



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
CENTRO DE INNOVACIÓN Y DESARROLLO
TECNOLÓGICO EN CÓMPUTO



CONTROL DE UN ROBOT MANIPULADOR MEDIANTE
LA INTERPRETACIÓN DE ONDAS CEREBRALES

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

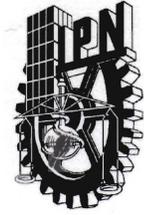
MAESTRÍA EN TECNOLOGÍA DE CÓMPUTO

PRESENTA:

MARCO ANTONIO RÓMAN PÉREZ

DIRECTORES DE TESIS:

DR. GABRIEL SEPÚLVEDA CERVANTES
DR. OMAR ARTURO DOMÍNGUEZ RAMÍREZ



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de México, D.F. siendo las 13:30 horas del día 3 del mes de Julio del 2012 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de la Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación del CIDETEC para examinar la tesis titulada:

“CONTROL DE UN ROBOT MANIPULADOR MEDIANTE LA INTERPRETACIÓN DE ONDAS CEREBRALES”

Presentada por el alumno:

ROMÁN PÉREZ MARCO ANTONIO
Apellido paterno Apellido materno Nombre(s)

Con registro:

B	1	0	1	9	7	6
---	---	---	---	---	---	---

aspirante de:

Maestría en Tecnología de Cómputo

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

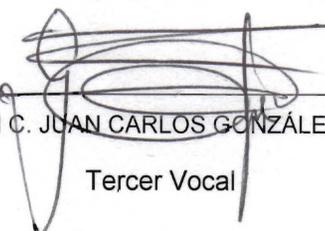
LA COMISIÓN REVISORA Directores de tesis

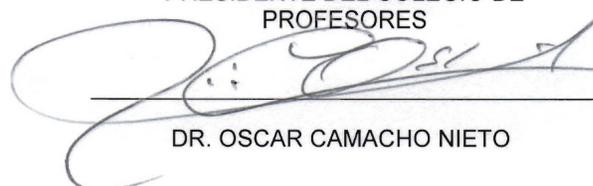

DR. GABRIEL SEPÚLVEDA CERVANTES
Primer Vocal


DR. OMAR ARTURO DOMÍNGUEZ RAMÍREZ
Segundo Vocal


M. EN C. EDUARDO VEGA ALVARADO
Presidente


DR. JUAN CARLOS HERRERA LOZADA
Secretario


M. EN C. JUAN CARLOS GONZÁLEZ ROBLES
Tercer Vocal

PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES

DR. OSCAR CAMACHO NIETO



S. E. P.
INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
CENTRO DE INNOVACION Y DESARROLLO
TECNOLÓGICO EN COMPUTO



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la **Ciudad de México** el día **02** del mes de **julio** del año **2012**, el que suscribe **Marco Antonio Román Pérez** alumno del Programa de **Maestría en Tecnología de Cómputo** con número de registro **B101976**, adscrito al **Centro de Innovación y Desarrollo Tecnológico en Cómputo**, manifiesta que es autor intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección del **Dr. Gabriel Sepúlveda Cervantes** y **Dr. Omar Arturo Domínguez Ramírez**, y cede los derechos del trabajo intitulado **Control de un robot manipulador mediante la interpretación de ondas cerebrales**, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección **m.antonio.roman@gmail.com**. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Marco Antonio Román Pérez

Dedicatorias

A mis padres por su apoyo y esfuerzo para lograr hacer de mí una mejor persona, los quiero mucho y estoy agradecido de que siempre han estado a mi lado para enseñarme y guiarme en el camino que he tomado.

Agradecimientos

A mis padres, por su apoyo y cariño sincero que me han demostrado toda la vida, porque han sido ejemplo de perseverancia y esfuerzo constante, gracias a ustedes hoy puedo alcanzar esta meta, gracias a sus consejos y enseñanzas. Este trabajo es para ustedes porque admiro su fortaleza y su energía para superar los obstáculos que la vida les presenta. Gracias por haber impulsado en mí el deseo de superación y el anhelo de triunfo en la vida, los amo con todo mi corazón.

A mis hermanos por su apoyo, porque siempre están cuando los necesito, por su confianza y por llenar mis días de alegría; espero que esto sea un estímulo y un ejemplo de que todo lo que queremos con esfuerzo y dedicación lo podemos lograr, los quiero mucho y espero puedan lograr sus sueños.

Al amor de mi vida, porque desde hace ya mucho tiempo has estado a mi lado, compartiendo una vida juntos, gracias por todo tú apoyo y cariño, porque has sido pieza fundamental para este logro, porque juntos podemos lograr todo lo que queramos, te amo Ney, gracias por estar conmigo y esto es solo el comienzo.

Al Dr. Gabriel Sepúlveda por el esfuerzo y tiempo dedicado para el desarrollo de ésta tesis, por el conocimiento brindado y por todas las experiencias compartidas que me han hecho crecer en el ámbito profesional.

Al Dr. Omar Arturo Domínguez por todos los consejos brindados para mejorar este trabajo, a los conocimientos compartidos y a la buena disposición que siempre tuvo para conmigo.

Al Dr. Edgar Alfredo Portilla por todo el apoyo y consejos brindados para el desarrollo de este trabajo, gracias por sus comentarios y por el tiempo dedicado para mejorar este trabajo.

Agradezco a CONACYT, a la SIP-IPN y al ICyT por el apoyo económico que facilitó la realización de mis estudios y el desarrollo de esta tesis.

Resumen

Una interfaz cerebro computadora (ICC) se basa en el análisis de las señales electroencefalográficas (EEG) obtenidas durante ciertas actividades mentales para controlar un dispositivo externo. El desempeño de una ICC dependerá de la habilidad del usuario para controlar sus patrones EEG, además de ser necesarias algunas sesiones de entrenamiento. Es importante también proveer algún tipo de retroalimentación al usuario que le permita observar su progreso.

El trabajo aquí presentado describe los componentes necesarios para el funcionamiento de una ICC, así como la implementación de un controlador tipo PD y un PID deslizante para realizar el control de posición de un robot manipulador, esto con el objetivo de que un usuario interactúe en un ambiente real utilizando solo sus pensamientos.

Los experimentos presentados fueron realizados utilizando el dispositivo EPOC de la empresa Emotiv, el cual cuenta con 14 electrodos activos y dos de referencia, los cuales permiten leer la actividad eléctrica producida por el cerebro.

El objetivo principal de este trabajo es desarrollar una interfaz cerebro máquina (ICM) que permita al usuario controlar la posición del efector final de un robot manipulador.

Abstract

A brain computer interface (BCI) is based on the analysis of the electroencephalographic signals (EEG), obtained during certain mental activities, to control an external device. The performance of BCI will depend on the ability of the user to control his EEG patterns, as well as being required some training sessions. It is also important to provide some kind of feedback that allows the user to monitor progress.

The work presented here describes the necessary components for the functioning of a BCI and the implementation of a PD and a sliding PID controller for position control of a manipulator robot, in order that a user interacts in a real environment using only his thoughts.

The experiments presented were performed using the EPOC device of the company Emotiv EPOC, which has 14 active electrodes and two reference ones, which can read the electrical activity produced by the brain.

The main objective of this work is to develop a brain machine interface (BMI) that allows the user to control the position of the end effector of a robot manipulator.

Índice General

1. Introducción	
1.1 Historia y definiciones	1
1.1.1 Robótica	1
1.1.2 Interfaz cerebro computadora	3
1.2 Estado del arte	6
1.3 Planteamiento del problema	10
1.4 Propuesta de solución	11
1.5 Objetivos	11
1.5.1 Objetivo general	11
1.5.2 Objetivos específicos	11
1.6 Estructura de la tesis	12
2. Modelo cinemático y dinámico del robot manipulador	
2.1 Morfología del robot manipulador	13
2.2 Articulaciones de un robot	14
2.3 Tipos de configuraciones morfológicas	15
2.3.1 Configuración cartesiana	16
2.3.2 Configuración cilíndrica	16
2.3.3 Configuración polar	17
2.3.4 Configuración angular	17
2.4 Modelo cinemático	18
2.4.1 Modelo cinemático directo	19
2.4.2 Modelo cinemático inverso	20
2.5 Modelo dinámico	22
3. Interfaz cerebro computadora	
3.1 Funcionamiento	31
3.2 Ondas cerebrales	32
3.3 Clasificación de las ICC	35
3.4 Emotiv EPOC	38
3.4.1 Entrenamiento	42
3.4.2 Acción	42
4. Control del manipulador	
4.1 Características mecánicas del manipulador	45
4.1.1 Espacio de trabajo	46
4.1.2 Especificaciones técnicas	47
4.2 Características electrónicas del manipulador	47
4.3 Control del robot manipulador	50
4.3.1 Control PD	51



4.3.2 Control PID deslizante	51
4.4 Pruebas de los controladores	51
5. Implementación de la interfaz cerebro máquina	
5.1 Interfaz cerebro máquina	57
5.2 Sensado de la actividad cerebral del usuario	58
5.3 Procesamiento de la actividad cerebral	61
5.3.1 Identificación de la actividad deseada	62
5.3.2 Comandos de control	64
5.4 Interacción con el ambiente	68
5.5 Experimentos realizados con la ICC	70
6. Conclusiones, aportes y trabajo a futuro	
6.1 Conclusiones	75
6.2 Aportes	76
6.3 Trabajo a futuro	77
Referencias	79
Apéndices	
A. Hojas técnicas	83

Índice de Figuras

Fig. 1 Eolípila de Herón.....	2
Fig. 2 El automóvil de da Vinci.....	2
Fig. 3 Robots Manipuladores Industriales.....	3
Fig. 4 Interfaz Cerebro Computadora EPOC, Emotiv.....	4
Fig. 5 Partes de una ICC.....	5
Fig. 6 Manipulador Bosch SR-800 [5].....	6
Fig. 7 Interfaz Gráfica [5].....	6
Fig. 8 Friend II Sistema controlado por una ICC [27].....	7
Fig. 9 Representación de una prueba durante los experimentos [6].....	8
Fig. 10 Matriz de estimulación.....	9
Fig. 11 Analogía del brazo robótico.....	14
Fig. 12 Tipos de Articulaciones.....	15
Fig. 13 Configuración Cartesiana [33].....	16
Fig. 14 Configuración Cilíndrica [33].....	16
Fig. 15 Configuración Polar [33].....	17
Fig. 16 Configuración Angular [33].....	17
Fig. 17 Modelado del manipulador en SolidWorks.....	19
Fig. 18 Sistema de referencia del robot.....	20
Fig. 19 Relación entre q_2 y q_3	21
Fig. 20 Sistema de referencia para el modelo dinámico del robot.....	24
Fig. 21 Sistema Nervioso Central [34].....	32
Fig. 22 Sistema Nervioso Central.....	32
Fig. 23 Diversos tipos de ondas cerebrales.....	33
Fig. 24 Neurona y sus partes.....	34
Fig. 25 Electrodo Comerciales.....	34
Fig. 26 a) Montaje de gorro con sensores para medición de EEG clínico y b) Montaje comercial para investigación de la marca Emotiv.....	36
Fig. 27 a) Diadema EPOC, b) receptor USB y c) sensores.....	39
Fig. 28 Configuración de la diadema.....	39
Fig. 29 Sistema Internacional 10-20.....	40
Fig. 30 Sección de expresiones.....	41
Fig. 31 Sección de emociones.....	41
Fig. 32 Sección Cognitiva.....	43
Fig. 33 Robot Manipulador.....	46
Fig. 34 Espacio de trabajo del manipulador vista lateral.....	46
Fig. 35 Motor Valeo utilizado como actuador.....	48

Fig. 36 Tarjeta Microcontroladora chipKIT Max32	48
Fig. 37 Diagrama de conexión eléctrica del puente H [A.1]	49
Fig. 38 Diagrama electrónico de conexión del robot manipulador.....	49
Fig. 39 Posiciones obtenidas y posiciones deseadas control PD en regulación.	52
Fig. 40 Error en X y Y Control PD en Regulación.....	52
Fig. 41 Posiciones obtenidas y posiciones deseadas control PD en seguimiento.....	52
Fig. 42 Error en X y Y Control PD en Seguimiento.....	53
Fig. 43 Círculo deseado en verde y círculo obtenido en color rojo.	53
Fig. 44 Posiciones obtenidas y posiciones deseadas control PID en regulación.	54
Fig. 45 Error en X y Y Control PID en Regulación.	54
Fig. 46 Posiciones obtenidas y posiciones deseadas control PID deslizante en seguimiento.	54
Fig. 47 Error en X y Y Control PID deslizante en Seguimiento.	55
Fig. 48 Círculo deseado en verde y círculo obtenido en color rojo.	55
Fig. 49 Humectación de los electrodos de la diadema.....	59
Fig. 50 Colocación de los sensores en la diadema.....	59
Fig. 51 Colocación de la diadema.....	60
Fig. 52 Colocación de la diadema de acuerdo al cráneo del usuario	60
Fig. 53 Usuario utilizando la diadema EPOC.....	61
Fig. 54 Interfaz de entrenamiento	63
Fig. 55 Aplicación Desarrollada.	64
Fig. 56 Diagrama de ejecución de la aplicación	65
Fig. 57 Ejecución de la aplicación	67
Fig. 58 Posición inicial del robot	68
Fig. 59 Funcionamiento del control del robot.....	69
Fig. 60 Interfaz Cerebro Máquina.....	70
Fig. 61 Control de un robot tipo delta.....	71
Fig. 62 Resultados obtenidos en el control de un robot Falcon.....	72
Fig. 63 Control de un robot móvil diferencial	72
Fig. 64 Plataforma de tres grados de libertad	73

Capítulo 1

Introducción

1.1 Historia y definiciones

1.1.1 Robótica

Desde el inicio de los tiempos el hombre siempre se ha preocupado por mejorar su calidad de vida, desarrollando cada vez nuevas y mejores herramientas que le faciliten el trabajo de la vida cotidiana, sin embargo, a partir del desarrollo de las computadoras el avance tecnológico ha dado pasos agigantados teniendo equipo más sofisticado y con mejores prestaciones, lo que se traduce en un mejor desempeño y una velocidad de procesamiento mayor.

La robótica ha sido desde hace algunos años atrás un área significativa en la ingeniería. Involucra diferentes disciplinas del conocimiento como son: ingeniería mecánica, electrónica, informática, control entre otras. De acuerdo a la Real Academia de la lengua Española (RAE[1]) se define como: la técnica que aplica informática al diseño y empleo de aparatos que, en sustitución de personas, realizan operaciones o trabajos, por lo general en instalaciones industriales.

La historia de la robótica y la forma en que evoluciona se encuentra intrínsecamente ligada a la necesidad inherente del ser humano de crear máquinas o mecanismos que faciliten su vida diaria o la hagan más placentera. Existen registros de autómatas creados en el siglo I antes de Cristo, el libro “Los autómatas” escrito por Herón de Alejandría y considerado el primer libro de robótica de la historia, explica el funcionamiento de algunos artefactos diseñados por él mismo, como la primera máquina de vapor llamada *eolípila*, que se muestra en la figura 1.



Fig. 1 Eolípila de Herón



Fig. 2 El automóvil de da Vinci

Leonardo da Vinci (1492) cuyos escritos muestran una enorme cantidad de inventos prácticos y realistas como lo son bombas hidráulicas, mecanismos de manivelas, varios autómatas, el automóvil (figura 2), por mencionar algunos.

En 1800 aparecen algunos juguetes mecánicos japoneses creados por Hisashige Tanaka capaces de servir té, disparar flechas y pintar, pero no es hasta 1921 cuando surge el primer autómatas de ficción llamado “robot” en la obra dramática “*Rossum’s Universal Robots / R.U.U.*” del escritor checo Karel Capek llamado así gracias a la palabra checa “*robota*” que significa servidumbre o trabajo forzado.

En la actualidad la mayoría de las industrias cuentan con equipo automatizado, y en muchos casos robots manipuladores que realizan las tareas de forma rápida y eficiente; esto debido a que pueden ser reprogramados y aplicados en un número casi ilimitado de funciones constituyendo así una solución rentable. En la figura 3 podemos observar algunos de los robots manipuladores usados actualmente en la industria.

De acuerdo a la RIA (Robot Institute of America) el robot industrial se define como “*Manipulador multifuncional reprogramable con varios grados de libertad, capaz de manipular materias, piezas, herramientas o dispositivos especiales según trayectorias variables programadas para realizar tareas diversas*” [2], y de acuerdo a la Asociación Francesa de Normalización podemos tener dos conceptos mas completos del término manipulador y robot.

Manipulador: mecanismo formado generalmente por elementos en serie, articulados entre sí, destinado al agarre y desplazamiento de objetos. Es multifuncional y puede ser gobernado directamente por un operador humano o mediante dispositivo lógico [30].



Fig. 3 Robots Manipuladores Industriales

Robot: manipulador automático servo-controlado, reprogramable, polivalente, capaz de posicionar y orientar piezas, útiles o dispositivos especiales, siguiendo trayectorias variables reprogramables, para la ejecución de tareas variadas. Normalmente tiene la forma de uno o varios brazos terminados en una muñeca. Su unidad de control incluye un dispositivo de memoria y ocasionalmente de percepción del entorno. Normalmente su uso es el de realizar una tarea de manera cíclica, pudiéndose adaptar a otra sin cambios permanentes en su material [30].

De los robots que existen en la industria la mayoría utilizan un control proporcional derivativo, el cual es muy sencillo y fácil de implementar, aunque la tarea de sintonizar las ganancias del controlador suele en algunos casos ser complicada y depende de la pericia del personal encontrar los valores adecuados [3][4].

1.1.2 Interfaz cerebro computadora

Para interactuar con sistemas robóticos se han desarrollado distintas interfaces dependiendo de la necesidad a cubrir (teclados, ratones, monitores, joysticks, por mencionar algunas), las cuales permiten al usuario comunicarse con la máquina, sin embargo, no son formas naturales de llevar a cabo la interacción debido a que el usuario debe aprender a utilizarlas; por ejemplo, si el usuario quiere escribir una letra “A” en la pantalla ha aprendido que oprimiendo esa letra en el teclado se realiza la acción que deseaba hacer.



Fig. 4 Interfaz Cerebro Computadora EPOC, Emotiv

No obstante el hecho de poder interactuar con máquinas solo con el pensamiento hasta hace pocos años era considerado como imposible o poco probable, sin embargo actualmente la idea de este tipo de tecnología es de gran interés por lo que en varios Centros de Investigación se encuentran trabajando en interfaces cerebro computador o cerebro máquina (ICC y ICM respectivamente), algunos autores consideran una ICM como una interfaz que incluye una ICC dentro de ella y algunos otros definen a la ICM como un caso particular de una ICC [31].

El objetivo de este tipo de investigaciones consiste en desarrollar una interfaz que permita leer la actividad eléctrica del cerebro y mediante la información obtenida interactuar con una computadora u otra máquina, sin embargo, el reto tecnológico es enorme, dado que involucra un conjunto fuertemente multidisciplinario de conocimiento como es la intersección de las neurociencias, la ingeniería biomédica y las ciencias de la computación, es decir, desarrollar tecnología lo suficientemente robusta para ejecutar la acción que el usuario piensa es algo complicado, sin embargo, ya se han realizado algunas interfaces con resultados muy alentadores.

Las interfaces cerebro computadora tienen una característica trascendente que las convierte en un importante objeto de estudio científico y esto es que la cantidad de aplicaciones que se pueden crear con esta interfaz es enorme, desde aplicaciones médicas en las que los pacientes pueden ser tratados para rehabilitación y recuperación de habilidades motoras hasta la lucrativa industria de los videojuegos, para la cual pueden crearse aplicaciones que hagan uso de esta interfaz como mando, creando así la posibilidad de que la interacción con el mundo virtual sea totalmente distinta a la experimentada hasta ahora.

Podemos entonces definir a la Interfaz Cerebro Computadora como un sistema de ingeniería capaz de traducir nuestras intenciones en interacción real con un mundo físico o virtual [8]. El funcionamiento esencial de una ICC consiste en medir la actividad eléctrica generada por el cerebro, procesar la información para obtener los datos de interés y posteriormente interactuar con el entorno de la forma en que el usuario desea, como lo podemos ver en la figura 5.



Fig. 5 Partes de una ICC

La ICC consta de las siguientes partes:

Sensor: es el encargado de hacer la medición eléctrica de las diferencias de voltaje generadas por la actividad cerebral del usuario. La magnitud de estas diferencias de voltaje se mide en micro volts, por tal motivo es necesario usar electrodos de buena calidad fabricados con materiales de excelente conductividad eléctrica, como el oro. Asimismo para mejorar la conductividad es necesario humectar los electrodos con solución salina para asegurar que las lecturas sean correctas.

Motor de procesamiento de Señal: Este módulo recibe las lecturas realizadas por los sensores y aplica una serie de filtros para decodificar la intención del usuario y así poder utilizarlas como señales de control. Existen dos formas de saber la intención del usuario mediante estas interfaces, una es estimulando al usuario y revisando sus reacciones ante los estímulos y la otra es entrenando al usuario para que por voluntad sea capaz de generar actividad eléctrica específica que pueda ser utilizada como señal de control, esto se explicará de forma mas clara en el capítulo 3.

Aplicación: Como se mencionó anteriormente, la aplicación es la forma en que una ICC interactúa con su entorno y éstas pueden ser muchas y muy variadas, en la imagen se muestra un robot manipulador, sin embargo, se pueden controlar sillas de ruedas, robots móviles, escribir en una computadora, controlar videojuegos, entre otras.

1.2 Estado del arte

Actualmente se han desarrollado diversos trabajos en los que se pretende controlar equipos robóticos utilizando interfaces cerebro computadora de modo tal que el usuario sólo con su pensamiento controle la acción o no acción del robot. Para ello hacen uso de una matriz de imágenes que representan acciones que el robot puede desempeñar, y mediante las reacciones del usuario se elige la opción a realizar.

Algunos proyectos como [5] utilizan esta técnica para controlar la posición de un robot, en este caso no explican claramente el tipo de control que implementan, sin embargo, resulta interesante el sistema de probabilidad que diseñaron para que el usuario escoja la posición a la que desea se mueva el robot. En las figuras se muestra una imagen del robot controlado (Fig. 6) y la interfaz gráfica presentada al usuario (Fig. 7):

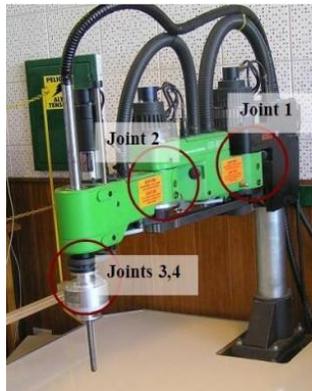


Fig. 6 Manipulador Bosch SR-800 [5]

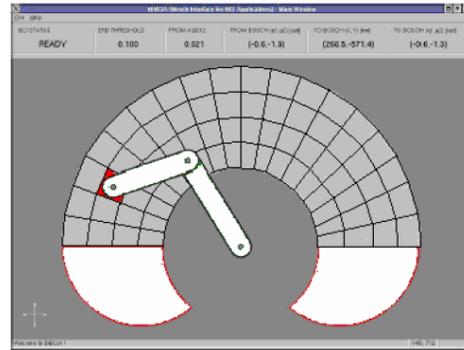


Fig. 7 Interfaz Gráfica [5]

Gran parte de los trabajos realizados con Interfaces Cerebro Computadora utilizan las decisiones del usuario solo para escoger entre rutinas ya programadas en el robot o máquina a controlar de esta forma la intención del usuario no interfiere en el control del robot, lo que permite que el control sea mas sencillo de implementar.

Tal es el caso de [27] donde se desarrolló un control para un sistema de rehabilitación semiautónomo utilizando también una ICC, es decir los usuarios ejercen un control de bajo nivel sobre un brazo robótico de asistencia o apoyo a ellos mismos. El sistema robótico de rehabilitación permite a usuarios con alguna limitación en el movimiento de piernas y/o brazos controlarlo con comandos de bajo nivel (ej. “toma la botella”), interviniendo también en la ejecución de la tarea, de forma que si ven que algo va mal pueden modificar el comportamiento del brazo o bien detenerlo.

El sistema robótico de rehabilitación utilizado es llamado Friend II el cual está siendo desarrollado para ayudar a personas cuádruplégicas a realizar tareas cotidianas e incrementar su autonomía. Consiste en una silla de ruedas eléctrica equipada con un manipulador de 7 grados de libertad, así como sensores y actuadores, además cuenta con una cámara montada sobre la cabeza del usuario y una bandeja inteligente con superficie táctil. Como se muestra en la figura 8.



Fig. 8 Friend II Sistema controlado por una ICC [27]

El control del sistema es de muy alto nivel por ejemplo cuando el usuario ordena al sistema pensando “Toma esa botella” en forma inmediata el sistema planea una secuencia de acciones requeridas para resolver esa tarea. Estas acciones involucran los sensores y actuadores del sistema y si es necesario la intervención del usuario.

El principal aporte de este trabajo es que permite al usuario ajustar la posición del manipulador y del efector final en el sistema FRIEND II, el usar una ICC para controlar directamente un manipulador hace al sistema potencialmente útil para personas con ciertas limitaciones motoras.

Otro proyecto interesante es el desarrollado en [6] donde se evalúan las posibles ventajas de utilizar un robot móvil con una cámara como retroalimentación para el usuario y observar si la información proporcionada por la cámara provoca una mayor inmersión por parte del usuario y se mejore el grado de concentración. Para llevar a cabo su análisis realizaron dos experimentos: el primero fue entrenar la ICC utilizando retroalimentación visual de imágenes y un cursor; y el segundo experimento fue entrenar la ICC pero con una retroalimentación proveniente de la cámara a bordo del robot. Los

Capítulo 1. Introducción

resultados de las pruebas fueron medidos para evaluar la eficacia de la retroalimentación.

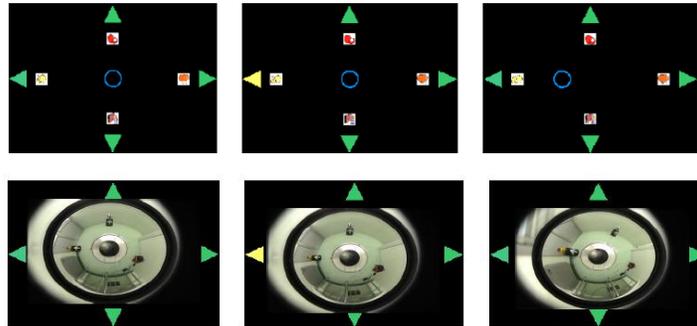


Fig. 9 Representación de una prueba durante los experimentos [6]

En la figura 9 podemos observar la retroalimentación dada al usuario en cada experimento, la parte superior es el experimento 1 y la inferior el 2. Sin embargo, los resultados del experimento 2 fueron similares a los del experimento 1, debido a que las señales de control fueron tomadas de la misma forma; podemos entonces concluir que este tipo de tecnología, oportunamente revisada y ajustada, podría conducir a una extensión real de las funciones sensoriales del usuario en el entorno de la vida cotidiana pero es necesario hacer más investigación y obtener el conocimiento necesario para lograr que el sistema trabaje de forma eficiente.

En [7] se presenta el control de la navegación de un robot NXT 2.0 lego a través de la adquisición y análisis de ondas cerebrales vía EEG mediante el desarrollo de un sistema de clasificación utilizando técnicas de Inteligencia Artificial (IA). El sistema se basa en el uso de señales provenientes de un magnetoencefalograma (MEG) multicanal; estas señales son enviadas en tiempo real a una computadora para jugar pong (el objetivo del juego es mover un cursor hacia arriba y abajo para golpear una pelota).

