

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

LIZETH ANDREA FERNANDEZ MOTTA
u1801478@unimilitar.edu.co

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.

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 cuanta 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.

Palabras claves: Robotica, Manipulador, Trayectoria, Cinematica Inversa, Cinematica Directa, Tarjeta Embebida

I. INTRODUCCION

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"

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 preludio 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.

II. 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.

A. DEFINICION DE PROBLEMA

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 estas son algunas razones por las cuales es indispensable buscar alternativas que con ayuda de la tecnología se puedan lograr.[1]

III. MARCO REFERENCIAL

A. 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.

3.1.1 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.[30]

3.1.2 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. [20]

3.1.3 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 Mindstorms 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[29]

3.1.4 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 TOS, 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 TOS y los estados cerebrales del tele-operador. [24]

3.1.5 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. 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. [21]

3.1.6 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.

B. 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.

3.2.1 Robots Manipuladores

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. 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.[13]

3.2.2 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. .[5]

3.2.3 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. .[5]

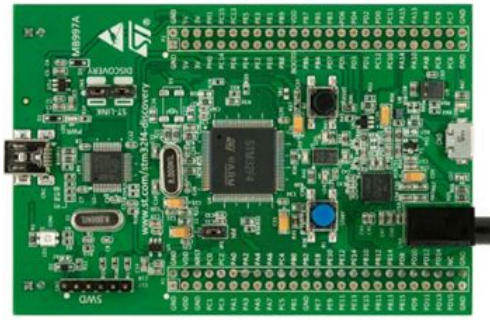


Figure 1. Tarjeta STM32F4DISCOVERY, Fuente:STMmicroelectronics,2012

3.2.4 EMOTIV

Este es uno de los avances más recientes en neurotecnología. 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.[5]



Figure 2. Auricular neuronal EMOTIV EPOC, Fuente:Emtoive, 2014

3.2.5 Encefalo 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. [5]

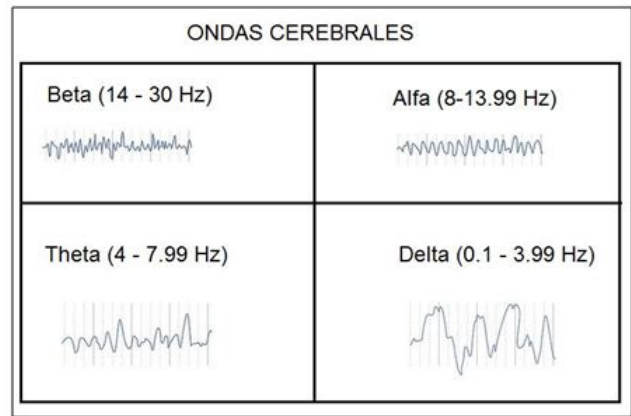


Figure 3. Ondas Cerebrales, Fuente: Docência & Barcelona, 2014

IV. DISEÑO METODOLOGICO

A. 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 esta 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/60º.

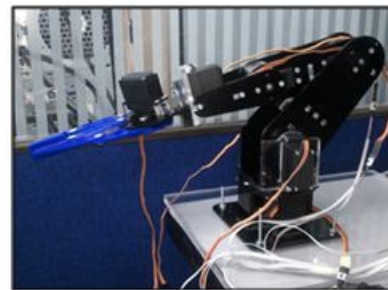


Figure 4. Manipulador de 5DOF, Fuente: Registro Fotográfico - Autor

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 agregados 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.

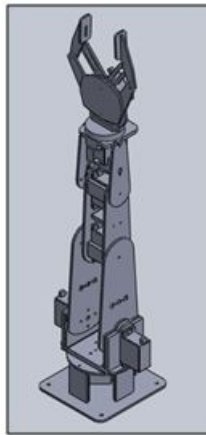


Figure 5. Manipulador de 5DOF en SolidWorks, Fuente: Registro Fotográfico - Autor

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.

4.1.1 Movimientos y restricciones del manipulador

Como fue mencionado anteriormente los actuadores son servomotores que por ende giran solo 180° 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 esquema del manipulador con la correspondiente nomenclatura que será empleada en todo el documento.

