

**SISTEMA DE CONTROL DE TRAYECTORIA EN MANIPULADOR DE CINCO  
GRADOS DE LIBERTAD UTILIZANDO SENSOR EMOTIV™.**

**LIZETH ANDREA FERNÁNDEZ MOTTA**

**UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
INGENIERÍA EN MECATRÓNICA  
BOGOTÁ D.C.  
2014**

**SISTEMA DE CONTROL DE TRAYECTORIA EN MANIPULADOR DE CINCO  
GRADOS DE LIBERTAD UTILIZANDO SENSOR EMOTIV™.**

**LIZETH ANDREA FERNÁNDEZ MOTTA**

**Código 1801478**

**Informe de investigación realizado para optar por el título de Ingeniero en  
Mecatrónica**

**Director:**

**Ing. OLGA LUCIA RAMOS SANDOVAL. Ms.c**

**Co-Director:**

**Ing. DARÍO AMAYA HURTADO. Ph.D**

**UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**INGENIERÍA EN MECATRÓNICA**

**BOGOTÁ D.C.**

**2014**

## NOTA DE ACEPTACIÓN

Informe final de investigación del proyecto titulado Sistema de control de trayectoria en manipulador de cinco grados de libertad utilizando sensor Emotiv™, aprobado por el Comité de Grado en cumplimiento de los requisitos exigidos por la Universidad Militar Nueva Granada para optar al título de Ingeniero en Mecatrónica.

---

**Director**

---

**Co-Director**

---

**Firma Jurado 1**

---

**Firma Jurado 2**

---

**Firma Jurado 3**

**BOGOTÁ D.C. Julio de 2014**

Dedico este trabajo primero que todo a Dios porque me ha llenado de fuerza, grandeza, oportunidades y seres queridos que me han apoyado en los buenos y malos momentos pero sobre todo han estado a mi lado durante esta etapa maravillosa de mi vida que con gran satisfacción y cariño despido.

Gracias a mi mami, mi familia y al compañero de mi camino.

## AGRADECIMIENTOS

---

En el desarrollo de nuestras vidas en el ámbito personal y profesional podemos distinguir diferentes etapas que son marcadas por personas y motivaciones, las cuales contribuyen a la realización de metas que nos satisfacen.

Personas como mis compañeros de nivel, de niveles superiores e inferiores, con los cuales se compartieron grandes experiencias de vida a medida que se descubrían los conocimientos que comprenden nuestra carrera.

Por otro lado, las motivaciones se logran a partir de los sueños y retos que son impuestos por nuestros profesores para generar en nosotros pasión por las actividades diarias de nuestra profesión. Y no solo a ellos sino también a nuestro querido grupo GAV, quienes me brindaron la oportunidad de desarrollar esta maravillosa propuesta que sea el inicio de un gran proyecto o ideas futuras, en especial a la ingeniera Olga Lucia Ramos y al ingeniero Darío Amaya Hurtado. Además agradezco a los asesores del proyecto el ingeniero Ricardo Castillo, el ingeniero Juan Camilo Quiceno Bravo, el ingeniero Camilo Cáceres Flores, el Ingeniero German Darío Buitrago Salazar y el ingeniero Alexis Yamid Ghisays Abril.

Sin embargo, este camino no sería nada sin encontrar al final un trofeo que representa la alegría y la tranquilidad del deber cumplido, que comparto con mi madre y mi familia, los cuales se esforzaron día a día para superar las

dificultades y convertirse en un gran apoyo para llegar al lugar donde me encuentro.

Finalmente agradezco a todas las personas que mencione en este escrito, pues son parte del gusto de poder culminar mi carrera con la presentación de este proyecto.

# CONTENIDO

---

---

	Pág.
AGRADECIMIENTOS.....	v
LISTA DE TABLAS.....	xi
LISTA DE FIGURAS.....	xii
RESUMEN .....	xv
ABSTRACT .....	xv
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA .....	3
1.2 JUSTIFICACIÓN .....	4
1.3 OBJETIVOS .....	5
1.3.1 Objetivo General.....	6
1.3.2 Objetivos Específicos.....	6
1.4 ALCANCE .....	6
2. MARCO REFERENCIAL .....	8
2.1 ESTADO DEL ARTE.....	8
2.1.1 Interacción hombre-máquina a través del monitoreo de la actividad cerebral.....	8
2.1.2 Control EEG para manipulador robótico industrial .....	9
2.1.3 Control cerebral de Robot NXT: Tele-operar un robot a través de la actividad eléctrica del cerebro .....	10

2.1.4	Evaluación on-line de la habilidad para operar un tele-robot usando electroencefalograma (EEG) .....	10
2.1.5	Control de una silla de ruedas inteligente a partir de los movimientos de la cabeza .....	11
2.1.6	Navegación de Robot utilizando interfaces cerebro - computador	12
2.2	MARCO CONCEPTUAL .....	12
2.2.1	Robots Manipuladores.....	12
2.2.1.1	Robots tele-operados.....	14
2.2.1.2	Tipos de articulaciones .....	15
2.2.1.3	Configuraciones de robot manipuladores.....	16
2.2.2	Cinemática de manipuladores .....	17
2.2.2.1	Algoritmo de Denavit – Hartenberg .....	18
2.2.2.2	Cinemática directa .....	20
2.2.2.3	Cinemática inversa.....	21
2.2.3	Tarjeta STM32F4DISCOVERY.....	23
2.2.3.1	Módulo de PWM .....	25
2.2.3.2	Módulo UART.....	25
2.2.4	Emotiv™.....	26
2.2.4.1	Emotiv™ SDK.....	27
2.2.4.2	La suite expresiva .....	28
2.2.4.3	La suite afectiva .....	29
2.2.4.4	La suite cognitiva .....	30



2.2.5	El encéfalo humano .....	31
2.2.5.1	Ondas Beta .....	33
2.2.5.2	Ondas Alfa .....	33
2.2.5.3	Ondas Theta.....	34
2.2.5.4	Ondas Delta.....	34
2.2.5.5	Electroencefalograma.....	35
3.	DISEÑO METODOLÓGICO .....	38
3.1	MANIPULADOR DE CINCO GRADOS DE LIBERTAD.....	39
3.1.1	Movimientos y restricciones del manipulador .....	41
3.2	ANÁLISIS DE TRAYECTORIA .....	44
3.2.1	Representación esquemática y análisis de Denavit-Hartenberg .	45
3.2.2	Matrices homogéneas .....	47
3.2.3	Cinemática directa para manipulador de 5DOF .....	49
3.2.4	Cinemática inversa para manipulador de 5DOF .....	52
3.2.5	Generación de trayectoria.....	55
3.3	DISEÑO FÍSICO .....	56
3.3.1	Acondicionamiento electrónico .....	56
3.3.2	Transmisión serial.....	61
3.4	INTERFAZ DE USUARIO.....	63
3.4.1	Conexión serial de la interfaz .....	65
3.4.2	Implementación de cinemática inversa y directa .....	66
3.4.3	Entorno virtual.....	68

3.4.4	Procesamiento de señales del Emotiv™ .....	70
4.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	77
4.1	SENSOR EMOTIV™ .....	79
4.2	COMPORTAMIENTO DE TRANSMISIÓN SERIAL Y ACONDICIONAMIENTO ELECTRÓNICO .....	81
4.3	MANIPULADOR – BRAZO ROBÓTICO .....	82
4.4	ERROR EN POSICIÓN.....	83
4.5	FUNCIONAMIENTO DEL PROYECTO .....	85
5.	CONCLUSIONES.....	92
6.	RECOMENDACIONES.....	94
	BIBLIOGRAFÍA .....	96

## LISTA DE TABLAS

---

---

	Pág.
Tabla 1. Parámetros de Denavit Hartenberg .....	20
Tabla 2. Detecciones expresivas .....	28
Tabla 3. Tipos de ondas cerebrales .....	35
Tabla 4. Restricciones de cada articulación. ....	43
Tabla 5. Restricciones de cada articulación en el plano cartesiano local.....	43
Tabla 6. Parámetros de cada articulación para manipulador de 5DOF .....	46
Tabla 7. Parámetros de cada articulación para manipulador de 4DOF .....	46
Tabla 8. Constantes de manipuladores de 5DOF y 4DOF .....	47
Tabla 9. Configuración de módulo de PWM.....	59
Tabla 10. Códigos para PWM .....	60
Tabla 11. Expresiones para movimiento de manipulador de 5DOF .....	72
Tabla 12. Estados cognitivos con respecto a las coordenadas. ....	73
Tabla 13. Muestras de error de posición .....	83

## LISTA DE FIGURAS

---

---

	Pág.
Figura 1. Tipos de articulaciones en manipuladores robóticos .....	15
Figura 2. Configuraciones de manipuladores .....	17
Figura 3. Estructura de matriz homogénea .....	21
Figura 4. Nomenclatura de triangulo .....	23
Figura 5. Tarjeta STM32F4DISCOVERY.....	24
Figura 6. Auricular neuronal Emotiv™ EPOC.....	26
Figura 7. Ondas cerebrales .....	33
Figura 8. Ritmos de la onda cerebral.....	36
Figura 9. Posicionamiento de electrodos.....	37
Figura 10. Esquema general del proyecto parte física.....	38
Figura 11. Manipulador de 5DOF.....	39
Figura 12. Manipulador de 5DOF en SolidWorks .....	40
Figura 13. Esquema de manipulador de 5DOF, nomenclatura .....	41
Figura 14. Giro de cada articulación 5DOF .....	42
Figura 15. Giro de cada articulación 4DOF .....	42
Figura 16. Diagrama de Denavit-Hartenberg para manipulador de 5DOF ....	45
Figura 17. Diagrama de Denavit-Hartenberg para manipulador de 4DOF ....	46
Figura 18. Análisis geométrico de manipulador Plano XY.....	52
Figura 19. Análisis geométrico de manipulador plano YZ.....	53

Figura 20. Circuito General de Manipulador de 5DOF.....	56
Figura 21. Diagrama general electrónico.....	61
Figura 22. Tarjeta RS232.....	61
Figura 23. Circuito de tarjeta RS232.....	62
Figura 24. Diagrama general de la interfaz de usuario.....	63
Figura 25. Tipos de manipulador.....	64
Figura 26. Módulo de trabajo en tiempo real.....	64
Figura 27. Puerto serial de interfaz.....	65
Figura 28. Virtual Serial Port Driver 6.9.....	66
Figura 29. Módulo de cinemática inversa.....	67
Figura 30. Módulo de cinemática directa.....	68
Figura 31. Entorno virtual manipulador de 5DOF.....	69
Figura 32. Modo Pruebas del entorno virtual.....	70
Figura 33. Programa Visual C++ Consola.....	72
Figura 34. Módulo Expresivo para manejo de manipulador.....	74
Figura 35. Módulo o cognitivo para manipulador.....	75
Figura 36. Representación general de simulación Emotiv™ y entrenamiento. .....	76
Figura 37. Formas de Conexión Emotiv™.....	77
Figura 38. Interfaz de MATLAB para manipulador.....	77
Figura 39. Interfaz final del proyecto.....	79
Figura 40. Gráfica de la muestra de cada error y error promedio.....	84

Figura 41. Alistar Manipulador. ....	85
Figura 42. Conexión virtual de COM1 y COM2 .....	86
Figura 43. Programa Emotiv™ en Consola.....	86
Figura 44. Simulación integral de módulo expresivo .....	87
Figura 45. Entrenamiento de módulo expresivo .....	88
Figura 46. Módulo cognitivo y entrenamiento. ....	88
Figura 47. Módulo real.....	89
Figura 48. Módulo de Cinemática inversa.....	89
Figura 49. Módulo de cinemática directa .....	90
Figura 50. Módulo de entorno virtual .....	91

## RESUMEN

---

Los manipuladores son dispositivos articulados que le permiten al hombre realizar tareas que estén bajo su control y que evite el contacto físico del usuario con el objeto final. El control del mismo se realiza a través de diferentes medios, en este trabajo se expone el resultado de la interacción de un brazo robótico con las señales cerebrales interpretadas por el sensor Emotiv™, quien ejerce el control de los movimientos del mismo.

Para lo cual se presenta la correspondiente revisión conceptual, diseño del sistema integrado, e implementación. Esta solución cuenta con una interfaz por computador, de fácil entendimiento y utilización, en donde el usuario puede interactuar con las diferentes etapas y aspectos que corresponden.

Finalmente, se describen las ventajas y desventajas de cada etapa (manipulador, transmisión serial y acondicionamiento eléctrico, interfaz y Emotiv™), de acuerdo a la disposición e implementación de los recursos escogidos (métodos, programas y dispositivos). Además se muestran los resultados de una prueba de error de la posición final del sistema.

## ABSTRACT

---

The manipulators are articulated enable man to perform tasks under their control and to avoid physical contact with the end user's device object. The same control is done through various means, in this paper the result of the

interaction of a robotic arm with brain signals interpreted by the sensor Emotiv™, who exercises control over the movements of it is exposed.

For which the corresponding revision conceptual design of the integrated system, and implementation is presented. This how much solution with a computer interface, easy to understand and use, where the user can interact with the different stages and aspects that apply.

Finally, the advantages and disadvantages of each step (manipulator, serial transmission and power conditioning, interface and Emotiv™), according to the provision and implementation of selected resources (methods, programs and devices) are described. In addition the results of error test of the final position of the system.



# 1. INTRODUCCIÓN

---

Los robots han marcado un antes y un después en la historia del humanidad, pues fueron creados para facilitar la vida del hombre y no solo eso sino para agilizar los procesos de la industria y generar productos y servicios de mayor calidad.

Entre los robots considerados de más utilidad en la actualidad se encuentran los robots industriales o manipuladores, los cuales según La Federación Internacional de Robótica (IFR, International Federation of Robotics) dice: "Por robot industrial de manipulación se entiende una máquina de manipulación automática, reprogramable y multifuncional con tres o más ejes que pueden posicionar y orientar materias, piezas, herramientas o dispositivos especiales para la ejecución de trabajos diversos en las diferentes etapas de la producción industrial, ya sea en una posición fija o en movimiento" (Cano Galindo, 2014)

Pues si esta definición sugiere que solo los podemos encontrar en fábricas o lugares donde se requiere un alto grado de repetitividad de actividades, es importante mencionar que últimamente, los manipuladores también son utilizados para realizar tareas de precisión o de difícil acceso para el hombre.

Por otra parte, es común encontrar que estos manipuladores son controlados de forma convencional por medio de computadores, programas y accionamiento manual. Sin embargo, esta tesis muestra una alternativa diferente que le da un valor agregado a la funcionalidad de estas máquinas.

Pues si antes para muchos de nosotros era impensable lograr que la actividad cerebral de un hombre pueda interpretarse y transducirse en acciones tangibles, en este trabajo de grado, se expone una de las muchas aplicaciones que la combinación hombre maquina puede lograr, ya que se muestran los resultados del control de un manipulador de 5 grados de libertad por medio de las ondas emitidas por el encéfalo.

En este documento se presenta en su inicio, la introducción que la que se describen los aspectos importantes de cada uno de los capítulos a desarrollar y un prelude de las características generales del desarrollo. Más adelante se encuentra la justificación, objetivos y alcance del proyecto, los cuales muestran el propósito y finalidad con el cual se lleva a término este proyecto.

El segundo capítulo tiene como título “Marco Referencial”, el cual se divide en dos apartados, el primero es el Estado del arte, en el cual se presentan seis proyectos desarrollados en torno al uso del sensor Emotiv™ en Brazos robóticos y en la industria en general. Por otra parte, en el segundo subcapítulo, se describe un resumen de la consulta bibliográfica de los temas que se deben tener en cuenta para el desarrollo de la práctica los cuales son: Manipulador de cinco grados de libertad, con sus características y configuraciones, descripción general de la cinemática directa, inversa y análisis de trayectorias, descripción de la tarjeta que se usa para como interfaz electrónica y por último referente al sensor Emotiv™ y las diferentes suites que se pueden utilizar.

El siguiente capítulo es el diseño metodológico, en donde se encuentran las características generales y específicas del manipulador con los movimientos y restricciones del mismo. Además el análisis de trayectoria con cinemática

directa e inversa, la exposición del acondicionamiento electrónico y transmisión serial y todo interconectado en la interfaz de usuario.

Por otro lado, se encuentra el capítulo del análisis de resultados del comportamiento del sensor Emotiv™, del acondicionamiento y transmisión serial y del manipulador. Seguido de una prueba de error de la posición final del efector.

En sus últimos capítulos encontramos las conclusiones y recomendaciones que se obtuvieron durante el proceso de elaboración y finalización del proyecto el cual se encuentra soportado con las referencias bibliográficas correspondientes, ubicadas al final del trabajo.

En consecuencia, esta es una invitación al lector para que conozca los resultados de este desarrollo inspirado en la necesidad que tiene el área de la medicina por incluir tecnología a sus procesos.

## 1.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

---

Este trabajo está enmarcado en el proyecto de investigación del grupo GAV (grupo de aplicaciones virtuales), “Prototipo de Robótica colaborativa para asistencia quirúrgica”. En el cual, por medio de señales cerebrales interpretadas por el sensor Emotiv™ se controlan los movimientos de un manipulador de cinco grados de libertad, en donde las trayectorias propuestas sean producto del procesamiento de las señales emitidas por el usuario y específicamente, este trabajo busca resolver el problema de conexión del sensor Emotiv™ y el manipulador.

Es importante mencionar que la robótica puede ser de gran utilidad en la medicina ya que es una herramienta muy apropiada en el momento de realizar cirugías complejas o donde el ojo del hombre le es difícil acceder. El robot se convierte en una herramienta fundamental en los momentos en que la presencia del hombre implique un riesgo, como por ejemplo la manipulación de explosivos, desactivar bombas, inspección de zonas tóxicas y en zonas de derrumbe ( RAMÍREZ GIRALDO & GRAJALES VALENCIA, 2003) estas son algunas razones por las cuales es indispensable buscar alternativas que con ayuda de la tecnología se puedan lograr.

## 1.2 JUSTIFICACIÓN

---

Uno de los anhelos más grandes de la civilización humana ha sido la capacidad de ejecutar acciones a partir del simple hecho de pensar, utilizando ondas cerebrales, aprovechar ese denominado poder mental, una especie de telequinesis (concepto acuñado en 1890 por el psicólogo ruso investigador Alexander N. Aksakof que refiere a la capacidad del hombre de ejercer movimiento en objetos únicamente mediante un poder mental sin necesidad de tocar el objeto o algo que desencadene este movimiento por consecuencia), o psicoquinesis (término preferido por la comunidad parapsicológica que se usa para describir una variedad de hipotéticos fenómenos complejos de fuerza mental).

El asunto del aprovechamiento de los “poderes mentales” llámense como se llamen, telequinesis o psicoquinesis en algún momento tendrían que

encontrar bases científicas para lograrse, posiblemente no como se tenía pensado, o tal cual expone la ciencia ficción y/o efectos especiales en el cine, pero he aquí la opción más cercana a este propósito, el dispositivo Emotiv™ (Magazine, 2013), el cual será empleado para la operación del manipulador que realizará movimientos en tres dimensiones.

Es importante resaltar que para la operación de un manipulador generalmente se utilizan diferentes comandos ordenados por voz o manualmente, esta situación hace excluyente a las personas que presentan algún tipo de discapacidad, sin embargo, esta es una alternativa para que sea más general su uso, por cual el proyecto realiza su contenido social sin dejar de lado una implementación tecnológica, en donde se realizarán actividades acordes a los conocimientos adquiridos durante el desarrollo de las diferentes asignaturas de la carrera de pregrado de Ingeniería en Mecatrónica

Finalmente, es una aplicación que puede ser empleada en diversos campos, por ejemplo para asistencia quirúrgica, manejo de explosivos o cualquier actividad que implique no tener contacto con el efector final de forma manual.