El principal aporte de este trabajo fue que lograron el desplazamiento del robot lego a través del puerto paralelo y para poder emplear la información de los MEG, éstos se convirtieron al formato ASCII para exportarlas a MatLab y ahí trabajar con ellas.

Utilizaron un software comercial de adquisición de datos llamado CTF MEG [38] que se ejecuta en Linux, el cual permite simultáneamente leer y escribir archivos mediante diferentes procesos para guardar los datos del MEG.

En el proyecto [8] se propone el desarrollo de un prototipo de ICC basado en el registro de potenciales evocados cognitivos P-300 mediante electroencefalografía. El prototipo usa un electroencefalógrafo de seis canales para la adquisición de las señales, y

por medio de una matriz de estimulación visual (Fig. 10) que contiene las letras del abecedario e íconos asociados a ellas permite que el usuario escriba palabras o elabore mensajes con los íconos.

Utilizan un sistema de propósito general para interfaces cerebro computadora llamado BCI2000 [9] el cual es usado para adquisición de datos, presentación de estímulos y aplicaciones de monitoreo del cerebro, tales señales se toman de potenciales evocados P300, el cual es un potencial relacionado con eventos es decir cuando hay una respuesta afirmativa del usuario esa reacción es registrada mediante el EEG como una deflexión positiva de voltaje con latencia de unos 300ms aproximadamente aunque puede variar dependiendo de cada persona.

Como se puede observar en la imagen el usuario observa una matriz que se utiliza para decodificar sus intenciones, el proceso para hacerlo consiste en iluminar filas y columnas de forma secuencial, de esta forma si el usuario esta pensando en escoger la letra "C" por mencionar un ejemplo, cuando la primera fila se ilumina se genera una reacción en el cerebro del usuario que es detectada mediante los electrodos colocados sobre su cráneo, posteriormente se iluminan las columnas y se espera hasta encontrar la misma reacción del usuario al iluminarse la columna en la que se encuentra la letra C, una vez hecho esto el sistema puede ejecutar la acción asociada a este elemento de la matriz.

Este prototipo está diseñado para pacientes con discapacidad motora y con problemas de comunicación. Para la adquisición y el procesamiento de las señales y los algoritmos de traslación, el dispositivo hace uso tanto del software BCI2000[9], desarrollado en el Instituto Wadsworth, como del software MATLAB [10].

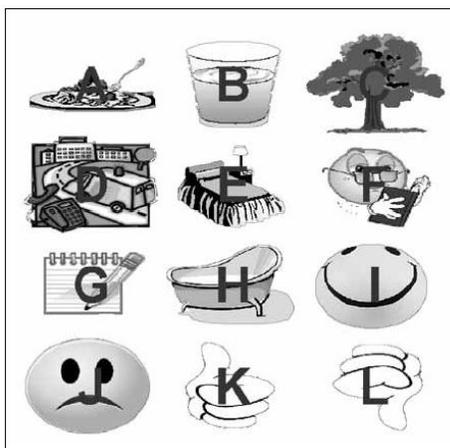


Fig. 10 Matriz de estimulación



Capítulo 1. Introducción

Actualmente se han desarrollado algunos dispositivos de alta resolución para la adquisición y procesamiento de señales neurológicas, los cuales utilizan un conjunto de sensores para sintonizar las señales eléctricas producidas por el cerebro y de esta forma detectar pensamientos, sentimientos e incluso expresiones faciales.

Tal es el caso del dispositivo EPOC Neuroheadset [11], el cual cuenta con 14 sensores, un giróscopo y es inalámbrico, este dispositivo fue adquirido para el desarrollo de aplicaciones y de esta tesis.

1.3 Planteamiento del problema

Un problema que afecta a la mayoría de las ICCs actuales es que se basan en el sistema de potenciales evocados P300 por lo que la velocidad de acción es muy baja, es decir, para tomar una decisión el sistema debe confirmar que la acción a realizar es la correcta por lo que cada orden a ejecutarse requiere de por lo menos dos veces el mismo proceso y debido a esto el sistema se vuelve lento, sin embargo, hay otras metodologías que se basan en el reconocimiento de pensamientos particulares, es decir, el usuario piensa en algún movimiento (por ejemplo mover el brazo) y en cuanto el sistema detecta la orden la actividad se lleva a cabo. Este último tipo de sistemas ha demostrado ser más rápidos para actuar y existen muy pocos trabajos que utilicen este tipo de tecnología, algunos de los prototipos más avanzados son los desarrollados por la empresa japonesa Honda sin embargo todo el trabajo realizado por esta empresa se considera confidencial por lo tanto es necesario seguir investigando esta tecnología para dar a conocer los avances y desarrollar ICCs cada vez más rápidas y precisas.

Esto es desde el punto de vista técnico, sin embargo otro problema desde el punto de vista médico es el desarrollo de prótesis de extremidades, las cuales generalmente o bien son estéticas o bien funcionales, esto debido a que el usuario debe ser capaz de controlarlas de la forma más sencilla y cómoda posible.

Actualmente las prótesis más avanzadas toman las señales de control directamente de los nervios del usuario, sin embargo este tipo de tecnología solo la pueden utilizar personas que han perdido alguna extremidad recientemente ya que con el paso del tiempo al no ser utilizados los nervios dejan de funcionar apropiadamente imposibilitando el uso de prótesis de éste tipo.

Por lo que para las personas que sufrieron alguna pérdida en años anteriores les resulta imposible aspirar a este tipo de tecnología, además de ser muy costosas y requerir cirugía para colocar correctamente la prótesis.

El desarrollo científico sobre este tipo de interfaz es necesario para estar a la vanguardia en tecnología y generar conocimiento que puede ser útil y beneficiar a la sociedad en general, a pesar de que actualmente algunos Centros de Investigación y Universidades del país se encuentran trabajando con estas tecnologías el conocimiento científico es muy escaso y relativamente nuevo.

1.4 Propuesta de solución

Por lo anterior, resulta evidente la necesidad de desarrollar tecnología en el mejoramiento de prótesis que puedan ser utilizadas por más personas, que sean sencillas de utilizar, más baratas y sin la necesidad de realizar intervenciones quirúrgicas para colocarlas.

Por tal motivo como propuesta de solución se pretende integrar las tecnologías existentes y necesarias para desarrollar un sistema capaz de leer la actividad neuronal de las personas mediante el dispositivo EPOC Neuroheadset [11] y con estas lecturas desarrollar un conjunto de algoritmos que permitan interpretarlas de forma tal que el usuario sea capaz de mover la posición del efector final de un robot manipulador de tres grados de libertad, esto con el objetivo de generar la tecnología necesaria para posteriormente desarrollar interfaces cerebro computadora de forma más sencilla, permitiendo así desarrollar más y mejores proyectos en un futuro.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general

- Desarrollar una Interfaz Cerebro Máquina (ICM) que permita al usuario controlar la posición del efector final de un robot manipulador de tres grados de libertad.

1.5.2 Objetivos específicos

- Implementar un sistema de control para el robot manipulador mediante el uso de un microcontrolador.
- Implementar la interfaz cerebro máquina (ICM) basada en el reconocimiento de pensamientos y no en secuencias de imágenes.

- Integrar la ICC y el sistema de control para implementar la interfaz cerebro máquina (ICM).

1.6 Estructura de la tesis

En el capítulo dos se hace una revisión de la morfología de los robots manipuladores, así como de las distintas configuraciones que pueden adoptar con base en las distintas articulaciones existentes; asimismo se presentan los modelos de la cinemática directa e inversa, y el modelo dinámico del robot manipulador de tres grados de libertad utilizado en esta tesis.

El capítulo tres describe el funcionamiento general de las interfaces cerebro computadora, cómo se clasifican y cómo se genera la actividad eléctrica en el cerebro que constituye la base del funcionamiento de esta interfaz, además se habla de la diadema que fue adquirida para el desarrollo de este trabajo y de las distintas partes que la conforman.

En el capítulo cuatro se exponen las características mecánicas y electrónicas del robot manipulador controlado; asimismo se describen las leyes de control que fueron implementadas para controlarlo.

El capítulo cinco contiene la implementación de la interfaz cerebro máquina presentando la forma en que es obtenida la información, como es procesada por la aplicación diseñada y la forma en que el robot controlado interactúa con el entorno.

Por último en el capítulo seis se muestran las conclusiones de esta tesis, se mencionan también las aportaciones realizadas y los trabajos a futuro que se pueden originar.

Capítulo 2

Modelo cinemático y dinámico del robot manipulador

2.1 Morfología del robot manipulador

Mecánicamente se puede definir a un robot como una cadena cinemática formada por eslabones rígidos unidos mediante articulaciones que permiten un movimiento relativo entre cada dos eslabones consecutivos [12].

Un elemento aislado puede moverse libremente por el espacio, dicho movimiento se puede describir en tres traslaciones y tres rotaciones geométricas independientes con respecto a una base referida al espacio de tres dimensiones, como se mencionó en el concepto anterior un robot consiste en eslabones unidos mediante articulaciones, al realizarse éstas uniones varios de los movimientos que un cuerpo libre puede realizar desaparecen, sin embargo alguno o algunos pueden permanecer dependiendo del tipo de unión. Los movimientos que permanecen se denominan grados de libertad.

De forma concreta se puede decir que los grados de libertad son el número mínimo de variables o movimientos independientes necesarios para definir el estado cinemático de un mecanismo o sistema mecánico. En este trabajo se utiliza un robot manipulador de tres grados de libertad.

La constitución física de la mayor parte de robots manipuladores industriales guardan una gran similitud con la anatomía de las extremidades superiores del cuerpo humano, por lo que también se les suele llamar brazos robóticos y para hacer referencia a los elementos que componen el robot también se utilizan términos como cintura, hombro, muñeca, codo, por mencionar algunos. En la figura 11 se muestra ésta similitud.

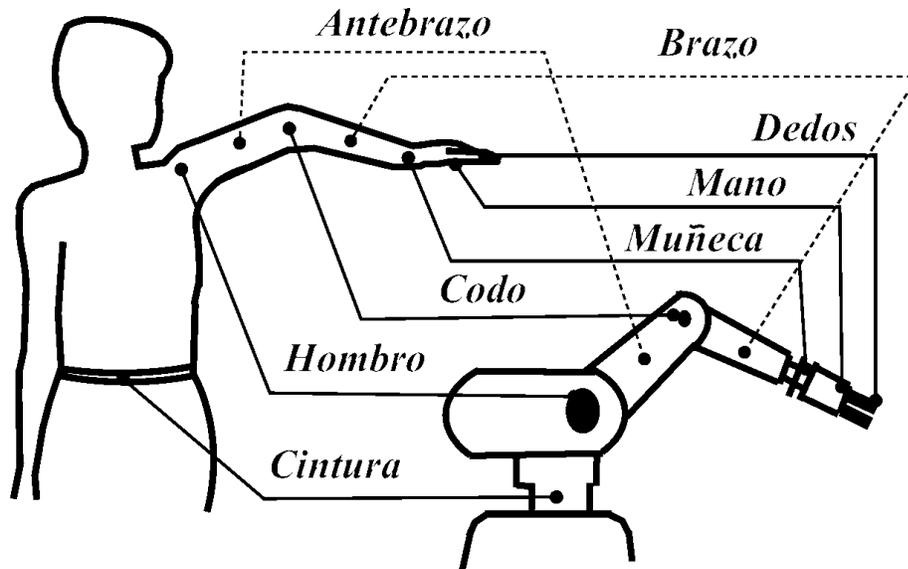


Fig. 11 Analogía del brazo robótico.

2.2 Articulaciones de un robot

A las uniones que se forman entre los eslabones de un robot se les llama articulaciones y proveen al robot de por lo menos un grado de libertad dependiendo del tipo de articulación que se presente en la unión. Los movimientos posibles de una articulación pueden ser de desplazamiento, giro o una combinación de ambos.

La mayoría de los manipuladores utilizan articulaciones de tipo prismática o rotacional, sin embargo existen seis tipos de articulaciones y son [32]:

- **Prismática:** Tipo de articulación que permite realizar movimientos lineales en una sola dirección, esta articulación añade un grado de libertad al robot.
- **Rotacional:** Esta articulación agrega también un grado de libertad al robot pero el tipo de movimiento que realiza es de giro como su nombre lo indica.
- **Tornillo o Helicoidal:** Esta articulación es similar a la prismática, permite un grado de libertad pero la forma en que permite el movimiento es a través de un tornillo.

2.3 Tipos de configuraciones morfológicas

- Planar: Esta articulación permite dos grados de libertad, uno de desplazamiento y el otro de rotación.
- Cilíndrica: Articulación que añade dos grados de libertad al robot, uno de desplazamiento y el otro de rotación, es similar al planar, pero podemos ver sus diferencias en la figura 12.
- Esférica o Rótula: Articulación que permite añadir tres grados de libertad al robot, los tres de tipo rotacional.

En la figura 12 se muestra una representación de los seis tipos de articulaciones existentes.

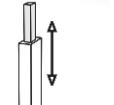
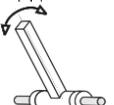
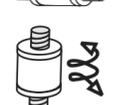
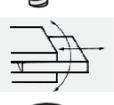
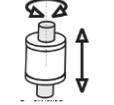
Ilustración	Nombre	Tipo
	Prismática	P (1GDL)
	Rotacional	R (1DL)
	Helicoidal	H (1GDL)
	Planar	Pl (2GDL)
	Cilíndrica	C (2GDL)
	Esférica	S (3GDL)

Fig. 12 Tipos de Articulaciones

2.3 Tipos de configuraciones morfológicas

Al hablar de la configuración morfológica nos referimos a la forma física que toma el robot manipulador y que depende completamente de los tipos de articulaciones presentes en las uniones de éste. La estructura del robot y la forma en que se relacionan los elementos o eslabones permiten saber que parámetros se deben conocer para determinar la posición y orientación del efector final del manipulador.

Capítulo 2. Modelo cinemático y dinámico del robot manipulador

El uso de algunas articulaciones u otras, o bien, la combinación de éstas dan lugar a diferentes configuraciones, cada una con características específicas que deben ser tomadas en cuenta al diseñar o construir un robot. Existen cuatro configuraciones clásicas en cuanto a manipuladores se refieren, las más comunes hacen uso de tres articulaciones que permitan o faciliten el posicionamiento del efector final del manipulador en la tarea a realizar.

2.3.1 Configuración cartesiana

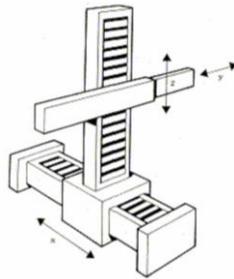


Fig. 13 Configuración Cartesiana [33]

Esta configuración para manipuladores utiliza tres articulaciones de tipo prismáticas (PPP) . Se utiliza en ambientes industriales generalmente para transportar cargas de gran volumen. Determinar la posición del efector final de estos manipuladores es muy sencillo, ya que las variables articulares corresponden a las coordenadas que toma el extremo del brazo, esto se debe a que los tres grados de libertad corresponden directamente a los movimientos localizados en los ejes x , y y z . Esta configuración resulta poco práctica para espacios cerrados y su volumen de trabajo es pequeño comparado con el que se puede obtener de otras configuraciones (Fig. 33).

2.3.2 Configuración cilíndrica

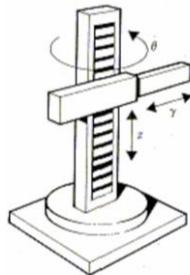


Fig. 14 Configuración Cilíndrica [33]

Configuración que cuenta con dos articulaciones prismáticas y una rotacional (2P, 1R), como se puede observar en la figura 14. Generalmente la primer articulación suele

2.3 Tipos de configuraciones morfológicas

ser la rotacional generando una estructura RPP. La posición del efector final se obtiene utilizando las variables articulares como coordenadas cilíndricas. Suponiendo que alcanza realizar un giro de 360 grados y cuenta con un rango de desplazamiento L , su volumen de trabajo es similar a un toroide generado por un cuadrado de radio interior L y radio exterior $2L$.

2.3.3 Configuración polar

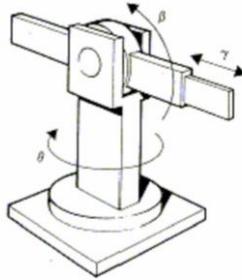


Fig. 15 Configuración Polar [33]

También llamada configuración esférica, cuenta con dos articulaciones rotacionales y una prismática, es una estructura de tipo RRP de tres grados de libertad. En este caso las variables articulares expresan la posición del extremos del tercer eslabón en coordenadas polares. Suponiendo que cuenta con tres eslabones de longitud L , y que el manipulador es capaz de realizar un giro de 360 grados, su espacio de trabajo se puede definir como una esfera de radio $2L$ menos otra esfera de radio L .

2.3.1 Configuración angular

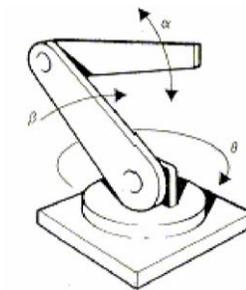


Fig. 16 Configuración Angular [33]

Esta configuración cuenta con tres articulaciones de tipo rotacional (estructura RRR), es una de las configuraciones mas utilizadas tanto en la industria como en las escuelas y Centros de Investigación, ya que tiene un mejor acceso a espacios de trabajo cerrados. Generalmente el volumen de trabajo es esférico y dada su configuración son también llamados brazos articulados ya que se parecen al brazo humano porque cuentan

con una cintura, hombro, codo y generalmente muñeca, como lo podemos observar en las figuras 11 y 16. Para el desarrollo de ésta tesis se hace uso de un manipulador con configuración angular, del cual se hablará ampliamente en el apartado siguiente.

2.4 Modelo cinemático

El modelo cinemático estudia el movimiento del robot con respecto a un sistema de referencia fijo [13]. La cinemática se interesa por la descripción analítica del movimiento espacial del robot como una función del tiempo, y en particular por las relaciones existentes entre la posición y orientación de la herramienta o efector final del robot con los valores que toman las coordenadas de sus articulaciones.

Existen dos problemas fundamentales a resolver con respecto a la cinemática del robot y estos son la cinemática directa y la inversa. La cinemática directa consiste en determinar cuál es la posición y orientación del extremo final del robot dados los valores de las articulaciones y parámetros geométricos de los elementos del robot, mientras que la cinemática inversa resuelve la configuración que debe adoptar el robot para llevarlo a una posición y orientación conocida.

Como se mencionó anteriormente, para la realización de esta tesis se hace uso de un robot manipulador de tres grados de libertad con configuración angular; en la figura 17 se muestran algunas vistas del robot que se modeló haciendo uso del software SolidWorks. Estos modelos fueron maquinados en la UPIITA (Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería y Tecnología Avanzadas) y ensamblados e instrumentados en el CIDETEC (Centro de Innovación y Desarrollo Tecnológico en Cómputo), ambos pertenecientes al IPN (Instituto Politécnico Nacional).

Como se observa en la figura 17 el robot cuenta con tres grados de libertad (cintura, hombro y codo) y tiene una característica muy importante, dado su diseño mecánico, posee la capacidad de plegarse sobre si mismo, reduciendo el espacio que ocupa. El manipulador se construyó con fines de exploración espacial, por tal motivo fue diseñado con éstas características.

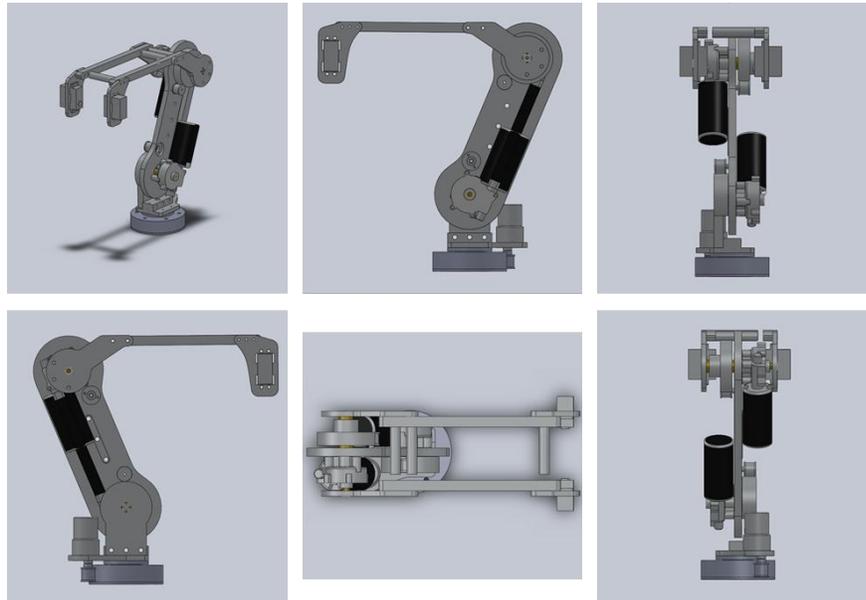


Fig. 17 Modelado del manipulador en SolidWorks

2.4.1 Modelo cinemático directo

Después de haber establecido la configuración del robot, así como sus características se procede a calcular la cinemática directa. En la figura 18 se observa el sistema de referencia fijo con respecto al cual calculamos la cinemática directa e inversa del robot, la configuración de los ejes se debe a que el modelo cinemático fue utilizado para realizar una simulación del manipulador en una aplicación, la cual utilizaba este sistema de referencia [14].

La cinemática directa, se calculó de forma geométrica, considerando el sistema de referencia, los ángulos (q_1, q_2, q_3) así como los eslabones (l_1, l_2, l_3), los cuales se pueden observar en la figura 17 y con base en ello, la posición del efector final, queda expresada con las siguientes ecuaciones:

$$P_x = [l_2 \cos(q_2) + l_3 \cos(q_2 + q_3)] \cos(q_1) \quad (2.1)$$

$$P_y = l_1 + l_2 \sin(q_2) + l_3 \sin(q_2 + q_3) \quad (2.2)$$

$$P_z = [l_2 \cos(q_2) + l_3 \cos(q_2 + q_3)] \sin(q_1) \quad (2.3)$$

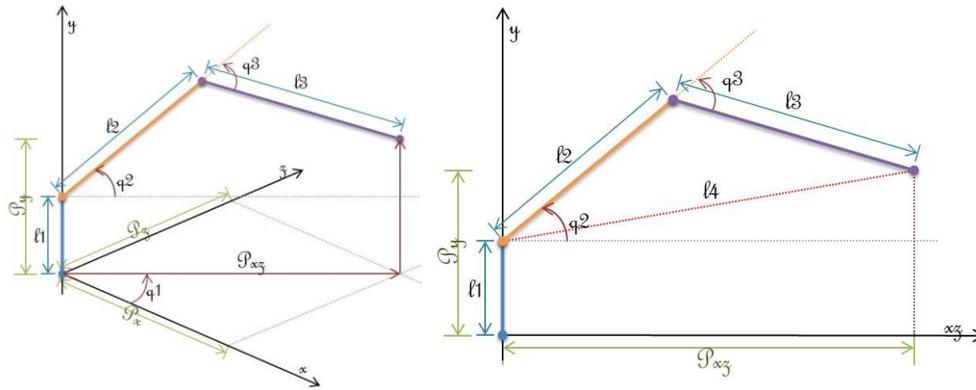


Fig. 18 Sistema de referencia del robot

Dónde: P_x es la posición respecto al eje x , P_y posición respecto al eje y , P_z posición respecto al eje z , l_1 longitud del primer eslabón, l_2 longitud del segundo eslabón, l_3 longitud del tercer eslabón, q_1 ángulo respecto el eje x , q_2 ángulo medido del plano xz , al segundo eslabón, q_3 ángulo medido del segundo eslabón al tercer eslabón, P_x es la proyección en el eje x , P_z es la proyección en el eje z .

2.4.2 Modelo cinemático inverso

De la misma forma en que la cinemática directa fue calculada de forma geométrica, la cinemática inversa es calculada. Como se puede observar q_1 se encuentra directamente relacionado con la posición en el eje z y x del efector final, P_z y P_x , de donde surge la siguiente ecuación:

$$\tan(q_1) = \frac{P_z}{P_x} \quad \therefore q_1 = \tan^{-1}\left(\frac{P_z}{P_x}\right) \quad \text{Ec. 2.4}$$

Lo siguiente a calcular es q_3 , de acuerdo a la figura 18 se puede establecer que:

$$P_{xz}^2 = P_x^2 + P_z^2 \quad (2.5)$$

$$l_4^2 = (P_y - l_1)^2 + P_{xz}^2 \quad (2.6)$$

Dónde: l_4 es la longitud del eje y hacia el efector final y P_{xz} es la proyección en el plano xz .

$$(P_y - l_1)^2 + P_{xz}^2 = l_2^2 + l_3^2 - 2l_2l_3 \cos(q_3) \quad (2.7)$$

$$\cos(q_3) = \frac{-P_x^2 - (P_y - l_1)^2 - P_z^2 + l_2^2 + l_3^2}{2l_2l_3} \quad (2.8)$$

$$\sin(q_3) = \pm\sqrt{1 - \cos^2(q_3)} \quad (2.9)$$

$$q_3 = \tan^{-1}\left(\frac{\pm\sqrt{1 - \cos^2(q_3)}}{\cos(q_3)}\right) \quad (2.10)$$

$$\therefore q_3 = \tan^{-1}\left(\frac{\pm\sqrt{1 - \cos^2\left(\frac{-P_x^2 - (P_y - l_1)^2 - P_z^2 + l_2^2 + l_3^2}{2l_2l_3}\right)}}{\cos\left(\frac{-P_x^2 - (P_y - l_1)^2 - P_z^2 + l_2^2 + l_3^2}{2l_2l_3}\right)}\right) \quad (2.11)$$

En la figura 19 se puede observar que, q_2 es la diferencia entre los ángulos α y β .

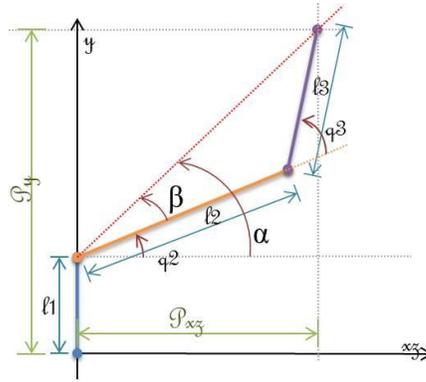


Fig. 19 Relación entre q_2 y q_3

$$q_2 = \alpha - \beta \quad (2.12)$$

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{Py - l_1}{Px_3}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{Py - l_1}{\pm\sqrt{P_x^2 + P_z^2}}\right) \quad (2.13)$$

$$\beta = \tan^{-1}\left(\frac{l_3 \sin(q_3)}{l_2 + l_3 \cos(q_3)}\right) \quad (2.14)$$

$$q_2 = \tan^{-1}\left(\frac{Py - l_1}{\pm\sqrt{P_x^2 + P_z^2}}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{l_3 \sin(q_3)}{l_2 + l_3 \cos(q_3)}\right) \quad (2.15)$$

2.5 Modelo dinámico

La dinámica se encarga de estudiar la relación existente entre las fuerzas que actúan sobre un cuerpo y el movimiento que en él se origina. Por lo tanto, el modelo dinámico de un robot tiene por objeto conocer la relación entre el movimiento del robot y las fuerzas implicadas en el mismo.

