

# PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

ESCUELA DE POSGRADO



PONTIFICIA  
**UNIVERSIDAD  
CATÓLICA**  
DEL PERÚ

## DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SUBSISTEMA ELECTRÓNICO PARA EL CONTROL DE UN BRAZO ROBOT DE 5 GDL

Tesis para optar el grado de Magíster en  
Ingeniería Mecatrónica

Presentado por:  
Ing. WILLY EDUARDO CARRERA SORIA

ASESOR:  
Ph.D. Julio César Tafur Sotelo

JURADO:  
Mg. Benjamín Eliseo Barriga Gamarra  
Ph.D. Julio César Tafur Sotelo  
Mg. Eddie Angel Sobrado Malpartida

Julio 2015

Lima – Perú



© 2014, Willy Carrera Soria

Se autoriza la reproducción total o parcial,  
con fines académicos a través de cualquier  
medio o procedimiento, incluyendo la cita  
Bibliográfica del documento.

## RESUMEN

El programa de Maestría de Ingeniería Mecatrónica de la PUCP desea contar con un brazo robot de 5GDL, teniendo a la fecha la estructura mecánica; ahora desea agregarle la parte electrónica para la enseñanza de robótica avanzada.

El desarrollo del sistema experimental ha sido dividido en 3 partes en el curso Proyecto Electrónico 1 de la especialidad de Ingeniería Electrónica y está generando 3 tesis de pregrado, una ya sustentada; acá se abordan las partes más relevantes de esos trabajos: el hardware electrónico, la interface de usuario, y el control electrónico que permite la cinemática directa e inversa, así como el seguimiento de una trayectoria.

Lo que se ha desarrollado en esta tesis en la parte de hardware es la selección de los motores, excitadores y sensores de posición, se ha diseñado e implementado un controlador Maestro y 5 controladores Esclavos. En la parte de software se ha desarrollado una interfaz desde una PC en Visual Basic para que se ingresen los movimientos que debe realizar cada una de sus 5 articulaciones del brazo robot, ya sea de un punto inicial a otro final, o para que describa una trayectoria. También se ha realizado la comunicación en lenguaje C entre la mencionada interfaz y el controlador maestro, y la comunicación de este último con los 5 controladores esclavos; finalmente se ha realizado un control PD en cada articulación. El brazo robot cuenta con sensores de fines de carrera y detectores de sobre corriente que cuando se activen harán que el robot detenga su movimiento para evitar cualquier accidente.

## DEDICATORIA



*A mi adorada esposa y a mis queridos hijos  
por su paciencia y comprensión.*

*A mis padres Pablo y María, y a mis hermanos Pablo y Alejandro,  
lejos pero siempre unidos.*

## AGRADECIMIENTOS

Con mucho aprecio a mi asesor Julio Tafur y al ingeniero Benjamín Barriga por su confianza y apoyo incondicional.

Un agradecimiento especial a los ingenieros mecánicos Andrés Garcés por la elaboración de los planos y a Jorge Fernández Jefe del Laboratorio de Manufactura por su siempre voluntariosa ayuda.

A Richard Luna por armar y desarmar n veces las articulaciones del robot aún en condiciones y con herramientas no ideales.

A todos ellos muchas gracias sobre todo por su amistad.



## ÍNDICE DE CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
RESUMEN .....	iii
DEDICATORIA .....	iv
AGRADECIMIENTOS.....	v
ÍNDICE DE CONTENIDO .....	vi
INDICE DE TABLAS .....	viii
ÍNDICE DE FIGURAS .....	ix
INTRODUCCIÓN .....	1
CAPÍTULO 1 .....	2
ASPECTOS BASES Y DATOS DE ROBÓTICA.....	2
1.1 Cinemática, dinámica y control .....	2
1.2 Estado del arte de la robótica .....	3
1.3 Conceptos generales de robots industriales .....	7
1.3.1 Diagrama del cuerpo libre del brazo robot .....	7
1.3.2 Espacio de trabajo del robot .....	8
1.3.3 Cálculos de las fuerzas de las uniones.....	10
1.4 Hardware de brazos robot .....	10
CAPÍTULO 2 .....	12
CINEMÁTICA Y DINÁMICA DEL ROBOT DE 5 GDL.....	12
2.1 Cinemática Directa .....	12
2.2 Cinemática Inversa .....	25
2.3 Dinámica Directa .....	27
2.4 Dinámica Inversa .....	29
CAPÍTULO 3 .....	30
ESTRUCTURA MECÁNICA DEL BRAZO ROBOT DE 5 GDL .....	30
3.1 Ensamblaje mecánico del brazo robot de 5 GDL.....	30
CAPÍTULO 4 .....	31
DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL CIRCUITO ELECTRÓNICO.....	31
4.1 Alcance .....	31
4.2 Diagrama de Bloques.....	31

