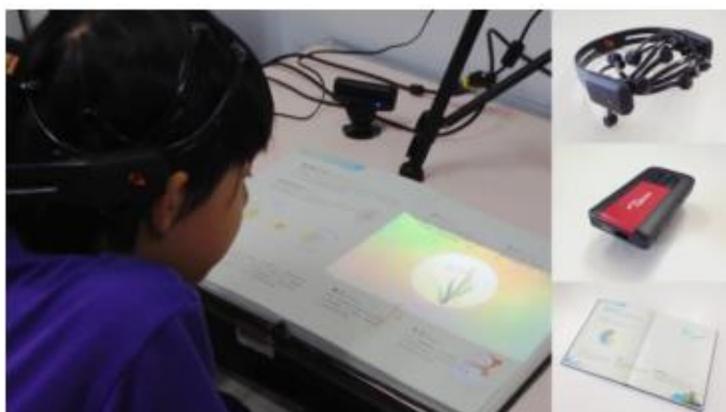


Figura 12. Niño utilizando FOCUS (Huang et al., 2014)

Para probar la efectividad de FOCUS, realizaron un estudio en el cual 24 niños de 6 a 8 años realizaron dos actividades de lectura. La primera consistió en una lectura contextual en la cual, si se detectaba un nivel bajo de atención, la imagen se proyectaba sobre el libro. La segunda consistía en realizar primero la lectura completa y al finalizar se realizaba la proyección de imágenes o video. Para evaluar la comprensión lectora al finalizar cada actividad los niños debían mencionar de qué se trató la lectura y respondieron una pequeña prueba que el profesor diseñó.

Los resultados en este estudio mostraron que los niños estuvieron más atentos a la lectura y obtuvieron mejores resultados en la prueba de lectura contextual, es decir FOCUS les ayudó a mejorar de manera significativa su comprensión lectora por medio de la proyección de imágenes que se presentaban cuando los niños disminuían su atención o interés durante la lectura.

Garzotto et al. (2016) se han enfocado en utilizar la actividad cerebral de niños con alguna discapacidad intelectual para controlar un ambiente inteligente (Figura 13). Este ambiente responde a los niveles de atención y relajación del niño brinda estímulos multisensoriales como lo son proyección de imágenes, cambios en la luz del ambiente, música, además del uso de sistemas inteligentes como una máquina que produce burbujas de jabón y objetos con forma de figuras geométricas que emiten luz.

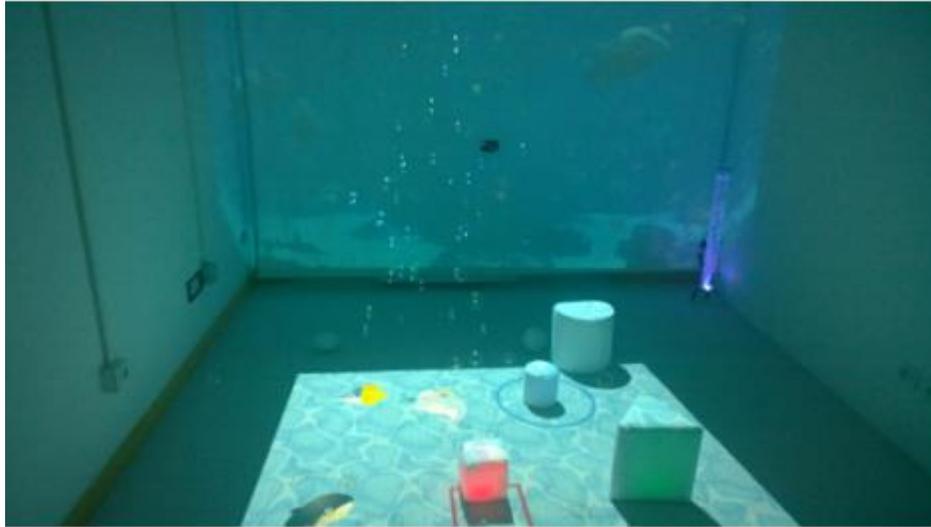


Figura 13. Ambiente inteligente que se controla por medio de la diadema cerebral (Garzotto et al. 2016)

Para obtener las lecturas de la actividad cerebral del niño, utilizan la diadema cerebral MindWave de NeuroSky³, la cual es capaz de medir los niveles de atención y relajación necesarios para controlar el ambiente inteligente. Sin embargo, los investigadores utilizan la diadema en conjunto con un casco que puede cambiarse de acuerdo con la personalidad del niño, esto puede ser mediante la apariencia de un animal o algún personaje de caricatura (Figura 14). Esto se realiza con la finalidad de que el uso del casco sea menos invasivo y más placentero lo cual es importante para los niños con discapacidad intelectual.



Figura 14. Diadema NeuroSky + casco de juguete (Garzotto et al., 2016)

³ Diadema Mindwave de NeuroSky - <https://store.neurosky.com/pages/mindwave>

Capítulo3. Diseño y desarrollo.

En este capítulo se presentan las actividades que se realizaron en conjunto con los niños para determinar las características de diseño que debe de tener un dispositivo cerebral adecuado para su uso. Las actividades de este estudio se llevaron a cabo con ayuda de un grupo de niños de una escuela primaria y una maestra de teatro infantil. El objetivo principal de estas actividades fue obtener las características de diseño de los dispositivos cerebrales para su uso por niños en edad escolar. El estudio también ayudó a que los niños conocieran algunos diseños de dispositivos comerciales, los usaran y dieran su opinión al respecto de los mismos. Estas opiniones se obtuvieron por medio del análisis cualitativo de grabaciones de audio y video de las actividades que se realizaron.

Además, se describe el proceso de diseño y el desarrollo de un prototipo de alta fidelidad de un dispositivo cerebral adecuado para su uso por niños en edad escolar. Esto se realizó con base en las características de diseño que se obtuvieron en las sesiones de diseño donde participaron los niños. El diseño del prototipo se realizó en dos etapas: (1) Obtener prototipos de baja fidelidad a través de sesiones de diseño participativas y (2) Diseñar e implementar un prototipo de alta fidelidad.

También se presentan y se describen los métodos que se utilizaron para el diseño de los prototipos de baja fidelidad. Después se describe a detalle el diseño del prototipo de alta fidelidad y finalmente la implementación del mismo.

3.1 Colección de datos

Para obtener las características de diseño con las que debe contar un dispositivo cerebral para su uso por niños, se realizó un estudio cualitativo en la Escuela Primaria pública Dr. Octavio León Medellín ubicada en El Sauzal, Ensenada, B.C., México. El estudio se realizó por tres meses e involucró las siguientes actividades (Tabla 3):

Tabla 3. Sesiones de Uso de BCIs y Juego dramático

Actividad	Participantes	Sesiones	Objetivo	Método
Uso de BCIs	7 niños 1 experto en HCI	1	Que los niños conocieran y usaran tres dispositivos cerebrales comerciales. Obtener la opinión de los niños acerca de estos dispositivos	Pensamiento Manifestado (<i>Think-aloud</i>)
Juego dramático	7 niños 1 experto en HCI 1 experto en teatro infantil	3	Obtener las características de diseño de los dispositivos cerebrales para su uso por niños por medio de la actuación de los niños	Sesiones de Juego dramático

3.1.1 Uso de BCIs

En la primera actividad participaron 7 niños (2 niñas y 5 niños) de 8 a 11 años ($m=9.42$, $sd=1.39$) y un experto en Interacción Humano-Computadora. El experto en HCI moderó la reunión y se encargó de explicar a los niños la actividad, colocar los dispositivos y grabar audio y video de las sesiones.

Antes de iniciar, se les explicó a los niños en qué consistía la actividad que iban a realizar con las aplicaciones de los dispositivos, así como que debían permanecer sentados en la postura indicada (*i.e.*, para utilizar las aplicaciones de las diademas) y sin moverse. Posteriormente, utilizando técnicas de pensamiento manifestado (Someren et al., 1994) se les pidió que dijeran lo que estaban pensando cuando se les colocara el dispositivo y cuando lo estuvieran utilizando.

Cada niño uso las diademas MindWave de NeuroSky, Muse de Interaxon, y MindFlex durante 5 minutos. Para la diadema MindWave de NeuroSky (Figura 15(a)) los niños realizaron una actividad de retroalimentación neuronal con la aplicación *Brainmaster*. Con la diadema Muse de Interaxon (Figura 15 (b)) se utilizó la aplicación móvil MUSE⁴ para realizar entrenamiento de retroalimentación neuronal. Y en

⁴ Aplicación móvil MUSE - <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.interaxon.muse&hl=es>

el caso de la diadema MindFlex (Figura 15 (c)) los niños solamente la usaron en la cabeza, pero no realizaron ninguna actividad con ella, esto debido a que no se tenía disponible el tablero con el cual interactúa la diadema. Esta sesión tuvo una duración de 1 hr. con 45 minutos

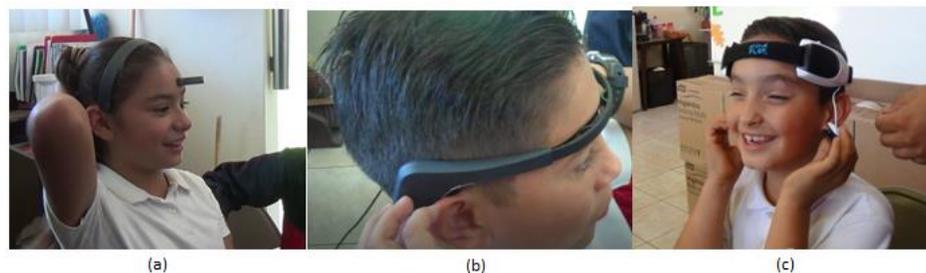


Figura 15. Diademas utilizadas en la sesión de uso de BCIs: (a) MindWave de NeuroSky, (b) Muse de Interaxon, (c) MindFlex

3.1.2 Sesiones de Juego Dramático

Después de la sesión de Uso de BCIs, se realizaron 3 sesiones de juego dramático. El juego dramático es una técnica que se utiliza para obtener de manera espontánea la expresión del niño; en el juego dramático se parte de un tema central a partir del cual los niños recrean situaciones imaginadas por ellos mismos (Eines y Mantovani, 1980). Además, el juego dramático se basa en la improvisación, respetando siempre el tema o el argumento central que en este caso particular es el diseño de un dispositivo cerebral para niños. Este tipo de sesiones puede realizarse en un espacio amplio como el patio de la escuela y el profesor puede estimular o apoyar el avance de la actividad en el caso de que los niños se encuentren desmotivados (Eines y Mantovani, 1980).

Eines y Mantovani (1980) mencionan que *“la utilización del juego dramático en la escuela es el medio más completo para permitir que el niño se exprese de un modo espontáneo y orgánico, entendiendo por orgánico la posibilidad de hacerlo a través del movimiento del cuerpo, unificando la voz y el gesto”*.

En dichas sesiones los niños por medio de una historia base relacionada con la temática de los dispositivos cerebrales, (Anexo 1) actuaron diversas situaciones en las cuales definían características o interactuaban con el dispositivo. El objetivo principal de estas sesiones fue el promover en los niños el pensamiento de diseño referente a los dispositivos cerebrales, y obtener sus ideas y características de diseño a través de la expresión oral y corporal

En estas sesiones, participaron los mismos 7 niños que participaron en la sesión de Uso de BCIS, una maestra de teatro infantil, y un experto en HCI. La maestra de teatro dirigió las sesiones, y el experto de HCI auxilió a la maestra de teatro, videograbó todas las sesiones, y definió un conjunto de preguntas (Anexo 2) que sirvieron como guía para poder estructurar cada sesión con base en una temática diferente. Dichas temáticas estaban relacionadas con diferentes aspectos de las interfaces cerebrales (*i.e.*, apariencia, forma, comodidad, funcionalidades, comodidad) que los niños mencionaron durante el Uso de BCIs; además se plantearon temáticas distintas en cada sesión de juego dramático para evitar que los niños abordaran las mismas temáticas en cada sesión. Una vez definidas estas preguntas, en conjunto con la maestra de teatro se definieron las temáticas que se abordarían en cada sesión y las actividades por realizar en cada una de ellas (Tabla 4).

Tabla 4. Sesiones de Juego dramático

Sesión	Temática	Duración	Etapas
Sesión 1	Apariencia/forma	1 hr.	Calentamiento
			Definir/recordar temática
			Actuación
			Retroalimentación
Sesión 2	Facilidad/Tiempo Colocación	1 hr.	Calentamiento
			Definir/recordar temática
			Actuación
			Retroalimentación
Sesión 3	Funcionalidad/Comodidad	1 hr.	Calentamiento
			Definir/recordar temática
			Actuación
			Retroalimentación

Durante las sesiones de juego dramático, además de la participación de los niños, la maestra apoyaba la escena y la creatividad de los niños con algunos juguetes, y permitía a los niños utilizar algún objeto que

quisieran traer de su casa. Las sesiones se realizaron en el patio de la escuela ya que este es un espacio grande, abierto, con algunas mesas, sillas, bancas, por lo cual se facilitaba el acomodo y uso del mobiliario para las actividades de los niños. Cada una de las sesiones se dividía en 4 etapas: Calentamiento, Definir/recordar temática, Actuación y Retroalimentación.



Figura 16. Niños realizando sesiones de Juego Dramático

- **Calentamiento:** En esta etapa de la sesión se realizaban juegos como las estatuas, la papa caliente o imitar lo que hace el compañero. El objetivo de esta etapa era preparar a los niños para la siguiente etapa y romper el hielo al mismo tiempo que generaban ideas por medio de una pregunta que se les hacía si perdían (relacionada con los dispositivos cerebrales). Esta actividad se realizaba durante 10 minutos.
- **Definir/recordar temática:** Esta etapa daba inicio una vez que los niños realizaban el Calentamiento. El objetivo en esta parte de la sesión era el de introducir a los niños a la temática que se tocaría durante la sesión, esto se hacía por medio de preguntas o lluvias de ideas relacionadas con la temática que se deseaba abordar. En el caso de la primera sesión, a los niños se les presentó la historia base, en la cual el personaje principal es un niño de su misma edad que requiere diseñar un dispositivo cerebral para controlar sus “poderes” cerebrales, después de esto, se presentó la primera problemática, y se hicieron preguntas y lluvias de ideas para posteriormente improvisar algunas escenas y finalizar con

una actividad de retroalimentación acerca de lo que se trabajó en dicha sesión. En el caso de la segunda y tercera sesión, antes de realizar las actividades antes mencionadas de esta etapa, se hacía una dinámica para que los niños recordaran lo que se había visto la sesión anterior y de este modo se enriquecieran las ideas de la sesión en turno. Esta actividad se realizaba durante 15 minutos.

- **Actuación:** Durante esta etapa los niños actuaban situaciones que la maestra de teatro les planteaba y que tenían lugar en la historia base. La maestra dividía el grupo en dos, el primer grupo de niños actuaba y los otros esperaban como si fueran espectadores. Antes de comenzar la actuación, la maestra definía los roles. Para evitar conflictos, la maestra otorgó el papel del protagonista a diferentes niños al azar durante las tres sesiones, una vez que la maestra planteaba la problemática y asignaba los roles, los niños comenzaban su actuación. Durante la representación de la escena, la maestra iba guiando a los niños a través de la historia (e.g., como si fuera un narrador) y para finalizar, la maestra iba apoyándose en un “guion” en donde tenía las distintas preguntas que debían responderse en esa sesión. Al terminar la actuación del primer grupo pasaba ahora a ser espectador y el segundo grupo actuaba la misma escena, de esta manera los niños de ambos grupos podían aportar sus propias ideas a la misma escena. Esta actividad se realizaba durante 25 minutos.
- **Retroalimentación:** Esta era la etapa final de las sesiones de juego dramático. Al ser la parte final, los niños realizaban algunos ejercicios como respiraciones para relajarse y la maestra les recompensaba por medio de estímulos verbales y dulces. Para finalizar los niños se reunían en un punto con la maestra y ella realizaba preguntas o algún juego como la papa caliente para recordar lo que se había trabajado durante la etapa de actuación. Esto se hacía con la finalidad de enriquecer las ideas que los niños expresaron o aportar ideas nuevas que quizás no emergieron durante la sesión. Esta actividad tenía una duración de 10 minutos.

3.2 Análisis de datos

Una vez que todos los niños probaron las diademas, dijeron su opinión acerca de ellas, y realizaron las sesiones de juego dramático, las grabaciones se revisaron y se analizaron mediante un diagrama de afinidad.

Tanto la sesión de uso de BCIs y las sesiones de juego dramático (Tiempo total = 4 hrs.) se grabaron para su posterior análisis. Para ello se realizaron transcripciones de cada una de las grabaciones. Posteriormente, de estas transcripciones se extrajeron citas y se analizaron los datos para obtener temas emergentes derivados de los objetivos de investigación. Estos temas se agruparon en categorías según su relación o similitud. Una vez que las citas se categorizaron se realizó una sesión de interpretación en donde por medio de un diagrama de afinidad (Beyer y Holtzblatt, 1999) se obtuvieron temas emergentes, ideas de diseño e interpretaciones de las citas previamente obtenidas.

3.3 Resultados

A continuación, se muestran los datos obtenidos de las sesiones de Uso de BCIs y las sesiones de juego dramático.

3.3.1 Características de diseño

Basados en los datos obtenidos, se presentan cuatro características de diseño que deben tener los dispositivos cerebrales adecuados para su uso por niños en edad escolar.

3.3.1.1 Aspecto entretenido y atractivo

Los niños requieren que el dispositivo cuente con un aspecto entretenido, creativo y atractivo que los motive a querer utilizar el dispositivo.

“...Ese prototipo [se le debería] poner un nuevo color, ponerle imaginación, creatividad. No tiene que ser aburrido... Porque te sentirías aburrido y no lo usarías...” (Anabel, 10 años).

“El dispositivo tiene que tener creatividad, tus emociones y tiene que tener lo que más te gusta” (Andrea, 11 años)

Tomando en cuenta esta idea de que el dispositivo cuente con una apariencia divertida/entretenida, se encontró que el diseño debe contar con características que lo hagan atractivo y entretenido para motivar a los niños a que lo utilicen.

Por otro lado, relacionado con el aspecto entretenido/attractivo para los niños. Se encontró que a los niños no les gustan algunas características físicas de los dispositivos comerciales como lo son la forma y el color. Por ejemplo, en el caso del color se encontraron algunas diferencias entre niños y niñas por lo cual se requieren diseños neutrales en términos de género.

“yo le cambiaría el color por el diferente género, para las niñas rosa con blanco y para los niños, negro con azul” (Anabel, 10 años)

“El color, que fuera negro con azul” (Alexander, 10 años)

3.3.1.2 Fácil y rápida colocación

Se encontró que los niños consideraron las diademas comerciales incómodas, además de difíciles y tardadas para su colocación. Por esta razón los niños sugirieron el uso de diseños fáciles y rápidos de colocar. En su trabajo, Mihajlovic et al. (2015) sugieren también el uso de diseños fáciles de colocar.

“...ponerle una [correa] para que nada más lo desabroches y te la puedas quitar y poner... o ponerle un casco !!!!” (Mario, 11 años).

Por otro lado, se encontró que los niños están conscientes de que estos dispositivos no están hechos para tenerlos colocados por mucho tiempo, por lo cual sugieren que sea fácil de colocar/quitar en caso de que se quiera dejar de usar por un rato o no se requiera tenerlo puesto en ese momento.

