



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

---

FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO Y DESARROLLO DE UN SISTEMA PARA EL  
CONTROL MENTAL DE PRÓTESIS UTILIZANDO UNA  
INTERFAZ CEREBRO-COMPUTADORA (BCI)**

**TESIS**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
**INGENIERO EN COMPUTACIÓN**

PRESENTA:

JOSÉ FRANCISCO NERI GONZÁLEZ

DIRECTOR DE TESIS  
M.I. HERNANDO ORTEGA CARRILLO

MÉXICO, D.F.

DICIEMBRE 2013





Universidad Nacional  
Autónoma de México



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

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

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

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

## AGRADECIMIENTOS

### GRACIAS A MI UNIVERSIDAD

Gracias a la **Universidad Nacional Autónoma de México** que es y siempre será mi alma máter, especialmente a la **Facultad de Ingeniería** que fue mi segunda casa durante toda mi carrera universitaria, donde profesores y compañeros me enseñaron a desarrollar las habilidades necesarias para ser un futuro ingeniero.

### GRACIAS A MI FAMILIA

Gracias a **mi madre Enriqueta**, quien me ayudó a prepararme y sobresalir sobre todas las cosas, esa persona a quien yo también llamo padre, ya que me enseñó a ser perseverante y así evadir todos los obstáculos que se puedan interponer en mi camino. Gracias a **mi tía Cecilia**, por ser como una segunda madre y quien me dio su apoyo y cariño incondicional durante todo el tiempo que he vivido junto a ella. Gracias a **mi tía Marga**, por sus regaños, consejos, apoyo y cariño que me ha dado durante todo este tiempo, y por esas palabras de aliento al decirme “Eres el mejor”. Gracias a **mi hermana Mariana**, quien siempre me ha dado su cariño, y quien me gustaría que a pesar de los pequeños problemas alcance la misma meta. Gracias a **mi tía Bertha, mi tía Liboria, mi tía Inés y demás familia**, quienes me animaron y apoyaron todo el tiempo para finalizar mi carrera profesional. Gracias a **mi prima Paula e hijos**, quienes aun estando en otro país, siempre me demuestran que están aquí conmigo en todo sentido.

A todos ustedes les agradezco por demostrarme su amor y cariño, lo cual me da fuerza suficiente para luchar y ser una mejor persona. Y sé que siempre estarán apoyándome en todos los momentos difíciles y exitosos de mi vida.

## GRACIAS A MIS AMIGOS

Gracias a **Alejandra Villegas**, por ser esa persona que ha estado para apoyarme desde que inicié la preparatoria y por ayudarme a corregir esta tesis, me alegro ser uno de tus mejores amigos desde hace algunos años. Gracias a **Astrid Hollands**, por demostrarme tu amistad, por regañarme, por tus consejos y por ser una amiga incondicional. Gracias a **Lilivette Cruz**, por ser mi amiga y compañera de carrera, y por ir aprendiendo a mi lado durante nuestra formación académica. Gracias a **Norman Morales**, por ser como un hermano y amigo durante todo este tiempo, y sé que siempre estarás allí cuando lo necesite. Gracias a **Gabriela Altamirano y Rosalba Merlos**, por enseñarme a disfrutar la vida en base a risas y carcajadas. Gracias a **Lorena Belmont, Maciel Torres y Sandra Navarrete** por ser mis compañeras y amigas, saben que sin sus porras no hubiese llegado hasta donde me encuentro ahora. Gracias a **mis amigos y compañeros de trabajo**, quienes día a día me alentaron a lograr mi titulación.

Gracias a mis amigos he comprendido qué es la amistad, y tal vez no lo han notado, pero he aprendido demasiadas cosas de ustedes que me han impulsado a luchar por todos mis objetivos propuestos.

## GRACIAS A MI DIRECTOR DE TESIS

Gracias al **M.I. Hernando Ortega Carrillo**, quien me ha dado la oportunidad de trabajar con él desde el servicio social; quien me ha dado consejos en todo aspecto para lograr mi titulación, y por creer en mí para desarrollar este proyecto. Así también, le agradezco que haya confiado para que sea parte del equipo de trabajo LAIDETEC, siendo un nuevo reto en el aspecto profesional del cual me siento sumamente orgulloso de poder participar a partir de este punto de mi vida.

## GRACIAS A MIS SINODALES

Gracias a **mis sinodales**, por tomarse el tiempo para leer esta tesis y aconsejarme al respecto, y así presentar un trabajo de calidad.

# TABLA DE CONTENIDO

<b>GLOSARIO .....</b>	<b>1</b>
<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>4</b>
1. INTRODUCCIÓN A INTERFACES CEREBRO-COMPUTADORA (BCI) .....	9
1.1. Interfaces Cerebro-Computadora (BCI).....	9
1.1.1. Definición .....	9
1.1.2. Clasificación .....	10
1.1.3. Principio de funcionamiento.....	11
1.2. Características y funcionamiento.....	12
1.2.1. Características.....	12
1.2.2. Funcionamiento.....	12
1.3. Métodos de adquisición .....	16
1.3.1. No invasivo.....	16
1.3.2. Invasivo .....	18
1.4. Estrategias mentales y patrones cerebrales.....	19
1.4.1. Atención Selectiva o Potenciales Evocados.....	20
1.4.2. Imaginación motora .....	21
1.5. Comparación de Interfaces Cerebro-Computadora comerciales .....	22
1.6. Emotiv EPOC Neuroheadset .....	25
1.6.1. Características.....	26
1.6.2. Panel de control Emotiv .....	28
1.7. Aplicaciones .....	30
1.8. Conclusiones del capítulo .....	32
2. INTRODUCCIÓN A PRÓTESIS ROBÓTICAS PARA MIEMBRO SUPERIOR .....	34
2.1. Prótesis robóticas para miembro superior.....	34
2.1.1. Definición .....	34
2.1.2. Características.....	35
2.1.3. Funcionamiento.....	36
2.1.4. Clasificación .....	37
2.1.4.1. Prótesis mecánicas .....	37
2.1.4.2. Prótesis eléctricas .....	38
2.1.4.3. Prótesis mioeléctricas.....	38
2.1.4.4. Prótesis híbridas .....	39
2.2. Principales prótesis de miembro superior en el mercado comercial .....	39
2.2.1. Ottobock .....	39
2.2.2. Touch Bionics .....	41
2.2.3. Pro/Bionics.....	42
2.2.4. DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency).....	44
2.3. Conclusiones del capítulo .....	46
3. DESCRIPCIÓN GENERAL DE DISPOSITIVOS ROBÓTICOS A MANIPULAR MEDIANTE UNA INTERFAZ CEREBRO-COMPUTADORA .....	48
3.1. Prototipo de prótesis robótica de mano .....	48
3.1.1. Características y funcionamiento.....	50
3.2. Prototipo de brazo robótico .....	53
3.2.1. Características y funcionamiento.....	54
3.3. Prototipo de piernas robóticas .....	55
3.3.1. Características y funcionamiento.....	56
3.4. Conclusiones del capítulo .....	57
4. DESARROLLO DE SOFTWARE E INTEGRACIÓN DE TECNOLOGÍAS.....	59
4.1. Sistema de software .....	59

4.1.1.	Características del sistema de software .....	60
4.2.	Diseño del sistema de software .....	61
4.2.1.	Diagrama modular del sistema de software .....	61
4.2.2.	Descripción a nivel modular del sistema de software .....	62
4.2.3.	Algoritmo general del sistema de software .....	63
4.3.	Desarrollo del sistema de software .....	68
4.4.	Pruebas del sistema de software .....	69
4.5.	Integración de tecnologías .....	73
4.6.	Conclusiones del capítulo .....	73
5.	PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	76
5.1.	Diseño y ejecución de pruebas .....	76
5.2.	Pruebas con prototipo de prótesis robótica de mano .....	77
5.3.	Análisis de resultados .....	80
5.4.	Conclusiones del capítulo .....	82
6.	CONCLUSIONES FINALES .....	85
6.1.	Trabajo a futuro .....	86
	<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>88</b>
	<b>SITIOS ELECTRÓNICOS.....</b>	<b>89</b>
	<b>ANEXOS.....</b>	<b>90</b>
	<b>DIFUSIÓN Y DIVULGACIÓN CIENTÍFICA DEL PROYECTO .....</b>	<b>90</b>

# GLOSARIO

## A

**Actividad cerebral o neuronal:** Es el trabajo funcional correspondiente al conjunto de neuronas del sistema nervioso central localizadas en el cerebro, produciendo señales eléctricas y magnéticas.

**Amputación transradial:** Separación espontánea, traumática o quirúrgica de una extremidad superior por debajo del codo.

**Amputación transhumeral:** Separación espontánea, traumática o quirúrgica de una extremidad superior por debajo del hombro.

**API (Application Programming Interface):** Es un conjunto de funciones que permite acceder a servicios de una aplicación a través del uso de un lenguaje de programación.

**Archivo DLL (Dynamic-Link Library):** Es un archivo que contiene funciones que se pueden llamar desde aplicaciones u otras DLL. No permiten ejecutarse directamente por lo que es necesario llamarlas desde un código externo.

**Área cortical:** Indica alguna zona cerebral según su localización anatómica.

**Artefactos:** Es la actividad bioeléctrica causada por el movimiento de ojos, lengua, boca y músculos del cuerpo humano.

## C

**Canal de contacto:** Representa una zona cerebral que se está monitoreando a través de un electroencefalograma. Se identifica con un electrodo sobre el cuero cabelludo.

**Control intencional:** Se basa en patrones de actividad cerebral que voluntariamente son generados por un usuario para ser interpretados por una BCI.

**Control mioeléctrico:** Se basa en potenciales eléctricos provenientes de las contracciones musculares.

**Corteza cerebral:** Es un revestimiento que cubre la superficie de los hemisferios cerebrales. Está conformada por materia gris y por millones de neuronas.

**Craneotomía:** Es una operación quirúrgica con el fin de acceder al cerebro.

**E**

**Electrocorticografía (ECoG):** Es una técnica invasiva que consiste en colocar electrodos sobre la superficie de la corteza cerebral con el objetivo de monitorear la actividad cerebral.

**Electrodo:** Cuerpo conductor que en contacto con un medio permite transmitir una corriente eléctrica.

**Electroencefalografía (EEG):** Es una técnica no invasiva que permite medir la actividad eléctrica cerebral y es utilizada de forma clínica para estudiar la tipología de las ondas cerebrales, con el fin de detección de patologías.

**Electromiografía (EMG):** Es una técnica para la evaluación y registro de la actividad eléctrica producida por los músculos del cuerpo humano.

**Emotiv EPOC Neuroheadset:** Es una Interfaz Cerebro-Computadora desarrollada por Emotiv Systems.

**Estrategia mental:** Determina lo que el usuario tiene que hacer para producir voluntariamente patrones cerebrales y así una BCI pueda interpretarlos.

**G**

**Grabación intracortical:** Es una técnica invasiva que consiste en grabar una señal bioeléctrica a partir de electrodos que penetran el tejido cerebral.

**H**

**Hemiplejia:** Es un trastorno en el que la mitad contra lateral del cuerpo humano está paralizada.

**M**

**Médula espinal:** Es un conjunto de nervios que pasa a través de la columna vertebral, y es parte del sistema nervioso central.

**Mioelectrodo:** Electrodo capaz de captar una señal eléctrica muscular.

**N**

**Neuromuscular:** Hace referencia a los nervios que controlan los músculos del cuerpo humano.

**Neuroprótesis o prótesis neuronal:** Chips de silicio dotados de finos electrodos que son implantados en el cerebro.

**Número de grados de libertad (GDL):** Se refiere al número de movimientos independientes que puede realizar un cuerpo.

## P

**Patrón cerebral:** Onda cerebral específica que se obtiene a partir de la actividad cerebral.

**PVC:** Policloruro de vinilo.

## S

**SDK (Software Development Kit):** Es un conjunto de herramientas que ayudan a la programación de aplicaciones para un entorno específico.

**Servomotor:** Es un actuador giratorio (motor eléctrico) que permite un control preciso de la posición angular.

**Sistema nervioso central o periférico:** Estructura biológica conformada por el cerebro y la médula espinal.

**Socket:** Dispositivo intermedio entre la prótesis y el muñón.

## T

**Tarea mental:** Ejercicio cerebral que permite generar una serie de patrones cerebrales específicos que son identificados mediante una BCI para traducirlos en comandos.

# INTRODUCCIÓN

En México se realizan en promedio 70,000 amputaciones de extremidades al año, de las cuales el 80% son provocadas principalmente por diabetes y el 20% restante por traumatismo derivado de accidentes automovilísticos, de trabajo o por quemaduras de tercer grado. Generalmente las amputaciones de miembro superior ocasionadas por traumatismo, la mayoría de las veces dejan al paciente sin posibilidad de valerse por sí mismo o desempeñar un trabajo de forma adecuada. Cabe señalar que en el IMSS se registran aproximadamente poco más de 4,000 amputaciones de miembro superior en un año. (*Federación Mexicana de Diabetes, A.C., 2012*) (*Medicina Digital, 2013*)

La prescripción de una prótesis se realiza para mejorar la calidad de vida de aquellas personas que sufren la pérdida de algún miembro superior o inferior debido a enfermedades o traumas, es importante mencionar que esto depende del nivel de amputación y del beneficio esperado. Regularmente sólo el 50% de los amputados se beneficia con una prótesis. Desafortunadamente en México la adquisición de una prótesis es complicada y costosa sobre todo para personas con bajos recursos, y esto a su vez se debe a que la mayoría de empresas dedicadas a la fabricación y venta de este tipo de productos son extranjeras. (*Barouti H, 1998*)

Principalmente existen dos tipos de prótesis de miembro superior: las *activas* y las *pasivas*. Las prótesis *pasivas* están orientadas en la estética del paciente y sirven para restablecer el aspecto exterior (imagen corporal), y las *activas* son aquellas que emulan la funcionalidad del miembro perdido. Dentro de estas últimas se encuentran básicamente las prótesis *mecánicas, mioeléctricas e híbridas*. Las prótesis *mecánicas* son las más comerciales y comunes a utilizar por aquellas personas que han sufrido la pérdida de algún miembro superior, son activadas por tracción lo cual hace fácil su manipulación, no cuentan con tecnología avanzada, solo mecanismos. Las prótesis *mioeléctricas* en cambio, cuentan con un funcionamiento autónomo debido a que actúan a partir de electrodos que se colocan sobre los músculos y captan los pulsos eléctricos para ejecutar una acción específica.

Una prótesis *híbrida* es aquella que combina la fuerza del cuerpo, elementos mecánicos y el control mioeléctrico, y éstas son comúnmente más usadas por amputados transhumerales (amputación arriba del codo). (Arce, 2005)

Todos estos tipos de prótesis han ido mejorando a través del tiempo, pero aún no satisfacen por completo las necesidades (costo, manipulación, control, ergonomía, disponibilidad, etc.) de aquellas personas que han sufrido la pérdida de alguna extremidad.

Por otro lado, el cerebro es el órgano más importante del sistema nervioso central y es el centro de control para todo el cuerpo. También es responsable de la complejidad del pensamiento, memoria, emociones y lenguaje. Una de sus funciones principales es registrar los movimientos voluntarios del cuerpo, y por lo tanto permite al ser humano tener el control de sus extremidades corporales.

Debido a lo anterior, en los últimos años se han desarrollado dispositivos que permiten la interacción del cerebro con la computadora denominados Interfaces Cerebro-Computadora (ICC, o bien BCI, *Brain Computer Interface* por sus siglas en inglés), las cuales detectan pensamientos, emociones y expresiones faciales mediante la adquisición de señales eléctricas cerebrales, transformándolas en comandos. Estos comandos permiten a los seres humanos interactuar con diversos tipos de aplicaciones, tales como: videojuegos, sistemas de software, realidad virtual, etc.

Las empresas dedicadas al diseño y desarrollo de Interfaces Cerebro-Computadora están creando este tipo de dispositivos para ser utilizados principalmente en videojuegos y experimentar así nuevas formas de interacción. Sin embargo, dada la funcionalidad de estos dispositivos comerciales, también están siendo utilizados por los desarrolladores en diferentes áreas, por ejemplo, en la robótica.

Por lo tanto, *el objetivo de esta tesis*, radica en el diseño y desarrollo de un sistema de software que permita la integración de dos desarrollos tecnológicos: una Interfaz Cerebro-Computadora y un prototipo de prótesis de mano robótica, con el fin de crear una forma de control alterna para manipular una prótesis de miembro superior. Puesto que al disponer de un dispositivo que permite interpretar señales eléctricas directamente del cerebro y transformarlas en acciones reales con nuestro entorno, se puede convertir en una extensión o en un sustituto más fiel de nuestras capacidades físicas.

De tal forma que este sistema permita dotar de movilidad a personas amputadas y puedan realizar su vida de forma más natural, así también como la posibilidad de extender las capacidades naturales del ser humano en cuanto a fuerza, número y tipo de extremidades, etc.

Esta tesis se encuentra conformada por 6 capítulos y comprende una serie de temas que son importantes para entender y conocer de forma general el funcionamiento del sistema de control cerebral de prótesis utilizando una Interfaz Cerebro-Computadora (BCI).

En el primer capítulo se hace una breve introducción referente a Interfaces Cerebro-Computadora donde se da a conocer su definición, clasificación, funcionamiento y características principales que conforman a estos dispositivos. Así también, se hace una breve descripción de Emotiv EPOC Neuroheadset, que corresponde a la Interfaz Cerebro-Computadora utilizada en este proyecto.

En el segundo capítulo se menciona acerca de prótesis robóticas de miembro superior, debido a que esta tecnología se desea controlar en primera instancia con una Interfaz Cerebro-Computadora. Se da a conocer la definición, clasificación, características y funcionamiento de una prótesis de miembro superior, así como algunos ejemplos de prótesis comerciales.

A través del tercer capítulo se realiza una descripción general de otros dispositivos robóticos que se desean controlar mediante una Interfaz Cerebro-Computadora, tales como: mano robótica, brazo robótico y piernas robóticas. Aquí se hace mención de los elementos característicos que conforman cada uno de ellos.

El cuarto capítulo hace referencia al diseño y desarrollo de software, y se da a conocer la forma en que el software y el hardware interactúan entre sí para hacer funcionar este sistema de control cerebral.

En el quinto capítulo se realiza el diseño y la ejecución de pruebas para verificar el correcto funcionamiento del sistema en cuestión, además se hace un análisis completo de los resultados obtenidos para corroborar que los objetivos planteados se hayan alcanzado.

Y por último, en el sexto capítulo se plantean las conclusiones obtenidas durante el desarrollo del sistema, así como un breve apartado donde se describe el trabajo a futuro que se desprende a partir de esta investigación.

# **CAPÍTULO 1**

## **INTRODUCCIÓN A INTERFACES CEREBRO- COMPUTADORA (BCI)**

# 1. INTRODUCCIÓN A INTERFACES CEREBRO-COMPUTADORA (BCI)

## 1.1. Interfaces Cerebro-Computadora (BCI)

Actualmente existen diferentes tipos de interfaces que permiten la comunicación entre hombre-máquina. Básicamente el ser humano puede interactuar con la computadora a través de diferentes canales de entrada/salida, por ejemplo: voz, visión, audición, tacto y movimiento. Sin embargo, existen dispositivos que permiten la comunicación hombre-máquina mediante el registro de actividad cerebral, y son conocidos como Interfaces Cerebro-Computadora (o bien BCI, *Brain Computer Interface* por sus siglas en inglés).