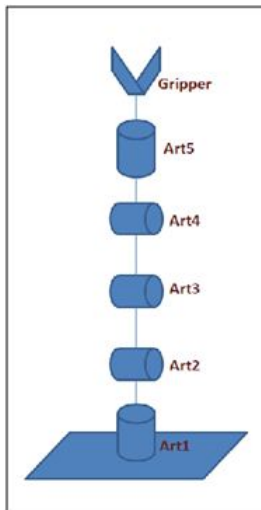


Figure 6. Esquema de manipulador de 5DOF, nomenclatura, Fuente: Registro Fotográfico - Autor

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

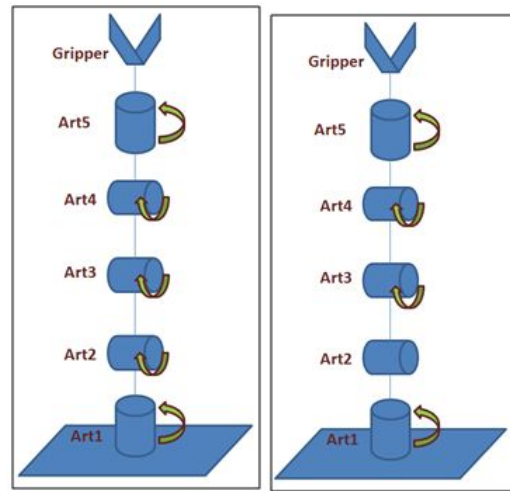


Figure 7. Esquema de manipulador de 5DOF - 4DOF, nomenclatura, Fuente: Registro Fotográfico - Autor

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.

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°

Table I
RESTRICCIONES DE CADA ARTICULACIÓN, FUENTE: AUTOR

Específicamente en el plano cartesiano cada articulación se ve así:

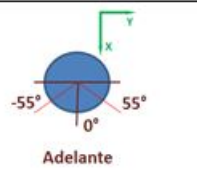
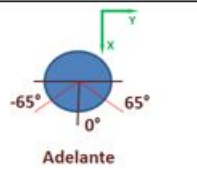
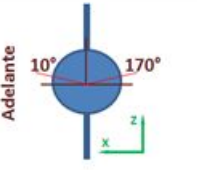
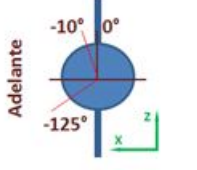
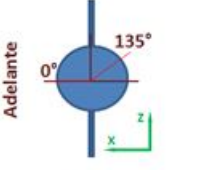
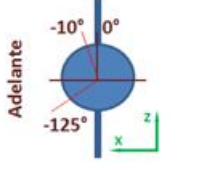
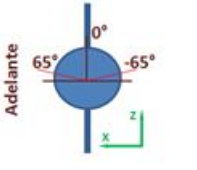
	5DOF	4DOF
Art. 1		
Art. 2		N/A
Art. 3		
Art. 4		

Table II

RESTRICCIONES DE CADA ARTICULACIÓN EN EL PLANO CARTESIANO, FUENTE: AUTOR

B. ANALISIS 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.

4.2.1 Representacion esquematica y analisis de Denavit-Hartenberg

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

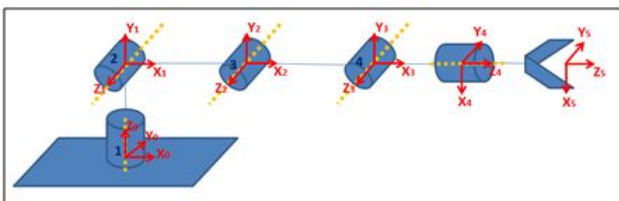


Figure 8. Diagrama de Denavit-Hartenberg 5DOF, Fuente: Registro Fotográfico - Autor

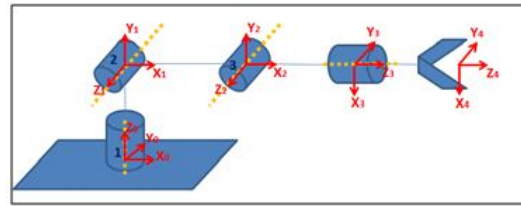


Figure 9. Diagrama de Denavit-Hartenberg 4DOF, Fuente: Registro Fotográfico - Autor

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

	θ	D	A	α
Art1	θ_1	d_1	0	$\pi/2$
Art2	θ_2	0	a_2	0
Art3	θ_3	0	a_3	0
Art4	$\theta_4 - \pi/2$	0	0	$-\pi/2$
Art5	θ_5	d_5	0	0

Table III

PARAMETRO MANIPULADOR 5DOF, FUENTE: AUTOR

	θ	D	A	α
Art1	θ_1	d_1	0	$\pi/2$
Art2	θ_2	0	a_2	0
Art3	$\theta_3 - \pi/2$	0	0	$-\pi/2$
Art4	θ_4	d_4	0	0

Table IV

PARAMETRO MANIPULADOR 4DOF, FUENTE: AUTOR

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

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

Table V

CONSTANTES DE MANIPULADORES 5DOF- 4DOF, FUENTE: AUTOR

4.2.2 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.