La dinámica del robot, trata directamente con la formulación matemática de las ecuaciones que describen el movimiento de un manipulador, son un conjunto de ecuaciones matemáticas que describen la conducta dinámica del manipulador. Tales ecuaciones de movimiento son útiles para realizar simulaciones por computadora del movimiento del brazo, el diseño de ecuaciones de control adecuadas para el robot y la evaluación del diseño y estructura cinemática del robot, así como para el dimensionamiento de los actuadores.

Para obtener esta relación llamada modelo dinámico, es necesario conocer tres características esenciales del robot a estudiar; y estas son:

1. Localización del robot definida por sus variables articulares o por las coordenadas de localización de su extremo, así como sus derivadas velocidad y aceleración.
2. Las fuerzas o pares aplicadas en las articulaciones del robot.
3. Los parámetros dimensionales del robot, es decir, longitud, masas e inercias de los elementos que componen físicamente al robot.

La obtención del modelo dinámico en mecanismos de uno o dos grados de libertad no es muy compleja, sin embargo, conforme aumenta el número de grados de libertad también aumenta el grado de complejidad para obtener el modelo dinámico. El modelo dinámico real de un brazo se puede obtener de leyes físicas conocidas tales como las leyes de Newton y la mecánica lagrangiana. Esto permite desarrollar ecuaciones dinámicas de movimiento para las articulaciones del manipulador en términos de los parámetros geométricos e inerciales especificados para los distintos elementos. Se pueden aplicar sistemáticamente enfoques convencionales como las formulaciones de Lagrange-Euler y de Newton-Euler para desarrollar las ecuaciones de movimientos del robot.

Para obtener el modelo dinámico de un robot manipulador industrial, varias formulaciones se han desarrollado, tales como la de Lagrange-Euler, Newton-Euler, y la formulación del principio generalizado d'Alembert [15]. En el presente capítulo se presenta el modelo dinámico de un robot manipulador de configuración angular utilizando la formulación de Lagrange basada en el balance energético:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} - \frac{\partial L}{\partial q} = \tau \quad (2.16)$$

Donde $q \in \mathcal{R}^{n \times 1}$ es un vector de coordenadas generalizadas, $\tau \in \mathcal{R}^{n \times 1}$ es un vector externo generalizado (de entrada) que relaciona fuerza/torque, la energía de un robot de n grados de libertad es la suma de sus energías cinética K y potencial U (Ec. 2.17) y el lagrangiano de un robot de n grados de libertad es la diferencia entre la energía cinética (K) y la potencial (U) del sistema (Ec. 2.18) [3][16].

$$\varepsilon(q(t), \dot{q}(t)) = K(q(t), \dot{q}(t)) + U(q(t)) \quad (2.17)$$

$$L(q(t), \dot{q}(t)) = K(q(t), \dot{q}(t)) - U(q(t)) \quad (2.18)$$

La ecuación 2.19 es la ecuación dinámica para robots de n grados de libertad. Siendo esta una ecuación diferencial vectorial no lineal en el estado $[q^T \dot{q}^T]$. $H(q)\ddot{q}$ es una matriz de 3x3 llamada matriz de inercias, $C(q, \dot{q})\dot{q}$ es una matriz de 3x3 llamada matriz de coriolis o de fuerzas centrífugas, $B(\dot{q})$ es una matriz diagonal de 3x3 que representa los pares debidos a las fricciones articulares, $g(q)$ es un vector de 3x1 de fuerzas o pares gravitacionales y τ es un vector de 3x1 llamado vector de fuerza externas, siendo generalmente los pares y fuerzas aplicadas por los actuadores en las articulaciones.

$$H(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + B(\dot{q}) + g(q) = \tau \quad (2.19)$$

Dicho esto, el primer paso para obtener el modelo dinámico del robot consiste en obtener el lagrangiano y para ello es necesario obtener las energías cinéticas y potenciales de cada eslabón del robot, por lo tanto tenemos que:

$$K(q(t), \dot{q}(t)) = K_1(q(t), \dot{q}(t)) + K_2(q(t), \dot{q}(t)) + K_3(q(t), \dot{q}(t)) \quad (2.20)$$

$$V(q(t), \dot{q}(t)) = V_1(q(t), \dot{q}(t)) + V_2(q(t), \dot{q}(t)) + V_3(q(t), \dot{q}(t)) \quad (2.21)$$

Donde K_1, K_2 y K_3 representan las energías cinéticas de los eslabones 1, 2 y 3 (l_1, l_2, l_3) respectivamente, así como V_1, V_2 y V_3 representan las energías potenciales de los mismos eslabones. De acuerdo al sistema de referencia mostrado en la figura 20 podemos observar que l_1 no se encuentra afectado por la gravedad por lo tanto las energías potenciales quedan expresadas de la siguiente forma:

$$V_1(q(t), \dot{q}(t)) = 0 \quad (2.22)$$

Capítulo 2. Modelo cinemático y dinámico del robot manipulador

$$V_2(q(t), \dot{q}(t)) = m_2 g (l_{c2} \text{sen}(q_2) + l_1) \quad (2.23)$$

$$V_3(q(t), \dot{q}(t)) = m_3 g (l_2 \text{sen}(q_2) + l_{c3} \text{sen}(q_2 + q_3) + l_1) \quad (2.24)$$

Donde m_2 y m_3 representan las masas de l_2 y l_3 , los cuales corresponden a los eslabones 2 y 3 respectivamente, l_{c2} y l_{c3} la longitud al punto medio de los eslabones l_2 y l_3 , ya que para este análisis se consideran las masas de los eslabones como puntuales colocadas en el punto medio de éstos; y g que representa la fuerza debida a la gravedad.

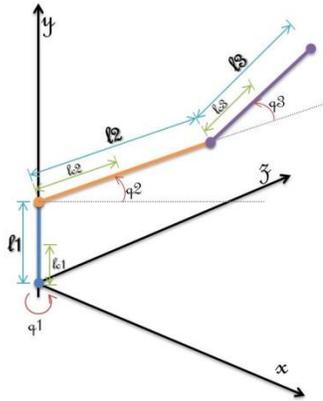


Fig. 20 Sistema de referencia para el modelo dinámico del robot

Lo siguiente a calcular es la energía cinética la cual se obtiene utilizando la fórmula representada en la ecuación 2.25, donde m representa la masa y v la velocidad del centro de masa de cada eslabón del robot.

$$E_C = \frac{1}{2} m v^2 \quad (2.25)$$

La masas serán representadas como m_1, m_2 y m_3 , sin embargo es necesario calcular la velocidad de cada eslabón, para ello es necesario conocer su ubicación y posteriormente derivarla para conocer su velocidad. Tenemos entonces que la posición del centro de masa de cada eslabón es la siguiente:

$$\begin{aligned} x_1 &= 0 \\ y_1 &= l_1 \\ z_1 &= 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} x_2 &= (l_2 \cos(q_2)) \cos(q_1) \\ y_2 &= l_2 \text{sen}(q_2) + l_1 \\ z_2 &= (l_2 \cos(q_2)) \text{sen}(q_1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}x_3 &= (l_2 \cos(q_2) + l_3 \cos(q_2 + q_3)) \cos(q_1) \\y_3 &= l_2 \sin(q_2) + l_3 \sin(q_2 + q_3) + l_1 \\z_3 &= (l_2 \cos(q_2) + l_3 \cos(q_2 + q_3)) \sin(q_1)\end{aligned}$$

Una vez que se conoce la posición de cada eslabón se procede a derivar cada ecuación y así encontrar la velocidad en los eslabones de acuerdo a la ecuación 2.26.

$$v^2 = \dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2 \quad (2.26)$$

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= 0 \\ \dot{y}_1 &= 0 \\ \dot{z}_1 &= 0\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\dot{x}_2 &= -l_2 \dot{q}_1 \cos(q_2) \cos(q_1) - l_2 \dot{q}_2 \sin(q_2) \cos(q_1) \\ \dot{y}_2 &= l_2 \dot{q}_2 \cos(q_2) \\ \dot{z}_2 &= -l_2 \dot{q}_1 \cos(q_2) \cos(q_1) - l_2 \dot{q}_2 \sin(q_2) \sin(q_1) \\ \dot{x}_3 &= -(l_2 \cos(q_2) + l_3 \cos(q_2 + q_3)) \dot{q}_1 \sin(q_1) \\ &\quad - (l_2 \dot{q}_2 \sin(q_2) + l_3 (\dot{q}_2 + \dot{q}_3) \sin(q_2 + q_3)) \cos(q_1) \\ \dot{y}_3 &= l_2 \dot{q}_2 \cos(q_2) + l_3 (\dot{q}_2 + \dot{q}_3) \cos(q_2 + q_3) \\ \dot{z}_3 &= (l_2 \cos(q_2) + l_3 \cos(q_2 + q_3)) \dot{q}_1 \cos(q_1) \\ &\quad - (l_2 \dot{q}_2 \sin(q_2) + l_3 (\dot{q}_2 + \dot{q}_3) \sin(q_2 + q_3)) \sin(q_1)\end{aligned}$$

Por lo tanto:

$$\begin{aligned}V_1^2 &= 0 \\ V_2^2 &= l_2^2 (\dot{q}_1^2 \cos^2(q_2) + \dot{q}_2^2) \\ V_3^2 &= l_2^2 (\dot{q}_1^2 \cos^2(q_2) + \dot{q}_2^2 \\ &\quad + l_3^2 [\dot{q}_1^2 \cos^2(q_2 + q_3) \\ &\quad + (\dot{q}_2 + \dot{q}_3) \sin^2(q_2 + q_3)] \\ &\quad + 2l_2 l_3 [\dot{q}_1^2 \cos(q_2) \cos(q_2 + q_3) \\ &\quad + \dot{q}_2 (\dot{q}_2 + \dot{q}_3) \cos(q_3)]\end{aligned}$$

Las energías potenciales quedan expresadas como:

$$K_1(q(t), \dot{q}(t)) = 0 \quad (2.27)$$

$$K_2(q(t), \dot{q}(t)) = \frac{1}{2} m_2 l_2^2 (\dot{q}_1^2 \cos^2(q_2) + \dot{q}_2^2) \quad (2.28)$$

$$\begin{aligned}
 K_3(q(t), \dot{q}(t)) = & \frac{1}{2} m_3 (l_2^2 (\dot{q}_1^2 \cos^2(q_2) + \dot{q}_2^2 \\
 & + l_3^2 [\dot{q}_1^2 \cos^2(q_2 + q_3) \\
 & + (\dot{q}_2 + \dot{q}_3) \text{sen}^2(q_2 + q_3)] \\
 & + 2l_2 l_3 [\dot{q}_1^2 \cos(q_2) \cos(q_2 + q_3) \\
 & + q_2 (\dot{q}_2 + \dot{q}_3) \cos(q_3)])
 \end{aligned} \tag{2.29}$$

Por lo tanto se define al lagrangiano como:

$$\begin{aligned}
 L = & \frac{1}{2} m_2 l_2^2 (\dot{q}_1^2 \cos^2(q_2) + \dot{q}_2^2 \\
 & + \frac{1}{2} m_3 (l_2^2 (\dot{q}_1^2 \cos^2(q_2) + \dot{q}_2^2 \\
 & + l_3^2 [\dot{q}_1^2 \cos^2(q_2 + q_3) + (\dot{q}_2 + \dot{q}_3) \text{sen}^2(q_2 + q_3)] \\
 & + 2l_2 l_3 [\dot{q}_1^2 \cos(q_2) \cos(q_2 + q_3) + q_2 (\dot{q}_2 + \dot{q}_3) \cos(q_3)]) \\
 & - m_2 g (l_{c2} \text{sen}(q_2) + l_1) - m_3 g (l_2 \text{sen}(q_2) \\
 & + l_{c3} \text{sen}(q_2 + q_3) + l_1)
 \end{aligned} \tag{2.30}$$

De acuerdo a la ecuación 2.26 es necesario realizar las derivadas del lagrangiano con respecto de q , con respecto de \dot{q} , y posteriormente con respecto del tiempo, quedando entonces:

$$\frac{dL}{dq} = \begin{pmatrix} \frac{dL}{dq_1} \\ \frac{dL}{dq_2} \\ \frac{dL}{dq_3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ -m_2 l_2^2 \dot{q}_1^2 \cos(q_2) \text{sen}(q_2) - m_3 l_3^2 \dot{q}_1^2 \cos(q_2 + q_3) \text{sen}(q_2 + q_3) \\ \quad + m_3 l_3^2 (\dot{q}_2 + \dot{q}_3) \text{sen}(q_2 + q_3) \cos(q_2 + q_3) \\ \quad - m_3 l_2 l_3 \dot{q}_1^2 (\cos(q_2) \text{sen}(q_2 + q_3) \\ \quad + \text{sen}(q_2) \cos(q_2 + q_3)) - m_2 g l_2 \cos(q_2) \\ \quad - m_3 g l_{c3} \cos(q_2 + q_3) \\ -m_3 l_3^2 \dot{q}_1^2 \cos(q_2 + q_3) \text{sen}(q_2 + q_3) \\ \quad + m_3 l_3^2 (\dot{q}_2 + \dot{q}_3) \text{sen}(q_2 + q_3) \cos(q_2 + q_3) \\ \quad - m_3 l_2 l_3 \dot{q}_1^2 \cos(q_2) \text{sen}(q_2 + q_3) \\ \quad - m_3 l_2 l_3 \dot{q}_2 (q_2 + q_3) \text{sen}(q_3) - m_3 g l_{c3} \cos(q_2 + q_3) \end{pmatrix}$$



Derivada del lagrangiano con respecto de \dot{q} :

$$\frac{dL}{d\dot{q}} = \begin{pmatrix} \frac{dL}{d\dot{q}_1} \\ \frac{dL}{d\dot{q}_2} \\ \frac{dL}{d\dot{q}_3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_2 l_2^2 \dot{q}_1 \cos^2(q_2) + m_3 l_3^2 \dot{q}_1 \cos^2(q_2 + q_3) + 2m_3 l_2 l_3 \dot{q}_1 \cos(q_2) \cos(q_2 + q_3) \\ m_2 l_2^2 \dot{q}_2 + \frac{1}{2} m_3 l_3^2 \dot{q}_1 \sin^2(q_2 + q_3) + 2m_3 l_2 l_3 \dot{q}_2 \cos(q_3) + m_3 l_2 l_3 \dot{q}_3 \cos(q_3) \\ \frac{1}{2} m_3 l_3^2 \sin^2(q_2 + q_3) + m_3 l_2 l_3 \dot{q}_2 \cos(q_3) \end{pmatrix}$$

Derivada con respecto al tiempo de la derivada del lagrangiano con respecto de \dot{q} :

$$\frac{d}{dt} \frac{dL}{d\dot{q}} = \begin{pmatrix} \frac{d}{dt} \frac{dL}{d\dot{q}_1} \\ \frac{d}{dt} \frac{dL}{d\dot{q}_2} \\ \frac{d}{dt} \frac{dL}{d\dot{q}_3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -2m_2 l_2^2 \dot{q}_1 \cos^2(q_2) \sin(q_2) \dot{q}_2 + m_2 l_2^2 \ddot{q}_1 \cos^2(q_2) - 2m_3 l_3^2 \dot{q}_1 \cos(q_2 + q_3) \sin(q_2 + q_3) (\dot{q}_2 + \dot{q}_3) + m_3 l_3^2 \ddot{q}_1 \cos^2(q_2 + q_3) - 2l_2 l_3 m_3 \dot{q}_1 [\cos(q_2) \sin(q_2 + q_3) (\dot{q}_2 + \dot{q}_3) + \cos(q_2 + q_3) \sin(q_2) \dot{q}_2] + 2l_2 l_3 m_3 \ddot{q}_1 \cos(q_2) \cos(q_2 + q_3) \\ m_2 l_2^2 \ddot{q}_2 - m_3 l_3^2 \sin(q_2 + q_3) \cos(q_2 + q_3) (\dot{q}_2 + \dot{q}_3) - 2l_2 l_3 m_3 \dot{q}_2 \dot{q}_3 \sin(q_3) + 2l_2 l_3 m_3 \ddot{q}_2 \cos(q_3) - m_3 l_2 l_3 \dot{q}_3^2 \sin(q_3) + m_3 l_2 l_3 \ddot{q}_3 \cos(q_3) \\ m_3 l_3^2 \sin(q_2 + q_3) \cos(q_2 + q_3) (\dot{q}_2 + \dot{q}_3) - l_2 l_3 m_3 \dot{q}_2 \dot{q}_3 \sin(q_3) + m_3 l_2 l_3 \ddot{q}_2 \cos(q_3) \end{pmatrix}$$

Capítulo 2. Modelo cinemático y dinámico del robot manipulador

Diferencia de la derivada con respecto al tiempo de la derivada del lagrangiano con respecto de \dot{q} y la derivada del lagrangiano con respecto de \ddot{q} ; de acuerdo a la ecuación 2.16:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \frac{dL}{d\dot{q}} - \frac{dL}{d\dot{q}} &= \begin{pmatrix} \frac{d}{dt} \frac{dL}{d\dot{q}_1} \\ \frac{d}{dt} \frac{dL}{d\dot{q}_2} \\ \frac{d}{dt} \frac{dL}{d\dot{q}_3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -2m_2l_2^2\dot{q}_1\cos^2(q_2)\text{sen}(q_2)\dot{q}_2 + m_2l_2^2\ddot{q}_1\cos^2(q_2) \\ -2m_3l_3^2\dot{q}_1\cos(q_2+q_3)\text{sen}(q_2+q_3)(\dot{q}_2 \\ + \dot{q}_3) + m_3l_3^2\ddot{q}_1\cos^2(q_2+q_3) \\ -2l_2l_3m_3\dot{q}_1[\dot{q}_2\text{sen}(2q_2+q_3) \\ + \cos(q_2)\text{sen}(q_2+q_3)\dot{q}_3] \\ + 2l_2l_3m_3\ddot{q}_1\cos(q_2)\cos(q_2+q_3) \\ m_2l_2^2\ddot{q}_2 - m_3l_2l_3\dot{q}_3\text{sen}(q_3)[2\dot{q}_2 + \dot{q}_3] \\ + m_3l_2l_3\cos(q_3)[2\ddot{q}_2 + \ddot{q}_3] \\ + m_2l_2^2\dot{q}_1^2\cos(q_2)\text{sen}(q_2) \\ + m_3l_3^2\dot{q}_1^2\cos(q_2+q_3)\text{sen}(q_2+q_3) \\ + m_3l_2l_3\dot{q}_1^2\text{sen}(2q_2+q_3) + m_2gl_{c2}\cos(q_2) \\ + m_3gl_2\cos(q_2) + m_3gl_{c3}\cos(q_2+q_3) \\ m_3l_2l_3\ddot{q}_2\cos(q_3) + m_3l_3^2\dot{q}_1^2\cos(q_2+q_3)\text{sen}(q_2+q_3) \\ + m_3l_2l_3\dot{q}_1^2\cos(q_2)\text{sen}(q_2+q_3) \\ + m_3l_2l_3\dot{q}_2^2\text{sen}(q_3) + m_3gl_{c3}\cos(q_2+q_3) \end{pmatrix} \end{aligned}$$

Los vectores anteriores corresponden a las ecuaciones dinámicas del robot manipulador y pueden ser rescritas de acuerdo a la ecuación 2.19. Considerando que la fricción articular es despreciada para nuestro modelo y considerada cero; escrito de forma matricial el modelo dinámico de nuestro robot manipulador de tres grados de libertad es el siguiente:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} H_{11}(q) & H_{12}(q) & H_{13}(q) \\ H_{21}(q) & H_{22}(q) & H_{23}(q) \\ H_{31}(q) & H_{32}(q) & H_{33}(q) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \\ \ddot{q}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{11}(q, \dot{q}) & C_{12}(q, \dot{q}) & C_{13}(q, \dot{q}) \\ C_{21}(q, \dot{q}) & C_{22}(q, \dot{q}) & C_{23}(q, \dot{q}) \\ C_{31}(q, \dot{q}) & C_{32}(q, \dot{q}) & C_{33}(q, \dot{q}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \end{bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} B_{11}(\dot{q}) & B_{12}(\dot{q}) & B_{13}(\dot{q}) \\ B_{21}(\dot{q}) & B_{22}(\dot{q}) & B_{23}(\dot{q}) \\ B_{31}(\dot{q}) & B_{32}(\dot{q}) & B_{33}(\dot{q}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} g_1(q) \\ g_2(q) \\ g_3(q) \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Donde:

$$H_{11}(q) = \begin{aligned} &m_2l_2^2\cos^2(q_2) + m_3l_3^2\cos^2(q_2+q_3) \\ &+ 2m_3l_2l_3\cos(q_2)\cos(q_2+q_3) \end{aligned} \quad (2.31)$$

$$H_{12}(q) = 0 \quad (2.32)$$

$$H_{13}(q) = 0 \quad (2.33)$$

$$H_{21}(q) = 0 \quad (2.34)$$

$$H_{22}(q) = m_2 l_2^2 + 2m_3 l_2 l_3 \cos(q_3) \quad (2.35)$$

$$H_{23}(q) = m_3 l_2 l_3 \cos(q_3) \quad (2.36)$$

$$H_{31}(q) = 0 \quad (2.37)$$

$$H_{32}(q) = m_3 l_2 l_3 \cos(q_3) \quad (2.38)$$

$$H_{33}(q) = 0 \quad (2.39)$$

$$C_{11}(q) = \begin{aligned} & -m_2 l_2^2 \dot{q}_2 \cos(q_2) \text{sen}(q_2) \\ & \quad - m_3 l_3^2 \dot{q}_2 \cos(q_2 + q_3) \text{sen}(q_2 + q_3) \\ & \quad - m_3 l_3^2 \dot{q}_3 \cos(q_2 + q_3) \text{sen}(q_2 + q_3) \\ & \quad - m_3 l_2 l_3 \dot{q}_2 \text{sen}(2q_2 + q_3) \\ & \quad - m_3 l_2 l_3 \dot{q}_3 \cos(q_2) \text{sen}(q_2 + q_3) \end{aligned} \quad (2.40)$$

$$C_{12}(q) = \begin{aligned} & -m_2 l_2^2 \dot{q}_1 \cos(q_2) \text{sen}(q_2) \\ & \quad - m_3 l_3^2 \dot{q}_1 \cos(q_2 + q_3) \text{sen}(q_2 + q_3) \\ & \quad - m_3 l_2 l_3 \dot{q}_1 \text{sen}(2q_2 + q_3) \end{aligned} \quad (2.41)$$

$$C_{13}(q) = \begin{aligned} & -m_3 l_3^2 \dot{q}_1 \cos(q_2 + q_3) \text{sen}(q_2 + q_3) \\ & \quad - m_3 l_2 l_3 \dot{q}_1 \cos(q_2) \text{sen}(q_2 + q_3) \end{aligned} \quad (2.42)$$

$$C_{21}(q) = \begin{aligned} & m_2 l_2^2 \dot{q}_1 \cos(q_2) \text{sen}(q_2) \\ & \quad + m_3 l_3^2 \dot{q}_1 \cos(q_2 + q_3) \text{sen}(q_2 + q_3) \\ & \quad - m_3 l_2 l_3 \dot{q}_1 \text{sen}(2q_2 + q_3) \end{aligned} \quad (2.43)$$

$$C_{22}(q) = -m_3 l_2 l_3 \dot{q}_3 \text{sen}(q_3) \quad (2.44)$$

$$C_{23}(q) = -m_3 l_2 l_3 \dot{q}_2 \text{sen}(q_3) - m_3 l_2 l_3 \dot{q}_3 \text{sen}(q_3) \quad (2.45)$$

$$C_{31}(q) = \begin{aligned} & m_3 l_3^2 \dot{q}_1 \cos(q_2 + q_3) \text{sen}(q_2 + q_3) \\ & \quad + m_3 l_2 l_3 \dot{q}_1 \cos(q_2) \text{sen}(q_2 + q_3) \end{aligned} \quad (2.46)$$

$$C_{32}(q) = m_3 l_2 l_3 \dot{q}_2 \text{sen}(q_3) \quad (2.47)$$

$$C_{33}(q) = 0 \quad (2.48)$$

$$B_{11}(\dot{q}) = 0 \quad (2.49)$$

$$B_{12}(\dot{q}) = 0 \quad (2.50)$$

$$B_{13}(\dot{q}) = 0 \quad (2.51)$$

$$B_{21}(\dot{q}) = 0 \quad (2.52)$$

$$B_{22}(\dot{q}) = 0 \quad (2.53)$$

$$B_{23}(\dot{q}) = 0 \quad (2.54)$$

$$B_{31}(\dot{q}) = 0 \quad (2.55)$$

$$B_{32}(\dot{q}) = 0 \quad (2.56)$$

$$B_{33}(\dot{q}) = 0 \quad (2.57)$$

$$g_1(q) = 0 \quad (2.58)$$

$$g_2(q) = m_2 g l_{c2} \cos(q_2) + m_3 g l_2 \cos(q_2) + m_3 g l_{c3} \cos(q_2 + q_3) \quad (2.59)$$

$$g_3(q) = m_3 g l_{c3} \cos(q_2 + q_3) \quad (2.60)$$

Capítulo 3

Interfaz cerebro computadora

3.1 Funcionamiento

Una interfaz cerebro computadora o ICC (*Brain-Computer Interface*), se basa principalmente en el análisis de las señales electroencefalográficas (señales EEG) [17] captadas durante algún tipo de actividad mental con la finalidad de controlar un componente externo, ya sea una computadora u otro dispositivo, dependiendo de la aplicación. Su desempeño dependerá en gran medida de la capacidad que tenga el usuario para controlar sus patrones EEG, siendo necesario un entrenamiento apropiado, y resulta indispensable proporcionar retroalimentación (*feedback*) que le permita conocer su progreso en el control de sus patrones EEG.

El entrenamiento requerido para manejar una interfaz cerebro computadora exige un esfuerzo considerable por parte del usuario. La concentración, frustración, cansancio, distracción, motivación, son algunos de los factores que pueden afectar a la capacidad de éste para controlar sus señales EEG y perjudicar o mejorar su desempeño.

El principio de funcionamiento básico de una ICC 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 de la forma deseada por el usuario. Sin embargo, es importante conocer la forma en que se genera esta actividad cerebral y para ello es necesario hablar del sistema nervioso.

De forma general el sistema nervioso es una red de tejidos cuya función es la de captar y procesar rápidamente las señales ejerciendo control y coordinación sobre los demás órganos para lograr una adecuada interacción con el entorno. El sistema nervioso se encuentra dividido en el sistema nervioso central y el sistema nervioso periférico. El sistema nervioso central se encuentra formado por el encéfalo y la médula espinal, ambos protegidos por huesos. El encéfalo es la parte del sistema que está protegida por el cráneo y está formado por el cerebro, el cerebelo y el tronco del encéfalo, mientras que la médula espinal es la prolongación del encéfalo y esta protegida por la columna vertebral, como se muestra en la figura 21. El Sistema nervioso periférico esta formado

Capítulo 3. Interfaz cerebro computadora

por los nervios que surgen del sistema nervioso central y recorren todo el cuerpo humano como se muestra en la figura 22.

Como se mencionó anteriormente, la ICC se basa en el análisis de las señales electroencefalográficas, estas señales generadas por el sistema nervioso central reciben el nombre de ondas cerebrales y muestran la constante actividad producida en el encéfalo, sin importar el estado de conciencia del individuo.