### 1.3 OBJETIVOS

---

Estos son los elementos que identifican la finalidad hacia la cual deben dirigirse los recursos y esfuerzos para dar cumplimiento del propósito del proyecto.

---

### 1.3.1 Objetivo General

---

Diseñar y desarrollar un sistema para el control de trayectoria de un brazo robótico de cinco grados de libertad utilizando el sensor Emotiv™.

---

### 1.3.2 Objetivos Específicos

---

- ❖ Diseñar e implementar un acondicionamiento de señales para un brazo robótico de cinco grados de libertad.
- ❖ Diseñar y desarrollar una estrategia de control de trayectoria para un brazo robótico de cinco grados de libertad.
- ❖ Controlar la trayectoria del brazo robótico, a través del sensor Emotiv™.
- ❖ Socializar los resultados obtenidos.

## 1.4 ALCANCE

---

El sistema de control de posición para el manipulador contará con el sensor Emotiv™ el cual permite percibir las señales cerebrales que posteriormente se procesarán por medio de un programa en el ordenador y las señales de salida será acondicionadas para que los actuadores muevan cada una de las articulaciones del robot, y este llegue a la posición final deseada.

Cabe resaltar que el grado de la precisión de los movimientos que realiza el manipulador estará sujeto a la exactitud con la que el usuario interactúa con

el sistema, sin embargo se debe realizar la correspondiente calibración para que se ajuste a las características de cada persona que lo emplee.

## 2. MARCO REFERENCIAL

---

En este capítulo, se describe la revisión bibliográfica de los conceptos relevantes para el desarrollo del proyecto, entre los cuales se destaca la consulta del estado del arte, que presenta aproximaciones o trabajos anteriores realizado por diferentes autores con relación a los temas a desarrollar y finalmente la consulta de los términos y características que justifican el avance de la propuesta.

### 2.1 ESTADO DEL ARTE

---

Durante la última década se realizaron diferentes avances relacionados con el análisis del comportamiento cerebral, enfatizado en el estudio de las señales que este emite y la aplicación a la ingeniería para cumplir con las expectativas del entorno actual.

#### 2.1.1 Interacción hombre-máquina a través del monitoreo de la actividad cerebral

---

Este trabajo investiga que sea realizable el uso de un dispositivo de lectura de ondas cerebrales en aplicaciones, así como las limitaciones del mismo. El dispositivo de prueba en este trabajo se llama Emotiv™ EPOC auricular, que es un electroencefalograma (EEG) dispositivo de medición de la actividad cerebral que usa 14 sensores colocados estratégicamente. En este trabajo se



presenta un marco BCI (Brain Computer Interfaces) impulsado completamente por patrones de pensamiento, dirigido a aplicaciones del mundo real. Además una prueba de control de un robot de cuatro ruedas diferenciales sencillas, este es dirigido mediante la identificación de cuatro patrones de pensamiento en el usuario: "neutral", "avanzar", "gire a la izquierda", y "gire a la derecha". El enfoque desarrollado se probó en 6 individuos y los resultados muestran que se requiere un alto grado de concentración de los usuarios para controlar el robot con precisión. (Wijayasekara, Univ. of Idaho, & Idaho Falls, 2013)

---

### **2.1.2 Control EEG para manipulador robótico industrial**

---

Este artículo presenta un sistema Brain Computer Interface (BCI) de EEG para control de un robot manipulador industrial en este caso el Emotiv EPOC™ se emplea para el registro de la actividad cerebral. El sistema BCI desarrollado registra la actividad rítmica cerebro a través de electrodos situados en el cuero cabelludo. El reconocimiento de la actividad cerebral se asocia con las expresiones faciales y acciones cognitivas relacionadas con el movimiento de un cubo virtual en 3D. El usuario es capaz de controlar una articulación de un manipulador en el espacio cartesiano asociado con el uso de las expresiones faciales y acciones cognitivas. Se proporciona un procedimiento de formación de las acciones cognitivas y se prueba con diferentes usuarios a través de las sesiones de entrenamiento cortas. Los experimentos y los resultados mostraron que los usuarios fueron capaces de gestionar y controlar el robot manipulador para llegar a una posición deseada simulando una tarea industrial. (Perez Garcia, Schjolberg, Gale, & Department of Engineering Cybernetics, Norwegian U, 2013)

---

### **2.1.3 Control cerebral de Robot NXT: Tele-operar un robot a través de la actividad eléctrica del cerebro**

---

Este documento se centra en la investigación de la interacción robot-hombre a través de tele-operación con la ayuda de interfaces cerebro-ordenador (BCI). El prototipo experimental utiliza las operaciones básicas de movimiento y detección de obstáculos de un Lego NXT Mindstroms Robot y son presentadas dos versiones de este prototipo, que toman lecturas de la actividad eléctrica del cerebro de los usuarios en tiempo real. La primera versión se realizó mediante el uso de un Neurosky Mindset, y se basa en los niveles de atención del usuario para lograr la aceleración o desaceleración del robot. La segunda versión está utilizando un Emotiv EPOC™ para tomar de las auriculares lecturas de 14 sensores, siendo el usuario capaz de controlar totalmente el robot. (Vourvopoulos, Liarokapis, & Interactive Worlds Appl. Res. Group, Coventry Uni, 2011)

---

### **2.1.4 Evaluación on-line de la habilidad para operar un tele-robot usando electroencefalograma (EEG)**

---

Los estados del tele-operador humano tienen un gran impacto en la tele-operación. Sin embargo, en la mayoría de la investigación se evalúa la estabilidad o la tele-presencia en la robótica, pero pocos de ellos se centran en el efecto del tele-operador. En este trabajo se presenta un método de evaluación de la habilidad en la tele-operación, basado en un nuevo concepto llamado SoT (skill of teleoperator), desde el punto de vista de los estados cerebrales. La idea básica es que los tele-operadores están sometidos

a diferentes niveles o grados de dificultad mientras usan de un auricular Emotiv™ durante la tele-operación, los experimentos se realizaron para entrenar una red neuronal B-spline y de esta forma se estableció la relaciones entre SoT y los estados cerebrales del tele-operador. (Shuang, Ning , & Yunyi , 2012)

---

### **2.1.5 Control de una silla de ruedas inteligente a partir de los movimientos de la cabeza**

---

Este artículo presenta una interfaz hombre-máquina de fácil uso (HMI) para el control con manos libres de una silla de ruedas eléctrica (EPW). Sus dos modos de funcionamiento se basan en movimientos de la cabeza: el modo 1 utiliza sólo un movimiento de la cabeza para dar las órdenes, y el Modo 2 emplea cuatro movimientos de la cabeza. Un dispositivo de EEG, conocido como Emotiv EPOC™, se ha utiliza para obtener la información sobre el movimiento de cabeza de los usuarios. El HMI propuesto se compara con el control de joystick de un EPW en un ambiente interior. Los resultados experimentales muestran que el modo de control 2 se puede implementar a gran velocidad de forma fiable, logrando un tiempo medio de 67,90 segundos para dos sujetos al recorrer un circuito propuesto por los investigadores. Sin embargo, el modo de control 1 tiene un rendimiento inferior, logrando una media de 153,20 segundos aunque necesita sólo un movimiento de la cabeza. Está claro que esta propuesta se puede utilizar con eficacia para sustituir el control de joystick tradicional para las personas con discapacidad y de edad avanzada. (Rechy-Ramirez, Hu, & McDonald-Maier, 2012)

---

### **2.1.6 Navegación de Robot utilizando interfaces cerebro - computador**

---

Este documento identifica la adaptación del usuario en los sistemas controlados por el cerebro y la capacidad de controlar eventos generados por el cerebro en un bucle de neuro-retroalimentación cerrado. Para lograr esto, un sistema de trabajo ha sido desarrollado sobre la base de off-the-shelf que son componentes para el control de un robot, tanto en el mundo real como el virtual. El sistema se divide en dos prototipos que difieren en el tipo de audífono utilizado. El primer prototipo se basa en el auricular Neurosky y ha sido probado con 54 participantes. El segundo prototipo se basa en el auricular Emotiv™ incluyendo más sensores y exactitud. Los resultados de las evaluaciones iniciales indican que la navegación de robots a través de BCI puede ser eficaz y natural.

## **2.2 MARCO CONCEPTUAL**

---

Para el desarrollo del proyecto se requiere la revisión conceptual y bibliográfica de los siguientes temas que están relacionados con las fases del desarrollo.

---

### **2.2.1 Robots Manipuladores**

---

La mayor parte de los robots industriales actuales son esencialmente brazos articulados. De hecho, según la definición del "Robot Institute of America", un

robot industrial es un manipulador programable multifuncional diseñado para mover materiales, piezas, herramientas o dispositivos especiales, mediante movimientos variados, programados para la ejecución de distintas tareas.

Los manipuladores en su sistema mecánico están compuestos por diversas articulaciones que distinguen el brazo de los órganos terminales o efector final. El aumento del número de articulaciones aporta mayor maniobrabilidad pero dificulta el problema de control, obteniéndose normalmente menores precisiones por acumulación de errores, entre tanto es común encontrar manipuladores como máximo de 6 grados de libertad, lo que permite ubicar y orientar el efector final adecuadamente sin tener redundancias.

Se indica que las ecuaciones que describen el movimiento del brazo articulado son ecuaciones diferenciales no lineales y acopladas, para las que, en un caso general, resulta difícil obtener soluciones analíticas. Físicamente, los términos de acoplamiento representan: pares gravitacionales que dependen de la posición de las articulaciones, pares de reacción debidos a las aceleraciones de otras articulaciones, y pares debido a aceleración de coriolis y fuerzas centrífugas. La magnitud de estas interacciones depende de las características del brazo y la carga que este soporta.

Por otra parte podemos encontrar que por lo general también está compuesto por:

- ❖ Actuadores.
- ❖ Sensores.
- ❖ Sistema de control.

Cabe resaltar que es usual encontrar que los parámetros de control son fijos aunque varían significativamente las condiciones de trabajo con la carga o con el propio movimiento. (Ollaro Baturone, 2001)

#### 2.2.1.1 Robots tele-operados

---

En este tipo de manipuladores la tarea de percepción del entorno, planificación y manipulación compleja es realizada por el hombre. Estos son muy utilizados para la localización remota (acceso difícil, medios contaminados o peligrosos), en tareas difíciles de automatizar y en entornos de estructurados, tales como las que se realizan en la construcción o en el mantenimiento de líneas eléctricas.

Las mayores dificultades radican en las limitaciones del hombre en la capacidad de ser preciso y sobre todo en la coordinación hombre y máquina. En algunas aplicaciones, el retraso de transmisión de información juega también un papel importante y su consideración resulta fundamental en el diseño del sistema de control. Por lo tanto el diseño de la interface persona-máquina suele ser el paso crítico para que el funcionamiento sea el adecuado. (Ollaro Baturone, 2001)

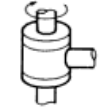
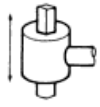
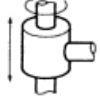

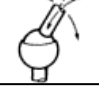
### 2.2.1.2 Tipos de articulaciones

---

Se pueden describir principalmente cinco, las cuales son:

- ❖ Rotacional: Suministra un grado de libertad de rotación alrededor del eje de la articulación.
- ❖ Prismática: Consiste en la traslación lo largo del eje de la articulación.
- ❖ Cilíndrica: En este tipo de articulación existen dos grados de libertad, una rotación y una traslación.
- ❖ Planar: Se caracteriza por el movimiento de desplazamiento en un plano, por tanto tiene dos grados de libertad.
- ❖ Esférica: Combina tres giros en tres direcciones perpendiculares en el espacio.

Figura 1. Tipos de articulaciones en manipuladores robóticos

ESQUEMA	ARTICULACIÓN	GRADOS LIBERTAD
	ROTACIÓN	1
	PRISMÁTICA	1
	CILÍNDRICA	2
	PLANAR	2
	ESFÉRICA (RÓTULA)	3

(Ollaro Baturone, 2001)

Los grados de libertad son el número de parámetros independientes que fijan la situación del efector final. El número de grados de libertad suele coincidir con el número de eslabones de la cadena cinemática.

### 2.2.1.3 Configuraciones de robot manipuladores

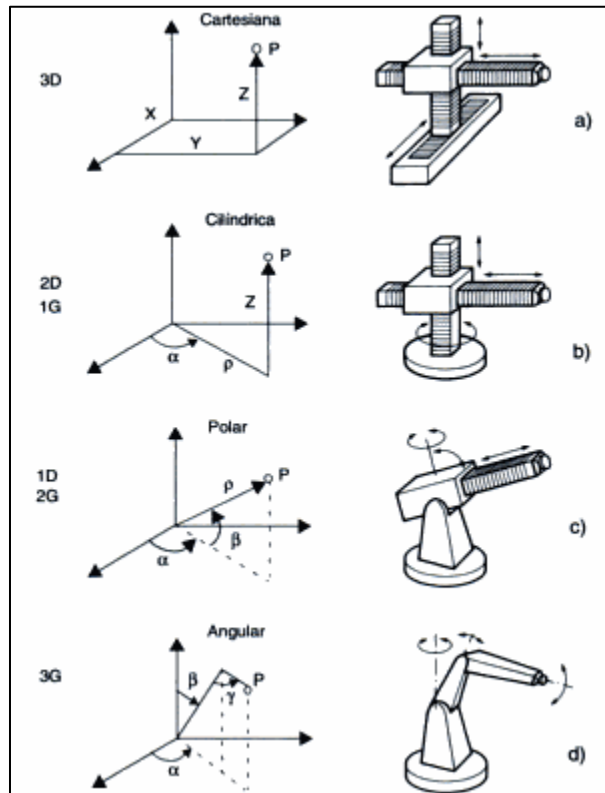
---

La estructura típica de manipuladores consiste en un brazo compuesto por elementos con articulaciones entre ellos, los cuales se mueven en el espacio de trabajo, que es el conjunto de puntos en los que puede situarse el efector final, hay que tener en cuenta que todos los puntos del espacio de trabajo no tienen la misma accesibilidad y de acuerdo a los tipos de articulaciones que lo conforman se pueden determinar las siguiente configuraciones que determinan el posicionamiento del efector final:

- ❖ Cartesiana: Tiene tres articulaciones prismáticas.
- ❖ Cilíndrica: Tiene dos articulaciones prismáticas y una rotacional.
- ❖ Polar: Tiene dos articulaciones rotaciones y una prismática.
- ❖ Angular: Tiene tres articulaciones rotaciones.



Figura 2. Configuraciones de manipuladores



(Ollaro Baturone, 2001)

## 2.2.2 Cinemática de manipuladores

La cinemática de manipuladores estudia el movimiento (en este caso, de estructuras mecánicas multi-articulares) pero no la manera de controlar este movimiento, que corresponde a la dinámica. Para el control de un brazo manipulador se necesita, además de su descripción cinemática, una formulación cinemática de su dinámica.

Entonces, si se quiere describir la cinemática del manipulador se tiene que definir los parámetros de cada eslabón, posteriormente la matriz homogénea

y su espacio de trabajo. En consecuencia, se puede decir que cada eslabón posee su propio sistema de coordenadas para sus movimientos de rotación y translación. (Catalunya, 2002)

#### 2.2.2.1 Algoritmo de Denavit – Hartenberg

---

Método matricial que permite establecer de manera sistemática un sistema de coordenadas ( $S_i$ ) ligado a cada eslabón  $i$  de una cadena articulada, pudiéndose determinar a continuación las ecuaciones cinemáticas de la cadena completa.

Este algoritmo permite de uno eslabón al siguiente mediante 4 transformaciones básicas que dependen exclusivamente de las características geométricas del eslabón.

Estas transformaciones básicas consisten en una sucesión de rotaciones y traslaciones que permitan relacionar el sistema de referencia del elemento  $i$  con el sistema del elemento  $i-1$ . Las transformaciones en cuestión son las siguientes:

- ❖ Rotación alrededor del eje  $Z_{i-1}$  un ángulo  $\theta_i$ .
- ❖ Traslación a lo largo de  $Z_{i-1}$  una distancia  $d_i$ ; vector  $d_i$   $(0, 0, d_i)$ .
- ❖ Traslación a lo largo de  $X_i$  una distancia  $a_i$ ; vector  $a_i$   $(0, 0, a_i)$ .
- ❖ Rotación alrededor del eje  $X_i$ , un ángulo  $\alpha_i$ .
- ❖ Numerar los eslabones comenzando con 1 (primer eslabón móvil de la cadena) y acabando con  $n$  (último eslabón móvil). Se numerara como eslabón 0 a la base fija del robot.

- ❖ Numerar cada articulación comenzando por 1 (la correspondiente al primer grado de libertad y acabando en n).
- ❖ Localizar el eje de cada articulación. Si esta es rotativa, el eje será su propio eje de giro. Si es prismática, será el eje a lo largo del cual se produce el desplazamiento.
- ❖ Para  $i$  de 0 a  $n-1$ , situar el eje  $Z_i$ , sobre el eje de la articulación  $i+1$ .
- ❖ Situar el origen del sistema de la base ( $S_0$ ) en cualquier punto del eje  $Z_0$ . Los ejes  $X_0$  e  $Y_0$  se situaran de modo que formen un sistema dextrógiro con  $Z_0$ .
- ❖ Para  $i$  de 1 a  $n-1$ , situar el sistema ( $S_i$ ) (solidario al eslabón  $i$ ) en la intersección del eje  $Z_i$  con la línea normal común a  $Z_{i-1}$  y  $Z_i$ . Si ambos ejes se cortasen se situaría ( $S_i$ ) en el punto de corte. Si fuesen paralelos ( $S_i$ ) se situaría en la articulación  $i+1$ .
- ❖ Situar  $X_i$  en la línea normal común a  $Z_{i-1}$  y  $Z_i$ .
- ❖ Situar  $Y_i$  de modo que forme un sistema dextrógiro con  $X_i$  y  $Z_i$ .
- ❖ Situar el sistema ( $S_n$ ) en el extremo del robot de modo que  $Z_n$  coincida con la dirección de  $Z_{n-1}$  y  $X_n$  sea normal a  $Z_{n-1}$  y  $Z_n$ .
- ❖ Obtener  $\theta_i$  como el ángulo que hay que girar en torno a  $Z_{i-1}$  para que  $X_{i-1}$  y  $X_i$  queden paralelos.
- ❖ Obtener  $d_i$  como la distancia, medida a lo largo de  $Z_{i-1}$ , que habría que desplazar ( $S_{i-1}$ ) para que  $X_i$  y  $X_{i-1}$  quedasen alineados.
- ❖ Obtener  $a_i$  como la distancia medida a lo largo de  $X_i$  (que ahora coincidiría con  $X_{i-1}$ ) que habría que desplazar el nuevo ( $S_{i-1}$ ) para que su origen coincidiese con ( $S_i$ ).
- ❖ Obtener  $\alpha_i$  como el ángulo que habría que girar en torno a  $X_i$  (que ahora coincidiría con  $X_{i-1}$ ), para que el nuevo ( $S_{i-1}$ ) coincidiese totalmente con ( $S_i$ ).
- ❖ Obtener las matrices de transformación  $i-1A_i$ .