“Porque puede haber momentos en que no se pueden usar y se puede romper” (Alexander, 10)

3.3.1.3 Comodidad

Los niños consideran que un dispositivo cerebral debe ser cómodo de usar. Para ello proponen el uso de materiales ligeros y suaves. Su propuesta surge ya que durante el uso de las BCIs los niños empezaron a sentir molestias en distintas zonas de sus cabezas debido a la presión que ejercen estos diseños.

“Un ratito (la usaría) porque me duele aquí” (señala el lado derecho de la diadema) (Anabel, 10 años)

*“Si (la usaría), si no tuviera esto (sensor), o que, si esté, pero nomas que esté planito para que no lastime”
(Roberto, 8 años)*

“Que esté hecho de algo esponjoso para que no me duela” (Julio, 8 años)

“Algo ligero, es lo mejor y puedes andar todo el día con él (dispositivo) sin cansarte” (Mario, 11 años)

Otro aspecto muy recurrente en el uso de las BCIs relacionado con la comodidad fue el de los clips en forma de pinza que se coloca en el lóbulo de la oreja que algunas diademas comerciales utilizan como referencias. Algunos de los niños al ver el clip que se colocaba en la oreja, expresaban que éste si les agradaba a la vista.

“me gusta esto y esto de la diadema (señalando clip y sensor)” (Anabel, 10 años)

“que así estuviera esta diadema con dos cositas (clips)” (señalando que le gustaría que NeuroSky tuviera dos clips) (Joel, 8 años)

Sin embargo, después de utilizar dispositivos con clips durante un tiempo y luego cambiar a un dispositivo sin clips, los niños parecían cambiar de opinión respecto al mismo.

“Me gusta más así sin pinzas porque me lastimarían” (Anabel, 10 años)

“Sin pinzas la siento más cómoda” (Joel, 8 años)

3.3.1.4 Retroalimentación

En cuanto a aspectos de retroalimentación, los niños consideraron que el dispositivo debe de proporcionar información acerca de lo que sucede en el cerebro del usuario.

“ayudará a ver qué sucede en su cerebro por ejemplo cuando mueve los parpados” (Anabel, 10 años)

“Un chip, para que se graben las cosas... y verlas después” (Roberto, 8 años)

Esta propuesta surge a raíz de que en las sesiones de Uso con BCIs los niños preguntaban frecuentemente si el dispositivo estaba listo para usarse. Además de que ninguno de los dispositivos que se probaron durante dichas sesiones cuenta con estímulos que proporcionen información al usuario acerca de la actividad cerebral.

Además, los niños propusieron el uso de tecnología que pudiera grabar distintos datos como las lecturas de la actividad cerebral para su posterior análisis e incluso propusieron que el dispositivo capturara imágenes que de alguna manera activaran su actividad cerebral. Por otro lado, los niños propusieron que el dispositivo diera avisos con luz y/o sonido.

3.4 Sesiones de Diseño

Se llevaron a cabo tres sesiones participativas en las cuales participaron los mismos niños que participaron en las sesiones de juego dramático a excepción de un participante que abandonó el proyecto por motivos de salud; en total fueron 6 niños (1 niña y 5 niños) de 8 a 11 años ($m=9.16$, $sd=1.32$) que trabajaron con un grupo de expertos ($n=3$) en HCI y un experto en diseño (Tabla 5). Todas las sesiones se llevaron a cabo en la Escuela Primaria pública Dr. Octavio León Medellín ubicada en El Sauzal, Ensenada, B.C., México.

Tabla 5. Sesiones de diseño

Sesión	Objetivo	Participantes	Duración
Visiones	Obtener de los niños prototipos de baja fidelidad (<i>sketches</i>)	6 niños 3 expertos en HCI (1 moderador) 1 experto en diseño	1hr. 50 min.
Visiones Personalización	Obtener prototipos de baja fidelidad (<i>sketches</i>) que reflejen la personalidad de los niños.	6 niños 1 experto en HCI	1 hr. 45 min.
Prototipos	Obtener prototipos tangibles hechos por los niños	6 niños 1 experto en HCI	1 hr. 45 min.

A continuación, se presenta y se describe cada una de las sesiones de diseño.

3.4.1 Sesión de diseño participativa: Bosquejos

El objetivo de esta sesión fue el obtener prototipos de baja fidelidad en la forma de bosquejo de dispositivos cerebrales. La sesión se dividió en tres etapas.

En la **primera etapa (1)** se les presentó a los niños el diagrama de afinidad con la finalidad de recordar las ideas que ellos habían expresado en las sesiones pasadas (20 minutos).

En la **segunda etapa (2)** los niños en 2 equipos de 3 personas (3 niños y un 1 en HCI) realizaron una lluvia de ideas de cómo tendría que ser el dispositivo. La experta en diseño se encargó de plasmar cada una de las ideas que los niños le indicaban en un bosquejo de papel (Figura 16) con la finalidad de que los niños no dibujaran y solo se dedicaran a expresar sus ideas acerca de los dispositivos (Moraveji et al., 2007).



Figura 17. Primer equipo especificando su bosquejo

Los bosquejos propuestos por los niños fueron los siguientes (Figura 17):

- **Bosquejo 1:** Los niños propusieron un dispositivo con forma de casco, el cual cuenta con 4 electrodos (colocados por dentro) y con capacidad de conectarse de manera inalámbrica, una linterna, una cámara, una ranura para una memoria SD, una pantalla y audífonos.

Las actividades que los niños sugirieron que realizará el dispositivo incluían la captura de imágenes de aquello que activara su actividad cerebral y conexión inalámbrica por Wi-Fi o Bluetooth para tener acceso a la memoria y extraer los datos que el dispositivo captura. Además de contar con una pantalla y auriculares para obtener retroalimentación acerca de su actividad cerebral, lo cual podían realizar también conectando su dispositivo a un celular.

- **Bosquejo 2:** El bosquejo que elaboró el segundo equipo era un dispositivo cerebral con forma de casco, al igual que el bosquejo anterior. Además, los niños, pensando en la comodidad del usuario, colocaron una tela suave en el interior del dispositivo para una mejor comodidad. Por otro lado, los niños comentaron que algunas partes del casco pueden desmontarse, por ejemplo, la pantalla, pues el usuario pudiera no requerirla en todo momento. Éste bosquejo contaba con un total de 4 electrodos en el interior, además los niños sugirieron también el uso de una cámara, una lámpara (luz), conexión inalámbrica por Wi-Fi, además de una bocina y una pantalla grande que pasa frente a los ojos del usuario. Los niños describieron su bosquejo como un casco que tomaría las lecturas cerebrales del usuario y las mostraría en la pantalla cuando el usuario así lo requiriera. La bocina

serviría para poner música al usuario y la lámpara (luz) indicaría al usuario si el dispositivo esta encendido o apagado e indicaría al usuario si está poniendo atención o no.

- Bosquejo 3:** Éste bosquejo, surgió debido a un descontento que hubo de uno de los niños con su equipo. Por esta razón y para evitar más conflictos el moderador decidió que el niño trabajara solo con uno de los expertos en HCI y elaborara su propio bosquejo con la diseñadora. Este diseño comparte varias similitudes con los dispositivos comerciales, por ejemplo, cuenta con un par de clips en cada lóbulo de la oreja además de colocarse una manera muy similar a la diadema Mindwave de NeuroSky. La única diferencia en cuanto a la colocación de este bosquejo con la diadema NeuroSky es que tiene una banda que rodea la cabeza a manera de soporte. Además, este diseño cuenta con 4 electrodos, todos ellos colocados en la parte frontal de la cabeza. Este diseño, en la parte de arriba cuenta con un Led indicador, que ayudara a observar si la diadema está tomando lecturas del cerebro, además de indicar si el usuario tiene un buen nivel de atención o no.

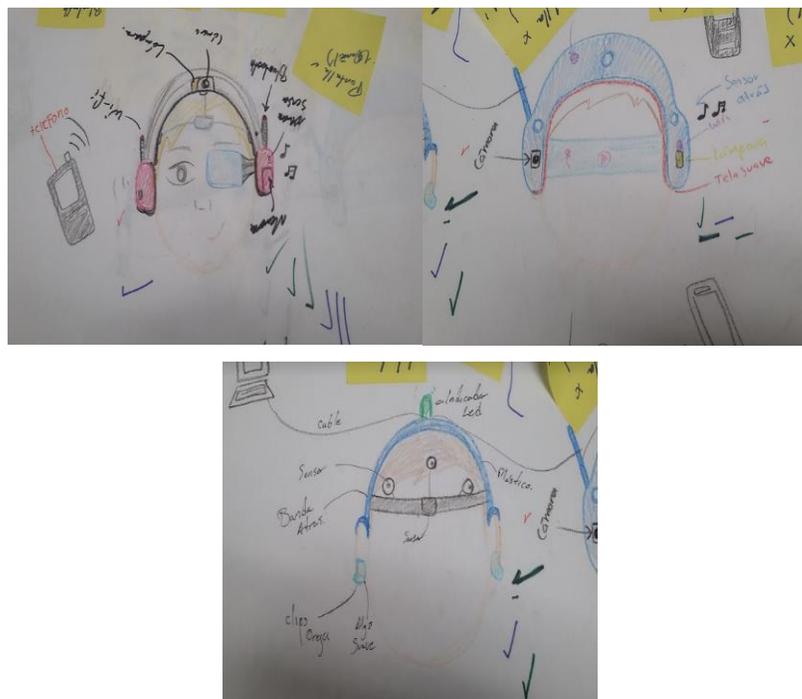


Figura 18. Bosquejos de los niños. En la parte superior izquierda el Bosquejo 1, a la derecha el Bosquejo 2 y abajo el Bosquejo 3.

En la **tercera etapa (3)**, cada uno de los equipos explicó a los demás su bosquejo. Enfatizaron la forma de su propuesta, la tecnología que tenía, sus colores y características generales. Después de esto, cada uno de los participantes escribía en una nota adhesiva aspectos positivos y negativos de cada uno de los bosquejos (Figura 18). Finalmente, cada participante votó por el bosquejo que le pareció mejor y se eligió el bosquejo 1 como el ganador.



Figura 19. Participantes identificando características positivas y negativas de sus bosquejos

3.4.1.1 Sesión de diseño participativa: Bosquejos personalización

Posteriormente, se realizó otra sesión de diseño con el fin de especificar el bosquejo que se seleccionó como ganador y agregar aspectos de diseño que los niños encuentran atractivos. Durante esta sesión participativa, se les presentaron a los niños los 3 bosquejos y sus características. Después, los niños se reunieron en parejas (formadas al azar) y agregaron ideas innovadoras en relación con la apariencia, personalización y la forma del dispositivo. Al finalizar, cada equipo explicó como especificó su bosquejo y se votó por el mejor eligiéndose al bosquejo del equipo 3 como el ganador.

Como resultado de esta sesión, se obtuvieron las siguientes visiones:

- **Bosquejo 1:** El primer equipo conformado por dos niños de 8 y 11 años, presentó una visión en forma de casco la cual definieron como un “casco de robot”, el cual los niños dibujaron de color

azul y lo adornaron con una estrella con alas (Figura 19). Como aspecto de personalización los niños mencionaron que podían removerse algunas partes del casco como la pantalla o los auriculares. Esto debido a que retroalimentación podría recibirse en la pantalla de un celular ó posteriormente observar los datos en la computadora.



Figura 20. Bosquejo del equipo 1

- **Equipo 2:** El segundo equipo fue el más productivo, ya que ellos elaboraron 3 bosquejos. El equipo se conformó por un niño y una niña de 10 años. La primera visión que presentaron se trataba de un casco personalizado con los colores y logotipos del hombre araña (Figura 20, izquierda). Este bosquejo refleja más la personalidad del niño debido a que expresó que su personaje favorito es el personaje del hombre araña. Además, este dispositivo proporciona retroalimentación por medio de luces de colores ubicadas al frente del dispositivo.

El segundo bosquejo (Figura 20, centro) se trata de un casco con colores transparentes en tonos fluorescentes los cuales reflejan más la personalidad de la niña, pues ella expresó que eran sus colores favoritos. Como aspecto de personalización la niña le proporcionó orejas que podían ponerse o quitarse, además de una pantalla en el ojo izquierdo en la cual podía recibir la retroalimentación acerca de la actividad cerebral; esta pantalla también puede removerse si el usuario no la requiere.

Finalmente, los niños elaboraron un bosquejo más (Figura 20, derecha) que cuenta con dos orejas, las cuales funcionan como bocinas para escuchar música o recibir retroalimentación auditiva. Los niños expresaron que estas orejas simulan ser las de un oso, pues éste es su animal preferido.



Figura 21. Bosquejos del Equipo 2.

- **Equipo 3:** El tercer equipo, conformado por dos niños de 8 años. elaboró un solo bosquejo, un casco color rojo con logotipos de Flash, un personaje que es el preferido de ambos (Figura 21). Este bosquejo cuenta con logotipos que proporcionan retroalimentación por medio de luz; dicha luz puede ser personalizada.

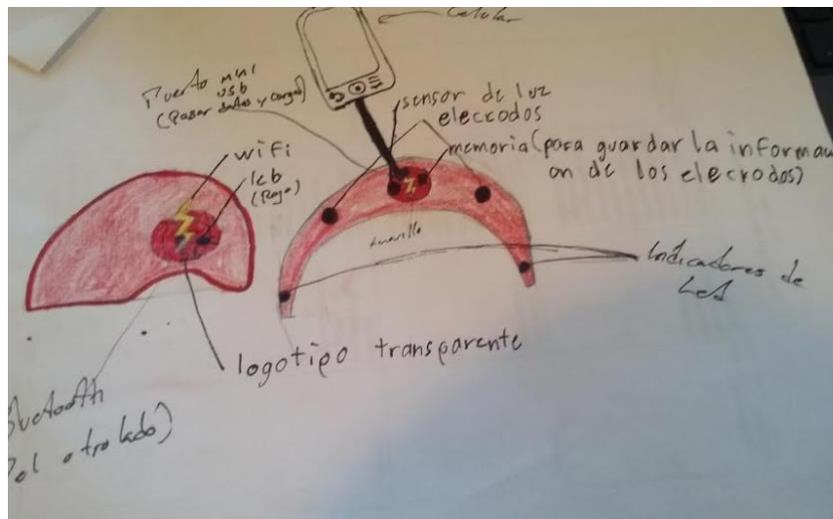


Figura 22. Bosquejo del Equipo 3

Como se observa en esta sección, los niños elaboraron bosquejos que reflejan la personalidad de cada uno de ellos. Por ejemplo, el equipo 2 no se centró en hacer solo un bosquejo con distintos aspectos de personalización, sino que hicieron 3 diferentes bosquejos, cada uno con un aspecto que refleja la personalidad de ambos (e.g., los colores, luces, logotipos, tipo de retroalimentación, forma). Todos los nuevos bosquejos están basados en el ganador de la sección 3.4.1 el cual tenía forma de casco.

3.4.2 Prototipos

Se realizó una tercera sesión de diseño participativa en la que los niños especificaron el bosquejo ganador hacia un prototipo de baja-fidelidad. En esta ocasión se les pidió de tarea a los niños, que, en equipos elaboraran un prototipo en el cual plasmaran sus preferencias y su personalidad.

Antes de la actividad se recapitularon las sesiones anteriores, las características de diseño del dispositivo cerebral y los prototipos de baja fidelidad que los niños elaboraron. Esto se realizó con el objetivo de verificar que los niños tuvieran claro el pensamiento de diseño y las características con las que debe contar un dispositivo cerebral adecuado para niños de sus edades. Los equipos para esta actividad fueron los mismos que se formaron en la sesión anterior.

Los prototipos que se obtuvieron de esta actividad fueron los siguientes:

- **Prototipo 1:** Consiste en un casco cubierto en la totalidad de su superficie por electrodos (Figura 22, izquierda). Como sensores, los niños colocaron una especie de collar que mide el ritmo cardiaco y luces largas de colores que indican el nivel de atención del usuario.

Tanto este prototipo como sus sensores se conectan a través de cables hacia una interfaz con forma de un pequeño control remoto que sirve para encender/apagar el dispositivo. Esta interfaz también indica información como la batería y la memoria. Este pequeño control, también cuenta con indicadores de luz, que informan si el dispositivo se encuentra funcionando de manera óptima.

- **Prototipo 2:** El segundo prototipo se trata de un casco con colores rosa y morado (Figura 22, centro). El equipo definió estos colores en común acuerdo y también lo adornaron con distintas figuras (estrellas, corazones, círculos, líneas) que ambos colocaron por toda la superficie e incluso

le colocaron sus nombres a una parte del prototipo. En cuanto al número de electrodos de este dispositivo, los niños no definieron el número exacto, pero afirmaron que puede llegar a estar lleno de electrodos por dentro.

Este prototipo cuenta también con algunos indicadores de luz en la forma de figuras geométricas como círculos o estrellas. Los indicadores de luz indican el estado del dispositivo: encendido/apagado y leyendo datos. El casco contiene una pequeña antena que funciona por Wi-Fi y por Bluetooth para conectar el dispositivo con una computadora o dispositivo móvil.

- **Prototipo 3:** Es un casco de color negro, con algunos módulos grises, además de contar con un logotipo transparente a los lados, que permite la visibilidad del circuito principal del casco (Figura 22, derecha). El equipo describió su prototipo como un casco que por dentro cuenta con 5 electrodos, al frente cuenta con dos LEDs que indican si el dispositivo está funcionando, además de un logotipo central que se ilumina ó parpadea dependiendo del nivel de atención que el casco esté sensando.

En la parte superior, en medio, el dispositivo tiene una antena que funciona con Wi-Fi y Bluetooth para poder enlazar el dispositivo a una computadora o dispositivo móvil. También cuenta con una entrada USB para el cargador y una ranura para una memoria en la cual se pueda guardar la información capturada por los sensores. Finalmente, en la parte superior, el equipo colocó un panel solar que sirve como fuente de alimentación para el dispositivo.



Figura 23. Prototipos de baja fidelidad. A la izquierda el Prototipo uno, al centro el prototipo 2 y a la derecha el prototipo 3

Como resultado de estas sesiones en las cuales se obtuvieron los prototipos de baja y media fidelidad que se describen con anterioridad, se hicieron las siguientes observaciones:

- De las 5 visiones que se obtuvieron en la segunda etapa de visiones solamente en 2 los niños mencionaron una cantidad de electrodos, por lo cual este aspecto no es de relevancia para los niños, de igual manera, solamente se especifica el número de electrodos en uno solo de los tres prototipos.
- En la segunda etapa de visiones se observaron diferencias entre las características visuales que propone una niña contra las características visuales que propone un niño. También en la etapa de prototipos se observó que en el segundo equipo (en el cual participo una niña) al momento de su presentación existían ciertos desacuerdos acerca del color, la forma y las figuras que contenía el dispositivo, es decir, los niños lograron llegar a un acuerdo para elaborar su prototipo, pero seguía existiendo inconformidad en ambas partes. Estas observaciones nos indican que se requiere de un diseño neutral en términos de género.
- En cuanto a la personalización del dispositivo, se observan distintas características tanto en las visiones como en los prototipos, por ejemplo, la preferencia de distintos colores, logotipos, formas, figuras, estampas, incluso hubo quienes pusieron su nombre sobre la superficie de su prototipo. Algunos de ellos incluso utilizan ciertas partes de sus prototipos como accesorios que se pueden poner o quitar dependiendo de las preferencias del usuario.
- Dentro de los aspectos de retroalimentación, el más presente en todas las visiones y prototipos fue el de la luz, seguido por el auditivo y finalmente la vibración, por lo cual se concluye que los niños necesitan que el dispositivo proporcione retroalimentación acerca de lo que está sucediendo en su cerebro.