4.2.1 Bloque Sensor.....	32
4.2.2 Bloque de Potencia.....	33
4.2.3 Bloque Excitador.....	33
4.2.4 Bloque Control.....	34
4.2.5 Bloque Interface de Comunicación .....	38
4.2.6 Bloque Fuente de Alimentación .....	40
CAPÍTULO 5 .....	41
SOFTWARE Y CONTROL DEL BRAZO MANIPULADOR .....	41
5.1 Control Cinemático.....	41
5.2 Control Dinámico.....	41
5.2.1 Efecto del harmonic drive .....	41
5.2.2 Control PD .....	42
5.3 Software .....	49
5.3.1 Programa del Control Maestro.....	49
5.3.2 Programa del Control Esclavo .....	49
5.3.3 Interfaz de Usuario .....	50
CAPÍTULO 6 .....	55
ENSAYOS Y RESULTADOS DEL BRAZO ROBOT DE 5 GDL .....	55
6.1 PRUEBA DE ERROR MÁXIMO DE CADA MOTOR.....	55
6.2 PRUEBA DE ERROR DE TRAYECTORIA DEL BRAZO 4.....	58
CONCLUSIONES .....	64
TRABAJOS A FUTURO .....	66
BIBLIOGRAFÍA.....	67

## INDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Ventas anuales y estimadas de robots industriales multipropósitos en países seleccionados en unidades.....	6
Tabla 2. Parámetros D-H del robot de 5 gdl .....	20
Tabla 3. Pesos de cada eslabón del robot de 5 GDL.....	27
Tabla 4. Factores de reducción de los Harmonic Drive .....	29
Tabla 5. Lista de los diferentes sensores de posición para cada motor.....	32
Tabla 6. Lista de los motores que usará el brazo robot de 5GDL .....	33
Tabla 7. Cuadro de voltajes y corrientes de los motores .....	40
Tabla 8. Valores calculados de Ra y La para cada motor .....	44
Tabla 9. Valores de par de fricción de cada motor .....	45
Tabla 10. Valores de masas, cargas y distancias .....	45
Tabla 11. Momentos de Inercia de la planta, reductor, rotor y de cada actuador.....	46
Tabla 12. Comparación entre La/Ra y Jm/fm .....	46
Tabla 13. Tabla de los valores de las constantes KP y KD para cada controlador .....	48
Tabla 14. Errores máximos de cada articulación .....	58
Tabla 15. Valores medidos de las coordenadas x,y,z en cm del extremo del 4to brazo para la trayectoria A.....	58
Tabla 16. Volumen de error del extremo del 4to brazo para la trayectoria A .....	59
Tabla 17. Valores medidos de las coordenadas x,y,z del extremo del 4to brazo para la trayectoria B .....	59
Tabla 18. Volumen de error del extremo del 4to brazo para la trayectoria B .....	60
Tabla 19. Valores medidos de las coordenadas x,y,z en cm del extremo del 4to brazo para la trayectoria 1 .....	60
Tabla 20. Volumen de error del extremo del 4to brazo para la trayectoria 1.....	61
Tabla 21. Valores medidos de las coordenadas x,y,z en cm del extremo del 4to brazo para la trayectoria 2 .....	61
Tabla 22. Volumen de error del extremo del 4to brazo para la trayectoria 2.....	61
Tabla 23. Valores medidos de las coordenadas x,y,z en cm del extremo del 4to brazo para la trayectoria 3 .....	62
Tabla 24. Volumen de error del extremo del 4to brazo para la trayectoria 3.....	62
Tabla 25. Valores medidos de las coordenadas x,y,z en cm del extremo del 4to brazo para la trayectoria 4 .....	62
Tabla 26. Volumen de error del extremo del 4to brazo para la trayectoria 4.....	63
Tabla 27. Valores medidos de las coordenadas x,y,z en cm del extremo del 4to brazo para la trayectoria 5 .....	63
Tabla 28. Volumen de error del extremo del 4to brazo para la trayectoria 5.....	63



ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Ventas anuales mundiales estimadas de robots industriales .....	4
Figura 2. Ventas anuales mundiales estimadas de robots industriales por continente .....	4
Figura 3. Suministro anual de robots industriales por las principales industrias.....	5
Figura 4. a) Brazo robot de 4 DOF y b) 3 DOF [9] .....	7
Figura 5. Brazo robot de 5 DOF [9] .....	8
Figura 6. Manipulador Cartesiano y Manipulador Gantry .....	8
Figura 7 . Manipulador Cilíndrico y Manipulador Esférico .....	9
Figura 8. Manipulador SCARA y Manipulador Antropomórfico.....	9
Figura 9. Manipulador con paralelogramo y Manipulador Paralelo.....	9
Figura 10. Fuerzas y distancias de un Robot de 3 GDL [9].....	10
Figura 11. Sistemas de referencia del robot de 5 grados de libertad .....	12
Figura 12. Eslabones y articulaciones .....	15
Figura 13 . Desplazamiento axial y desplazamiento radial.....	15
Figura 14. Sistemas de referencia S0 y S1 .....	16
Figura 15. Sistema de referencia S'0.....	16
Figura 16. Sistema de referencia S''0 .....	16
Figura 17. 1er GDL.....	16
Figura 18. Sistemas de referencia S1 y S2.....	17
Figura 19. 2do GDL.....	17
Figura 20. Sistemas de referencia S2 y S3.....	18
Figura 21. 3er GDL.....	18
Figura 22. Sistemas de referencia S3 y S4.....	18
Figura 23. Sistema de referencia S'3.....	18
Figura 24. Sistema de referencia S''3 .....	19
Figura 25. 4to GDL.....	19
Figura 26. Sistemas de referencia S4 y S5.....	19
Figura 27. 5to GDL.....	20
Figura 28. Pantalla del Matlab.....	23
Figura 29. Nueva posición según articulaciones para segunda posición.....	24
Figura 30. Nueva posición según articulaciones para tercera posición.....	24
Figura 31. Articulaciones que definen la posición y orientación .....	25
Figura 32. Vista superior y lateral del extremo del robot.....	26
Figura 33. Diagrama de bloques del circuito electrónico .....	31
Figura 34. Conexión de las llaves de fin de carrera.....	32
Figura 35. CI del excitador .....	34
Figura 36. Amplificador No Inversor .....	34
Figura 37. Diagrama esquemático del Control Esclavo 1 .....	35
Figura 38. Circuito impreso de la cara cobreada de un control esclavo .....	36

Figura 39. Circuito impreso de la cara de los componentes.....	36
Figura 40. Diagrama esquemático del Control Maestro.....	37
Figura 41. Cara cobreada del control maestro .....	37
Figura 42. Cara de los componentes del control maestro .....	38
Figura 43. Tarjeta de conversión USB a RS232 .....	38
Figura 44. Circuito esquemático de conversión USB a DB9 ida y vuelta.....	39
Figura 45. Conexión entre un microcontrolador Maestro y 5 microcontroladores Esclavos .....	39
Figura 46. Modelo de planta a controlar por .....	42
Figura 47. Esquema de bloques de una junta articular .....	43
Figura 48. Diagrama de bloques simplificado de una junta articular .....	44
Figura 49. Circuito para determinar Ra y La en cada motor [8].....	44
Figura 50. Diagrama de bloques de cada controlador y articulación .....	48
Figura 51. Diagrama de flujo del control maestro .....	49
Figura 52. Diagrama de flujo de cada control esclavo .....	50
Figura 53. Interfaz gráfica del usuario.....	51
Figura 54. Vista de la interfaz de usuario para realizar cinemática directa.....	52
Figura 55. Vista de la interfaz de usuario cuando se requiere una calibración .....	52
Figura 57. Diagrama de flujo del programa de la interfaz de usuario .....	53
Figura 56. Trama que envía la interfaz hacia el controlador Maestro.....	54
Figura 58. Brazo robot de 5 GDL.....	55
Figura 59. a) Posición a 0° del motor 1                      b) Posición a 90° del motor 1 .....	56
Figura 60. a) Posición a 90° del motor 2                      b) Posición a 50° del motor 2.....	56
Figura 61. a) Posición a 10° del motor 3                      b) Posición a 40° del motor 3.....	57
Figura 62. a) Posición a 0° del motor 4                      b) Posición a 70° del motor 4 .....	57