### 1.1.1. Definición

Existen diferentes definiciones en la literatura respecto a una Interfaz Cerebro-Computadora, tales como:

- ✦ Una *Interfaz Cerebro-Computadora* es un dispositivo que provee al cerebro un nuevo canal de control y comunicación. (*Jonathan R. Wolpaw, 2002*)
- ✦ Una *Interfaz Cerebro-Máquina* permite proveer una señal de comando desde la corteza cerebral. Este comando sirve como una nueva salida funcional para controlar partes del cuerpo deshabilitadas o dispositivos físicos, tales como computadoras o brazos robóticos. (*Donoghue, 2002*)
- ✦ Una *Interfaz Directa Cerebral* es un dispositivo que acepta comandos voluntarios directamente desde el cerebro humano sin necesidad de movimiento físico y puede ser usado para operar una computadora u otras tecnologías. (*S.P. Levine, 1999*)

- ✦ Una *Interfaz Cerebro-Computadora* está compuesta por microelectrodos incrustados quirúrgicamente en la corteza cerebral, permitiendo con ello el uso de la actividad neuronal para controlar dispositivos con suficiente velocidad y agilidad para reemplazar movimientos naturales, y animar movimientos en personas paralizadas. (Schwartz, 2004)

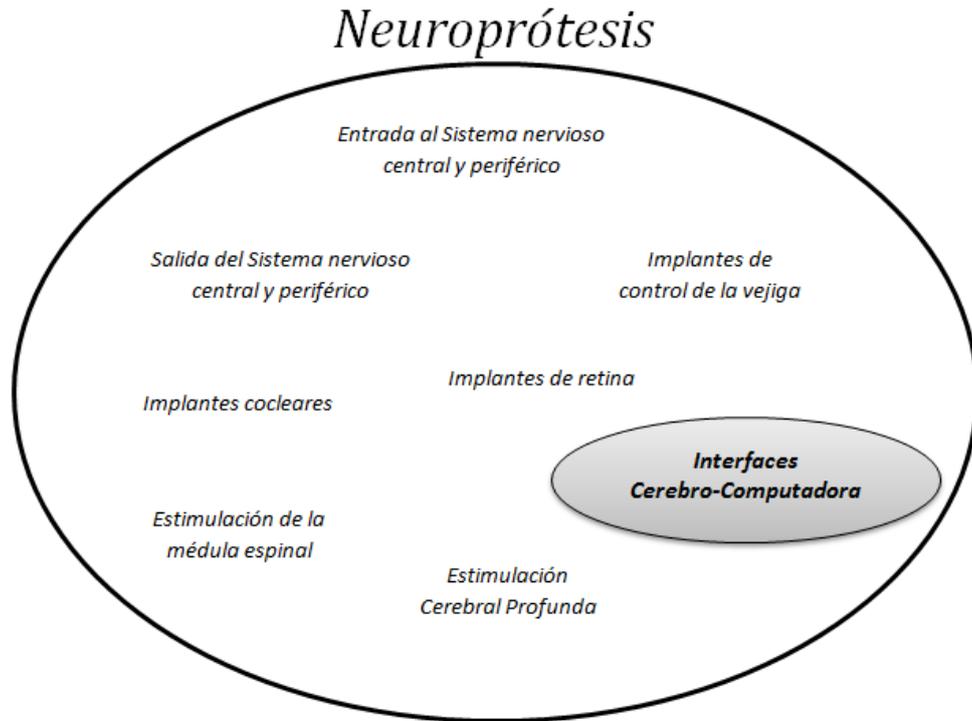
Sin embargo, en este trabajo se propone la siguiente definición:

Una *Interfaz Cerebro-Computadora* es un sistema que permite la comunicación hombre-máquina mediante la adquisición de señales eléctricas cerebrales, y el cual es capaz de traducir pensamientos cognitivos (intenciones) del usuario en acciones reales para interactuar con un entorno físico o virtual.

Este dispositivo también es conocido en algunos textos como Interfaz Cerebro-Máquina (Brain-Machine Interface BMI), Interfaz Directa Cerebral (Direct Brain Interface DBI) y Neuroprótesis, todos estos términos describen el mismo sistema y son usados como sinónimos. En este escrito se usará el término Interfaz Cerebro-Computadora o sus siglas en inglés BCI (Brain Computer Interface).

### **1.1.2. Clasificación**

Las Neuroprótesis (también llamadas Prótesis neuronales) pueden estimular y/o medir la actividad del sistema nervioso central o periférico. Las Interfaces Cerebro-Computadora pertenecen a una subcategoría especial de estos dispositivos y proporcionan un canal de salida artificial del sistema nervioso central (*Ver Figura 1.1*). A diferencia de otras Interfaces Hombre-Máquina, las cuales requieren actividad muscular, una BCI proporciona comunicación “No muscular”. (Bernhard Graimann, 2011)



**Figura 1.1** Clasificación de las Interfaces Cerebro-Computadoras.

(tomada de Bernhard Graimann, 2011)

### 1.1.3. Principio de funcionamiento

El principio de funcionamiento básico de una BCI es medir la actividad cerebral, procesarla para obtener las características de interés de la señal y una vez obtenidas, usarlas para interactuar con el entorno. Es importante señalar que este dispositivo utiliza para su funcionamiento únicamente información obtenida del sistema nervioso central, es decir, actividad únicamente de tipo cerebral. Por tanto quedan excluidas todas la interfaces que utilicen de forma implícita o explícita información eléctrica resultante del movimiento muscular.

Una BCI regularmente está basada en la *Electroencefalografía (EEG)*, que es una técnica para medir la actividad eléctrica cerebral y se utiliza de forma clínica para estudiar la tipología de ondas en zonas del cerebro en detección de patologías; así también tiene una gran resolución temporal, fácil uso y portabilidad. (Minguez, 2003)

## **1.2. Características y funcionamiento**

### **1.2.1. Características**

Para que una Interfaz Cerebro-Computadora sea considerada como tal, debe cumplir con 3 características básicas:

1. Registrar actividad cerebral (Invasivo o No invasivo).
2. Proveer retroalimentación al usuario en tiempo real.
3. Basarse en el control intencional.

Esto significa que el usuario debe elegir entre realizar una tarea mental cada vez que quiera lograr un objetivo con la BCI. También es importante mencionar que NO son consideradas Interfaces Cerebro-Computadora, aquellos dispositivos que solo pasivamente detectan cambios en la actividad cerebral, es decir, sin ninguna intención. Por ejemplo, la actividad EEG que se encuentra asociada con la carga de trabajo, excitación o sueño. (*Bernhard Graimann, 2011*)

### **1.2.2. Funcionamiento**

Una BCI mide la actividad cerebral, la procesa y produce señales de control que reflejan la intención del usuario. Para comprender mejor como funciona una interfaz de este tipo, primero se debe conocer cómo la actividad cerebral puede ser medida y cuáles son las señales que pueden ser utilizadas. (*Bernhard Graimann, 2011*)

La *actividad cerebral* es el trabajo funcional correspondiente al conjunto de neuronas del sistema nervioso central localizadas en el cerebro, produciendo señales eléctricas y magnéticas. (*Minguez, 2003*)

La mayoría de las BCI se basan en medidas eléctricas generadas por la actividad cerebral, y usualmente utilizan electrodos que son colocados sobre el cuero cabelludo de una persona para detectar diferencias de potencial eléctrico, este método de exploración neurofisiológico se llama *Electroencefalografía (EEG)*.

La electroencefalografía (EEG) es susceptible a los denominados *artefactos*, es decir, la actividad bioeléctrica causada por el movimiento de ojos, lengua, boca, músculos del cuerpo, etc. Las fuentes electromagnéticas externas también pueden alterar las lecturas de un electroencefalograma. Para lograr una adecuada calidad en la señal, las zonas de la piel que están en contacto con los electrodos deben prepararse cuidadosamente con un gel conductor, se conocen como electrodos húmedos.

Para eliminar el uso de electrodos húmedos, existen empresas que ya se están dedicando a la investigación de electrodos secos para crear una solución más práctica al momento de hacer un electroencefalograma.

Las principales dificultades de la obtención de información de la actividad cerebral son:

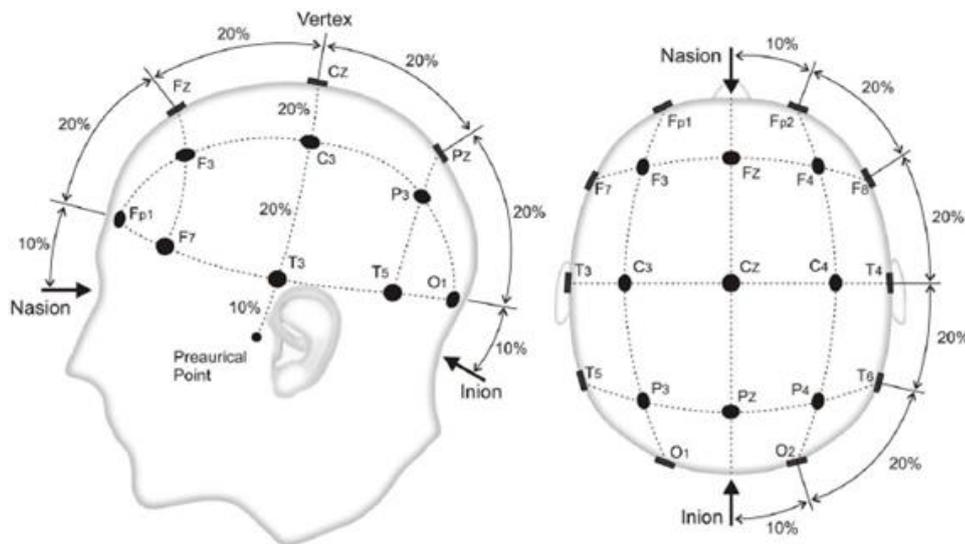
- ⊕ Los procesos cerebrales a decodificar pueden verse afectados o incluso eliminados por la actividad de los artefactos (Movimiento de ojos, lengua, boca, músculos del cuerpo, etc.)
- ⊕ La actividad cerebral medida tiene una naturaleza no estacionaria, lo que hace que varíe en el tiempo para una misma persona durante el uso de la BCI y entre diferentes sesiones.
- ⊕ Todas las personas tienen una actividad cerebral diferente en los dominios temporales, frecuenciales y espaciales.

Por otro lado, una BCI analiza el comportamiento de patrones que se originan en áreas específicas del cerebro, y para obtener registros consistentes de ciertas regiones específicas de la cabeza, los científicos se basan en un sistema estándar para la colocación exacta de electrodos llamado *Sistema Internacional 10-20*.

El sistema internacional 10-20 es ampliamente utilizado en aplicaciones médicas y en la investigación referente a Interfaces Cerebro-Computadora. El nombre de 10-20 indica que los electrodos más frecuentemente utilizados están colocados 10, 20, 20, 20, 20, y 10% del total de la distancia de Nasión-Inión. Los otros electrodos se colocan a distancias similares fraccionadas.

Las etiquetas de las posiciones de los electrodos suelen ser también las etiquetas de los canales grabados, es decir, si se coloca un electrodo en el sitio de C3, la señal grabada a partir de este electrodo típicamente también se denota como C3. Las primeras letras de las etiquetas dan una pista de la región del cerebro sobre el que se encuentra el electrodo. Por ejemplo, Fp – pre frontal, F - frontal, C - central, P - parietal, O - occipital, T - temporal.

En los siguientes esquemas se muestra la colocación de los electrodos de acuerdo con el Sistema Internacional 10-20.

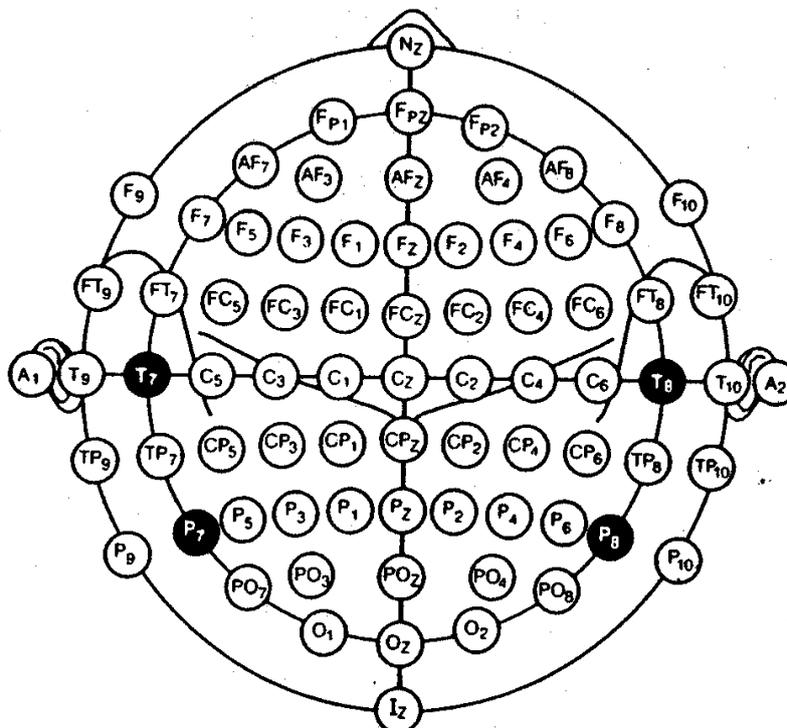


**Figura 1.2** Sistema Internacional 10-20.  
(Lado izquierdo y vista aérea de la cabeza)

(tomada de Bernhard Graimann, 2011)

En la *figura 1.2* se muestra el Sistema Internacional 10-20 original que incluye únicamente 19 electrodos. El *Nasion* es la intersección del hueso frontal y nasal en el puente de la nariz. El *Inión* es una pequeña protuberancia en la parte posterior del cráneo, justo encima del cuello. (Bernhard Graimann, 2011)

Posteriormente, se propuso un nuevo estándar al Sistema Internacional 10-20 (Ver figura 1.3) para poder monitorear 70 electrodos. En esta modificación se renombraron 4 electrodos (marcados en la figura) los nombres originales fueron: T3, T5, T4 y T6; cambiándose por T7, P7, T8 y P8 respectivamente. Estos últimos, regularmente son utilizados como canales de referencia.



**Figura 1.3** Sistema Internacional 10-20 modificado.  
(tomada de Gerwin Schalk, 2010)

La Interfaz Cerebro-Computadora que se utilizará en este proyecto está basada en el Sistema Internacional 10-20 modificado, se describirán posteriormente las zonas cerebrales que permite monitorear.

### **1.3. Métodos de adquisición**

Existen 2 métodos principales para la adquisición de señales cerebrales: *Invasivo* y *No invasivo*.

La elección del método de adquisición tiene consecuencias importantes de usabilidad, ética, diseño del sistema y calidad de la señal, a continuación se describe en qué consiste cada uno de ellos.

#### **1.3.1.No invasivo**

Este método consiste en colocar una serie de electrodos de tal forma que no se realiza una intrusión sobre el cerebro o cuerpo humano. Es la forma más utilizada debido a que no es necesario algún tipo de cirugía.

En la sección anterior se describió la exploración neurofisiológica llamada electroencefalografía (EEG), esta técnica pertenece al método no invasivo, y es la más utilizada en los sistemas BCI debido a que el equipo requerido es barato, ligero, y relativamente fácil de aplicar. (*Bernhard Graimann, 2011*)

Existen otros tipos de técnicas no invasivas que se han utilizado en sistemas BCI, a continuación se muestra un cuadro comparativo con las ventajas y desventajas de las mismas. (*Ver figura 1.4*)

Técnica	Propiedad física	Mecanismo de medición	Ventajas	Desventajas
<b>Electroencefalografía (EEG)</b>	Potencial eléctrico	Los electrodos se colocan cuidadosamente en el cuero cabelludo con el fin de medir el potencial eléctrico (5 – 100 $\mu$ V) generado por la actividad neuronal en el cerebro.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Portable y fácil de usar</li> <li>• Alta resolución temporal (diez o cientos de milisegundos)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Baja resolución espacial debido al ruido añadido cuando las señales se mueven a través del líquido, el hueso y la piel</li> <li>• Requiere una cuidadosa colocación de electrodos directamente sobre el cuero cabelludo</li> </ul>
<b>Magneto-encefalografía (MEG)</b>	Potencial magnético	Mide los campos magnéticos generados por la actividad eléctrica del cerebro.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• MEG permite obtener imágenes mucho más profundas y es mucho más sensible que el EEG, desde el cráneo es casi totalmente transparente a las ondas magnéticas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Requiere equipo voluminoso y costoso</li> </ul>
<b>Tomografía por emisión de positrones (PET)</b>	Flujo de sangre	Detecta la actividad química de trazadores radioactivos inyectados mediante la medición de las emisiones de rayos gamma.		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Equipo voluminoso y costoso</li> <li>• No es apropiado para uso continuo debido a la necesidad de inyectar sustancias radiactivas</li> </ul>
<b>Tomografía Computarizada por Emisión de Fotones Individuales (SPECT)</b>	Flujo de sangre	Funciona como PET, excepto que utiliza tubos fotomultiplicadores para medir fotones generados por rayos gamma.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Un poco menos costoso que el PET</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Más baja resolución temporal y espacial que PET</li> <li>• Equipo voluminoso y costoso</li> <li>• No es apropiado para uso continuo debido a la necesidad de inyectar sustancias radiactivas</li> </ul>
<b>Imagen por resonancia magnética funcional (fMRI)</b>	Flujo de sangre	Mide las propiedades magnéticas de la sangre para determinar la disminución de desoxihemoglobina (hemoglobina desoxigenada) en las regiones cerebrales activas (el aumento del flujo sanguíneo en estas regiones no está acompañado por un aumento proporcional en el consumo de oxígeno).	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alta resolución espacial (~1mm-1cm)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Baja resolución temporal (5-8 segundos) porque la afluencia de la sangre no es un fenómeno inmediato</li> <li>• Equipo voluminoso y costoso debido a la necesidad de imanes superconductores</li> </ul>
<b>Espectroscopia de Infrarrojo Cercano (fNIR)</b>	Flujo de sangre, cambios en el tejido cortical	Mide la absorción y dispersión de la luz de infrarrojo cercano dirigida hacia el cerebro para determinar los cambios en la oxigenación de los tejidos (respuesta lenta), así como cambios en las membranas neuronales durante el disparo de las neuronas (rápida respuesta).	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alta resolución espacial (&lt;1 cm).</li> <li>• La similitud con fMRI permite la transferencia de conocimientos</li> <li>• Equipo barato</li> <li>• Portátil y fácil de usar</li> <li>• No requiere gran cantidad de conocimientos para configurar</li> <li>• Luz No Ionizante, la cual es segura para un uso prolongado</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Baja resolución temporal (5-8 segundos) cuando se utilizan mediciones de respuesta lentas</li> </ul>

**Figura 1.4** Tabla de técnicas No invasivas

### 1.3.2. Invasivo

El método invasivo requiere cirugía para implantar los sensores necesarios. Esta cirugía incluye la apertura del cráneo a través de un procedimiento quirúrgico llamado *craneotomía* y el corte de las membranas que cubren el cerebro.

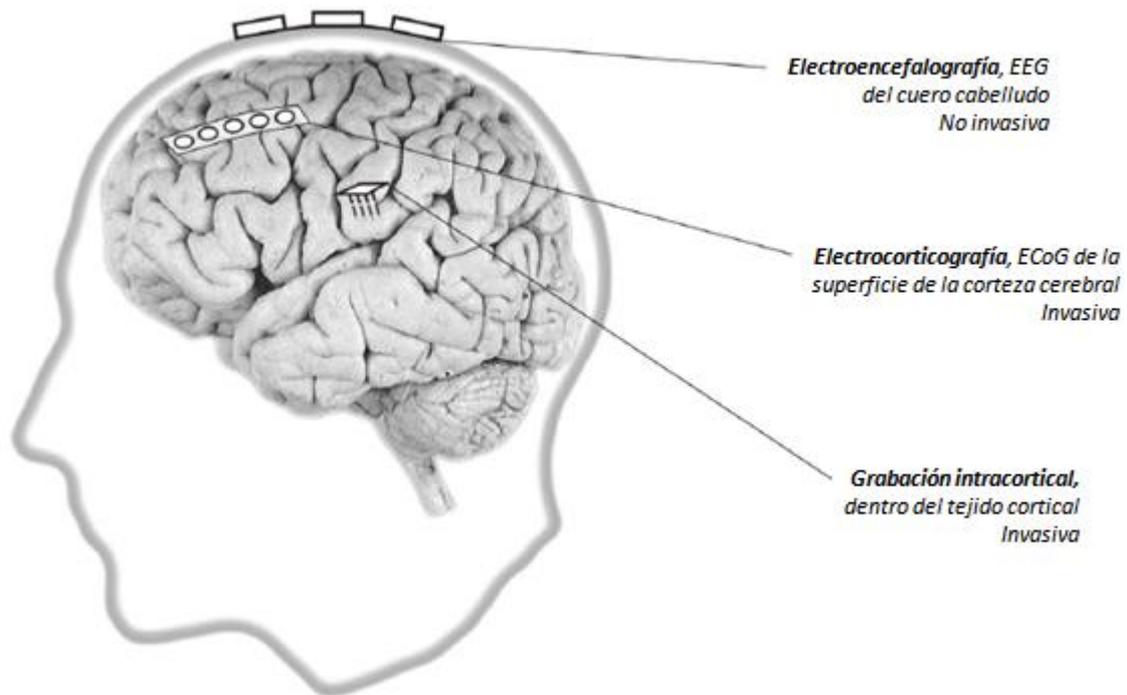
Entre los métodos invasivos, el más conocido se llama *Electrocorticografía (ECoG)* y consiste en colocar sensores sobre la superficie de la corteza cerebral. Este método no daña ninguna neurona debido a que ningún electrodo penetra el cerebro, así también registra la actividad integrada de un número mucho más grande de neuronas que se encuentran cerca de los electrodos ECoG.