- ❖ Obtener la matriz de transformación que relaciona el sistema de la base con el del extremo del robot  $T = {}^0A_1, {}^1A_2 \dots {}^{n-1}A_n$ .
- ❖ La matriz  $T$  define la orientación (submatriz de rotación) y posición (submatriz de traslación) del extremo referido a la base en función de las  $n$  coordenadas articulares. (Ibarra Nuño & Recinos Silva, 2013)

Finalmente se construye la siguiente tabla de parámetros de acuerdo con la cantidad de articulaciones de que tiene el manipulador.

Tabla 1. Parámetros de Denavit Hartenberg

Articulación	$\theta$	$d$	$a$	$A$
Art 1	$\theta_1$	$d_1$	$a_1$	$\alpha_1$
...	...	...	...	...
Art n	$\theta_n$	$d_n$	$a_n$	$\alpha_n$

#### 2.2.2.2 Cinemática directa

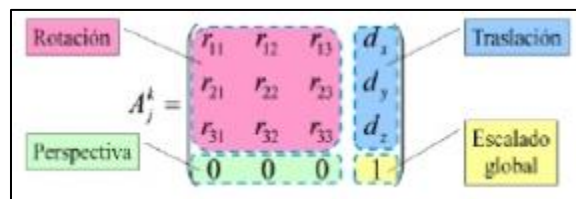
---

Dado que el análisis geométrico de la cinemática del robot, se emplea el método de Denavit – Hartenberg el cual con 4 parámetros implícitos en la geometría del robot, estos parámetros se usan en la matriz de transformación homogénea que representa los movimiento de cada uno de los eslabones, por lo tanto para representar los movimientos de las 6 articulaciones es necesario usar 6 matrices de transformación como la que es presentada a continuación:

$$A_i^{i-1}(q_i) = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cos \alpha_i & \sin \theta_i \sin \alpha_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \sin \alpha_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

De esta configuración se puede rescatar los siguientes parámetros:

Figura 3. Estructura de matriz homogénea



(Cuya Solari, Flores Bustinza, & Torres Chavez)

Para determinar la posición final del efector se requiere multiplicar las matrices homogéneas de cada uno de los eslabones y con la matriz final y los ángulos de cada una de las articulaciones se pueden determinar las condiciones finales del manipulador.

$$T = A_0^1 * A_1^2 * \dots * A_{n-1}^n \quad (2)$$

De la matriz resultante en las la posición r14, r24 y r34 corresponden a las coordenadas PX, PY y PZ respectivamente.

### 2.2.2.3 Cinemática inversa

En cinemática inversa, la posición deseada y, posiblemente, la orientación del efector final están dadas por el usuario, y los ángulos de la articulación

requerida para alcanzar esa configuración se pueden calcular. El problema puede tener cero, una, o más soluciones.

Si hay tantas limitaciones en la configuración que no existe solución, el sistema está llamado con exceso de restricciones.

Si hay relativamente pocas restricciones en el sistema y hay muchas soluciones al problema planteado, entonces se llama con pocas restricciones.

Para encontrar la solución es recomendable que sea cerrada. Este tipo de solución presenta las siguientes ventajas:

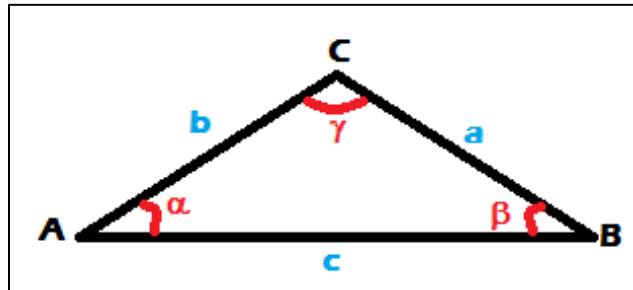
- ❖ Posibilidad de resolución en tiempo real (seguimiento de trayectorias).
- ❖ Posibilidad de incluir restricciones que garanticen la mejor solución (por ejemplo, límite en los recorridos articulares).
- ❖ Posibilidad de simplificaciones.
- ❖ Problema: No siempre existe.

Los métodos para obtenerlos son varios, pero principalmente los siguientes:

- ❖ Geométrico: Se suele utilizar para obtener los valores de las primeras variables articulares, que son las que posicionan el robot (prescindiendo de la orientación de su extremo). Utilizan relaciones geométricas y trigonométricas sobre los elementos del robot.
- ❖ Matrices de transformación homogénea: Despejar las  $n$  variables  $q_i$  en función de las componentes de los vectores  $n$ ,  $o$ ,  $a$  y  $p$ .
- ❖ Desacoplo cinemático: Para determinados robots con 6 grados de libertad. Resolución independiente de los grados de libertad que posicionan y de los que orientan.

Para el desarrollo del análisis de cinemática inversa por el método geométrico se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones trigonométricas:

Figura 4. Nomenclatura de triángulo



$$c^2 = a^2 + b^2 - 2ab\cos(\gamma) \quad (3)$$

$$\alpha + \beta + \gamma = 180^\circ \quad (4)$$

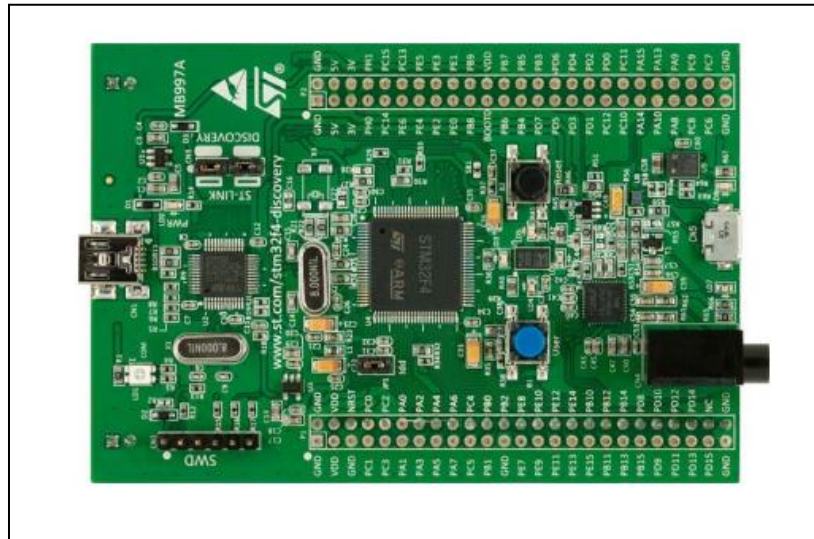
---

### 2.2.3 Tarjeta STM32F4DISCOVERY

---

Pertenece a la familia ARM de alto rendimiento Cortex™-M4 de 32 bits que funciona a una frecuencia de hasta 168 MHz. El núcleo Cortex-M4 dispone de una unidad de coma flotante (FPU) de precisión simple que soporta todas las instrucciones de procesamiento y tipos de datos. También implementa un conjunto completo de instrucciones DSP y una unidad de protección de memoria (MPU), que mejora la seguridad de las aplicaciones.

Figura 5. Tarjeta STM32F4DISCOVERY



(Stmicroelectronics, 2012)

La placa STM32F4DISCOVERY ofrece las siguientes características:

- ❖ Microcontrolador STM32F407VGT6 con 1 MB de memoria flash, 192 KB de RAM, encapsulado LQFP100.
- ❖ ST-LINK/V2 incorporado con selector usar el kit como un ST-LINK/V2 independiente (con conector SWD para programación y depuración).
- ❖ Fuente de alimentación: a través del bus USB o desde una fuente de alimentación externa de 5V.
- ❖ Sensor de movimiento ST MEMS LIS302DL, acelerómetro con salida digital de 3 ejes.
- ❖ Sensor de audio ST MEMS MP45DT02, micrófono digital omnidireccional.
- ❖ Audio DAC CS43L22 con controlador integrado de altavoz clase D.
- ❖ Dos pulsadores (usuario y reset).



- ❖ USB OTG con conector micro-AB.
- ❖ Hasta tres I2Cs
- ❖ Tres SPI, dos I2Ss full duplex. Para lograr una precisión de clase de audio, los periféricos I2S puede ser registrado a través de un PLL interno de audio dedicado o mediante un reloj externo para permitir la sincronización.
- ❖ Cuatro USART más dos UART
- ❖ Un USB OTG a toda velocidad y un USB OTG de alta velocidad con capacidad de velocidad completa (con la ULPI).
- ❖ Una interfaz SDIO / MMC
- ❖ Ethernet e interfaz de cámara disponible.

#### 2.2.3.1 Módulo de PWM

---

Para usar este módulo hay que tener en cuenta cuatro parámetros importantes:

- ❖ PWM\_TIMn\_Init.
- ❖ PWM\_TIMn\_Set\_Duty.
- ❖ PWM\_TIMn\_Start.
- ❖ PWM\_TIMn\_Stop.

#### 2.2.3.2 Módulo UART

---

Este módulo permite realizar comunicación serial entre la tarjeta y el exterior. Para la cual contamos con los siguientes canales:

- ❖ UART1 – PA9/PA10.
- ❖ UART2 – PA2/PA3.
- ❖ UART3 – PB10/PB11.
- ❖ UART4 – PC10/PC11.
- ❖ UART5 – PC12/PD2.
- ❖ UART6 – PC6/PC7.

---

## 2.2.4 Emotiv™

---

Este es uno de los avances más recientes en neuro-tecnología. Emotiv™ corresponde a una interfaz para la interacción persona-ordenador, de alta tecnología y conexión inalámbrica. Emotiv™ EPOC utiliza un conjunto de 14 sensores y 2 referencias para sintonizar las señales eléctricas producidas por el cerebro y de esta manera sean deducidas los pensamientos, los sentimientos y las expresiones de los usuarios en tiempo real.

Figura 6. Auricular neuronal Emotiv™ EPOC



(Emotiv, 2014)

Además cuenta con un giroscopio, el cual genera información sobre la posición que permite controlar de cursor y la cámara.

El conjunto (suites) de detección que se incorporan del Emotiv EPOC™ son:

- ❖ Expresivas: Utiliza las señales medidas por el neuroheadset para interpretar las expresiones faciales en tiempo real.
- ❖ Afectivo: Supervisa los estados emocionales del usuario en tiempo real.
- ❖ Cognitivo: Lee e interpreta los pensamientos y las intenciones conscientes de un usuario quienes pueden manipular objetos virtuales sólo con el poder de su pensamiento. (Emotiv, 2014)

#### 2.2.4.1 Emotiv™ SDK

---

El panel de control de Emotiv™ tiene un GUI (interfaz gráfica de usuario) que permite conectar el programa EmoEngine a través del API de Emotiv™ que presenta una biblioteca de enlace dinámico llamado edk.dll. La interfaz de usuario del panel de control descifra las señales del cerebro y las presentar en formas útiles mediante los suites de detección de Emotiv™.

#### 2.2.4.2 La suite expresiva

---

Debe interpretarse de la siguiente manera:

Tabla 2. Detecciones expresivas

<b>Expresiones</b>	<b>Nivel bajo</b>	<b>Nivel medio</b>	<b>Nivel alto</b>
<b>Parpadeo</b>	No hay parpadeo	—	Parpadeo
<b>Guiño derecho/ izquierdo</b>	Guiño izquierdo	No hay guiño	Guiño derecha
<b>Mirar a la derecha / Izquierda</b>	Mirar a la izquierda	Mirada al frente	Mirar a la derecha
<b>Levantar las cejas</b>	No hay expresión	—	Máxima expresión
<b>Surcar cejas</b>	No hay expresión	—	Máxima expresión
<b>Sonrisa</b>	No hay expresión	—	Máxima expresión
<b>Apretar</b>	No hay expresión	—	Máxima expresión
<b>Boca a la derecha/ izquierda</b>	Sonrisa a izquierda	No hay sonrisa	Sonrisa a derecha
<b>Carcajada</b>	No hay expresión	—	Máxima expresión

El nivel gráfico que aumentará o disminuirá dependiendo del nivel detectado de la expresión.

### 2.2.4.3 La suite afectiva

---

Posee tres diferentes detecciones afectivas: compromiso, la excitación instantánea, y emoción a largo plazo. Las detecciones afectivas buscan ondas cerebrales características que son de carácter universal y que no requieren un entrenamiento explícito. Sin embargo, los datos individuales se recogen para cada usuario y se guarda en ese perfil mientras que la suite afectiva se ejecuta. Por lo tanto, es importante ver algunas de las características de las detecciones de este módulo.

- ❖ La emoción instantánea: Se experimenta como una conciencia o sentimiento de fisiológico excitación con un valor positivo. La excitación se caracteriza por la activación en el sistema nervioso simpático, que se traduce en una gama de respuestas fisiológicas incluyendo dilatación de la pupila, abrir mucho los ojos, la estimulación de las glándulas sudoríparas, la frecuencia cardiaca y la tensión muscular aumenta, la desviación de la sangre, y la inhibición digestiva.
  - Emociones relacionadas: excitación, nerviosismo, agitación.
  - Comportamiento de puntuación: En general, cuanto mayor es el aumento en la activación fisiológica entonces mayor la puntuación de salida para la detección.
- ❖ Emoción a largo plazo: Se experimenta y se define de la misma manera que el instantáneo, pero la detección está diseñado y ajustado para ser más exactos, porque se meden los cambios en la excitación durante períodos de tiempo más largos.
- ❖ Compromiso: Es experimentado como el estado de alerta y la dirección consciente de la atención hacia los estímulos relevantes para una tarea. Se caracteriza por un aumento de la excitación fisiológica y las ondas

beta (un tipo bien conocido de forma de onda de EEG), junto con las ondas alfa atenuadas (otro tipo de forma de onda de EEG). El polo opuesto de esta detección se conoce como "Aburrimiento". Sin embargo, tenga en cuenta que esta no siempre corresponde a una experiencia emocional subjetiva que todos los usuarios describen como el aburrimiento.

- Emociones relacionadas: el estado de alerta, vigilancia, de concentración, de estimulación, de interés
- Comportamiento de puntuación: Cuanto mayor es la atención, la concentración y la carga de trabajo cognitivo, mayor la puntuación reportada por la detección.

#### 2.2.4.4 La suite cognitiva

---

Evalúa la actividad cerebral en tiempo real de un usuario para discernir la intención consciente del usuario para realizar acciones físicas distintas en un objeto, está diseñado para trabajar con un máximo de 13 acciones diferentes: 6 movimientos direccionales (empuja, tirar, izquierda, derecha, arriba y abajo) y 6 rotaciones (Giro a las manecillas del reloj, giro contra las manecillas del reloj, izquierda, derecha, adelante y hacia atrás) más una acción adicional que sólo existe en el ámbito de la imaginación del usuario: desaparecer.

El módulo cognitivo permite al usuario elegir hasta 4 acciones que se pueden reconocer en un momento dado de tiempo. Al aumentar el número de acciones concurrentes, aumenta la dificultad de mantener el control consciente sobre los resultados de la detección cognitiva. Casi todos los nuevos usuarios obtienen fácilmente controlar más de una sola acción con

bastante rapidez. Aprender a controlar múltiples acciones típicamente requiere práctica.

Cabe mencionar que este módulo requiere entrenamiento, que se consigue seleccionando la acción que desea entrenar. La acción por defecto es "neutral", cuando se requiere comenzar le entrenamiento se comienza a imaginar la acción y se pulsa el botón de entrenamiento. Para mejorar la respuesta del sistema es indispensable mantener el pensamiento durante el entrenamiento sin hacer gestos o movimientos adicionales.

Por último, la destreza mental con la suite cognitiva es una habilidad que va a mejorar con el tiempo. A medida que aprenda como capacitar los estados mentales distintos, reproducibles para cada acción, la detección se hace cada vez más precisa. La mayoría de los usuarios suelen alcanzar sus mejores resultados después de la formación de cada una de las acciones varias veces. El sobre-entrenamiento puede producir a veces una disminución en la precisión, aunque esto también puede indicar una falta de coherencia y la fatiga mental. La práctica y la experiencia le ayudarán a determinar la cantidad ideal de la formación necesaria para cada individuo de usuario. (Emotiv, Emotiv Software Development Kit)

---

### **2.2.5 El encéfalo humano**

---

El encéfalo, contenido en el cráneo, es la parte más voluminosa del sistema nervioso central (SNC), que continúa en la médula espinal, contenida en la columna vertebral, y en los nervios sensitivos y motores que llevan, respectivamente, información sensorial al encéfalo y el control de la

musculatura del esqueleto.

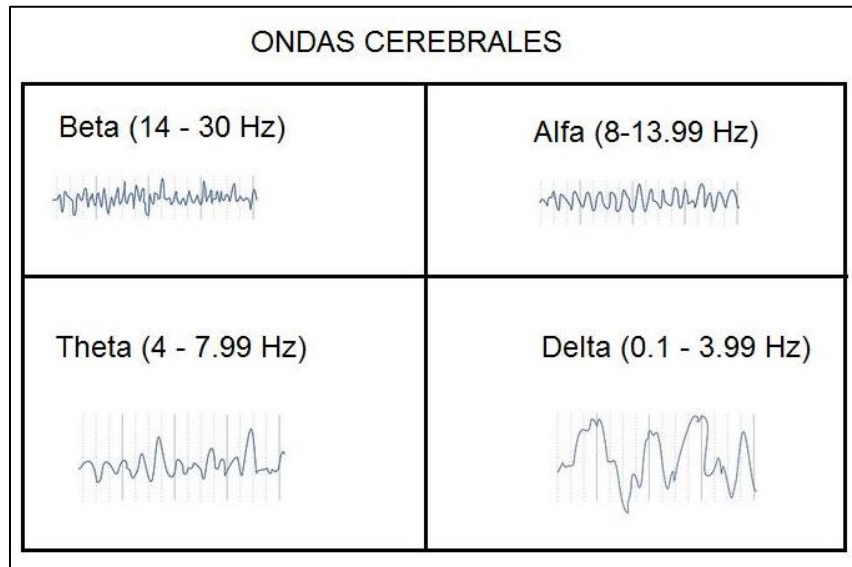
El cerebro produce impulsos eléctricos (potenciales de acción) que viajan a través de nuestras neuronas. Estos impulsos eléctricos producen ritmos que son conocidos como ondas cerebrales. Los impulsos eléctricos son información que viaja de neurona a neurona haciendo uso de cientos de miles de ellas para lograr transportarse y ejecutar una función determinada. La actividad de las ondas cerebrales puede ser observada un electroencefalograma o EEG.

Desde la invención del EEG se han producido numerosas investigaciones que han estudiado la relación entre las ondas cerebrales y los diferentes estados de conciencia. Sabemos que los diferentes patrones de ondas cerebrales se relacionan entre sí con diferentes estados de conciencia, tales como concentración intensa, estado de alerta (despierto), sueño profundo, sueños vívidos, somnolencia, relajación, hipnosis, estados alterados de conciencia, etc.

Existen cuatro tipos principales de ondas cerebrales: alfa, beta, theta y delta. A continuación se describen estos diferentes tipos de ondas cerebrales, en orden de mayor a menor actividad.