## INTRODUCCIÓN

Los robots manipuladores poseen características ideales para tareas repetitivas en ambientes conocidos o en entornos peligrosos, es por eso que hace mas de 40 años son muy utilizados en la industria del automóvil y en la de manufactura. Actualmente hay otros sectores que también los requieren como la medicina, minería, vigilancia, telepresencia entre otros; por lo que su estudio es una necesidad imperiosa.

La Maestría de Ingeniería Mecatrónica de la PUCP dispone de la estructura mecánica de un brazo robot de 5GDL y los accionamientos eléctricos.

Una solución es comprar un brazo robot industrial, y la otra es construir su propio robot; la mejor opción es esta última tanto desde el punto de vista económico, como también porque con ello se adquiere un conocimiento importante en el desarrollo de control de robots.

El objetivo general de la presente tesis es agregarle la parte electrónica a la estructura mecánica del brazo robot de 5 GDL, para la enseñanza de robótica avanzada, así como para su empleo en futuras aplicaciones de robótica.

Como objetivos específicos se tienen:

Diseñar o seleccionar los sensores de posición de cada motor,

Diseñar o seleccionar los excitadores de cada motor,

Diseñar y construir la tarjeta de control,

Seleccionar la interface de comunicación,

Diseñar o seleccionar la fuente de alimentación,

Diseñar la interface de usuario,

Diseñar los programas de control de los controles esclavos y del maestro,

Evaluar el funcionamiento del brazo robot con la electrónica incorporada.

## CAPÍTULO 1

### ASPECTOS BASES Y DATOS DE ROBÓTICA

#### 1.1 Cinemática, dinámica y control [1]

La cinemática es una rama de la física que estudia las leyes del movimiento sin tener en cuenta las fuerzas o pares que lo originan, en el caso de un brazo robot relaciona las variables articulares con la posición y orientación del extremo del brazo robot; es decir estudia la trayectoria en función del tiempo, y cómo la velocidad y aceleración definen la trayectoria, sabiendo una de ellas o ambas, sabremos la trayectoria del extremo del robot.

La matriz Jacobiana y su inversa relacionan las velocidades articulares con las cartesianas y viceversa respectivamente, estas varían instante a instante por lo que deberán calcularse en cada punto de la trayectoria. Cuando el determinante de la matriz Jacobiana se hace cero no se puede tener una matriz Jacobiana inversa que relaciona la velocidad cartesiana con la articular, por lo que una variación pequeña de las coordenadas cartesianas implica un movimiento muy grande de las coordenadas articulares que generalmente los motores no son capaces de realizar. A esta condición se le conoce como configuración singular y se debe evitar su paso anulando la velocidad de la articulación que lo genere permaneciendo desenergizado ese motor durante ese tramo de trayectoria.

Se puede resolver el modelo cinemático haciendo uso de las transformaciones homogéneas así como también a través de los cuaternios, siendo este último menos complejo computacionalmente pues solo necesita 4 componentes.

En mecánica clásica, la dinámica es parte de ella que se encarga del estudio del movimiento de los cuerpos debido a las fuerzas que actúan sobre ellos; en el caso del brazo robot la dinámica vincula su movimiento (en coordenadas articulares o espaciales) en función con las fuerzas o pares en cada articulación o en su extremo y donde también intervienen la longitud, masas y otros parámetros del robot.