Otro método es la *Grabación Intracortical*, que consiste en grabar una señal bioeléctrica a partir de electrodos que penetran el tejido cerebral; estos electrodos permiten registrar la actividad neuronal de una sola célula cerebral o conjuntos pequeños de células cerebrales, pero la implantación de estos dispositivos puede causar reacciones en el tejido y conducir al deterioro de la calidad de la señal o incluso un mal funcionamiento en los electrodos.

Las técnicas invasivas combinan excelente calidad en la señal, muy buena resolución espacial, y un alto rango de frecuencia. Además, los artefactos no son problema en este tipo de técnicas. Sin embargo, existen desventajas, tal como el grave inconveniente de que requiere cirugía; implica riesgos y es costoso.

La investigación relativa a BCI invasivas es difícil debido a razones éticas, algunos esfuerzos de investigación se basan en pacientes que se someten a la neurocirugía por otras razones, tales como el tratamiento de la epilepsia. Los estudios realizados con estos pacientes pueden ser únicamente de tipo informativo, ya que es imposible estudiar los efectos de entrenamiento y el uso a largo plazo ya que estos pacientes suelen tener un sistema de ECoG por sólo unos pocos días antes de ser retirado.

La *figura 1.5* resume los diferentes métodos para registrar la actividad bioeléctrica cerebral. (Bernhard Graimann, 2011)



**Figura 1.5** Tres formas diferentes para detectar la actividad cerebral.

(tomada y modificada de Bernhard Graimann, 2011)

#### **1.4. Estrategias mentales y patrones cerebrales**

La medición de la actividad cerebral es el primer paso fundamental para la comunicación Cerebro-Computadora. Sin embargo, no es suficiente porque una BCI no puede leer la mente o descifrar pensamientos en general, sólo puede detectar y clasificar patrones específicos de la actividad cerebral en curso, los cuales están asociados con tareas específicas o eventos. Lo que el usuario tiene que hacer para producir estos patrones se determina por medio de la *estrategia mental* (también llamada *estrategia experimental o enfoque*).

La *estrategia mental* es la base de toda comunicación entre cerebro y computadora, determina lo que el usuario tiene que hacer para producir voluntariamente patrones cerebrales que la BCI pueda interpretar. También establece ciertas restricciones en el hardware y software de un BCI, tales como las técnicas de procesamiento de señales.

Las estrategias mentales más comunes son *Atención selectiva e Imaginación motora*, a continuación se explican brevemente.

### **1.4.1. Atención Selectiva o Potenciales Evocados**

Una BCI basada en *Atención selectiva o Potenciales evocados*, funciona por medio de potenciales que se generan en el cerebro provocados por trenes de estímulos internos o externos. Su naturaleza es una respuesta cerebral evocada o relacionada con eventos que pueden ser visuales, auditivos o somatosensoriales (estimulaciones táctiles).

La mayoría de las BCI están basadas en estímulos visuales, pero también los estímulos pueden ser diferentes tonos, diferentes estimulaciones táctiles, o luces parpadeantes con diferentes frecuencias. En una configuración típica de una BCI, cada estímulo está asociado con un comando que controla una aplicación y para seleccionar un comando, el usuario tiene que enfocar su atención al estímulo correspondiente.

El funcionamiento general consiste en que el usuario centra su atención en una opción concreta, entonces, un fenómeno de estimulación revisa todas las opciones, y cuando la opción deseada es estimulada, se produce el potencial evocado asociado al evento concreto. En paralelo, las herramientas de señal trabajan para detectar en línea este potencial y así deducir la opción en la que el usuario está concentrado. A estas interfaces se les denomina *síncronas* porque el usuario está sincronizado con la BCI, dado que es la interfaz la que presenta los estímulos a la persona.

Existen 2 tipos diferentes de potenciales evocados que dependen de estímulos, estrategias mentales y procesamiento de señales: el primero se refiere a *Potenciales P300* y el segundo se llama *Potenciales Evocados Visuales de Estado Estable (Steady-State Visual Evoked Potentials SSVEP)*.

Una BCI basada en *Potenciales P300* puede depender de un estímulo visual, auditivo o somatosensorial, infrecuente o particularmente significativo, combinado con un estímulo frecuente o rutinario, típicamente evoca un pico positivo cercano a los 300 ms sobre la corteza parietal en el EEG, de ahí su nombre del P300, un potencial positivo aproximadamente en el milisegundo 300. Los estímulos que frecuentemente se utilizan son letras, pero pueden ser símbolos que representen otros objetivos, tales como controlar un cursor, un brazo robótico o un robot móvil.

Una BCI basada en *SSVEP* requiere un número de estímulos visuales, cada estímulo está asociado con un comando específico, el cual a su vez está asociado con una salida de la BCI. Los estímulos utilizados parpadean continuamente con diferentes frecuencias en el intervalo de 6 a 30 Hz aproximadamente. Cuando el usuario pone atención a uno de los estímulos parpadeantes se provoca una *SSVEP* en la corteza visual que tiene la misma frecuencia que el objetivo de parpadeo, es decir, si el estímulo objetivo parpadea a 16 Hz, la *SSVEP* resultante también parpadeará a 16 Hz. Por lo tanto, una BCI basada en esta estrategia mental puede determinar qué estímulo ocupa la atención del usuario mediante la búsqueda de actividad *SSVEP* en la corteza visual a una frecuencia específica. La BCI conoce las frecuencias de parpadeo de todas las fuentes de luz, y cuando se detecta un *SSVEP*, se puede determinar la fuente de luz y su correspondiente comando asociado.

Una de las grandes ventajas que tiene el uso de potenciales evocados es que el usuario no requiere un entrenamiento previo, lo cual le brinda al sistema una mayor flexibilidad en su uso y abre las puertas para que un sin número de personas que requieran su uso no tengan que invertir tiempo para realizar extensas jornadas de entrenamiento. (Minguez, 2003)

### **1.4.2. Imaginación motora**

Existen Interfaces Cerebro-Computadora que se basan en la imaginación motora (*Motor Imagery*), muchos estudios en neuroimagen funcional han demostrado que la imaginación del movimiento está relacionada con la activación de los circuitos neuronales involucrados en fases previas del control motor.

El funcionamiento general de esta estrategia mental consiste en que el usuario se concentra imaginándose el movimiento de una de sus extremidades, por ejemplo, el pie derecho. Este pensamiento crea una actividad en la corteza motora en la zona relacionada con el pie, que se refleja en una desincronización del electroencefalograma en esa zona y las herramientas de procesamiento de señal detectan esa desincronización, la cual se interpreta como una entrada binaria al sistema.

Otro tipo de BCI está basado en tareas mentales, consiste en que el usuario se concentra en alguna de las tareas mentales predefinidas relacionadas con el lenguaje, el cálculo, la rotación de figuras complejas, etc. Estas tareas activan unas áreas específicas que se pueden identificar aplicando filtros espaciales a la señal, y con ello, deducir la intención del usuario. Se denominan *asíncronas* dado que el usuario puede decidir cuándo enviar un comando a voluntad (de forma asíncrona para el sistema).

Esta estrategia mental es prácticamente una modulación voluntaria de la actividad cerebral, la cual genera unos patrones de actividad conocidos o que se pueden medir y distinguir de todo el conjunto de señales mostradas en un electroencefalograma.

Las BCI que utilizan imaginación motora no dependen de estímulos externos. No obstante, es una habilidad que debe ser aprendida y frecuentemente no funciona muy bien en la primera sesión de entrenamiento. Por lo tanto, un entrenamiento frecuente es importante para lograr suficiente control sobre la Interfaz Cerebro-Computadora. *(Minguez, 2003)*

La BCI que se utiliza en este proyecto hace uso de la imaginación motora pero utilizando tareas mentales para la ejecución de ciertas acciones sobre una aplicación o un sistema.

## **1.5. Comparación de Interfaces Cerebro-Computadora comerciales**

Actualmente existen en el mercado diferentes tipos de Interfaces Cerebro-Computadora con características y funciones muy particulares pero con el mismo objetivo, interactuar con alguna aplicación mediante comandos generados a través de señales eléctricas. A continuación se presenta una tabla comparativa de las principales Interfaces Cerebro-Computadora comerciales. *(Ver figura 1.6)*

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN A INTERFACES CEREBRO-COMPUTADORA (BCI)

Nombre comercial	Descripción (según su fabricante)	Características	Número de electrodos	Requerimientos del sistema	Precio	Fecha de lanzamiento	Fabricante
<b>Minset</b>	El Mindset detecta datos EEG de ondas cerebrales para poder alimentar la innovación de investigadores de laboratorio y desarrolladores de aplicaciones como ningún otro dispositivo EEG lo ha hecho en el mundo.	<ul style="list-style-type: none"> <li>⊕ Señal EEG RAW (3-100 Hz)</li> <li>⊕ Atención</li> <li>⊕ Meditación</li> <li>⊕ Detección de apertura y cierre de ojos</li> <li>⊕ Neurociencia bandas de frecuencia: 3 a 50Hz</li> </ul>	1 electrodo	<p><b>PC</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Windows XP, Vista y 7</li> <li>• Procesador Intel Core 2 Duo o equivalente</li> <li>• 1 GB de RAM DirectX 9.0</li> <li>• 1 GB de espacio en disco duro</li> </ul> <p><b>MAC</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mac OS X 10.6.7 "Leopard"</li> <li>• Cualquier procesador Intel Mac</li> <li>• 1 GB de RAM</li> <li>• 1 GB de espacio en disco duro</li> </ul>	\$199.00 USD	Marzo 2007	NeuroSky
<b>Neural Impulse Actuator (NIA)</b>	El NIA PC GameController libera las manos de los controles de juego comúnmente utilizados para experimentar una inmersión verdadera en el juego mediante la traducción de las expresiones faciales, los movimientos oculares y la actividad de las ondas cerebrales concentrada en el teclado de juegos de PC y los controles del ratón.	<ul style="list-style-type: none"> <li>⊕ Medición de 2 ondas cerebrales (Alfa y beta)</li> <li>⊕ Detección de expresiones faciales</li> <li>⊕ Detección de movimientos oculares</li> </ul>	1 electrodo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Windows XP, Vista o 7 (32/64-bit)</li> <li>• 1 GHz CPU</li> <li>• 1 GB de memoria</li> </ul>	\$90.00 USD	Mayo 2008	OCZ Technology
<b>Emotiv EPOC</b>	En base a los últimos avances en neuro-tecnología, Emotiv ha desarrollado una revolucionaria nueva interfaz personal de interacción persona-ordenador. El Emotiv EPOC es un neuroheadset inalámbrico de alta resolución, con neuro-adquisición de señal y procesamiento. Se utiliza un conjunto de sensores para sintonizar las señales eléctricas producidas por el cerebro para detectar pensamientos, sentimientos y expresiones de los jugadores y se conecta de forma inalámbrica a la mayoría de los PC.	<ul style="list-style-type: none"> <li>⊕ 4 estados mentales (sobre la base de las ondas cerebrales)</li> <li>⊕ 13 pensamientos conscientes</li> <li>⊕ Detección de expresiones faciales</li> <li>⊕ Movimientos de la cabeza (detectado por 2 giroscopios)</li> </ul>	14 electrodos	<p><b>PC</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 2,4 GHz Intel Pentium 4 (o equivalente).</li> <li>• Microsoft Windows XP con Service Pack 2, Windows Vista o Windows 7.</li> <li>• 1 GB de RAM.</li> <li>• 50 MB de espacio disponible en disco.</li> <li>• Puerto USB 2.0</li> </ul> <p><b>MAC</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• MAC OS X (10.5.x, 10.6.x, 10.7.x)</li> <li>• Macintosh basado en Intel</li> <li>• Disco duro con 500 MB disponibles</li> </ul>	\$299.00 USD	Diciembre 2009	Emotiv Systems

Nombre comercial	Descripción (según su fabricante)	Características	Número de electrodos	Requerimientos del sistema	Precio	Fecha de lanzamiento	Fabricante
<b>XWaveheadset</b>	XWaveLogger software para PC le permite ver, grabar, reproducir y exportar su atención, la meditación y las amplitudes de datos de 8 bandas de EEG. Los datos pueden verse en un gráfico 2D con respecto al tiempo y en un gráfico 3D donde 3 parámetros se pueden representar uno contra el otro. Cada sesión grabada se puede exportar a formato Excel y CSV para su posterior procesamiento y análisis.  Con el Sport XWave, puede registrar su actividad cerebral en las actividades más físicamente exigentes donde la vibración y el movimiento están presentes. XWaveLogger conecta con Sport XWave a través de un simple enchufe y la conexión Bluetooth juego.	<ul style="list-style-type: none"> <li>✦ 8 bandas de EEG</li> </ul>	1 electrodo	Windows XP o sistemas operativos posteriores	\$99.00 USD	Enero 2011	XWave
<b>MindWave</b>	TheMindWave mide de forma segura las señales cerebrales para controlar los niveles de atención de los estudiantes a medida que interactúan con aplicaciones de reconocimiento de las matemáticas, la memoria y el patrón. Diez aplicaciones se incluyen con experiencias que van desde la diversión y entretenimiento a la educación en serio.	<ul style="list-style-type: none"> <li>✦ Meditación</li> <li>✦ Parpadeo de ojos</li> <li>✦ Neurociencia bandas de frecuencia: 0,5 a 50Hz</li> </ul>	1 electrodo	<b>PC</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>✦ Windows XP, Vista y 7</li> <li>✦ Procesador Intel Core 2 Duo o equivalente</li> <li>✦ 1 GB de RAM</li> <li>✦ DirectX 9.0</li> <li>✦ 1 GB de espacio en disco duro</li> </ul> <b>MAC</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>✦ Mac OS X 10.6.7 "Leopard"</li> <li>✦ Cualquier procesador Intel Mac</li> <li>✦ 1 GB de RAM</li> <li>✦ 1 GB de espacio en disco duro</li> </ul>	\$99.00 USD	Marzo 2011	NeuroSky
<b>BrainBand MyndPlay</b>	El BrainBand MyndPlay Bluetooth accionado por B3 y NeuroSky permite controlar películas, juegos, aplicaciones de entrenamiento deportivo y mucho más usando sólo su mente.  El BrainBand MyndPlay ha sido diseñado para el contacto constante y comodidad, así como para ofrecer la opción de personalizar, la unidad desmontable B3 comprime la revolucionaria tecnología EEG NeuroSky en una pequeña unidad ligera que se sienta cómodamente en el interior del BrainBand con 2 puntos de contacto seco del sensor y un gancho de oreja. La unidad puede ser removida y colocarse en el interior de una visera, una gorra o un auricular.	<ul style="list-style-type: none"> <li>✦ Procesamiento y salida de los espectros de potencia del EEG</li> <li>✦ Medición de atención, meditación, detección de parpadeo</li> </ul>	2 electrodos	<b>PC</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>✦ Windows Xp, Vista, Win7</li> </ul> <b>MAC</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>✦ Mac OS 10.5</li> </ul>	£129.00	Diciembre 2011	MyndPlay

Figura 1.6 Tabla comparativa de BCI comerciales.

## 1.6. Emotiv EPOC Neuroheadset

La Interfaz Cerebro-Computadora comercial que se utiliza para la adquisición de información cerebral en este proyecto se llama *Emotiv EPOC Neuroheadset* (Ver figura 1.7).

Este producto es fabricado por *Emotiv Systems*, una empresa de electrónica Australiana fundada por la emprendedora tecnológica Tan Le en el año 2003. La compañía se dedica al desarrollo de Interfaces Cerebro-Computadora basadas en electroencefalografía (EEG). (*Systems, 2012*)

Emotiv EPOC Neuroheadset es un dispositivo que fue diseñado con el objetivo de hacer que los juegos de PC u otras plataformas sean controlados a través de ondas cerebrales y expresiones faciales de un jugador. A pesar de no tener el éxito esperado por sus fabricantes en el área de los videojuegos, varios usuarios lo han utilizado para hacer pruebas en diferentes áreas de la tecnología, y así buscar nuevas alternativas de uso. En este caso, por ejemplo, se utiliza en el área de la robótica.



**Figura 1.7** Emotiv EPOC Neuroheadset.

(tomada de *Systems, 2012*)

### 1.6.1. Características

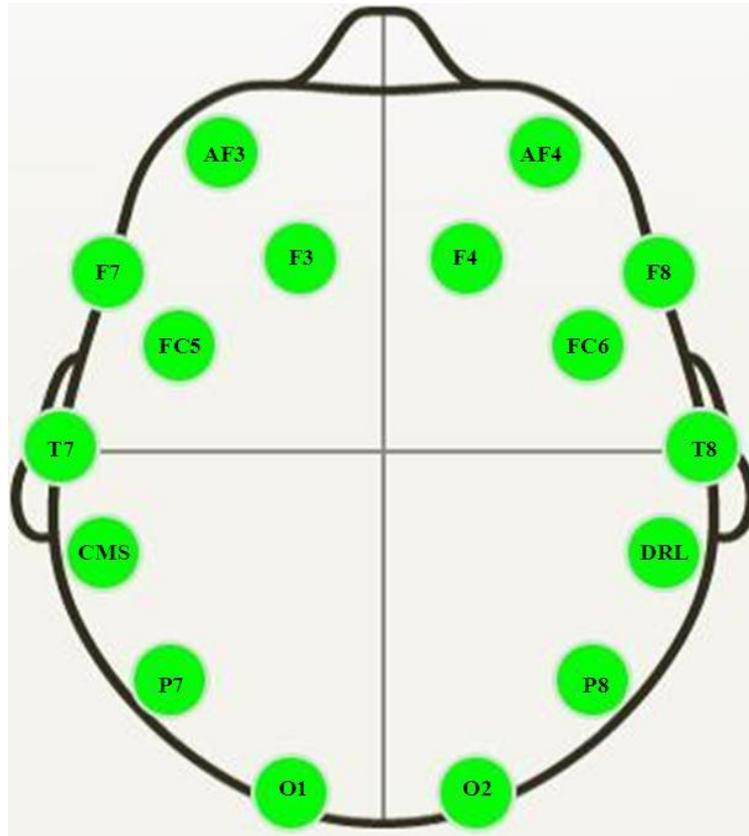
A continuación se mencionan las principales características con las que cuenta el producto Emotiv EPOC Neuroheadset:

- ✦ Es una BCI basada en el Sistema Internacional 10-20 modificado.
- ✦ Tiene 14 canales de contacto (más 2 referencias identificadas como CMS/DRL y localizadas en la posición P3/P4) identificados como: AF3, F7, F3, FC5, T7, P7, O1, O2, P8, T8, FC6, F4, F8, AF4.
- ✦ Cuenta con un giroscopio compuesto por 2 acelerómetros que facilitan información sobre los movimientos que el usuario realiza con su cabeza.
- ✦ Tiene un transmisor inalámbrico mediante el cual se mantiene el enlace con el receptor USB que se conecta a la PC.
- ✦ Viene acompañado de un *Kit de desarrollo Emotiv* conformado por un SDK, herramientas de software y documentación referente al producto de Emotiv.

Este dispositivo cuenta con 3 modalidades de detección: cognitiva, afectiva y expresiva, identificadas por su fabricante con los siguientes nombres:

- ✦ *Cognitiv Suite (Cognitiva)*: Permite detectar 13 tipos de movimientos de una figura geométrica (cubo de Emotiv): 6 direcciones (izquierda, derecha, arriba, abajo, empujar, jalar/zoom), 6 rotaciones (sentido horario y antihorario, rotación a la izquierda y derecha, rotación hacia adelante y atrás), y uno adicional de visualización (“desaparecer”).
- ✦ *Affectiv Suite (Afectiva o emocional)*: Permite detectar 4 tipos de emociones que está experimentando el usuario en ese momento: “Emoción o excitación”, “Aburrimiento”, “Meditación” y “Frustración”.
- ✦ *Expressiv Suite (Expresiones faciales)*: Permite detectar algunas expresiones faciales que realiza el usuario, por ejemplo: movimiento de cejas, parpadeos, movimiento en ojos, apretar dientes, sonrisa, etc.

Emotiv EPOC Neuroheadset está basada en el Sistema Internacional 10-20 modificado, utilizando 14 canales de contacto, en el siguiente esquema se identifica cada uno de ellos (*Ver figura 1.8*).