Algorithm 1 Diagrama de Denavit-Hartenberg 5DOF, Fuente: Autor

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

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

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

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

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

4.2.3 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 producto cruz por parejas así: la matriz uno con la matriz dos, luego el resultado de ellas producto cruz 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:

Algorithm 2 Cinemática Directa de Matriz, Fuente: Autor

$$r_{21} = -c_5(s_1 - c_3(c_{12})) - s_5(s(\theta_4 + 1.571)(c_3(c_1s_2) + s_2(c_{12})) + c(\theta_4 + 1.571)(s_3(c_1s_2) - c_3(c_{12} -)))$$

$$r_{22} = c_{51} - s_5(s(\theta_4 + 1.571)(s_3(-c_3(-s_{12})) - c(\theta_4 + 1.571)(c_3(c_2s_1) + s_3(-s_{12})))$$

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

$$r_{24} = 0$$

$$r_{31} = s(\theta_4 + 1.571)(s_3(c_1s_2) - c_2(c_{12})) - \cos(\theta_4 + 1.571)(c_3(c_1s_2) + s_3(c_{12} -))$$

$$r_{32} = -s(\theta_4 + 1.571)(c_3(c_2s_1) + s_2(-s_{12})) - c(\theta_4 + 1.571)(s_3(c_2s_1) - c_3(-s_{12}))$$

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

$$r_{34} = 0$$

De esta forma la matriz solo requiere de los valores de θ_1 , θ_2 , θ_3 , θ_4 y θ_5 y de esta manera las posiciones

r14, r21, r31 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.

4.2.4 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 θ_1 en el plano XY.

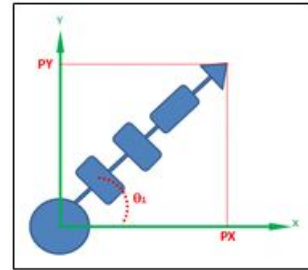


Figure 10. Analisis geometrica de manipulador PlanXY, Fuente: Registro Fotográfico - Autor

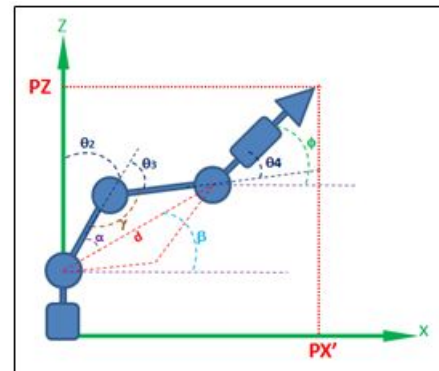


Figure 11. Analisis geometrica de manipulador PlanYZ, Fuente: Registro Fotográfico - Autor

Algorithm 3 Despeje de la Ecuaciones de Matriz, Fuente: Autor

$$PX' = \sqrt{PY^2 + PZ^2}$$

$$\phi = \theta_2 + \theta_3 + \theta_4$$

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

$$w_z = (PZ - a_4) - a_2 \sin(\phi)$$

$$d = \sqrt{w_x^2 + w_z^2}$$

$$d^2 = a_2^2 + a_3^2 - 2a_2a_3 \cos(180^\circ - \theta_2)$$

$$\cos(\theta_2) = \frac{d^2 - a_2^2 - a_3^2}{2a_2a_3}$$

$$\sin(\theta_2) = \sqrt{1 - (\cos(\theta_2))^2}$$

$$\theta_2 = \text{atan2}(\sin(\theta_2), \cos(\theta_2))$$

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

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

Finalmente el ángulo de θ_5 es ingresado por el usuario y ϕ es calculado por iteraciones.

C. 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.

4.3.1 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.



