



# IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO  
DOCENTE  
DEL AREA  
MECANICA  
DE LAS  
INGENIERIAS

FoDAMI

## SISTEMA DE CONTROL EN LAZO CERRADO PARA MANIPULADORES ROBÓTICOS

Bravo, Gerardo A.<sup>\*1</sup>, Cirera, Eduardo A.<sup>2</sup> Imfeld, Santiago G.<sup>3</sup>

<sup>\*1,2,3</sup> GETeC, Grupo de Estudios en Tecnologías de Control – Facultad de Ingeniería – UNNE

Las Heras 727 – Resistencia – Chaco

<sup>\*1</sup> correo-e: gbravo@ing.unne.edu.ar

<sup>2</sup> correo-e: ecirera@ing.unne.edu.ar

<sup>3</sup> correo-e: santi\_imf@hotmail.com

### RESUMEN

Este trabajo presenta el desarrollo de un sistema de control en lazo cerrado para manipulador robótico. Está basado en una topología de control maestro-esclavo y tiene la particularidad de que puede ser extendido a 8 ejes de movimiento. Se lo ha implementado en un robot antropomorfo de 3 articulaciones comandado por motores paso a paso.

El desarrollo consistió en el diseño y la construcción de tres controladores de eje funcionando como esclavos, los cuales controlan la posición de la articulación o grado de libertad correspondiente mediante la lectura de encoders incrementales. Se utilizó para ello, microcontroladores con módulos QEI incorporados, posibilitando la actualización de la posición leída en forma paralela al programa principal. Por otro lado, el dispositivo maestro planifica y envía las referencias de posición a cada eje mediante un bus paralelo bidireccional de 8 bits. Los controladores de eje calculan el error y actúan sobre la velocidad de los motores en forma proporcional al error.

A su vez, indican al controlador maestro de distintos eventos mediante un bus de control, así, pueden indicar si se ha llegado al valor de referencia especificado.

El dispositivo maestro utilizado fue un kit de desarrollo comercial adaptado a las necesidades y se le ha incorporado el algoritmo de la cinemática inversa para el cálculo de las coordenadas articulares necesarias para el posicionamiento y la planificación de interpolaciones lineales, de forma tal que los valores de ingreso por parte del usuario están expresadas en coordenadas ortogonales.

En los controladores de eje se obtuvo un diseño compacto y funcional, con una electrónica robusta y de bajo coste y se ha logrado el posicionamiento del extremo del manipulador correctamente. Creemos que es necesario seguir trabajando en técnicas de control que establezcan el movimiento cuando se somete al manipulador a trayectorias rectas interpoladas debido a la rigidez en los movimientos que presenta el tipo de motores empleados y la técnica utilizada. Actualmente, el posicionamiento se estabiliza admitiendo un mayor nivel de error en el extremo del manipulador.

**Palabras Claves:** Mecatrónica, Manipulador, Robótica, Microcontroladores



# IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO  
DOCENTE  
DEL AREA  
MECANICA  
DE LAS  
INGENIERIAS

FoDAMI

## 1. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo parte de un desarrollo iniciado en el año 2009 por el grupo de investigación GETeC “Grupo de Estudios en Tecnologías de Control”, donde se realizó inicialmente el estudio de la cinemática directa y la dinámica de un manipulador robótico antropomorfo de tres articulaciones y la construcción del mismo. Con dicho estudio se establecieron dimensiones y capacidades del robot, como así también la selección de los motores que lo comandan. Además, se diseñó y construyó un controlador de tres ejes para realizar el control de los motores a lazo abierto pero con varias limitaciones en el control de posicionamiento.