Para este caso que se cuenta con la estructura mecánica del brazo robot de 5 GDL, la dinámica nos ayuda a simular su movimiento, dimensionar sus actuadores y diseñar su control dinámico el mismo cuyo modelo debe también incluir la dinámica de sus sistemas de transmisión de fuerzas, de sus actuadores, de sus excitadores y de sus controles electrónicos los cuales incrementan la inercia y rozamiento típico de la estructura

mecánica, así como agregan nuevos parámetros como saturaciones de los circuitos electrónicos.

El control cinemático para cada articulación lo que hace es, definida la trayectoria por el usuario en el espacio cartesiano, la muestrea para obtener una cantidad finita de ellos, luego por transformación homogénea inversa los convierte en coordenadas articulares, después interpola obteniendo una expresión temporal de cada coordenada articular que se aproxime lo más posible a la trayectoria cartesiana, y finalmente la muestrea generando un conjunto de valores angulares (articulares) que serán las referencias actualizadas para el control dinámico. Lo que insume demasiado tiempo de procesamiento es el cálculo reiterado de la transformación homogénea inversa, y como se sabe que entre la velocidad articular  $\dot{q}(t)$  y la velocidad en el espacio cartesiano  $j(t)$  cumplen con la siguiente relación:

$$\dot{q}(t) = J^{-1}(q)j(t)$$

se usa esto para el bloque de control cinemático del robot. Entonces para el cumplimiento de esta ecuación se requiere de la trayectoria  $j$ , su derivada y el cálculo de  $J^{-1}$  que varía para cada  $q$ ; hecho esto se obtiene los puntos  $\dot{q}(t)$  que se deben interpolar, por lo tanto es importante también el tipo de interpolador.

El control dinámico permite que el robot se desplace por la trayectoria calculada por el control cinemático haciendo uso del modelo dinámico del brazo robot.

Normalmente el modelo dinámico de un brazo robot es no lineal, multivariable, acoplado y de parámetros variables, pero con ciertas simplificaciones como por ejemplo desacoplado, se consiguen resultados bastante reales.

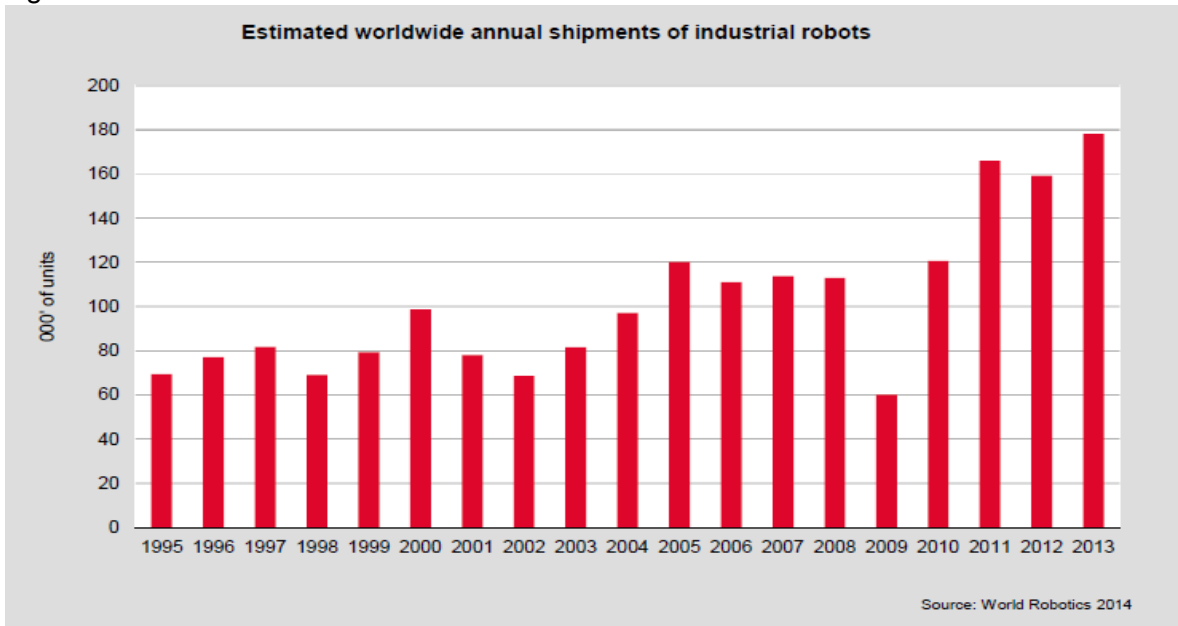
Se puede realizar control dinámico tanto en el espacio articular como en el espacio cartesiano.