Figura 7. Ondas cerebrales



(Docència & Barcelona, 2014)

#### 2.2.5.1 Ondas Beta

---

Se producen cuando el cerebro está despierto e implicado en actividades mentales. Son ondas amplias y las de mayor velocidad de transmisión de las cuatro. Su frecuencia oscila entre 14 y 30-35 Hz (ciclos por segundo o cps). Denotan una actividad mental intensa. Cuando una persona está dando un discurso, estudiando, realizando un problema de matemáticas, etc. su cerebro se encuentra emitiendo este tipo de ondas. (Docència & Barcelona, 2014)

#### 2.2.5.2 Ondas Alfa

---

Alfa representa un estado de escasa actividad cerebral y relajación. Estas ondas son más lentas y de mayor amplitud que las beta. Su frecuencia oscila entre 8 y 14 cps. Una persona que ha terminado una tarea y se sienta a

descansar, se encuentra a menudo en un estado alfa; así como la persona que está dando un paseo, disfrutando del paisaje. (Docència & Barcelona, 2014)

#### 2.2.5.3 Ondas Theta

---

Son ondas de mayor amplitud y menor frecuencia (entre 4 y 8 cps). Se alcanzan bajo un estado de calma profunda. La persona que está fantaseando (o soñando despierta), se encuentra en este estado, así como la persona que tras conducir un rato, de repente se da cuenta de que no recuerda como ha hecho los últimos kilómetros. Se dice que es un estado de inspiración de ideas y soluciones creativas. Se trata de un estado en el que las tareas realizadas se han automatizado, ya no se necesita tener un control atencional y consciente de su ejecución, pudiendo el sujeto distanciarse de ellas mentalmente. Es decir, que su mente esté en “otro sitio” (a veces decimos “en la luna”). (Docència & Barcelona, 2014)

#### 2.2.5.4 Ondas Delta

---

Son las ondas de mayor amplitud y menor frecuencia (entre 1,5 y 4 cps). Nunca llegan a cero, pues eso significaría la muerte cerebral. Se generan ante un estado de ‘sueño profundo’.

Cuando nos vamos a dormir, las ondas cerebrales van pasando sucesivamente de beta a alfa, theta y finalmente, delta. Durante el sueño se producen ciclos que duran unos 90 minutos. (Docència & Barcelona, 2014)

### 2.2.5.5 Electroencefalograma

---

Se define Electroencefalografía como el registro gráfico de la actividad eléctrica cerebral, obtenido dicho registro en el cuero cabelludo mediante la colocación de electrodos de superficies e impresos en un papel en movimiento, por medio del electroencefalógrafo cuando se trata de un aparato convencional o en un monitor cuando se trata de un aparato computarizado o digita.

Entonces, cabe mencionar que un grafo elemento a la actividad eléctrica cerebral registrada a través del electroencefalógrafo, la sucesión de los grafoelementos y el conjunto de actividad registrada en diferentes canales dan origen a un electroencefalograma.

Las ondas en el EEG se clasifican de acuerdo a su frecuencia (se refiere al número de veces que una onda se repite en un segundo) en cuatro bandas: delta, theta, alfa y beta; que tienen características de amplitud y morfología (onda aguda, punta, complejos punta-onda lenta y/0 onda aguda – onda lenta). (Martinez Barros & Trout Guardiola , 2006)

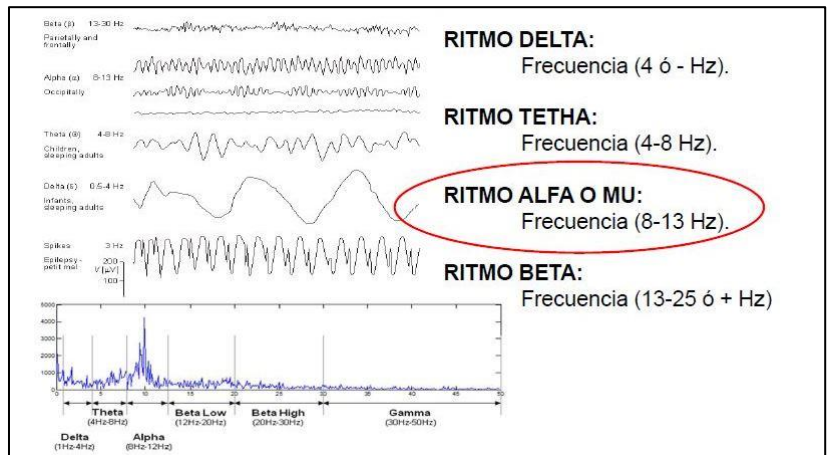
Tabla 3. Tipos de ondas cerebrales

<b>Banda Delta</b>	<b>Banda Theta</b>	<b>Banda Alfa</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>❖ Frecuencia: 0.1-4Hz.</li><li>❖ Amplitud: Variable, mayor a 50µV.</li><li>❖ Distribución: Propia de la infancia, niños menores de tres</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>❖ Frecuencia: 4– 7Hz.</li><li>❖ Distribución: Fronto-Central</li><li>❖ Voltaje: Mayor a 40µV, si es menor a 15µV puede ser</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>❖ Frecuencia: 8-12Hz</li><li>❖ Voltaje: de 15µV, el cual puede variar según: la edad, a mayor edad menor voltaje; según la</li></ul>

<p>meses, Fase III de sueño fisiológico, su apariencia en el adulto debe ser considerado anormal.</p>	<p>considerado anormal, pero si se encuentra acompañada de un ritmo Alfa bien establecido se considera normal.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Propia en niños entre 3 meses y 5 años; Fase I y II del sueño fisiológico; durante la hiperventilación y la fatiga.</li> </ul>	<p>distancia inter electrodos, cambios en la densidad ósea.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Regulación: Rítmica</li> <li>❖ Distribución: Occipital</li> <li>❖ Simetría: una asimetría mayor del 50% se considera anormal.</li> <li>❖ Reactividad: se bloquea con la apertura palpebral y concentración.</li> </ul>
---	--	---

(Martinez Barros & Trout Guardiola , 2006)

Figura 8. Ritmos de la onda cerebral.



( Roman Gonzalez)

Para leer las señales tradicionalmente los electrodos se colocan según la figura.

Figura 9. Posicionamiento de electrodos



(Cordoba Villar & Perez Oviedo )

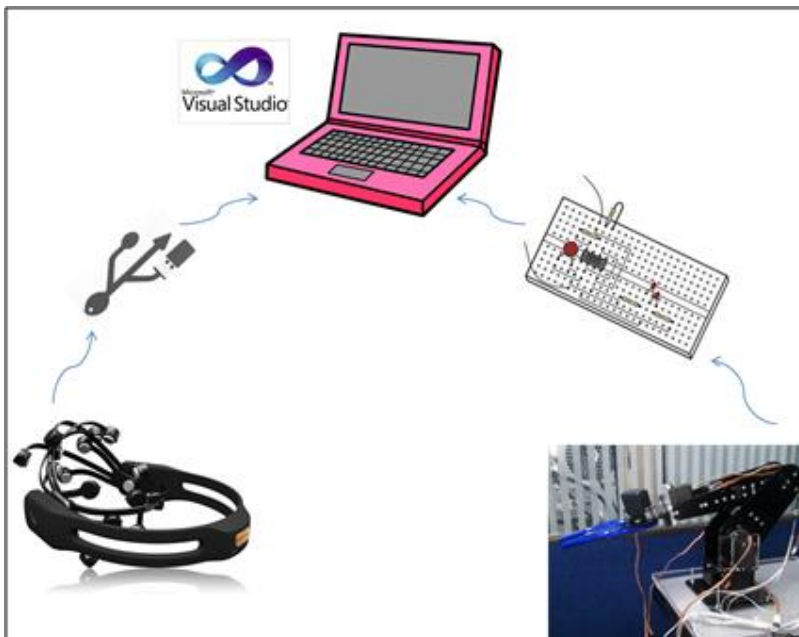
### 3. DISEÑO METODOLÓGICO

---

En este capítulo se describe cuatro etapas de desarrollo del proyecto, en las que se muestra paso a paso como se obtuvo el resultado final.

La solución que fue desarrollada para la problemática mencionada con anterioridad, consta de un manipulador de 5DOF proporcionado por el grupo GAV de la Universidad Militar Nueva Granada, un acondicionamiento electrónico para comunicar el manipulador con el computador, en donde el procesamiento de las señales emitidas por los actuadores se lleva a cabo en la tarjeta STM32F4DISCOVERY y finalmente el auricular neuronal EMOTIV EPOCH™, de conexión USB. La coordinación del funcionamiento total se realiza con una interfaz de usuario elaborada en el entorno de Microsoft Visual Studio C++.

Figura 10. Esquema general del proyecto parte física



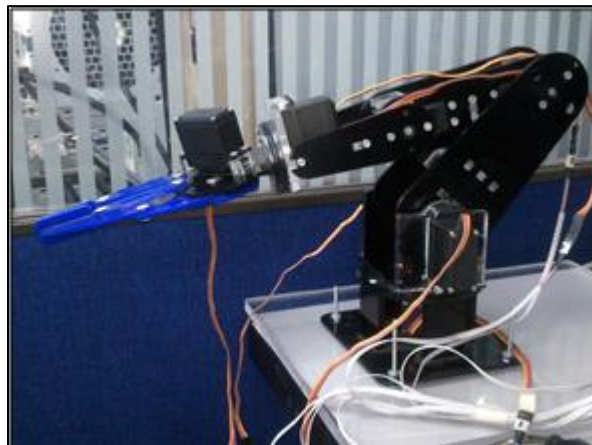
### 3.1 MANIPULADOR DE CINCO GRADOS DE LIBERTAD

---

El manipulador que se va a utilizar cuenta con cinco articulaciones rotacionales y una pinza de dos dedos, por lo tanto se puede decir que su configuración es angular o antropomórfica, este manipulador está hecho en acrílico en su mayoría de medio centímetro de espesor, lo que permite deducir que su capacidad de carga es baja.

Además, los actuadores ubicados en el centro de rotación de cada una de las articulaciones son servomotores metálicos de fuerza de 10kg y velocidad aproximada de 0,10 sec/60°.

Figura 11. Manipulador de 5DOF

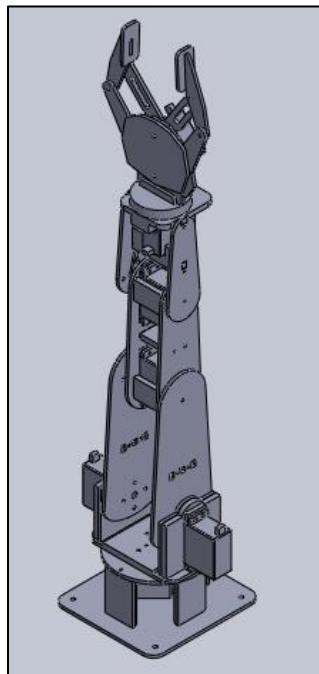


Para efectos de darle diversidad a la interfaz gráfica, y de esta forma que el usuario pueda cambiar el tipo de brazo robótico, se agrega el análisis de un manipulador de 4DOF, de iguales características que el anterior y que es igualmente facilitado por el grupo GAV. Por tanto se podrá comparar como

afecta el análisis de cinemática inversa por iteraciones en contraste con el análisis geométrico.

Para su manipulación virtual se utilizan las piezas creadas en SolidWorks a escala real por el grupo GAV y son posicionadas para que se pueda ubicar el punto de inicio del manipulador, cabe mencionar que tuvieron que ser adicionados los centros de rotación de las piezas y un nuevo sistema de coordenadas que se encuentra en el eje de rotación de cada una de las piezas.

Figura 12. Manipulador de 5DOF en SolidWorks



Después de separar cada una de las piezas se exportan en archivo VRML y son abiertas en el programa Deep Exploration para que sea generado un archivo .cpp que será el que contendrá las matrices que serán usadas en el entorno virtual más adelante.



---

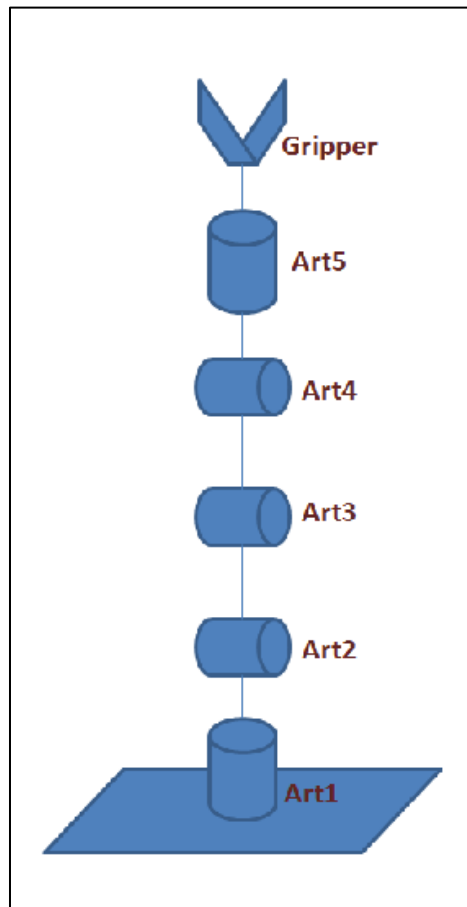
### 3.1.1 Movimientos y restricciones del manipulador

---

Como fue mencionado anteriormente los actuadores son servomotores que por ende giran solo  $180^\circ$  sin embargo hay que tener en cuenta las restricciones de construcción para que puedan ser analizada su cinemática.

Por tanto, en la siguiente figura se presenta el esquemático del manipulador con la correspondiente nomenclatura que será empleada en todo el documento.

Figura 13. Esquema de manipulador de 5DOF, nomenclatura



Todas las articulaciones giran en torno a su eje contra las manecillas del reloj, como se muestra en la siguiente figura.

Figura 14. Giro de cada articulación 5DOF

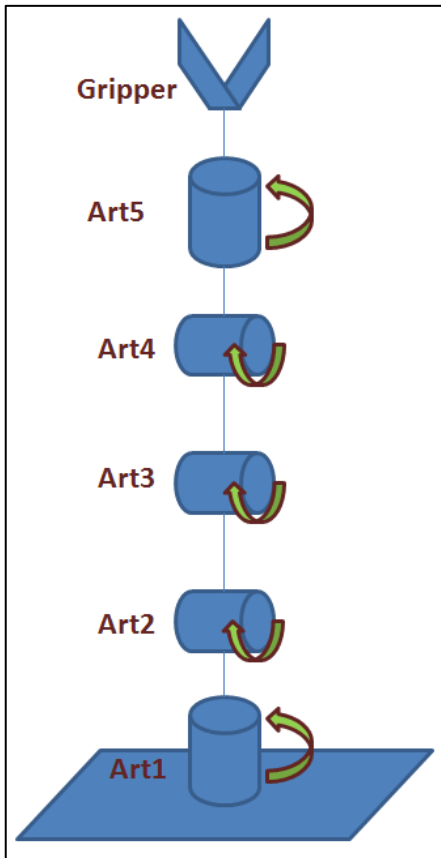
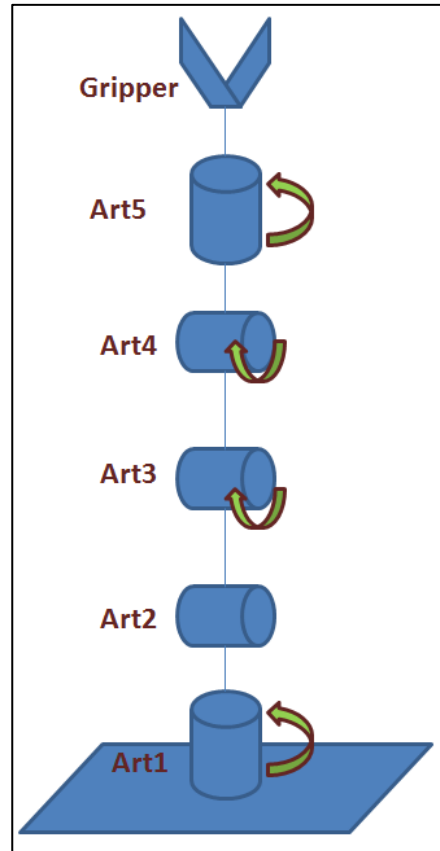


Figura 15. Giro de cada articulación 4DOF



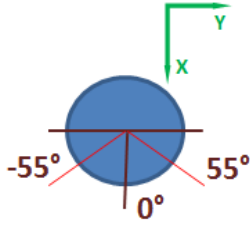
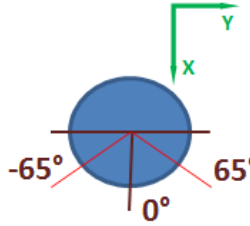
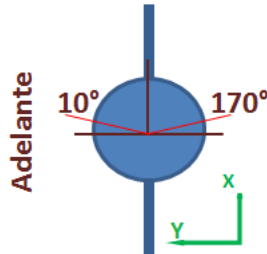
Sin embargo la articulación no mueve espacialmente los 180 grados del servo, pues está limitada por la arquitectura del robot y por la posición en la que fueron acoplados los motores. Entonces en la siguiente tabla se resumen las restricciones de movimiento de cada miembro.

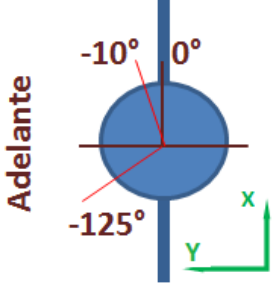
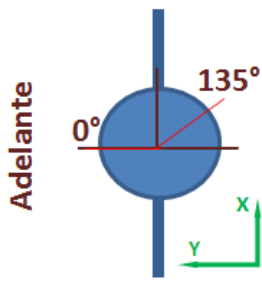
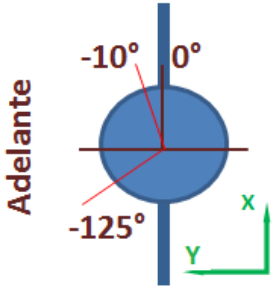
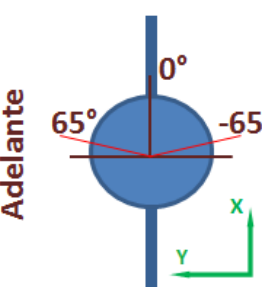
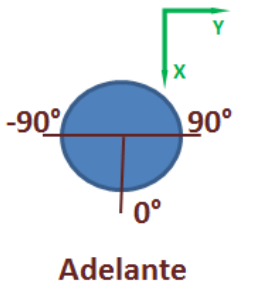
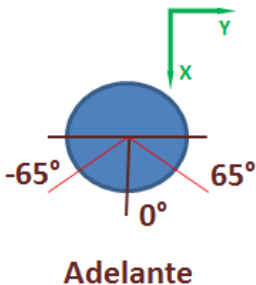
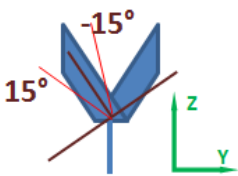
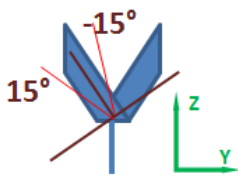
Tabla 4. Restricciones de cada articulación.

Articulaciones	Máximo		Mínimo	
	5DOF	4DOF	5DOF	4DOF
1	55°	65°	-55°	-65°
2	170°	N/A	10°	N/A
3	-10°	135°	-125°	0°
4	-10°	65°	-125°	-65°
5	90°	65°	-90°	-65°
Gripper	15°	15°	-15°	-15°

Específicamente en el plano cartesiano cada articulación se ve así:

Tabla 5. Restricciones de cada articulación en el plano cartesiano local.