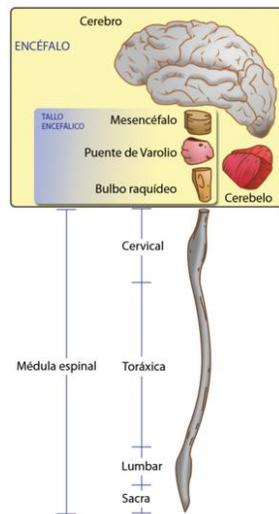


Fig. 21 Sistema Nervioso Central [34]

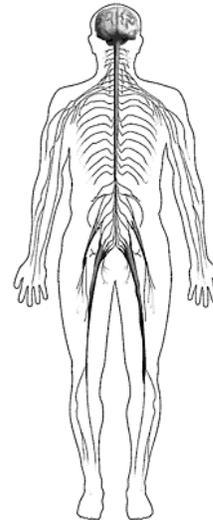


Fig. 22 Sistema Nervioso Central y Periférico [35]

3.2 Ondas cerebrales

La intensidad, así como los patrones mostrados por las ondas cerebrales se encuentran determinados por el grado de excitación del usuario debidos al sueño, vigilia o enfermedades cerebrales como la epilepsia. El registro de estas ondas recibe el nombre de Electroencefalograma (EEG).

Las ondas cerebrales leídas en el cuero cabelludo varían su intensidad de 0 a 200 microvoltios, y su frecuencia puede variar desde una vez cada varios segundos hasta 50 o más por segundo, aunque esto depende del grado de actividad en la corteza cerebral.

La mayor parte del tiempo las ondas cerebrales son irregulares y no se puede observar ningún patrón específico en ellas utilizando un EEG, sin embargo, en algunas ocasiones pueden aparecer ciertos patrones nítidos, a éstos patrones que aparecen en personas sanas se les ha asignado un nombre y una clasificación como se muestra en la figura 23.

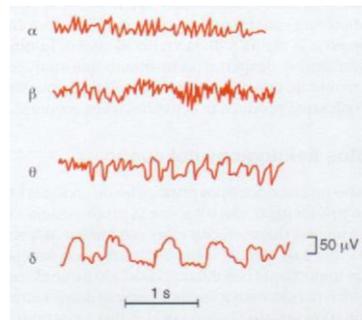


Fig. 23 Diversos tipos de ondas cerebrales

Las ondas α son ondas rítmicas, con una frecuencia entre 8 y 13 ciclos por segundo, y están presentes en el EEG de casi todos los adultos normales mientras permanecen despiertos y en un estado de reposo tranquilo en su actividad cerebral. Estas ondas desaparecen durante el sueño profundo.

Las ondas β presentan una frecuencia superior a 14 ciclos por segundo y pueden llegar hasta los 80 ciclos por segundo. Se registran sobre todo en las regiones parietal y frontal durante la activación específica de estas partes del cerebro.

Las ondas θ tienen unas frecuencias entre 4 y 7 ciclos por segundo. Aparecen normalmente en los niños en la región parietal y temporal, pero también en algunos adultos en situaciones de estrés emocional, desánimo o frustración, al mismo tiempo pueden presentarse en algunos trastornos nerviosos.

Las ondas δ engloban todas las ondas del EEG con frecuencias menores a 3,5 ciclos por segundo y frecuentemente muestran voltajes del doble al cuádruple que la mayor parte de los demás tipos de ondas cerebrales. Estas ondas se presentan durante el sueño profundo, en la lactancia y en las enfermedades orgánicas serias del cerebro.

La unidad básica del sistema nervioso son las neuronas, las cuales tienen la capacidad de comunicarse con precisión, rapidez y a larga distancia con otras células, ya sean nerviosas, musculares o glandulares [23]. La información viaja entre neuronas por medio de impulsos eléctricos que se transmiten de unas neuronas a otras. Estos impulsos se reciben de otras neuronas en las dendritas, pasan por toda la neurona hasta ser conducidas por el axón a los botones terminales, los cuales pueden conectar con otra neurona, fibras musculares o glándulas. Las neuronas conforman e interconectan los tres componentes del sistema nervioso: sensitivo, integrador o mixto y motor (ver figura 24).

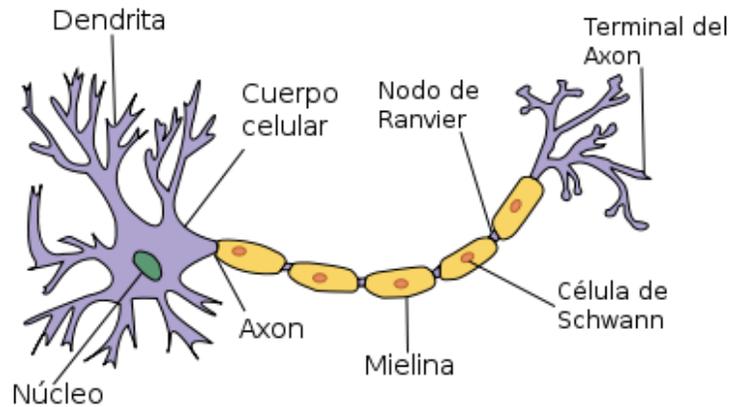


Fig. 24 Neurona y sus partes

La descarga eléctrica generada por una sola neurona o de una sola fibra nerviosa producida en el encéfalo nunca puede registrarse desde la superficie de la cabeza. Para medir estas descargas es necesario que muchos miles e incluso millones de neuronas se disparen de forma sincronizada, de esta forma los potenciales procedentes de las neuronas o fibras nerviosas se suman y es posible que atraviesen el cráneo.

Por lo tanto las mediciones que se realizan en el cuero cabelludo para observar la intensidad de las ondas cerebrales se encuentra determinada por el número de neuronas y fibras nerviosas que disparan en sincronía y no por la actividad eléctrica total en el encéfalo.

Los dispositivos utilizados para medir la actividad eléctrica producida por el cerebelo reciben el nombre de electrodos y se usan normalmente en tareas clínicas para medir la actividad directa o indirecta del cerebro. En la figura 25 podemos observar algunos electrodos comerciales utilizados para realizar electroencefalogramas.



Fig. 25 Electrodos Comerciales.

Como sabemos las neuronas al igual que cualquier otra célula viva en un organismo necesitan un aporte energético que les permita sobrevivir, mantenerse en condiciones adecuadas para realizar su función y también para realizarla, es por ello que a pesar de que el cerebro representa solamente el 2% de la masa total del cuerpo, recibe el 15% del flujo cardiaco utilizando el 20% del oxígeno que consume el cuerpo [18], entonces para realizar la medición de la actividad directa del cerebro se utiliza dispositivos como los que se muestran en la figura 25, mientras que para la actividad indirecta es necesario medir los cambios generados en el organismo como resultado de la actividad directa del cerebro y para ello se hacen uso de resonancias magnéticas con lo que se pueden observar los cambios de oxigenación de la sangre.

3.3 Clasificación de las ICC

En la sección anterior se habló de las ondas cerebrales qué son, cómo se generan y cómo se miden, sin embargo otro aspecto a considerar en una ICC es como se colocan los electrodos o dispositivos de medida con respecto al cuerpo humano, y atendiendo a este punto podemos clasificar a las ICC en dos tipos que son: invasiva y no invasiva.

Elegir entre un interfaz invasiva y una que no lo es depende del uso que se le va a dar a la interfaz, y tiene repercusiones tanto en la usabilidad de la interfaz como en el diseño del sistema y en la ética del mismo. La mayoría de las ICC en la actualidad utilizan interfaces no invasivas dado que los electrodos se colocan sobre el cuero cabelludo del usuario; sin embargo, existen interfaces invasivas para las que es necesario introducir los electrodos en el cerebro, aunque generalmente son utilizadas para entender el funcionamiento del cerebro y no tienen un objetivo tecnológico como en el caso de las ICC no invasivas.

La mayoría de las interfaces invasivas se llevan a cabo en animales, aunque hay algunos trabajos realizados con personas voluntarias que se han sometido a operaciones quirúrgicas necesarias para colocar los electrodos dentro del cerebro.

A groso modo hay diferentes niveles de penetración y colocación del sensor que varían desde sistemas que penetran el córtex cerebral que es el tejido nervioso que cubre la superficie de los hemisferios cerebrales con el objetivo de medir neuronas individuales y potenciales locales de campo, hasta el electrocorticograma para el cual se colocan los sensores sobre la superficie del córtex midiendo la suma de actividad de cientos de miles de neuronas.

Capítulo 3. Interfaz cerebro computadora

Más allá de los problemas éticos que tienen estas tecnologías invasivas, está la dificultad de mantener medidas estables en el tiempo debido a que un pequeño movimiento del sensor puede implicar un gran movimiento a nivel celular o local, y la disminución en la eficiencia del sensor que sufre un ataque de las defensas del organismo, generando pequeñas costras alrededor del electrodo y en poco tiempo inutilizándolo por completo.

El primer elemento que compone toda ICC es el dispositivo de medida de la actividad cerebral, generalmente se utiliza equipo clínico que mide la actividad cerebral directa o indirecta, aunque actualmente existen varios productos comerciales que nos permiten acceder a estas mediciones como se muestran en la figura 26.

La mayoría de las ICC en la actualidad utilizan dispositivos que miden la actividad eléctrica esto es debido a que una parte fundamental en una interfaz consiste en transmitir la mayor cantidad de información del cerebro a la máquina que la procesa. Esta transferencia depende directamente de la cantidad de procesos eléctricos que el dispositivo sea capaz de detectar, es por ello, que es necesario contar con sensores con la máxima resolución temporal y con capacidad de tiempo real.



a)



b)

Fig. 26 a) Montaje de gorro con sensores para medición de EEG clínico y b) Montaje comercial para investigación de la marca Emotiv

De todas las técnicas utilizadas para ICC, la más utilizada es el EEG, dado que tiene una gran resolución temporal, fácil uso, portabilidad y tiene un gran número de posibilidades proporcionadas por su extenso uso clínico. Aunque es importante mencionar que existen otras ICC basadas en técnicas como electrooculogramas que basan sus mediciones en el movimiento de los ojos, o electromiogramas que se basan en la actividad eléctrica producida por los músculos.



El montaje de un sistema de EEG requiere de un gorro que se coloca sobre la cabeza, el cual cuenta con electrodos utilizados para medir las diferencias en el potencial eléctrico. Con el motivo de mejorar la conductividad entre el cuero cabelludo y los electrodos éstos últimos deben humedecerse con un gel. Posteriormente se conectan a un sistema que digitaliza, y filtra la señal y se la envía a la computadora para su análisis [25]. En el trabajo aquí desarrollado se utilizó una interfaz no invasiva que se basa en la técnica de EEG y la cual se describirá ampliamente en la sección siguiente.

Otra clasificación existente en las ICC se basa en dos paradigmas neuronales, aquellos basados en una respuesta evocada por estímulos externos y aquellos que están controlados por una modulación voluntaria. Las ICCs de la primera categoría están basadas en los potenciales evocados [19], que son potenciales que se generan en el cerebro provocados por estímulos internos o externos. Su naturaleza es una respuesta cerebral evocada o relacionada con eventos que pueden ser visuales, auditivos o somatosensoriales. El funcionamiento de una ICC basada en potenciales evocados es el siguiente: en primer lugar, 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, entonces 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 ICCs se les denomina sincronas porque el usuario esta sincronizado con la ICC, dado que es la interfaz la que presenta los estímulos a la persona.

La segunda categoría de ICCs están basadas en 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 registro de actividades del EEG. En estas ICCs hay un proceso intrínseco en el cual la persona aprende a realizar el pensamiento de la forma en la que las maquinas de procesamiento de señal maximicen su reconocimiento (es una respuesta modulada del usuario que mejora progresivamente durante el uso). Una de las ICCs más extendidas se basa en la imaginación motora [8]. Muchos estudios en neuroimagen funcional han demostrado que la imaginación del movimiento está relacionada con la activación de los circuitos neuronales involucrados en estados previos del control motor. Estos circuitos incluyen el área motora suplementaria y la corteza motora primaria entre otras. Es decir se produce prácticamente la misma actividad cerebral al mover un brazo que al pensar en mover el mismo; esto resulta muy importante dado que para nuestro trabajo utilizamos una interfaz basada en modulación voluntaria.



Capítulo 3. Interfaz cerebro computadora

La forma en que funcionan es la siguiente: el usuario se concentra imaginando el movimiento de una de sus extremidades, por ejemplo el brazo derecho. Este pensamiento crea una actividad en la corteza motora en la zona relacionada con el brazo, que se refleja en los registros del EEG en esa zona. Las herramientas de procesamiento de señal detectan esa actividad, la cual se interpreta como una entrada al sistema.

Otro tipo de ICC está basada en tareas mentales. En este paradigma, el usuario se concentra en alguna de las tareas mentales predefinidas relacionadas con el lenguaje, el cálculo, la rotación de figuras complejas, entre otras. Estas tareas activan unas áreas específicas que se pueden identificar aplicando filtros espaciales a la señal, y con ello, deducir la intención del usuario. A estas ICC se les denomina asíncronas dado que es el usuario el que puede decidir cuando enviar un comando a voluntad (de forma asíncrona para el sistema).

3.4 Emotiv EPOC

Como se mencionó anteriormente para el trabajo presentado en esta tesis hacemos uso de una interfaz no invasiva, la cual fue diseñada y manufacturada por la empresa Emotiv [36], de nombre Emotiv EPOC y consta de una diadema inalámbrica con sensores de alta resolución para la adquisición de señales eléctricas producidas por el cerebro.

Utiliza 14 electrodos con los que es posible detectar pensamientos, emociones y expresiones faciales del usuario, no obstante tiene 2 electrodos más, los cuales son utilizados como referencia para medir los potenciales producidos por la actividad cerebral del usuario.

Cuenta además con un par de giroscopios que pueden ser utilizados para mover el cursor, y dado que la diadema es inalámbrica permite al usuario moverse libremente, el receptor se conecta vía USB a la computadora y la batería del dispositivo permite 12 horas continuas de uso. En la figura 27 podemos observar fotografías de la diadema, sensores y receptor USB del dispositivo.

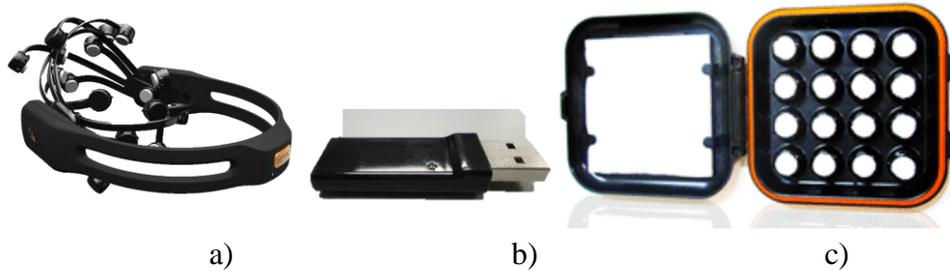


Fig. 27 a) Diadema EPOC, b) receptor USB y c) sensores.

Como podemos observar el tamaño del hardware es menor y más práctico comparado con su equivalente clínico para realizar electroencefalogramas mostrado en la figura 26. El dispositivo EPOC cuenta con una interfaz gráfica desde la que es posible observar el estado de la interfaz, la calidad de la señal recibida de forma inalámbrica y el nivel de la batería, además se divide en cuatro secciones denominadas:

- Configuración de la diadema (*Headset Setup*).
- Sección de expresiones (*Emotiv Suite*).
- Sección de emociones (*Affective Suite*).
- Sección cognitiva (*Cognitiv Suite*).

En la primera sección se muestra una guía básica sobre como colocar la diadema y el estado de cada electrodo, como se observa en la figura 28.

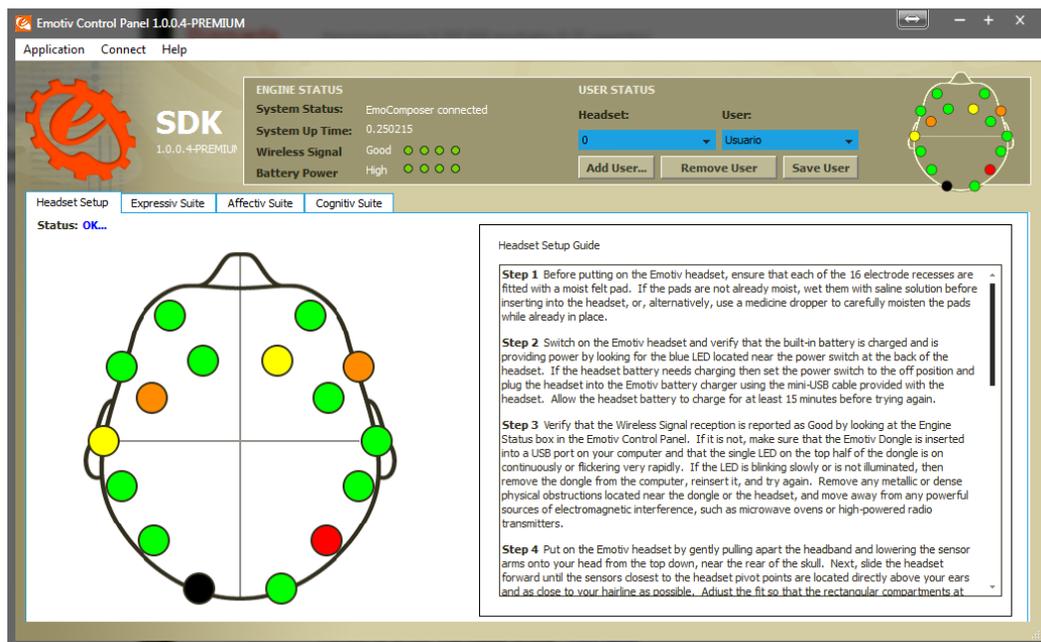


Fig. 28 Configuración de la diadema

Capítulo 3. Interfaz cerebro computadora

En la parte izquierda de esta interfaz se encuentra una imagen que representa la colocación de los electrodos en el usuario, también se distingue que algunos electrodos presentan colores diferentes, esto se debe a que el sistema detecta la calidad de la señal en cada electrodo y muestra un color distinto dependiendo del estado en que se encuentre, pudiendo presentar cinco casos, los cuales son:

- Color Verde: La señal es buena.
- Color Amarillo: La señal es medianamente buena.
- Color Naranja: La señal es mala.
- Color Rojo: La señal es muy mala.
- Color Negro: No se detecta señal en el electrodo.

La colocación de cada electrodo no es al azar, se rige bajo un sistema internacional llamado 10-20 [24], el cual es un método reconocido internacionalmente para describir y mostrar la ubicación exacta para la colocación de los electrodos sobre el cuero cabelludo en una prueba EEG clínica [20][21]. De acuerdo a este sistema los electrodos de nuestra interfaz reciben los nombres mostrados en la figura 29.

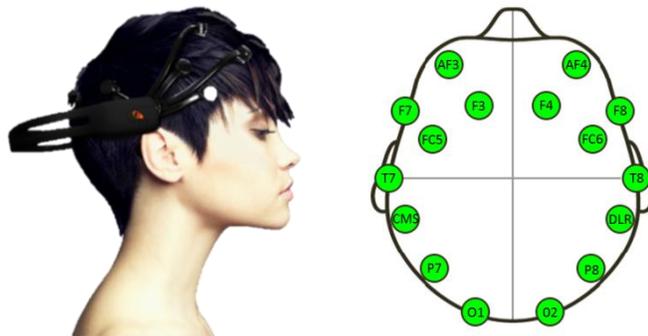


Fig. 29 Sistema Internacional 10-20

Cada electrodo tiene una letra y un número que lo identifica, las letras pueden ser F, T, C, P y O; y se refieren a los lóbulos frontal, temporal, central, parietal y occipital. Los números pares 2, 4, 6, 8, se utilizan para numerar los electrodos colocados en el hemisferio derecho, mientras que los números impares 1, 3, 5, 7, son utilizados para referirse a los electrodos colocados en el hemisferio izquierdo [22].

La sección de expresiones permite detectar varias expresiones del usuario al momento que las realiza ya sea parpadear, cerrar un ojo u otro, sonreír, levantar alguna de sus cejas o ambas, mover los ojos hacia la izquierda o derecha, entre otras. Además es posible modificar la sensibilidad de la interfaz ante estos fenómenos. En la figura 30 podemos observar esta sección de la interfaz.

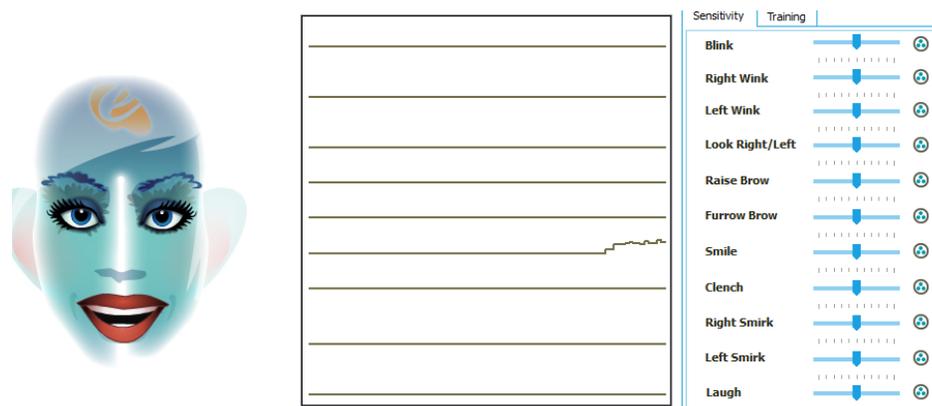


Fig. 30 Sección de expresiones

Dentro de la sección de emociones es posible observar gráficamente el aumento o disminución de ciertas emociones tales como aburrimiento, frustración, concentración, y emoción del usuario en una escala que va del 0 al 1, se puede ver una gráfica que muestra las emociones en los últimos 30 segundos que el usuario utiliza la diadema, y en otra gráfica 300 segundos anteriores, aunque es posible modificar estos parámetros. Esto se observa en la figura 31.

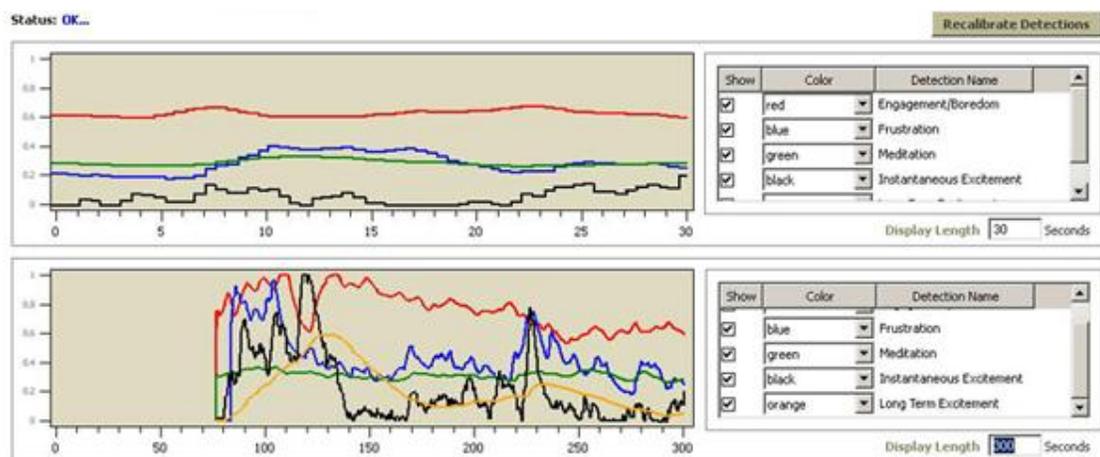


Fig. 31 Sección de emociones

Para el trabajo presentado en esta tesis se hace uso únicamente de las secciones de configuración y la sección cognitiva, que es en la que se centra este trabajo. La sección cognitiva es la que permite al usuario utilizar sus pensamientos como medio de comunicación entre él y la computadora o el dispositivo de procesamiento que se esté utilizando.



Capítulo 3. Interfaz cerebro computadora

Para hacer esto posible a diferencia de la técnica basada en matrices de imágenes de la que se habló brevemente en la sección 1.2, se utiliza una técnica que se basa en el reconocimiento de patrones de ondas.

Como se dijo anteriormente las ondas generan actividad eléctrica que es medida mediante la diadema EPOC, posteriormente estas mediciones son enviadas al dispositivo de procesamiento, en este caso una computadora; y es aquí donde se analizan las señales y se obtiene la actividad que el usuario desea realizar. Para explicarlo de forma más clara se puede separar este proceso en dos partes principales **entrenamiento** y **acción**.

3.4.1 Entrenamiento

El **entrenamiento** consiste en pequeñas sesiones de ocho segundos en las cuales el usuario debe pensar en una actividad específica, esta actividad puede ser motora o emocional, es decir, el usuario puede pensar en mover alguna parte de su cuerpo o concentrarse en una emoción como sentirse triste o alegre; a este tipo de pensamiento o actividad se le conoce como proceso neuronal de base y genera patrones de actividad que son el objetivo a decodificar.

Actualmente las ICC de tipo no invasivas no son capaces de decodificar cualquier pensamiento o intención del usuario, es decir, para utilizarla el usuario no se concentra directamente en la tarea que desea llevar a cabo, sino que relaciona una actividad que para él es conocida y común, de forma tal que cuando quiera realizar una actividad pueda generar el mismo patrón de onda, el sistema identifique el patrón e interprete la intención a realizar.

Cuando se realiza el entrenamiento el sistema guarda un patrón generado por la actividad neuronal leída durante los ocho segundos de entrenamiento; de esta forma cuando el usuario vuelve a pensar en la actividad (proceso neuronal de base) que entrenó, los patrones de onda son similares a los entrenados y entonces se puede deducir la acción que desea realizar.

3.4.2 Acción

La **acción** se lleva a cabo después de haber entrenado algunas acciones, y consiste en que el usuario se concentre en la actividad que entrenó, con la ICC que se utilizó es posible realizar hasta 13 acciones de control distintas las cuales son: empujar (*push*), jalar (*pull*), soltar (*drop*), levantar (*lift*), izquierda (*left*), derecha (*right*), rotar izquierda (*rotate left*), rotar derecha (*rotate right*), rotar en el sentido de las manecillas del reloj (*rotate clockwise*), rotar en sentido contrario a las manecillas del reloj (*rotate anti-*

clockwise), rotar adelante (*rotate forwards*), rotar hacia atrás (*rotate reverse*), desaparecer (*disappear*). En esta parte del proceso, se procesan las lecturas que se obtienen de la diadema y se comparan con los patrones guardados en el sistema al momento en que se hicieron los entrenamientos; de esta forma el sistema puede detectar cual es la acción que el usuario desea realizar.