## 1.2 Estado del arte de la robótica [2]

- **Estadística de uso de robots en la industria**

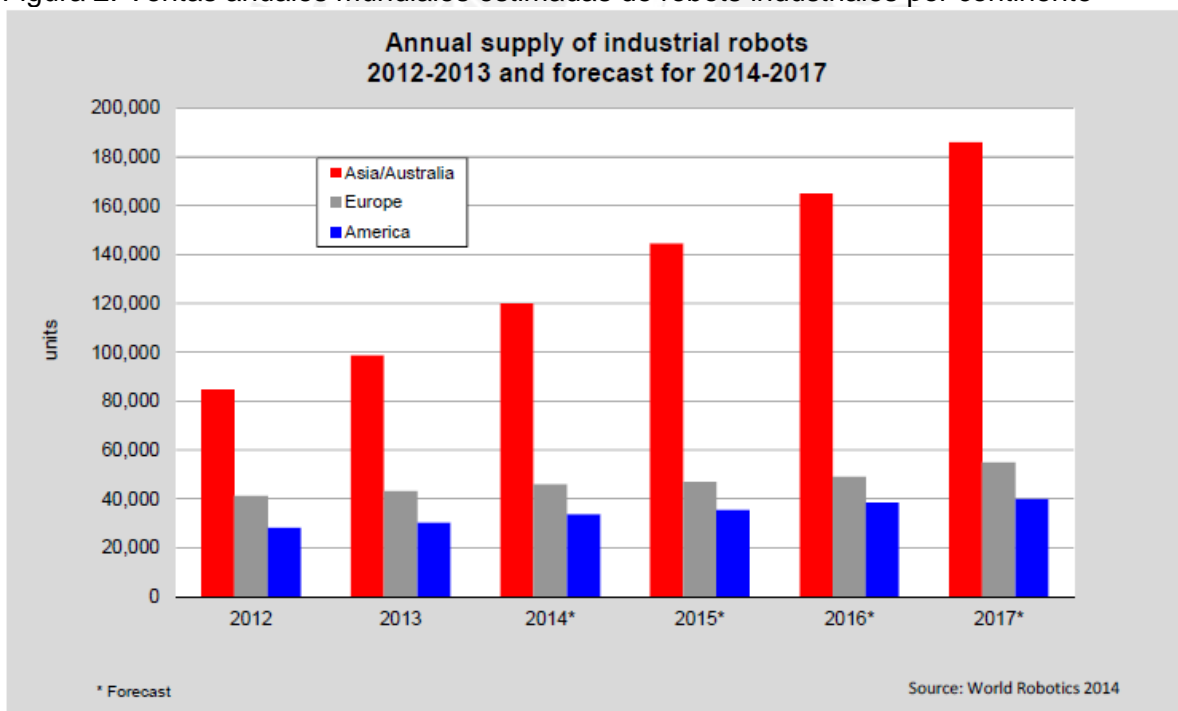
De acuerdo a la Federación Internacional de Robótica la mayor venta de robots industriales se realizó en el año 2013 tal como lo muestran las Figuras 1 y 2.

Figura 1. Ventas anuales mundiales estimadas de robots industriales



Elaboración: [2]

Figura 2. Ventas anuales mundiales estimadas de robots industriales por continente



Elaboración: [2]

Asia, incluyendo Australia y Nueva Zelanda, fue la región más grande de ventas de robots industriales, 17% más que en 2012. La República Popular China es el mercado más grande de robot en el 2013, sus ventas fueron casi tres veces mayor que en 2012. Le siguen Japón, Corea, Taiwan, y Tailandia.