**Figura 1.8** Configuración de Emotiv EPOC Neuroheadset de acuerdo al Sistema Internacional 10-20 modificado.

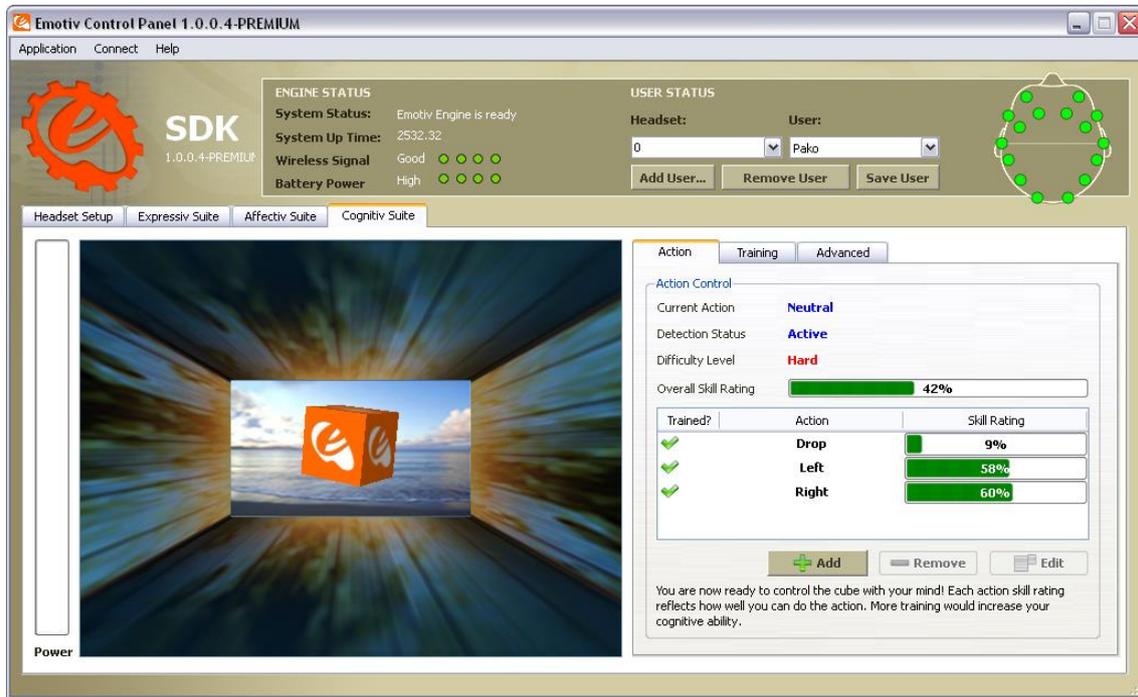
Canales de referencia:

*CMS*: Common Mode Sense (Electrodo activo)

*DRL*: Driven Right Leg (Electrodo pasivo)

## 1.6.2. Panel de control Emotiv

Emotiv EPOC Neuroheadset viene acompañado de algunas herramientas de software para su funcionamiento. La principal y más utilizada se llama *Panel de control Emotiv* que consiste en un software que permite el acceso e interacción a diferentes funciones del dispositivo en cuestión. (Ver figura 1.9)



**Figura 1.9** Panel de control Emotiv.

Este panel consta de una sección superior en donde se puede visualizar el estado del sistema, el tiempo de conexión, la intensidad de la señal inalámbrica, el nivel de carga de la batería y la calidad de contacto de los electrodos. Además se puede seleccionar el dispositivo sobre el cual operar (se admiten hasta dos Emotiv EPOC Neuroheadset conectados simultáneamente) y gestionar los perfiles de entrenamiento.

En la sección izquierda del panel se muestran 4 pestañas:

- ✦ *Headset Setup*: Se visualiza la disposición de los electrodos y la calidad de la señal recibida desde cada uno de ellos.
- ✦ *Expressiv Suite*: Corresponde a la sección de configuración y visualización del modo expresivo del dispositivo.

- ✦ *Affectiv Suite*: Se refiere a la sección de configuración y visualización del modo afectivo del dispositivo.
- ✦ *Cognitiv Suite*: Muestra la sección de configuración y visualización del modo cognitivo del dispositivo.

Y por último, del lado derecho del panel se muestran los principales botones que permiten la configuración de parámetros para cada una de las distintas modalidades con las que cuenta Emotiv EPOC Neuroheadset. (*Systems, 2012*)

En la *figura 1.9* se ve que está seleccionada la modalidad cognitiva (*Cognitiv Suite*), la cual permitirá entrenar distintas tareas mentales a partir del movimiento de un cubo. De este modo, una tarea mental corresponde al movimiento intencionado que el usuario desea invocar sobre el cubo de Emotiv (6 direcciones, 6 rotaciones y “desaparición” del cubo).

Por ejemplo, en la *figura 1.10* se visualizan 3 tareas mentales (movimiento del cubo hacia la izquierda, hacia abajo y hacia la derecha).



*Izquierda*

*Abajo*

*Derecha*

**Figura 1.10** Tres tareas mentales sobre el cubo de Emotiv.

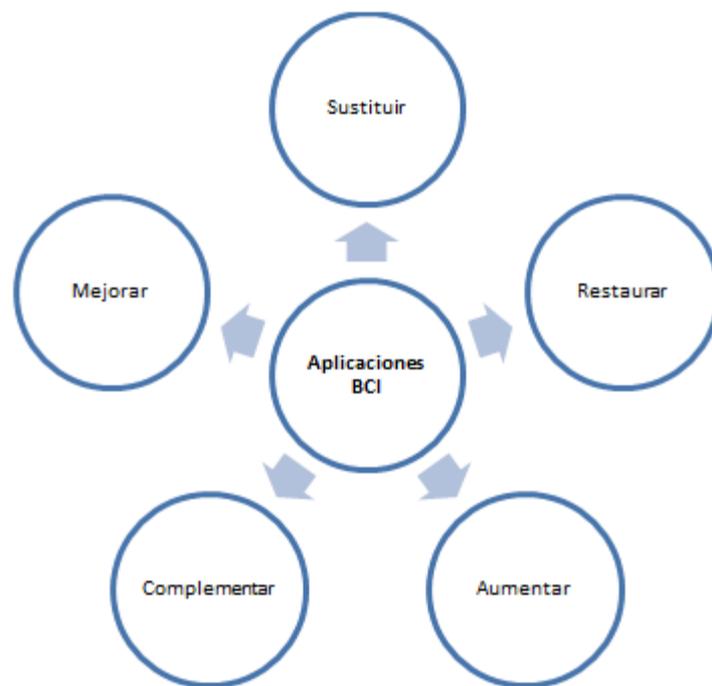
En capítulos posteriores, se hace mención nuevamente de las tareas mentales que deben ser entrenadas para que se logre controlar algún dispositivo robótico mediante una BCI.

## 1.7. Aplicaciones

Existen 5 tipos de aplicaciones que una salida de BCI podría controlar:

- 1) Una BCI podría *sustituir* una salida natural que se ha perdido como resultado de una lesión o enfermedad. Por ejemplo, una persona que ya no puede hablar puede usar una BCI para escribir palabras que luego son pronunciadas por un sintetizador de voz. O una persona que ha perdido el control de las extremidades puede usar una BCI para operar una silla de ruedas motorizada. En estos ejemplos, las salidas de una BCI reemplazan las salidas naturales perdidas.
- 2) Una BCI podría *restaurar* la pérdida de una salida natural. Por ejemplo, una persona con lesión de médula espinal, cuyos brazos y manos están paralizados podría usar una BCI para estimular los músculos paralizados a través de electrodos para que se muevan las extremidades. O una persona que ha perdido la función de la vejiga debido a la esclerosis múltiple podría utilizar un BCI para estimular los nervios periféricos que controlan la vejiga, permitiendo así la micción. En estos ejemplos, las salidas de BCI restauran las salidas naturales.
- 3) Una BCI podría *aumentar* una salida natural del sistema nervioso central. Por ejemplo, una persona que realiza una tarea que requiere atención continua durante un período prolongado (por ejemplo, conduciendo un vehículo) podría usar un BCI para detectar fallas en la actividad del cerebro referente a la atención y, así proporcionar una nueva salida (por ejemplo, un sonido) que alerte a la persona y enfoque su atención nuevamente sobre lo que está realizando. Al impedir que lapsos de fallo en la atención perjudiquen periódicamente una salida natural se podrían evitar accidentes de tráfico.
- 4) Una BCI podría *complementar* una salida natural del sistema nervioso central. Por ejemplo, una persona que está controlando la posición del cursor de una computadora con un joystick puede usar una BCI para seleccionar los elementos que el cursor alcanza. O una persona puede usar una BCI para controlar un tercer brazo robótico. En estos casos, se complementa una salida natural neuromuscular con una salida adicional y la cual es artificial.

5) Una BCI posiblemente podría **mejorar** una salida natural del sistema nervioso central. Por ejemplo, una persona cuyos movimientos de brazo han sido afectados por un derrame cerebral que implica la corteza sensitivomotora podría usar una BCI que mide las señales de las áreas corticales dañadas y, a continuación estimular los músculos o controlar un dispositivo ortótico (dispositivo que permite reforzar, parcial o totalmente, alguna función del cuerpo) para mejorar los movimientos del brazo. Debido a que esta aplicación BCI permite movimientos más normales, su uso repetido puede inducir la actividad dependiente de la salida del sistema central nervioso y por lo tanto ayuda a la persona a recuperar el control del brazo de una forma más normal. (He, 2013)



**Figura 1.11** Aplicaciones BCI.

## **1.8. Conclusiones del capítulo**

En este primer capítulo se presentó la definición, las características, la funcionalidad y las principales aplicaciones de una Interfaz Cerebro-Computadora, y se describió como un dispositivo permite al ser humano interactuar con un entorno real o virtual a través de comandos generados a partir de la actividad cerebral.

También se revisaron las diferentes estrategias mentales que son utilizadas por el usuario para generar patrones cerebrales voluntarios que una BCI es capaz de reconocer, y que pueden ser procesados para que se utilicen como comandos en el control de algún sistema, como en este caso, en la manipulación de un prototipo de prótesis de mano robótica.

En el siguiente capítulo se hará una breve introducción relacionada a prótesis robóticas para miembro superior. Se dará a conocer el funcionamiento y las características de este tipo de elementos artificiales que permiten reemplazar la pérdida de alguna extremidad. Y finalmente se describirá la unión de ambas tecnologías en un solo sistema que permita la manipulación y control de prótesis robóticas usando una Interfaz Cerebro-Computadora.

**CAPÍTULO 2**  
INTRODUCCIÓN A PRÓTESIS ROBÓTICAS  
PARA MIEMBRO SUPERIOR

## **2. INTRODUCCIÓN A PRÓTESIS ROBÓTICAS PARA MIEMBRO SUPERIOR**

El factor determinante que ha impulsado el desarrollo tecnológico de prótesis robóticas ha sido por la necesidad de uso, y por mejorar la calidad de vida de personas que han sufrido la pérdida o falta de algún miembro superior por consecuencia de accidentes, enfermedades o malformaciones.

La existencia de prótesis data de tiempos remotos. La primera prótesis de miembro superior funcional de la historia proviene del año 1504 d.C., y es una mano de acero utilizada por un caballero imperial llamado Götz von Berlichingen. Desafortunadamente, aún se desconoce su origen y el nombre del inventor que la diseñó. (*Historias con Historia, 2008*)

A través del tiempo se han diseñado y desarrollado diferentes prótesis de mano, y aunque todas realizan básicamente las mismas actividades, la principal diferencia entre ellas radica en el tipo de control que se emplea.

Para saber más acerca de este tema, a continuación se da a conocer la definición de una prótesis y cómo la robótica ha complementado estos elementos artificiales en la actualidad.

### **2.1. Prótesis robóticas para miembro superior**

#### **2.1.1. Definición**

Dentro del ámbito médico, una *prótesis* es un elemento desarrollado con el fin de mejorar o reemplazar una función, una parte o un miembro completo del cuerpo humano afectado. (*Dorador, 2004*)

Considerando lo anterior, se puede decir que una *prótesis robótica* es un elemento artificial dotado de cierta autonomía e inteligencia capaz de realizar las funciones de una parte faltante del cuerpo humano. Dicha autonomía e inteligencia se logra al integrar sensores, procesadores, actuadores y algoritmos de control.

De acuerdo a esta definición, las prótesis de uso cosmético quedan completamente excluidas. (Lisandro Puglisi, 2008)

Es importante mencionar que el desarrollo de prótesis involucra la necesidad de fusionar conocimientos de fisiología, ciencias biomédicas e ingeniería, con el objetivo de crear una prótesis que sea fiable para el usuario o paciente.

### **2.1.2. Características**

Una prótesis de miembro superior tiene por lo general 3 grados de libertad: se puede abrir y cerrar el gancho o la mano, se puede extender y retraer el codo, y con los modelos más sofisticados se puede rotar la muñeca. Aun así, estos movimientos sencillos requieren de entrenamiento, concentración y esfuerzo, lo cual resulta en un movimiento que no es fluido ni preciso. Esto contrasta con un brazo humano que tiene más de 25 grados de libertad y por lo tanto una mayor destreza.

Para obtener una prótesis que emule en buena forma la dinámica del miembro amputado, es necesario que el diseño satisfaga ciertas especificaciones o características, como son:

- ✦ *Tamaño y masa:* Las dimensiones de la prótesis deben ser similares a las del miembro que sustituye. Por otro lado, la masa debería ser igual o menor a la del miembro amputado para que el portador pueda manipularla con facilidad y no haga esfuerzos extraordinarios que puedan dañar los músculos que soportan la prótesis.
- ✦ *Velocidad y torque:* La prótesis debería ejecutar los movimientos con la cadencia y fuerza del miembro a sustituir.
- ✦ *Baterías:* La duración de la fuente de energía de una prótesis robótica debería permitir un funcionamiento de al menos 8 horas para que el usuario no tenga problemas de insuficiencia de energía durante las actividades diarias.

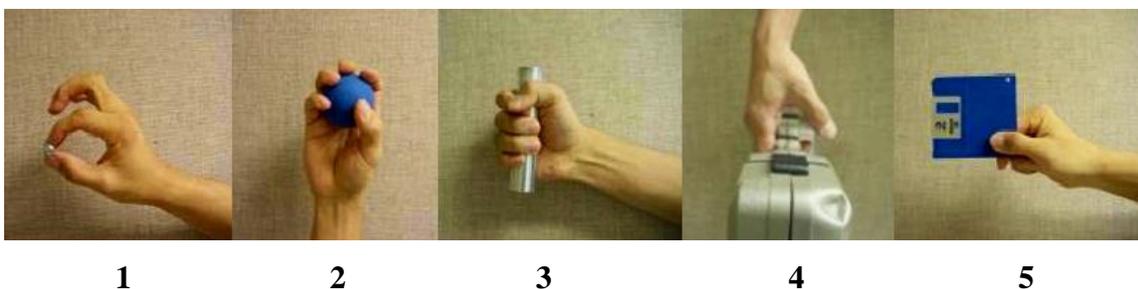
- ✚ *Retroalimentación al usuario:* La prótesis debería informar al usuario indicando que ha tenido contacto con el ambiente y también la intensidad del contacto. (Lisandro Puglisi, 2008)

### 2.1.3. Funcionamiento

La mano humana realiza principalmente dos funciones: la prensión y el tacto, las cuales permiten al hombre interactuar con su entorno. La capacidad de la mano depende totalmente del sentido del tacto, sin éste nos sería imposible medir la fuerza prensora. Cabe mencionar que el dedo pulgar representa el miembro más importante de la mano, sin éste la capacidad de la mano se reduce hasta en un 40 por ciento. (Dorador, 2004)

Los principales tipos de prensión de la mano son de suma importancia, porque permiten realizar las tareas básicas de la vida diaria, y por lo tanto una prótesis debería ser diseñada para llevarlos a cabo. Algunos autores mencionan los siguientes:

1. *Prensión en pinza fina*
2. *Prensión con la punta de los dedos*
2. *Prensión en puño, gruesa o en superficie*
3. *Prensión en gancho*
4. *Prensión en llave*



**Figura 2.1** Formas básicas de prensión de la mano.

(tomada de Dorador, 2004)

### 2.1.4. Clasificación

En este apartado se propone una clasificación de prótesis basada en la función que realizan, en los elementos que emplean para realizar su función y en la metodología empleada para su control. Dentro de las prótesis motoras, se puede hablar de prótesis de miembro superior (hombros, brazos y manos) y prótesis de miembros inferiores (cadera, piernas y pies); en este trabajo por el momento nos enfocaremos en las de miembro superior.

Las prótesis de miembro superior se clasifican en *activas* y *pasivas*:

- ✦ *Prótesis pasivas*: Están orientadas hacia la estética del paciente y sirven para restablecer el aspecto exterior (imagen corporal). También son conocidas como prótesis cosméticas.
  
- ✦ *Prótesis activas*: Son aquellas que emulan la funcionalidad del miembro perdido. Dentro de estas últimas se encuentran básicamente las prótesis *mecánicas, eléctricas, mioeléctricas e híbridas*. En seguida se hace una breve descripción de cada una de ellas.

#### 2.1.4.1. Prótesis mecánicas

Las manos mecánicas son dispositivos que se utilizan con la función de apertura o cierre voluntario por medio de un arnés el cual se sujeta alrededor de los hombros, parte del pecho y parte del brazo controlado por el usuario. Su funcionamiento se basa en la extensión de una liga por medio del arnés para su apertura o cierre. Estos elementos se recubren con un guante para dar una apariencia más estética, sin embargo se limita al agarre de objetos relativamente grandes y redondos ya que el guante estorba al querer sujetar objetos pequeños. (Dorador, 2004)

#### **2.1.4.2. Prótesis eléctricas**

Estas prótesis usan motores eléctricos en el dispositivo terminal, muñeca o codo con una batería recargable. Se controlan de varias formas, ya sea con un servocontrol, control con botón pulsador o botón con interruptor de arnés. En ciertas ocasiones se combinan éstas formas de control para su mejor funcionalidad. Se usa un socket que es un dispositivo intermedio entre la prótesis y el muñón logrando la suspensión de éste por succión. Es más costosa su adquisición y reparación, existiendo otras desventajas evidentes como son el cuidado a la exposición de un medio húmedo y el peso de la prótesis. (Dorador, 2004)

#### **2.1.4.3. Prótesis mioeléctricas**

Son aquellas prótesis controladas por medio de impulsos eléctricos generados al contraer los músculos. Estos dispositivos son hoy en día el tipo de miembro artificial con más alto grado de rehabilitación. Sintetizan el mejor aspecto estético, tienen gran fuerza y velocidad de prensión, así como muchas posibilidades de combinación y actualización con nuevos elementos.

El control mioeléctrico es probablemente el esquema de control más popular. Se basa en el concepto de que siempre que un músculo en el cuerpo se contrae o se flexiona, se produce una pequeña señal eléctrica (EMG) de 5 a 20  $\mu\text{V}$  que es creada por interacciones químicas en el cuerpo.

El uso de electrodos que entran en contacto con la superficie de la piel permite registrar la señal EMG. Una vez registrada, esta señal se amplifica y es procesada después por un controlador que conmuta los motores encendiéndolos y apagándolos para producir movimiento y funcionalidad en mano, muñeca o codo.

Este tipo de prótesis tiene la ventaja de que sólo requiere que el usuario flexione sus músculos para operarla, a diferencia de las prótesis accionadas por el cuerpo, que requieren el movimiento general del mismo. Una prótesis controlada en forma mioeléctrica también elimina el arnés de suspensión usando una de las dos siguientes técnicas de suspensión: bloqueo de tejidos blandos-esqueleto o succión.

Tienen como desventaja que usan un sistema de batería que requiere mantenimiento para su recarga, descarga, desecho y reemplazo eventual. Una prótesis accionada por electricidad proporciona un mayor nivel de tecnología, sin embargo es más costosa y tiende a ser más pesada que otras opciones protésicas debido al sistema de batería y de los motores eléctricos. *(Dorador, 2004)*

#### **2.1.4.4. Prótesis híbridas**

Una prótesis híbrida combina la acción del cuerpo con el accionamiento por electricidad en un solo dispositivo. En su gran mayoría, las prótesis híbridas sirven para individuos que tienen amputaciones o deficiencias transhumerales (arriba del codo). Las prótesis híbridas utilizan con frecuencia un codo accionado por el cuerpo y un dispositivo terminal controlado en forma mioeléctrica (gancho o mano). *(Dorador, 2004)*

## **2.2. Principales prótesis de miembro superior en el mercado comercial**

Actualmente existen diferentes empresas dedicadas a la fabricación de prótesis de miembro superior, cada una de ellas ofrece a sus clientes un diseño con características y funciones específicas con el fin de satisfacer las necesidades principales de las personas que hagan uso de éstas.

Como ejemplo, se presentan algunas empresas u organizaciones que desarrollan prótesis de miembro superior a nivel internacional.