El trabajo que se presenta en esta oportunidad mejora la primera versión con un controlador por cada eje y en lazo cerrado, mediante un hardware dedicado de lectura de Encoders en cuadratura. Esto nos brinda la posibilidad de aumentar a 8 el número de ejes a controlar a través de un dispositivo maestro que coordina las acciones de cada eje. El desarrollo consistió en el diseño, fabricación e implementación de los controladores de eje para el control del manipulador robótico. Además se adaptó una placa de desarrollo comercial para hacer de controlador maestro e interfaz humana en la cual un operador controla el robot mediante un joystick y una pantalla gráfica. La misma gobierna a los controladores de eje por medio de un sistema de comunicación maestro esclavo enviándole distintas posiciones de referencia a los controladores de eje para alcanzar los distintos puntos del extremo del manipulador robótico. El controlador maestro se encarga de registrar las peticiones del operador, calcular la cinemática inversa correspondiente a ellas, planificar los movimientos sincronizados de cada motor en el caso de interpolaciones lineales y enviar las posiciones de referencia a cada controlador de eje para que estos ejecuten el movimiento correspondiente.

Por otra parte, los controladores de eje comparan la posición de referencia enviada por el controlador maestro con la posición real de la articulación tomada por el encoder y calcula un error. Luego este error es procesado en base a la estrategia de control y actúa sobre una salida de pulsos hacia los drivers de los motores. Cada controlador de ejes tiene una dirección física configurable para su identificación y cuenta con una serie de parámetros propios con los cuales se establecen la velocidad máxima, la ganancia del desplazamiento, el control proporcional de la velocidad y los límites físicos de su movimiento entre otros. Poseen además un Microcontrolador con módulo QEI “quadrature encoder interface” integrado para la lectura de señales provenientes del encoder correspondiente instalado en el robot.



# IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO  
DOCENTE  
DEL AREA  
MECANICA  
DE LAS  
INGENIERIAS

FoDAMI

## 2. CINEMÁTICA DIRECTA E INVERSA

Para realizar el cálculo de las diferentes posiciones que deben tomar las articulaciones del manipulador para una determinada posición del extremo del mismo en el espacio  $[X,Y,Z]$ , es preciso calcular la cinemática inversa del mismo. Esta depende de la configuración física del robot, que en este caso es del tipo antropomorfo de tres grados de libertad. Se desarrollara en esta sección el cálculo de la cinemática inversa del manipulador que fue implementada en el controlador maestro. Se debe aclarar que también se ha desarrollado la cinemática directa para su comparación con la cinemática inversa y la depuración de los resultados arrojados por el algoritmo.

### 2.1. Cinemática inversa

Recordando que la cinemática inversa relaciona las coordenadas articulares de un manipulador con las coordenadas cartesianas de algún punto del mismo, que en este caso es el extremo del manipulador. La Ecuación (1) obtiene las coordenadas articulares mediante funciones trigonométricas y parte de las coordenadas cartesianas del extremo del manipulador. En la Figura 1 y 2 podemos apreciar los parámetros asociados para encontrar dicha relación.

$$\begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \end{bmatrix} = f \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (1)$$

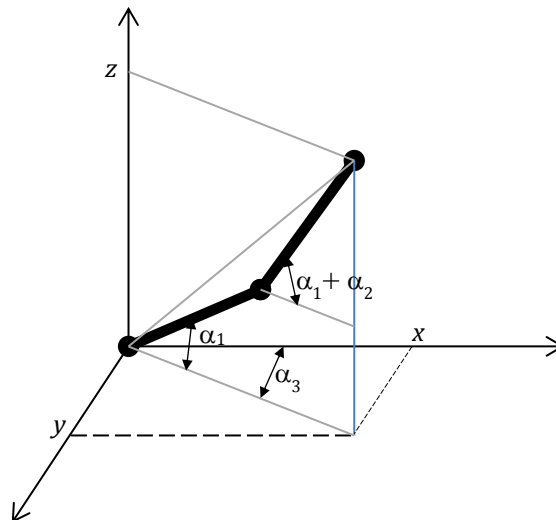


Figura 1 Grados de libertad en coordenadas articulares.



# IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO  
DOCENTE  
DEL AREA  
MECANICA  
DE LAS  
INGENIERIAS

FoDAMI

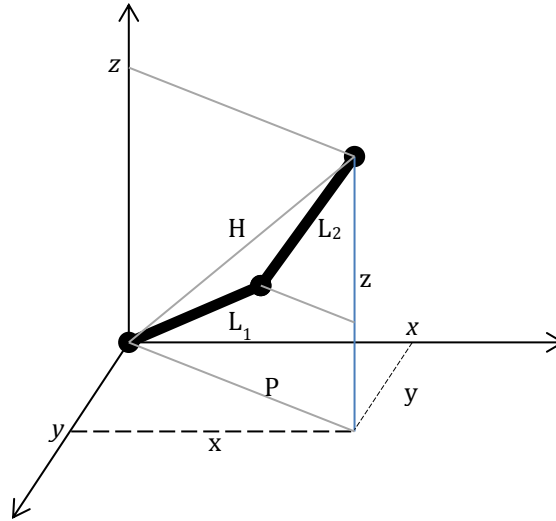


Figura 2 Coordenadas cartesianas [x,y,z].

Cada motor fue instalado de tal forma que pueda actuar sobre los tres ángulos mencionados. Por lo cual, para una posición determinada del extremo en [X,Y,Z] le corresponde, según el modo de trabajo, un juego único de coordenadas articulares  $[\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3]$  en base a las siguientes relaciones trigonométricas:

$$P = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (2)$$

$$H = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (3)$$

$$\alpha_3 = \cos^{-1}\left(\frac{x}{P}\right) \quad (4)$$

$$\text{Si } y < 0 \longrightarrow \alpha_3 = -\alpha_3 \quad (5)$$

El ángulo  $\gamma$  formado por el arco  $H$  con la proyección  $P$  se obtiene mediante la Ecuación (6).

$$\gamma = \sin^{-1}\left(\frac{z}{H}\right) \quad (6)$$

Partiendo del teorema del coseno y despejando obtenemos la Ecuación (7) y (8). Donde  $\alpha_{11}$  representa el ángulo formado entre  $H$  y  $L_1$ .

$$\alpha_{11} = \cos^{-1}\left(\frac{H^2 + L_1^2 - L_2^2}{2 * H * L_1}\right) \quad (7)$$

$$\alpha_2 = \pi - \cos^{-1}\left(\frac{L_1^2 + L_2^2 - H^2}{2 * L_1 * L_2}\right) \quad (8)$$



# IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO  
DOCENTE  
DEL AREA  
MECANICA  
DE LAS  
INGENIERIAS

FoDAMI

El signo del ángulo  $\alpha_2$  obtenido será de acuerdo al modo de trabajo elegido, según puede apreciarse en la Figura (3) y en base a la Ecuación (9) y (10).

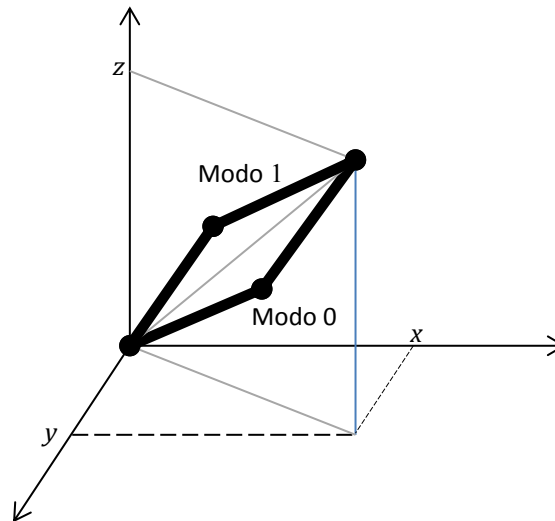


Figura 3 Modos de trabajo.