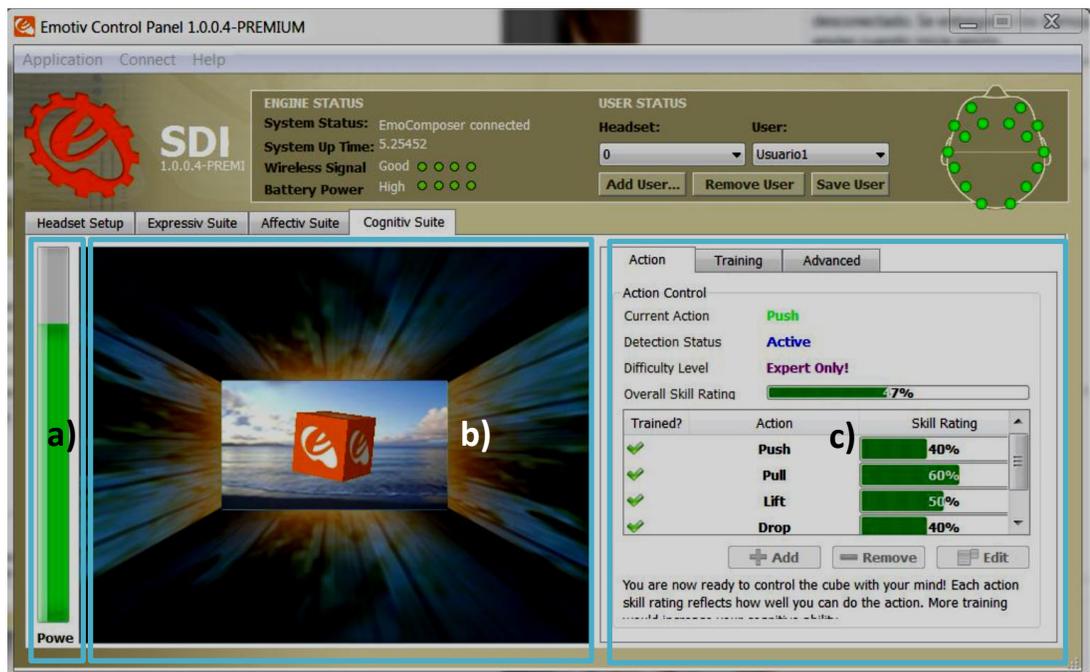


Fig. 32 Sección Cognitiva

En la figura 32 se muestra una imagen de la sección cognitiva que presenta la interfaz, es importante reconocer tres secciones principales de esta ventana;

- Barra color verde colocada de lado izquierdo. Esta barra muestra de forma gráfica el grado de similitud entre la actividad neuronal actual con algún patrón entrenado con anterioridad.
- Cubo de desplazamiento. Muestra de forma gráfica los movimientos que el usuario elije accionar, tales como: empujar, jalar, levantar, girar, por mencionar algunos.
- Acciones entrenadas. Muestra una lista de las acciones que ya han sido entrenadas así como el porcentaje de habilidad que tiene el usuario para controlar tal acción.



Capítulo 3. Interfaz cerebro computadora

Capítulo 4

Control del manipulador

4.1 Características mecánicas del manipulador

El robot fue diseñado y maquinado casi completamente en la Unidad Profesional Interdisciplinaria en Ingeniería y Tecnologías Avanzadas e instrumentado en el Centro de Innovación y Desarrollo Tecnológico en Cómputo ambos pertenecientes al Instituto Politécnico Nacional.

Para el trabajo aquí presentado se hace uso de tres grados de libertad: cintura, hombro y codo, los cuales son utilizados para localizar un punto en su espacio de trabajo, aunque el robot fue diseñado para contar con cinco grados de libertad.

En la figura 33 se muestra la estructura mecánica del brazo robótico, donde se aprecian los tres grados de libertad de la plataforma experimental. La primera articulación es la cintura y se controla a través del motor 1 con un sistema de transmisión por cable, siendo esta articulación la única que no se ve afectada por los efectos de la gravedad, sin embargo, presenta el mayor momento de inercia cuando los eslabones del brazo y antebrazo se encuentran alineados y formando 90° con respecto a la cintura.

La segunda articulación es el hombro y se controla por el motor 2 transmitiendo la potencia a la articulación mediante una transmisión de sinfín corona, siendo el hombro un elemento que se ve afectado por el momento de inercia, la gravedad de la articulación y por el codo.

La tercera articulación es el codo, el cual es controlado por el motor 3 y la potencia a esta articulación se transmite de la misma manera que la articulación anterior. Esta junta también se ve afectada por los efectos de gravedad y por el momento de inercia.

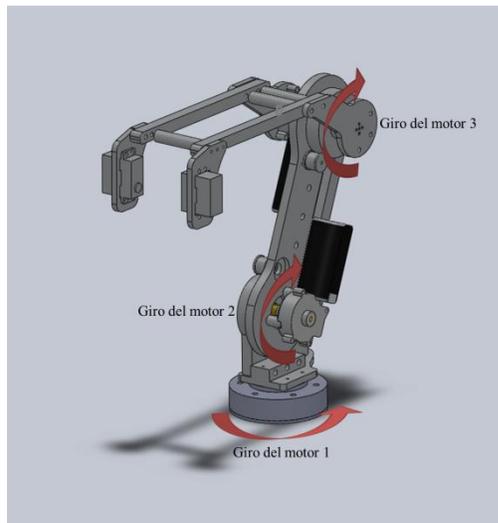


Fig. 33 Robot Manipulador

4.1.1 Espacio de trabajo

En la figura 34 se muestra el espacio de trabajo visto de forma lateral en el que el robot manipulador puede desempeñarse en forma segura, es decir, que no exista algún objeto que dañe el robot), y se encuentra determinado por las longitudes de los eslabones.

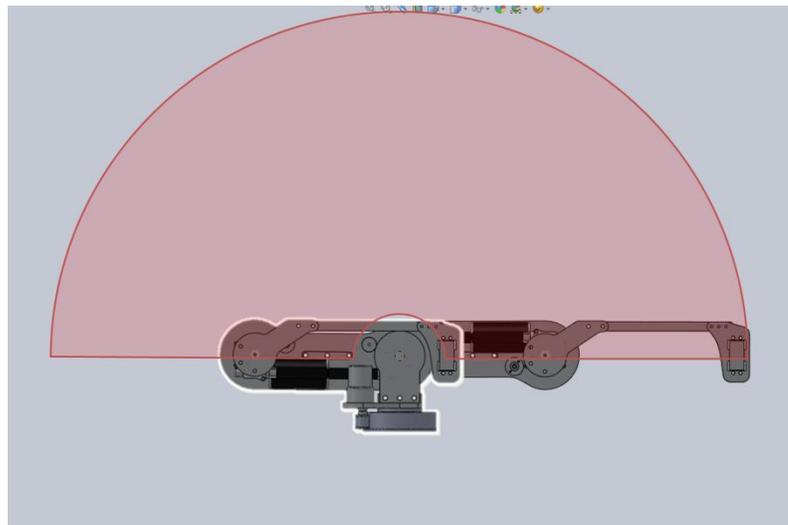


Fig. 34 Espacio de trabajo del manipulador vista lateral.

La estructura mecánica del robot se diseñó con la herramienta computacional Solid Works, con ella se analizaron los esfuerzos a los que se somete la estructura y el espacio seguro de trabajo al simular la estructura mecánica para diferentes posiciones, como se

4.2 Características electrónicas del manipulador

aprecia el espacio de trabajo es mayor al de otros manipuladores del mismo tipo, ya que éste tiene la capacidad de plegarse sobre sí mismo.

4.1.2 Especificaciones técnicas

En la tabla 1 se muestran las especificaciones del robot manipulador, correspondientes a actuadores, sensores, radios de operación, transmisión, entre otras.

Característica	Especificación
Número de Ejes	3
Radio máximo de operación	465 mm
Efector final	No Implementado
Realimentación	Encoders ópticos incrementales en cada motor. Señales cuadradas desfasadas 90°, entrada 5 Vcd.
Actuadores	1 Motor de CD, 12 V 2 Motores de CD, 24 V
Transmisión	Eje 1: Cable Eje 2: Sinfín corona Eje 3: Sinfín Corona
Peso total del robot	4 Kg.
Carga máxima	0.2 Kg.
Rango de movimiento:	
Eje 1: Cintura	300°
Eje 2: Hombro	180°
Eje 3: Codo	270°

Tabla 1. Especificaciones técnicas del manipulador

4.2 Características electrónicas del manipulador

Cada articulación del robot manipulador se controla por un motor de corriente directa de 24 volts. Este tipo de motor fue utilizado debido a sus características dinámicas y facilidad de control, además del par que proporciona siendo de 4.5 Nm. Los motores que controlan cada articulación son de la marca Valeo® y se muestran en la figura 35.

La localización y el sentido de giro de cada eje son medidos por un encoder óptico incremental E6A2-C de dos canales, el cual consiste en un disco ranurado de 500 cuentas por revolución. El sentido de giro de la articulación se evalúa comparando la señal de cada canal desfasada 90°.



Fig. 35 Motor Valeo utilizado como actuador

El control del robot se realiza utilizando un chipKIT Max 32[37], el cual es una tarjeta de microcontroladora, que cuenta con un procesador Microchip PIC32MX795F512 de 80 Mhz, 512 Kb de memoria flash y 128 Kb de memoria RAM y conector usb 2.0. Está basada en la plataforma Arduino, por lo que puede ser programado con el mismo software y la programación es idéntica. Cuenta con 83 pines de entrada/salida, 16 entradas analógicas, puertos específicos para I²C y modulación por ancho de pulso (*PWM*). En la figura 37 se observa una imagen de esta tarjeta.

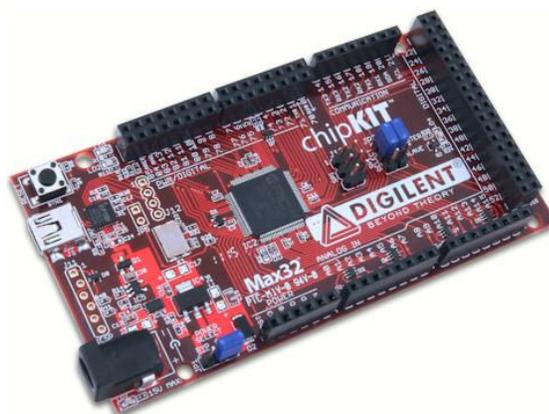


Fig. 36 Tarjeta Microcontroladora chipKIT Max32

Para la etapa de potencia se utilizaron puentes H, 33887 de Freescale Semiconductor, que son circuitos integrados de potencia con retroalimentación de carga, sus voltajes de operación van de 5.0 volts a 28.0 volts, soporta frecuencias de PWM de 10 kHz. y carga de hasta 5.0 Amperes. El diagrama eléctrico de conexión se muestra en la figura 37.

4.2 Características electrónicas del manipulador

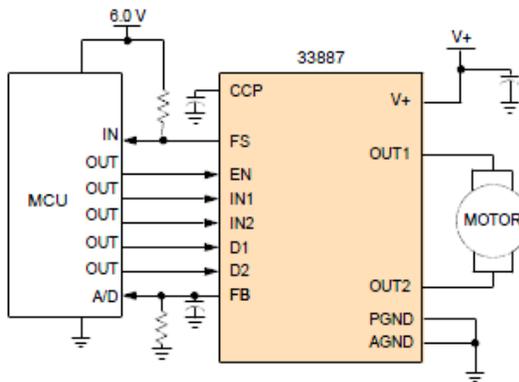


Fig. 37 Diagrama de conexión eléctrica del puente H [A.1]

En la figura 38 se muestra el diagrama electrónico de conexión completo que se implementó para realizar el control del manipulador, como se puede observar en la imagen fue necesario utilizar tres tarjetas chipKIT Max 32, esto debido a que la resolución de los encoders junto con el número de revoluciones de los motores generaban frecuencias muy que provocaban errores en el proceso de lectura de los encoders.

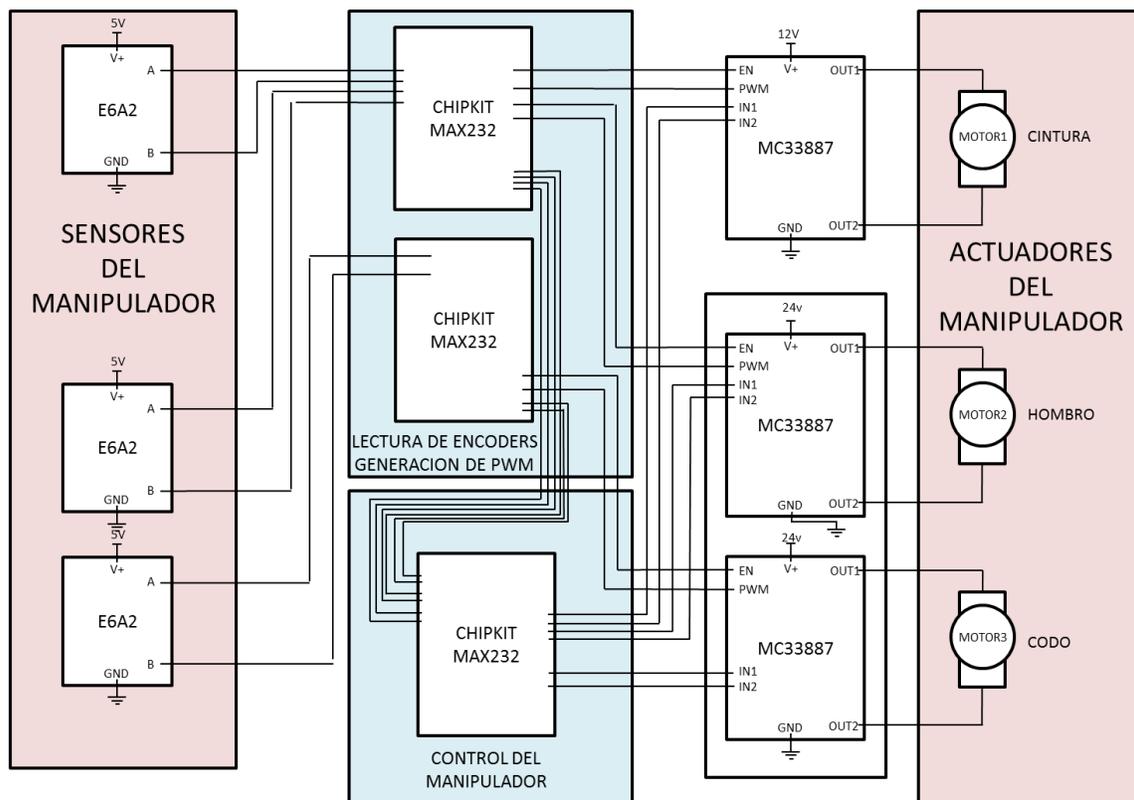


Fig. 38 Diagrama electrónico de conexión del robot manipulador

4.3 Control del robot manipulador

Para el trabajo presentado en esta tesis, el usuario debe ser capaz de controlar la posición del manipulador y esto es posible permitiendo que mediante la interfaz cerebro computadora el usuario modifique la posición deseada del manipulador, de esta forma el robot debe seguir las posiciones deseadas que el usuario comande, para esto es necesario aplicar una ley de control que garantice esta actividad.

El objetivo del control es el de aplicar una ley de retroalimentación de estados $\tau = \tau(q, \dot{q})$ tal que el efector final del robot manipulador alcance una posición p_d y una orientación deseada R_d de manera asintótica, es decir:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} p(t) = p_d \quad (4.1)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} R(t) = R_d \quad (4.2)$$

Donde: $p(t) \in R^3$ es la posición y $R(t) \in R^{3 \times 3}$ la matriz de orientación del efector final, mientras que $p_d \in R^3$ y $R_d \in R^{3 \times 3}$ son la posición y la matriz de orientación deseada. Es importante mencionar que para el trabajo aquí presentado solo se resuelve el problema de la posición del manipulador y no de la orientación, por lo que el control implementado será única y exclusivamente para garantizar control de posición.

4.3.1 Control PD

El controlador PD es uno de los controladores mas sencillos que pueden aplicarse en el control de movimiento de robots manipuladores, ha sido probado y utilizado ampliamente y cumple adecuadamente su objetivo en forma general. La acción del controlador proporcional derivativo se define como:

$$u(t) = K_p e(t) + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (4.3)$$

Donde: $u(t)$ representa la energía suministrada al sistema, K_p es una ganancia proporcional ajustable, K_d es una ganancia derivativa también ajustable, $e(t)$ es el error de posición definido como la diferencia entre la posición actual y la posición deseada (4.4), y $de(t)/dt$ el error en velocidad definido como la diferencia entre la velocidad actual y la velocidad deseada [12]. (4.5)

$$e(t) = p_a - p_d \quad (4.4)$$

$$\dot{e}(t) = \dot{p}_a - \dot{p}_d \quad (4.5)$$

4.3.2 Control PID deslizante

Actualmente la mayoría de los brazos robóticos en la industria son controlados haciendo uso de controladores tipo PD y en algunos casos particulares PD con compensación de gravedad, este tipo de controladores son útiles para realizar tareas de regulación, sin embargo, no aseguran estabilidad en tareas de seguimiento y son incapaces de eliminar perturbaciones constantes.

Por tal motivo, se hicieron pruebas utilizando un control PID deslizante con referencia en [3], el cual garantiza estabilidad, libre de castaño, al mismo tiempo que compensa las dinámicas provocadas por la inercia y gravedad; este tipo de controlador puede ser utilizado para tareas de seguimiento. Considerando la dinámica del robot mostrada en la ecuación 2.19 (Sección 2.5) el controlador se define como:

$$\tau = -K_p \Delta q - K_v \Delta \dot{q} + K_d S_d - K_i \int_{t_0}^t \text{sgn}(S_q(\zeta)) d\zeta \quad (4.7)$$

Donde $\{K_p, K_d, K_v, K_i\} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ y son matrices diagonales simétricas definidas positivas, Δq es el error de posición, $\Delta \dot{q}$ es el error de velocidad, S_d es la superficie del error articular. Este control asegura seguimiento y su estabilidad ha sido probada y demostrada [3].

4.4 Pruebas de los controladores

Ambos controladores (secciones 4.3.1 y 4.3.2) fueron implementados y probados, sin embargo, dado que para este proyecto solo se realiza control de posición y no de seguimiento se decidió utilizar el control PD tradicional mencionado en la sección 4.3.1 debido a su facilidad en la implementación y a que cumple con los requisitos de éste trabajo. Las pruebas fueron realizadas con el robot Falcon de tres grados de libertad, el cual es un robot comercial tipo delta, con él se realizaron dos tareas con cada control; una de regulación y otra de seguimiento, que se muestran a continuación.

En la figura 39 se observa el comportamiento del controlador tipo PD en tarea de regulación, donde se le pide ir al punto P (1.0, 0.8), como se puede observar existe un pequeño error que se incrementa en el eje y, esto es debido a que sobre este eje actúa la fuerza de gravedad, impidiendo que el robot llegue al punto deseado.

Capítulo 5. Implementación de la interfaz cerebro máquina

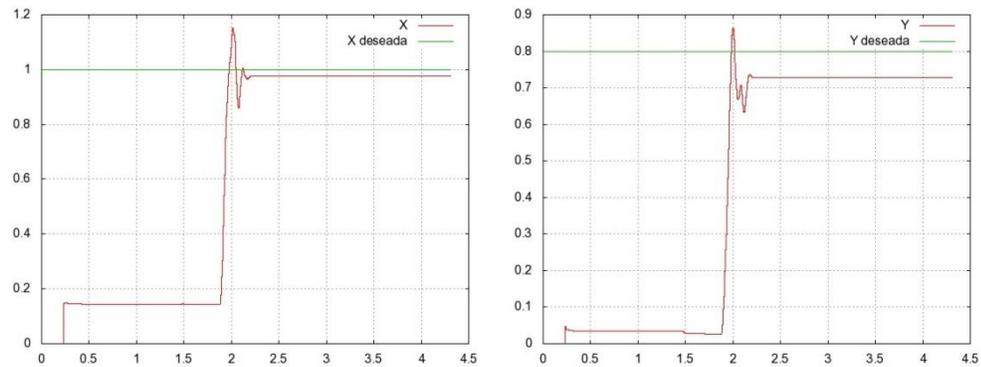


Fig. 39 Posiciones obtenidas y posiciones deseadas control PD en regulación.

En la figura 40 se observa gráficamente el comportamiento del error en la tarea de regulación y como es que el robot estabiliza su posición tratando de llegar al punto deseado, teniendo así un controlador estable en tareas de regulación.

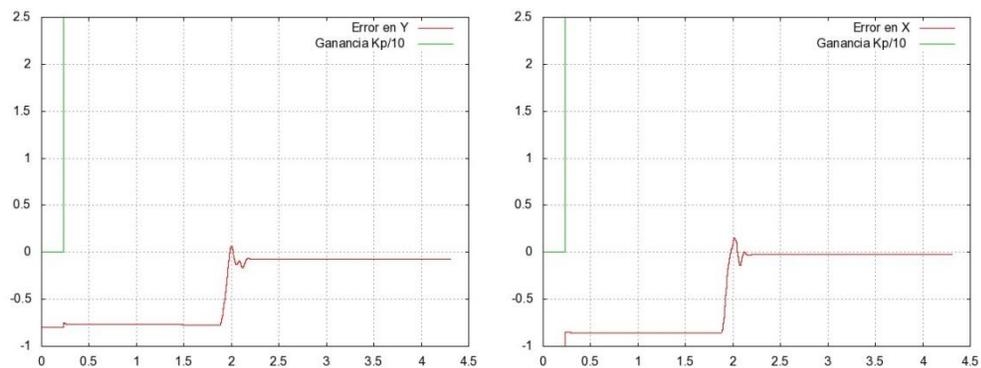


Fig. 40 Error en X y Y Control PD en Regulación.

Para las pruebas de seguimiento, se utilizó como trayectoria deseada un círculo en el plano XY, de esta forma el robot tendría como tarea dibujar un círculo utilizando un controlador tipo PD. En la figura 41 se muestra el comportamiento del controlador tipo PD en tarea de seguimiento.

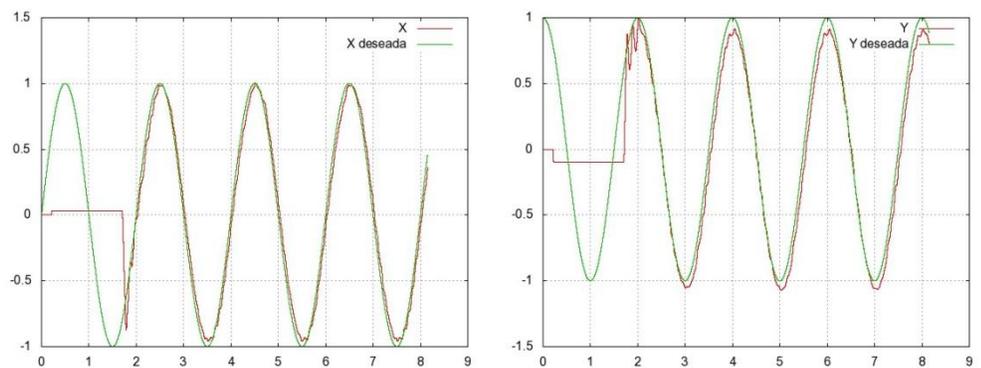


Fig. 41 Posiciones obtenidas y posiciones deseadas control PD en seguimiento.

4.4 Pruebas de los controladores

En la figura 42 se puede observar el comportamiento del error en ambos ejes en la tarea de seguimiento.

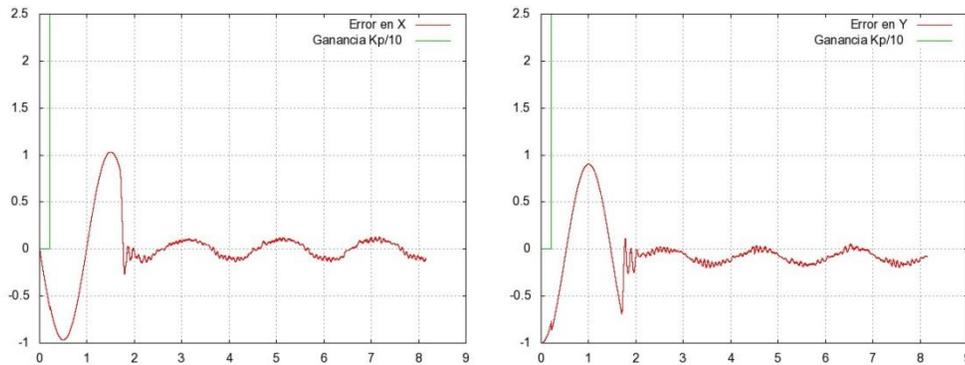


Fig. 42 Error en X y Y Control PD en Seguimiento.

En la figura 43 se muestra en color verde la trayectoria deseada y en color rojo la trayectoria que el robot describió durante el experimento.

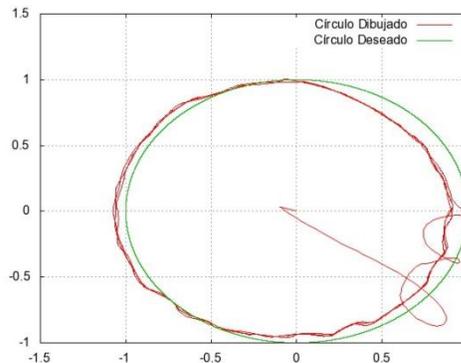


Fig. 43 Círculo deseado en verde y círculo obtenido en color rojo.

En la figura 44 se observa el comportamiento del controlador tipo PID en tarea de regulación, teniendo como punto deseado P (1.0, 0.8), el mismo que se utilizó para probar el controlador PD en tarea de regulación, como se puede notar también se presenta el error que se incrementa en el eje y mostrado en el controlador PD, esto es debido a que sobre este eje actúa la fuerza de gravedad, este error tiende a disminuir con el paso del tiempo al utilizar un controlador tipo PID.

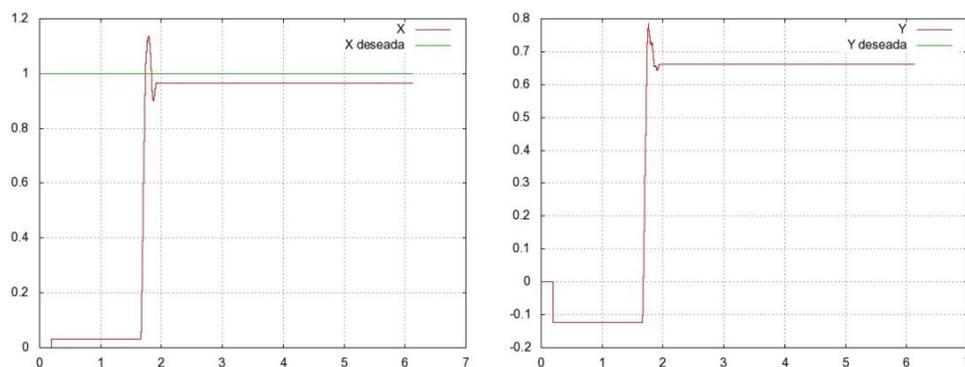


Fig. 44 Posiciones obtenidas y posiciones deseadas control PID en regulación.

En la figura 45 se muestran las gráficas de los errores en X y Y del controlador PID en tarea de regulación.

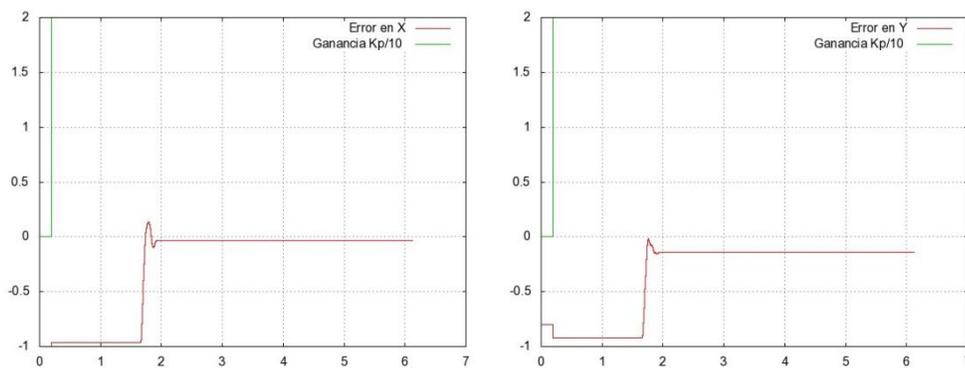


Fig. 45 Error en X y Y Control PID en Regulación.

Para la prueba de seguimiento se utilizaron las mismas ecuaciones que en el control PD, la figura 46 muestra la gráfica de las posiciones deseadas en color verde, y en color rojo las posiciones del robot al ejecutar la tarea.