Figure 12. Circuito General del Manipulador de 5DOF, Fuente: Registro Fotográfico - Autor

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:

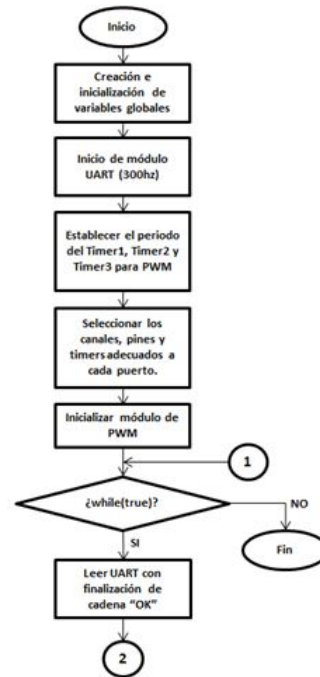


Figure 13. Diagrama de Flujo, Fuente: Autor

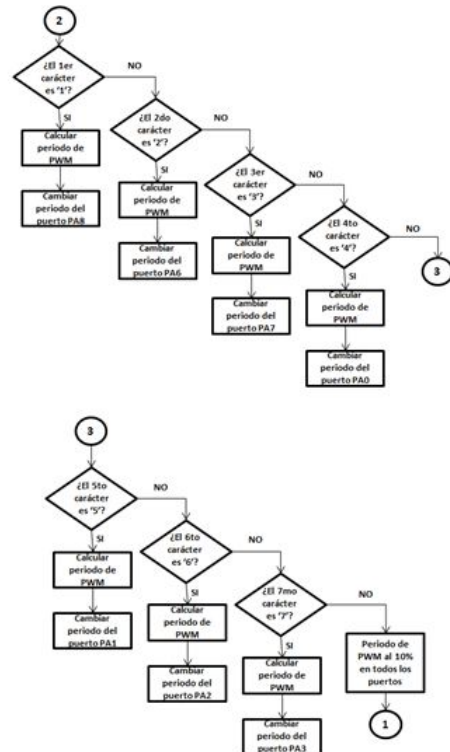


Figure 14. Diagrama de Flujo, Fuente: Autor

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.

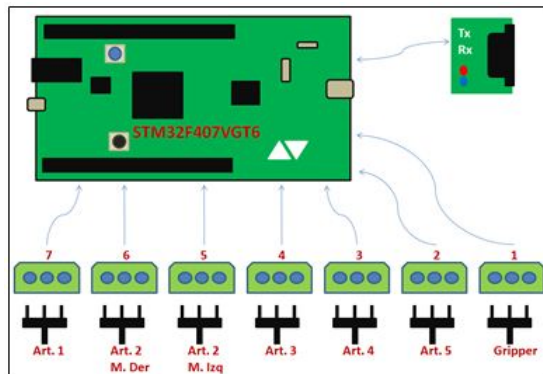


Figure 15. Diagrama General Electronico, Fuente: Autor

D. INTERFAZ DEL 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.



Figure 16. Diagrama General Interfaz Virtual, Fuente: Autor

4.4.1 Conexión Serial

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.

4.4.2 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.



Figure 17. Módulo Cinemática Inversa, Fuente: Autor

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.

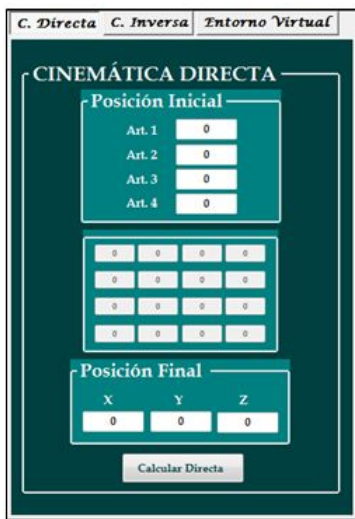


Figure 18. Modulo Cinematica Directa, Fuente: Autor

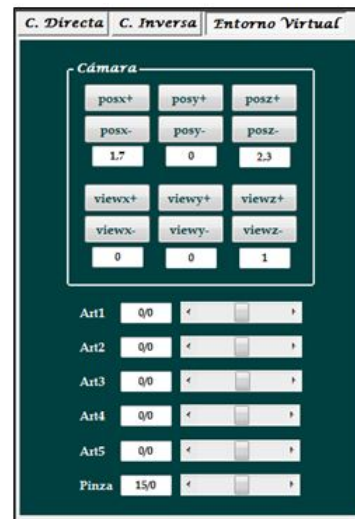


Figure 20. Modulo de Pruebas del entorno virtual, Fuente: Autor

4.4.3 Entorno Virtual manipulador 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.

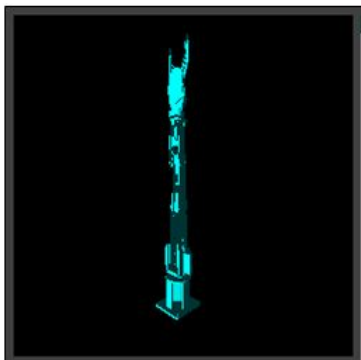


Figure 19. Entorno Virtual manipulador, Fuente: Autor

4.4.4 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.