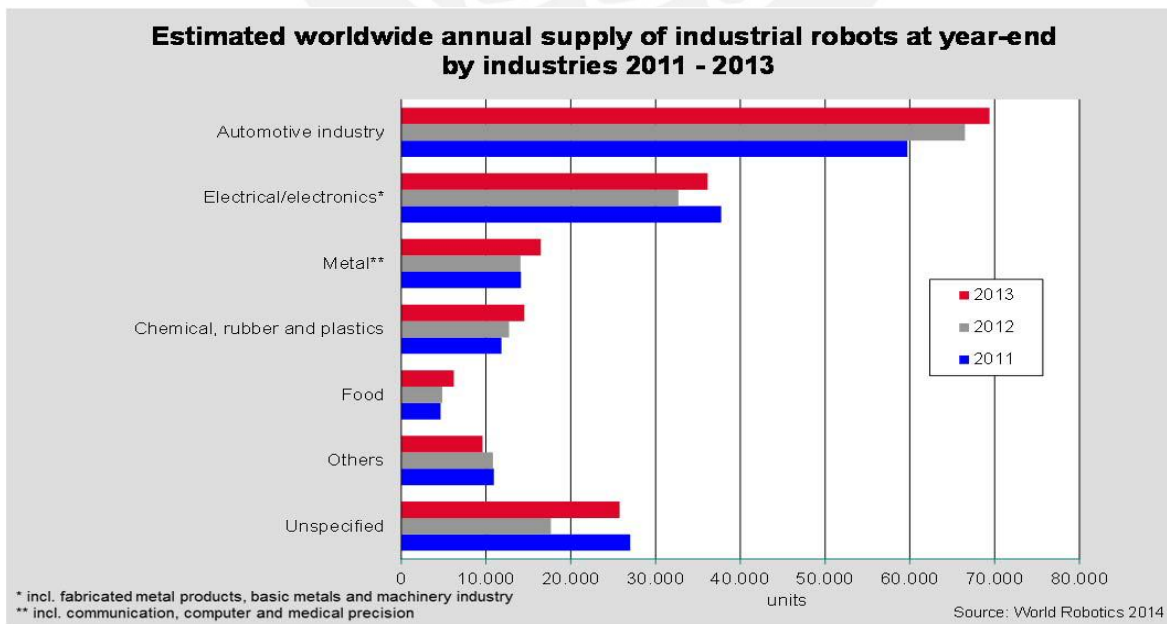
En el 2013, las ventas de robots industriales en Europa alcanzaron casi el pico del 2011. Cerca del 5% más que en 2012. Los responsables del crecimiento fueron los fabricantes de automóviles. Alemania es el mayor mercado de robots en Europa, incrementó 4% más que en 2012. Los proveedores de autos controlaron el crecimiento y el aumento de las inversiones del robot. Todas las demás industrias, la industria en general, redujeron las inversiones en el 2013 en comparación con el 2012. Le siguen España, Inglaterra y Francia.

En América durante el 2013, se vendió un 8% más que en 2012, alcanzando una vez más un nuevo nivel máximo, como en el 2011 y 2012. Los responsables de este crecimiento fueron la industria en general y los proveedores de piezas de automóviles. Estados Unidos y Canadá son sus representantes, le siguen México y Brasil.

- **Industrias que usan robots**

La Figura 3 muestra el suministro anual de robots industriales por las principales industrias, siendo la industria automotriz la más importante de robots industriales, esta industria fue una de los responsables principales de una fuerte recuperación de ventas de robots. Le sigue la industria eléctrica/electrónica (incluye computadoras y equipos, radio, TV y dispositivos y equipos de comunicación e instrumentos de precisión y ópticos médicos) con un 20% del mercado total en el 2013. La industria del metal y la maquinaria un 9%, la industria del caucho y los plásticos cubre el 7% de las ventas, y la industria farmacéutica y cosmética un 4%.

Figura 3. Suministro anual de robots industriales por las principales industrias



Elaboración: [2]

En la tabla 1 se muestra las ventas de los años 2012 y 2013, y los estimados anuales de robots industriales multipropósitos en países seleccionados en unidades según la IFR.

Tabla 1. Ventas anuales y estimadas de robots industriales multipropósitos en países seleccionados en unidades.