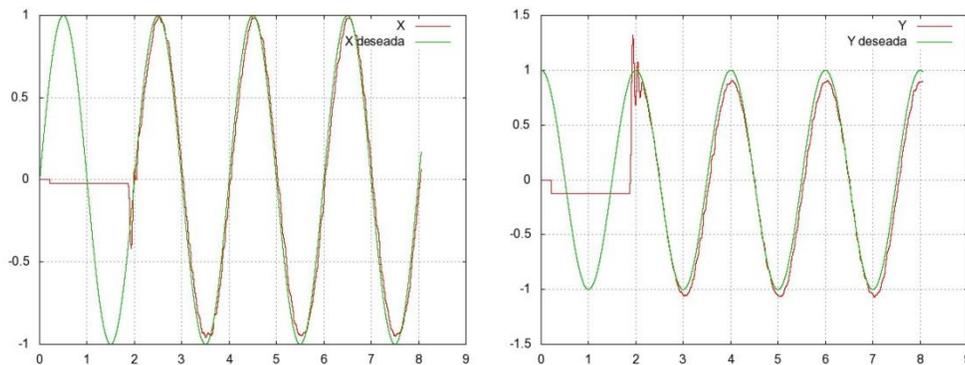


Fig. 46 Posiciones obtenidas y posiciones deseadas control PID deslizante en seguimiento.

4.4 Pruebas de los controladores

La figura 47 muestra las gráficas de los errores en los ejes X y Y al realizar la prueba de seguimiento.

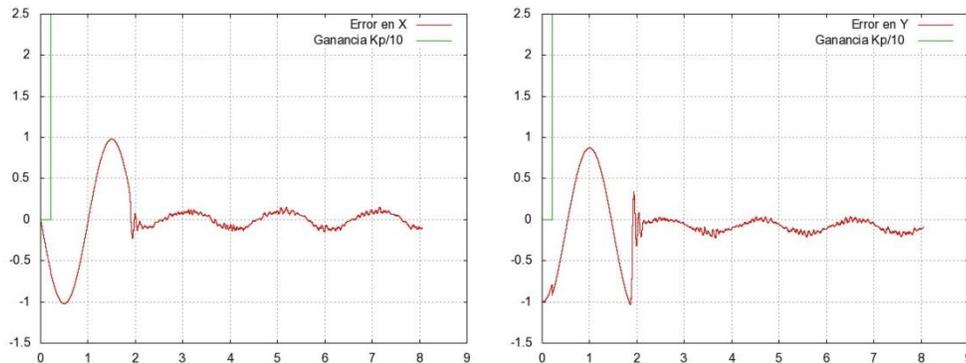


Fig. 47 Error en X y Y Control PID deslizante en Seguimiento.

En la figura 48 se observa el círculo deseado y el círculo dibujado al realizar la prueba del controlador PID en tarea de seguimiento.

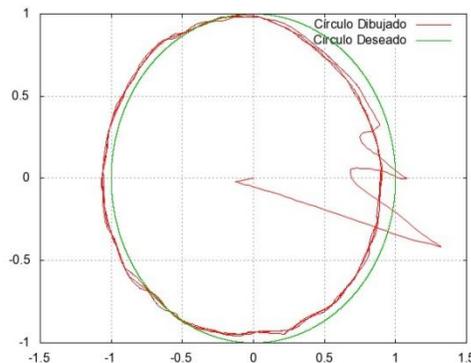


Fig. 48 Círculo deseado en verde y círculo obtenido en color rojo.

Como se puede apreciar en las imágenes anteriores el error presente en cada controlador tiende a estabilizarse alrededor del valor de cero, con una pequeña diferencia entre ambos controladores, sin embargo, el tiempo empleado para la sintonización de las ganancias y la implementación del controlador PID deslizante es sumamente mayor al utilizado en la implementación del controlador PD y dada la finalidad del sistema el control PD cumple con las características necesarias para ser utilizado en este trabajo.



Capítulo 5. Implementación de la interfaz cerebro máquina



Capítulo 5

Implementación de la interfaz cerebro máquina

5.1 Interfaz cerebro máquina

Diariamente en nuestra vida cotidiana interactuamos cada vez más con máquinas, tales como computadoras, televisores, celulares, electrodomésticos, por mencionar algunos. Esta interacción se realiza mediante una interfaz hombre maquina (*HMI por sus siglas en inglés*), la cual constituye un medio para que el usuario pueda comunicarse con el equipo que desea.

Cuando nosotros como usuarios interactuamos con alguna interfaz hombre máquina, por ejemplo al tratar de hacer clic con el botón del mouse de una computadora, nuestra intención reside en algunas redes neuronales dedicadas dentro del cerebro y se traducen en complejas órdenes motoras, las cuales salen del cerebro y son enviadas a los músculos a través del sistema nervioso periférico. El resultado de esta acción en unión con nuestros sentidos como la vista o el tacto que retroalimentan de información al cerebro permite que podamos realizar la tarea que deseamos.

Como se mencionó anteriormente la tecnología de interfaz cerebro computadora es un sistema de interacción hombre máquina capaz de traducir nuestras intenciones en interacción real con un mundo físico o virtual. El funcionamiento básico de una ICC es medir la actividad cerebral, procesarla para obtener las características de interés, y una vez obtenidas interaccionar con el entorno de la forma deseada por el usuario. En los últimos años se han desarrollado varios trabajos tales como [26][27][29], en los cuales se hace uso de esta tecnología, o bien desarrollan dispositivos que puedan ser utilizados para crear una interfaz propia [28], esto es debido a que el conocimiento científico sobre estas interfaces es muy escaso o se encuentra en manos de compañías que lo mantienen como confidencial.



Capítulo 5. Implementación de la interfaz cerebro máquina

En el presente capítulo se describirá la forma en que la Interfaz Cerebro Máquina (*BMI por sus siglas en inglés*) fue implementada, los resultados obtenidos, así como los factores que pueden afectar el desempeño de esta interfaz.

Una interfaz cerebro máquina puede ser definida como un sistema capaz de monitorear la actividad cerebral de una persona y traducir sus intenciones en comandos para controlar un dispositivo. En una ICM ideal, las órdenes motoras generadas en el cerebro en lugar de ser enviadas hacia los músculos, deben ser enviadas a un actuador artificial como un robot; los sentidos del usuario pueden seguir funcionando como retroalimentación para controlar la acción deseada en el dispositivo.

En este caso, la interfaz implementada permite al usuario mover la posición del efector final de un robot manipulador utilizando una aplicación programada en C++, la cual se comunica mediante el puerto COM al microcontrolador que se encarga del control del robot manipulador. De esta forma el usuario después de haber entrenado y teniendo la habilidad para controlar tres acciones puede proceder a controlar el robot manipulador utilizando solo su actividad cerebral. Como se dijo en el primer capítulo una ICC al igual que una ICM se compone de tres partes principales; las cuales son el sensado o monitoreo de la actividad cerebral, el procesamiento de la información y la ejecución de la aplicación o interacción con el ambiente. A continuación se describirán la implementación de cada sección en la Interfaz Cerebro Máquina que fue diseñada.

5.2 Sensado de la actividad cerebral del usuario

Antes de utilizar la interfaz, es necesario realizar una serie de pasos que consisten en: cargar la batería de la diadema, hidratar los sensores, colocar los sensores en la diadema, y la correcta colocación de la diadema por parte del usuario, para entonces poder hacer uso de la interfaz.

La diadema tiene un puerto mini USB en la parte trasera, y cuenta con un cargador que se conecta a la energía eléctrica; para que la batería se recargue completamente se requieren aproximadamente cuatro horas de carga, a un costado del conector se encuentra un led que enciende color rojo cuando la diadema está en proceso de carga, verde cuando está cargada completamente y azul cuando se encuentra en uso.

Para el correcto funcionamiento de la diadema se deben humectar los 16 electrodos que utiliza, con una solución salina multipropósito para lentes de contacto, la forma correcta de humectar consiste en colocar la solución sobre la almohadilla que se encuentra en el estuche de los sensores, después cerrar el estuche y sacudir. Si al abrir se

5.2 Sensado de la actividad cerebral del usuario

nota que los sensores no se humectaron correctamente, o al hacer uso de la diadema algunos sensores proporcionan mala señal es recomendable agregar unas cuantas gotas al electrodo que presente problemas. En la figura 48 se puede observar una imagen del estuche con los electrodos y la forma en que deben humectarse.

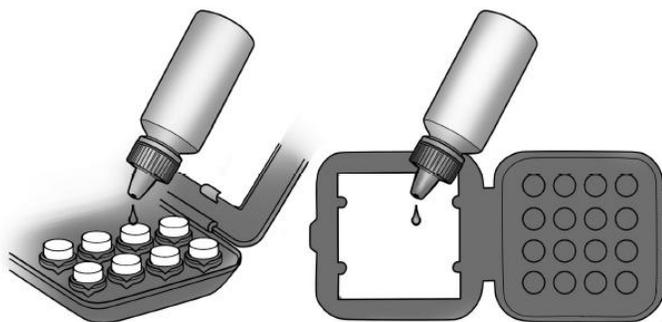


Fig. 49 Humectación de los electrodos de la diadema

Una vez que los electrodos fueron humectados es necesario colocarlos en la diadema, para hacer esto es importante notar que cuentan con una cuerda y se les debe dar un pequeño giro tanto para colocarlos en la diadema como para quitarlos, de la misma forma al guardarlos en el estuche o sacarlos de ahí. Para colocarlos es necesario darles un pequeño giro en el sentido de las manecillas del reloj hasta escuchar un “click”, el cual indica que el sensor se colocó correctamente, y para quitarlos es necesario girar los sensores en sentido contrario. En la imagen 49 podemos observar la forma de colocarlos 49(a) y quitarlos 49(b) de la diadema.

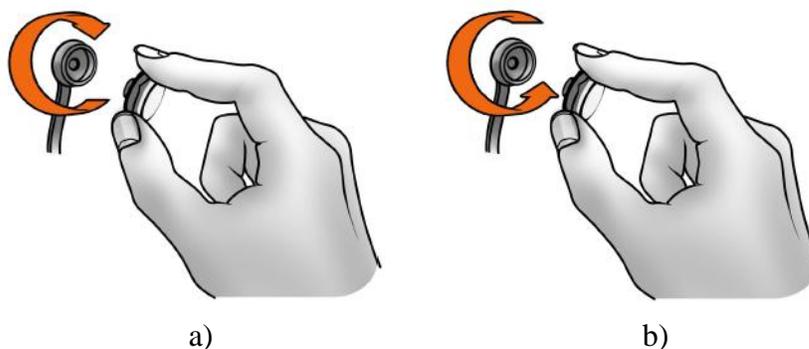


Fig. 50 Colocación de los sensores en la diadema

Después que fueron colocados los sensores en la diadema, el usuario debe colocársela. La forma correcta de hacerlo es usando ambas manos y deslizando hacia abajo la diadema desde la parte superior de la cabeza figura 50(a); la diadema posee dos terminales para sensores que no se utilizan para lectura, sino para fijar la diadema a la

Capítulo 5. Implementación de la interfaz cerebro máquina

cabeza del usuario, estas terminales cuentan con unas gomas color negro, las cuales deben ser colocadas en el hueso detrás de la oreja como se muestra en la figura 50(b) para evitar que la diadema se mueva de lugar mientras el usuario la utiliza.

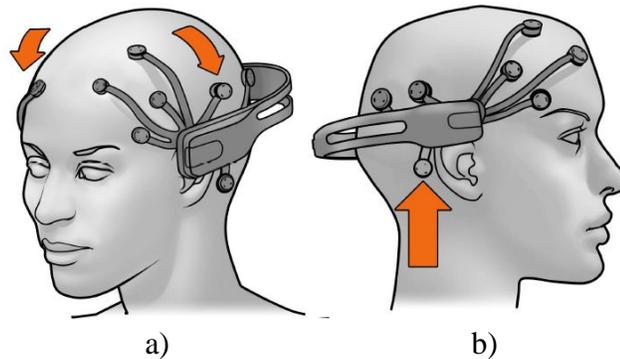


Fig. 51 Colocación de la diadema

Por último es necesario tomar en cuenta dos indicaciones más para la correcta colocación y funcionamiento de la diadema; los dos sensores frontales deben colocarse aproximadamente en la línea donde inicia el cabello o lo que es lo mismo a una distancia de tres dedos por encima de las cejas como se muestra en la figura 51(a), y se deben presionar de cinco a diez segundos los dos electrodos de referencia que se encuentran en la parte de atrás y arriba de las orejas como se muestra en la figura 51b.

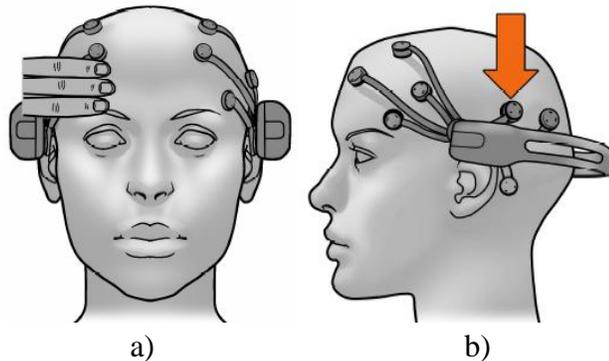


Fig. 52 Colocación de la diadema de acuerdo al cráneo del usuario

Una vez que el usuario se ha colocado correctamente la diadema lo único que falta es conectar el receptor USB a la computadora y entonces la interfaz se encuentra lista para el monitoreo de la actividad cerebral del usuario, si la diadema no es colocada adecuadamente o los sensores no se encuentran correctamente humectados, las señales que la diadema envía a la computadora continuamente van a presentar problemas de ruido y no va a funcionar correctamente ya que las lecturas recibidas pueden no ser las correctas.

5.3 Procesamiento de la actividad cerebral

Para tener acceso a la información que nos proporcionan los sensores es necesario comunicarnos con la diadema por medio del kit de desarrollo de software (*SDK Software Development Kit*) que proporciona el fabricante, y por medio de las siguientes instrucciones obtenemos los valores de *actionType* y *actionPower* que nos indican la acción que el usuario quiere realizar y el grado de similitud entre las lecturas obtenidas y el patrón guardado durante los entrenamientos.

```
Epoc.UpdateEvents();  
actionType = Epoc.getCogActionType();  
actionPower = Epoc.getCogActionPower();
```

Estas instrucciones son métodos pertenecientes a la clase programada para el uso de la interfaz EPOC y deben ejecutarse dentro de un ciclo que permita actualizar la información proveniente de la diadema.

En la figura 52 se muestra a un usuario utilizando la diadema EPOC y la forma correcta en que se encuentra colocada.



Fig. 53 Usuario utilizando la diadema EPOC

El siguiente paso es procesar la información recibida de la diadema y para ello utiliza la aplicación que se programó para este trabajo. En la siguiente sección se describirá como funciona la aplicación y cuáles son los procesos que se llevan a cabo para que la interfaz deduzca la acción que el usuario desea realizar.

5.3 Procesamiento de la actividad cerebral

Toda ICC tiene asociada un motor de procesamiento de señal encargado de extraer los datos verdaderamente importantes de toda la información obtenida en el sensado de la actividad cerebral. Esta actividad de procesamiento representa la parte más compleja de toda interfaz cerebro computadora puesto que el objetivo de toda interfaz es ser

rápida y con una gran precisión. El procesamiento de la actividad cerebral se puede dividir en dos partes, que son, identificación de la actividad deseada por el usuario y el envío de señales de control a la máquina a controlar; en este caso el robot manipulador.

5.3.1 Identificación de la actividad deseada

La primera parte se lleva a cabo utilizando la sección cognitiva de la interfaz gráfica que presenta el EPOC; la cual evalúa en tiempo real la actividad cerebral del usuario para determinar las acciones que el usuario desea realizar intencionalmente. Es necesario que el usuario halla entrenado al menos una acción más el estado neutral.

El estado neutral corresponde a las lecturas recibidas cuando el usuario no desea realizar una acción, es decir, es toda la actividad cerebral de fondo que siempre se está recibiendo por parte de los sensores; aunque el usuario se encuentre tranquilo y relajado el cerebro siempre se encuentra activo y generando actividad eléctrica la cual es necesario conocer para entonces determinar cuando se quiere realizar una acción y cuando no. En la siguiente imagen (figura 53) se muestra una sesión de entrenamiento en proceso, en esta etapa el usuario debe concentrarse en una acción que le indique al sistema que quiere mover el cubo hacia abajo.

El proceso de entrenamiento habilita al procesador de señales llamado EmoEngine en la aplicación desarrollada cuya función es la de analizar las ondas cerebrales del usuario y desarrollar un patrón de señales que corresponda a la acción entrenada y permita distinguirlo del estado neutral. El EmoEngine tiene la capacidad de aprender y refinar los patrones entrenados para cada acción, incluyendo el estado neutral. Mientras mas sesiones de entrenamiento realice el usuario el procesador de señales detectará de forma más rápida y precisa la intención del usuario y podrá decodificar que acción es la que quiere realizar.

5.3 Procesamiento de la actividad cerebral

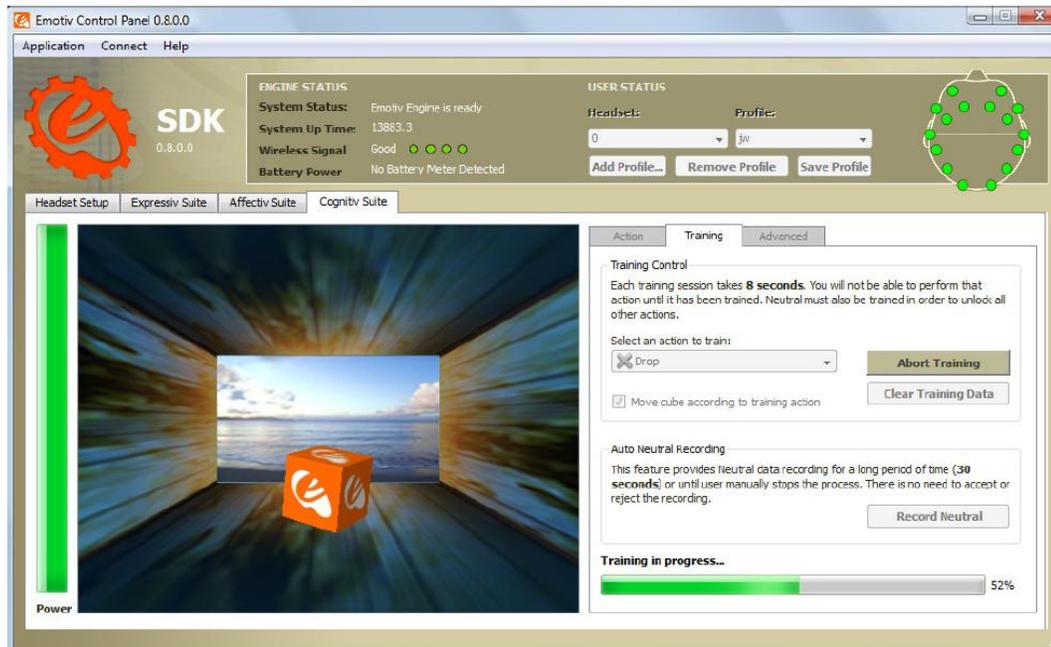


Fig. 54 Interfaz de entrenamiento

El proceso de entrenamiento consiste en tres pasos fundamentales:

- Seleccionar la acción a entrenar
- Iniciar la sesión de entrenamiento
- Aceptar o Rechazar el entrenamiento

Para seleccionar la acción a entrenar basta con seleccionar que acción se desea de la lista desplegable mostrada en interfaz de entrenamiento (figura 55), en esta lista aparecerán con una marca de verificación color verde las acciones que ya han sido entrenadas; y con una marca color rojo aquellas que no han sido entrenadas.

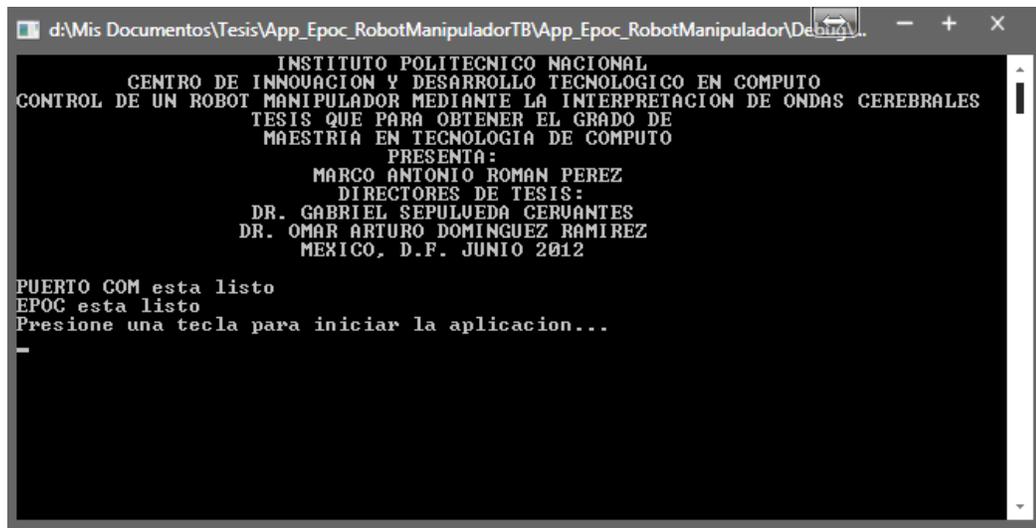
Cuando el usuario se encuentre listo para empezar a concentrarse o visualizar la acción que quiere entrenar, se debe presionar el botón de “*Start training*” para iniciar el entrenamiento. Durante este proceso es fundamental que el usuario este completamente concentrado y trate de mantener su estado mental durante los ocho segundos que dura el entrenamiento. El usuario debe estar calmado y sin realizar ninguna clase de gesticulación, ya que al mover alguna parte del cuerpo o cara el sistema puede interpretar que esa actividad es la que manda a realizar la acción.

Finalmente después de estos ocho segundos de entrenamiento el usuario puede decidir si aceptar o rechazar el entrenamiento, esto es importante, ya que alguna perturbación pudo interferir en el proceso de entrenamiento y si el usuario considera que

Capítulo 5. Implementación de la interfaz cerebro máquina

no pudo concentrarse o algún factor externo dificultó la sesión lo más recomendable es que rechace la sesión e inicie con otra.

Cuando el usuario haya entrenado al menos tres acciones además de la neutral le será posible utilizar la interfaz aquí desarrollada (figura 54); para lograr controlar de forma apropiada las tres acciones de acuerdo a las pruebas que se realizaron para este trabajo se necesitarán aproximadamente dos semanas en las cuales cada día se llevará a cabo una sesión de una hora de entrenamiento, en la cual el usuario debe aprender a controlar su actividad cerebral y descubrir que pensamientos son los que disparan la acción en la interfaz. Una vez hecho esto se debe ejecutar la aplicación que se encargará de enviar los comandos a la aplicación que controla al robot manipulador.



```
d:\Mis Documentos\Tesis\App_Epoc_RobotManipuladorTB\App_Epoc_RobotManipulador\Debuta...
INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
CENTRO DE INNOVACION Y DESARROLLO TECNOLOGICO EN COMPUTO
CONTROL DE UN ROBOT MANIPULADOR MEDIANTE LA INTERPRETACION DE ONDAS CEREBRALES
TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRIA EN TECNOLOGIA DE COMPUTO
PRESENTA:
MARCO ANTONIO ROMAN PEREZ
DIRECTORES DE TESIS:
DR. GABRIEL SEPULVEDA CERUANTES
DR. OMAR ARTURO DOMINGUEZ RAMIREZ
MEXICO, D.F. JUNIO 2012

PUERTO COM esta listo
EPOC esta listo
Presione una tecla para iniciar la aplicacion...
-
```

Fig. 55 Aplicación Desarrollada.

5.3.2 Comandos de control

Para establecer una vía de comunicación entre la aplicación que envía los comandos de control y la diadema que sensa la actividad cerebral del usuario se utiliza la interfaz de programación de aplicaciones (*API del inglés Application Programming Interface*) provista por el fabricante, la cual es una interfaz creada en ANSI C que contiene tres archivos de encabezado que son `edk.h`, `EmoStateDLL.h` y `edkErrorCode.h`, y además cuenta con dos bibliotecas de enlace dinámico de nombre `edk.dll` y `edk_utils.dll`. Esta API provee el conjunto de funciones y procedimientos necesarios para que desde la aplicación desarrollada en C++ se pueda establecer una vía de comunicación con la diadema y recibir la información que está sensando.

5.3 Procesamiento de la actividad cerebral

La forma en que la API y la aplicación trabajan se muestra en la figura 55. Como se puede observar el primer paso en esta aplicación consiste en establecer la comunicación con la diadema para esto dentro de la aplicación se debe llamar a la función `EE_EngineConnect()` o `EE_EngineRemoteConnect()`; ambas funciones permiten establecer una conexión con el motor de procesamiento (`EmoEngine`) y de esta forma mediante el intercambio de paquetes conocer la información leída por la diadema.

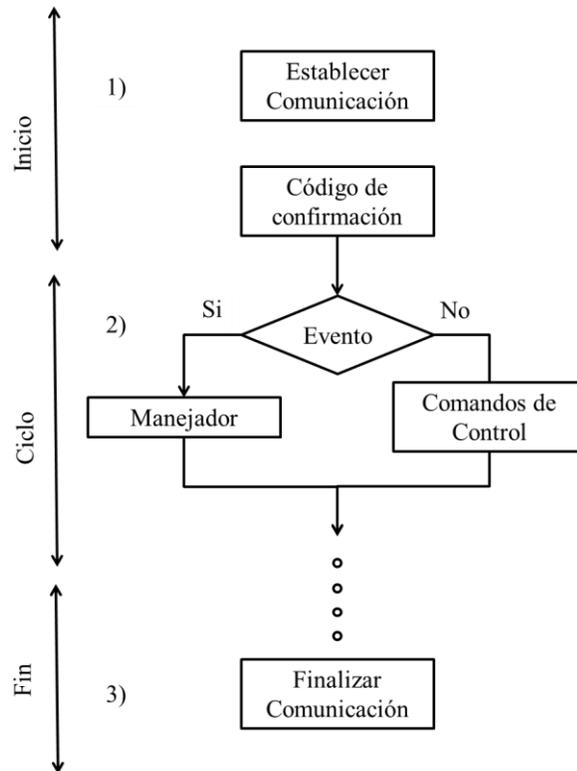


Fig. 56 Diagrama de ejecución de la aplicación

En el paso dos el motor de procesamiento se comunica con la aplicación mediante la publicación de eventos, los cuales pueden ser leídos llamando a la función `EE_EngineGetNextEvent()`. De forma general el motor de procesamiento genera eventos con el fin de enviar paquetes de información alrededor de diez a quince veces por segundo, los cuales indican todos los cambios en el estado del usuario.

Los eventos se clasifican en tres tipos distintos:

- Eventos relacionados a hardware (*Hardware-related events*).
- Actualización del estado del usuario (*New EmoState events*).
- Eventos específicos de cada sección (*Suite.specific events*).

Capítulo 5. Implementación de la interfaz cerebro máquina

Los eventos relacionados a hardware informan cuando un usuario conecta o desconecta la diadema o diademas a la computadora, las actualizaciones del estado de usuario proporcionan la información relacionada al estado facial, cognitivo y emocional del usuario. En estos paquetes de información encontramos cuando un usuario desea realizar una actividad. Los eventos específicos de cada sección se relacionan al entrenamiento y configuración de las secciones cognitivas y expresivas de la interfaz de usuario.