$$\text{Si } \textit{Modo} = 0 \longrightarrow \alpha_2 \geq 0 \longrightarrow \alpha_2 = \alpha_2 \quad (9)$$

$$\text{Si } \textit{Modo} = 1 \longrightarrow \alpha_2 < 0 \longrightarrow \alpha_2 = -\alpha_2 \quad (10)$$

Para obtener  $\alpha_1$  tendremos en cuenta también el modo de trabajo, siguiendo la Ecuación (11) y (12).

$$\text{Si } \textit{Modo} = 0 \longrightarrow \alpha_1 = \gamma + \alpha_{11} \quad (11)$$

$$\text{Si } \textit{Modo} = 1 \longrightarrow \alpha_1 = \gamma - \alpha_{11} \quad (12)$$

## 3. INTERPOLACION LINEAL

### 3.1. Estrategia de interpolación

Proponemos ahora que el extremo del manipulador realice un determinado movimiento controlado a lo largo de dos puntos conocidos. Esto sería, que parta de un punto conocido  $[x_1, y_1, z_1]$  y se traslade hacia otro punto también conocido  $[x_2, y_2, z_2]$  a través de una recta entre ellos, podemos decir que en cierto tiempo, el extremo del manipulador habrá recorrido:



# IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO  
DOCENTE  
DEL AREA  
MECANICA  
DE LAS  
INGENIERIAS

FoDAMI

$$\begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} \quad (13)$$

El movimiento se realizará en forma sincronizada, es decir, que en un mismo tiempo, las variables  $[x, y, z]$  pasaran de  $[x_1, y_1, z_1]$  hasta  $[x_2, y_2, z_2]$ . La distancia que habrá recorrido el extremo del manipulador está representada con el modulo  $M$  mediante la Ecuación (14).

$$M = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2} \quad (14).$$

Por otro lado, como el movimiento del manipulador es discreto, podemos imaginar que pasará por sucesivos puntos a partir de  $[x_1, y_1, z_1]$  hasta llegar a  $[x_2, y_2, z_2]$ . Esos sucesivos puntos que denominaremos  $[x, y, z]$  podrían calcularse en base a la Ecuación (15) propuesta:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} + \varphi * \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} \quad (15)$$

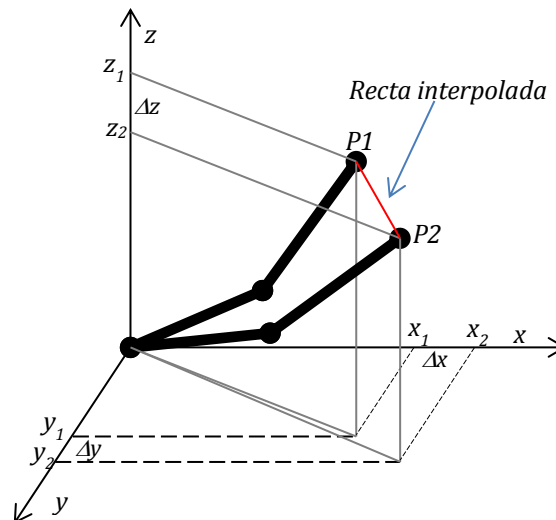


Figura 4. Interpolación Lineal entre dos puntos.

Variando ahora el valor de  $\varphi$  desde  $\varphi = 0$  hasta  $\varphi = 1$  podremos encontrar los sucesivos valores intermedios que tomarán las coordenadas cartesianas  $[x, y, z]$  por los que el extremo del manipulador deberá pasar. En la Figura (4) se muestra un esquema representativo de la interpolación a lograr.