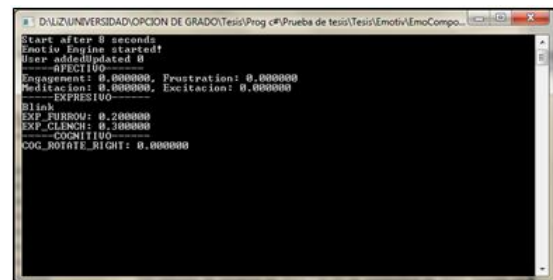


Figure 21. Programa Visual C++ Consola, Fuente: Autor

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.

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	EQ0	Pinza cerrada.

Figure 22. Expresiones para movimiento de manipulador de 5DOF, Fuente: Autor

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

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

la siguiente tabla:

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.

Figure 23. Expresiones para movimiento de manipulador de 5DOF, Fuente: Autor

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



Figure 24. Modulo Cognitivo para manejo manipulador, Fuente: Autor

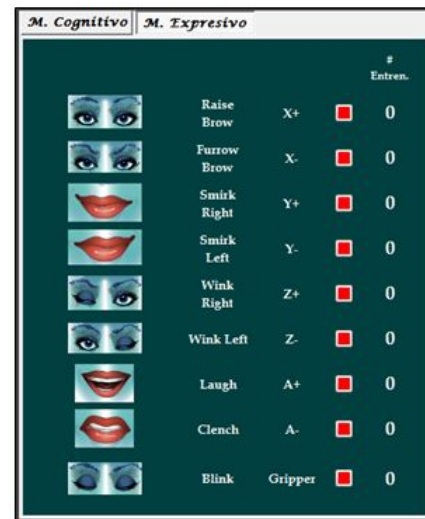


Figure 25. Modulo Expresivo para manejo manipulador, Fuente: Autor

Pero para que los resultados sean apropiados se incluye el módulo de entrenamiento del cada una de las acciones del Emotiv, pues de acuerdo a las señales de cada usuario el comportamiento del programa es diferente.

V. ANALISIS 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.

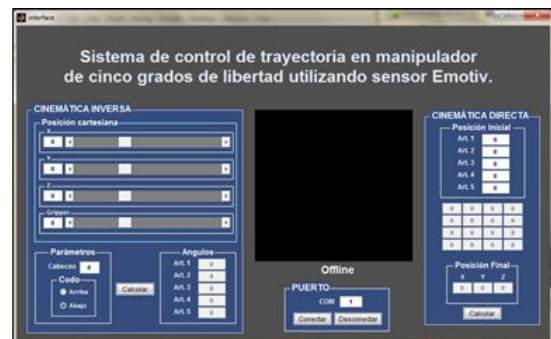


Figure 26. Interfaz de MATLAB para manipulador, Fuente: Autor

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.



Figure 27. Interfaz deC++1 para manipulador, Fuente: Autor

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.



Figure 28. Interfaz Final de Proyecto, Fuente: Autor

A. 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 módulo 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 entre 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.

B. COMPORTAMIENTO DE TRANSMISION SERIAL Y ACONDICIONAMIENTO ELECTRONICO

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

C. MANIPULADOR- BRAZO ROBOTICO

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.

D. ERROR EN POSICION

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. Y los resultados con los siguientes:

Px	Py	Pz	Errorcm
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
Promedio			1,85706

Table VI
MUESTRAS DE ERROR DE POSICION, FUENTE: AUTOR



Figure 29. Grafica de la muestra de cada error y error promedio, Fuente: Autor

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.

E. FUNCIONAMIENTO DEL PROYECTO

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



Figure 30. Alistar Manipulador, Fuente: Autor

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.

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.

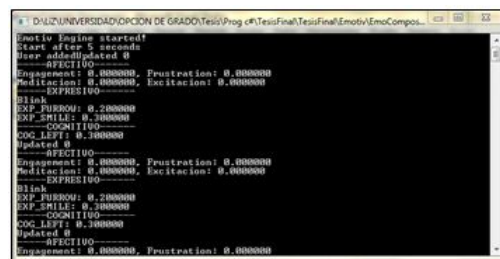


Figure 31. Programa Emotiv en Consola, Fuente: Autor

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.