Para la aplicación desarrollada (figura 55) los eventos relacionados a la actualización del estado del usuario son los mas importantes, ya que en estos eventos específicamente los relacionados a la actividad cognitiva del usuario se reciben paquetes de información que indican la intención del usuario, es decir, si el usuario desea empujar, jalar o girar el cubo que son las acciones utilizadas en esta interfaz; estas acciones fueron elegidas pensando en que seria más fácil para el usuario relacionarlas con el control del manipulador sin embargo pueden escogerse cualquiera de las 13 acciones descritas en la sección 3.4 de esta tesis.

Una vez que el sistema detecte que acción es la que el usuario desea realizar se procede a enviar los comandos de control al robot manipulador mediante el puerto COM, de esta forma y dependiendo de la acción elegida por el usuario se envían cuatro comandos, los cuales son:

- Avanzar
- Retroceder
- Cambiar de eje
- Detener

Como se mencionó anteriormente la interfaz hace uso de tres acciones y éstas se encuentran relacionadas con los comandos de la siguiente forma: si el usuario piensa en mover hacia adelante manda el comando de avanzar al robot, si el usuario piensa en jalar manda el comando de retroceder, si el usuario piensa en girar en el sentido contrario de las manecillas del reloj manda el comando de cambiar de eje al robot y por ultimo, si el usuario se encuentra en el estado neutral manda el comando de detener al robot, como se muestra en la figura 56. La forma en que estos comandos afectan el comportamiento del robot se describe en la siguiente sección.

5.3 Procesamiento de la actividad cerebral



El tercer paso de acuerdo a la figura 55 consiste en finalizar la comunicación con la diadema, esto se debe realizar antes de terminar nuestra aplicación, de lo contrario se podrían presentar problemas al tratar de ejecutar de nuevo el programa. Para terminar la comunicación hacemos una llamada a la función `EE_EngineDisconnect()` la cual termina cualquier comunicación que se haya abierto con la diadema.

5.4 Interacción con el ambiente

La interacción con el ambiente constituye la parte final de la interfaz cerebro computadora y es la forma en que la interfaz interactúa con el entorno que puede ser desde mover el puntero en una computadora hasta mover una silla de ruedas o escribir mensajes en la computadora. En este caso la forma en que nuestra interfaz interactúa es a través de un robot manipulador de tres grados de libertad.

Al iniciar la aplicación de control el robot debe colocarse en la posición inicial mostrada en la figura 57, esto lo hacemos mediante el control y dando esa posición como la inicial deseada; posteriormente conforme se reciban los comandos de control, la ubicación del efector final cambiará.

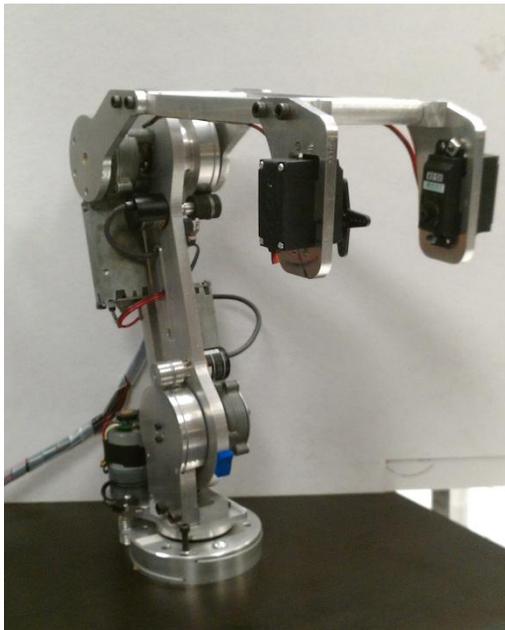


Fig. 58 Posición inicial del robot

La aplicación de control del robot se ejecuta en el microcontrolador, el cual se encuentra conectado a la computadora por un puerto USB, recibe cuatro comandos a través del puerto COM que controlan el comportamiento del robot y envía las señales de control a la electrónica que se encarga de mover el robot; la forma en que funciona la aplicación de control del robot se muestra en el diagrama de la figura 58.

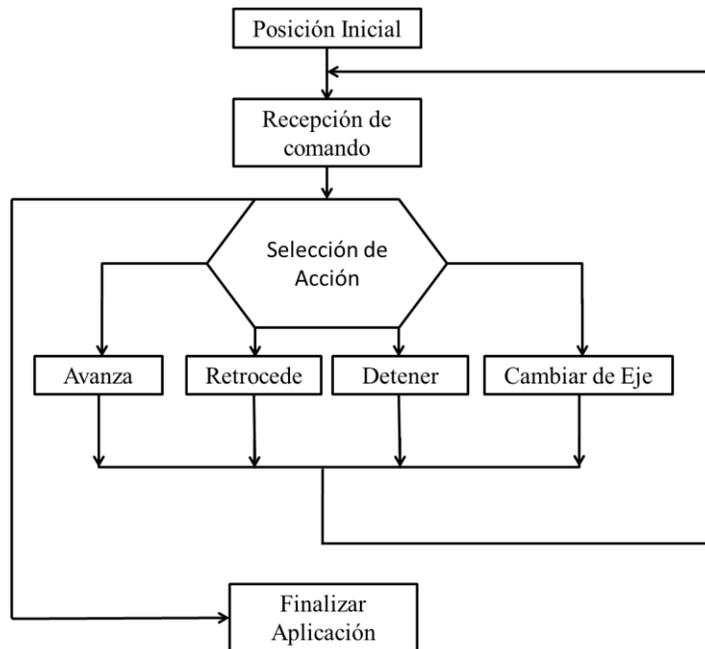


Fig. 59 Funcionamiento del control del robot

La posición inicial es considerada como el cero para cada eje, es decir, el robot inicia en el punto $P(0,0,0)$. Una vez que la aplicación inició y el robot se ubicó en su posición se procede a la etapa de espera de un comando que le indique cual es el paso siguiente. En el estado inicial el robot tiene seleccionado el eje “x” como el eje inicial en el que puede moverse, de esta forma si después de iniciar la aplicación el usuario manda a avanzar al robot este debe moverse sobre el eje “x” positivo y si el usuario manda a retroceder el robot debe moverse en sentido contrario sobre el mismo eje. Ambos comandos tanto el de retroceder como el de avanzar van acompañados de un número que indica la posición en el eje a la cual debe moverse el efector final. Este número aumenta o disminuye dependiendo del tiempo que el usuario se mantenga concentrado en una acción de control.

La opción de detener manda como posición deseada la posición actual en la que se encuentre el manipulador, de esta forma cuando el usuario no quiera mover el robot, la aplicación de control se encarga de mantener en la última posición al manipulador.

Para cambiar el eje de movimiento el usuario debe concentrarse en girar el cubo en sentido contrario a las manecillas del reloj y debe mantenerse concentrado en esta acción por un breve periodo de tiempo para que el cambio de eje se produzca. De esta forma la aplicación de control selecciona el siguiente eje, en este caso “y” y después “z”. Proporcionando así al usuario la capacidad de mover el efector final del robot hacia la posición que el desee.

Capítulo 5. Implementación de la Interfaz Cerebro Máquina

En la figura 59 se muestra la interfaz completa, donde podemos ver al usuario con la diadema, la computadora encargada del procesamiento y el robot manipulador siendo movido por el usuario.

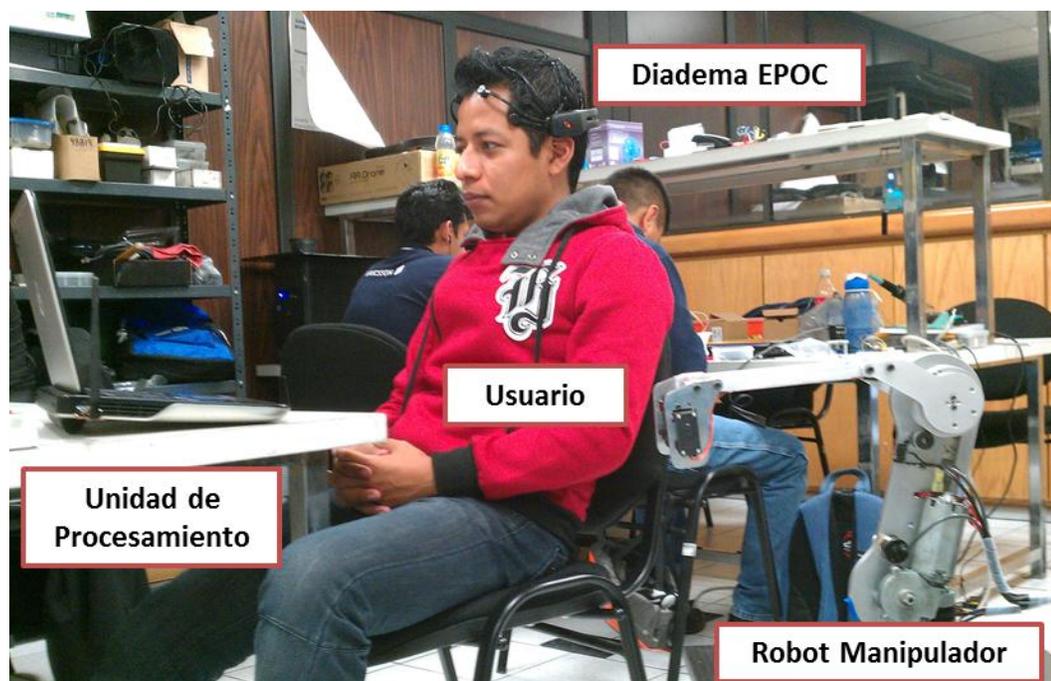


Fig. 60 Interfaz Cerebro Máquina

Por último, es importante mencionar las especificaciones técnicas de la computadora que se utiliza para el procesamiento de la información, así como del control del robot. La computadora mostrada es una laptop Dell modelo XPS15 L501X con las siguientes especificaciones:

- Procesador Intel® Core™ i7-740QM de 1.73 a 2.93 GHz con 8 hilos de procesamiento y 6 Mb de cache.
- 8 GB de memoria RAM doble canal DDR3.
- Tarjeta de video Nvidia® GeForce® GT 435M de 2 GB.
- Disco duro de 500 GB.
- Sistema operativo Windows® 7 Home Premium de 64 bits.

5.5 Experimentos realizados con la ICC

La interfaz cerebro máquina desarrollada en esta tesis fue implementada de forma tal que permite una fácil integración con otros sistemas con los que se quiera interactuar, es por ello que durante el desarrollo de este trabajo se realizaron varios experimentos

consistentes en la integración de la ICC con otro tipo de máquinas como se muestra a continuación:

- Influencia de la interacción humana en el control de un robot tipo delta

Las pruebas desarrolladas consistieron en que el usuario después de haber realizado al menos cinco sesiones de entrenamiento interactuara con el controlador del robot aumentando o disminuyendo sus ganancias y con esto afectar el comportamiento del robot al tratar de seguir una trayectoria. En la figura 61 se muestra la plataforma experimental mediante la cual se realizaron los experimentos. El robot utilizado fue el Falcon de la empresa Novint, el cual cuenta con tres grados de libertad.

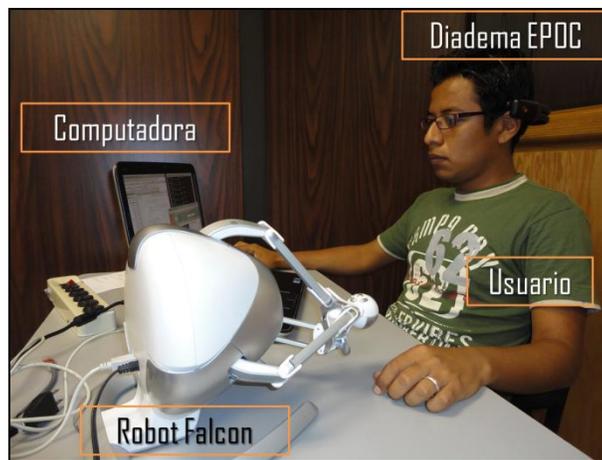


Fig. 61 Control de un robot tipo delta

El usuario habiendo entrenado dos acciones las cuales eran empujar y jalar pudo aumentar la ganancia del controlador o disminuirla, esto provocaba que el desempeño del controlador programado para seguir la trayectoria disminuyera. Las ganancias estaban acotadas para evitar que el usuario aumentara o disminuyera su valor mas allá de los límites permitidos que fueron propuestos al realizar la sintonización de éstas.

En la figura 62(a) se observa que al principio del experimento la ganancia tenía un valor de cero, y a partir del segundo siete aproximadamente se fue incrementando hasta llegar a su valor máximo permitido, al mismo tiempo que el valor del error disminuyó considerablemente. En la figura 62(b) se muestra en color verde la trayectoria deseada y en color rojo la trayectoria descrita por el robot.

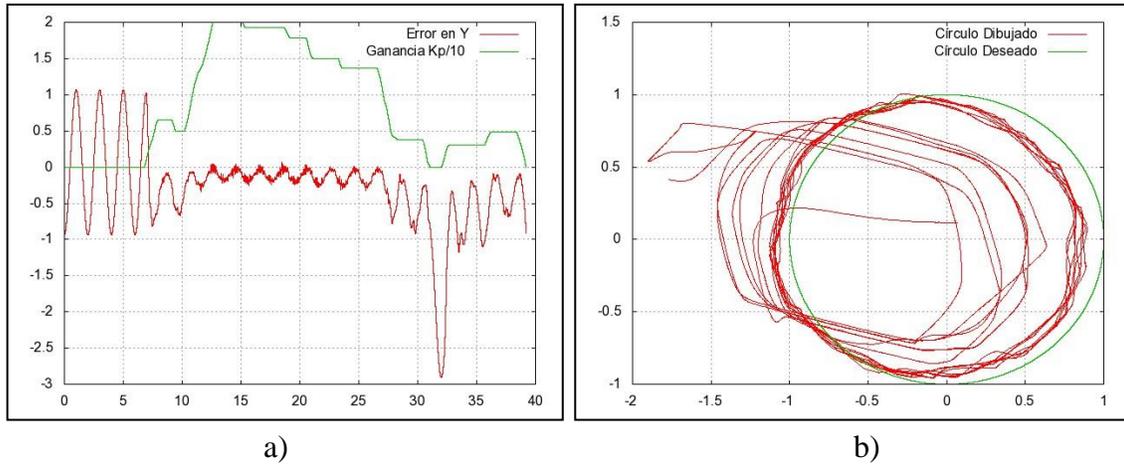


Fig. 62 Resultados obtenidos en el control de un robot Falcon

● Control de un robot móvil diferencial

Para realizar este experimento el usuario debía ser capaz de controlar dos acciones en este caso empujar y girar, estas acciones fueron utilizadas como señales de control y enviadas al robot móvil, de forma que si el usuario pensaba en empujar el robot móvil avanzaba y si el usuario pensaba en girar el robot lo hacía para cambiar su dirección. Como se observa en la imagen la comunicación era de forma inalámbrica lo que brindaba autonomía al móvil, esto se realizó mediante el uso de antenas Xbee que se pueden observar en la figura 63; el robot llevaba una cámara a bordo que transmitía en video lo que el móvil tenía al frente.



Fig. 63 Control de un robot móvil diferencial

● Accionamiento de una plataforma de tres grados de libertad

El experimento realizado consistió en accionar los actuadores de la plataforma mostrada en la figura 64, esto se llevó a cabo utilizando dos señales de control que el usuario enviaba por medio de la diadema EPOC, sin embargo, los entrenamientos para controlar las acciones se realizaron de forma distinta, uno fue asociando un pensamiento por parte del usuario como normalmente se hace, mientras que el otro entrenamiento se realizó colocando al usuario sobre la plataforma y estimulándolo con el movimiento de ésta, de forma tal que cuando el usuario imaginaba el movimiento que sentía al moverse la plataforma, se generaban los mismo patrones de onda y la plataforma se accionaba.

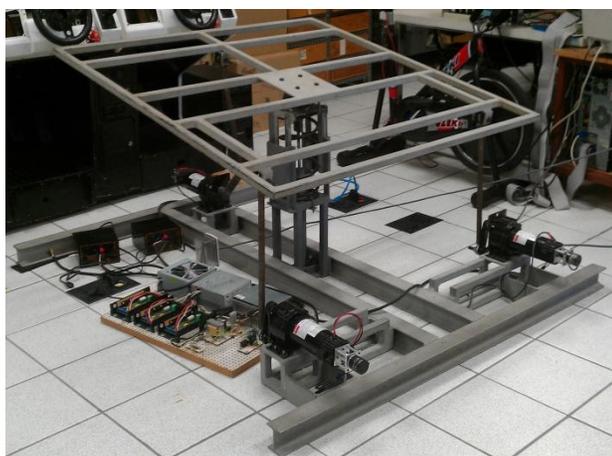


Fig. 64 Plataforma de tres grados de libertad



Capítulo 5. Implementación de la Interfaz Cerebro Máquina



Capítulo 6

Conclusiones, Aportes Y Trabajo a Futuro

6.1 Conclusiones

En este documento se presentó la tecnología detrás de una Interfaz Cerebro Máquina, desde sus conceptos básicos hasta su implementación; la forma en que se obtuvieron las señales, como fueron procesadas y como interactuó con el entorno controlando un robot manipulador. Durante el desarrollo de esta interfaz alrededor de nueve personas realizaron entrenamientos con el objetivo de controlar la posición del cubo en la pantalla; sin embargo solo dos realizaron entrenamientos para controlar tres acciones al mismo tiempo, las demás solo controlaron una acción o dos a lo máximo, esto se debe principalmente a la falta de tiempo para realizar de manera constante las sesiones de entrenamiento ya que solo contamos con una diadema.

Para que un usuario logre controlar la interfaz y mejore su habilidad mental es necesario que se lleven a cabo continuamente sesiones de entrenamiento, mientras más rápido el usuario sea capaz de entrenar distintos estados mentales para cada acción podrá tener resultados favorables en poco tiempo. Para algunos usuarios puede ser sencillo controlar hasta dos acciones desde la primera sesión de entrenamiento mientras que para otros puede ser muy complejo controlar una sola acción. Si se trata de obtener mejores resultados mediante la extensión en el tiempo de las sesiones de entrenamiento los resultados pueden no ser los esperados, debido a que el usuario puede sufrir de fatiga mental, además de dolores de cabeza. Entrenar con esta interfaz puede ser una actividad muy demandante, razón por la cual se sugirieron sesiones de máximo una hora por día, aunque la práctica y la experiencia ayudarán a determinar el tiempo ideal de entrenamiento para cada usuario.

Otro aspecto importante a tomar en cuenta es que al entrenar el usuario debe estar en calma ya que el estrés, cansancio o aburrimiento afecta considerablemente la precisión de la interfaz para detectar la intención del usuario, ya que éste último



Capítulo 6. Conclusiones, Aportes y Trabajos a Futuro

disminuye notablemente su capacidad para concentrarse. El hecho de haber realizado la implementación de la ICM basada en el reconocimiento de pensamientos y no en secuencia de imágenes contribuyó a la creación de un sistema más rápido y que respondía en el momento justo en el que el usuario quería ejecutar una acción.

El desarrollo del trabajo aquí presentado sirve y puede ser utilizado para desarrollar más y mejores proyectos que nos ayuden a entender cada vez mejor la forma en que estas interfaces trabajan; además de que pueden utilizarse para mejorar la calidad de vida de las personas que por alguna razón han visto disminuidas algunas de sus capacidades motoras. Aunque la interfaz controla un robot manipulador, éste no fue diseñado con el objetivo de servir de apoyo a una persona, pero por la forma en que se controla, fácilmente puede ser sustituido por una manipulador que si lo haga.

A pesar de que la interfaz fue diseñada, implementada y probada en un equipo de altas prestaciones, lo cierto es que para funcionar utiliza un mínimo de requerimientos, por lo que fácilmente puede ser utilizada en equipos de gama baja. Permitiendo así que prácticamente cualquier computadora pueda ejecutar la aplicación.

Se logró implementar el control del robot manipulador haciendo uso de tres microcontroladores chipKIT Max32 debido a que la frecuencia de trabajo ocasionaba que al utilizar únicamente un microcontrolador no era posible leer adecuadamente la información proveniente de los encoders, lo que provocaba pérdida de información y perturbaciones al sistema.

6.2 Aportes

La interfaz implementada fue diseñada y programada de forma modular, lo que permite que pueda ser utilizada con otros sistemas como se mostró en la sección 5.5 de este trabajo; el código fue programado utilizando C++ y puede enviar información por medio del puerto COM, lo que facilita su comunicación con otras aplicaciones.

En la ICM implementada la adquisición de datos se realiza por medio del dispositivo EPOC, el cual transmite la información de forma inalámbrica a la computadora, lo que hace posible una mayor movilidad para el usuario.

Asimismo la interfaz cerebro computadora fue utilizada para controlar diversos dispositivos tales como el robot Falcon de tres grados de libertad; un robot móvil tipo diferencial con una cámara a bordo que permite al usuario observar lo que se encuentre delante del móvil; un helicóptero a escala en el cual se controlaba solo el ascenso y

descenso de éste; y una plataforma en la que se controlaban dos de los tres grados de libertad que posee.

Se implementó un algoritmo que con base en las acciones que el usuario mandaba accionar enviaba las acciones de control necesarias para controlar el manipulador y llevarlo a la posición que el usuario deseara.

Durante el desarrollo de esta interfaz se sometieron y fueron aceptados los siguientes artículos en diferentes congresos llevados a cabo en nuestro país.

- *“Influencia de la Interacción humana vía Interfaz Cerebro Computadora (BCI) en el control de un robot”*. Noviembre 3 y 4 del 2011. Puerto Vallarta, Jalisco. 10° Congreso Nacional de Mecatrónica.
- *“BCI para el control de robots virtuales”*. Octubre 17 al 21 del 2011. Ciudad de México, D. F. 7° Congreso Internacional Tendencias Tecnológicas en Computación.
- *“Control de un robot manipulador virtual, utilizando una interfaz Cerebro Computadora”*. Septiembre 27 al 29 del 2011. Querétaro, Querétaro. 4° Congreso Internacional de Ingenierías Mecánica, Eléctrica, Electrónica, Mecatrónica y Computacional.
- *“Posicionamiento de un robot virtual”*. Septiembre 30 del 2011. Ciudad de México, D.F. XII Simposio Mexicano en Cirugía Asistida por Computadora y Procesamiento de Imágenes Médicas MEXCAS 2011.

6.3 Trabajo a Futuro

En el presente trabajo de tesis se mostró el proceso de implementación de una Interfaz Cerebro Máquina, las partes que la componen así como la interacción con el medio mediante un robot manipulador de tres grados de libertad. Tomando en cuenta el conocimiento obtenido y las dificultades presentadas a lo largo del desarrollo de este trabajo surgen los siguientes trabajos a futuro:

- Desarrollar sensores que puedan medir la actividad cerebral del usuario y permitan acceder directamente a esta información, para así contar con un sistema de sensado propio que no limite la obtención de información.
- Desarrollar un sistema de procesamiento propio que permita mejorar los algoritmos de reconocimiento de patrones e implementar algoritmos nuevos.



Capítulo 6. Conclusiones, Aportes y Trabajos a Futuro

- Implementar aplicaciones para la ICM aquí presentada que permitan interactuar de forma distinta con el medio y no solo a través de un robot manipulador.
- Desarrollar una interfaz gráfica que facilite el uso de la interfaz al usuario.
- Implementar una ICM que se base en la respuesta del usuario ante ciertos estímulos exteriores, con el fin de establecer un sistema de entrenamiento formal para que cualquier persona pueda utilizar este tipo de interfaces, y las señales de control no dependan de la habilidad del usuario para controlar sus patrones de onda.

Referencias Bibliográficas

- [1] Real Academia Española. Disponible en: http://buscon.rae.es/draeI/SrvltConsulta?TIPO_BUS=3&LEMA=rob%C3%B3tica. Consultada 23 de enero del 2012, 13:00 hrs.
- [2] ISO. "Online Browsing Platform". Disponible en: [http://www.iso.org/obp/ui/Defined in: ISO 10218-1:2011, 3.10](http://www.iso.org/obp/ui/Defined%20in%3A%20ISO%2010218-1%3A2011%2C%203.10). Consultado 08 de mayo del 2012, 16.00 hrs.
- [3] M. W. Spong, S. Hutchinson, M. Vidyasagar, "Robot Dynamics and Control", Ed. John Wiley & Sons, 2nd. Ed, 2006.
- [4] R. Ortega, M. W. Spong, "Adaptive Motion Control of Rigid Robot: A Tutorial", *Journal Automatica*, Vol. 25, No.6, pp. 877-888, 1989.
- [5] F. A Auat Cheeín¹, F. Di Sciascio¹, T. Freire Bastos And R. Carelli, "Probabilistic Scan Mode Of A Robot Manipulator Workspace Using EEG Signals. Part I", *Journal of Physics: Conference Series*. Institute of Physics, 2007. p.1-8.
- [6] L. Tonin, E. Menegatti, M. Cavinato, C. D'avanzo, M Pirini, A. Merico, L Piron, K Priftis, S. Silvoni, C. Volpato, F. Piccione, "Evaluation Of A Robot As Embodied Interface For Brain Computer Interface Systems", *International Journal Of Bioelectromagnetism*, Vol. 11, No. 2, pp.97-104, 2009.
- [7] C.W. Hesse, R. Oostenveld, T. Heskes and O. Jensen, "On The Development Of A Brain-Computer Interface System Using High-Density Magnetoencephalogram Signals For Real-Time Control Of A Robot Arm", *IEEE Benelux EMBS Symposium*, December 6-7, 2007.
- [8] C. Arboleda, E. García, A. Posada, R. Torres, "Diseño Y Construcción De Un Prototipo De Interfaz Cerebrocomputador Para Facilitar La Comunicación De Personas Con Discapacidad Motora", *Revista Eia*, Núm. 11, pp. 105-115, Julio 2009.
- [9] "BCI 2000". Disponible en: <http://www.bci2000.org/BCI2000/Home.html>. Consultada el 12 de enero del 2011.
- [10] Emotiv, "Emotiv Store". Disponible en: <http://www.mathworks.com/products/matlab/>. Consultada el 12 de enero del 2011.
- [11] Emotiv, "Emotiv Store". Disponible en: <http://www.emotiv.com/store/hardware/epoc-bci/epoc-neuroheadset/>. Consultada el 12 de enero del 2011.