	5DOF	4DOF
Art. 1	 <p>Adelante</p>	 <p>Adelante</p>
Art. 2	 <p>Adelante</p>	N/A

Art. 3		
Art. 4		
Art. 5		
Gripper		

### 3.2 ANÁLISIS DE TRAYECTORIA

Para el análisis de trayectoria se tienen en cuenta el análisis de Denavit-Hartenberg para generar las matrices homogéneas del modelo y de esta

forma poder calcular la cinemática directa del modelo que nos indique la posición del efector final a partir de las ángulos de cada una de las articulaciones.

Además de eso se requirió calcular la cinemática inversa para que a partir de las coordenadas ingresadas por el usuario se conozcan los ángulos de las articulaciones y la correspondiente trayectoria.

---

### 3.2.1 Representación esquemática y análisis de Denavit-Hartenberg

---

De acuerdo con los pasos para Denavit-Hartenberg, se obtienen el siguiente esquema que permitirá calcular los parámetros de cada articulación.

Figura 16. Diagrama de Denavit-Hartenberg para manipulador de 5DOF

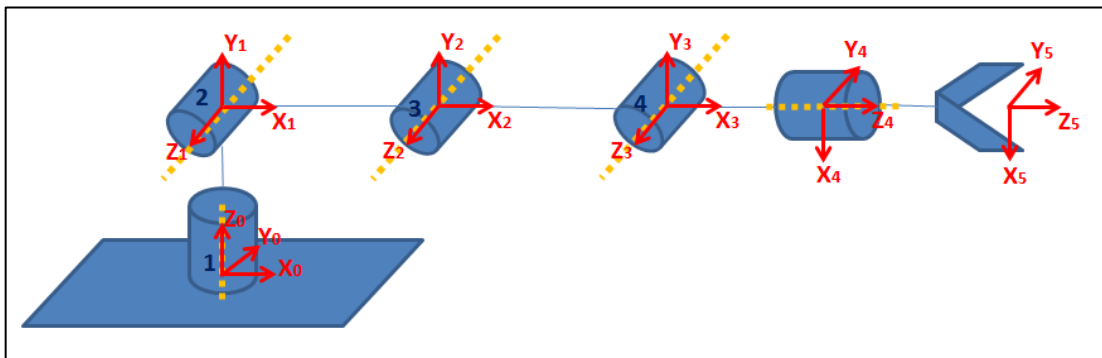
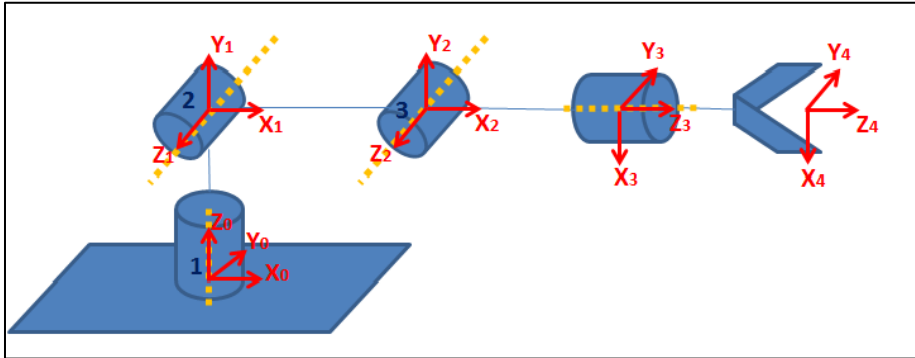


Figura 17. Diagrama de Denavit-Hartenberg para manipulador de 4DOF



En consecuencia, los parámetros para cada articulación están relacionados en la siguiente tabla.

Tabla 6. Parámetros de cada articulación para manipulador de 5DOF

	$\theta$	D	A	A
<b>Art1</b>	$\theta_1$	$d_1$	0	$\pi/2$
<b>Art2</b>	$\theta_2$	0	$a_2$	0
<b>Art3</b>	$\theta_3$	0	$a_3$	0
<b>Art4</b>	$\theta_4 - \pi/2$	0	0	$-\pi/2$
<b>Art5</b>	$\theta_5$	$d_5$	0	0

Tabla 7. Parámetros de cada articulación para manipulador de 4DOF

	$\theta$	D	A	A
<b>Art1</b>	$\theta_1$	$d_1$	0	$\pi/2$
<b>Art2</b>	$\theta_2$	0	$a_2$	0
<b>Art3</b>	$\theta_3 - \pi/2$	0	0	$-\pi/2$
<b>Art4</b>	$\theta_4$	$d_4$	0	0

El cálculo de las constantes se realiza por medio de cotas en los planos proporcionados.

Tabla 8. Constantes de manipuladores de 5DOF y 4DOF

5DOF	4DOF
$d_1 = 91mm$	$d_1 = 150mm$
$a_2 = 119,5mm$	$a_2 = 100mm$
$a_3 = 97,4mm$	$a_3 = 92mm$
$a_4 = 128,95mm$	$a_4 = 116mm$
$a_5 = 113,239mm$	$d_4 = a_4 + a_5$
$d_5 = a_4 + a_5$	

### 3.2.2 Matrices homogéneas

La matriz homogénea de cada una de las articulaciones está dada por la ecuación ( 1 ), de acuerdo a lo anterior son presentadas las matrices.

$$A_{01} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1) & 0 & \sin(\theta_1) & 0 \\ \sin(\theta_1) & 0 & -\cos(\theta_1) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 91 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$A_{12} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_2) & -\sin(\theta_2) & 0 & 119.35\cos(\theta_2) \\ \sin(\theta_2) & \cos(\theta_2) & 0 & 119.35\sin(\theta_2) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$A_{23} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_3 - 1.57) & -\sin(\theta_3 - 1.57) & 0 & 97.4\cos(\theta_3 - 1.57) \\ \sin(\theta_3 - 1.57) & \cos(\theta_3 - 1.57) & 0 & 97.4\sin(\theta_3 - 1.57) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$A_{34} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_4) & 0 & -\sin(\theta_4) & 0 \\ \sin(\theta_4) & 0 & \cos(\theta_4) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 242.18 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$A_{45} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_5) & -\sin(\theta_5) & 0 & 0 \\ \sin(\theta_5) & \cos(\theta_5) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 242.189 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

En el caso de un manipulador de 4DOF las matrices son las siguientes.

$$A_{01} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1) & 0 & \sin(\theta_1) & 0 \\ \sin(\theta_1) & 0 & -\cos(\theta_1) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 150 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$A_{12} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_2) & -\sin(\theta_2) & 0 & 100\cos(\theta_2) \\ \sin(\theta_2) & \cos(\theta_2) & 0 & 100\sin(\theta_2) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$A_{23} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_3 - 1.57) & 0 & -\sin(\theta_3 - 1.57) & 0 \\ \sin(\theta_3 - 1.57) & 0 & \cos(\theta_3 - 1.57) & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$



$$A_{34} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_4) & -\sin(\theta_4) & 0 & 0 \\ \sin(\theta_4) & \cos(\theta_4) & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 258 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

---

### 3.2.3 Cinemática directa para manipulador de 5DOF

---

Para el análisis de la cinemática directa se parte del hecho de que las matrices homogéneas fueran calculadas anteriormente, estas matrices son multiplicadas por parejas así: la matriz uno con la matriz dos, luego el resultado de ellas producto con la matriz tres y así sucesivamente hasta llegar a la matriz n, lo anterior se puede evidenciar en la ecuación ( 2 ) y en este caso la matriz resultante del movimiento de la herramienta en el eje de coordenadas de la base es:

$$T = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & r_{14} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & r_{24} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & r_{34} \\ r_{41} & r_{42} & r_{43} & r_{44} \end{bmatrix} \quad (14)$$

Donde,

$$r_{11} = c_5(s(\theta_4 + 1.571)(c_{31}s_2) + s_3c_{12}) + \cos(\theta_4 + 1.571) (s_3(c_1s_2) - c_3(c_{12})) - s_{51}(s_3(c_1s_2) - c_3(c_{12})) \quad (15)$$

$$\begin{aligned}
r_{12} = c_5 & \left( s(\theta_4 + 1.571)(s_3(c_2s_1) - c_3(-s_{12})) \right. \\
& \left. - c(\theta_4 + 1.571)(c_3(c_2s_1) + s_3(-s_{12})) + s_5(c_1 + c_2s_1) \right. \\
& \left. + s_3(s_{12}) \right) \quad (16)
\end{aligned}$$

$$r_{13} = c_5(s(\theta_4 + 1.571)(c_{23} - s_{23})) + (c(\theta_4 + 1.571)(c_2s_3 + c_3s_2)) \quad (17)$$

$$r_{14} = 0 \quad (18)$$

$$\begin{aligned}
r_{21} = -c_5 & \left( s_1 - c_3(c_{12}) \right) - s_5(s(\theta_4 + 1.571)(c_3(c_1s_2) + s_3(c_{12})) \\
& + c(\theta_4 + 1.571)(s_3(c_1s_2) - c_3(c_{12} -))) \quad (19)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
r_{22} = c_{51} - s_5 & \left( s(\theta_4 + 1.571)(s_3(-c_3(-s_{12})) \right. \\
& \left. - c(\theta_4 + 1.571)(c_3(c_2s_1) + s_3(-s_{12})) \right) \quad (20)
\end{aligned}$$

$$r_{23} = -s_5(s(\theta_4 + 1.571)(c_{23} - s_{23})) + c(\theta_4 + 1.571)(c_2s_3 + c_3s_2) \quad (21)$$

$$r_{24} = 0 \quad (22)$$

$$\begin{aligned}
r_{31} = s(\theta_4 + 1.571) & \left( s_3(c_1s_2) - c_3(c_{12}) \right) - \cos(\theta_4 + 1.571) (c_3(c_1s_2) \\
& + s_3(c_{12} -)) \quad (23)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
r_{32} = -s(\theta_4 + 1.571) & \left( c_3(c_2s_1) + s_3(-s_{12}) \right) - c(\theta_4 + 1.571)(s_3(c_2s_1) \\
& - c_3(-s_{12})) \quad (24)
\end{aligned}$$

$$r_{33} = s(\theta_4 + 1.571)(c_2s_3 + c_3s_2) - c(\theta_4 + 1.571)(c_{23} - s_{23}) \quad (25)$$

$$r_{34} = 0 \quad (26)$$

$$\begin{aligned} r_{41} = & 97.4s_3(c_1s_2) - 119.35c_{12} - 97.4c_3(c_{12}) \\ & + 242.18(\theta_4 + 1.571)(s_3(c_1s_2) - c_3(c_{12})) \\ & - 242.18c(\theta_4 + 1.571)(c - 3(c_1s_2) + s_3(c_{12})) \end{aligned} \quad (27)$$

$$\begin{aligned} r_{42} = & -97.4c_3(c_2s_1) - 119.35c_2s_1 \\ & - 242.18s(\theta_4 + 1.571)(c_3(c_2s_1) + s_3(-s_{12})) \\ & - 97.4s_3(-s_{12}) \\ & - 242.189c(\theta_4 + 1.571)(s_3(c_2s_1) - c_3(-s_{12})) \end{aligned} \quad (28)$$

$$\begin{aligned} r_{43} = & 119.35s_2 - 97.4c_2s_3 + 97.4c_3s_2 \\ & - 242.189c(\theta_4 + 1.571)(c_{23} - s_{23}) \\ & + 242.189s(\theta_4 + 1.571)(c_2s_3 + c_3s_2) + 91 \end{aligned} \quad (29)$$

$$r_{44} = 1 \quad (30)$$

De esta forma la matriz solo requiere de los valores de  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ ,  $\theta_3$ ,  $\theta_4$  y  $\theta_5$  y de esta manera las posiciones  $r_{14}$ ,  $r_{21}$ ,  $r_{31}$  corresponden a la ubicación del efector final en X, Y y Z respectivamente, que es finalmente lo que es importante para este desarrollo, sin embargo si se requieren determinar parámetros más específicos de orientación del manipulador estarán contenidos en el resto de los datos de la matriz final.

---

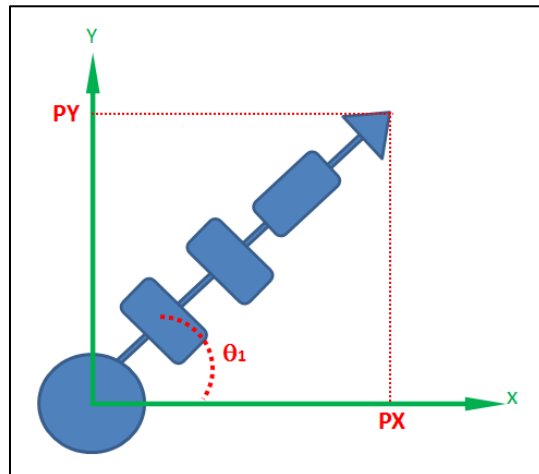
### 3.2.4 Cinemática inversa para manipulador de 5DOF

---

Para la cinemática inversa se realiza el análisis geométrico de los ángulos de las articulaciones y se calcula el ángulo de cabeceo por medio de iteraciones teniendo en cuenta las restricciones del manipulador. Es importante tener en cuenta que debe ser suministrada la posición final del efector final para poder realizar los cálculos correspondientes.

En primer lugar se calcula  $\theta_1$  en el plano XY.

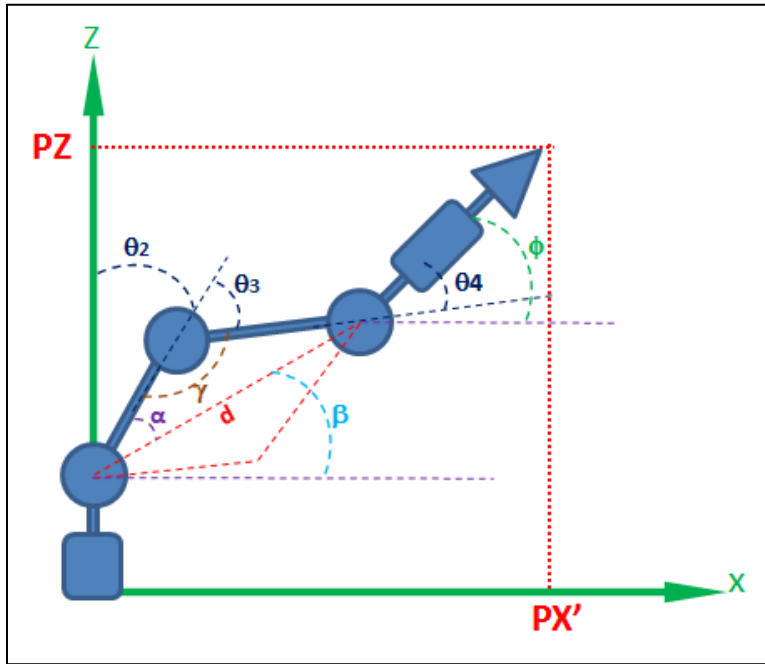
Figura 18. Análisis geométrico de manipulador Plano XY



$$\theta_1 = \text{atan2}(PY, PX) \quad (31)$$

Seguido de ellos, se calculan los demás ángulos en el plano YZ.

Figura 19. Análisis geométrico de manipulador plano YZ



$$PX' = \sqrt{PY^2 + PX^2} \quad (32)$$

$$\phi = \theta_2 + \theta_3 + \theta_4 \quad (33)$$

$$w_x = PX' - a_4 \cos(\phi) \quad (34)$$

$$w_z = (PZ - a_1) - a_4 \sin(\phi) \quad (35)$$

$$d = \sqrt{w_z^2 + w_x^2} \quad (36)$$

$$d^2 = a_2^2 + a_3^2 - 2a_2a_3 \cos(180^\circ - \theta_3) \quad (37)$$

$$\cos(\theta_3) = \frac{d^2 - a_2^2 - a_3^2}{2a_2a_3} \quad (38)$$

$$\text{sen}(\theta_3) = \sqrt{1 - (\cos(\theta_3))^2} \quad (39)$$

$$\theta_3 = \text{atan2}(\text{sen}(\theta_3), \cos(\theta_3)) \quad (40)$$

$$a_3^2 = d^2 + a_2^2 - 2a_2d\cos(\alpha) \quad (41)$$

$$\cos(\alpha) = \frac{d^2 + a_2^2 - a_3^2}{2a_2d} \quad (42)$$

$$\text{sen}(\alpha) = \sqrt{1 - (\cos(\alpha))^2} \quad (43)$$

$$\alpha = \text{atan2}(\text{sen}(\alpha), \cos(\alpha)) \quad (44)$$

$$\beta = \text{atan2}(w_z, w_x) \quad (45)$$

$$\theta_2 = \frac{\pi}{2} - \beta + \alpha \rightarrow \text{Codo Abajo} \quad (46)$$

$$\theta_2 = \frac{\pi}{2} - \beta - \alpha \rightarrow \text{Codo Arriba} \quad (47)$$

$$\theta_4 = \phi - \theta_2 - \theta_3 \quad (48)$$

Finalmente el ángulo de  $\theta_5$  es ingresado por el usuario y  $\phi$  es calculado por iteraciones.

---

### 3.2.5 Generación de trayectoria

---

La generación de trayectoria se realiza de la siguiente forma:

- ❖ Es conocida la posición inicial del manipulador.
- ❖ El usuario por medio de gestos (Modulo expresivo) o imaginaria (Modulo cognitivo), aumento o disminuye la posición (X, Y, Z) del manipulador y la orientación del efector así como la apertura o cierre (A+, A-, GripperON, GripperOFF respectivamente). Este delta es adicionado a la posición actual, y este nuevo punto se conoce como la referencia.
- ❖ Se calcula en repetidas ocasiones la cinemática inversa variando la posición del codo y el ángulo de cabeceo y por medio de la cinemática directa se determina que tan distante está el resultado del método de la referencia, esto se realiza hasta encontrar los ángulos de las articulaciones que cumplan con las restricciones físicas del sistema y que se aproximen al punto final.
- ❖ Es determinado el error.
- ❖ Se envían los datos al manipulador y/o entorno virtual en donde se aprecian los movimientos del mismo.
- ❖ Si no es encontrada la solución el manipulador regresa a su condición inicial.

### 3.3 DISEÑO FÍSICO

---

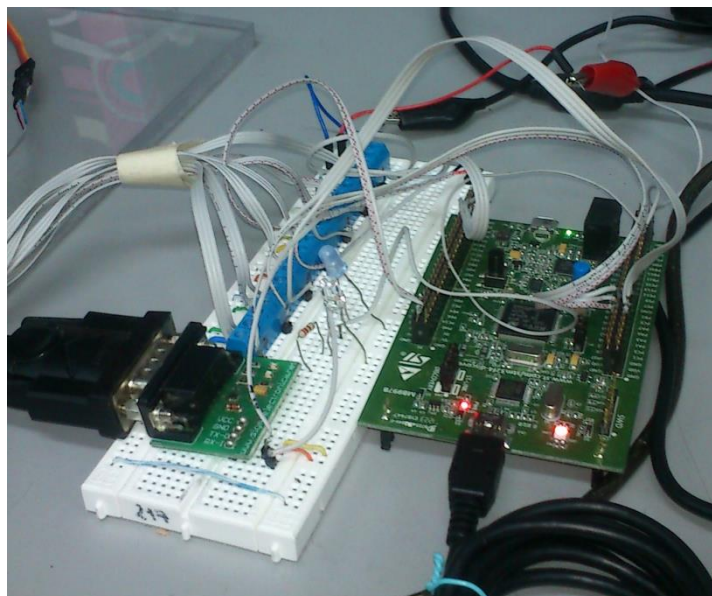
Este diseño permitió realizar la conexión entre los servomotores y el computador. Para lo que se destacan dos partes fundamentales, que son el procesamiento de las señales en la tarjeta STM32F4DISCOVERY y su correspondiente transmisión serial.