Figure 32. Simulación Integral de Modulo Expresivo, Fuente: Autor

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



Figure 33. Modulo de Entrenamiento Expresivo, Fuente: Autor

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



Figure 34. Modulo de Cognitivo y Entrenamiento, Fuente: Autor

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.



Figure 35. Modulo de Cinematica Inversa, Fuente: Autor

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



Figure 36. Modulo de Cinematica Directa, Fuente: Autor

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.

VI. 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 la configuración del manipulador no es convencional, pues no cuenta con una muñeca esférica que pueda ser calculada y el método iterativo siempre representa grandes imprecisiones con respecto los métodos geométricos puros que son de gran exactitud, en el momento de calcular la cinemática inversa

VII. 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 Emotiv.
- 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.

REFERENCIAS

- [1] 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 ingeniería: http://www.umanizales.edu.co/publicaciones/campos/ingenieria/ventana_informatica/html/ventana1/RoboticaenMedicina.pdf
- [2] Roman Gonzalez, M. (s.f.). PROCESAMIENTO DE SEÑALES EEG PARA APLICACIONES DE COMUNICACIÓN Y CONTROL DEL PENSAMIENTO .
- [3] Aminoff, M. J. (2012). Aminoff's electrodiagnosis in clinical neurology. New York : Elsevier.
- [4] binaurales, S. (s.f.). Ondas Cerebrales. Recuperado el 28 de 01 de 2014, de <http://www.sonidosbinaurales.com/ondas-cerebrales/>
- [5] Catalunya, U. P. (2002). Robots industriales. Manipuladores. . Catalunya : Edicions UPC.
- [6] Chicago Medicine , T. (07 de 05 de 2014). Anatomía del Encéfalo. Obtenido de <http://www.uchospitals.edu/online-library/content=S03866>
- [7] Cordoba Villar , S., & Perez Oviedo , W. (s.f.). Tesis UNSAAC. Cusco: Universidad Nacional de San Antonio de Abad de Cusco.
- [8] Cuya Solari, O., Flores Bustinza, E., & Torres Chavez, J. (s.f.). CINEMÁTICA 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>
- [9] 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>
- [10] Emotiv. (06 de 05 de 2014). Emotiv. Obtenido de <http://emotiv.com/Emotiv>. (06 de 05 de 2014). Emotiv. Obtenido de <http://emotiv.com/>
- [11] Emotiv. (s.f.). Emotiv Software Development Kit. User Manual for Release 1.0.0.5.
- [12] Etxebarria, V. (1999). Sistemas de control no lineal y robótica. País Vasco: Universidad del País Vasco.
- [13] 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/>
- [14] 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
- [15] 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>.
- [16] Martínez Barros , D., & Trout Guardiola , D. (2006). Conceptos básicos de electroencefalografía. Universidad del Magdalena , Duazary.
- [17] MikroC PRO for ARM. (v.4.2.0.). Programa .
- [18] Murray, R. M., Li, Z., & Sastry, S. (1994). A mathematical introduction to robotic manipulation. Florida CRC Press: Boca Raton.
- [19] Ollaro Baturone, A. (2001). Robótica manipuladores y robots móviles . Barcelona (España): Marcombo-Alfaomega .
- [20] 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%3>
- [21] 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&query>
- [22] Reyes Cortés, F. (2011). Robótica : control de robots manipuladores. México: Alfaomega .
- [23] Rojas Zuaznábar, L. (2011). Manual de electrocardiografía y electroencefalografía. México: Manula Moderno.
- [24] 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>
- [25] Sigma Electronica . (08 de 05 de 2014). Sigma Electronica. Obtenido de <http://www.sigmaelectronica.net/index.php>
- [26] 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_disco
- [27] Torres Torrití, 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_0506
- [28] 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/ter%20electroencefalografia.pdf>
- [29] Vourvopoulos, A., Liarokapis, F., & Interactive Worlds Appl. Res. Group, Coventry Uni. (06 de 05 de 2011). Brain-Controlled NXT Robot: Tele-operating a Robot through Brain Electrical Activity. Recuperado el 28 de 01 de 2014, de IEEEExplore: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?tp=&arnumber=5962098&queryTe>
- [30] 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 IEEEExplore: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?tp=&arnumber=6577809&queryTe>