### **2.2.1.Ottobock**

Es una empresa que se fundó en Berlín, Alemania en 1919 y ahora la dirige el Profesor Hans Georg Näge. Su página de internet la describe como una empresa dedicada a fabricar productos para personas con una movilidad restringida y como suministrador de productos y servicios tecnológicamente avanzados y de gran calidad. *(Ottobock, 2012)*

Uno de los principales productos de Ottobock es el *DynamicArm*:



**Figura 2.2** *DynamicArm* fabricado por Ottobock.

(tomada de Ottobock, 2012)

**Descripción:**

Ottobock describe al *DynamicArm*, como una prótesis transhumeral que tiene una articulación de codo eléctrica y la cual se adapta a distintas cargas, así como a la intensidad de las señales musculares. El fabricante afirma que es un dispositivo preciso y rápido que se controla con la fuerza muscular a través de mioelectrodos. Puede girar la muñeca, abrir y cerrar la mano, así como flexionar y extender el codo.

Ottobock también menciona que el *DynamicArm* puede transportar un peso de hasta 5 kg, es decir, cinco veces el peso de la prótesis. Por otro lado, la intensidad de las señales musculares regula de forma progresiva la velocidad de los movimientos.

Algunas características del producto que se mencionan en el sitio web son:

**Características:**

- Es preciso y rápido.
- El movimiento del brazo es prácticamente natural.
- Reacciona ante la carga de objetos pesados y es adaptable.

- Discreto gracias a su forma y su color.
- Apenas hace ruido, y en oscilación libre es totalmente silencioso.
- Unas cubiertas de silicona permiten amortiguar los ruidos al tocar objetos duros.
- Ajustable de manera individual.

### 2.2.2. Touch Bionics

Touch Bionics es una empresa escocesa que se describe como un proveedor de prótesis tecnológicas y de servicios de apoyo, diseñados para asegurar los mejores resultados posibles para las personas con deficiencias en las extremidades superiores. Sus principales productos son prótesis mioeléctricas de mano y soluciones protésicas de dedos. (*Touch Bionics, 2013*)

Su compromiso, según menciona el fabricante en su página web es ayudar a asegurar a sus pacientes y clientes para que tengan la mejor experiencia posible con sus productos mediante el apoyo de entrenamientos y una amplia gama de servicios clínicos.

El producto principal de Touch Bionics es *i-limb ultra revolution*:



**Figura 2.3** *i-limb ultra revolution* fabricado por Touch Bionics.

(tomada de Touch Bionics, 2013)

#### **Descripción:**

Touch Bionics describe a este producto como una prótesis de mano que está diseñada para aquellos que quieren una prótesis avanzada y versátil. Se basa en el diseño fiable de la prótesis *i-limb ultra* (versión anterior) pero con características mejoradas.

El fabricante afirma que *i-limb ultra revolution*, ofrece más destreza y movimientos semejantes a una mano natural que cualquier otra prótesis de mano. Cada dedo se dobla de forma similar a las articulaciones naturales, de manera que puedan adaptarse con precisión para encajar alrededor de la forma del objeto que se desea tomar.

Cuenta con una amplia selección de movimientos automatizados y gestos para ayudar al usuario a completar sus tareas diarias, y precisión para agarrar objetos pequeños o la posición natural de la mano para caminar o estar en reposo.

Esta prótesis, según afirman, proporciona la capacidad de aumentar gradualmente la fuerza para controlar un objeto. Esto puede ser muy útil en situaciones donde se requiere una compresión más firme, como atarse los cordones o bien tomar una bolsa pesada de forma más segura.

Algunas características del producto que menciona el fabricante son:

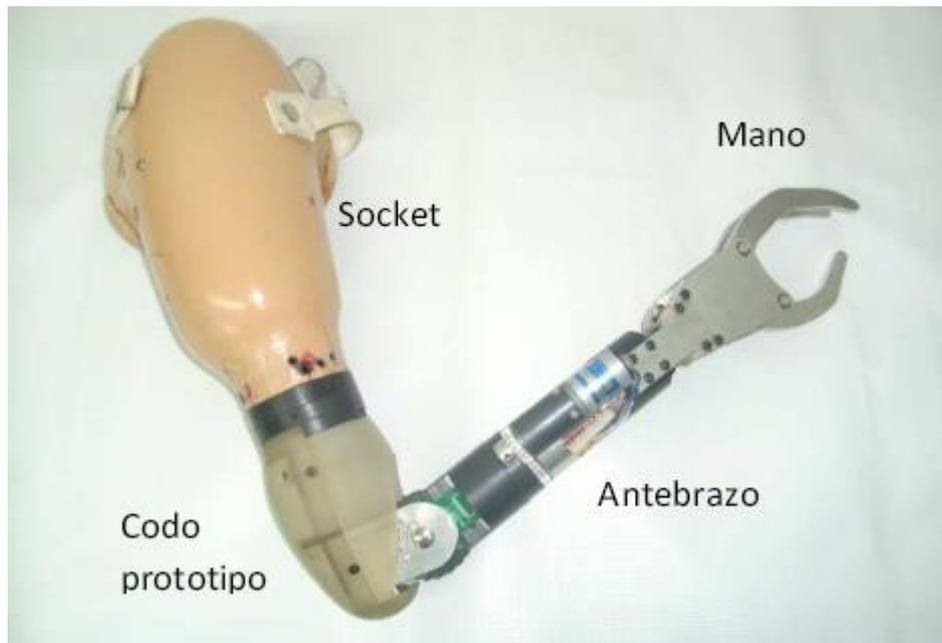
**Características:**

- Amplia selección de movimientos y agarres de objetos.
- Pulgar giratorio accionado.
- Movimiento automático a posición natural después de un periodo de inactividad.
- Software de control mejorado y con nuevas características llamado BioSim.
- Una variedad de opciones flexibles en la muñeca que permite el movimiento más natural.
- Señal de audio para aviso de batería baja.

### **2.2.3. Pro/Bionics**

Esta empresa fue fundada por el Ing. Luis Armando Bravo. Es una empresa mexicana cuyo objetivo, como lo describe su página web, es el desarrollo de sistemas biotecnológicos orientados al área de rehabilitación, utilizando conocimientos y técnicas avanzadas en ingeniería Biónica, Mecatrónica y Telemática, que le permitan a la población discapacitada contar con los medios tecnológicos de adquirir una rehabilitación integral y exitosa. (*Pro/Bionics, 2013*)

El producto principal es un **Brazo bioeléctrico**:



**Figura 2.4** Brazo bioeléctrico fabricado por Pro/Bionics.

(tomada de Pro/Bionics, 2013)

**Descripción:**

El Ing. Luis Armando Bravo comentó en una entrevista que la prótesis que han desarrollado ha sido colocada a 40 personas con diferente nivel de amputación, comenta que tiene una plataforma de lectura mioeléctrica que recoge y registra la actividad eléctrica muscular a través de unos electrodos. La prótesis pesa entre 250 gramos y 1.2 kilogramos, tiene una serie de movimientos rotatorios y de apertura en la mano, además de que duplica la fuerza de la persona que la usa.

Durante la entrevista, el fabricante mencionó las siguientes características del producto:

**Características:**

- Tiene 3 electrodos en el socket capaces de identificar las señales eléctricas que produce el músculo del paciente al realizar una contracción.
- Si el nivel de amputación es a nivel de hombro, las señales se extraen del pecho.
- La batería ya se encuentra incluida en el brazo, libre de cables.

- La parte de electrónica y de control pertenecen al mismo brazo, es decir, ya no está de forma separada.
- La muñeca del brazo se puede doblar.
- La prótesis se puede adaptar de acuerdo al nivel de la pérdida de miembro de cada paciente (Desde un módulo de mano biónica hasta un módulo integrativo de mano, antebrazo, codo y hombro)
- Los materiales que se utilizan principalmente son aluminio, nylon y fibra de carbono.
- Se podrá conectar a la PC mediante un dispositivo USB, y así el médico podrá realizar las configuraciones necesarias mediante una interfaz gráfica.

#### **2.2.4. DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency)**

DARPA es una agencia del Departamento de Defensa de Estados Unidos responsable de nuevas tecnologías para uso militar. Fue creada en 1958 como consecuencia tecnológica de la llamada Guerra Fría, al inicio solo era conocida como Advanced Research Projects Agency (ARPA) y en 1972 fue renombrada como DARPA. En su página de internet, DARPA menciona que su misión es mantener la superioridad tecnológica de la milicia en los Estados Unidos de América y prevenir la sorpresa tecnológica de dañar la seguridad nacional mediante el patrocinio de la investigación revolucionaria y de alta rentabilidad, reduciendo la brecha entre los descubrimientos fundamentales y de uso militar. (DARPA, 2013)

DARPA cuenta con un programa llamado “Revolutionizing Prosthetics Project”, donde junto con científicos del Laboratorio de Física Aplicada de la Universidad Johns Hopkins (APL) se han encargado de crear el prototipo de un brazo robótico llamado **Modular Prosthetic Limb (MPL)**, con el objetivo de darle múltiples usos, tales como: prótesis de brazo, dispositivo de ayuda humana, dispositivo general de robótica, etc. Debido a que pertenece a la milicia estadounidense no se encuentra en el mercado comercial, sin embargo, es importante mencionarla porque cuenta con características muy avanzadas con respecto a las comerciales. (The Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory, 2013)



**Figura 2.5** Modular Prosthetic Limb (MPL) fabricado por DARPA.

*(tomada de DARPA, 2013)*

**Descripción:**

En el sitio web del Laboratorio de Física Aplicada de la Universidad Johns Hopkins (APL) describen al *Modular Prosthetic Limb (MPL)* en el área clínica, como un dispositivo que se puede utilizar como prótesis de extremidad superior, el cual se puede acomodar a todos los niveles de amputación, desde la muñeca hasta el hombro. También mencionan que se puede utilizar como un dispositivo de ayuda para pacientes con lesión en la médula espinal.

Algunas de las características del dispositivo que menciona el fabricante en su sitio web son:

**Características:**

- Permite ser adaptado a diferentes niveles de amputación, desde la muñeca hasta el hombro.
- Mano articulada (10 articulaciones accionadas).
- 3 grados de libertad en la muñeca.
- Codo de gran alcance con extensión activa.
- 3 grados de libertad en el hombro.

- Está diseñado para dar cabida a interfaces con diferentes esquemas de control, por ejemplo: Dispositivos de entrada convencionales (Interruptores y transductores), Electromiografía (EMG), Estimulador sensorial táctil, Sensor Eléctrico Implantable (IMES), etc.

### **2.3. Conclusiones del capítulo**

En este capítulo se hizo la revisión de los principales sistemas protésicos que se utilizan para la fabricación de miembros artificiales, los cuales permiten reemplazar alguna extremidad corporal perdida por alguna enfermedad, accidente o también debido a una malformación de la misma. También se hizo una breve descripción a nivel producto de las empresas u organizaciones internacionales más importantes que desarrollan prótesis de miembro superior.

Es importante señalar que se han analizado dos diferentes tecnologías, las cuales se desean integrar para lograr uno de los objetivos principales de esta tesis, que es crear el control de una prótesis robótica utilizando una Interfaz Cerebro-Computadora. Al combinar ambos elementos mediante el desarrollo de software y hardware, estaremos siendo partícipes de la investigación y desarrollo de una forma alterna para el control de un dispositivo robótico o un nuevo sistema de control protésico basado en ondas cerebrales, permitiendo con esto que el control de una prótesis sea similar o parecido al control natural de la mano o el brazo.

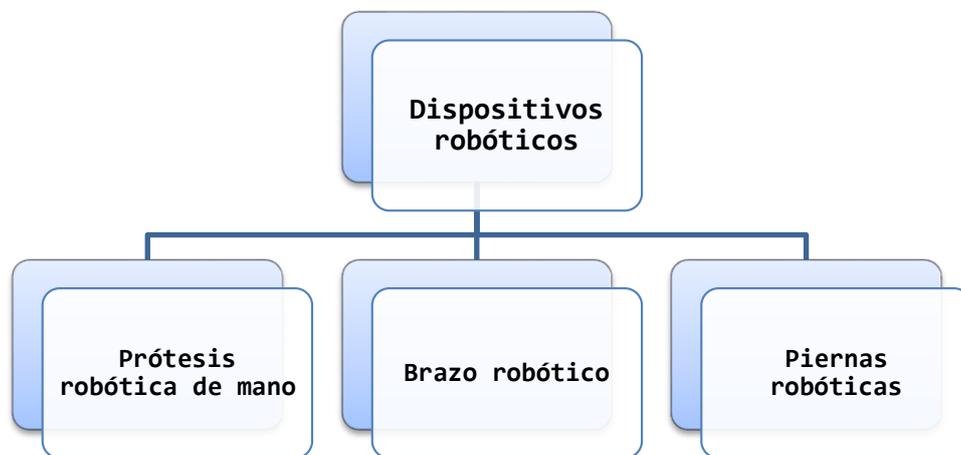
En el siguiente capítulo se explicará el funcionamiento de diferentes dispositivos robóticos que se pretende someter a un control experimental mediante una BCI y los cuales, puedan ayudar a mejorar la calidad de vida de personas con alguna discapacidad, o incluso ampliar alguna capacidad humana.

## **CAPÍTULO 3**

DESCRIPCIÓN GENERAL DE DISPOSITIVOS  
ROBÓTICOS A MANIPULAR MEDIANTE UNA  
INTERFAZ CEREBRO-COMPUTADORA

### 3. DESCRIPCIÓN GENERAL DE DISPOSITIVOS ROBÓTICOS A MANIPULAR MEDIANTE UNA INTERFAZ CEREBRO-COMPUTADORA

En este capítulo se describen 3 diferentes dispositivos robóticos que fueron desarrollados en el Instituto de Investigaciones en Matemáticas Aplicadas y en Sistemas (IIMAS) por el M.I. Hernando Ortega Carrillo y su equipo de desarrollo. Se dará a conocer el funcionamiento y las características básicas de estos dispositivos. A los que se pretende someter a un control mediante señales eléctricas cerebrales utilizando una BCI. Sin embargo, en esta tesis solo se abarcará la comunicación con el prototipo de prótesis robótica de mano.



**Figura 3.1** Dispositivos robóticos.

#### 3.1. Prototipo de prótesis robótica de mano

Es el prototipo de una mano robótica que tiene como principal objetivo utilizarse como prótesis de miembro superior para llevar a cabo distintas tareas de prensión y manipulación de objetos con diversas formas, texturas y tamaños. El desarrollo de este elemento electromecánico intenta buscar una buena relación entre adaptabilidad, costos y facilidad de uso, entre otros aspectos afines.

No obstante, el problema aún no está resuelto de manera general y satisfactoria, quedan todavía varios aspectos por mejorar, por ejemplo: diseño, portabilidad, uso de materiales, etc.

La construcción de este prototipo se realizó en el IIMAS por alumnos de Diseño industrial como parte de su servicio social. Terminando el ensamblaje fueron utilizados sensores infrarrojos (IR) y un software especializado para el control y la generación de movimientos. Actualmente, este dispositivo es el pionero en la integración a un control cerebral para poder llevar a cabo la manipulación de objetos mediante una Interfaz Cerebro-Computadora.

Este dispositivo robótico actualmente tiene dos versiones. La primera mano robótica que se implementó, es considerablemente grande y pesada, y únicamente permite ejecutar el movimiento de agarre total con los 5 dedos, debido a que cuenta con movimiento independiente en el dedo pulgar y el resto de los dedos se mueven de manera simultánea. En la *figura 3.2*, se muestra una imagen del prototipo de esta mano robótica



**Figura 3.2** Prototipo de prótesis robótica de mano (Versión 1).

La segunda versión de esta mano robótica disminuyó en tamaño y peso, básicamente gracias a los materiales que la conforman. La mejora que se le adicionó fue la independencia de movimiento en el dedo índice, con el objetivo de poder tomar objetos pequeños con el dedo pulgar e índice. Cabe destacar que esta segunda mano robótica es la que se utilizó para el desarrollo y las pruebas de este proyecto. A continuación se muestra una imagen del dispositivo y se mencionan sus características y su funcionamiento básico. (*Ver figura 3.3*)



**Figura 3.3** Prototipo de prótesis robótica de mano (Versión 2).

### 3.1.1. Características y funcionamiento

Las características principales del prototipo de prótesis robótica de mano son:

- ✦ Cuenta con los 5 dedos y el tamaño aproximado de una mano humana, siendo todavía un prototipo de laboratorio.
- ✦ El dedo pulgar e índice tienen movimiento independiente, permitiendo manipular objetos pequeños.
- ✦ Los dedos medio, anular y meñique no son independientes, se mueven de forma paralela.

Los aspectos mecánicos del prototipo de prótesis robótica de mano son:

- ✦ Tiene 4 grados de libertad (GDL).
- ✦ Está conformado por 4 servomotores: 3 servomotores están ubicados en la palma de la mano, y otro servomotor forma parte del dedo pulgar.
- ✦ Su peso aproximado es de 300 g.
- ✦ Sus dimensiones aproximadas son 22 cm de alto, 15 cm de ancho y 3 cm de profundidad (medidas tomadas con los dedos extendidos).
- ✦ Los dedos están fabricados de PVC y la palma la conforman los mismos servomotores.
- ✦ Sobre la palma están ensamblados los 5 dedos de una mano humana: los dedos medio, anular y meñique son controlados al mismo tiempo por un solo servomotor. El dedo índice es controlado por 1 servomotor y el dedo pulgar es controlado por 2 servomotores.
- ✦ El movimiento de los dedos medio, anular y meñique es generado a través de tendones artificiales o cables, los cuales permiten la transmisión del movimiento creado por el servomotor ubicado en la palma de la mano.

Los movimientos básicos con los que cuenta este prototipo son:

- ✦ Movimiento independiente en el dedo pulgar.
- ✦ Movimiento independiente en el dedo índice.
- ✦ Movimiento paralelo en los dedos: medio, anular y meñique.
- ✦ Prensión total con los 5 dedos, prensión parcial con 3 dedos (pulgar, índice y medio) y prensión lateral (pulgar e índice).
- ✦ Prensión en pinza (pulgar e índice).

El funcionamiento de este prototipo se basa principalmente en los servomotores Dynamixel fabricados por la empresa Robotis, y tienen las siguientes especificaciones:



**Figura 3.4** Servomotor Dynamixel RX-64.

*(tomada de Robotis, 2010)*

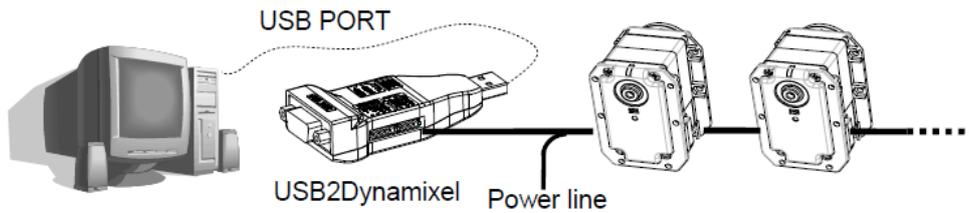
	RX-64	
Weight (g)	125	
Dimension (mm)	40.2 x 61.1 x 41.0	
Gear Reduction Ratio	1/200	
Applied Voltage (V)	at 15V	at 18V
Final Reduction Stopping Torque (kgf.cm)	64.4	77.2
Speed (Sec/60 degrees)	0.188	0.157

**Figura 3.5** Especificaciones del servomotor Dynamixel RX-64.

*(tomada de Robotis, 2010)*

El prototipo robótico de mano está conformado por 4 servomotores que se encuentran conectados en serie directamente a un conector llamado USB2Dynamixel y los cuales se comunican por medio del protocolo TTL (Transistor-Transistor Logic).

El adaptador *USB2Dynamixel* es un dispositivo que permite controlar servomotores seriales de la marca Dynamixel a través de una PC. Este adaptador tiene la opción de seleccionar 3 funciones diferentes (TTL, RS-485 y RS-232).



**Figura 3.6** Configuración básica de servomotores.

*(tomada de Robotis, 2010)*

### 3.2. Prototipo de brazo robótico

El prototipo de brazo robótico tiene como objetivo principal poder acoplarse a un robot para el alcance, prensión y manipulación de objetos. Actualmente, se pretende adaptar este dispositivo a una silla de ruedas para que personas con alguna discapacidad en brazos o manos puedan llevar a cabo la manipulación de objetos que se encuentran a una cierta distancia, es decir, utilizarlo como un dispositivo de ayuda humana.