Referencias bibliográficas

- [12] A. Ollero, “Robótica: manipuladores y robots móviles.” Ed. Marcombo, España, 2001.
- [13] Andueza L., Aguirre I. “Three degree of freedom robotic manipulator design for educational purpose”. *Revista Ciencia e Ingeniería*, Vol. 30(1), pp. 3-14, Marzo 2009.
- [14] G. Sepulveda, N. Montaña, M. A. Roman, “Control de un robot manipulador virtual, utilizando una interfaz cerebro-computadora”, *Congreso Nacional de Ingenierías Mecánica, Eléctrica, Electrónica y Mecatrónica*, 2011.
- [16] J. K. Salisbury, J. J. Craig, “Articulated hands: force control and kinematic issues”, *Int. J. Robotics Research*, Vol. 1, No. 1, pp. 4-17, 1982
- [17] H. Berger H, “Über das Elektroencephalogramm des Menschen.”, *European Archives of Psychiatry and Clinical Neuroscience*, Vol. 87, No. 1, pp. 527-570, 1929
- [18] L. Sokoloff. “Circulation and Energy Metabolism of the Brain”, en *Basic Neurochemistry: Molecular, Cellular and Medical Aspects*, 6th edition. pp. 565, 1989
- [19] L. D. Blumhardt, G. Barrett, A. M. Halliday, A. Kriss, “The asymmetrical visual evoked potential to pattern reversal in one half field and its significance for the analysis of visual field effects.”, *British Journal of Ophthalmology*, Vol. 61: pp. 454-61, 1977.
- [20] R. Cooper, J. W. Osselton, J. C. Shaw, “EEG Technology”, 2nd ed., pp. 275, Butterworths, London.
- [21] H. H. Jasper, “Report of the Committee on Methods of Clinical Examination in Electroencephalography.” *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, Vol. 10, 1958.
- [22] R. L. Gilmore, “American Electroencephalographic Society guidelines in electroencephalography, evoked potentials, and polysomnography”, *Journal of Clinical Neurophysiology*, Vol.11:(1) pp. 147, Enero, 1994.
- [23] P. L. Nunez, “Electric Fields of the Brain: The Neurophysics of EEG”, Oxford University Press, New York, 1981, pp. 484.
- [24] J. Puikkonen, J. A. Malmivuo, “Theoretical investigation of the sensitivity distribution of point EEG-electrodes on the three concentric spheres model of a

- human head - An application of the reciprocity theorem.” *Tampere University. Technology Inst. Biomed. Eng., Reports* 1:(5) 71, 1987.
- [25] S. Rush, D. A. Driscoll, “EEG-electrode sensitivity - An application of reciprocity.”, *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, Vol. BME-16:(1), pp. 15-22, 1969.
- [26] R. R. Angevin, C. García, A. Díaz, “Desarrollo De Un Interfaz Cerebro-Computadora”, Ursi 2001.
- [27] T. Luith, D. Ojdanic, O. Friman, O. Prenzel, A. Graser, “Low level control in a semi-autonomous rehabilitation robotic system via a Brain-Computer Interface”, *IEEE 10th International Conference on Rehabilitation Robotics*, Noordwijk, The Netherlands, June 12-15, 2007.
- [28] T. J. Sullivan, S. R. Deiss, Tzyy-Ping Jung and G. Cauwenberghs, “A Brain-Machine Interface using Dry-Contact, Low-Noise EEG Sensors”, *International Symposium on Circuits and Systems*, 2008.
- [29] B. Mahmoudi, J. DiGiovanna, J. C. Principe, and J. C. Sanchez, “Neuronal Tuning in a Brain-Machine Interface during Reinforcement Learnin”, *30th Annual International IEEE EMBS Conference*, Vancouver, British Columbia, Canada, August 20-24, 2008.
- [30] A. Barrientos, L. F. Peñin, C. Balaguer, R. Aracil, “*Fundamentos de robótica*”, Ed. MacGraw-Hill, 1997.
- [31] F. Carpi, D. De Rossi, “Non invasive Brain-Machine Interfaces”, European Space Agency, The Advanced Concepts Team, (05-6402), 2006.
- [32] A. Ollero, “Robótica: manipuladores y robots móviles.” Ed. Marcombo, España, 2001.
- [33] Estructura de un robot industrial. Disponible en: http://cfievalladolid2.net/tecno/cyr_01/robotica/sistema/morfologia.htm. Consultada 07 de junio del 2012, 10:00 hrs.
- [34] Snell RS (2003) Neuroanatomía clínica: Panamericana. 554 p.
- [35] “Sistema nerviosos central”. Disponible en: <http://atencionatupsique.files.wordpress.com/2011/05/snp1.gif>. Consultada 07 de junio del 2012, 10:00 hrs.
- [36] Emotiv. Disponible en: www.emotiv.com. Consultada 07 de junio del 2012, 10:00 hrs.



Referencias bibliográficas

- [37] DIGILENT, “chipKIT Max32” Disponible en: <http://www.digilentinc.com/Products/Detail.cfm?NavPath=2,892,894&Prod=CHIPKIT-MAX32>. Consultada 07 de junio del 2012, 10:00 hrs.
- [38] CTF MEG, Disponible en: <http://www.ctf.com/>. Consultada 04 de julio del 2012, 19:00 hrs.



Apéndices

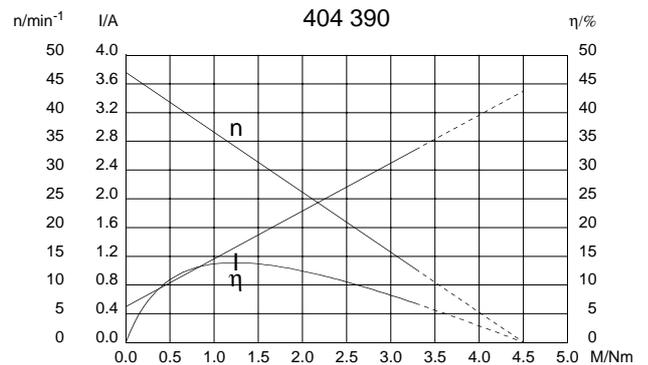
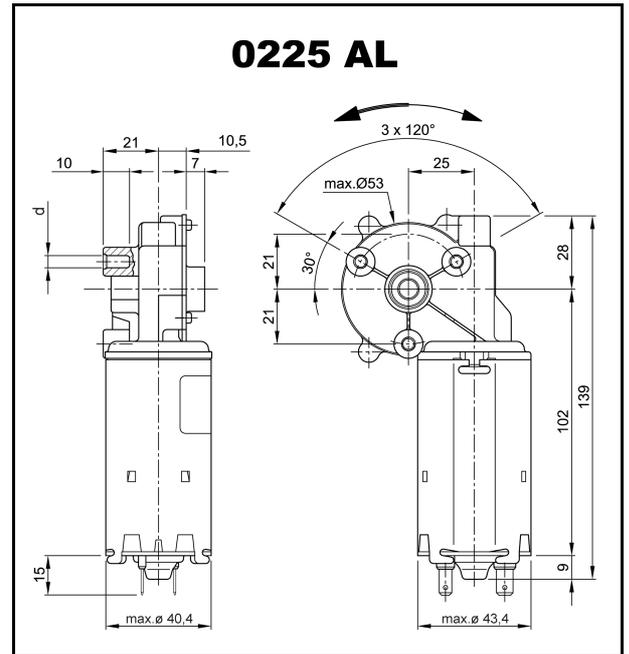
A. Hojas Técnicas

Baureihe 0225 (GMPPG)

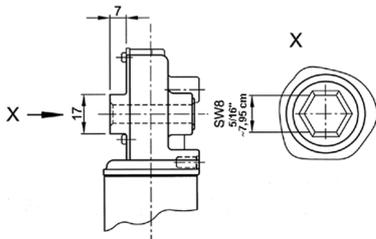
Motortyp 404 390

Technische Daten

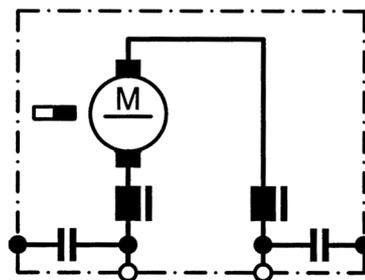
Nennspannung	U_N	[Volt]	24
Leerlaufdrehzahl	n_0	$[\text{min}^{-1}]$	47
Nenn Drehmoment	M_N	[Nm]	1,5
Einschaltdauer	%		10
EIN		[min]	
Anlaufmoment	M_A	[Nm]	4,5
Getriebeübersetzung	i		72/1
Anschlusswiderstand	2 Lamellen	R	$[\text{m}\Omega]$ 6400,0
	4 Lamellen	R	$[\text{m}\Omega]$ 3000,0
Anschlussinduktivität	2 Lamellen	L	[mH] 3,90
	4 Lamellen	L	[mH] 3,30
Läuferträgheitsmoment	J_R	$[\text{kgm}^2] \times 10^{-6}$	10,0
Zahnradwerkstoff			Kunststoff
Hall IC			
Impuls/Umdrehung Abtriebswelle			
Ausgangskanäle			
Bemerkungen	d = für selbstformende Schraube M 5		
Schutzart			IP 30
Gewicht		[kg]	0,71



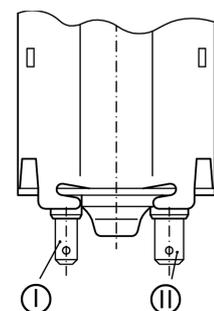
W 229



S 30



K 117



I Flachsteckerenden 4,8 x 0,8 DIN 46 244

II Flachsteckerenden 6,3 x 0,8 DIN 46 244

E6A2-C

Compact Encoder with External Diameter of 25 mm

- Incremental model
- External diameter of 25 mm.
- Resolution of up to 500 ppr.



 Be sure to read *Safety Precautions* on page 3.

Ordering Information

Encoders [Refer to *Dimensions* on page 4.]

Power supply voltage	Output configuration	Output phases	Resolution (pulses/rotation)	Model
5 to 12 VDC	Voltage output	Phases A, B, and Z	100, 200, 360	E6A2-CWZ3E (resolution) 0.5M Example: E6A2-CWZ3E 100P/R 0.5M
	Open-collector output (NPN output)		500	E6A2-CWZ3C (resolution) 0.5M Example: E6A2-CWZ3C 100P/R 0.5M
12 to 24 VDC			100, 200, 360	E6A2-CWZ5C (resolution) 0.5M Example: E6A2-CWZ5C 100P/R 0.5M
	500			
5 to 12 VDC	Voltage output	Phases A and B	100, 200, 360	E6A2-CW3E (resolution) 0.5M Example: E6A2-CW3E 100P/R 0.5M
	Open-collector output (NPN output)		500	E6A2-CW3C (resolution) 0.5M Example: E6A2-CW3C 100P/R 0.5M
12 to 24 VDC			100, 200, 360	E6A2-CW5C (resolution) 0.5M Example: E6A2-CW5C 100P/R 0.5M
	500			
5 to 12 VDC	Voltage output	Phase A	10, 20, 60, 100, 200, 300, 360	E6A2-CS3E (resolution) 0.5M Example: E6A2-CS3E 10P/R 0.5M
	Open-collector output (NPN output)		500	E6A2-CS3C (resolution) 0.5M Example: E6A2-CS3C 10P/R 0.5M
12 to 24 VDC			10, 20, 60, 100, 200, 300, 360	E6A2-CS5C (resolution) 0.5M Example: E6A2-CS5C 10P/R 0.5M
	500			

Accessories (Order Separately) [Refer to *Dimensions* on *Rotary Encoder Accessories*.]

Name	Model	Remarks
Coupling	E69-C04B	Provided with the product.
Servo Mounting Bracket	E69-1	Provided with the E6A2-CWZ□.

Refer to *Accessories* for details.

Ratings and Specifications

Item	Model	E6A2-CWZ3E	E6A2-CWZ3C	E6A2-CWZ5C	E6A2-CW3E	E6A2-CW3C	E6A2-CW5C	E6A2-CS3E	E6A2-CS3C	E6A2-CS5C
Power supply voltage		5 VDC -5% to 12 V +10% ripple (p-p): 5% max.		12 VDC -10% to 24 VDC +15%, ripple (p-p): 5% max.	5 VDC -5% to 12 V +10%, ripple (p-p): 5% max.		12 VDC -10% to 24 VDC +15%, ripple (p-p): 5% max.	5 VDC -5% to 12 V +10%, ripple (p-p): 5% max.		12 VDC -10% to 24 VDC +15%, ripple (p-p): 5% max.
Current consumption*1		50 mA max.	30 mA max.		30 mA max.	20 mA max.		30 mA max.	20 mA max.	
Resolution (pulses/rotation)		100, 200, 360, 500						10, 20, 60, 100, 200, 300, 360, 500		
Output phases		Phases A, B, and Z			Phases A and B			Phase A		
Output configuration		Voltage output	NPN open-collector output		Voltage output	NPN open-collector output		Voltage output	NPN open-collector output	
Output capacity		Output resistance: 2 kΩ Output current: 20 mA max. Residual voltage: 0.4 V max. (Output current: 20 mA max.)	Applied voltage: 30 VDC max. Sink current: 30 mA max. Residual voltage: 0.4 V max. (at sink current of 30 mA)		Output resistance: 2 kΩ Output current: 20 mA max. Residual voltage: 0.4 V max. (Output current: 20 mA max.)	Applied voltage: 30 VDC max. Sink current: 30 mA max. Residual voltage: 0.4 V max. (at sink current of 30 mA)		Output resistance: 2 kΩ Output current: 20 mA max. Residual voltage: 0.4 V max. (Output current: 20 mA max.)	Applied voltage: 30 VDC max. Sink current: 30 mA max. Residual voltage: 0.4 V max. (at sink current of 30 mA)	
Maximum response frequency*2		30 kHz								
Phase difference between outputs		Phase difference between phases A and B: 90°±45°						---		
Output duty factor		---						50±25%		
Rise and fall times of output		1.0 μs max. (Cable length: 500 mm, Sink current: 10 mA)	1.0 μs max. (Cable length: 500 mm, Control output voltage: 5 V, Load resistance: 1 kΩ)		1.0 μs max. (Cable length: 500 mm, Sink current: 10 mA)	1.0 μs max. (Cable length: 500 mm, Control output voltage: 5 V, Load resistance: 1 kΩ)		1.0 μs max. (Cable length: 500 mm, Sink current: 10 mA)	1.0 μs max. (Cable length: 500 mm, Control output voltage: 5 V, Load resistance: 1 kΩ)	
Starting torque		1 mN·m max.								
Moment of inertia		1 × 10 ⁻⁷ kg·m ² max.								
Shaft loading	Radial	10 N								
	Thrust	50 N								
Maximum permissible speed		5,000 r/min								
Ambient temperature range		Operating: -10 to 55°C (with no icing), Storage: -25 to 80°C (with no icing)								
Ambient humidity range		Operating/storage: 35% to 85% (with no condensation)								
Insulation resistance		20 MΩ min. (at 500 VDC) between current-carrying parts and case								
Dielectric strength		500 VAC, 50/60 Hz for 1 min between current-carrying parts and case								
Vibration resistance		Destruction: 10 to 55 Hz, 1.5-mm double amplitude for 2 hours each in X, Y, and Z directions								
Shock resistance		Destruction: 500m/s ² 3 times each in X, Y, and Z directions								
Degree of protection*3		IEC 60529 IP50								
Connection method		Pre-wired Models (Standard cable length: 500 mm)								
Material		Case: Aluminum alloy, Main unit: Aluminum, Shaft: SUS420J2, Mounting Bracket: Galvanized iron								
Weight (packed state)		Approx. 35 g								
Accessories		Coupling, Servo Mounting Bracket (provided with the E6A2-CWZ□□), Hexagonal wrench, Instruction manual								

*1. An inrush current of approximately 9 A will flow for approximately 0.3 ms when the power is turned ON.

*2. The maximum electrical response speed is determined by the resolution and maximum response frequency as follows:

$$\text{Maximum electrical response speed (rpm)} = \frac{\text{Maximum response frequency}}{\text{Resolution}} \times 60$$

This means that the E6A2-C Rotary Encoder will not operate electrically if its speed exceeds the maximum electrical response speed.

*3. No protection is provided against water or oil.

I/O Circuit Diagrams

Model	Output circuits	Output mode	Connection												
E6A2-CS3C E6A2-CS5C	<p>E6A2 main circuit</p> <p>Brown V_{CC} (+5 to 12 V) (E6A2-C□□3C: +5 to 12 V) (E6A2-C□□5C: +12 to 24V)</p> <p>Black, white, orange Output (Black: phase A, White: phase B, Orange: phase Z)</p> <p>Blue 0 V</p> <p>30 VDC 30 mA max.</p>	Output transistor	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Color</th> <th>Signal</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Brown</td> <td>V_{CC}</td> </tr> <tr> <td>Black</td> <td>Phase A</td> </tr> <tr> <td>White</td> <td>Phase B</td> </tr> <tr> <td>Orange</td> <td>Phase Z</td> </tr> <tr> <td>Blue</td> <td>0 V (common)</td> </tr> </tbody> </table> <p>Note: 1. The white and orange wires of Single Models (E6A2-CS□□) do not output signals (no connection). 2. The white and orange wires of Single Models (E6A2-C□□□) do not output signals (no connection). 3. Voltage Output Models are capable of sinking a maximum current of 20 mA.</p>	Color	Signal	Brown	V_{CC}	Black	Phase A	White	Phase B	Orange	Phase Z	Blue	0 V (common)
Color		Signal													
Brown		V_{CC}													
Black	Phase A														
White	Phase B														
Orange	Phase Z														
Blue	0 V (common)														
E6A2-CW3C E6A2-CW5C	Direction of rotation: CW (as viewed from end of shaft)	Output transistor													
E6A2-CWZ3C E6A2-CWZ5C	Direction of rotation: CCW (as viewed from end of shaft)	Output transistor													
E6A2-CW3E	<p>E6A2 main circuit</p> <p>Brown V_{CC} (+5 to 12 V)</p> <p>Black, white, orange Output (Black: phase A, White: phase B, Orange: phase Z)</p> <p>Blue 0 V</p> <p>20 mA max.</p> <p>2 kΩ</p>	Output transistor													
E6A2-CWZ3E		Output transistor													
E6A2-CS3E		Output transistor													

Note: 1. *(H) and (L) indicate the output levels of Voltage Output Models.
2. Output A leads B by $1/4 T \pm 1/8 T$ when the shaft revolves clockwise, while A lags behind B by $1/4 T \pm 1/8 T$ when the shaft revolves counterclockwise.

Safety Precautions

Refer to *Warranty and Limitations of Liability*.

⚠ WARNING

This product is not designed or rated for ensuring safety of persons either directly or indirectly. Do not use it for such purposes.



Precautions for Correct Use

Do not use the Encoder under ambient conditions that exceed the ratings.

● Wiring

Spurious pulses may be generated when power is turned ON and OFF. Wait at least 0.1 s after turning ON the power to the Encoder before using the connected device, and stop using the connected device at least 0.1 s before turning OFF the power to the Encoder. Also, turn ON the power to the load only after turning ON the power to the Encoder.

5.0 A H-Bridge with Load Current Feedback

The 33887 is a monolithic H-Bridge Power IC with a load current feedback feature making it ideal for closed-loop DC motor control. The IC incorporates internal control logic, charge pump, gate drive, and low $R_{DS(ON)}$ MOSFET output circuitry. The 33887 is able to control inductive loads with continuous DC load currents up to 5.0 A, and with peak current active limiting between 5.2 A and 7.8 A. Output loads can be pulse width modulated (PWM-ed) at frequencies up to 10 kHz. The load current feedback feature provides a proportional (1/375th of the load current) constant-current output suitable for monitoring by a microcontroller's A/D input. This feature facilitates the design of closed-loop torque/speed control as well as open load detection.

A Fault Status output pin reports undervoltage, short circuit, and overtemperature conditions. Two independent inputs provide polarity control of two half-bridge totem-pole outputs. Two disable inputs force the H-Bridge outputs to tri-state (exhibit high impedance).

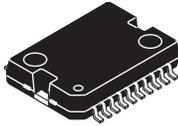
The 33887 is parametrically specified over a temperature range of $-40^{\circ}\text{C} \leq T_A \leq 125^{\circ}\text{C}$ and a voltage range of $5.0\text{ V} \leq V_+ \leq 28\text{ V}$. Operation with voltages up to 40 V with derating of the specifications.

Features

- Fully specified operation 5.0 V to 28 V
- Limited operation with reduced performance up to 40 V
- 120 m Ω $R_{DS(ON)}$ Typical H-Bridge MOSFETs
- TTL/CMOS Compatible Inputs
- PWM Frequencies up to 10 kHz
- Active Current Limiting (Regulation)
- Fault Status Reporting
- Sleep Mode with Current Draw $\leq 50\ \mu\text{A}$ (Inputs Floating or Set to Match Default Logic States)
- Pb-Free Packaging Designated by Suffix Codes VW and EK

33887

H-BRIDGE



DH SUFFIX
VW SUFFIX (Pb-FREE)
98ASH70273A
20-PIN HSOP



PNB SUFFIX
98ASA10583D
36-PIN PQFN



DWB SUFFIX
EK SUFFIX (Pb-FREE)
98ASA10506D
54-PIN SOICW-EP

Bottom View

ORDERING INFORMATION		
Device	Temperature Range (T_A)	Package
MC33887DH/R2	-40°C to 125°C	20 HSOP
MC33887VW/R2		
MC33887PNB/R2		36 PQFN
MC33887DWB/R2		54 SOICW-EP
MCZ33887EK/R2		

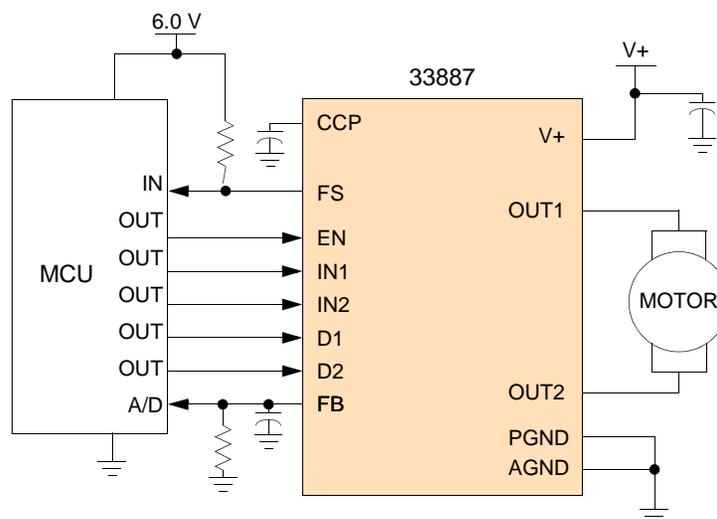


Figure 1. 33887 Simplified Application Diagram

Freescale Semiconductor, Inc. reserves the right to change the detail specifications, as may be required, to permit improvements in the design of its products.

© Freescale Semiconductor, Inc., 2007. All rights reserved.

INTERNAL BLOCK DIAGRAM

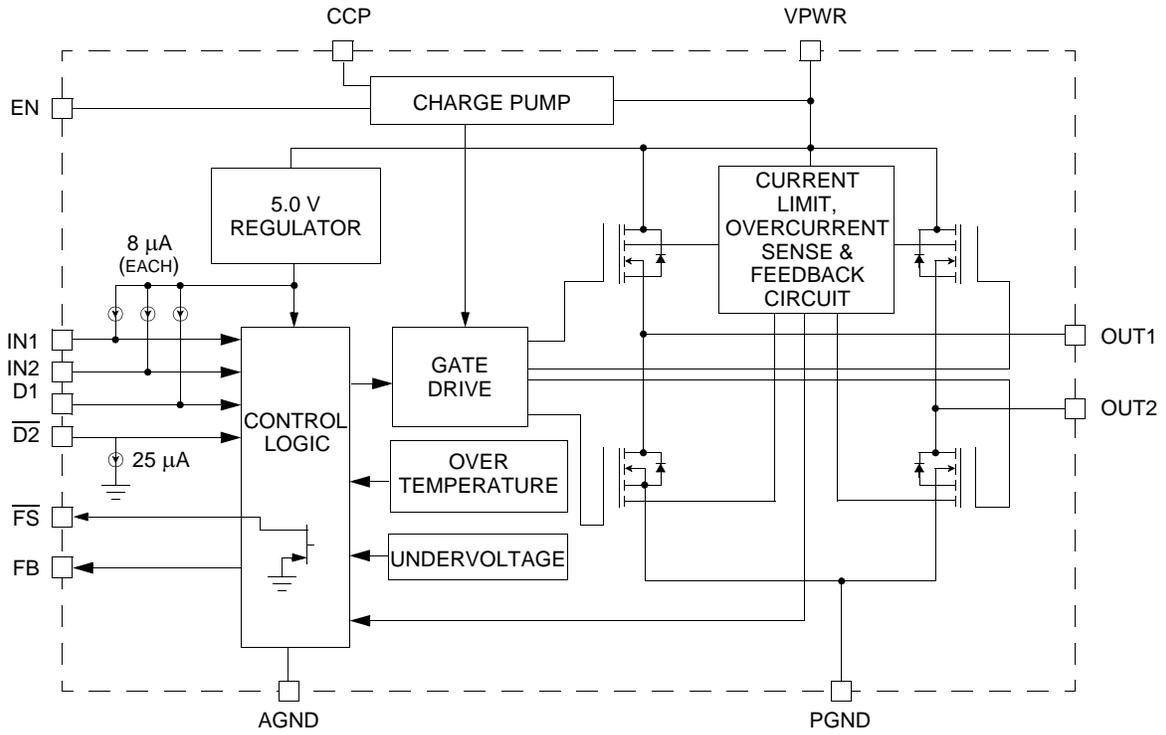


Figure 2. 33887 Simplified Internal Block Diagram

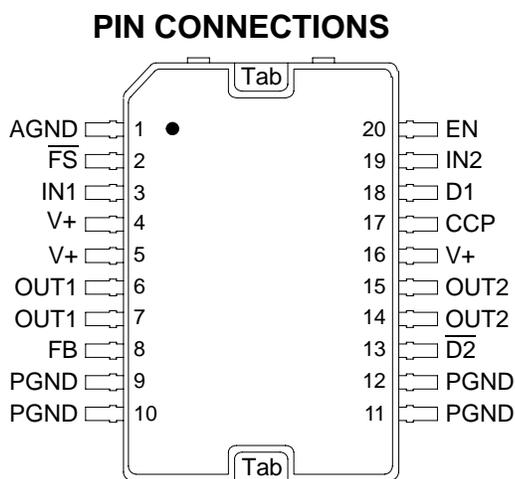


Figure 3. 33887 Pin Connections

Table 1. 33887 HSOP PIN DEFINITIONS

A functional description of each pin can be found in the [Functional Pin DescriptionS](#) section, [page 21](#).

Pin	Pin Name	Formal Name	Definition
1	AGND	Analog Ground	Low-current analog signal ground.
2	\overline{FS}	Fault Status for H-Bridge	Open drain active LOW Fault Status output requiring a pull-up resistor to 5.0 V.
3	IN1	Logic Input Control 1	Logic input control of OUT1 (i.e., IN1 logic HIGH = OUT1 HIGH).
4, 5, 16	V+	Positive Power Supply	Positive supply connections
6, 7	OUT1	H-Bridge Output 1	Output 1 of H-Bridge.
8	FB	Feedback for H-Bridge	Current sensing feedback output providing ground referenced 1/375th (0.00266) of H-Bridge high-side current.
9–12	PGND	Power Ground	High-current power ground.
13	$\overline{D2}$	Disable 2	Active LOW input used to simultaneously tri-state disable both H-Bridge outputs. When $\overline{D2}$ is Logic LOW, both outputs are tri-stated.
14, 15	OUT2	H-Bridge Output 2	Output 2 of H-Bridge.
17	CCP	Charge Pump Capacitor	External reservoir capacitor connection for internal charge pump capacitor.
18	D1	Disable 1	Active HIGH input used to simultaneously tri-state disable both H-Bridge outputs. When D1 is Logic HIGH, both outputs are tri-stated.
19	IN2	Logic Input Control 2	Logic input control of OUT2 (i.e., IN2 logic HIGH = OUT2 HIGH).
20	EN	Enable	Logic input Enable control of device (i.e., EN logic HIGH = full operation, EN logic LOW = Sleep Mode).
Tab/Pad	Thermal Interface	Exposed Pad Thermal Interface	Exposed pad thermal interface for sinking heat from the device. Note Must be DC-coupled to analog ground and power ground via very low impedance path to prevent injection of spurious signals into IC substrate.