Durante todas las sesiones de diseño se les proporcionaron a los niños los materiales necesarios para realizar sus bosquejos y prototipos incluyendo rotafolios, plumas, plumones, cintas adhesivas, cascos de cartón, tijeras, pegamento, marcadores, foamy, diamantina, entre otros.

3.5 Diseño del prototipo de alta fidelidad

Una vez que se obtuvieron las características arriba mencionadas, se procedió a la creación del diseño de un prototipo de alta fidelidad en el cual se pudieran apreciar dichas características. Este prototipo se elaboró con ayuda de un diseñador gráfico con conocimientos en diseño en 3D en el Software de modelado Blender⁵.

3.5.1 Diseño y especificación del casco

El diseño es un dispositivo en forma de casco (Figura 23), que cuenta sobre su superficie con dos carriles de luces que encienden del color que el usuario personaliza. La superficie del casco está cubierta en su totalidad por orificios en los cuales podrán insertarse algunos accesorios que el niño elija, todo esto con la finalidad de dar al casco una apariencia entretenida y a la vez atractiva para el usuario. También cuenta con un espacio para fácil acceso al circuito principal del dispositivo.

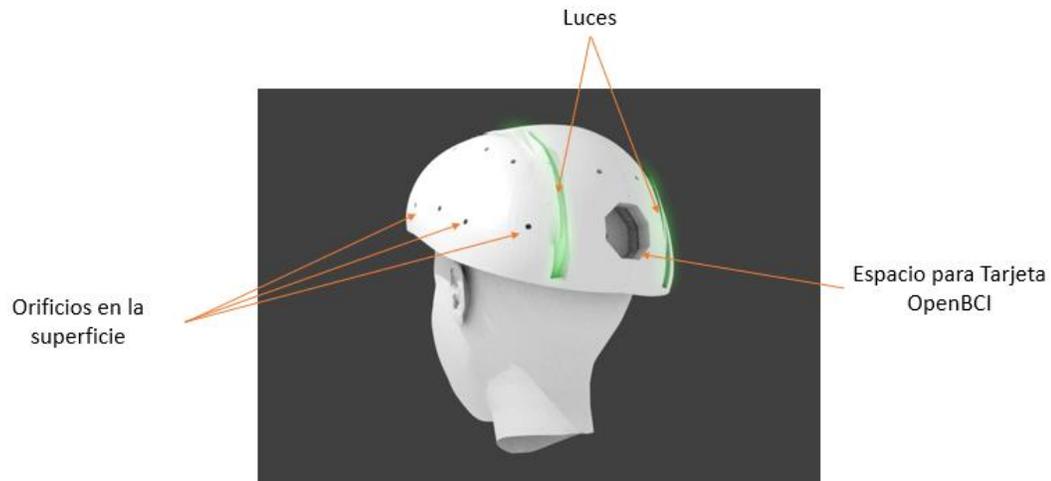


Figura 24. Vista general del prototipo; Lo orificios de la superficie son para colocar los accesorios y personalizar la apariencia, al igual que con el color de las luces; por medio de las luces el usuario recibirá retroalimentación acerca de su nivel de atención; y en el espacio para tarjeta OpenBCI se coloca el circuito encargado de tomar las lecturas de la actividad cerebral por medio de electrodos secos conectados a él.

⁵Software de modelado 3D Blender - <https://www.blender.org/>

Los aspectos que se mencionan en el párrafo anterior, además de proporcionar una apariencia divertida y entretenida al casco, también facilitan la personalización del mismo.

Como se mencionó anteriormente, sobre la superficie del casco existen una serie de orificios en los cuales se podrán insertar accesorios con formas, colores y personajes que son del agrado de los niños (Figura 24). Se implementó este enfoque de personalización ya que se observó en las sesiones de diseño que los niños personalizaban sus prototipos por medio de logotipos, formas e incluso animales que a ellos les agradan. Por otro lado, existen en el mercado un sin número de accesorios que se utilizan desde juguetes hasta calzado y pulseras (Figura 25); debido a esto existen una gran variedad de personajes, colores tamaños y formas, lo cual facilitaría abarcar una gran cantidad de preferencias.

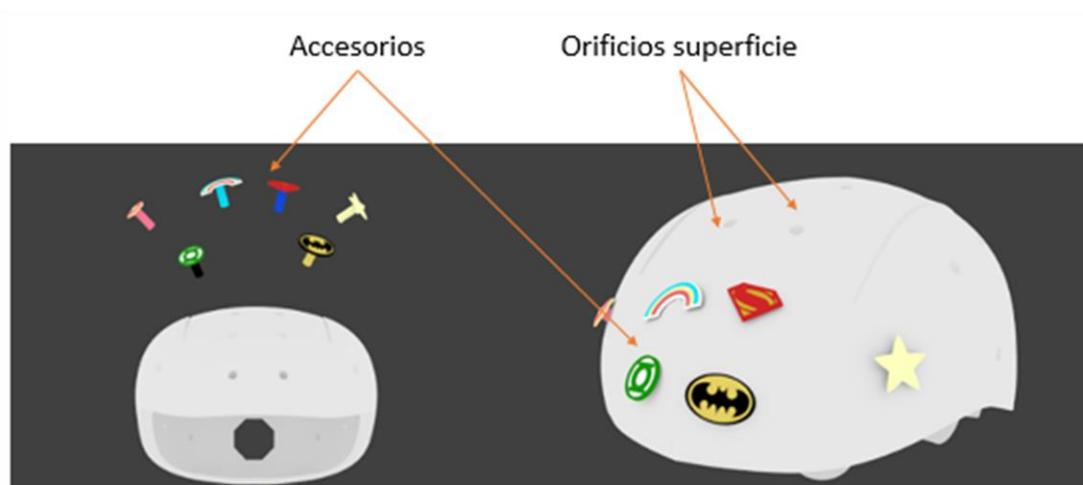


Figura 25. Accesorios que se colocan sobre la superficie del prototipo



Figura 26. Ejemplo de accesorios existentes

Además de los aspectos referentes a la apariencia y personalización del casco, el diseño apoya problemas referentes a la facilidad y tiempos de colocación del dispositivo. Esto se logra primero por medio de una malla basada en el sistema de distancias de electrodos 10/20 (Figura 26). Esta malla (Figura 27) que cuenta con 18 posiciones para electrodos está diseñada primeramente para adaptarse a la cabeza del usuario y para que la persona encargada de realizar las mediciones con el casco pueda colocar los electrodos en las posiciones que prefiera o que posicionarlos en regiones de interés específico.

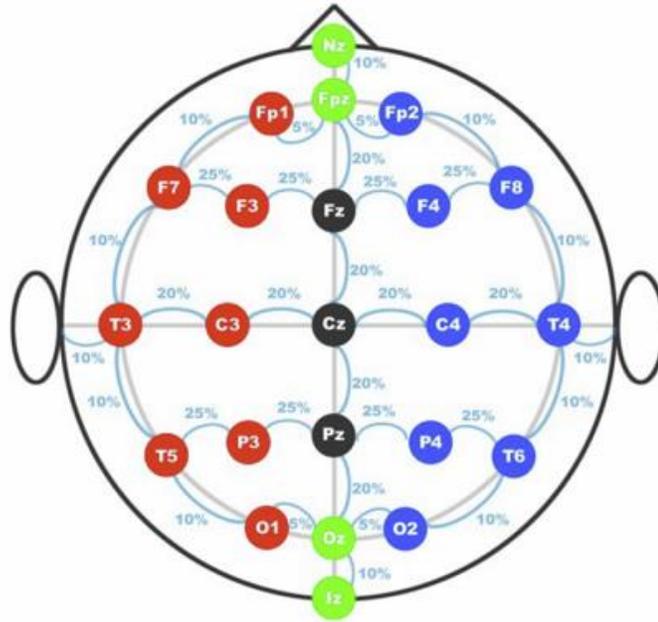


Figura 27. Sistema de colocación de electrodos 10/20

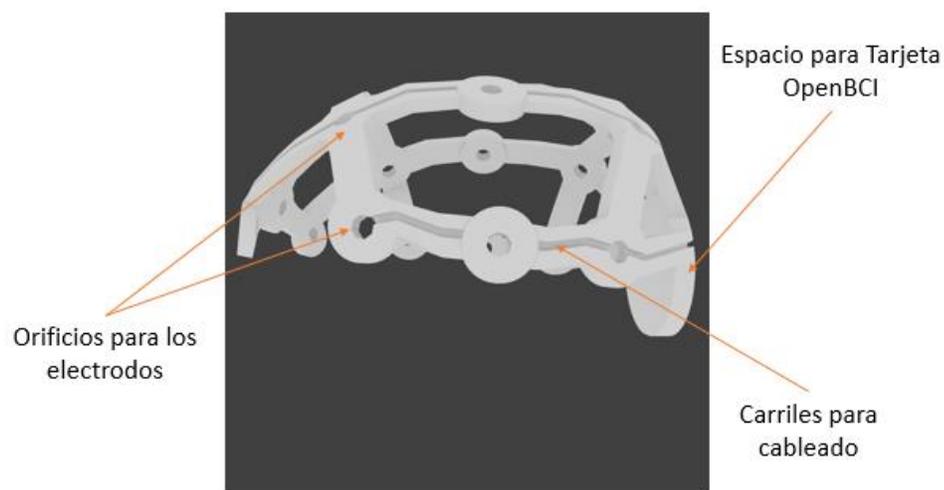


Figura 28. Malla para electrodos

Una vez que los electrodos se colocan, la malla se adhiere a la parte superior del casco para proceder a su colocación. Esto se logra por medio de una especie de sujetador a presión en el cual se ensambla la malla de electrodos. Además de estos sujetadores, en el interior del casco podemos encontrar también los espacios para la bocina y el vibrador que servirán para proporcionar estímulos al usuario (Figura 28).

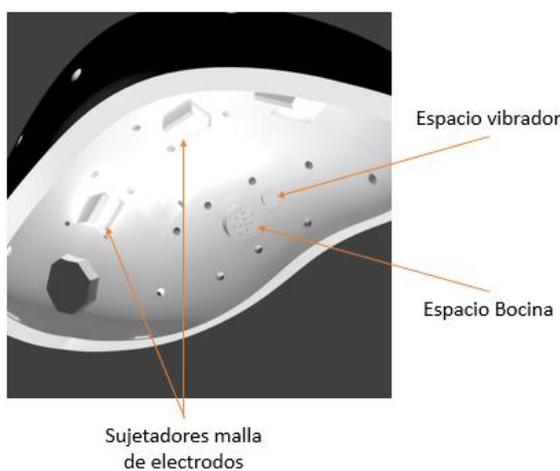


Figura 29. Interior del prototipo

Una vez que están ensambladas ambas partes (*i.e.*, caso y malla de electrodos), el prototipo es un casco de una sola pieza con la finalidad de facilitar y reducir el tiempo de la colocación (Figura 29).

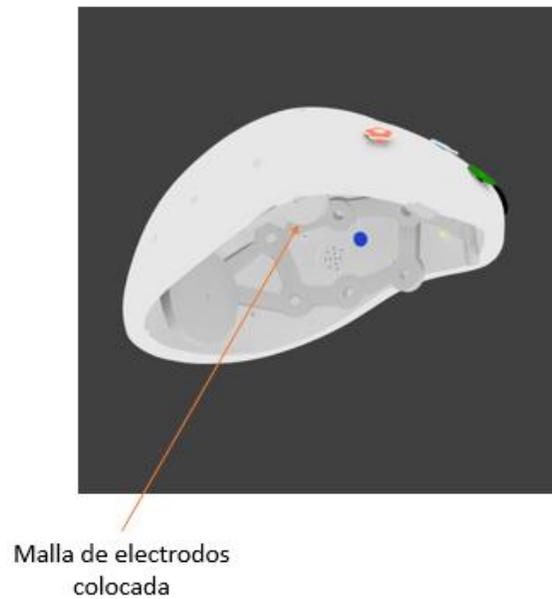


Figura 30. Prototipo listo para colocarse

Una de las ventajas de esta malla para los electrodos es que la persona que se encarga de la colocación del dispositivo y realizar las mediciones, puede cómodamente cambiar los electrodos de posición. El usuario puede retirar la malla para la limpieza o reemplazo de los electrodos y otros componentes que quedan al interior del casco.

En cuanto a los aspectos de retroalimentación, como se mencionó con anterioridad el dispositivo contará con tres tipos de estímulos: vibración, luz y sonido. La vibración indica el inicio y la finalización de la calibración del dispositivo. La luz será la que indique el nivel de atención; Rojo para un nivel de atención bajo, blanco para un nivel de atención aceptable y el color que defina el niño para un nivel muy bueno por encima del umbral definido, acompañado de un estímulo auditivo positivo.

3.5.2 Escenario de uso del prototipo de alta fidelidad

Con la finalidad de ejemplificar el uso del dispositivo propuesto en la práctica a continuación se presenta un escenario de uso:

Laura configura las posiciones de los electrodos y los coloca en la malla de electrodos dentro del casco. Pedro, un niño típico de 9 años, utilizará el casco para mejorar su atención

Pedro personaliza el Casco; primero personaliza la apariencia por medio de accesorios de crocs⁶. que se colocan a presión en orificios ubicados por toda la superficie del casco. Después personaliza la luz del casco, para ello Laura le pregunta a Pedro de qué color quiere que encienda la luz; Pedro selecciona el color azul para que el casco se encienda de ese color cuando se encuentra poniendo atención. Laura define el color de la luz en la computadora, además de poder definir los rangos del umbral para la atención; dichos umbrales están basados en evidencia empírica.

Antes de colocar el dispositivo, las luces que proporcionar el estímulo visual se encuentran parpadeando de un color verde que es el color por defecto de las luces del dispositivo, las cuales indican que se encuentra en estado de espera. Una vez personalizados estos aspectos, Laura coloca el dispositivo sobre la cabeza de Pedro, asegurándose de que los electrodos hagan un buen contacto con la cabeza y que dicho dispositivo se encuentre bien ajustado y firme sobre la cabeza de Pedro.

Una vez que el casco se coloca, Laura inicia el juego que se controlará mediante las lecturas tomadas por el dispositivo y ejecuta el programa que procesa la señal y envía los valores hacia el dispositivo para generar los estímulos visuales y auditivos que funcionarán basados en los valores de las lecturas de atención.

Cuando el casco comienza a recibir los datos de la señal procesada éste comienza a producir estímulos de retroalimentación basados en los niveles de atención recibidos desde la computadora. Si el nivel de atención se encuentra dentro del umbral definido por Laura, la luz enciende de un color blanco, si el nivel de atención es malo (debajo del umbral) la luz enciende de un color rojo y si el nivel de atención es bueno (se encuentra sobre el umbral) la luz encenderá del color azul, que es la que Pedro eligió para personalizar la apariencia del dispositivo.

El juego que Pedro controla mediante el uso del dispositivo se realiza durante el tiempo que Laura considere necesario, además de los periodos necesarios de descanso. Una vez que Pedro realiza las actividades definidas por Laura, se procede a retirar el dispositivo de la cabeza de Pedro.

⁶Accesorios de crocs "Jibbitz" - <http://www.crocs.com/c/jibbitz>

3.6 Implementación del prototipo de alta fidelidad

En esta sección se describe la arquitectura y el funcionamiento del Casco, así como los elementos que la componen. A continuación, se describe la arquitectura del dispositivo y después se describe el procesamiento de la señal.

3.6.1 Arquitectura del prototipo de alta fidelidad

Los electrodos del Casco, los cuales se encargan de obtener la señal, se conectan al circuito OpenBCI⁷. Este circuito es el encargado de enviar dicha señal cruda hacia la computadora a través de una comunicación serial inalámbrica por medio de un chip FTDI⁸.

La computadora recibe los datos que se leyeron de los electrodos y los procesa para obtener el valor de atención. Esta señal cruda se recibe por medio del servidor de adquisición de OpenViBe⁹ (*Open Virtual Brain Environment*) que, mediante un modelo cliente-servidor se comunica con el programa procesador de la señal también de OpenViBe. Dicho programa a través de un enfoque de extracción de características que se explica en la siguiente sección, el cual procesa la señal para obtener el nivel de atención. Por otro lado, el mismo programa genera archivos a manera de *logs* que se guardan en un formato GDF y CSV que sirven para el posterior análisis de la señal.

Mediante el uso del protocolo LSL¹⁰ (*Lab Streaming Layer*) la señal de salida que produce el programa procesador de OpenViBe puede aprovecharse para su uso por otras aplicaciones. Para enviar esta señal hacia el circuito generador de estímulos, se implementó un *script* que recibe la señal de salida y la reenvía hacia el circuito generador de estímulos a través de una conexión serial mediante Bluetooth. Este *script* de salida se desarrolló con el lenguaje de programación Python y se hizo uso de la librería pylsl desarrollada por el *Swartz Center for Computational Neuroscience* de la Universidad de California en San Diego (UCSD).

⁷OpenBCI - <http://docs.openbci.com/Hardware/02-Cyton>

⁸Future technology Devices International (FTDI) - <http://www.ftdichip.com/>

⁹OpenVibe Es una plataforma de software que permite diseñar, probar y utilizar BCIs- <http://openvibe.inria.fr/faq/>

¹⁰Protocolo Lab Streaming Layer - <https://github.com/sccn/labstreaminglayer/wiki>

El *script* antes mencionado, se encarga de recibir y enviar la señal procesada por medio de Bluetooth hacia un circuito Arduino que genera los estímulos de retroalimentación (Luz, Sonido). Dichos estímulos se programaron por medio del lenguaje de programación de Arduino el cual es muy similar a C++.

La arquitectura de este prototipo puede observarse en la Figura 30:

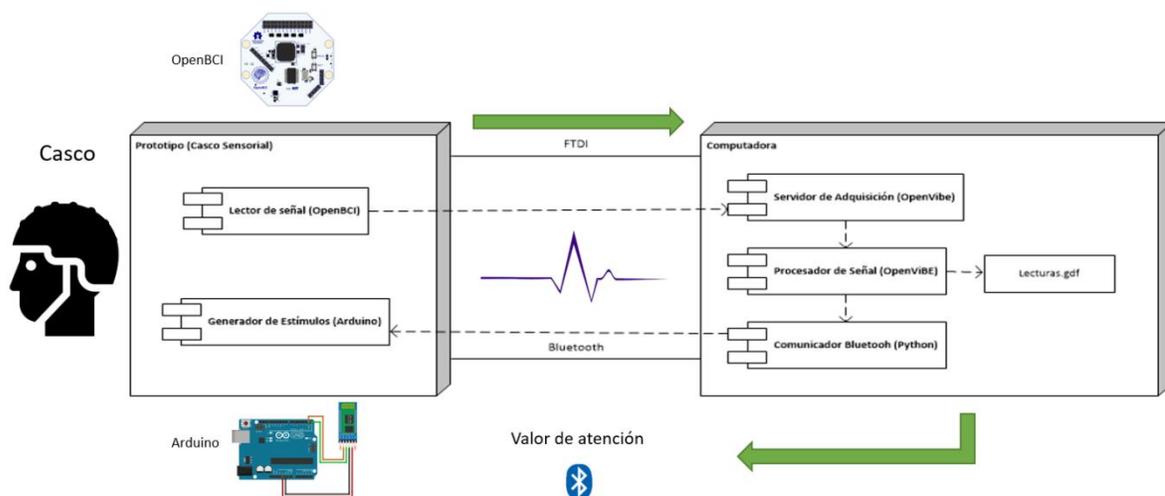


Figura 31. Arquitectura del prototipo

3.6.2 Procesamiento de la señal

Como se mencionó en la sección anterior el procesamiento de la señal se realizó con ayuda de OpenViBe.