El diseño y desarrollo de este componente robótico se realizó en el IIMAS por parte del M.I. Hernando Ortega Carrillo, para ser montado en una silla de ruedas y permitir a pacientes hemipléjicos (Parálisis de todo un lado del cuerpo por diversas lesiones en los centros motores) tomar objetos a través de un sistema de captura de movimientos. Hoy en día este brazo robótico funciona prácticamente como un módulo independiente, es por esto que se pretende en un futuro integrar al control cerebral utilizando una Interfaz Cerebro-Computadora, pero a su vez siendo parte de una silla de ruedas, como anteriormente se había mencionado.



**Figura 3.7** Prototipo de brazo robótico.

### 3.2.1. Características y funcionamiento

Las características principales del brazo robótico son:

- ✦ Cuenta con una pinza para la prensión de objetos.
- ✦ Tiene 5 grados de libertad (GDL).
- ✦ Está conformado por 5 servomotores: 3 servomotores están ubicados en la parte del brazo, y los otros 2 forman la pinza.
- ✦ Su peso aproximado es de 800 g.
- ✦ La longitud aproximada del brazo robótico es de 84 cm (medidas tomadas con el brazo y pinza extendidos).
- ✦ La longitud aproximada de la pinza es de 20 cm.
- ✦ La pinza está formada por 2 elementos fabricados de esponja con un contorno metálico, lo cual permite ejercer fuerza sobre un objeto, y lo que conforma el brazo son 2 segmentos de aluminio, los cuales están conectados entre sí a través de servomotores que forman las articulaciones del brazo.

Los movimientos básicos con los que cuenta este prototipo son:

- ✦ Movimiento independiente en la pinza del brazo robótico (Movimiento vertical).
- ✦ Movimiento de contracción y expansión del brazo.

El funcionamiento de este prototipo se basa también en los servomotores Dynamixel fabricados por la empresa Robotis, y utiliza la misma configuración de conexión que el prototipo de prótesis robótica de mano anteriormente descrito. (Ver figura 3.6)

### 3.3. Prototipo de piernas robóticas

El prototipo de piernas robóticas tiene como propósito principal permitir el análisis y el entendimiento de la marcha humana para el diseño y mejora de prótesis de miembro inferior. Este prototipo construido en el IIMAS ha sido creado por M.I. Hernando Ortega Carrillo, el diseño está basado en el uso de material reciclado para disminuir el costo en su construcción.

Este sistema actualmente funciona de forma independiente, utilizando un microcontrolador como sistema de control, que ejecuta las flexiones básicas para caminar en círculos. Es importante mencionar que el sistema se pretende someter a un control cerebral a través de una Interfaz Cerebro-Computadora, lo cual podría permitir en un futuro ayudar y entender a las personas que hayan sufrido de una lesión en la médula espinal, que provoca regularmente un daño parcial en las piernas.



**Figura 3.8** Prototipo de piernas robóticas.

### 3.3.1. Características y funcionamiento

Las características principales de las piernas robóticas son:

- ✦ Cuenta con un soporte para mantener vertical el dispositivo y sostenerlo mientras éste se desplaza, debido a que todavía las piernas no son capaces de mantenerse de pie por si solas.
- ✦ Tiene 10 grados de libertad (GDL), tomando en cuenta las 2 piernas.
- ✦ Cada pierna está conformada por 5 servomotores: 2 de ellos se encuentran al nivel de la cadera, el tercero realiza el movimiento de la rodilla y los 2 últimos permiten que se mueva el tobillo.
- ✦ Su peso aproximado es de 1 kg (sin contemplar el soporte).
- ✦ Sus dimensiones aproximadas son 100 cm de alto, 41 cm de ancho y 20 cm de profundidad (medidas tomadas con las piernas extendidas).
- ✦ La estructura de las piernas y los pies se encuentran fabricadas con material reciclado.

Los movimientos básicos con los que cuenta el prototipo de piernas robóticas son:

- ✦ Movimiento en las articulaciones de cadera.
- ✦ Movimiento en las articulaciones de rodillas.
- ✦ Movimientos en las articulaciones de tobillos.

El funcionamiento de este prototipo se basa también en los servomotores Dynamixel fabricados por la empresa Robotis, y utiliza la misma configuración de conexión que los prototipos anteriormente descritos.

### **3.4. Conclusiones del capítulo**

En este capítulo se revisó el funcionamiento básico y las principales características de los diferentes dispositivos robóticos que se integrarán a un sistema de control cerebral utilizando una Interfaz Cerebro-Computadora. Cabe recalcar que los dispositivos descritos pertenecen a una serie de prototipos robóticos que están orientados a mejorar la calidad de vida de personas con alguna discapacidad o incrementar también alguna capacidad humana. Por el momento la mano robótica ha sido probada de forma directa en personas, mientras que los demás prototipos solo funcionan mediante software especializado y microcontroladores que permiten la ejecución de movimientos muy específicos.

Puesto que uno de los objetivos principales de este proyecto de tesis es la creación de una forma alterna para el control cerebral de una prótesis de mano, es indispensable el desarrollo de un elemento de conexión o comunicación entre el dispositivo robótico y la BCI. Este elemento corresponde al desarrollo de un sistema de software que recibirá comandos basados en señales eléctricas que serán leídas desde el cerebro por medio de la BCI utilizada, dichas señales serán procesadas, interpretadas y traducidas para que un dispositivo protésico, en este caso una mano robótica, logre ejecutar una acción o un movimiento.

El siguiente capítulo describe lo concerniente al sistema de software desarrollado para conectar un dispositivo robótico e interfaces partícipes en el sistema de control cerebral.

# **CAPÍTULO 4**

## **DESARROLLO DE SOFTWARE E INTEGRACIÓN DE TECNOLOGÍAS**

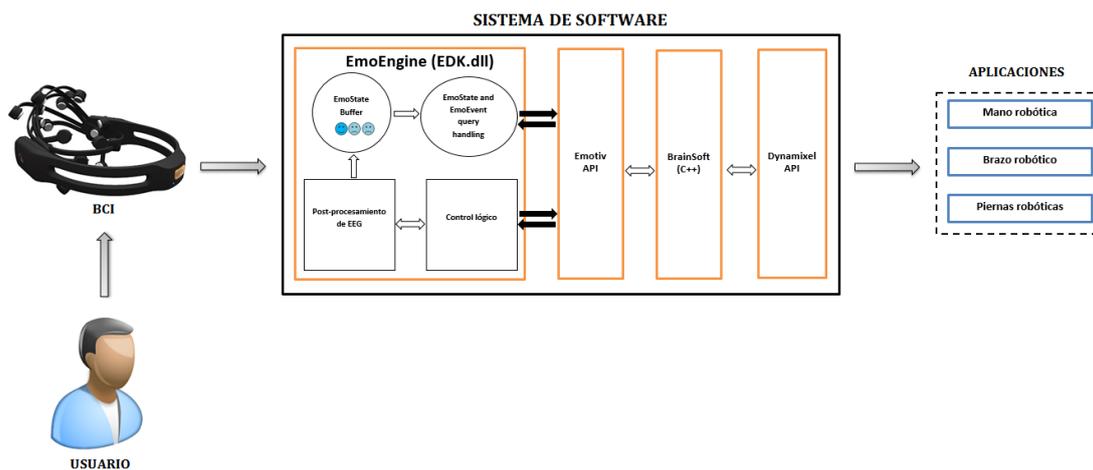
## 4. DESARROLLO DE SOFTWARE E INTEGRACIÓN DE TECNOLOGÍAS

En este capítulo se describe el diseño, el desarrollo y las pruebas del sistema de software que permite comunicar a una BCI con un dispositivo robótico. Esto implica obtener señales eléctricas cerebrales de una persona a través de una Interfaz Cerebro-Computadora, procesarlas, interpretarlas y traducirlas para que, en nuestro caso, una mano robótica pueda realizar una acción o un movimiento específico.

### 4.1. Sistema de software

El sistema de software que se desarrolló en este proyecto, denominado como *BrainSoft*, se implementó con lenguaje de programación C++ utilizando las API respectivas para extraer la información de la interfaz Emotiv EPOC Neuroheadset y controlar los servomotores Dynamixel de Robotis.

El esquema básico del sistema para el control cerebral de dispositivos robóticos es el siguiente:



**Figura 4.1** Esquema básico del sistema para el control cerebral de dispositivos robóticos.

En seguida se detalla cada uno de los elementos que forman el esquema anterior:

- ✦ **Usuario:** Es la persona que utiliza la BCI para obtener señales eléctricas cerebrales y de esta forma controlar algún dispositivo robótico.
- ✦ **Emotiv EPOC Neuroheadset (BCI):** Es una Interfaz Cerebro-Computadora que permite extraer e identificar señales eléctricas cerebrales de una persona, que son posteriormente interpretadas y traducidas en comandos.
- ✦ **Sistema de software (BrainSoft):** Es el conjunto de programas que permite crear un canal de comunicación entre una BCI y un dispositivo robótico (mano robótica).
- ✦ **Aplicaciones:** Es el conjunto de dispositivos robóticos que se desea controlar a través de señales eléctricas cerebrales.

#### 4.1.1. Características del sistema de software

El software identificado con el nombre de BrainSoft tiene las siguientes características funcionales:

- ✦ **Software desarrollado a la medida:** Esta característica indica que el software está diseñado para cumplir requerimientos específicos, es decir, BrainSoft nos otorga resultados que se ajustan exactamente a lo que necesitamos. Así también, al ser un desarrollo propio tenemos el control sobre las mejoras y nuevas funciones que se requieran realizar en el futuro a dicha aplicación.
- ✦ **Modular:** Este sistema de software se encuentra dividido en subprogramas con el fin de hacerlo más legible y manejable, y así darle más fácilmente un mantenimiento adecuado en caso de ser necesario.

- ✦ *No es portable*: La aplicación de BrainSoft no permite ser utilizada en otro sistema operativo distinto a Windows, se tendría que migrar el código para que funcione adecuadamente.
- ✦ *Eficiente*: Debido a que es una aplicación de consola, tiene la ventaja de no invertir tiempo de procesamiento en el despliegue de algún gráfico innecesario.

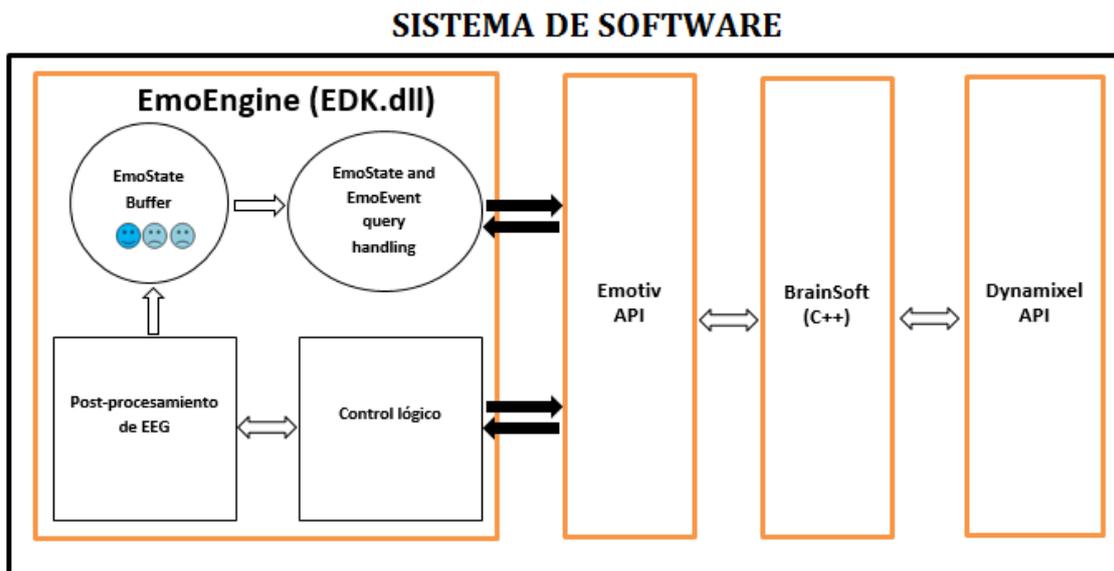
## 4.2. Diseño del sistema de software

Se requiere que *BrainSoft* sea un software capaz de identificar comandos que son recibidos desde la Interfaz Cerebro-Computadora llamada Emotiv EPOC Neuroheadset. Dichos comandos permitirán ejecutar acciones específicas sobre algunos dispositivos robóticos.

Por ejemplo, en el caso de la mano robótica se debe controlar la posición y velocidad de los servomotores para generar movimientos en dedos y articulaciones. En seguida, se hace una breve descripción del sistema de software *BrainSoft*.

### 4.2.1. Diagrama modular del sistema de software

El diseño lógico del sistema de software se esquematiza en la figura 4.2, que forma parte del esquema de la figura 4.1 en la que se indica la interacción que existe entre los diferentes módulos internos y externos que lo conforman, permitiendo así la identificación de patrones cerebrales generados a partir de tareas mentales.



**Figura 4.2** Diseño lógico del sistema de software para el control cerebral.

#### 4.2.2. Descripción a nivel modular del sistema de software

El diseño lógico del sistema de software presentado en el punto anterior (*Ver figura 4.2*), está formado por varios módulos que se mencionan a continuación:

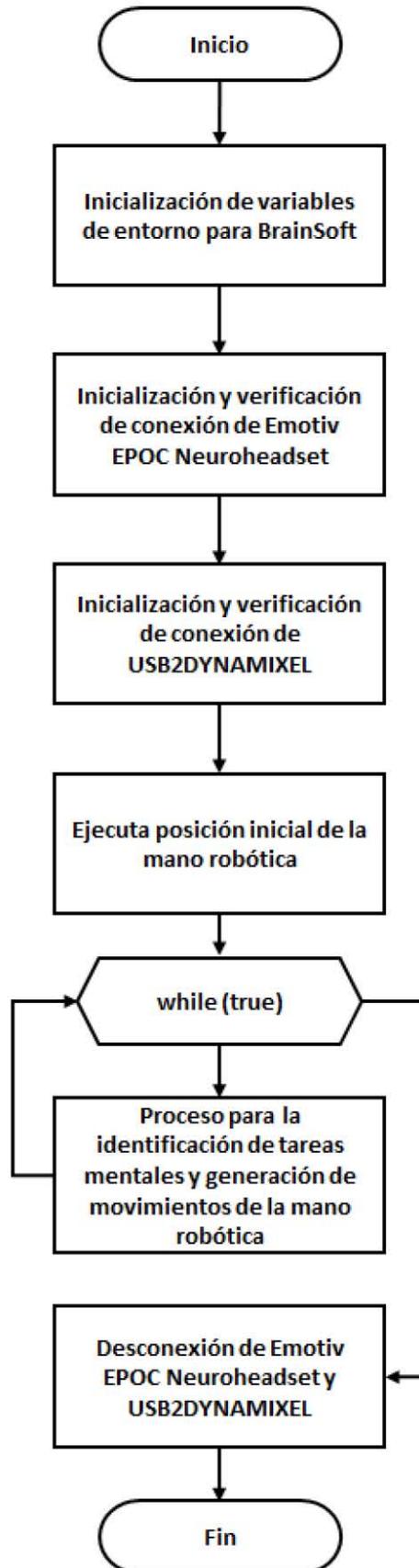
- ✦ **API Emotiv:** Es una biblioteca de funciones proporcionada por *Emotiv Systems* que permite implementar aplicaciones de software que funcionan con Emotiv EPOC Neuroheadset. Utiliza el estándar ANSI C, se declara en 3 archivos de cabecera (*edk.h*, *EmoStateDLL.h*, *edkErrorCode.h*) y está implementada en 2 archivos DLL en el caso de Windows: *edk.dll* y *edk\_util.dll*.
- ✦ **EmoEngine (*edk.dll*):** Este módulo se comunica con Emotiv EPOC Neuroheadset, es decir, recibe datos pre-procesados en modo EEG, administra la configuración específica del usuario de la aplicación, realiza el post-procesamiento y traduce los resultados de la detección Emotiv en una estructura fácil de usar llamada *EmoState*.

*EmoState* es considerada una estructura de datos que contiene el estado actual de las detecciones que realiza el Emotiv EPOC Neuroheadset, reflejando a su vez un estado facial, emocional o cognitivo del usuario. Estos datos se recuperan mediante funciones definidas en la API Emotiv con el prefijo "ES\_".

- ⊕ ***Post-procesamiento de EEG:*** Es un submódulo de la parte lógica del sistema, encargado de recibir las señales eléctricas cerebrales transformadas en datos digitales, con el fin de analizar los patrones cerebrales generados por el usuario, y así poder identificar las tareas mentales que se han invocado.
  
- ⊕ ***EmoStateBuffer:*** Corresponde a una zona de memoria donde se almacenan los datos correspondientes al estado actual detectado por Emotiv EPOC Neuroheadset.
  
- ⊕ ***EmoState and EmoEventQueryHandling:*** Se refiere al submódulo dedicado a la correcta manipulación lógica del estado mental obtenido por Emotiv EPOC Neuroheadset y la acción que se desea realizar con ésta.
  
- ⊕ ***BrainSoft:*** Es un sistema de software dedicado a la identificación y selección de tareas mentales que son generadas por un usuario a través de Emotiv EPOC Neuroheadset, de tal forma que cada tarea mental realizada por el usuario es utilizada de forma específica para darle movimiento a una mano robótica y así generar un tipo de presión para tomar un objeto.
  
- ⊕ ***API Dynamixel:*** Es una biblioteca de funciones definidas en C que permiten crear software dedicado al control de servomotores Dynamixel de Robotis.

### **4.2.3. Algoritmo general del sistema de software**

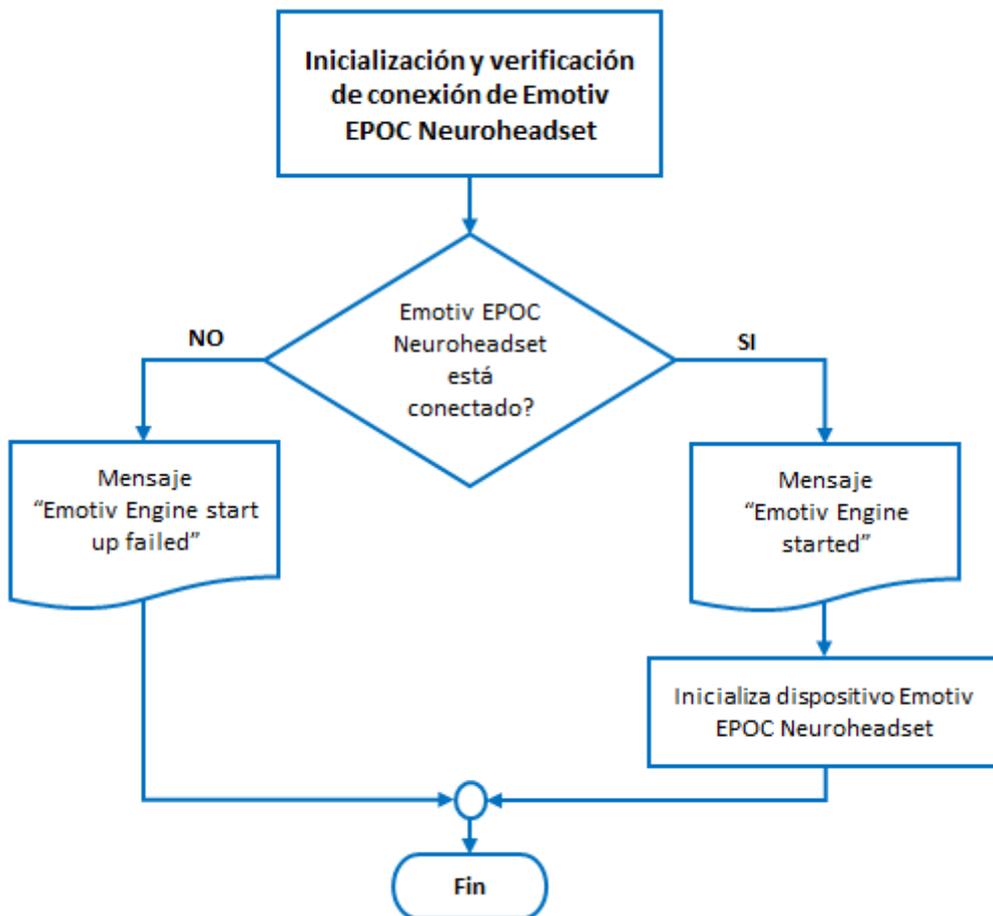
El algoritmo general contiene los procesos esenciales que deben ser implementados en lenguaje de programación C++ para que BrainSoft funcione de manera correcta y eficiente. En la figura 4.3 se muestra un diagrama de flujo con la lógica de programación correspondiente.