#### 3.3.1 Acondicionamiento electrónico

---

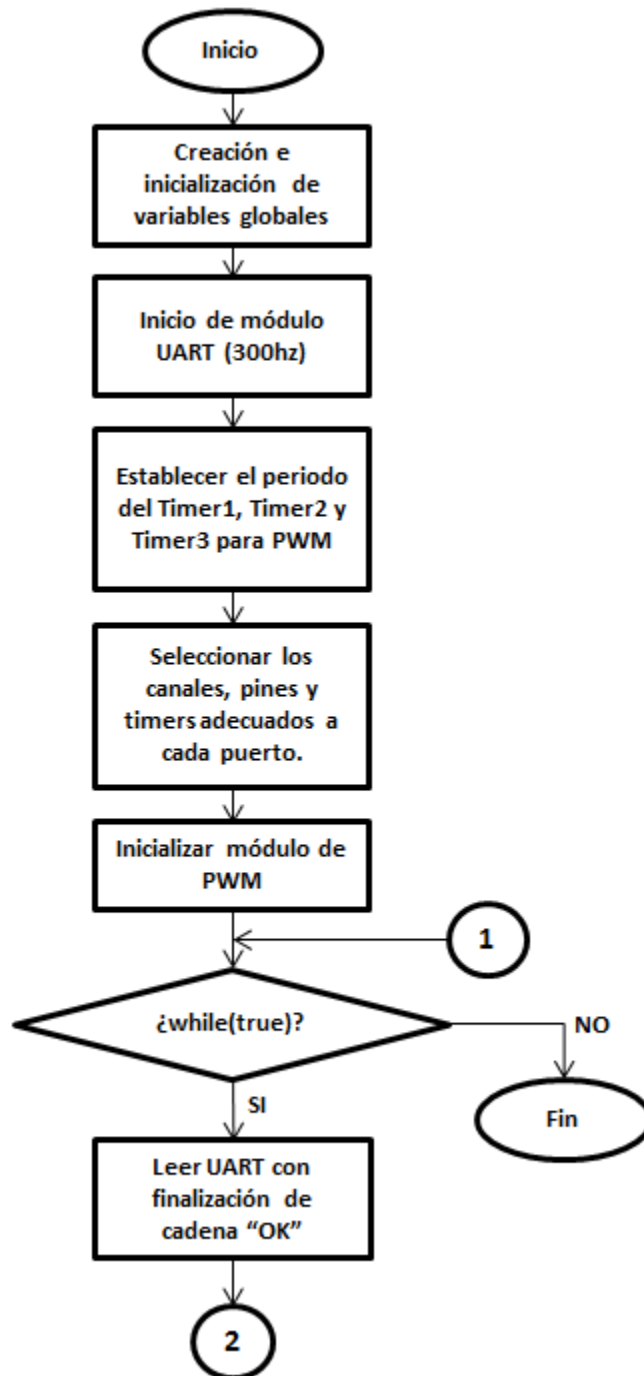
Se determinó que la tarjeta STM32F4DISCOVERY cumple con los requisitos mínimos para el funcionamiento de este proyecto, que son: 7 canales para PWM y transmisión de TX/RX serial.

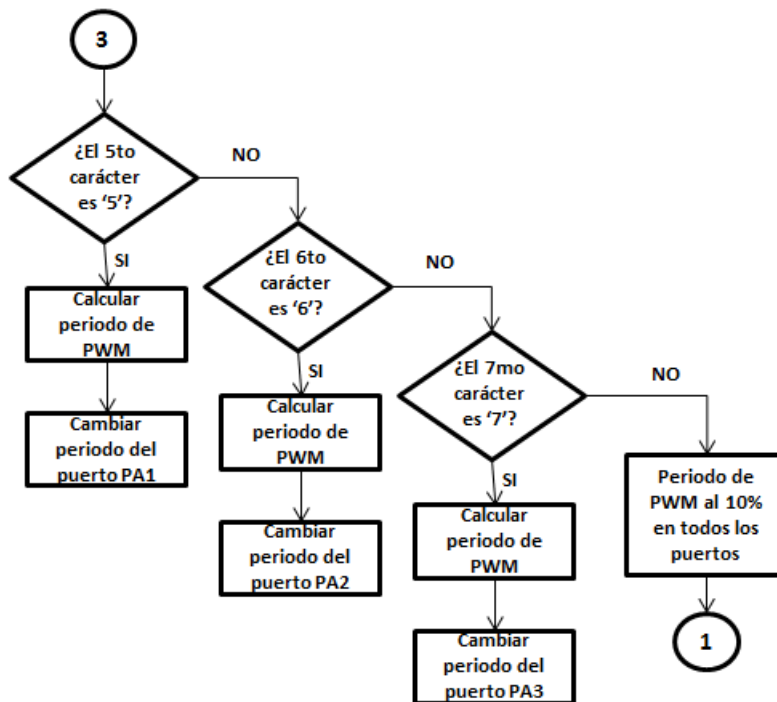
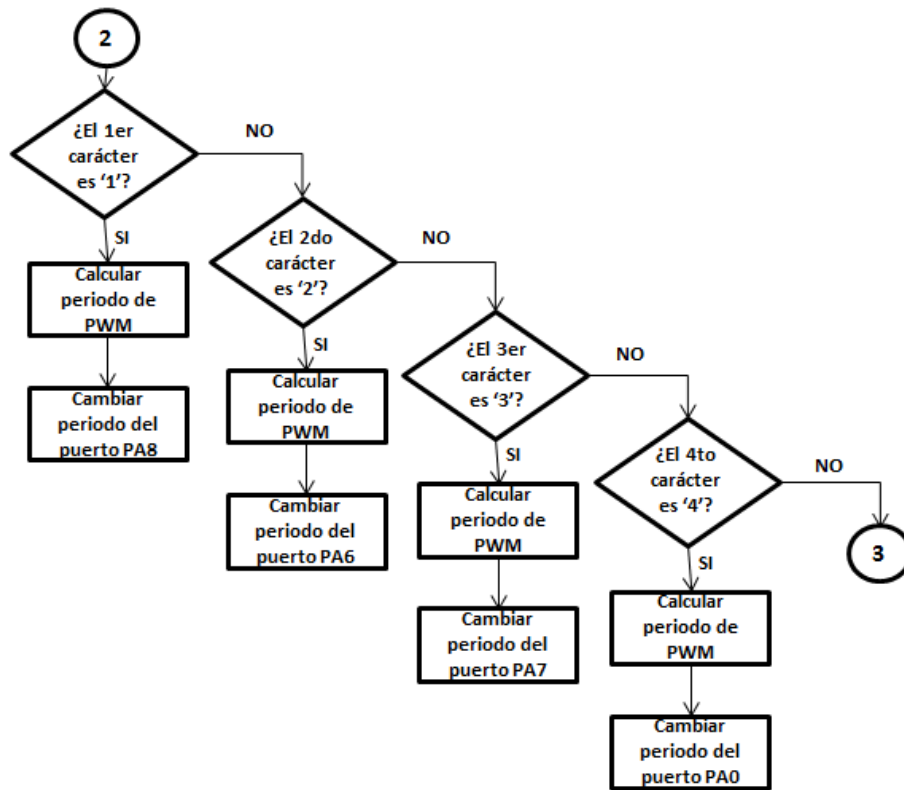
Figura 20. Circuito General de Manipulador de 5DOF





Para la programación de dicha tarjeta se realizó un programa en el entorno de MikroC PRO for ARM, el siguiente diagrama de flujo muestra el curso del programa:





De acuerdo a las tablas de configuración del módulo de PWM ubicadas en el marco teórico, en la siguiente tabla se determina la configuración para cada uno de los canales.

Tabla 9. Configuración de módulo de PWM

PWM	TIMER	CANAL	PUERTO	ARTICULACIÓN
1	1	1	PA8	GRIPPER
2	3	1	PA6	5
3	3	2	PA7	4
4	2	1	PA0	3
5	2	2	PA1	2
6	2	3	PA2	2
7	2	4	PA3	1

Una vez que el módulo está configurado e inicializado solo hay que cambiar el periodo de tiempo de cada PWM, para lo cual se establecen porcentajes entre 0 y 100 para que este oscile. Sin embargo se deben tener presentes las restricciones de movimiento de cada uno de los servos y de esta forma establecer los códigos, estos rangos son obtenidos por calibración manual.

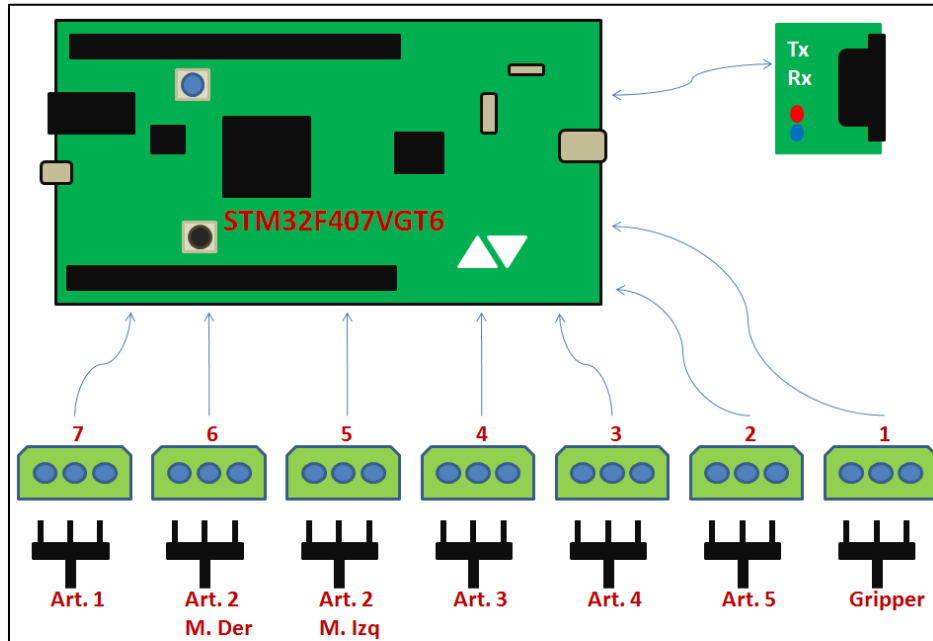
Tabla 10. Códigos para PWM

Art.	5DOF				4DOF			
	Máximo		Mínimo		Máximo		Mínimo	
	Grados	Código	Grados	Código	Grados	Código	Grados	Código
1	55°	776	-55°	728	65°	280	-65°	230
2	170°	580	10°	510	N/A	N/A	N/A	N/A
3	-10°	440	-125°	492	135°	330	0°	380
4	-10°	364	-125°	319	65°	580	-65°	530
5	90°	287	-90°	217	65°	480	-65°	430
Gripper	15°	170	-15°	150	15°	780	-15°	765

Finalmente cuando se genera el pulso para mover los servos, estos son alimentados con una fuente independiente de 5V a 6V que tiene que tener capacidad como mínimo de 2A, para que el brazo responda adecuadamente a los comandos enviados por el controlador.

Por último el diagrama general se puede ver en la siguiente figura.

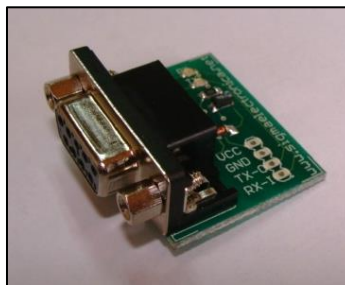
Figura 21. Diagrama general electrónico



### 3.3.2 Transmisión serial

Para la transmisión serial se utiliza una tarjeta RS232 que es un circuito de conversión serial. Convierte niveles RS232 a TTL (UART) y viceversa (TX y RX).

Figura 22. Tarjeta RS232

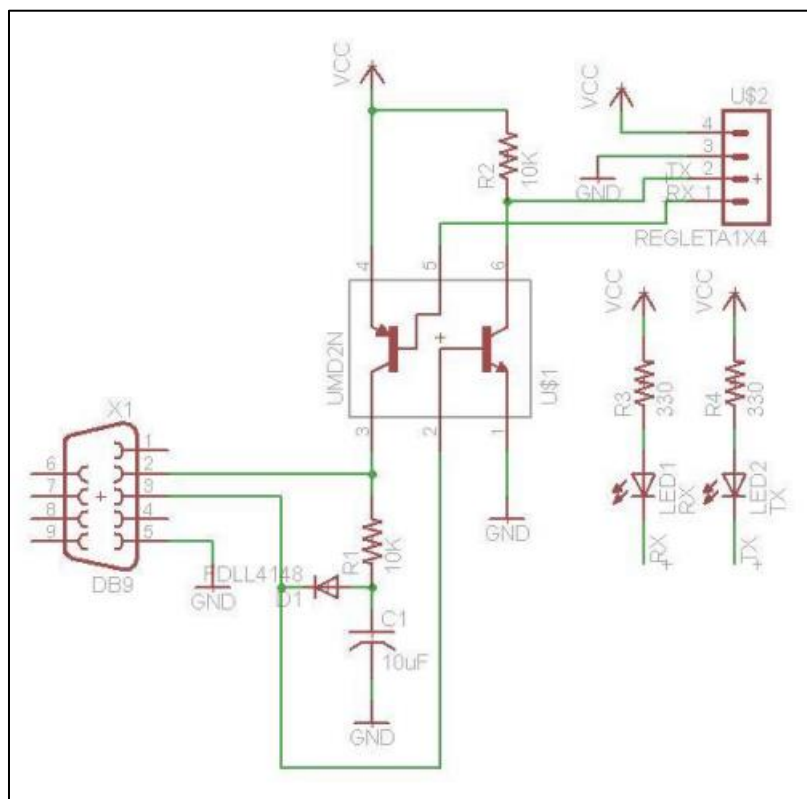


(Sigma Electronica , 2014)

Puede trabajar a cualquier voltaje, si la tarjeta se alimenta a 5V la conversión será RS232 a 5V, si la tarjeta se alimenta a 3.3V la conversión será RS232 a 3.3V y trabaja entre 300 y 115200 baudios. Para este caso en especial es alimentada a 3.3V que provienen de la STM32F4DISCOVERY, para poder emplear el UART a 300Hz.

El circuito dentro de la tarjeta está representado en la siguiente figura.

Figura 23. Circuito de tarjeta RS232



(Sigma Electronica , 2014)

### 3.4 INTERFAZ DE USUARIO

La interfaz de usuario permite a la persona que utilice el proyecto, manipular de forma clara y fácil cada una de las etapas del desarrollo desde un computador.

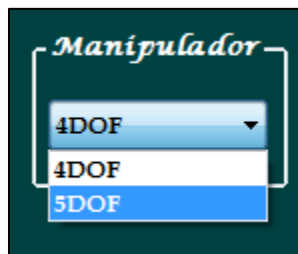
En adición, esta se realizó en Microsoft Visual Studio C++, cuenta con diferentes espacios de interacción con cada etapa del proyecto como son: la conexión serial, cálculo de cinemática inversa y directa tanto individual como conjunta entorno virtual donde se pueden simular los movimientos del manipulador y el desarrollo del Emotiv™.

Figura 24. Diagrama general de la interfaz de usuario



En esta aplicación se puede diferenciar si el usuario quiere trabajar con un manipulador de 4 grados de libertad o de 5 grados de libertad.

Figura 25. Tipos de manipulador



Además si se requiere el programa puede simular los movimientos del robot en el entorno virtual o hacerlo de forma real.

Figura 26. Módulo de trabajo en tiempo real.





---

### 3.4.1 Conexión serial de la interfaz

---

En este desarrollo se describen dos transmisiones seriales diferentes, la primera comunica por medio de puerto física a la tarjeta STM32F4Discovery y la interfaz de usuario y la segunda a recepción de datos del Emotiv™ con igualmente el programa de usuario.

Para la primera comunicación se debe configurar tanto emisor como receptor, para este caso ya fue configurada anteriormente la STM32F4Discovery y con los mismos parámetros de esta debe ser configurada la transmisión del puerto serial del programa de Visual C++.

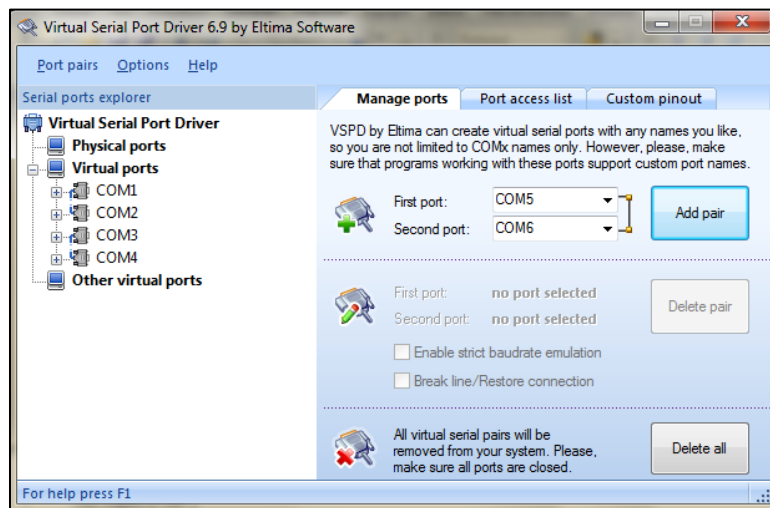
En consecuencia, el módulo de conexión a puerto serial le permite al usuario modificar dos parámetros importantes que son: el nombre del puerto identificado como COMx y la tasa de baudios. Además admite la conexión y desconexión de puertos para no afectar el funcionamiento del ordenador cuando se requiera comenzar la ejecución del proceso.

Figura 27. Puerto serial de interfaz



Por otro lado para la segunda comunicación se utilizan puertos virtuales que crean una conexión por medio del programa *Virtual Serial Port Driver 6.9*, este programa crea dos puertos que serán asociados a uno a emisor y otro a receptor e internamente se crea este vínculo.

Figura 28. Virtual Serial Port Driver 6.9



---

### 3.4.2 Implementación de cinemática inversa y directa

---

Como fue descrito en capítulos anteriores y según las ecuaciones mencionadas es elaborado este módulo que permite el cálculo del ángulo de cada articulación partiendo de las coordenadas X, Y y Z que son ingresadas manualmente en número o moviendo los Slider, sin embargo estos son modificados automáticamente por el programa cuando está siendo ejecutada la conexión con el sensor Emotiv™.

Además, pueden ser modificados el giro del gripper y la apertura de la pinza.

Figura 29. Módulo de cinemática inversa.

CINEMÁTICA INVERSA	
Posición Cartesiana	
X	358
Y	0
Z	150
Gripper (Giro)	0
Pinza	<input checked="" type="radio"/> Cerrado <input type="radio"/> Abierto
Codo	---
---	---
---	---
Ángulos	
Art. 1	0
Art. 2	0
Art. 3	0
Art. 4	0
Art. 5	0
Calcular Inversa	

Por otra parte, en el módulo de cinemática directa son ingresados los ángulos y el programa calcula la matriz de transformación homogénea y la correspondiente posición final del efector final. Al igual que en el caso anterior los parámetros de inicio son ingresados manual o automáticamente.