Por la naturaleza discreta del control que se ha implementado y por la característica de los motores paso a paso, puede intuirse que no pueden asignarse infinitos valores de  $\varphi$  sino valores discretos y estarán en función de la resolución necesaria en el movimiento. El problema resulta que para lograr el sincronismo de los tres motores, deben actualizarse en un intervalo de tiempo  $\Delta t$  los



# IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO  
DOCENTE  
DEL AREA  
MECANICA  
DE LAS  
INGENIERIAS

FoDAMI

valores de  $[a_1, a_2, a_3]$  en cada motor. Dentro de este intervalo de tiempo, los motores no están sincronizados ya que al asignar los valores de Set Point a cada controlador de eje, los mismos intentarían disminuir el error a cero asincrónicamente y con sus propias condiciones dinámicas. Por tal motivo, aparecerá un pseudo diente de sierra entre punto y punto alcanzado. En la Figura 5 puede observarse el problema mencionado en el pasaje por 4 puntos consecutivos de interpolación.

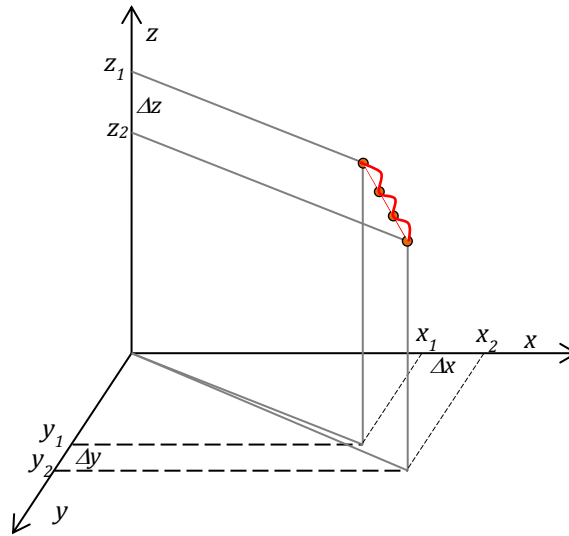


Figura 5. Interpretación del error.

La cantidad de pasos que utilizaremos para llegar de un punto a otro estará determinada por la desviación máxima admitida en el movimiento, por la resolución de los motores y por la precisión mecánica que podemos esperar del manipulador.

Definiremos para esto el parámetro  $R[mm]$  que nos indica la resolución con la que se realizarán los cálculos de posición en cada paso. Este parámetro no será igual al error entre puntos, pero será representativo del mismo.

Mediante el módulo  $M$  previamente calculado en la Ecuación (14), obtendremos el número de pasos por los que debe pasar  $\varphi$  para llegar de 0 a 1.

$$N^{\circ}P = \frac{M}{R} \quad (16)$$

Por último, el incremento  $\Delta\varphi$  será la inversa del número de puntos  $N^{\circ}P$ .

$$\Delta\varphi = \frac{1}{N^{\circ}P} \quad (17)$$

En forma iterativa aplicaremos la Ecuación (15), recalcularemos  $\varphi = \varphi + \Delta\varphi$  y aplicaremos nuevamente la Ecuación (15)  $N^{\circ}P$  veces hasta alcanzar el punto objetivo. Los sucesivos puntos

calculados serán los sucesivos Set points de cada eje en coordenadas angulares  $[\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3]$ , que serán alcanzados a medida que el controlador maestro los envíe secuencialmente a cada controlador de eje.

#### 4. CONTROLADOR MAESTRO

El sistema se controla mediante una placa multimedia comercial denominada MMB for PIC32MX7. En la misma, se desarrolló una aplicación en la que el operador trabaja en submenús donde ingresa el valor de las coordenadas cartesianas  $[x, y, z]$  del extremo del manipulador, a partir de allí, el controlador maestro calcula la cinemática inversa para dichas coordenadas y envía las mismas a cada controlador de eje. La comunicación se realiza por medio de un sistema de comunicación maestro esclavo, donde cada controlador de eje tiene una dirección física configurable de 3bits. Por otro lado, se ha incorporado también una función de interpolación lineal entre puntos, donde el operador ingresa los valores iniciales  $[x_1, y_1, z_1]$  y finales  $[x_2, y_2, z_2]$  de la recta, y el controlador maestro calcula y envía secuencialmente los sucesivos valores de Set Point hacia los controladores de eje. Existe también un modo de trabajo secuencial programado, donde a partir de las funciones desarrolladas previamente es posible la concatenación de movimientos interpolados. En el Esquema 1 se puede apreciar el funcionamiento general y las funciones del sistema formado por el controlador maestro y los controladores de eje. Por otro lado, el código embebido puede interpretarse en los diagramas de la Figura 7 y Figura 8.