Para el procesamiento de la señal se utilizó un enfoque de extracción de características. Una característica se define como un valor que describe una propiedad de las señales EEG (Lotte y Congedo, 2016). Dichas características se utilizan para identificar estados mentales con base en la actividad cerebral. La característica más comúnmente utilizada para identificar estos estados mentales es la potencia de las distintas bandas de frecuencia (*Band Power*) presentes en la actividad eléctrica del cerebro.

Las BCIs que emplean el uso de la actividad oscilatoria del cerebro utilizan la potencia de las bandas de frecuencia de las señales EEG. Para extraer esta característica existen distintos métodos en la literatura

(Brodu et al., 2011). Sin embargo, el método más comúnmente utilizado es filtrar la señal EEG de un electrodo dado en la banda de frecuencia que se desea trabajar, por ejemplo, filtrar la señal procedente del electrodo FP1 en la banda Beta (16-24 Hz). Una vez que se filtra la señal en la banda deseada, ésta se eleva al cuadrado para obtener su potencia y finalmente se promedia este valor en el tiempo (e.g., cada segundo). Este método para la extracción de la potencia de la señal se puede implementar en OpenViBe (Figura 31)

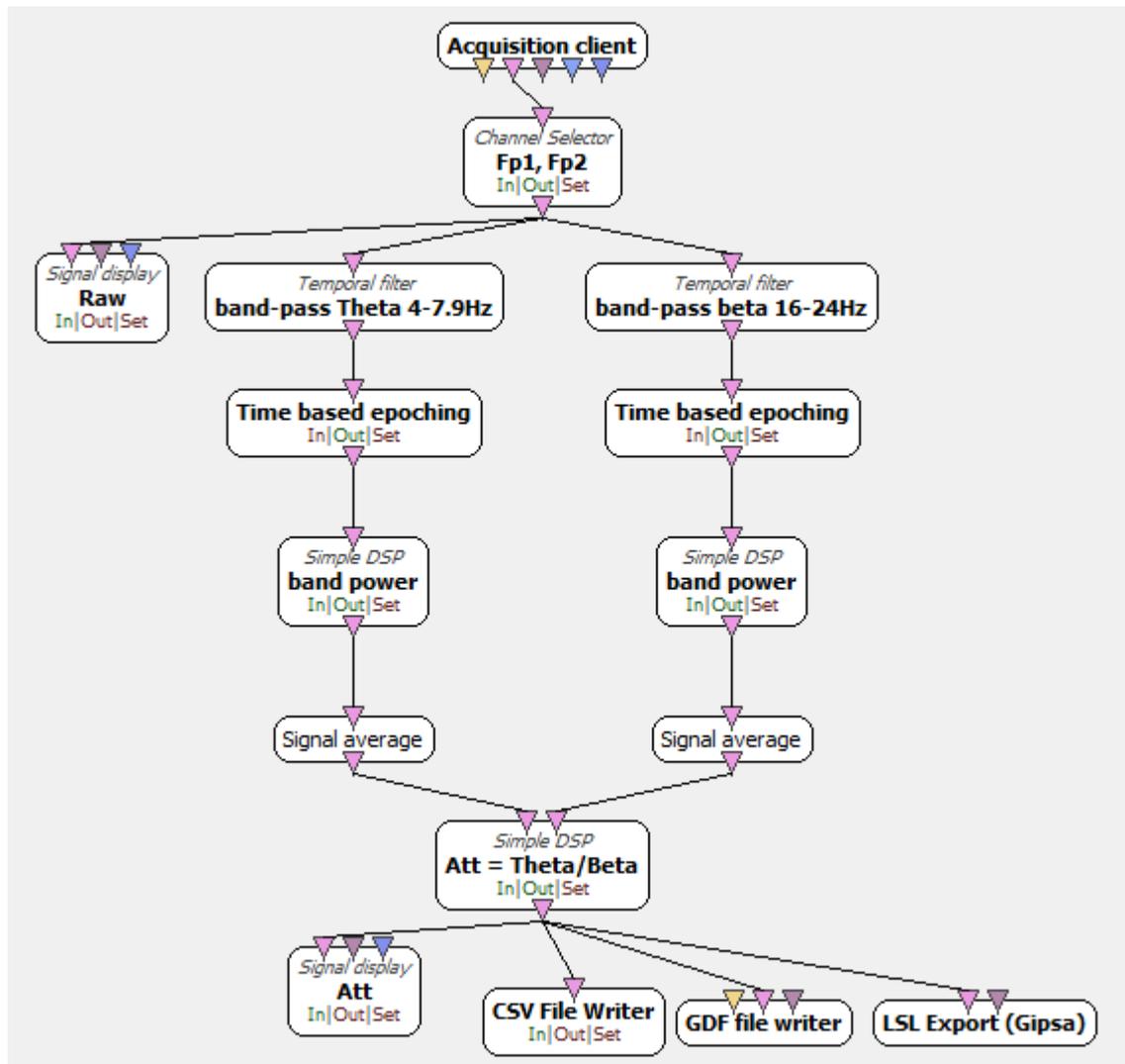


Figura 32. Programa para procesar la señal en OpenViBe

OpenViBe cuenta con distintas cajas que se conectan entre sí para procesar las señales EEG que recibe. Cada una de estas cajas puede recibir una señal de entrada y producir una señal de salida, una visualización o archivos para guardar la información (*logs*). Mediante el uso de dichas cajas se puede implementar la extracción de la potencia de la señal.

Primero, para obtener la señal OpenViBe cuenta con un servidor de adquisición al cual se conecta el circuito OpenBCI que mediante electrodos secos captura y envía la señal. El primer elemento del programa es el Cliente de adquisición que se comunica con el Servidor de adquisición, gracias a esta comunicación los demás elementos pueden recibir la señal y procesarla.

El siguiente elemento es el Selector de canales; en esta caja se definen como parámetro los nombres o identificadores de los electrodos de los cuales se desea recibir la señal EEG. En el caso de este prototipo se hizo uso de 2 electrodos en la parte frontal (Fp1 y Fp2) y una referencia. A la salida de este elemento se tiene conectada una pantalla de visualización de la señal cruda (*Raw*) y dos filtros pasa bandas, uno que filtra la frecuencia Beta (16-24 Hz) y otro que filtra la frecuencia Theta (4-7.9 Hz) que son las bandas que se requieren para obtener el valor del nivel de atención de los niños (Lansbergen et al., 2011 y Perales et al., 2017).

Después, para cada una de estas señales se descompone la señal en ventanas deslizantes de 1 segundo cada 0.1 segundos. Esto se realiza por medio de la caja de Partición de la señal basada en el tiempo (*Time-based epoching*) a la cual se le proporcionan como parámetros la duración de la ventana y cada cuanto tiempo se realiza esta partición.

A continuación, se procede a obtener la potencia de la señal, esto se lleva a cabo por medio de una caja de Procesamiento digital simple de la señal (*Simple DSP*) a la cual se le proporciona como parámetro la operación matemática deseada, en este caso elevar la señal al cuadrado, por lo cual el parámetro que se introduce es $x*x$.

Una vez que se obtiene la potencia de la señal, se obtiene el promedio de la señal. Esto se realiza por medio de la caja promedio de la señal (*Signal Average*) cuya función es calcular el promedio de la señal sobre cada ventana de tiempo (en este caso 1 segundo) que recibe como entrada.

Finalmente, se realiza la operación para obtener el valor del nivel de atención. Para ello se utiliza una vez más una caja de procesamiento digital simple de la señal (*Simple DSP*). En este caso, se necesitan los

valores obtenidos de Theta y Beta, por lo cual dicha caja cuenta con 2 entradas (A y B) y una señal de salida. Para obtener el valor del nivel de atención se realiza la operación Theta/Beta (Lansbergen et al., 2011 y Perales et al., 2017). A la entrada 'A' se conecta Theta y a la entrada 'B' se conecta Beta, por lo cual la operación que debemos indicar a la caja es A/B, de esta manera se obtiene como salida la señal del nivel de atención del usuario.

Una vez que se obtiene la señal procesada se puede utilizar de distintas formas. En el caso de este prototipo a la señal de salida se tiene conectada una caja Nombrada "Att" que es una pantalla de visualización de dicha señal. Después se tienen las cajas de escritura de archivos CSV y GDF; estas cajas generan archivos en los cuales se graban los datos de la señal obtenida (*logs*) y que pueden utilizarse para su posterior análisis. Finalmente se tiene la caja *LSL Export*, la cual por medio del protocolo LSL (*Lab Streaming Layer*) permite comunicar el software OpenVibe con otras aplicaciones (*e.g.*, videojuegos desarrollados en Unity) y éstas puedan utilizar la señal resultante del procesamiento.

3.7 Conclusiones

En el presente capítulo se muestran las actividades realizadas para obtener las características de diseño que debe tener un dispositivo cerebral adecuado para su uso por niños en edad escolar. Estas actividades se realizaron en una escuela primaria rural de Ensenada B.C. con la ayuda de 7 niños en edad escolar, un experto en HCI y una maestra de teatro infantil.

En la primera parte de este capítulo se presentaron los participantes, las sesiones que se realizaron para coleccionar los datos y posteriormente se describieron las actividades que se realizaron durante cada una de estas sesiones.

Después, se describieron las sesiones de diseño que se llevaron a cabo con ayuda de 7 niños en edad escolar (8 a 11 años) 3 expertos en HCI y un experto en diseño. Estas sesiones se llevaron a cabo en una escuela primaria pública en Ensenada, B.C., México.

En dichas sesiones los niños elaboraron bosquejos y prototipos de baja fidelidad tomando como bases las características de diseño que los niños encontraron mediante las sesiones de Juego dramático. Estas

características son: Apariencia divertida/entretenida, Comodidad, Fácil y rápida colocación y Retroalimentación.

Una vez que los niños elaboraron sus prototipos, los participantes votaron por los prototipos que representaron mejor éstas características de diseño. Los bosquejos y prototipos que obtuvieron más votos fueron aquellos que contaban con forma de casco.

Después, en colaboración con un experto en diseño gráfico se elaboró un modelo 3D de un Casco en el cual se plasmaron las características de diseño proporcionadas por los niños; dicho modelo se imprimió mediante el uso de impresoras 3D.

Este prototipo funciona por medio de un circuito que adquiere la señal a través de electrodos secos colocados en una malla con posiciones que siguen el estándar de colocación de electrodos 10/20. Dicha señal se envía de manera inalámbrica a una computadora para su procesamiento mediante el software OpenViBe para después enviarla hacia el circuito generador de estímulos por Bluetooth (Arduino); esto se realiza por medio de un *script* desarrollado en Python que hace uso del protocolo LSL gracias a la librería pylsl.

Como resultados de este capítulo se obtuvieron las características de diseño para los dispositivos cerebrales para su uso por niños y un prototipo de alta fidelidad del casco y su implementación utilizando OpenViBe y Arduino.

Capítulo 4. Evaluación y resultados

A lo largo de este capítulo se presenta detalladamente la evaluación del casco sensorial (ver Cap. 3) con la finalidad de conocer su usabilidad y experiencia de uso. El dispositivo se evaluó en la escuela Dr. Octavio León Medellín, una escuela primaria pública localizada en El Sauzal, Ensenada, B.C., México.

A continuación, se presenta la metodología que se empleó para el estudio. Posteriormente se describe el diseño del experimento y desarrollo. Finalmente, se presenta el análisis de los datos y los resultados.

4.1 Objetivo

El objetivo del estudio involucró el evaluar la usabilidad y experiencia de uso del Casco Sensorial (C) en comparación con la diadema comercial Mindwave de NeuroSky (N). La usabilidad se midió en términos de facilidad de uso y tiempo de colocación. Y la experiencia de uso se midió en términos de apariencia, comodidad, personalización y retroalimentación. Con esta evaluación se busca responder a la segunda pregunta de investigación:

[P2], ¿Cuál es la experiencia de uso y la usabilidad de la diadema propuesta para su uso por niños?).

4.2 Diseño del experimento

4.2.1 Participantes

El Casco sensorial se diseñó para niños de entre 9-12 años. Para la evaluación se reclutaron 31 niños de primaria (Edad promedio = 10.12 años); 14 niños y 17 niñas; 8 cursando el cuarto grado, 8 de tercero, 7 de quinto y 8 de sexto). La actividad de los participantes consistió en jugar por 4 minutos FarmerKeeper, un juego serio en el cual un granjero en un tractor debe recolectar animales a lo largo del camino. El tractor avanza y recoge animales si la atención del niño se encuentra en un nivel adecuado, en caso contrario el tractor avanzará más lento o se detendrá y no recogerá a los animales. La evaluación se realizó en dos condiciones: (1) utilizando el casco sensorial y (2) utilizando la diadema NeuroSky.

4.2.2 Instalación

FarmerKeeper se instaló en un salón amplio de usos múltiples de la escuela primaria (Figura 32). Un escritorio del salón se equipó con:

- **1 computadora portátil**, en la cual se tenían corriendo los programas responsables de procesar la señal y enviar las lecturas al videojuego, el cual también se encontraba ejecutándose en el equipo;
- **1 monitor de computadora**, conectado a la computadora portátil, en dicho monitor sólo se tenía abierta la ventana del juego;
- **1 circuito Arduino**, encargado de recibir los valores de las lecturas para producir los estímulos de retroalimentación en el caso del Casco Sensorial;
- **2 dispositivos cerebrales** incluyendo el Casco y diadema NeuroSky;
- **20 accesorios de crocs**, que se utilizaron para que los niños pudieran personalizar su dispositivo; y
- **1 cámara de video**, utilizada para videograbar todas las actividades

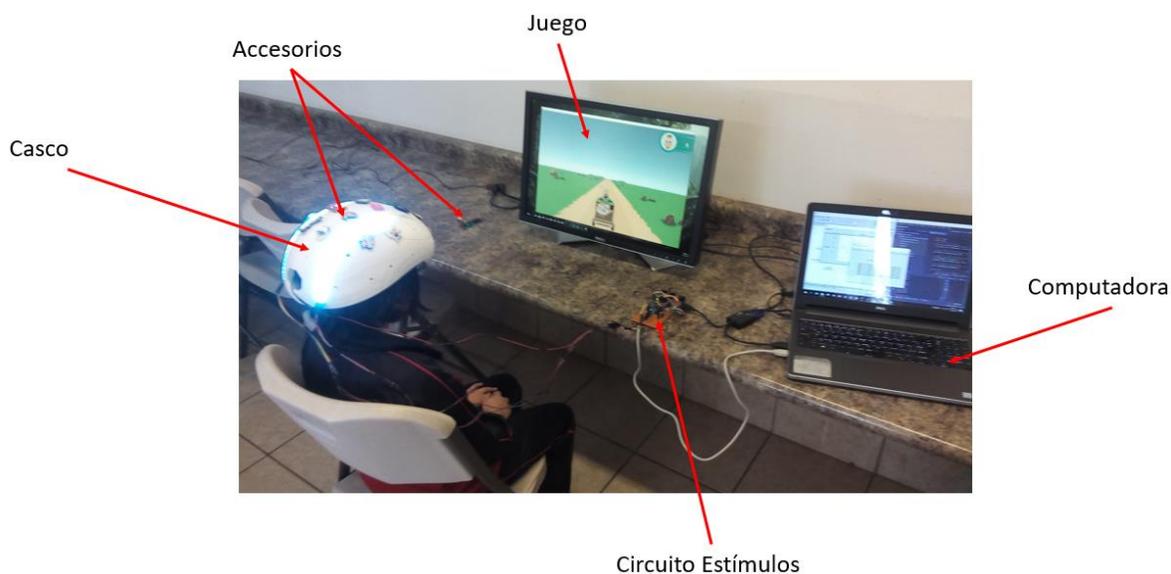


Figura 33. Instalación del experimento

4.2.3 Procedimiento

Se siguió un diseño experimental intra-sujetos (*within-subjects*) en el cual todos los niños participaron en las dos condiciones; es decir, todos los niños utilizaron tanto el Casco sensorial como la diadema NeuroSky. Los niños se asignaron de manera aleatoria a iniciar en cada una de las condiciones para evitar el efecto de aprendizaje. Los grupos completaron las actividades en las dos condiciones en grupos de 4. En promedio se completaban 8 niños en un día. Para evitar falsos positivos y negativos que pudiesen afectar la percepción de usabilidad y de experiencia de los niños, se utilizó la técnica de Mago de Oz¹¹ para controlar las lecturas de la señal. Una vez concluida una condición los niños cambiaban de dispositivo para completar la segunda condición del estudio.

Después de usar cada dispositivo, y para cada condición, los niños respondieron cuestionarios de usabilidad y experiencia de uso; y participaron en una entrevista. Al terminar el uso de los dos dispositivos (las dos condiciones), los niños completaron un cuestionario de salida.

¹¹ Mago de Oz (conocida en inglés como *Wizard of Oz*) es una técnica de prototipado rápido en la cual una persona (el mago) simula los eventos que ocurren cuando un usuario interactúa con un sistema (Maulsby et al., 1993).

4.2.4 Captura de datos

Para evaluar la usabilidad y experiencia de uso, después de cada condición los niños respondieron un cuestionario de 4 preguntas cada uno (Anexo 3) las cuales debían puntuar con la escala Likert de 5 puntos llamada Cinco grados de felicidad (Hall et al., 2016), donde 1 es la peor calificación y 5 la mejor.

A la par de estos cuestionarios los niños participaron en una entrevista semiestructurada de Escalera Contextual (Anexo 3, Zaman et al., 2010) en la cual por cada pregunta que el niño puntúa del 1 al 5 se le hacen preguntas abiertas con el objetivo de obtener más detalle acerca de la respuesta del niño en el cuestionario.

Finalmente, cuando los niños finalizaban las actividades con ambos dispositivos respondían un cuestionario de salida en el cual se buscaba conocer su preferencia por uno de los dos dispositivos (Anexo 3). Para la elaboración de este cuestionario se hizo uso de la tabla Ordenamiento divertido y la tabla Otra vez- Otra vez (Figura 33) las cuales son herramientas que forman parte del Juego de herramientas divertido (*Fun Toolkit*; Read et al., 2006).

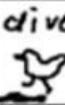
La tabla Ordenamiento divertido se utiliza para que los niños por categorías ordenen de mejor a peor los dispositivos que utilizaron. Para esta tabla se utilizaron 7 categorías: Mejores estímulos, Más Cómodo, Facilidad de colocación, Mejor apariencia (puesto), Personalización, Más divertido y Más atractivo (Ver Anexo 3)

En la tabla Otra vez- Otra vez se presentaron a los niños ambos dispositivos y se les pregunta si les gustaría realizar la actividad de nuevo con cada uno de los dispositivos; los niños deben elegir entre las respuestas: Si, Tal vez y No.

Name of child.....Age.....Boy / Girl

	Best			Worst
Most fun				

Would you like to do it again?