Figura 30. Módulo de cinemática directa

The interface is titled "CINEMÁTICA DIRECTA" and is divided into three tabs: "C. Directa", "C. Inversa", and "Entorno Virtual". The "C. Directa" tab is selected. The main content area is a dark teal box with white text and input fields. At the top, the title "CINEMÁTICA DIRECTA" is displayed. Below it, the "Posición Inicial" section contains four rows of input fields labeled "Art. 1", "Art. 2", "Art. 3", and "Art. 4", each with a value of "0". In the center, there is a 4x4 grid of input fields, all containing "0". Below the grid, the "Posición Final" section contains three input fields labeled "X", "Y", and "Z", each with a value of "0". At the bottom of the interface is a button labeled "Calcular Directa".

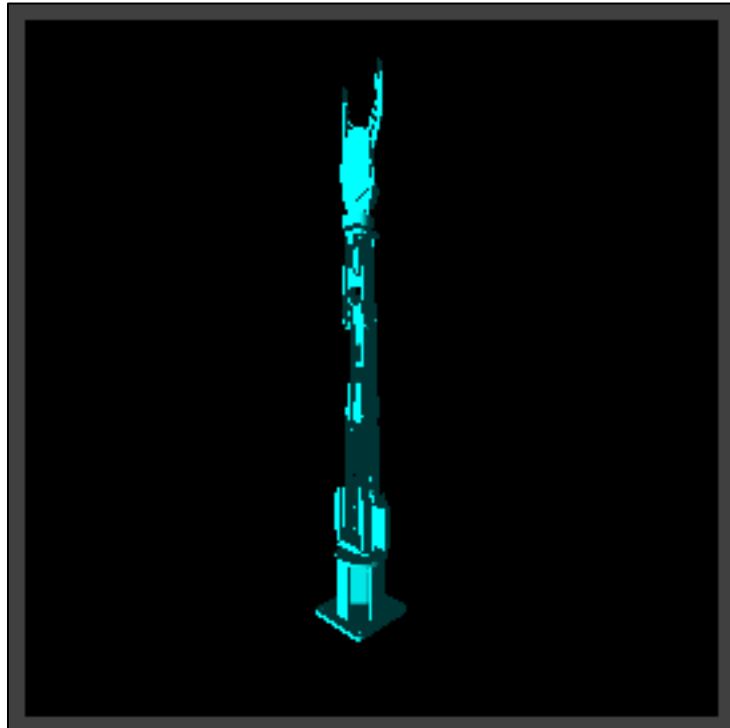
---

### 3.4.3 Entorno virtual

---

El entorno virtual es una ventana que contiene la representación a escala del manipulador para que el usuario verifique o pruebe con anterioridad los movimientos del manipulador.

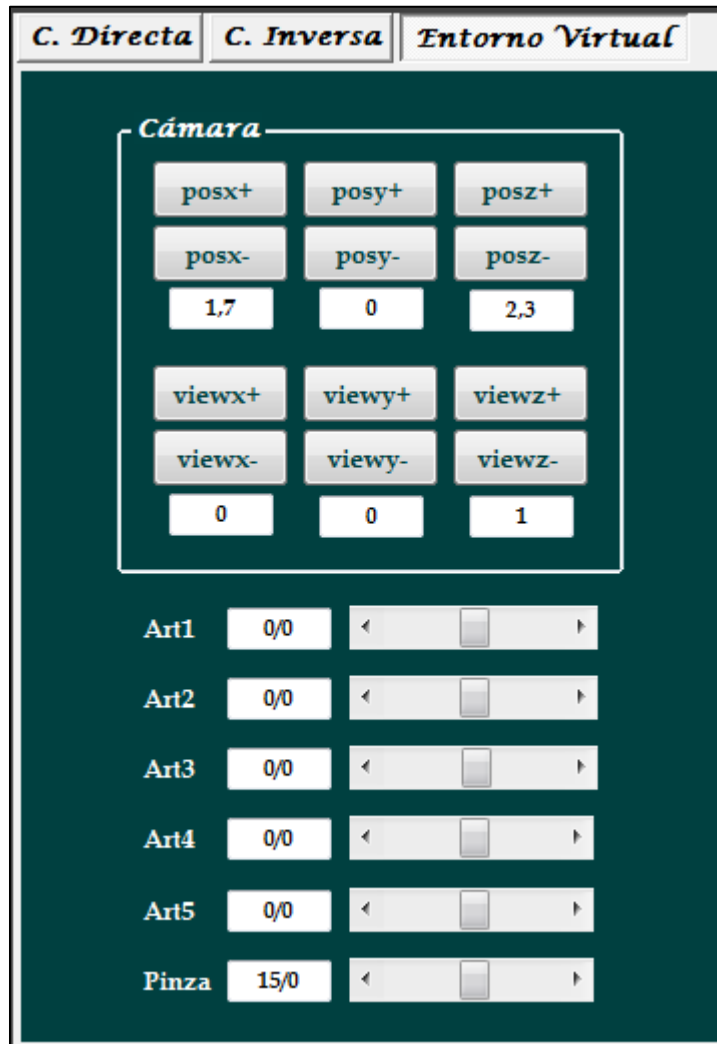
Figura 31. Entorno virtual manipulador de 5DOF.



Este entorno es creado en Visual C++ por medio de Windows Simple OpenGL, que recibe por parámetros para la gráfica de las piezas, un archivo .cpp generado por DeepExploration a partir del VRML de los CAD de las piezas.

Cuando es habilitado el modo pruebas del GUI, son modificados los parámetros de posición y cámara de la plataforma virtual, además pueden moverse las articulación del manipulador de manera independiente.

Figura 32. Modo Pruebas del entorno virtual.

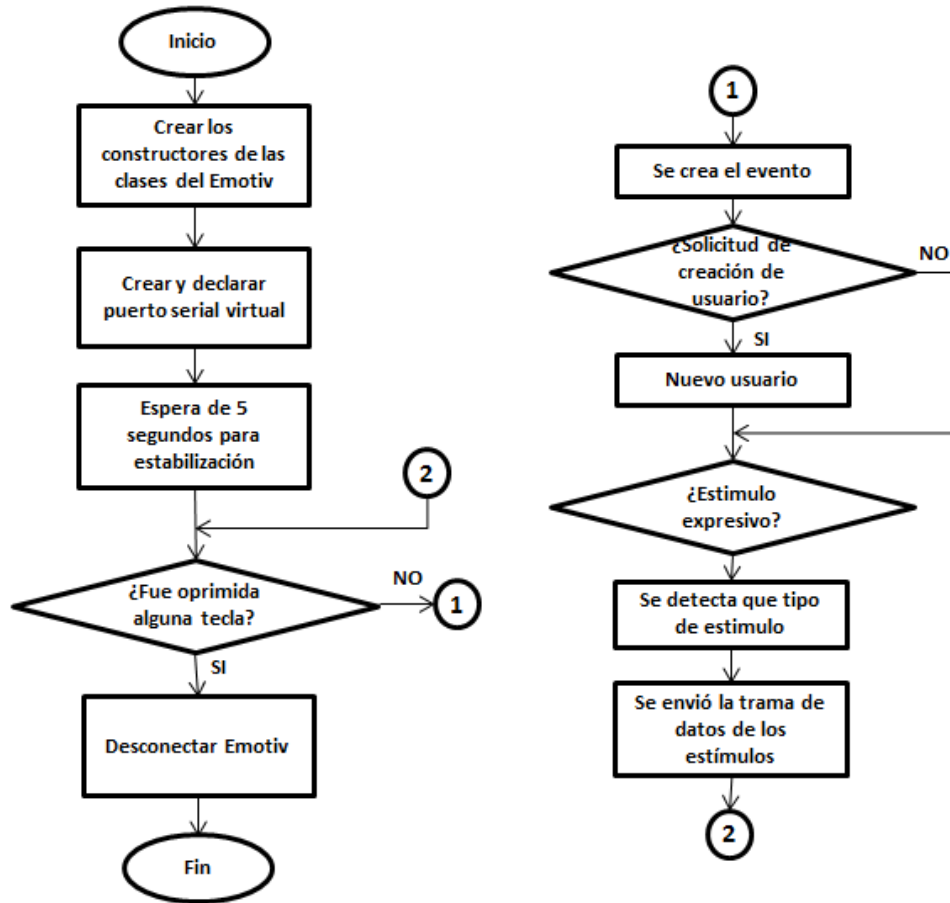


---

### 3.4.4 Procesamiento de señales del Emotiv™

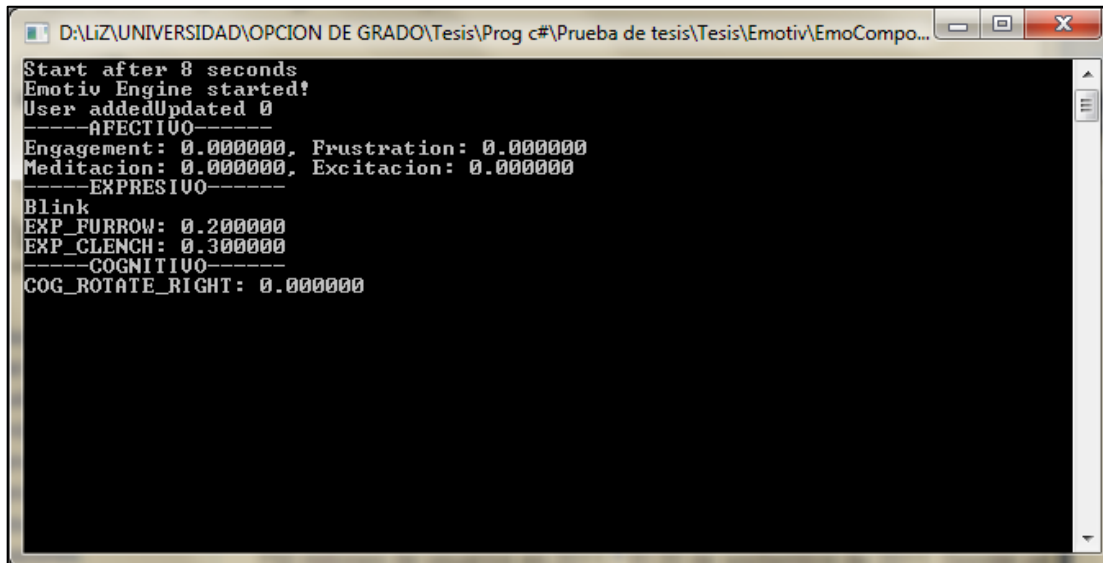
---

La interfaz de usuario es desarrollada en GUI mientras que la recepción e interpretación de los datos del Emotiv™ son procesados en Visual C++ consola. Y en el siguiente diagrama se muestra el flujo del programa creado para este fin.



Este programa identifica las señales de tipo afectivo, expresivo y cognitivo, sin embargo las que son usadas para este proyecto son las expresivas.

Figura 33. Programa Visual C++ Consola



Cuando los datos son capturados y procesados son enviados a la interfaz de usuario y las expresiones que fueron interpretadas de acuerdo a la siguiente tabla.

Tabla 11. Expresiones para movimiento de manipulador de 5DOF

Expresión Emotiv™	GUI	Descripción
Levantar las cejas	X+	Aumento positivo de la posición del efectos final en el eje X.
Fruncir el ceño	X-	Aumento negativo de la posición del efectos final en el eje X.
Boca a la derecha	Y+	Aumento positivo de la posición del efectos final en el eje Y.
Boca a la izquierda	Y-	Aumento negativo de la posición del efectos final en el eje Y.
Guiño a derecha	Z+	Aumento positivo de la posición del



		efectos final en el eje Z.
Guiño a izquierda	Z-	Aumento negativo de la posición del efectos final en el eje Z.
Risa	GG+	Aumento positivo del giro de la pinza.
Apretar boca	GG-	Aumento negativo del giro de la pinza.
Parpadear	POn	Pinza cerrada.

Por otra parte es la interpretación de las señales cognitivas tiene la equivalencia en el programa según la siguiente tabla:

Tabla 12. Estados cognitivos con respecto a las coordenadas.

Expresión Emotiv™	GUI	Descripción
Halar	X+	Aumento positivo de la posición del efectos final en el eje X.
Empujar	X-	Aumento negativo de la posición del efectos final en el eje X.
Derecha	Y+	Aumento positivo de la posición del efectos final en el eje Y.
Izquierda	Y-	Aumento negativo de la posición del efectos final en el eje Y.
Elevar	Z+	Aumento positivo de la posición del efectos final en el eje Z.
Bajar	Z-	Aumento negativo de la posición del efectos final en el eje Z.
Giro con las Manecillas del reloj	GG+	Aumento positivo del giro de la pinza.

Giro contra las Manecillas del reloj	GG-	Aumento negativo del giro de la pinza.
Desaparecer	POn	Pinza cerrada.

Esta interpretación se envía por COM virtual al programa en el cual se visualizan los módulos de acuerdo a las siguientes figuras,

Figura 34. Módulo Expresivo para manejo de manipulador.










<i>M. Cognitivo</i>		<i>M. Expresivo</i>			
			#	Entren.	
	Raise Brow	X+	<input type="checkbox"/>	0	
	Furrow Brow	X-	<input type="checkbox"/>	0	
	Smirk Right	Y+	<input type="checkbox"/>	0	
	Smirk Left	Y-	<input type="checkbox"/>	0	
	Wink Right	Z+	<input type="checkbox"/>	0	
	Wink Left	Z-	<input type="checkbox"/>	0	
	Laugh	A+	<input type="checkbox"/>	0	
	Clench	A-	<input type="checkbox"/>	0	
	Blink	Gripper	<input type="checkbox"/>	0	

Figura 35. Módulo o cognitivo para manipulador.

<i>M. Cognitivo</i>		<i>M. Expresivo</i>		#
				Entren.
	Pull	X+		0
	Push	X-		0
	Right	Y+		0
	Left	Y-		0
	Lift	Z+		0
	Drop	Z-		0
	Clockwise	A+		0
	Unclockwise	A-		0
	Disappear	Gripper		0

Pero para que los resultados sean apropiados se incluye el módulo de entrenamiento de cada una de las acciones del Emotiv™ que fueron utilizadas, este consiste en seleccionar por separado cada acción, y desde el momento en el que el usuario inicia el entrenamiento, debe pensar o realizar el gesto según sea el caso, durante 6 segundos, tiempo en el que el programa base envía los datos al SDK del Emotiv en el programa secundario, el cual es el encargado de agrupar los datos y procesarlos para ajustar los parámetros

de interpretación de las señales generadas por el Emotiv™, pues de acuerdo a las señales de cada usuario el comportamiento del programa será diferente.

Figura 36. Representación general de simulación Emotiv™ y entrenamiento.



Además el programa permite que el usuario pueda usar el auricular del Emotiv™ o su simulador "EmoComposer™".

Figura 37. Formas de Conexión Emotiv™.



## 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para el desarrollo del proyecto se realizan pruebas de ejecución de cálculo de cinemática inversa y directa de los manipuladores en dos plataformas diferentes. La primera es MATLAB, de la cual se evidencia que los procesos matemáticos se realizan de forma más sencilla en términos técnicos sin embargo el procesamiento de las señales del Emotiv™ y los diferentes procesos simultáneos que se requieren realizar no crean el efecto de manejo de tiempo real.

Figura 38. Interfaz de MATLAB para manipulador



Por lo tanto es descartada esta posibilidad una solución apropiada para la hipótesis por lo tanto se realiza el desarrollo en Microsoft Visual C++ que brinda la posibilidad de manejar “simultáneamente” diferentes procesos y da la sensación de trabajo en tiempo real, en la siguiente figura se muestra la interfaz lograda.



Sin embargo, la ingeniería actual exige que los proyectos desarrollados no solo sean funcionales sino que estén orientados a prestar un buen servicio, de fácil entendimiento para los usuarios por lo tanto se propone una distribución diferente de la interfaz en la que se incluyen funciones especiales.

Figura 39. Interfaz final del proyecto



## 4.1 SENSOR EMOTIV™

---

La interfaz permite que el usuario use el auricular del Emotiv™ y el EmoComposer™ que es el simulador y como es de esperarse la percepción de las señales por medio del simulador es precisa en comparación con el uso real ya que no se tienen en cuenta factores eventuales tales como:

- ❖ Contacto de los sensores con el cuero cabelludo.
- ❖ Diversidad del usuario.
- ❖ Concentración del usuario.

Por lo tanto el entrenamiento de cada una de las acciones no muestra grandes variaciones en el comportamiento del sistema.

Los módulos del sensor Emotiv™ son: el afectivo, expresivo y cognitivo, para esta aplicación se utilizó únicamente los dos últimos pues el afectivo solo presenta 4 estados y para la manipulación del sistema se requiere como mínimo 9 estados.

Con respecto a los estados que fueron usados de cada módulo se tuvo en cuenta la facilidad de operación del sistema. En referencia al módulo cognitivo, se asignan las acciones como reflejo del eje cartesiano lo que permite al usuario que con menor esfuerzo imagine los movimientos del manipulador. Por otra parte, para el modulo expresivo, las actividades de mayor frecuencia tales como desplazamientos en X, Y y Z, son controlados por el movimiento de cejas, boca y ojos alternados, esto permite al usuario ver el objetivo mientras se realiza el movimiento.

Para detección de las señales se mide entre intensidades ente 0 y 1, de lo cual se realizan varias pruebas de las señales en la cual se determina que para esta aplicación el nivel mínimo de las señales en intensidad debe ser de 0,2 para que sea diferenciada la decisión de las demás.



## 4.2 COMPORTAMIENTO DE TRANSMISIÓN SERIAL Y ACONDICIONAMIENTO ELECTRÓNICO

---

El acondicionamiento electrónico elaborado por medio de la tarjeta permite un funcionamiento adecuado de los servomotores los cuales fueron energizados a 5.5V y con corrientes inferiores a un amperio cuando trabajan en conjunto, en puntos donde los servomotores deben soportar el peso de toda la estructura, aspecto que favorece la propuesta pues no fue afectada la integridad física del manipulador ni de los servomotores.

Por otra parte, la tarjeta trabaja a 300 baudios, lo que representa el número de símbolos por segundo en un medio de transmisión digital. Teniendo en cuenta que cada símbolo puede codificar 1 o más bits, se menciona que en este caso se requiere transmitir cadenas de caracteres con de 5 símbolos, que integran un símbolo de direccionamiento, dos símbolos de porcentaje del PWM que varía entre 30 y 80 y dos de finalización de la transmisión. Pero para que se ejecute una instrucción de cinemática de la interfaz se requiere realizar 6 envíos de paquetes de datos, en consecuencia se infiere que la respuesta del sistema físico disminuye a 30 veces.

Es decir, que la reacción del sistema será lenta y tendrá un retraso aparente en comparación con la velocidad a la cual se envían los datos desde la interfaz.

Teniendo en cuenta la situación anterior, se consideró importante utilizar paquetes de datos que no sean grandes, lo cual afecto la exactitud los

movimientos pues la precisión decimal en este caso es 0, antes de la transmisión y en la conversión PWM.

### 4.3 MANIPULADOR – BRAZO ROBÓTICO

---

El objetivo del proyecto está orientado a la interacción con un manipulador de 5 grados de libertad, sin embargo el programa permite de igual forma el manejo de un manipulador de similares características pero con 4 grados de libertad.

La cinemática del manipulador de 4DOF fue sencilla, pues este cuenta con una configuración robótica típica que se rige a los parámetros de DH y a los de la interpretación geométrica de la cinemática inversa. En el caso del manipulador de 5DOF, la cinemática inversa se realizó en dos partes un análisis geométrico parcial, seguido de un análisis iterativo para determinar el ángulo de cabeceo apropiado para las coordenadas ingresadas.