Figura 6. Controlador de eje.



# IV CAIM 2014

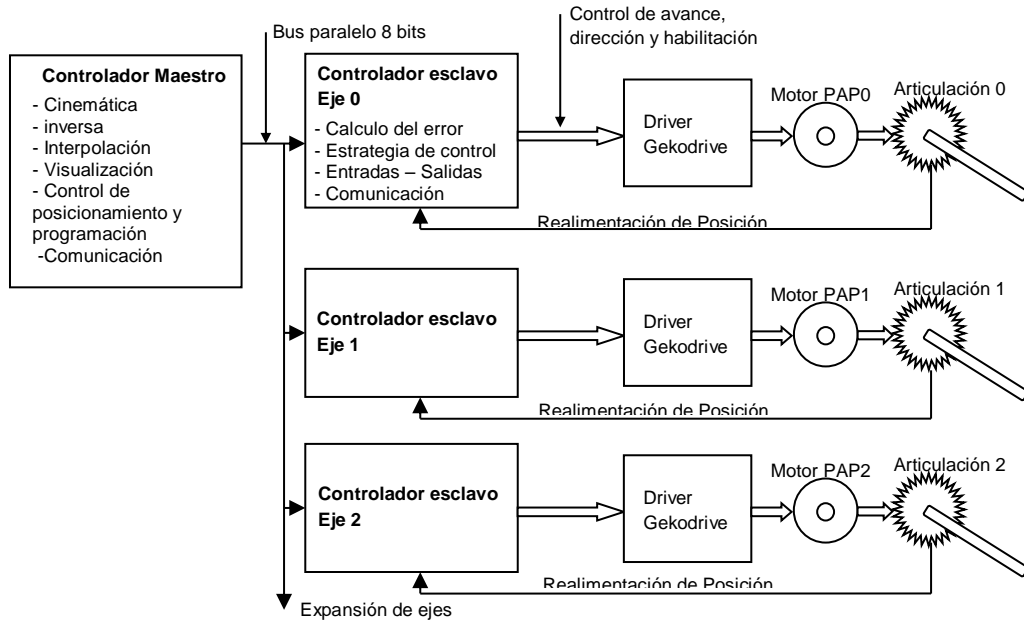
Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO  
DOCENTE  
DEL AREA  
MECANICA  
DE LAS  
INGENIERIAS

# FoDAMI



Esquema 1. Funcionamiento general del sistema de control.

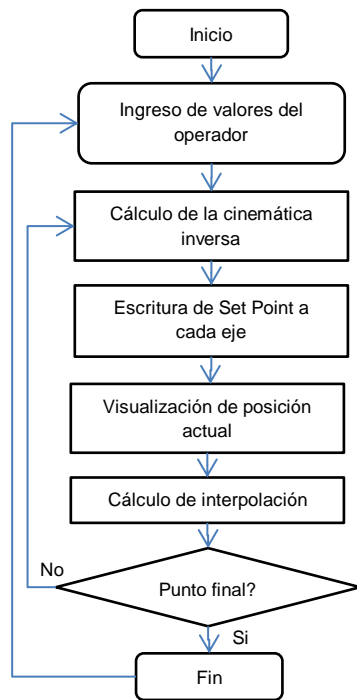


Figura 7. Controlador maestro.