	Yes	Maybe	No
 clock	✓		
 dive		✓	

Name of child.....Age.....Boy / Girl

Figura 34. Tabla de Ordenamiento divertido (izquierda) y tabla Otra vez- Otra vez (derecha)

Además, todas las sesiones fueron videograbadas para su posterior análisis mediante un esquema de codificación en donde se buscaba observar: Los tiempos de colocación, movimientos con la cabeza y número de veces que se tocaron la cabeza indicando incomodidad, así como la motivación y el interés de los niños (Figura 34).

Estudio de usabilidad y experiencia de uso de dispositivos cerebrales

Esquema de codificación de videos

Casco: __ NeuroSky: __

Evento	Código	Definición	Medir
Colocación			
Gestos	GE	El niño hace gestos de incomodidad mientras se le coloca el dispositivo	Repeticiones
Tiempo de Colocación	TC	El tiempo que lleva colocar el dispositivo al niño	Tiempo
Emociones			
Motivado	MOT	El niño se muestra motivado a realizar la actividad con el dispositivo	Repeticiones
Interés	IN	El niño muestra interés en realizar la actividad con el dispositivo	
Aburrido	AB	El niño se muestra aburrido a realizar la actividad con el dispositivo	
Comportamientos			
Movimiento Cabeza	MC	Si el niño mueve la cabeza mientras tiene puesto el dispositivo	Repeticiones
Tocar Cabeza	TOC	Si el niño se toca la cabeza mientras tiene puesto el dispositivo	

Figura 35 Esquema de codificación.

4.3 Desarrollo del experimento

A continuación, se explica el desarrollo del experimento (Figura 35; Anexo 4).

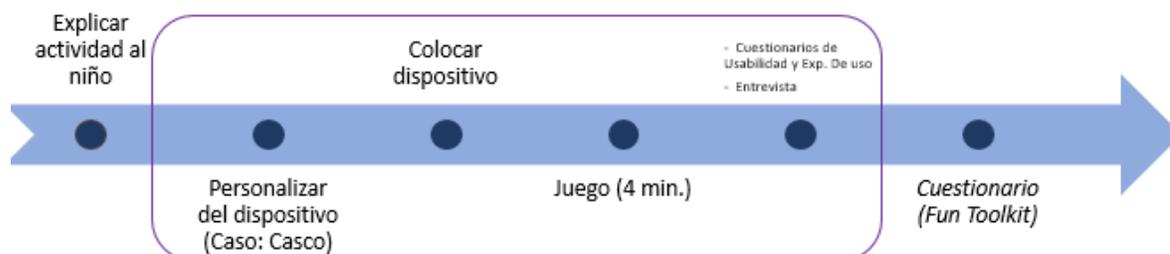


Figura 36. Desarrollo del experimento.

Primero, se le explicó al niño la actividad a realizar y se le mostraba el dispositivo a utilizar. Particularmente, cuando usaban el caso del casco se le hacía saber al niño que podía personalizar tanto los estímulos como su apariencia. Después se procedía a colocar el dispositivo en la cabeza del niño. Durante la etapa de colocación, se aseguraba que los electrodos hicieran un buen contacto con la cabeza del niño, que el dispositivo quedara bien fijo y que los niños no sintieran algún tipo de incomodidad. Una vez que el dispositivo se encontraba bien colocado el niño realizaba la actividad con el juego durante 4 minutos. Los niños realizaron la actividad sentados frente a la pantalla donde se tenía el juego en ejecución.

Una vez que el niño concluyó la actividad, al terminar de usar cada dispositivo y por cada condición, el niño respondía un cuestionario de usabilidad y experiencia de uso. Los cuestionarios utilizaron la escala de Cinco grados de felicidad (ver Anexo 3, Hall et al., 2016). Los niños también participaban en una entrevista semi-estructurada. Durante la entrevista y con el objetivo de obtener más detalle acerca de la respuesta del niño en el cuestionario el investigador utilizó el método de escalera contextual (Zaman et al., 2010)

Al terminar el uso de los dos dispositivos, el niño contestaba un cuestionario utilizando la tabla de ordenamiento divertido y la tabla otra vez-otra vez (ver Anexo 3), ambas herramientas forman parte del Juego de herramientas divertido (*Fun Toolkit*, Read et al., 2006).

4.4 Análisis de datos

Para analizar los datos cuantitativos,

- se utilizó estadística descriptiva (*e.g.*, medias, medianas, promedios y desviaciones) para analizar los datos de los cuestionarios y los videos;
- se utilizaron pruebas estadísticas para comparar los datos entre las dos condiciones, dada que la distribución de los datos fue no-paramétrica;
- se utilizó un método de análisis secuencial basado en eventos¹²(Bakeman, 1997) para tipificar los comportamientos que se presentaban en los videos por medio de un esquema de codificación; y
- para el análisis de audio se utilizaron técnicas cualitativas como transcripciones que se analizaron por medio de codificación abierta, la cual consiste en seleccionar citas que se agrupan en conceptos que se relacionan entre sí.

Además, Se revisaron un total de 393 minutos (6h. 33min.) de video los cuales incluían desde el momento en que el niño llegaba y se le explicaba la actividad hasta que se removía el dispositivo de su cabeza (promedio por sesión = 6:20 min)

La usabilidad se evaluó en términos de tiempo de colocación y facilidad de colocación. La experiencia de uso se evaluó en términos de apariencia, comodidad, personalización y retroalimentación.

Para analizar los datos cualitativos, que incluyen las preguntas abiertas en los cuestionarios y las transcripciones, se realizó de manera sistemática e inductiva la codificación abierta¹³ de las preguntas abiertas en los cuestionarios y en las transcripciones. Se puso especial énfasis para encontrar citas que apoyaran y ejemplificaran los datos cuantitativos.

¹² La técnica de análisis secuencial en videos consiste en observar cada uno de los videos que se capturaron durante la evaluación de acuerdo con un esquema de codificación (Bakeman, 1997)

¹³ La codificación abierta consiste en seleccionar citas, las cuales se agrupan en conceptos que se relacionan entre sí.

4.4.1 Usabilidad

En esta sección se encuentran los resultados tanto cuantitativos como cualitativos que surgieron del estudio de usabilidad que se realizó con niños en una escuela primaria de El Sauzal, Ensenada, B.C. La usabilidad del dispositivo se evaluó en términos de facilidad y tiempos de colocación. A continuación, se muestran los resultados.

4.4.1.1 Facilidad de colocación

Se puede observar que, en el caso del Casco, de los 31 niños 16 dieron el mayor puntaje de facilidad de colocación, es decir la mitad de los niños lo percibieron como muy fácil de colocar (Figura 36. Por otro lado sólo 11 lo percibieron como fácil de colocar y 4 lo consideraron como neutral (*i.e.*, no es fácil ni difícil de colocar).

En el caso de NeuroSky, 15 de los 31 niños percibieron a la diadema como fácil de colocar, mientras que 9 lo percibieron muy fácil de colocar y sólo 7 lo consideraron como neutral.

Se observa que en ambas condiciones aproximadamente la mitad de los niños se inclinaron hacia un puntaje. En el caso del Caso éste se percibió como muy fácil de colocar mientras que en el caso de NeuroSky se percibió como fácil de colocar.

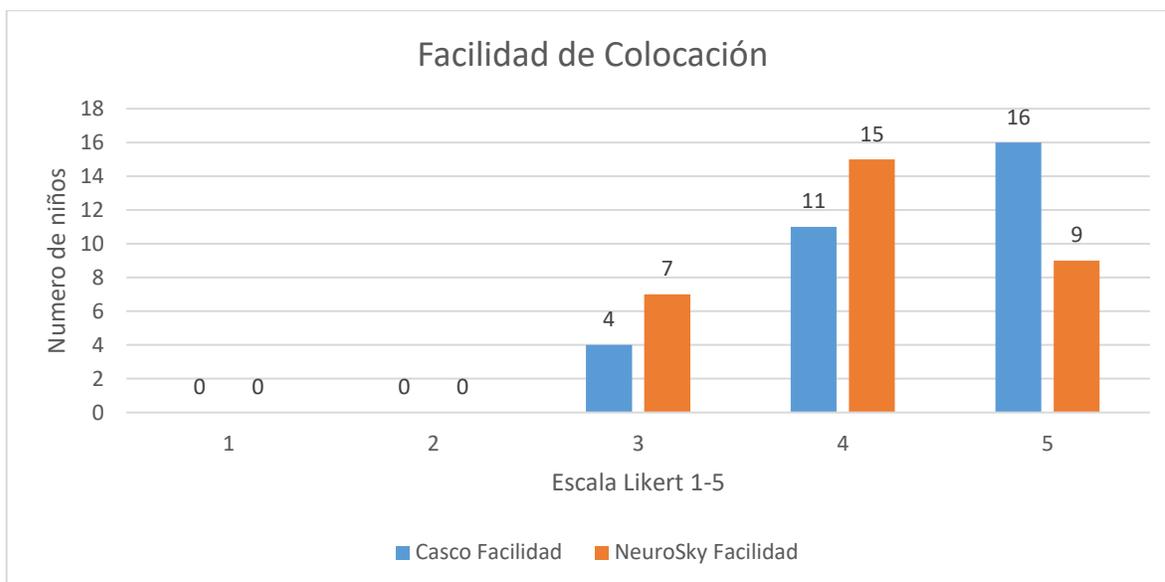


Figura 37. Gráfica de percepción de facilidad de colocación.

La percepción de facilidad de colocación de los niños se debe a factores que a continuación se mencionan. El primero es que los niños (5/31) consideran que el número de pasos para la colocación es menor con el Casco que con NeuroSky, por lo cual no necesitarían ayuda para colocarse el dispositivo por si mismos.

“No, Porque no tuvimos que hacer tantas cosas para colocarlo” (Participante Femenino, 10 años)

En caso contrario, los niños (23/31) perciben que si necesitarían ayuda para colocarse la diadema NeuroSky debido a que no saben dónde colocar exactamente el electrodo y la referencia de la diadema.

“Si necesito ayuda porque no veo donde van estas cositas [refiriéndose al electrodo y al clip de la oreja de referencia]” (Participante Masculino, 9 años)

Sin embargo, a pesar de que la percepción de los niños es que el Casco es más fácil de colocar que NeuroSky la prueba estadística de Wilcoxon (Wilcoxon et al., 1970) indica que para los puntajes de facilidad de colocación no existe diferencia significativa ($p= 0.0762$), por lo cual este aspecto se considera igual en ambos dispositivos.

4.4.1.2 Tiempo de colocación

En la Figura 37 se puede observar que, en el caso del casco, 20 de los 31 niños le dieron la calificación más alta, es decir más de la mitad de los niños perciben el casco como muy rápido de colocar, mientras que 8 perciben que el casco es rápido de colocar y sólo 3 niños piensan que la colocación no es rápida ni lenta.

En el caso de NeuroSky se observa que menos de la mitad de los niños (11 de 31) perciben el casco como muy rápido de colocar, mientras que 12 lo consideran rápido y sólo 8 lo consideran como neutral.

Estos resultados cuantitativos muestran que los niños percibieron al casco como más rápido de colocar que la diadema NeuroSky.

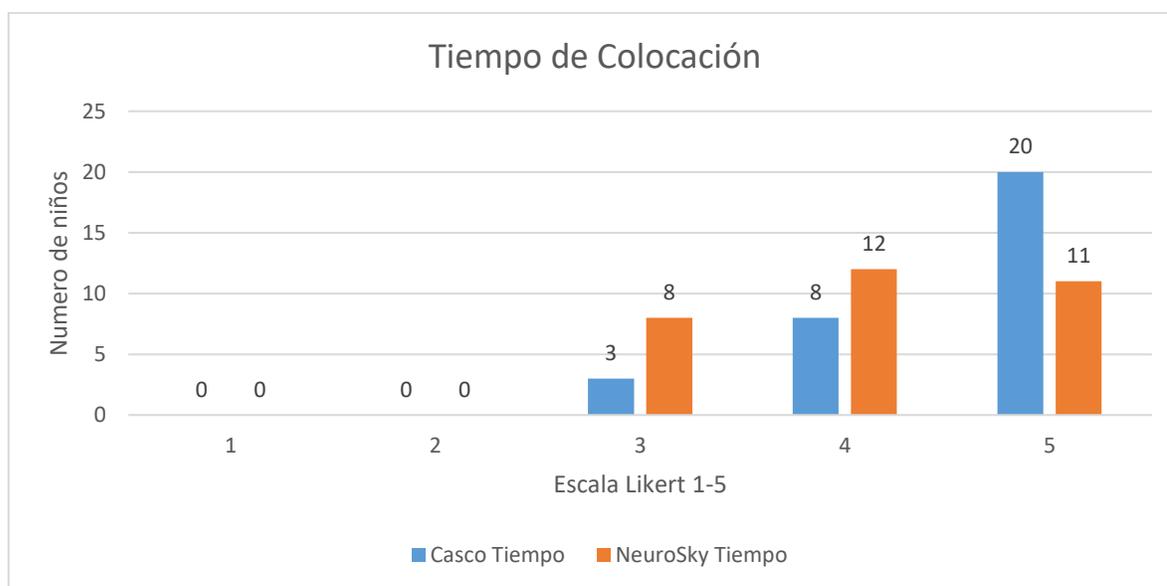


Figura 38. Gráfica de percepción de tiempo de colocación

La percepción de que el tiempo de colocación es menor con el Casco que con NeuroSky se debe en primer lugar a la forma de colocación. El Casco al tener predefinida la localización de los electrodos y al quedar bien ajustado se colocaba en solo movimiento y se aseguraba que los electrodos hicieran un buen contacto con la cabeza.

“Porque me lo puse como una gorra... se puso rapidito” (Participante Femenino, 9 años)

Relacionado con los datos cuantitativos, los niños percibieron también que el casco se observaba como un dispositivo más fácil y rápido de colocar, es decir, los niños ven la diadema como más complicada y lenta de colocar debido a su forma y a la manera como se coloca.

“Se miraba que se ponía más rápido y más sencillo” (Participante Femenino, 11 años)

En cuanto al tiempo de colocación la prueba estadística de Wilcoxon indica que si existe una diferencia significativa ($p = 0.0185$) entre la percepción de los niños acerca de los tiempos de colocación de ambos dispositivos.

El tiempo total de colocación fue de 441 segundos para el Casco y 771 para NeuroSky, mientras que los tiempos promedio fueron de 14.2 segundos para el Casco y 24.8 segundos para NeuroSky (Figura 38), es decir, el Casco se coloca en promedio 10.6 segundos más rápido que NeuroSky. Además, la prueba estadística de Wilcoxon indica que existe diferencia significativa ($p < 0.001$) para los tiempos de colocación.

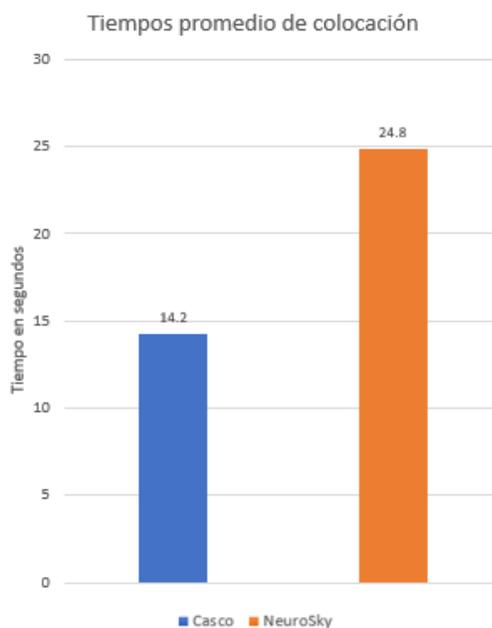


Figura 39. Gráfica de tiempo de colocación promedio (videos)

Conforme avanzaban los participantes, el tiempo de colocación fue disminuyendo en ambos dispositivos (Figura 39). Esto puede ser debido a que con cada niño que pasaba, el investigador encargado de colocar el dispositivo adquirió práctica para colocar ambos dispositivos. Sin embargo, aunque los tiempos y la diferencia entre ambos dispositivos descendieron, el tiempo de colocación sigue siendo más corto con el casco que con NeuroSky.

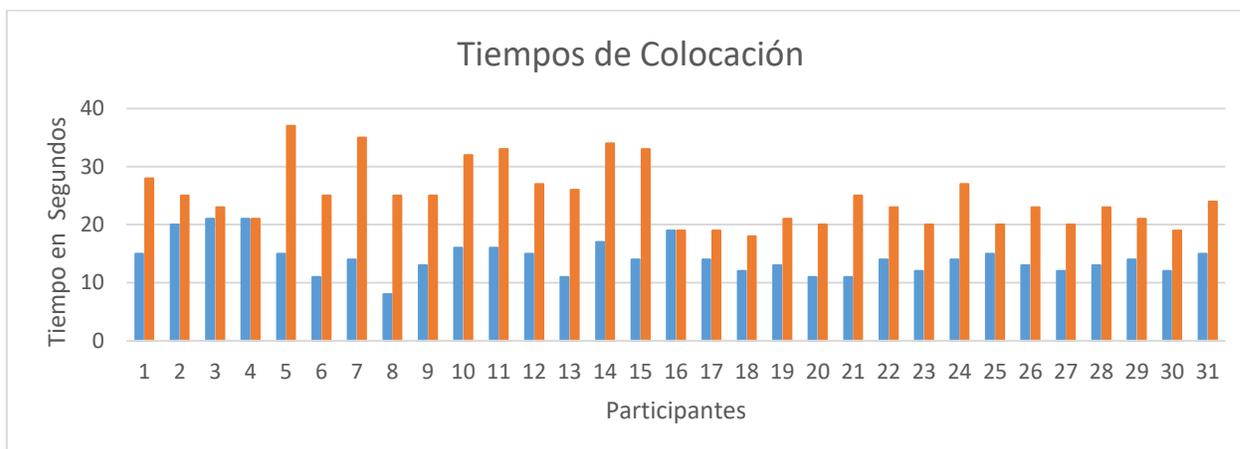


Figura 40. Comparativa del tiempo de colocación de cada participante con ambos dispositivos

Estos resultados muestran que el casco fue más rápido de colocar que la diadema NeuroSky, tanto desde el punto de vista de los niños como en el tiempo observado en los videos (tiempo promedio de colocación Casco = 14.2 s; tiempo promedio de colocación NeuroSky = 24.8; $p < 0.001$). En lo que respecta a la facilidad de colocación, los niños percibieron que este aspecto es prácticamente igual en ambos dispositivos.

4.4.2 Experiencia de uso

En esta sección se encuentran los resultados tanto cuantitativos como cualitativos que surgieron de la evaluación de experiencia de uso que se realizó con niños en una escuela primaria de El Sauzal, Ensenada, B.C. La experiencia de uso del dispositivo se evaluó en términos de apariencia, comodidad, personalización y retroalimentación. A continuación, se muestran los resultados.

4.4.2.1 Apariencia

Una de las características que emergieron durante el proceso de diseño fue que el dispositivo debería ser atractivo y tener una apariencia divertida y entretenida, además de contar con una forma que complementara estos aspectos (*e.g.*, forma de casco, diadema, banda, sombrero).

Como se observa en la Figura 40, en todos los aspectos de apariencia del dispositivo más, de la mitad de los niños dieron el puntaje más alto a ambos dispositivos.