**Figura 4.3** Diagrama de flujo del sistema de software BrainSoft.

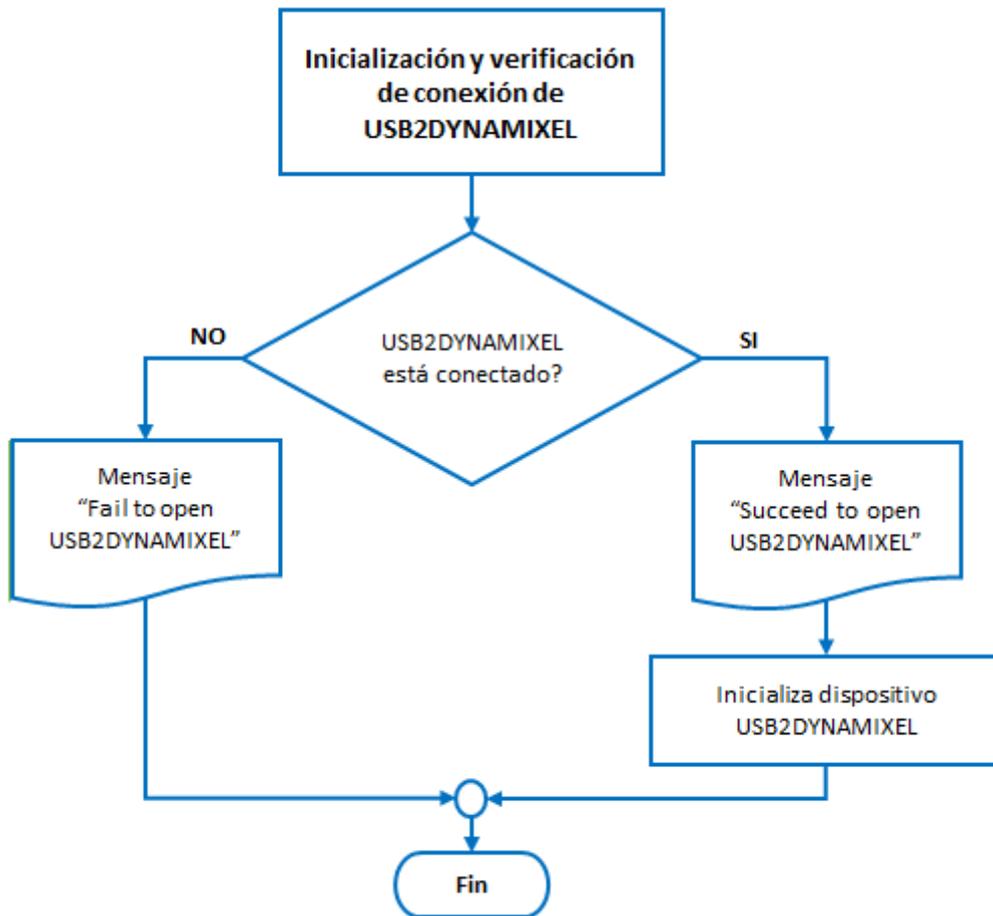
En seguida se muestra el diagrama de flujo de los procesos más importantes para el funcionamiento del software.

**Inicialización y verificación de conexión de Emotiv EPOC Neuroheadset:** En este proceso se verifica que el dispositivo Emotiv EPOC Neuroheadset se encuentre conectado y preparado para iniciar la identificación de las tareas mentales ejecutadas por el usuario.



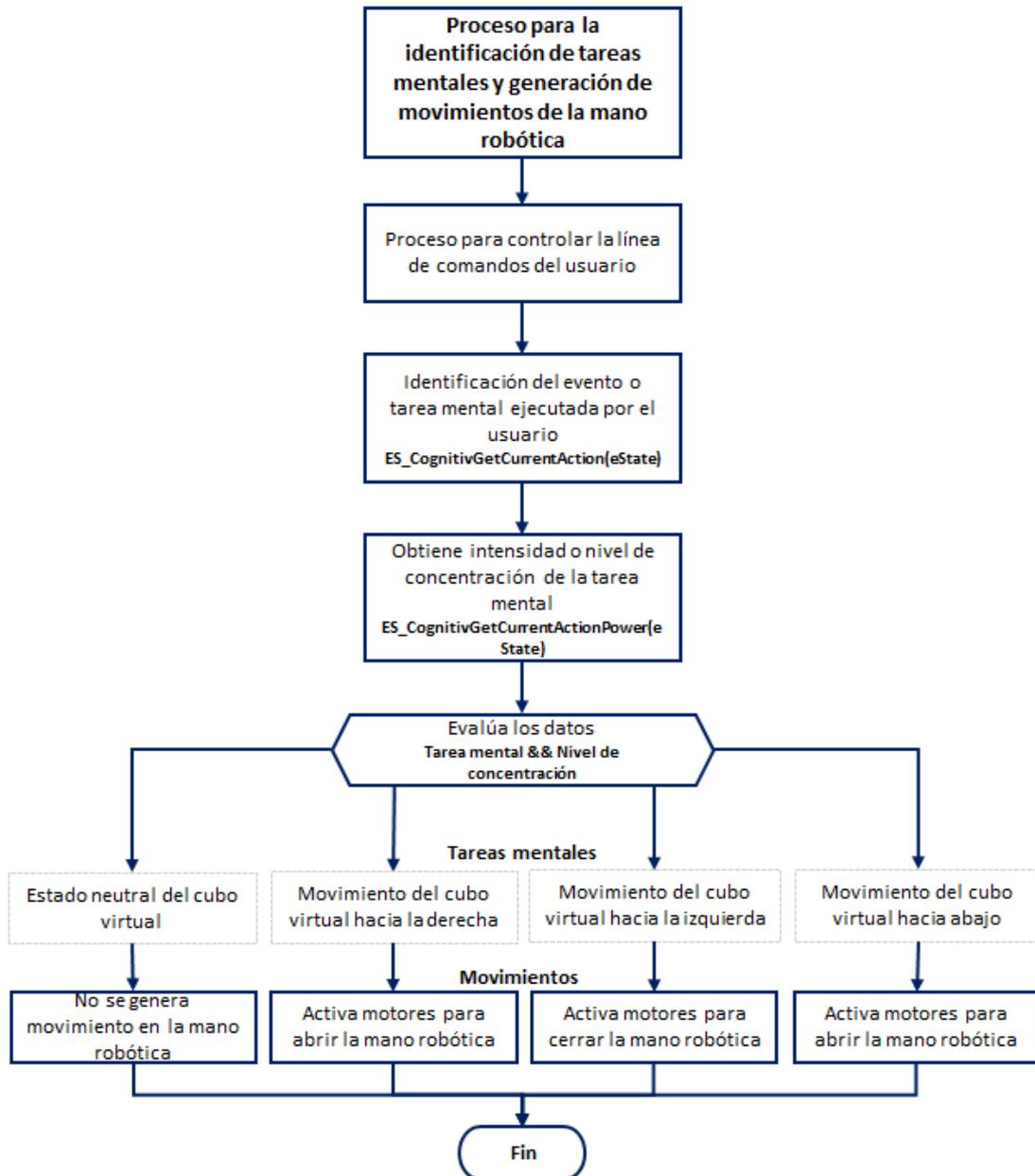
**Figura 4.4** Proceso de inicialización y verificación de Emotiv EPOC Neuroheadset.

**Inicialización y verificación de conexión de USB2DYNAMIXEL:** En este proceso se verifica que el dispositivo USB2DYNAMIXEL se encuentre conectado y preparado para iniciar la comunicación con los servomotores que le dan movimiento a la mano robótica.



**Figura 4.5** Proceso de inicialización y verificación de conexión de dispositivo USB2DYNAMIXEL.

**Identificación de tareas mentales y generación de movimientos de la mano robótica:** Este proceso está dedicado a la identificación de las 4 diferentes tareas mentales que pueden ser enviadas a través del dispositivo Emotiv EPOC Neuroheadset, y las cuales se asocian a un movimiento específico de la mano robótica.



**Figura 4.5** Proceso para la identificación de tareas mentales y generación de movimientos de la mano robótica.

### 4.3. Desarrollo del sistema de software

Como se ha mencionado anteriormente, la codificación del sistema de software BrainSoft se ha hecho con lenguaje C++ para poder utilizar las API de Emotiv y Dynamixel respectivamente. Esto con el objetivo de unificar las funciones que permiten la identificación de tareas mentales y el control de los servomotores Dynamixel que conforman el prototipo de mano robótica.

El algoritmo principal que se utiliza para la asociación de acciones con tareas mentales está basado en una sencilla *máquina de estados* (implementada dentro de una estructura básica de control *IF...THEN... ELSE*), donde al detectarse la ejecución de una tarea mental por medio de la Interfaz Cerebro-Computadora, el sistema BrainSoft identifica inmediatamente 2 parámetros principales:

- ✦ **ActionType:** Este parámetro permite almacenar la tarea mental actual que está siendo generada por el usuario. Se obtiene su valor al momento de ejecutar la función de la API de Emotiv identificada como *ES\_CognitivGetCurrentAction(eState)*.
  
- ✦ **ActionPower:** Este parámetro corresponde a la intensidad o nivel de concentración con la cual el usuario realiza una tarea mental, con un rango de valores que oscila entre 0 y 1. Se obtiene su valor al momento de ejecutar la función de la API de Emotiv identificada como *ES\_CognitivGetCurrentActionPower(eState)*.

Los parámetros anteriores, son los datos o la información básica de entrada que debe recibir el sistema de software para generar un movimiento específico sobre la mano robótica. Todo esto en base a los valores enviados por Emotiv EPOC Neuroheadset. De forma que, cuando el usuario ejecuta una tarea mental, inmediatamente la BCI la identifica a través de señales cerebrales, procesando, interpretando y traduciéndolas a un comando para ser enviado a BrainSoft quien se encargará de identificarlo, seleccionarlo y asignarlo a un movimiento predefinido de la mano robótica.

En la *figura 4.6* se muestra este proceso de identificación y selección de tareas mentales para la generación de movimientos en la mano robótica.



**Figura 4.6** Proceso de identificación y selección de tareas mentales para la generación de movimientos en la mano robótica.

En el siguiente punto, se hace una descripción de las pruebas que se realizaron con el sistema BrainSoft para verificar la comunicación correcta con la mano robótica.

#### 4.4. Pruebas del sistema de software

En este apartado se verificó de manera individual la correcta ejecución de cada función básica que es capaz de realizar BrainSoft. Con el objetivo de someterlo sin problemas a pruebas funcionales con un usuario. Y finalmente aislar cada parte del programa, y con esto, poder resolver cada posible problema por separado.

BrainSoft tiene implementadas algunas funciones dedicadas a generar movimientos básicos y específicos en la mano robótica. Estas funciones han sido ejecutadas de manera independiente para comprobar que los resultados de salida son los esperados basándose en los parámetros de entrada (*ActionType* y *ActionPower*). En seguida, se menciona cada uno de los movimientos de la mano robótica, su función y el resultado obtenido de manera independiente.



### *Apertura de la mano robótica*

Este movimiento corresponde a la apertura total de los 5 dedos de la mano robótica.

#### **FUNCION**

```

else if(static_cast<int>(actionType)==abrir && static_cast<int>(actionPower*100.0f)>=pwr_abrir)
{
    //Abre mano robótica
    abrir_mano();
}

```

#### **RESULTADO**

```

c:\BrainSoft.exe
Ual= 64,44
Accion = Abre
Ual= 64,54
Accion = Abre
Ual= 64,61
Accion = Abre
Ual= 64,62
Accion = Abre
Ual= 64,62
Accion = Abre
Ual= 64,65
Accion = Abre
Ual= 64,69
Accion = Abre
Ual= 64,74
Accion = Abre
Ual= 64,77
Accion = Abre
Ual= 64,77
Accion = Abre
Ual= 64,78
Accion = Abre
Ual= 64,77
Accion = Abre

```

**Figura 4.8** Ejecución del movimiento de apertura de la mano robótica en BrainSoft.

### *Cierre de la mano robótica*

Este movimiento corresponde al cierre total de los 5 dedos de la mano robótica.

#### **FUNCION**

```

else if(static_cast<int>(actionType)==cerrar && static_cast<int>(actionPower*100.0f)>=pwr_cerrar)
{
    //Cierra mano robótica
    cerrar_mano();
}

```

## RESULTADO



```

c:\BrainSoft.exe
Ual= 16,56
Accion = Cierra
Ual= 16,56
Accion = Cierra
Ual= 16,52
Accion = Cierra
Ual= 16,52
Accion = Cierra
Ual= 16,47
Accion = Cierra
Ual= 16,47
Accion = Cierra
Ual= 16,38
Accion = Cierra
Ual= 16,27
Accion = Cierra
Ual= 16,29
Accion = Cierra
Ual= 16,39
Accion = Cierra
Ual= 16,39
Accion = Cierra
Ual= 16,47
Accion = Cierra

```

Figura 4.5 Ejecución del movimiento de cierre de la mano robótica en BrainSoft.

### *Cierre del dedo índice y pulgar de la mano robótica*

Este movimiento corresponde a la prensión de tipo pinza realizada con el dedo índice y pulgar de la mano robótica.

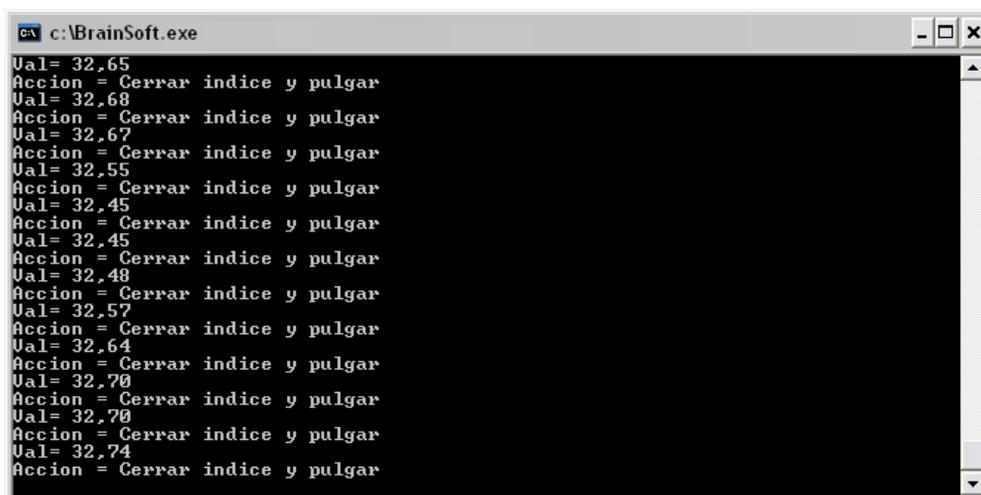
## FUNCION

```

else if(static_cast<int>(actionType)==cerrar_indi && static_cast<int>(actionPower*100.0f)>=pwr_cerrar_indi)
{
    //Cierra mano robótica con indice y pulgar
    cerrar_indice_pulgar();
}

```

## RESULTADO



```

c:\BrainSoft.exe
Ual= 32,65
Accion = Cerrar indice y pulgar
Ual= 32,68
Accion = Cerrar indice y pulgar
Ual= 32,67
Accion = Cerrar indice y pulgar
Ual= 32,55
Accion = Cerrar indice y pulgar
Ual= 32,45
Accion = Cerrar indice y pulgar
Ual= 32,45
Accion = Cerrar indice y pulgar
Ual= 32,48
Accion = Cerrar indice y pulgar
Ual= 32,57
Accion = Cerrar indice y pulgar
Ual= 32,64
Accion = Cerrar indice y pulgar
Ual= 32,70
Accion = Cerrar indice y pulgar
Ual= 32,70
Accion = Cerrar indice y pulgar
Ual= 32,74
Accion = Cerrar indice y pulgar

```

Figura 4.5 Ejecución del movimiento de cierre del dedo índice y pulgar de la mano robótica en BrainSoft.

Los resultados de las pruebas demuestran que la Interfaz Cerebro-Computadora se comunica satisfactoriamente con la mano robótica a través del sistema BrainSoft, al momento de ejecutar cada uno de los movimientos definidos con base en las diferentes tareas mentales. Todo esto con el fin de que el usuario obtenga una retroalimentación en tiempo real respecto a los movimientos de la mano y los resultados mostrados en la consola.

#### **4.5. Integración de tecnologías**

Se logró la integración de dos tecnologías utilizadas en este proyecto. Por un lado se tenía una Interfaz Cerebro-Computadora, capaz de extraer señales cerebrales de una persona e interpretarlas para interactuar con un ambiente físico o virtual. Y por otro lado se tenía un dispositivo protésico que tiene como función principal reemplazar algún miembro del cuerpo humano. El acoplamiento de ambos dio como resultado un sistema de control cerebral para prótesis robóticas.

La unificación de estos elementos se realizó por medio de la implementación del sistema BrainSoft, que permitió establecer una conexión entre las dos tecnologías para crear un sistema de control cerebral, en el que se utiliza una BCI para darle movimiento a una mano robótica. Es importante mencionar que esta aplicación de software es indispensable para el funcionamiento del sistema principal, ya que se considera como el medio que permite transferir, identificar y seleccionar todas las tareas mentales que son generadas voluntariamente por el usuario, con la intención de ejecutar una acción específica sobre alguna de las aplicaciones robóticas propuestas.

#### **4.6. Conclusiones del capítulo**

En este capítulo se ha descrito el diseño, el desarrollo y las pruebas realizadas del sistema de software llamado BrainSoft, el cual es utilizado en el sistema de control cerebral que se implementó para la elaboración de esta tesis.

BrainSoft permite la comunicación entre un sistema BCI y un dispositivo robótico o protésico. De tal forma que la interfaz Emotiv EPOC Neuroheadset obtenga señales eléctricas del cerebro y las envíe al módulo de procesamiento de señales EEG, para que éste sea capaz de reconocer patrones cerebrales y enviar tal interpretación al sistema de software. Inmediatamente, BrainSoft se encargará de generar acciones o movimientos específicos sobre la mano robótica, dependiendo de la tarea mental ejecutada por usuario.

Uno de los inconvenientes que actualmente se ha presentado durante la implementación de BrainSoft, es que se requiere forzosamente un equipo de cómputo para su ejecución. Por lo tanto, en trabajos futuros se tiene como objetivo migrar y ejecutar el sistema de software a un microcontrolador o a algún dispositivo más portable que una laptop.

En el próximo capítulo se analizarán los resultados de las pruebas de usuario que se deben ejecutar con la mano robótica. También se realizará la propuesta de actividades de entrenamiento que debe seguir el usuario que haga uso de Emotiv EPOC Neuroheadset, para lograr un control básico sobre la mano robótica.

# **CAPÍTULO 5**

## **PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS**

## 5. PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se explica el diseño de las pruebas que se ejecutaron para verificar el funcionamiento integral del sistema de control cerebral en conjunto con la mano robótica utilizada en esta tesis. También, se analiza cada uno de los resultados obtenidos para determinar si existe la posibilidad de realizar una mejora en alguno de los elementos del sistema construido, es decir, adecuaciones en el software, hardware o algún cambio en las pruebas realizadas.

Las pruebas realizadas son preliminares con el objetivo de comprobar el funcionamiento integral del sistema. En un futuro se deberá ejecutar pruebas con pacientes y realizar un respectivo análisis para verificar la viabilidad de crear un protocolo de investigación basado en este sistema de control y el prototipo de prótesis de extremidad superior.

### 5.1. Diseño y ejecución de pruebas

A continuación se explica la serie de actividades que se llevó a cabo para manipular eficientemente el sistema cerebral, en distintos entornos y condiciones.

Participaron 3 voluntarios para realizar las pruebas quienes se sometieron a un entrenamiento para utilizar la Interfaz Cerebro-Computadora. Para la adquisición de un aprendizaje rápido de Emotiv EPOC Neuroheadset es necesario:

- ✦ Instalación de la aplicación *Panel de control de Emotiv* y software de control identificado como BrainSoft en un equipo de cómputo (sistema operativo Windows XP).
- ✦ Identificación de las partes básicas que conforman la Interfaz Cerebro-Computadora de Emotiv (Sensores, receptor inalámbrico, botón de encendido/apagado, cargador de batería, puertos, etc.)
- ✦ Identificación del dispositivo inalámbrico para la conexión de la Interfaz Cerebro-Computadora con el equipo de computo
- ✦ Humectación de electrodos cerebrales con una solución salina para la adquisición de señales eléctricas cerebrales de forma óptima.

- ✦ Colocación correcta de la Interfaz Cerebro-Computadora sobre la cabeza del usuario y verificación del contacto de cada electrodo con el cuero cabelludo.
- ✦ Entrenamiento y dominio de al menos 3 diferentes ejercicios o tareas mentales propuestos por Emotiv a través del Panel de control (Control de movimientos de una figura geométrica en diferentes direcciones: Izquierda, Derecha, Arriba, Abajo, etc.)