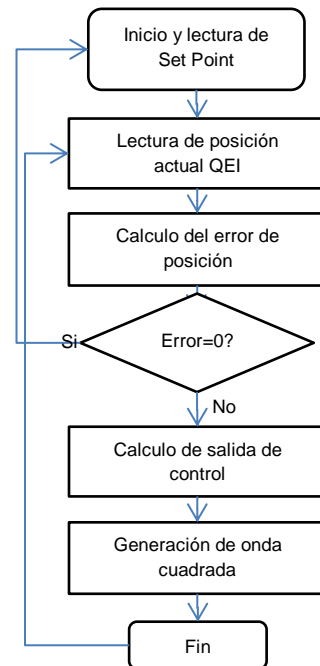


Figura 8. Controlador de eje.



# IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO  
DOCENTE  
DEL AREA  
MECANICA  
DE LAS  
INGENIERIAS

FoDAMI

## 5. CONTROLADORES DE EJE

Se siguieron varias pautas a la hora de desarrollar los controladores de eje.

A\_ El sistema debía ser expandible a un número de ejes tal que, en futuras aplicaciones, pudiera posicionar una herramienta.

B\_ Controlar por medio de trenes de pulsos el avance o retroceso de los motores paso a paso y su habilitación.

C\_ Lograr un sistema de lazo cerrado que nos permita posicionar una articulación.

D\_ Obtener la posición actual relativa de los Encoders incrementales por medio de un módulo QEI con hardware dedicado dentro de un microcontrolador.

E\_ Obtener la posición de referencia mínima y máxima de cada eje por medio de entradas para fines de carrera ópticos.

F\_ En base a las referencias mínimas y la posición relativa de los Encoders rotativos incrementales obtener la posición absoluta de un eje cualquiera.

G\_ Obtener mediante un bus de comunicación, la referencia de posición en un eje determinado.

H\_ Calcular el error y aplicar una estrategia de control en función del mismo, a fin de encontrar el mejor comportamiento dinámico de cada eje y del sistema en su conjunto.

I\_ Indicar mediante bits de control si un eje ha llegado a su fin de recorrido y otros eventos a implementar.

Por tal motivo, cumpliendo con lo pautado, se logró el diseño y la fabricación de tres controladores de ejes para el posicionamiento del extremo del manipulador robótico. En la Figura 6 se puede apreciar uno de ellos.

## 6. CONCLUSIONES

Se describen a continuación los aspectos positivos del sistema implementado y los principales inconvenientes que hemos encontrado.

### 6.1. Aspectos positivos del desarrollo



# IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO  
DOCENTE  
DEL AREA  
MECANICA  
DE LAS  
INGENIERIAS

FoDAMI

- Se ha logrado un desarrollo integral, desde la planificación hasta el diseño y su posterior construcción.
- Se ha logrado una herramienta didáctica muy importante para el desarrollo de cursos.
- La metodología de cálculo y diseño es aplicable a otros tipos de robots.
- Se ha logrado una electrónica robusta y sin problemas de hardware.

## 6.2. Principales inconvenientes

- La incorrecta ubicación mecánica de los Encoders implica no tener la mayor resolución disponible, por tal motivo la velocidad del movimiento de cada eje se redujo para aumentar la estabilidad del sistema y evitar oscilaciones propias de su dinámica.
- Las tensiones de entradas y salidas del controlador maestro y los controladores de eje se debieron adaptar.
- Los movimientos en los motores del tipo paso a paso es muy rígida y la única variable a controlar en los mismos es la velocidad. Por tal motivo se implementó un control de posición a lazo cerrado del tipo proporcional actuando sobre la velocidad de los motores.

## 7. REFERENCIAS

- [1] Bravo, Gerardo A.; Cirera, Eduardo A., Controlador de tres ejes para manipulador, CAIM 2010, San Juan-Argentina, 2010.
- [2] José M. Angulo Usategui, MICROCONTROLADORES AVANZADOS dsPIC, Thomson, España, 2006.
- [3] Lucio Di Jacio, Programming 32-bit Microcontrollers in C, Elsevier, USA, 2008.