En cuanto a la Forma del dispositivo, se observa que los niños calificaron más alto a NeuroSky; esto puede deberse a que los niños percibieron que el casco de juguete que la diadema tenía encima (con forma de dinosaurio). Era más llamativo que el casco propuesto. Esta situación puede observarse también cuando se observa la gráfica referente al aspecto atractivo del dispositivo

Sin embargo, puede observarse que 2 niños más percibieron que el casco contaba con una apariencia divertida y entretenida. Esto puede ser debido a los estímulos personalizables con los que contaba el casco, los cuales le proporcionaban esta apariencia divertida y entretenida. Además, solo un niño percibió la diadema como neutral, esto puede ser debido a que le gustó el casco que tenía encima, pero no le gustó que no pudiera personalizarse.

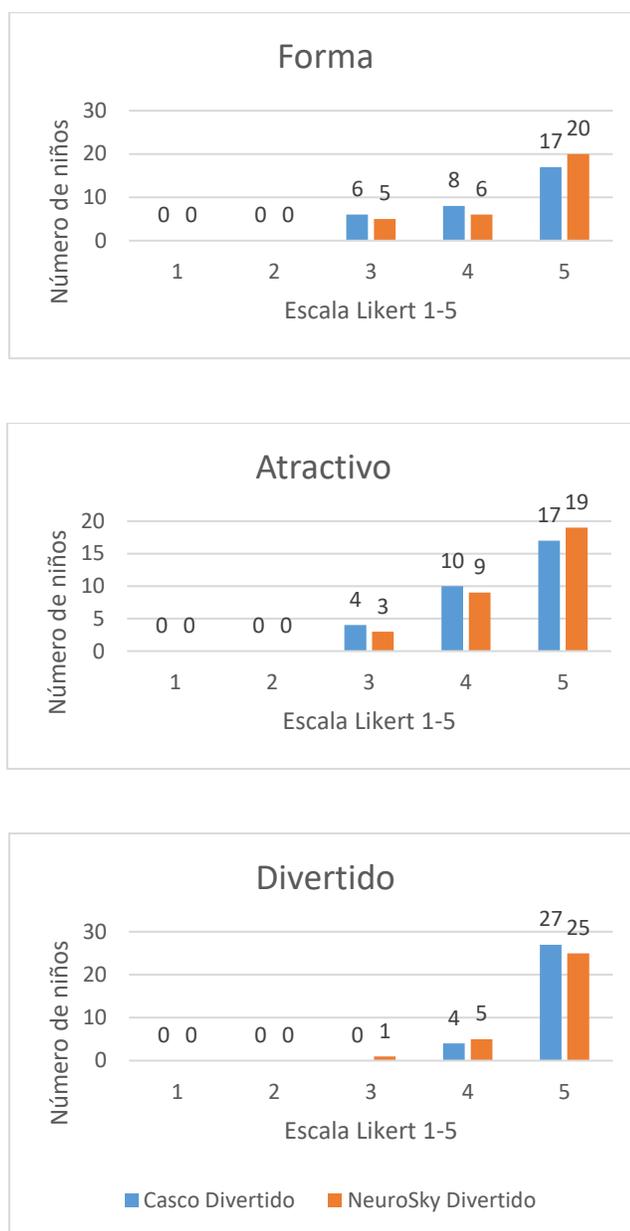


Figura 41. Gráficas de percepción de aspectos de apariencia

Relacionado con lo anterior, los niños perciben (23/31) que la apariencia del dispositivo no es importante para poder utilizarlo, sino que funcione de manera correcta

“No, porque no importa cómo se vea, sino que funcione bien” (Participante Masculino, 8 años)

La mitad de los niños (16/31) prefirieron que el dispositivo tuviera forma de casco; y la otra mitad prefirió una diadema. Esto puede ser debido a que a algunos niños les gustó más el aspecto del casco con el que contaba NeuroSky a pesar de que no producía ningún estímulo visual ó auditivo y no se podía personalizar.

“Me gustó que fuera un casco no como una diadema” (Participante Femenino, 10 años)

A pesar de que existe una pequeña diferencia en estos aspectos de apariencia, la prueba estadística de Wilcoxon indica que no existe una diferencia significativa en cuanto a la apariencia de los dispositivos (Forma $p = 0.4804$, Atractivo $p = 0.5920$, Entretenido/divertido $p = 0.4773$). Estos resultados sugieren que la apariencia (*i.e.*, que el dispositivo se les vea bien) no es un aspecto importante para que los niños quieran usar el dispositivo; si no, más bien les importa más el funcionamiento. Sin embargo, modificar la apariencia para reflejar la personalidad del niño parece indicar que lo importante es la personalización de la apariencia.

4.4.2.2 Comodidad

Referente a la comodidad los niños percibieron al Casco más cómodo que la diadema NeuroSky (Figura 41) se puede observar que, en el caso del casco, más de la mitad de los niños (21 de 31) le dieron la calificación más alta, mientras que solo 9 niños se la otorgaron al casco, lo cual sugiere que los niños perciben que el casco es más cómodo que la diadema NeuroSky ($p = 0.0041$). Esto puede deberse principalmente a la forma del casco, ya que se amolda mejor a la cabeza de los niños, además, por dentro cuenta con algunas esponjas que hacen que se sienta más suave que la diadema NeuroSky.

Por otro lado, se observa que en el caso de NeuroSky, la mitad de los niños (15 de 31) piensan que la diadema sólo es cómoda, esto puede ser debido a que los niños consideran que la diadema es cómoda a pesar de algunos aspectos que no les gustaron (*e.g.*, el clip de la oreja, presión en la cabeza). Además, sólo 5 niños la consideran como neutral, es decir, ni cómoda ni incómoda.

En cuando a la incomodidad, 2 niños consideraron a la diadema NeuroSky como incómoda, esto puede deberse al clip de la oreja o al sentimiento de presión en la cabeza. En el caso del casco, solo un niño indicó que lo considera incómodo lo cual puede ser a causa de un sentimiento de pesadez o incluso que sentía los cables como invasivos.

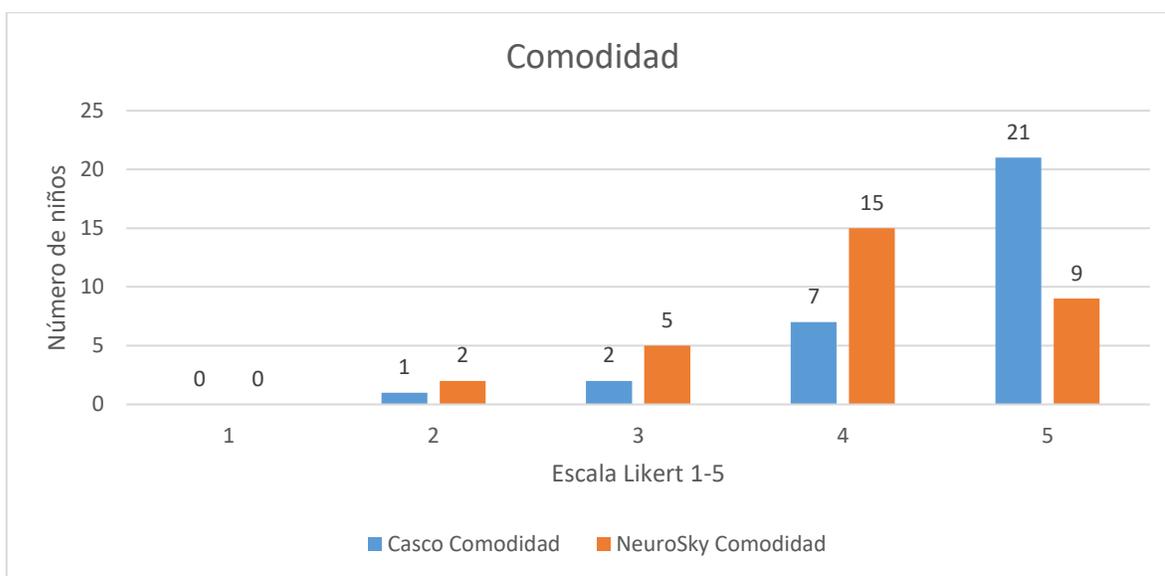


Figura 42. Gráfica de percepción de comodidad

Para la percepción de los niños respecto a la comodidad de los dispositivos la prueba estadística de Wilcoxon indica que si existe diferencia significativa entre el casco y NeuroSky ($p = 0.0041$), lo cual indica que los niños perciben el casco más cómodo de la diadema NeuroSky.

25/30 niños percibieron que la comodidad en este tipo de dispositivos es un aspecto importante para considerar en el diseño de los mismos. Esto se debe a que, si los dispositivos no son cómodos, los niños piensan que no podrían concentrarse en la actividad que están realizando con dichos dispositivos.

“Si (es importante), porque con el dispositivo puedes pensar en cuanto te incomoda y no concentrarte en lo que vas a hacer” (Participante Femenino, 10 años)

En relación con la comodidad, los niños opinaron que ambos dispositivos presentan algún tipo de incomodidad. Por un lado 11/31 niños mencionaron algún tipo de incomodidad con el casco incluyendo un sentimiento de pesadez del dispositivo, el que el cabello de las niñas se enredaba en los electrodos, y que los cables del prototipo eran invasivos.

“No me gusto el casco, como que pesaba” (Participante Masculino, 10 años)

Por otro lado, 19/31 niños mencionaron algún tipo de incomodidad con la diadema NeuroSky. La mayoría de estas incomodidades están relacionadas con el clip que se coloca en la oreja a modo de referencia, y con la presión que el dispositivo ejerce sobre la cabeza.

“A veces aprieta mucho el gancho de la oreja” (Participante Masculino, 10 años)

Como resultado del análisis de los videos se encontró que la diadema NeuroSky es incómoda. Esto, con base en los comportamientos que se observaron en los videos que parecían presentar una incomodidad para el niño en turno; estos comportamientos eran: el número de veces que se presentaban movimientos con la cabeza y el número de veces que los niños se tocaron la cabeza. Respecto a los movimientos de cabeza, se presentaron pocos movimientos con ambos dispositivos (Casco (C) = 2, NeuroSky (N) = 4). Sin embargo, con NeuroSky se presentaron el doble de movimientos con la cabeza (Figura 42 (a)). Estos movimientos se presentaron cuando los niños sentían que el dispositivo no estaba bien ajustado o al querer observar algún aspecto del dispositivo en turno. Por ejemplo, los niños movían el electrodo de la frente de la diadema NeuroSky.

Por otra parte, los niños se tocaron la cabeza casi 4 veces más con la diadema NeuroSky (C = 4 veces, N = 23 veces; Figura 42 (b)). Los niños realizaban estos movimientos cuando se sentían incómodos al utilizar alguno de los dispositivos. Por ejemplo, los niños se tocaban la cabeza cuando les molestaba la presión del clip sobre su oreja o en alguna parte de la cabeza, o cuando la diadema les quedaba muy floja o muy apretada.

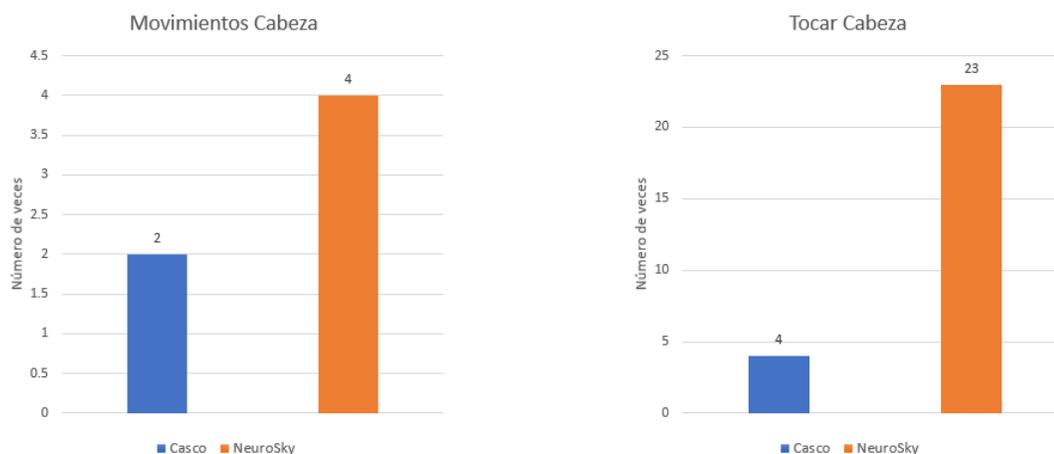


Figura 43. (a) Total de número de movimientos de cabeza, (b) Total de veces que se tocaron la cabeza

Estos resultados demuestran que el Casco fue más cómodo ($p = 0.0041$) que NeuroSky. Además de que los niños consideran que la comodidad es un aspecto importante que se debe considerar al momento de diseñar este tipo de dispositivos para su uso por niños.

4.4.2.3 Personalización

Respecto a los aspectos personalizables del dispositivo se observó en los videos que los niños tuvieron 51% más muestras de interés cuando usaban el casco que cuando usaban la diadema NeuroSky (Figura 43). Se tomó en cuenta como muestras de interés cuando los niños preguntaban por el funcionamiento de los estímulos y cómo podían personalizarlos. También se contaba como muestra de interés cuando preguntaban si podían colocarle los accesorios que ellos querían y qué era lo que tenían que hacer para que los estímulos funcionaran.

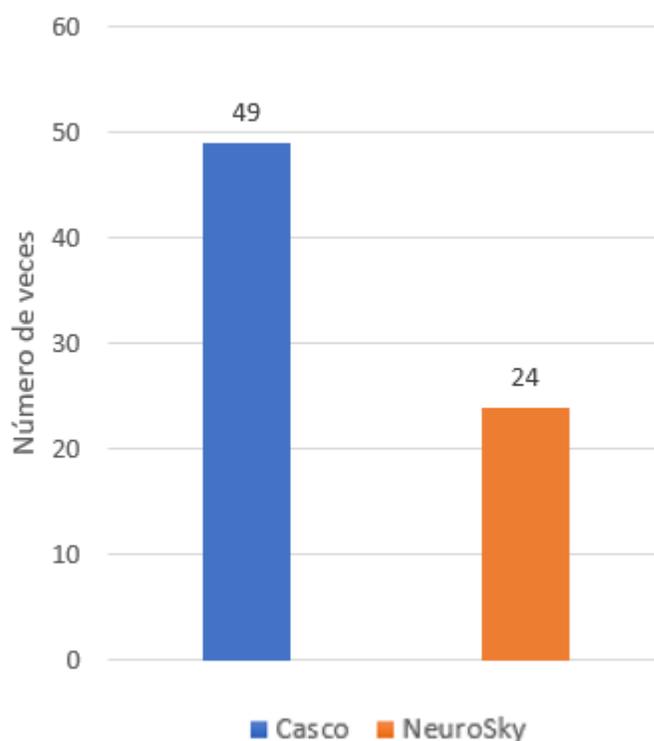


Figura 44. Total de muestras de interés de los niños en cada dispositivo

En los videos también se analizó el número de niños que se mostraron más motivados a realizar la actividad con el Casco que con la diadema NeuroSky (Figura 44). Se consideraron como motivados los niños que al observar que podían personalizar el casco se mostraron emocionados y/o contentos por realizar la actividad. En el caso de la diadema se contabilizaron los niños que presentaban estos mismos comportamientos, pero al observar el casco con el que se colocaba la diadema NeuroSky.

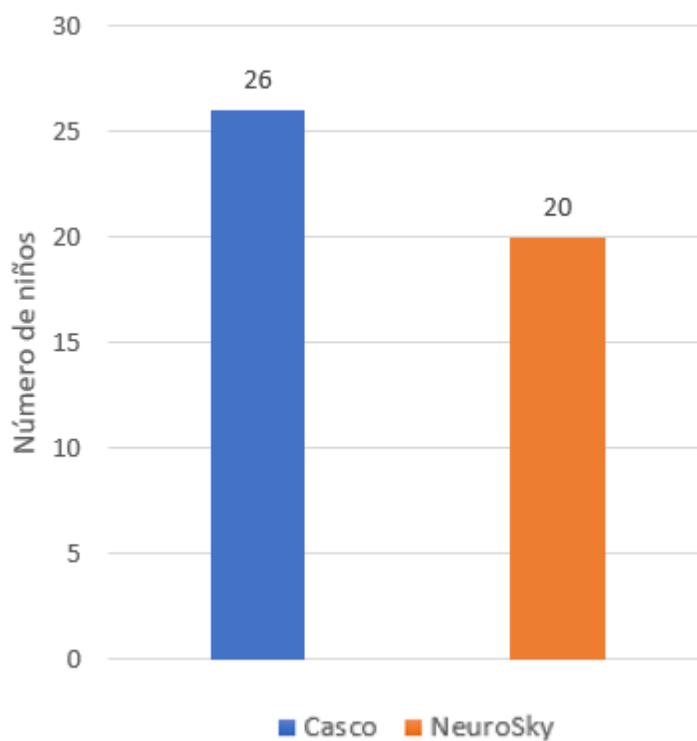


Figura45. Total de niños que se mostraron motivados a realizar la actividad con cada dispositivo

Como se puede observar, 6 niños más se mostraron motivados para realizar la actividad con el casco que con la diadema NeuroSky.

24/31 niños mencionaron que preferían usar y/o que les gustó más el casco debido a alguno de los aspectos personalizables del dispositivo (*i.e.*, estímulos, apariencia).

“Me gusto más el casco porque le podías poner las figuritas y cambiarle el color porque pues sabiendo que tu decidiste como que estás más a gusto” (Participante Masculino, 9 años)

Estos resultados pudieran indicar que esta población prefirió el casco debido a sus aspectos personalizables. Además, se observa que debido a estos aspectos personalizables los niños presentan más muestras de interés en el casco y más niños se muestran motivados a realizar la actividad con él.

4.4.2.4 Retroalimentación

En cuanto a los estímulos de retroalimentación, debido al uso de la técnica de Mago de Oz (Geiger et al., 2001) no se pudieron obtener datos cuantitativos acerca de los estímulos producidos por el dispositivo. Sin embargo, los niños expresaron su opinión respecto a estos estímulos.

Por un lado 24/31 niños expresaron que prefirieron el Casco debido a los estímulos de retroalimentación que producía.

“Me gustó más el casco porque prendía luces de color cuando te concentrabas” (Participante Masculino, 11 años)

“Me gustó el casco por las luces porque es lo que ayuda a que ponga atención” (Participante Masculino, 9 años)

En lo que respecta al tipo de estímulos que prefieren los niños, 27/31 niños mencionaron que les gustó más el estímulo visual.

“Me gustaron las luces porque si estabas no concentrado se ponía rojo, si estas medio era rosita y blanco sería mi color favorito y sería que estás concentrado” (Participante Femenino, 8 años)

Además 27/31 niños mostraron preferencia por este estímulo debido a que podían personalizarlo.

“Me gusto que las luces eran del color que yo pedí si me concentraba mucho, y rojo es que no estaba concentrada, entonces me decía qué tanto me concentraba o no, aunque en ratos no lo viera, pero al escuchar la música y todo se miraba si me concentraba o no” (Participante Femenino, 11 años)

En contraste con el estímulo visual, se recibieron pocos comentarios en referencia al estímulo auditivo. En este caso 5/31 niños mencionaron que les gustó más el estímulo auditivo.

“Las luces me gustaron... (Entrevistador: ¿Y el sonido? - Si, me gustó porque suena como campanita... (Entrevistador: ¿y cuál te gusto más?) ... El sonido” (Participante Masculino, 8 años)

En referencia a este estímulo, solo 1 niño de 31 mencionó que además del estímulo auditivo positivo, necesitaba un estímulo negativo, es decir, un sonido que le indicara que no estaba poniendo atención a la actividad.