Otra de las limitaciones para que el resultado de la cinemática inversa se encuentre cuando se integra el sensor Emotiv™, es que dado que los servomotores se mueven en promedio 125°, se pierden gran cantidad de configuraciones y de espacio de trabajo, por tanto se planteó como solución, que el usuario pueda manipular el sistema en simulación con o sin restricciones de ángulo, lo que sugiere que permite percibir los movimientos del mismo con mayor fluidez cuando es controlado por el Emotiv™.

## 4.4 ERROR EN POSICIÓN

---

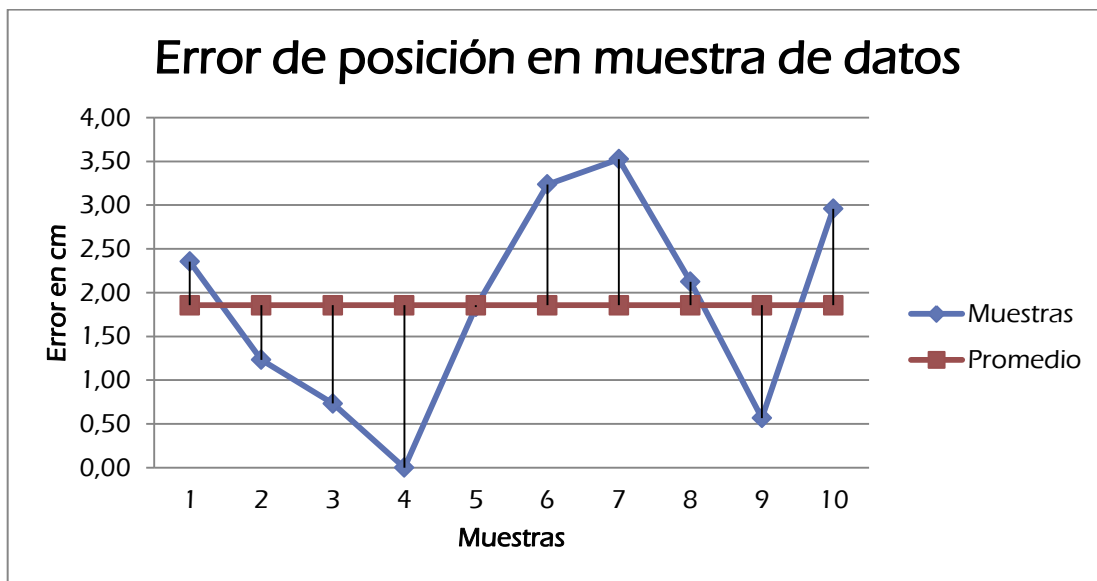
Para este proyecto se realiza una prueba del error de posición en la cual se toman 10 posiciones al azar y se evalúa su cinemática y finalmente se determina la diferencia del resultado con la inicial propuesta, lo que quiere decir que el usuario modifica la posición actual del manipulador, y propone un aumento o disminución en cada uno de sus ejes, esto será asumido por el método como la referencia o punto final, después se realizan los cálculos respectivos hasta encontrar la solución más cercana que cumpla con las restricciones de las articulaciones, se evalúa cual fue el error en distancia. De lo anterior se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 13. Muestras de error de posición

Px	Py	Pz	Error cm
166	96	380	2,35526
2	-2	447	1,23368
-93	-199	355	0,73420
249	100	286	0,00020
-57	0	356	1,83532
50	50	428	3,23536
-12	-9	451	3,52544

138	138	354	2,12558
-86	106	285	0,56769
-149	89	266	2,95789
<b>Promedio</b>			<b>1,85706</b>

Figura 40. Gráfica de la muestra de cada error y error promedio



Por tanto se puede observar que en este caso el error es de 1.85 cm en promedio, ya que por ajuste de decimales se pierde información

## 4.5 FUNCIONAMIENTO DEL PROYECTO

---

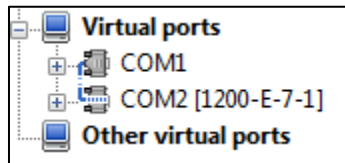
El funcionamiento del desarrollo comienza con la conexión de los elementos físicos al manipulador y al ordenador.

Figura 41. Alistar Manipulador.



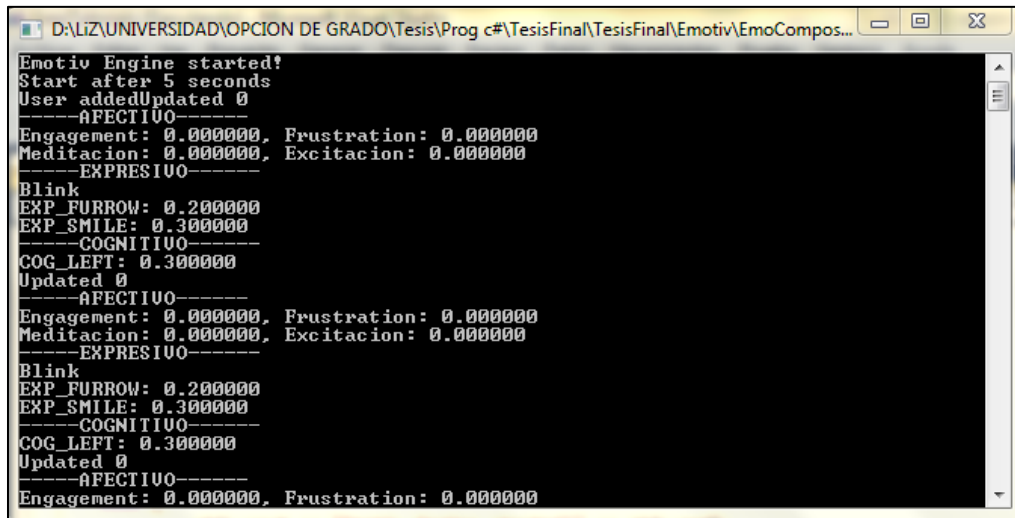
Luego hay que establecer la conexión de los puertos virtuales. A lo que le correspondes COM1 a programa de usuario y COM2 al programa Emotiv™.

Figura 42. Conexión virtual de COM1 y COM2



Después hay que correr el EmoComposer™ y el programa en consola que lee las señales en donde se identifica el tipo de estímulo del Emotiv™ y la intensidad de la señal que se está mostrando.

Figura 43. Programa Emotiv™ en Consola



Cuando se ejecute el programa de usuario se configura en este caso la conexión Emotiv™ en EmoComposer™, y cuando el indicador está en verde ya está listo para usarse, luego se configura la conexión del puerto serial teniendo en cuenta que la velocidad apropiada es de 300baud de igual forma el indicador cambia de rojo a verde.

Lo anterior se ve en la siguiente figura y además se evidencia con el indicador verde cuando una determinada acción del Emotiv™ está activa, en este caso en el módulo expresivo.

Figura 44. Simulación integral de módulo expresivo



Por otra parte el programa permite entrenar las funciones para que la percepción de cada acción de cada usuario sea percibida mejor.

Figura 45. Entrenamiento de módulo expresivo



De igual forma, se comporta el módulo y el entrenamiento cognitivo.

Figura 46. Módulo cognitivo y entrenamiento.



En el módulo real hay únicamente que oprimir el Play para que las señales sean enviadas al manipulador.



Figura 47. Módulo real



Por otro lado en el módulo de simulación, cinemática inversa, se asignan los valores de las coordenadas y al calcularla el sistema arroja el codo, si encontró o no solución, el error de la posición y los ángulos para cada articulación.

Figura 48. Módulo de Cinemática inversa



Y si calculamos con los mismos ángulos la cinemática directa, las coordenadas serán muy parecidas a las que se indican en el cálculo anterior.

Figura 49. Módulo de cinemática directa



En el entorno virtual se ve el ángulo de cada articulación y brinda la posibilidad de modificar las propiedades de la cámara y los ángulos de las articulaciones individualmente.

Figura 50. Módulo de entorno virtual



## 5. CONCLUSIONES

---

La tarjeta STM que se utiliza en este proyecto cuenta con las capacidades de procesamiento y de puertos PWM necesarios para conectar el manipulador, sin embargo la velocidad de recepción serial de los datos fue baja lo que afecta la ejecución en tiempo real y esta se retrasa varios segundos.

El desarrollo de este proyecto, está limitado por el funcionamiento de los servomotores, que no permiten apreciar la libre interacción de los dos sistemas, por lo cual se desarrolló un módulo de simulación que brinda la opción de manejo del brazo robótico sin restricciones, lo que puede ser útil para escoger mejores características de diseño según la funcionalidad que se requiera.

Las soluciones al problema que se planteó inicialmente son de grandes variedades, sin embargo este trabajo sigue especificaciones técnicas de materiales, de acuerdo a la disponibilidad de los equipos del grupo al que apoya este escrito, lo que aporta ventajas y desventajas en la respuesta final del sistema.

La interfaz gráfica que se elaboró, además de presentar el contenido ingenieril del proyecto, está orientada al usuario, la cual brinda el fácil uso, estética y ayudas durante la ejecución, pues siempre está enfocado al sector de la salud, en donde se entiende las personas que la podrían utilizar pueden o no tener afinidad con los aspectos técnico del proyecto.

El sensor Emotiv™ es un dispositivo de gran utilidad para la captura de las señales cerebrales, sin embargo el buen desempeño del manipulador

depende de las capacidades y habilidades del usuario para concentrarse y estabilizar sus expresiones y pensamientos, a pesar de ello el entrenamiento de cada uno de los parámetros utilizados acomoda las variables del sistema y la identificación de las señales es más clara. En el caso del simulador virtual, a pesar de los entrenamientos que se realicen, no incluye en la detección de las señales pues se entiende que es un “usuario ideal”.

Adicional a los alcances del proyecto, se realiza una prueba de error de posición con diez ubicaciones en el plano cartesiano diferentes, y la respuesta del sistema indica que el error en simulación es de 1,86cm aproximadamente con respecto a lo solicitado por el usuario, lo que quiere decir que la exactitud es baja, si se requiere utilizar para trabajos de precisión. Esto se debe a que el método iterativo implementado representa un alto grado de inexactitud con respecto los métodos geométricos puros que son de gran exactitud, en el momento de calcular la cinemática inversa y por consiguiente realizar la selección de los ángulos apropiados para seguir la referencia.

## 6. RECOMENDACIONES

---

Para poder ejecutar este desarrollo hay que tener en cuenta diferentes aspectos:

- ❖ Las salidas del circuito electrónico tienen un número que las identifica y que deben ser conectadas en el orden que indica las tablas de códigos relacionadas en el trabajo, y según el primer número de cada paquete de datos.
- ❖ El ordenador que se utilice para esta aplicación debe tener como mínimo 3 puertos seriales para conectar la tarjeta, la transmisión serial y el puerto del Emotiv™.
- ❖ Es importante antes de correr el programa y energizar los motores, verificar que los cables no interfieren en el movimiento de ninguno de los servomotores.
- ❖ El manipulador debe ser conectado a una fuente de 5.5V a dos amperios.
- ❖ Los programas que se necesitan para la ejecución de la interfaz son: Microsoft Visual Studio C++, Configure Virtual Serial Port y EmoComposer™.
- ❖ Verificar que los puertos sean reconocidos, de lo contrario descargar o actualizar el controlador del cable serial y el ST-Linker para la tarjeta.
- ❖ La ejecución de los programas en su orden es: Configure Virtual Serial Port (vincular pareja de COM1 con COM2), EmoComposer™, Programa de Emotiv™ y por último programa de Interfaz de usuario.
- ❖ Para el auricular del Emotiv™ se deben seguir las especificaciones de uso del manual del dispositivo.

- ❖ Si se dificulta el manejo de las expresiones del Emotiv™ se debe practicar en el Control Panel de Emotiv™.
- ❖ Cuando se use el modulo cognitivo, no hacer gestos o movimientos.
- ❖ Se recomienda para futuros trabajos, utilizar un método iterativo diferente, el cual permita converger con más rapidez a la respuesta, un ejemplo puede ser Newton –Raphson u otros.

## BIBLIOGRAFÍA

---

- RAMÍREZ GIRALDO , J., & GRAJALES VALENCIA, C. (25 de 11 de 2003). *LA ROBÓTICA EN LA MEDICINA*. Recuperado el 14 de 02 de 2013, de Centro de investigacion y desarrollo-Facultad de ingenieria: [http://www.umanizales.edu.co/publicaciones/campos/ingenieria/ventana\\_informatica/html/ventana11/RoboticaenMedicina.pdf](http://www.umanizales.edu.co/publicaciones/campos/ingenieria/ventana_informatica/html/ventana11/RoboticaenMedicina.pdf)
- Roman Gonzalez, M. (s.f.). PROCESAMIENTO DE SEÑALES EEG PARA APLICACIONES DE COMUNICACIÓN Y CONTROL DEL PENSAMIENTO .
- Aminoff, M. J. (2012). *Aminoff's electrodiagnosis in clinical neurology*. New York : Elsevier.
- binaurales, S. (s.f.). *Ondas Cerebrales*. Recuperado el 28 de 01 de 2014, de <http://www.sonidosbinaurales.com/ondas-cerebrales/>
- Cano Galindo, J. (04 de 24 de 2014). *RAMAS DE LA TECNOLOGÍA*. Obtenido de <http://jcano10.blogspot.com/2014/04/respuestas-7a.html>
- Catalunya, U. P. (2002). *Robots industriales. Manipuladores*. . Catalunya : Edicions UPC.
- Chicago Medicine , T. (07 de 05 de 2014). *Anatomía del Encéfalo*. Obtenido de <http://www.uchospitals.edu/online-library/content=S03866>
- Cordoba Villar , S., & Perez Oviedo , W. (s.f.). *Tesis UNSAAC*. Cusco: Universidad Nacional de San Antonio de Abad de Cusco.
- Cuya Solari, O., Flores Bustinza, E., & Torres Chavez, J. (s.f.). *CINEMATICA DIRECTA E INVERSA DE UN ROBOT4DOF*. Obtenido de IEEE UNAC:



<http://es.scribd.com/doc/142121427/CINEMATICA-DIRECTA-E-INVERSA-DE-UN-ROBOT-DE-4-GRADOS-DE-LIBERTAD>

Docència, U. d., & Barcelona, U. (07 de 05 de 2014). *LAS ONDAS CEREBRALES*. Obtenido de PSICOLOGÍA DE LA PERCEPCIÓN VISUAL: <http://www.ub.edu/pa1/node/130>

Emotiv. (06 de 05 de 2014). *Emotiv*. Obtenido de <http://emotiv.com/>

Emotiv. (s.f.). Emotiv Software Development Kit. *User Manual for Release 1.0.0.5*.

Etxebarria, V. (1999). *Sistemas de control no lineal y robótica*. País Vasco: Universidad del País Vasco.

GADGETS. (09 de 12 de 2008). *Emotiv EPOC: Práctico lector de ondas cerebrales*. Recuperado el 28 de 01 de 2014, de FayerWayer: <http://www.fayerwayer.com/2009/12/emotiv-epoc-practico-lector-de-ondas-cerebrales/>

Ibarra Nuño , C., & Recinos Silva, M. (02 de 02 de 2013). *Matrices Homogéneas*. Obtenido de <http://proton.ucting.udg.mx/~cin/robotic/tarease/dh/dh.htm>

Lopez Cedillo , L., & Cuenca Jimenez , F. D. (06 de 2011). *Robot Paralelo de 6 Grados de Libertad*. Recuperado el 28 de 01 de 2014, de [http://wikipam.astroscu.unam.mx/@api/deki/files/846/=Robot\\_clase.pdf](http://wikipam.astroscu.unam.mx/@api/deki/files/846/=Robot_clase.pdf)

Magazine, T. (01 de 11 de 2013). *Más que un efecto especial*. Recuperado el 14 de 02 de 2014, de <http://touchmgz.blogspot.com/2013/11/emotiv-insight.html>.

Martinez Barros , D., & Trout Guardiola , D. (2006). *Conceptos básicos de electroencefalografía*. Universidad del Magdalena , Duazary.

- MikroC PRO for ARM. (v.4.2.0.). *Programa* .
- Murray, R. M., Li, Z., & Sastry, S. (1994). *A mathematical introduction to robotic manipulation*. Florida CRC Press: Boca Raton.
- Ollaro Baturone, A. (2001). *Robótica manipuladores y robots móviles* . Barcelona (España): Marcombo-Alfaomega .
- Perez Garcia, A., Schjolberg, I., Gale, S., & Department of Engineering Cybernetics, Norwegian U. (5 de 12 de 2013). Recuperado el 28 de 01 de 2014, de <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?tp=&arnumber=6719280&queryText%3Dcontrol+emotiv>
- Rechy-Ramirez, E. J., Hu, H., & McDonald-Maier, K. (14 de 12 de 2012). *Head movements based control of an intelligent wheelchair in an indoor environment*. Obtenido de <http://ezproxy.umng.edu.co:2087/xpl/articleDetails.jsp?tp=&arnumber=6491175&queryText%3Demotiv+control>
- Reyes Cortés, F. (2011). *Robótica : control de robots manipuladores*. México: Alfaomega .
- Rojas Zuaznábar, L. (2011). *Manual de electrocardiografía y electroencefalografía*. México: Manula Moderno.
- Shuang, L., Ning , X., & Yunyi , J. (14 de 12 de 2012). *On-line operator skill assessment for telerobot operation using electroencephalo-graph (eeg)*. Obtenido de International Conference on Robotics and Biomimetics: <http://ezproxy.umng.edu.co:2087/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6491195&tag=1>

Sigma Electronica . (08 de 05 de 2014). *Sigma Electronica*. Obtenido de <http://www.sigmaelectronica.net/index.php>

Stmicroelectronics, e. (09 de 11 de 2012). *Guía de iniciación al kit de evaluación St STM32F4 Discovery*. Obtenido de [http://www.disca.upv.es/aperles/arm\\_cortex\\_m3/curset/guia\\_iniciacion\\_STM32F4\\_discovery.pdf](http://www.disca.upv.es/aperles/arm_cortex_m3/curset/guia_iniciacion_STM32F4_discovery.pdf)

Torres Torriti, M. (05 de 2005). *Manipuladores Robóticos* . Recuperado el 28 de 01 de 2014, de Pontificia Universidad Católica de Chile, Escuela de ingeniería, Departamento de ingeniería eléctrica: [http://www2.ing.puc.cl/iee2682/biblio/IEE2682\\_Clase\\_Forward\\_Kinematics\\_050627.pdf](http://www2.ing.puc.cl/iee2682/biblio/IEE2682_Clase_Forward_Kinematics_050627.pdf)

UNIVERSIDAD DE ALCALÁ DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA, .. (07 de 05 de 2014). *Instrumentación Biomédica* . Obtenido de Electroencefalografía : <http://www.bioingenieria.edu.ar/academica/catedras/bioingenieria2/archivos/apuntes/tema%205%20-%20electroencefalografia.pdf>

Vourvopoulos, A., Liarokapis, F., & Interactive Worlds Appl. Res. Group, Coventry Uni. (06 de 05 de 2011). *Brain-Controlled NXT Robot: Teleoperating a Robot through Brain Electrical Activity*. Recuperado el 28 de 01 de 2014, de IEEExplore: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?tp=&arnumber=5962098&queryText%3Demotiv+robot>

Wijayasekara, D., Univ. of Idaho, & Idaho Falls. (08 de 06 de 2013). *Human machine interaction via brain activity monitoring*. Recuperado el 28 de 01 de 2014, de IEEExplore: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?tp=&arnumber=6577809&queryText%3Dcontrol+emotiv>