El usuario que va a manipular el sistema de control cerebral basado en Emotiv EPOC Neuroheadset debe estar forzosamente familiarizado con los puntos que se describieron, para que sea capaz posteriormente de realizar la conexión con algún dispositivo robótico y controlarlo por medio de ondas cerebrales.

Las pruebas realizadas con el sistema de control cerebral a través de una Interfaz Cerebro-Computadora se exponen a continuación.

## **5.2. Pruebas con prototipo de prótesis robótica de mano**

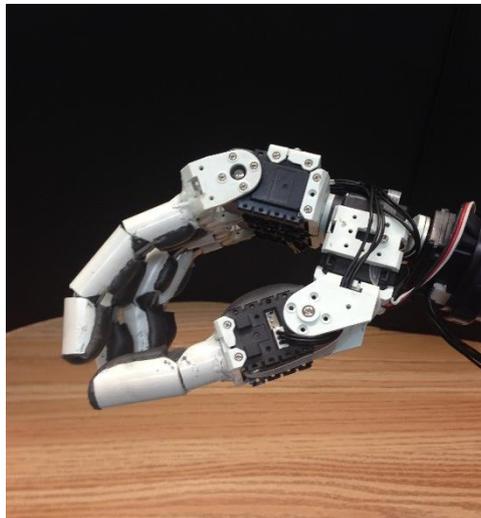
Los ejercicios propuestos para la manipulación de una prótesis robótica de mano son los siguientes:

### ***1. Apertura y cierre de la mano robótica de manera repetitiva.***

El usuario debe ser capaz de abrir y cerrar la mano robótica de manera repetitiva durante un tiempo determinado. Posteriormente, el usuario debe mantener la mano cerrada durante 15 segundos, y enseguida mantener la mano abierta durante los mismos 15 segundos de tiempo.



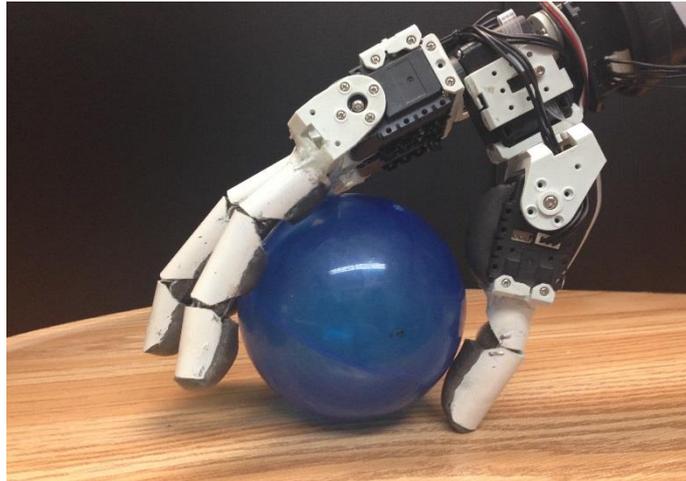
**Figura 5.1** Apertura de la mano robótica.



**Figura 5.2** Cierre de la mano robótica.

***2. Sujeción de pelotas (Pasar de un contenedor a otro una cantidad determinada de pelotas).***

El usuario debe ser capaz de pasar un conjunto de pelotas de un contenedor a otro sin que éstas se caigan. Este ejercicio le permite al usuario aprender a sujetar objetos y al mismo tiempo a coordinar movimientos simultáneos.



**Figura 5.3** Sujeción de pelotas.

**3. Tomar un vaso con líquido y verterlo a otro.**

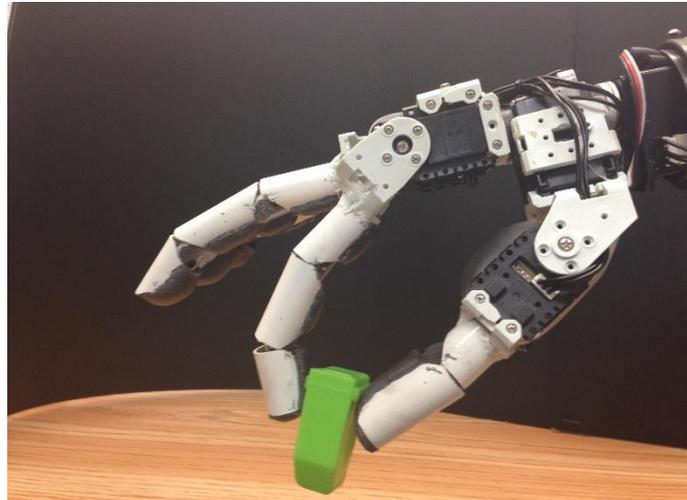
El usuario debe ser capaz de tomar un vaso con algún líquido y poder verterlo a otro sin que éste se derrame o se caiga el vaso. Este ejercicio le permite al usuario aprender a mantener pensamientos estáticos para que la mano robótica no ejerza algún movimiento no deseado.



**Figura 5.4** Tomar un vaso con líquido.

**4. Sujeción de objetos pequeños.**

El usuario debe ser capaz de sujetar objetos pequeños con los dedos índice y pulgar de la mano robótica. Este ejercicio le permite al usuario manipular objetos que tengan dimensiones pequeñas, aproximadas a una pluma o un lápiz.



**Figura 5.5** Sujeción de objetos pequeños.

Para la utilización básica de la mano robótica, se propone el siguiente plan de actividades:

Núm.	Actividad	Número de semanas	Tiempo (h)
1	<i>Entrenamiento y dominio de al menos 3 diferentes ejercicios propuestos por Emotiv para utilizar una BCI</i>	3	18
2	<i>Apertura y cierre de la mano robótica de manera repetitiva.</i>	1	6
3	<i>Sujeción de pelotas</i>	2	12
4	<i>Tomar un vaso con agua y verterlo a otro</i>	2	12
5	<i>Sujeción de objetos pequeños</i>	2	12
<b>TOTAL</b>		<b>10</b>	<b>60</b>

**Figura 5.6** Plan de actividades para el control de la mano robótica.

**5.3. Análisis de resultados**

El plan de actividades descrito fue ejecutado por 3 usuarios (2 de género femenino y 1 de género masculino) en un área reservada dentro del IIMAS, UNAM. Esto bajo condiciones controladas con el fin de evitar distracciones externas (luz solar, ruido, etc).

**Usuario 1:**

**Sexo:** Mujer

**Edad:** 35 años

**Condiciones físicas:** Amputación transhumeral (a nivel del hombro) del lado derecho.

**Resultado de los ejercicios:**

1. Ha logrado exitosamente controlar 3 tareas mentales propuestas por Emotiv: empujar, jalar y mover hacia abajo un cubo virtual.
2. Ha mantenido abierta y cerrada la mano robótica durante 1 minuto aproximadamente.
3. Ha aprendido a sujetar varias pelotas y pasarlas de un contenedor a otro, sólo se presentaron algunos inconvenientes debido a la textura lisa que presentan las pelotas.
4. Ha aprendido a sostener un vaso con agua, desafortunadamente no se ha logrado verter el líquido sin que éste se derrame.
5. Ha aprendido a tomar objetos pequeños colocados en una superficie plana, pero se presentaron problemas frecuentemente por la forma del objeto.

**Usuario 2:**

**Sexo:** Mujer

**Edad:** 38 años

**Condiciones físicas:** Inmovilidad total en la mano izquierda (abajo del codo)

**Resultado de los ejercicios:**

1. Este usuario ha logrado controlar 3 tareas mentales propuestas por Emotiv: mover hacia la derecha, hacia la izquierda y hacia abajo un cubo virtual. Presentando algunos problemas para el control total del último.
2. Ha aprendido a controlar la mano para que ésta se cierre y se abra, pero con movimientos irregulares y con períodos de tiempo de 15 segundos aproximadamente.
3. Ha logrado sujetar algunas pelotas, sin conseguir pasarlas de un contenedor a otro.

4. Ha aprendido a sostener un vaso con agua durante un período aproximado de 20 segundos, pero se ha derramado el agua al soltar el vaso, debido a ciertos pensamientos inconscientes.

5. Ha aprendido a controlar la apertura y el cierre de los dedos índice y pulgar, sin embargo, no ha logrado sujetar algún objeto pequeño con ellos.

**Usuario 3:**

**Sexo:** Hombre

**Edad:** 25 años

**Condiciones físicas:** Ambas extremidades superiores.

**Resultado de los ejercicios:**

1. Ha logrado exitosamente controlar 3 tareas mentales propuestas por Emotiv: mover hacia la derecha, hacia la izquierda y hacia abajo un cubo virtual.

2. Ha mantenido abierta y cerrada la mano robótica durante 1 minuto aproximadamente.

3. Ha aprendido satisfactoriamente a sujetar varias pelotas y pasarlas de un contenedor a otro. Sólo en ciertas ocasiones, dejaba caer alguna de ellas.

4. Ha aprendido a sostener un vaso con agua, pero sólo en pocas ocasiones se logró verter el agua sin que ésta se derramara.

5. Ha aprendido a tomar objetos pequeños colocados en una superficie plana, pero no siempre consiguió tomarlas la primera vez.

## **5.4. Conclusiones del capítulo**

A lo largo del capítulo se detalló el diseño y los resultados obtenidos de las pruebas ejecutadas por los voluntarios que permitieron verificar el funcionamiento correcto del sistema de control cerebral.

Los resultados obtenidos fueron en general satisfactorios para los 3 usuarios, aunque se presentaron algunas dificultades en la sujeción de objetos de diferentes tamaños y con diferentes texturas, debido a la simultaneidad de movimientos corporales que se requieren para ejecutar estos ejercicios.

El sistema desarrollado debe mejorarse en el aspecto funcional. Se deberá adaptar la interfaz BCI para hacerla portable y más responsiva para el usuario. La mano robótica deberá pasar de un prototipo estacionario a un prototipo adaptable para una persona, y una vez logrado esto, se debe rediseñar y ejecutar el grupo de pruebas respectivas.

El último capítulo contiene las conclusiones finales y las perspectivas de este proyecto, teniendo en cuenta que el objetivo es lograr que el sistema de control cerebral para dispositivos robóticos sea un modelo totalmente portable y funcional.

# **CAPÍTULO 6**

## **CONCLUSIONES FINALES**

## 6. CONCLUSIONES FINALES

De acuerdo con los objetivos planteados en la introducción de esta tesis, se concluye lo siguiente:

Se desarrolló un nuevo sistema de control cerebral al acoplar una Interfaz Cerebro-Computadora y un prototipo de mano robótica. Este logro podría permitir a una persona mejorar su calidad de vida después de una amputación de miembro superior y a otros usuarios incrementar sus capacidades físicas respecto a número de miembros, fuerza, etc, evitando una invasión cerebral. Esto gracias a la invención de nuevas interfaces que permiten el monitoreo de la actividad cerebral.

Durante el desarrollo del sistema se comprobó que puede existir un número infinito de aplicaciones, que pueden ser descubiertas y estudiadas a lo largo de la investigación y la utilización de una Interfaz de Cerebro-Computadora.

Una de las principales ventajas de este sistema cerebral consiste en que se logre en un futuro obtener un producto final que permita comunicar a un usuario con un elemento robótico para realizar actividades diarias. Sin embargo, se ha presentado un obstáculo principal, el cual consiste en la portabilidad y la funcionalidad limitada que se presenta. Esto surge debido a que el sistema de software (BrainSoft), por el momento, se ejecuta sobre una computadora portátil lo cual hace que la parte de hardware incremente su tamaño y costo de manera considerable y no permita libre movilidad al usuario.

Por ejemplo, el aspecto de portabilidad anteriormente mencionado se podría resolver, probablemente, con investigaciones que permitan realizar una adaptación del software sobre un microcontrolador. Eliminando la ejecución de la aplicación BrainSoft sobre una computadora portátil, con el objetivo de disminuir el tamaño del sistema respecto a los elementos eléctricos.

## **6.1. Trabajo a futuro**

Este proyecto tiene diferentes áreas de trabajo que pueden permitir a la ingeniería y otras disciplinas a colaborar en conjunto, con la posibilidad de obtener un producto final que pudiera llegar al mercado comercial o indagar en nuevas áreas de oportunidad. También puede ser un tema de investigación debido a que es un área muy poco estudiada, al menos, en nuestro país.

El trabajo a futuro que se puede proponer es el siguiente:

### **1. Optimización en la portabilidad y ergonomía de la Interfaz Cerebro-Computadora**

Se propone aplicar ingeniería inversa a la interfaz BCI adquirida (Emotiv EPOC Neuroheadset), para obtener un dispositivo con elementos eléctricos más económicos, y por supuesto, crear una interfaz más ergonómica para el usuario. Por otro lado, también se puede investigar las capacidades funcionales de la nueva versión de Emotiv EPOC Neuroheadset, con el objetivo de comprobar si existe una mejor portabilidad y fidelidad en la lectura de señales cerebrales.

### **2. Adaptación del sistema de software (BrainSoft) sobre un microcontrolador**

Consiste en investigar la posibilidad de migrar el software denominado BrainSoft a un lenguaje de programación que sea soportado por un sistema embebido o un microcontrolador, con el propósito de eliminar la ejecución de software sobre un equipo de cómputo (Laptop o Netbook), y así minimizar el hardware del sistema.

### **3. Mejoras en diseño y funcionalidad en la mano robótica**

Se pretende migrar de un prototipo de mano robótica a una prótesis como elemento comercial, y la cual se pueda adaptar a personas para su utilización diaria. Así mismo, se debe investigar cuáles son los materiales más convenientes para la fabricación de este tipo de prótesis, para obtener un diseño ligero y resistente para realizar prensiones básicas.

#### **4. Estudio de mercado para un producto final**

Se debe realizar un estudio de mercado para verificar que el sistema desarrollado tenga oportunidad de ser un producto comercial, y así generar estimulación para más investigación sobre el área de Interfaces Cerebro-Computadoras y la robótica.

#### **5. Adaptación de una Interfaz BCI en diferentes áreas de la ingeniería**

Investigar otras diferentes áreas de la ingeniería donde se pueda utilizar una Interfaz BCI para ayudar a la sociedad o profundizar conocimientos respecto a nuevas tecnologías referentes a la neurociencia.

#### **6. Desarrollo de protocolo con el Instituto Nacional de Rehabilitación**

Iniciar con el desarrollo de un Protocolo de investigación con el Instituto Nacional de Rehabilitación (INR), donde sea planteado que la mano robótica cumple con las características médicas necesarias para lograr ser una prótesis robótica, es decir, ser utilizada por personas con amputaciones de miembro superior.

**BIBLIOGRAFÍA**

- ✦ Barouti H, A. M. (1998). Amputaciones del miembro superior. *Enycl. Méd Chir* , 10.
- ✦ Bernhard Graimann, B. Z. (2011). *Brain-Computer Interfaces: Revolutionizing Human-Computer Interaction*. Springer.
- ✦ Donoghue, J. P. (2002). Connecting cortex to machines: recent advances in brain interfaces. *Nature Neuroscience*, 5, 1085-1088.
- ✦ Dorador, G. J. (2004). *ROBÓTICA Y PRÓTESIS INTELIGENTES*. Revista Digital Universitaria.
- ✦ He, B. (2013). *Neural Engineering*. MN, USA: Springer.
- ✦ Jonathan R. Wolpaw, N. B. (2002). Brain-computer interfaces for communication and control. *Clinical Neurophysiology*, 113, 767-791.
- ✦ Lisandro Puglisi, H. M. (2008). *Prótesis Robóticas*. Universidad Politécnica de Madrid, Departamento de Automática, Ingeniería Electrónica e Informática Industrial.
- ✦ Mendoza, R. I. (2007). *DISEÑO DE PRÓTESIS MECATRÓNICA DE MANO*. México, D.F.: TESIS.
- ✦ Minguez, J. (2003). *Tecnología de Interfaz Cerebro – Computador*. Universidad de Zaragoza, España, Departamento de Informática e Ingeniería de Sistemas.
- ✦ S.P. Levine, J. H. (1999). Identification of electrocorticogram patterns as the basis for a direct brain interface. *Journal of Clinical Neurophysiology*, 16, 439-447.
- ✦ Schwartz, A. (2004). Cortical Neural Prosthetics. *Annual Review of Neuroscience*, 27, 487-507.

## SITIOS ELECTRÓNICOS

- ✦ Arce, D. C. (2005). Arcesw. Recuperado el 10 de Septiembre de 2012, de <http://www.arcesw.com/pms1.htm>
- ✦ DARPA. (2013). Obtenido de <http://www.darpa.mil/default.aspx>
- ✦ Federación Mexicana de Diabetes, A.C. (27 de Julio de 2012). Diabetes, primera causa de amputación. México. Recuperado el 10 de Septiembre de 2013, de <http://www.fmdiabetes.org/fmd/pag/noticias.php?id=MTYzMg>
- ✦ Gerwin Schalk, P. (2010). Laboratory of Neural Injury and Repair. Recuperado el 10 de Diciembre de 2012, de <http://www.bci2000.org>
- ✦ Historias con Historia. (25 de julio de 2008). Recuperado el 25 de Noviembre de 2012, de <http://historiasconhistoria.es/2008/07/25/gotz-mano-de-hierro-berlichingen.php>
- ✦ Medicina Digital. (2013). Rehabilita IMSS a diabéticos que han sufrido amputación de piernas . México. Recuperado el 10 de Septiembre de 2013, de <http://www.medicinadigital.com/index.php/patolog%C3%ADas/7965-rehabilita-imss-a-diabcos-que-han-sufrido-amputacie-piernas>
- ✦ Ottobock. (2012). Obtenido de <http://www.ottobock.com.mx/>
- ✦ Pro/Bionics. (2013). Obtenido de <http://www.probionics.com.mx/>
- ✦ Robotis. (2010). Robotis. Recuperado el 2012, de [http://support.robotis.com/en/product/auxdevice/interface/usb2dxl\\_manual.htm](http://support.robotis.com/en/product/auxdevice/interface/usb2dxl_manual.htm)
- ✦ Systems, E. (2012). Obtenido de <http://emotiv.com/>
- ✦ The Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory. (2013). Obtenido de <http://www.jhuapl.edu/prosthetics/default.asp>
- ✦ Touch Bionics. (2013). Obtenido de <http://www.touchbionics.com/>

## ANEXOS

### DIFUSIÓN Y DIVULGACIÓN CIENTÍFICA DEL PROYECTO

- ✦ **Revista Ciencia y Desarrollo CONACYT** (*Publicado marzo-abril de 2012*)  
<http://www.cyd.conacyt.gob.mx/258/articulos/productos-de-la-ciencia.html>
- ✦ **Boletín UNAM-DGCS** (*Publicado el 3 de mayo de 2012*)  
[http://www.dgcs.unam.mx/boletin/bdboletin/2012\\_283.html](http://www.dgcs.unam.mx/boletin/bdboletin/2012_283.html)
- ✦ **Boletín UNAM-DGCS** (*Publicado el 3 de mayo de 2012*)  
<http://www.dgcs.unam.mx/gacetaweb/historico.html>
- ✦ **Informador** (*Publicado el 3 de mayo de 2012*)  
<http://www.informador.com.mx/tecnologia/2012/373814/6/crean-protesis-que-puede-ser-controlada-con-la-mente.htm>
- ✦ **El Diario** (*Publicado el 3 de mayo de 2012*)  
[http://diario.mx/Nacional/2012-05-03\\_9b602d7d/](http://diario.mx/Nacional/2012-05-03_9b602d7d/)
- ✦ **El Universal** (*Publicado el 4 de mayo de 2012*)  
<http://www.eluniversal.com.mx/articulos/70539.html>
- ✦ **PC World México** (*Publicado el 4 de mayo de 2012*)  
<http://www.pcworld.com.mx/Articulos/22918.htm>
- ✦ **Revista emeequis** (*Publicado el 25 de junio de 2012*)  
<http://www.m-x.com.mx/xml/pdf/283/10.pdf>
- ✦ **Entrevista en “Venga a tomar café con nosotros” Radio UNAM 860 AM**  
(*Entrevista el 23 de enero de 2013*)
- ✦ **Crónica** (*Publicado el 12 de febrero de 2013*)  
<http://www.cronica.com.mx/notas/2012/658108.html>
- ✦ **Gaceta UNAM** (*Publicado el 30 de septiembre de 2013*)  
<http://www.dgcs.unam.mx/gacetaweb/historico.html>
- ✦ **Proyecto radiofónico “Radiosfera” DGDC, UNAM**  
(*Transmisión el mes de noviembre de 2013*)