Las opiniones de los niños reflejan que dentro de esta población existe una preferencia por el estímulo visual. Esto puede deberse a que este estímulo era el único que se podía personalizar; sin embargo, hay niños que afirman que este estímulo es el que les ayuda a saber si están realizando la actividad de manera correcta.

En cuanto al estímulo auditivo, éste fue mencionado poco por los niños. Por otro lado, solo un niño indicó que necesitaría un estímulo auditivo que le indicara que está realizando mal la actividad. Esto muestra que, aunque prevalece la preferencia por el estímulo visual, existen usuarios que desean enfocarse más en la actividad que realizan con el dispositivo que en observar cómo reacciona el estímulo visual a su actividad cerebral, por lo cual los estímulos auditivos son mejores para ellos.

4.4.3 Cuestionario de salida

En cuanto a la percepción final por ambos dispositivos, 6 niños más respondieron que si les gustaría realizar la actividad con el casco en lugar que con la diadema NeuroSky. A su vez 5 niños más respondieron que tal vez realizarían la actividad de nuevo con la diadema NeuroSky; es decir, dudan si realizarían la actividad de nuevo con ese dispositivo o no. Finalmente, solo un niño dijo que definitivamente no realizaría de nuevo la actividad con NeuroSky mientras que ningún niño dijo que no realizaría la actividad de nuevo con el casco (Figura 45); esto puede ser debido a que la diadema NeuroSky fue considerado como más incómoda y colocación más lenta, además de que no cuenta con aspectos personalizables.

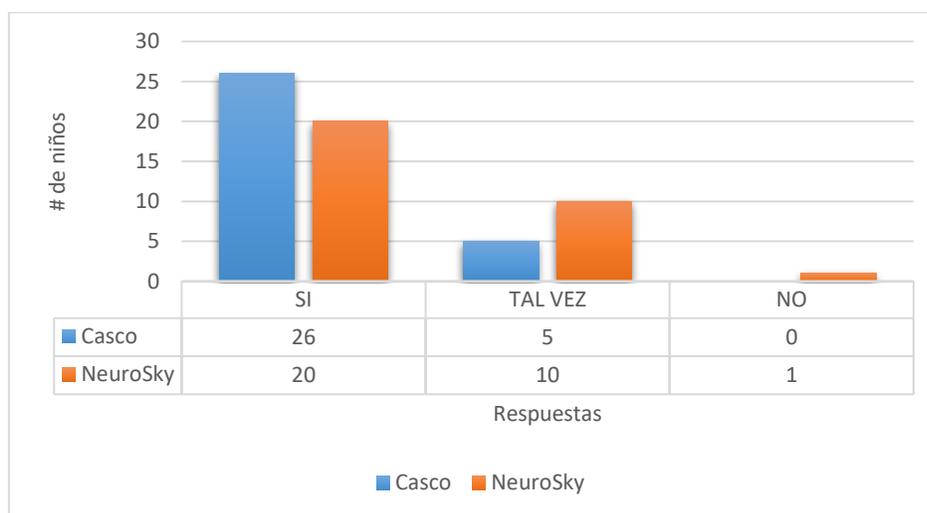


Figura 46. Resultados de la tabla *Otra vez-Otra vez*

Por otro lado, más niños prefirieron el casco en términos de estímulos, comodidad, facilidad de colocación, personalización y más atractivo (Figura 46). Sin embargo, se observa que en cuanto a aspectos de apariencia del dispositivo (mejor apariencia con el dispositivo puesto y aspecto más divertido) las opiniones de los niños están divididas. Esto coincide con lo que se observó en la sección 4.5.2.1 en donde los puntajes de apariencia resultaron muy parejos. Esto sugiere que para esta población la apariencia de estos dispositivos no es un aspecto relevante para considerar en el diseño de los mismos.

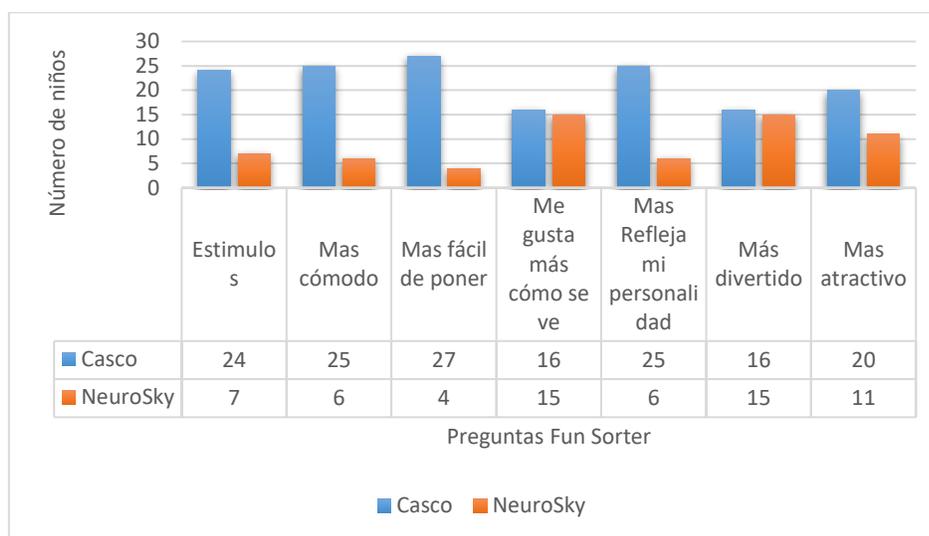


Figura 47. Resultado de la tabla de Ordenamiento divertido

4.5 Conclusiones

En este capítulo se describe la evaluación del Casco en comparación con la diadema NeuroSky. Esta evaluación se realizó con la finalidad de conocer la usabilidad y la experiencia de uso del casco para su uso por niños entre 8 y 11 años.

Esta evaluación muestra que la usabilidad del casco fue mejor en términos de Tiempo y Facilidad de colocación. Además, los niños perciben que:

- El tiempo de colocación es importante para diseñar este tipo de dispositivos para su uso por niños. También consideraron al Casco significativamente más rápido de colocar.
- El Casco fue más fácil de colocar, pero no se observó una diferencia significativa.

La Experiencia de uso del casco fue mejor en términos de comodidad, personalización y Retroalimentación. Sin embargo, la diadema NeuroSky fue mejor en términos de Apariencia.

- Los niños consideran que la comodidad en este tipo de dispositivos es un aspecto importante que se debe considerar para el diseño de este tipo de dispositivos para su uso por niños de 8 a 11 años.

- El uso de estímulos personalizables parece tener un efecto en el interés y la motivación que tienen los niños para usar el dispositivo, además de que le proporciona una apariencia atractiva.
- Los niños consideran que la apariencia del dispositivo no es un aspecto importante para el diseño de estos dispositivos, sin embargo, es importante que funcione adecuadamente y proporcione estímulos de retroalimentación.

Capítulo 5. Conclusiones, aportaciones y trabajo futuro

5.1 Conclusiones

En este trabajo se diseñó un dispositivo cerebral de manera participativa con niños en edad escolar (8 a 11 años). En este proceso de diseño se logró conocer cuáles son las características de diseño que deben tener las interfaces cerebrales para su uso por niños. Para demostrar la factibilidad del diseño propuesto se evaluó la usabilidad y experiencia de uso de dicho dispositivo en un escenario concreto.

Para obtener las características de diseño del dispositivo propuesto se realizaron actividades de juego dramático. En dichas sesiones los niños actuaron e improvisaron escenas en donde se describía y simulaba el uso del dispositivo. Además de estas actividades, los niños realizaron algunos juegos con la finalidad de obtener más datos cualitativos acerca de las características de diseño con las que debería contar el dispositivo propuesto. Dichas sesiones se videograbaron y se analizaron mediante el uso de técnicas cualitativas.

El análisis sugiere que un dispositivo cerebral adecuado para su uso por niños en edad escolar debe tener las siguientes características de diseño: una apariencia divertida y entretenida, debe ser cómodo, fácil de usar, rápido de colocar, reflejar la personalidad del usuario, y proporcionar retroalimentación al usuario acerca de lo que está ocurriendo con su actividad cerebral.

Con las características de diseño que emergieron de los datos cualitativos, se realizaron sesiones de diseño participativas con los niños de las cuales se obtuvieron bosquejos de prototipos de baja fidelidad. Al final de dichas sesiones los niños votaron por el bosquejo que ellos consideraron que mejor refleja las características de diseño propuestas.

Con base en los resultados de las sesiones de diseño participativas y en conjunto con un diseñador gráfico se obtuvo el modelo 3D del casco cerebral. El casco informa al usuario acerca de lo que ocurre con su actividad cerebral y cuenta con aspectos personalizables como lo son la apariencia y los estímulos de retroalimentación.

El Casco toma lecturas de la actividad cerebral por medio de electrodos secos colocados en su interior. Esta señal, se envía de manera inalámbrica a una computadora (por medio de una comunicación serial FTDI) en la cual se ejecuta un programa desarrollado con el software OpenViBe que toma la señal cruda,

la procesa, y devuelve un valor. El sistema envía este valor a un circuito Arduino; la interfaz entre el procesamiento de la señal y el circuito Arduino se realiza mediante un script hecho en Python. Después, el circuito Arduino con base en estos valores genera estímulos visuales y auditivos que reflejan la actividad cerebral del usuario; dichos estímulos están programados en el lenguaje de programación de Arduino, el cual se basa en C++.

Para realizar la evaluación del Casco se realizó un estudio intra-sujetos. En este estudio 31 niños en edad escolar probaron el Casco y la diadema comercial NeuroSky sobre la cual se colocó un casco de juguete para niños con la finalidad de hacerlo comparable (Garzotto et al, 2016).

La evaluación se llevó a cabo durante 4 días en una escuela primaria pública de El Sauzal, Ensenada, B.C., México. Cada día participó un grupo de 8 niños que utilizaron el casco que se diseñó y la diadema cerebral. Los niños fueron asignados de manera aleatoria a los grupos que iniciaban la actividad con un dispositivo diferente para evitar el efecto de aprendizaje. Al terminar cada condición los niños respondieron un cuestionario de usabilidad y experiencia de uso, y participaron en una entrevista semiestructurada. Una vez que realizaron la actividad con ambos dispositivos y respondieron cuestionarios y entrevista, los niños respondieron un cuestionario final de salida (Read et al, 2006). Todas las sesiones fueron videograbadas y las entrevistas se grabaron en audio para su posterior análisis. Se utilizaron técnicas cualitativas y cuantitativas para analizar los datos que se recabaron.

Respecto a la usabilidad, los resultados cuantitativos muestran que el Casco fue significativamente más rápido de colocar que la diadema NeuroSky; esto también pudo observarse en los tiempos de colocación de los videos que se analizaron.

Por otro lado, los resultados cuantitativos indican que el casco fue considerado como más fácil de colocar; sin embargo, la prueba estadística que se realizó no mostró una diferencia significativa en cuanto a la facilidad de colocación

Los resultados cualitativos de usabilidad sugieren que los niños percibieron que el tiempo de colocación del Casco era considerablemente más corto que el de la diadema NeuroSky. Además, la percepción de los niños fue que ambos dispositivos fueron fáciles de colocar.

En cuanto a la experiencia de uso, los resultados cuantitativos muestran que los niños perciben que ambos dispositivos son igualmente atractivos y con un aspecto divertido y entretenido. Además, los resultados

cualitativos sugieren que los niños no consideran la apariencia del dispositivo como un aspecto importante, sino más bien les interesa que realice bien su función.

En lo que respecta a la comodidad del dispositivo, los datos cuantitativos muestran que los niños consideran el Casco significativamente más cómodo que la diadema NeuroSky, mientras que esta percepción de los niños acerca del casco se mantiene en los datos cualitativos. Aunado a esto, la percepción de los niños es que la comodidad es un aspecto importante para considerar en el diseño de interfaces cerebrales para esta población en particular.

Referente a la personalización del dispositivo, los resultados cualitativos sugieren que los niños prefirieron el Casco debido a dichos aspectos con que cuenta el Casco. Además, se observó en los videos que estos aspectos motivan y estimulan el interés del niño para usar el dispositivo.

Respecto a los estímulos de retroalimentación, la opinión de los niños refleja que existe una preferencia por el estímulo visual debido a que los niños podían personalizarlo; sin embargo, existen niños que consideran que este estímulo es el que les ayuda a realizar mejor la actividad. En cuanto al estímulo auditivo se mencionó poco, sin embargo, existen usuarios que prefieren tener más estímulos auditivos que visuales.

5.2 Aportaciones

Las principales aportaciones de este trabajo se mencionan a continuación:

- Un prototipo de alta fidelidad de un dispositivo cerebral adecuado para su uso por niños en edad escolar.
- Las características de diseño con las que debe contar un dispositivo cerebral adecuado para su uso por niños.
- Evidencia empírica del uso de juego dramático como método para obtener las características de diseño de los niños por medio de la actuación y la improvisación de escenas que involucran el uso y la interacción con el dispositivo a diseñar.

- Evidencia empírica del uso del dispositivo propuesto, en donde se comparó con una diadema cerebral comercial (NeuroSky) en términos de usabilidad (facilidad y tiempo de colocación) y experiencia de uso (apariencia, comodidad, personalización, retroalimentación).
- Se presentó un artículo corto para el Congreso Mexicano de Interacción Humano-Computadora (MexIHC 2016).

5.3 Limitaciones

Este trabajo en su versión actual presenta algunas limitaciones que se mencionan a continuación:

- El procesamiento de la señal debe mejorarse ya en su estado actual la solución es simple y presenta algunos falsos positivos y negativos.
- La evaluación se realizó solamente en una escuela primaria durante 4 días, por lo que los resultados no son generalizables a una población general de niños.
- Solo se comparó el dispositivo propuesto con la diadema NeuroSky y el uso de nuevos dispositivos y más variables pudiera impactar de diferente manera en los resultados.

5.4 Trabajo futuro

El dispositivo propuesto que se presenta en este trabajo de tesis se encuentra aún en vías de desarrollo ya que ésta es la primera versión de dicho dispositivo. Dada esta situación se puede explorar futuros proyectos de investigación para mejorar otros aspectos de diseño como, la ergonomía del dispositivo, cambiar el tipo de electrodos y su posicionamiento, y mejorar aspectos de interacción con el sistema incluyendo el uso de otros estímulos sensoriales para retroalimentación.

En términos de ergonomía el dispositivo tuvo algunos problemas con el ajuste a diferentes tamaños de cabeza en los niños, por lo que se necesita trabajo en adaptar este diseño a distintos tamaños de cabeza o incluso modificar la forma de tal manera que pueda adaptarse mejor. Estos aspectos incluyen también el uso de diferentes materiales para la elaboración del dispositivo.

Por otro lado, sería interesante observar si los niños estarían dispuestos a renunciar a ciertos estímulos y/o aspectos de comodidad para tener un dispositivo más portable. En caso contrario se podría conocer si prefieren tener un dispositivo más cómodo con más elementos de retroalimentación y personalización. Si este es el caso, los niños estarían sacrificando la portabilidad del dispositivo en aspectos como el peso, tamaño, duración de la batería, entre otros.

En cuanto al posicionamiento de los electrodos haría falta realizar una evaluación de la precisión de las posiciones en que se colocan los electrodos con respecto al sistema 10/20. Dicho posicionamiento debería poderse adaptar a los distintos tamaños de cabeza en los niños ya que la colocación de los electrodos se realiza con base en las medidas que se toman de la cabeza de cada individuo.

En lo que respecta a los estímulos de retroalimentación, hace falta realizar un estudio en donde se evalúe el tipo de estímulo que sea el más adecuado para que el dispositivo proporcione dichos estímulos. Además, valdría la pena evaluar distintos tipos de estímulos visuales como patrones de luces, auditivos tanto positivos como negativos, además de probar también la retroalimentación háptica.

Por otro lado, hace falta trabajo referente a los algoritmos de procesamiento de la señal. Actualmente existen diferentes métodos para realizar el procesamiento de estas señales fisiológicas como lo son clasificadores e incluso algoritmos genéticos. Se propone probar alguno de estos enfoques para la extracción de características y tener un análisis y procesamiento de la señal más profundo y preciso. Además, si se requiere que el dispositivo haga el procesamiento en tiempo real también se necesitaría trabajo en cuando a la calibración del dispositivo para cada individuo.

En cuanto a los aspectos de interacción con el dispositivo, hace falta integrar en una interfaz los diferentes elementos que dan soporte al funcionamiento del dispositivo; desde el procesamiento de la señal hasta la generación de los estímulos de retroalimentación. Por lo cual se necesita trabajo para desarrollar una interfaz que permita al usuario configurar y personalizar los distintos elementos del casco (*i.e.*, Estímulos de retroalimentación, calibración, iniciar/detener el funcionamiento del casco).

Finalmente, respecto al estudio de usabilidad y experiencia de uso hace falta realizar un estudio a largo plazo en el cual los niños utilicen los dispositivos durante más tiempo; esto debido a que al ser una tecnología muy novedosa para los niños puede que esté presente un efecto de novedad en la percepción de los niños para ambos dispositivos. Por otro lado, se podrían utilizar estos dispositivos para controlar

con ellos distintas aplicaciones (además de juegos) que hagan uso de señales EEG y ver si la actividad que se realiza con ellos casusa un efecto en la percepción de usabilidad y experiencia de uso.

Literatura citada

- An, X., Wan, B., Qi, H., & Ming, D. (2012, July). Digital spelling BCI based on visual-auditory associate stimulation. In *Virtual Environments Human-Computer Interfaces and Measurement Systems (VECIMS), 2012 IEEE International Conference on* (pp. 82-85). IEEE.
- Attanasio, V. (1985). Clinical issues in utilizing biofeedback with children. *Clinical Biofeedback & Health: An International Journal*.
- Bakeman, R., & Gottman, J. M. (1997). *Observing interaction: An introduction to sequential analysis*. Cambridge university press.
- Berger, H. (1929). Electroencephalogram in humans. *Archiv fur Psychiatrie und nervenkrankheiten*, 87, 527-570.
- Beyer, H., & Holtzblatt, K. (1999). Contextual design. *Interactions*, 6(1), 32-42.
- Brodu, N., Lotte, F., & Lécuyer, A. (2011, April). Comparative study of band-power extraction techniques for motor imagery classification. In *Computational Intelligence, Cognitive Algorithms, Mind, and Brain (CCMB), 2011 IEEE Symposium on* (pp. 1-6). IEEE.
- Cabestaing, F. and Derambure, P. (2016) Physiological Markers for Controlling Active and Reactive BCIs, in *Brain-Computer Interfaces 1: Foundations and Methods* (eds M. Clerc, L. Bougrain and F. Lotte), John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA. doi: 10.1002/9781119144977.ch4
- Clerc, M., Bougrain, L., & Lotte, F. (Eds.). (2016). *Brain-Computer Interfaces 1: Methods and Perspectives*. John Wiley & Sons.
- Coben, R., Linden, M., & Myers, T. E. (2010). Neurofeedback for autistic spectrum disorder: a review of the literature. *Applied psychophysiology and biofeedback*, 35(1), 83.
- Eines, J., & Mantovani, A. (1980). *Teoría del juego dramático* (Vol. 8). Ministerio de Educación.
- Ekandem, J. I., Davis, T. A., Alvarez, I., James, M. T., & Gilbert, J. E. (2012). Evaluating the ergonomics of BCI devices for research and experimentation. *Ergonomics*, 55(5), 592-598.
- Enabling the Future. 2017. Enabling the future. A global network of passionate volunteers using 3D printing to give the world a "Helping hand". Consultado en 19 de septiembre de 2017, de <http://enablingthefuture.org/about/>
- Evain, A., Roussel, N., Casiez, G., Argelaguet-Sanz, F. and Lécuyer, A. (2016) Brain-Computer Interfaces for Human-Computer Interaction, in *Brain-Computer Interfaces 1: Foundations and Methods* (eds M. Clerc, L. Bougrain and F. Lotte), John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA. doi: 10.1002/9781119144977.ch12
- Frauenberger, C., Makhaeva, J., & Spiel, K. (2016, May). Designing smart objects with autistic children: Four design exposés. In *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (pp. 130-139). ACM.
- Future Technology Devices International Ltd., 2017. FTDI. Consultado el 19 de septiembre de 2017, de <http://www.ftdichip.com/>

- Garzotto, F., Gelsomini, M., Pappalardo, A., Sanna, C., Stella, E., & Zanella, M. (2016, May). Using Brain Signals in Adaptive Smart Spaces for Disabled Children. In *Proceedings of the 2016 CHI Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems* (pp. 1684-1690). ACM.
- Geiger, M., Nieschulz, R., Zobl, M., Neuss, R., & Lang, M. (2001). Methods for Facilitation of Wizard-of-Oz Studies and Data Acquisition. In *Proc. of the 9th Intl. Conf. on Human-Computer Interaction (HCI International 2001), New Orleans, Louisiana, USA* (Vol. 5, No. 10, p. 8).
- Hairston, W. D., Whitaker, K. W., Ries, A. J., Vettel, J. M., Bradford, J. C., Kerick, S. E., & McDowell, K. (2014). Usability of four commercially-oriented EEG systems. *Journal of neural engineering*, 11(4), 046018.
- Hall, L., Hume, C., & Tazzyman, S. (2016, June). Five Degrees of Happiness: Effective Smiley Face Likert Scales for Evaluating with Children. In *Proceedings of the 15th International Conference on Interaction Design and Children* (pp. 311-321). ACM.
- Hamadicharef, B (2010, May). Brain-computer interface (bci) literature-a bibliometric study. In *Information Sciences Signal Processing and their Applications (ISSPA), 2010 10th International Conference on* (pp. 626-629). IEEE.
- Huang, J., Yu, C., Wang, Y., Zhao, Y., Liu, S., Mo, C., & Shi, Y. (2014, April). FOCUS: enhancing children's engagement in reading by using contextual BCI training sessions. In *Proceedings of the 32nd annual ACM conference on Human factors in computing systems* (pp. 1905-1908). ACM.
- Jibbitz, 2017. Jibbitz shoe charms. Consultado el 19 de septiembre de 2017, de <http://www.crocs.com/c/jibbitz>
- Lansbergen, M. M., Arns, M., van Dongen-Boomsma, M., Spronk, D., & Buitelaar, J. K. (2011). The increase in theta/beta ratio on resting-state EEG in boys with attention-deficit/hyperactivity disorder is mediated by slow alpha peak frequency. *Progress in Neuro-Psychopharmacology and Biological Psychiatry*, 35(1), 47-52.
- Lotte, F. and Congedo, M. (2016) EEG Feature Extraction, in *Brain-Computer Interfaces 1: Foundations and Methods* (eds M. Clerc, L. Bougrain and F. Lotte), John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA. doi: 10.1002/9781119144977.ch7
- Magerkurth, C., Cheok, A. D., Mandryk, R. L., & Nilsen, T. (2005). *Pervasive games: bringing computer entertainment back to the real world. Computers in Entertainment (CIE)*, 3(3), 1-19.
- Mann, A. M., Hinrichs, U., & Quigley, A. (2014, November). Children's Creativity Lab: Creating a 'Pen of the Future'. In *Proceedings of the 2014 Workshops on Advances in Computer Entertainment Conference* (p. 11). ACM.
- Marshall, D., Coyle, D., Wilson, S., & Callaghan, M. (2013). Games, gameplay, and BCI: the state of the art. *IEEE Transactions on Computational Intelligence and AI in Games*, 5(2), 82-99.
- Maulsby, D., Greenberg, S., & Mander, R. (1993, May). Prototyping an intelligent agent through Wizard of Oz. In *Proceedings of the INTERACT'93 and CHI'93 conference on Human factors in computing systems* (pp. 277-284). ACM.
- McDonald, S., Comrie, N., Buehler, E., Carter, N., Dubin, B., Gordes, K., & Hurst, A. (2016, October). Uncovering challenges and opportunities for 3D printing assistive technology with physical

- therapists. In *Proceedings of the 18th International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility* (pp. 131-139). ACM.
- Mellis, D. A., & Buechley, L. (2012, June). Case studies in the personal fabrication of electronic products. In *Proceedings of the Designing Interactive Systems Conference* (pp. 268-277). ACM.
- Mihajlović, V., Grundlehner, B., Vullers, R., & Penders, J. (2015). Wearable, wireless EEG solutions in daily life applications: what are we missing? *IEEE journal of biomedical and health informatics*, 19(1), 6-21.
- MindWave. 2017. MindWave NeuroSky Body and Ming Quantified. Consultado el 19 de septiembre de 2017, de <https://store.neurosky.com/pages/mindwave>
- Moraveji, N., Li, J., Ding, J., O'Kelley, P., & Woolf, S. (2007, April). Comicboarding: using comics as proxies for participatory design with children. In *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems* (pp. 1371-1374). ACM.
- Moss, D. P. (2014). The use of biofeedback and neurofeedback in pediatric care. In *Functional Symptoms in Pediatric Disease* (pp. 285-303). Springer New York.
- Muse. 2017. Aplicación Muse Interaxon. Consultado el 19 de septiembre de 2017, de <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.interaxon.muse&hl=es>
- Nijholt, A. (2008, September). BCI for games: A 'state of the art' survey. In *International Conference on Entertainment Computing* (pp. 225-228). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Norman, D. A. 2010. Natural user interfaces. *Interactions* 17, 3 (May 2010), 6-10. DOI=<http://dx.doi.org/10.1145/1744161.1744163>
- OpenBCI, 2017. OpenBCI Cyton. Consultado el 19 de septiembre de 2017, de <http://docs.openbci.com/Hardware/02-Cyton>
- OpenViBE, 2017. OpenViBE FAQ. Consultado el 19 de septiembre de 2017, de <http://openvibe.inria.fr/faq/>
- Perales, F. J., & Amengual, E. (2017). Combining EEG and Serious Games for Attention Assessment of Children with Cerebral Palsy. In *Converging Clinical and Engineering Research on Neurorehabilitation II* (pp. 395-399). Springer International Publishing.
- Perego, P., Sironi, R., Lavezzari, R., & Andreoni, G. (2015, May). User-Centered Design for Wearable Neuro-rehabilitation System. In *Proceedings of the 2015 workshop on Wearable Systems and Applications* (pp. 57-58). ACM.
- Perronnet, L., Lécuyer, A., Lotte, F., Clerc, M., & Barillot, C. (2016). Brain training with neurofeedback. *Brain-Computer Interfaces 1: Foundations and Methods*, 271-292.
- Rogers, Y., Sharp, H., & Preece, J. (2011). *Interaction design: beyond human-computer interaction*. John Wiley & Sons.
- Read, J. C., & MacFarlane, S. (2006, June). Using the fun toolkit and other survey methods to gather opinions in child computer interaction. In *Proceedings of the 2006 conference on Interaction design and children* (pp. 81-88). ACM.

- Roy, R. N. and Frey, J. (2016) Neurophysiological Markers for Passive Brain–Computer Interfaces, in Brain–Computer Interfaces 1: Foundations and Methods (eds M. Clerc, L. Bougrain and F. Lotte), John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA. doi: 10.1002/9781119144977.ch5
- Sas, C., & Chopra, R. (2015). *MeditAid: a wearable adaptive neurofeedback-based system for training mindfulness state*. *Personal and Ubiquitous Computing*, 19(7), 1169-1182.
- Somerén, M. V., Barnard, Y. F., & Sandberg, J. A. (1994). *The think aloud method: a practical approach to modelling cognitive processes*. Academic Press.
- Swartz Center for Computational Neuroscience, UCSD, 2017. Lab Streaming Layer Protocol. Consultado el 19 de septiembre de 2017, de <https://github.com/sccn/labstreaminglayer/wiki>
- Vidal, J. J. (1973). Toward direct brain-computer communication. *Annual review of Biophysics and Bioengineering*, 2(1), 157-180.
- Viny, J. 2017, SIMON. Consultado el 19 de Septiembre de 2017, de <http://jerviny.com/simon>
- Weiser, M. (1991). The Computer for the 21st Century. *Scientific American*, 265(3), 94-105.
- Wilcoxon, F., Katti, S. K., & Wilcox, R. A. (1970). Critical values and probability levels for the Wilcoxon rank sum test and the Wilcoxon signed rank test. *Selected tables in mathematical statistics*, 1, 171-259.
- Wobbrock, J. O. (2012). Seven research contributions in HCI. *Studies*, 1(1), 52-80.
- Zaman, B., & Abeele, V. V. (2010, June). Laddering with young children in User eXperience evaluations: theoretical groundings and a practical case. In *Proceedings of the 9th International Conference on Interaction Design and Children* (pp. 156-165). ACM.
- Zhaochen, D. T. (2017, June). Alternative 3D Education for Children: Course Design of 3D Printing Interactivity for Beijing's Primary Schools. In *Proceedings of the Fifth International Symposium of Chinese CHI* (pp. 30-35). ACM.

Anexos

Anexo 1 - Historia Base

Luis es un niño de 9 años, algo tímido y callado al principio, pero muy alegre y abierto con sus amigos y compañeros de la escuela. Luis asiste a la escuela primaria con normalidad como el resto de sus compañeros a la cual lo lleva su mamá y por las tardes después de realizar sus deberes de la escuela le gusta jugar videojuegos y jugar al fútbol.

Luis posee poderes mentales pero él aún no está seguro de ello pues le han sucedido algunas cosas extrañas como el poder mover objetos cuando está muy concentrado en ellos o incluso cuando está muy relajado, pero él no ha podido darles explicación a estos sucesos.

Un profesor de su escuela (a quien de niño le sucedían cosas similares) se dio cuenta de su situación y ha decidido ayudarlo. Para ayudar a Luis, el profesor le ha comentado que necesita de un dispositivo que le ayude a activar sus “poderes” así como poder utilizarlos para realizar algunas acciones con ellos (por ejemplo, mover cosas con la mente por medio de la concentración o relajación que él tenga en su cabeza).

El profesor posee uno de estos dispositivos, pero al parecer no es adecuado para Luis pues el profesor lo construyó cuando ya era adulto y por lo tanto no está hecho para adaptarse a la cabeza de un niño como Luis. Además, Luis no es el único niño con poderes de este tipo, por lo cual el profesor le ha encomendado a Luis la misión de crear su propio dispositivo el cual servirá también para ayudar a otros niños con los mismos poderes a controlarlos.

Anexo 2 - Preguntas guía para talleres de teatro

Taller I - Apariencia/Forma

- ¿Cómo te gustaría que fuera el dispositivo (gorro, casco, diadema, banda)?
- ¿En qué le ayuda al personaje que su dispositivo tenga esa forma?
- ¿Por qué crees que el dispositivo sería mejor con esta forma vs otras?
- ¿Crees que el dispositivo del personaje debería tener pinzas en la oreja?
- ¿De qué color te gustaría que fuera el dispositivo (que sea neutral)?

Taller II - Tiempo/Dificultad de colocación

- ¿Cuánto crees que debe tardar el personaje en ponerse el dispositivo?, ¿Por qué?
- ¿Crees que sea mejor colocarlo en poco tiempo?, ¿Por qué?
- ¿Por qué creen que es importante el tiempo de colocación para el personaje?
- ¿Qué cambiarían en el dispositivo para tener un mejor tiempo de colocación?

Taller III - Funcionalidad/Comodidad

- ¿Cómo crees que ayudará el dispositivo al personaje?
- ¿Qué tendrá que hacer el personaje para que su dispositivo funcione?
- ¿El personaje podrá utilizar su dispositivo con facilidad?
- ¿Qué cambiarían para que el dispositivo fuera más fácil de usar?
- ¿El dispositivo debe ser ligero o pesado?, ¿Por qué?
- ¿Debe ser cómodo el dispositivo del personaje?, ¿Por qué?
- ¿Qué cambiarían para que el dispositivo fuera más cómodo?
- ¿Qué otras funcionalidades le agregarías al dispositivo?

Anexo 3 – Instrumentos de evaluación

Nombre: _____ Grado: _____ Edad: _____

1. Cuestionario de Usabilidad

Parte I (Para cada dispositivo) – Responde las preguntas eligiendo solo una carita.

1. ¿Cuánto te gustó usar el dispositivo?



1.1 ¿Qué es lo que más te gustó de usar el dispositivo? ¿Por qué?

1.2 ¿Qué es lo que no te gustó? ¿Por qué?

1.3 ¿Qué cambiarías para que te guste más usar el dispositivo?

2. ¿Qué tan fácil es ponerte el dispositivo?



2.1 ¿Por qué te pareció que es fácil/difícil?

2.2 ¿Necesitarías ayuda para ponerte/quitar el dispositivo?

3. ¿Qué te pareció el tiempo que tomó ponerte el dispositivo?



3.1 ¿Fue muy lento o muy rápido?

3.2 ¿Crees que es importante que el dispositivo se ponga rápido?

4. ¿Cómo crees que se te ve puesto el dispositivo?



4.1 ¿Por qué te gusta cómo se ve?

4.2 ¿Crees que es importante que el dispositivo se te vea bien? ¿Por qué?

2. Cuestionario de Experiencia de uso

1. ¿Qué opinas acerca de la forma del dispositivo?



1.1 ¿Qué es lo que más te gustó de la forma del dispositivo? ¿Por qué?

1.2 ¿Qué es lo que no te gustó? ¿Por qué?

1.3 ¿Cambiarías algo de la forma/apariencia del dispositivo? ¿Qué cambiarías?

2. ¿Qué tan atractivo te pareció el dispositivo? ¿Por qué?



2.1 ¿Qué es lo que te atrae más del dispositivo? ¿Por qué?

2.2 ¿Agregarías algo al dispositivo para hacerlo más atractivo?

3. ¿Qué tan cómodo es el dispositivo?



3.1 ¿Crees que es importante que el dispositivo sea cómodo? ¿Por qué?

3.2 ¿Qué agregarías para hacer el dispositivo más cómodo?

4. ¿El dispositivo te pareció divertido/entretenido?



4.1 ¿Qué fue lo que te pareció más divertido/entretenido del dispositivo?

4.2 ¿Agregarías algo al dispositivo para hacerlo más divertido/entretenido?

3. Comparación de dispositivos - Tabla Otra vez- Otra vez (después de haber usado ambos dispositivos)

1. Responde con una “✓” si te gustaría volver a realizar el entrenamiento con los dispositivos según se indica.

	SI	TALVEZ	NO
1. 			
2. 			

2. Tomando en cuenta los dispositivos anteriores. Coloca en las casillas el número del dispositivo que tu pienses que es “MEJOR” o “PEOR” (Tabla Ordenamiento Divertido)

	MEJOR	PEOR
ESTÍMULOS QUE DA EL DISPOSITIVO		
MÁS CÓMODO		
MÁS FÁCIL DE PONER		
ME GUSTA MÁS CÓMO SE ME VE		
REFLEJA MI PERSONALIDAD		
MAS DIVERTIDO		
MAS ATRACTIVO		

Anexo 4 - Protocolo de Evaluación

Usabilidad y Experiencia de uso del Casco Sensorial Personalizable

Objetivo del estudio

- Evaluar la usabilidad y experiencia de uso del **Casco** en comparación con la diadema NeuroSky

Descripción del estudio

- **Diseño experimental:** Intra Sujetos (*Within-subjects*, los niños participan en las dos condiciones)

- **Condiciones**

- **Uso de casco sensorial**
- **Uso de NeuroSky + casco de juguete**

- **Hipótesis:**

- El prototipo es mejor para niños en términos de usabilidad que la diadema NeuroSky
- La experiencia de uso es mejor con el casco que con la diadema NeuroSky

- **Variables:**

- **Independientes:**

- Prototipo Casco
- Diadema NeuroSky

- **Dependientes:**

- Usabilidad
 - Facilidad de uso
 - Tiempo de colocación
- Experiencia de uso
 - Retroalimentación
 - Comodidad
 - Personalización
 - Diversión

➤ **Participantes:**

- **30 niños que cursan de 3er a 6to año de primaria (8-11 años)**
(Al menos 7 de cada edad)

➤ **Procedimientos de control**

- Las actividades de evaluación se realizarán en grupos de 8 niños por día (4 días aprox.) esto debido a que los niños están disponibles de 1 a 2.45 pm, cada grupo de 8 niños realizará la actividad de entrenamiento con todas las condiciones, un niño a la vez. La división será aleatoria a fin de evitar el sesgo hacia una actividad o dispositivo.

➤ **Materiales**

1. Prototipo
2. Diadema NeuroSky
3. Casco de juguete
4. Laptop con Juego FarmerKeeper y programas de procesamiento de señal
5. Tabla ordenamiento divertido y Tabla Otra vez-Otra vez
6. Cuestionario de Usabilidad
7. Cuestionario de experiencia de uso

➤ **Pasos a Seguir**

- Un grupo por día realizará el entrenamiento de retroalimentación neuronal con las tres condiciones. Se sorteará el orden en el que cada niño usará las condiciones.
- Explicar al niño la actividad de entrenamiento y mostrarle el dispositivo que le corresponde (2 min)
- Colocación de los dispositivos (mediré los tiempos de colocación)
- Actividad de retroalimentación neuronal (4 min. con cada condición)
 - Para cada actividad, el niño usará un dispositivo, el cual estará interfazado con una laptop en la cual se instalará el juego FarmerKeeper y los programas de procesamiento de la señal para realizar la sesión de entrenamiento.
- Una vez que cada actividad concluye, el niño responderá los cuestionarios de usabilidad y experiencia de uso
- Cuando el niño haya realizado la sesión de entrenamiento con ambos dispositivos, responderá la parte restante del cuestionario de experiencia de uso

➤ **Colección de datos**

- **Entrenamiento retroalimentación neuronal:** Las sesiones de entrenamiento que se realizarán con los dispositivos serán videograbadas para su análisis posterior y así evaluar los tiempos de colocación de los dispositivos, detectar errores que cometen los usuarios, así como detectar comportamientos y/o algunas acciones de los niños durante la sesión de entrenamiento.
- **Usabilidad:** Los niños responderán el cuestionario de usabilidad al terminar cada condición; esto con la finalidad de conocer la opinión de los niños acerca de las condiciones como la facilidad de uso, el tiempo y facilidad de colocación, así como saber si el usuario requerirá algún tipo de ayuda y/o entrenamiento para poder utilizar el dispositivo.
- **Experiencia de uso:** Los niños responderán un cuestionario para determinar cuál fue la experiencia de uso (al terminar cada condición) de los dispositivos en términos de qué dispositivo les pareció más atractivo, divertido, qué dispositivo es más cómodo, cuál se coloca más rápido, cuál estarían dispuestos a usar más tiempo y con cuál sienten que se ven mejor, entre otros. Al terminar ambas condiciones, los niños responderán la tabla de Ordenamiento divertido y la Tabla otra vez-otra vez.