Country	2012	2013	2014*	2017*
<b>America</b>	<b>28,137</b>	<b>30,317</b>	<b>33,700</b>	<b>40,000</b>
Brazil	1,645	1,398	2,000	3,500
North America (Canada, Mexico, USA)	26,269	28,668	31,500	36,000
Other America	223	251	200	500
<b>Asia/Australia</b>	<b>84,645</b>	<b>98,807</b>	<b>120,000</b>	<b>186,000</b>
China	22,987	36,560	50,000	100,000
India	1,508	1,917	2,500	5,000
Japan	28,680	25,110	28,000	32,000
Republic of Korea	19,424	21,307	23,500	26,000
Taiwan	3,368	5,457	6,000	9,000
Thailand	4,028	3,221	4,200	7,000
other Asia/Australia	4,650	5,235	5,800	7,000
<b>Europe</b>	<b>41,218</b>	<b>43,284</b>	<b>46,000</b>	<b>55,000</b>
Czech Rep.	1,040	1,337	1,800	2,600
France	2,956	2,161	2,300	2,800
Germany	17,528	18,297	19,500	21,000
Italy	4,402	4,701	4,800	5,500
Spain	2,005	2,764	3,000	3,800
United Kingdom	2,943	2,486	2,500	3,500
other Europe	10,344	11,538	12,100	15,800
<b>Africa</b>	<b>393</b>	<b>733</b>	<b>800</b>	<b>1,000</b>
not specified by countries**	4,953	4,991	4,500	6,000
<b>Total</b>	<b>159,346</b>	<b>178,132</b>	<b>205,000</b>	<b>288,000</b>

Sources: IFR, national robot associations.

\*forecast

\*\* reported and estimated sales which could not be specified by countries

Elaboración: [2]

En [17,18,19,20,21,22,23,24 y 25] se puede apreciar las diversas aplicaciones de los robots y ello ha sido suficiente para ver claramente el auge que ha tenido la robótica en estos 64 años desde su aparición, donde se inició en la industria y aún permanece en ella, a otras aplicaciones en tierra, agua, aire y espacio exterior.

En cuanto a su aplicación en la industria como Brazo Robot, que es donde se tiene la mayor cantidad de robots en el mundo, China, Japón y Estados Unidos como sus abanderados, se ve que es un éxito por todas las ventajas que trajo tanto para los propietarios de las fábricas como para la economía de sus países.

También se ve que la tecnología para desarrollar este tipo de robot es totalmente alcanzable como objetivo, ya que se tiene el conocimiento y los equipos necesarios así como también acceder a los componentes en el mercado nacional o se puede importar en tiempos cortos.



### 1.3 Conceptos generales de robots industriales

Los robots manipuladores están conformados de **uniones** (brazos, tramos, eslabones) conectados por **junturas** ya sea **rotatorias** que simulan el codo de una persona, o **lineales** que brindan un desplazamiento lineal entre las uniones.

El número de junturas determina el **grado de libertad** (GDL) del manipulador.

Es **espacio de trabajo**, algunas veces conocido como espacio alcanzable, son todos los lugares que el efector final puede alcanzar. El espacio de trabajo depende del número de grados de libertad (limitaciones de rotación / traslación), longitud de cada brazo, ángulo en que se sujeta algo, etc. El espacio de trabajo es muy dependiente de la configuración del robot. Finalmente el robot manipulador además de los brazos y las uniones, está constituido por la herramienta del efector final, sensores externos e internos, acondicionadores de señal, excitadores, actuadores (motores eléctricos, hidráulicos o neumáticos), circuito de control, programa de control y comunicación, interfase de comunicación con la PC, programa de la PC y la fuente de alimentación.

#### 1.3.1 Diagrama del cuerpo libre del brazo robot

El método aceptado para dibujar el diagrama de cuerpo libre de brazos robots es La Convención Denavit-Hartenberg (DH). En la figura 4a) se muestra un brazo robot de 4 GDL, donde la juntura inferior gira sobre su base y las restantes junturas también giran sobre distintos planos. En la figura 4b) las junturas inferiores giran sobre planos paralelos a la base y la última juntura es de desplazamiento vertical. Finalmente la figura 5 es un brazo robot de 5GDL similar al que aborda esta tesis, las junturas extremas giran  $360^\circ$  y las restante giran en planos paralelos.

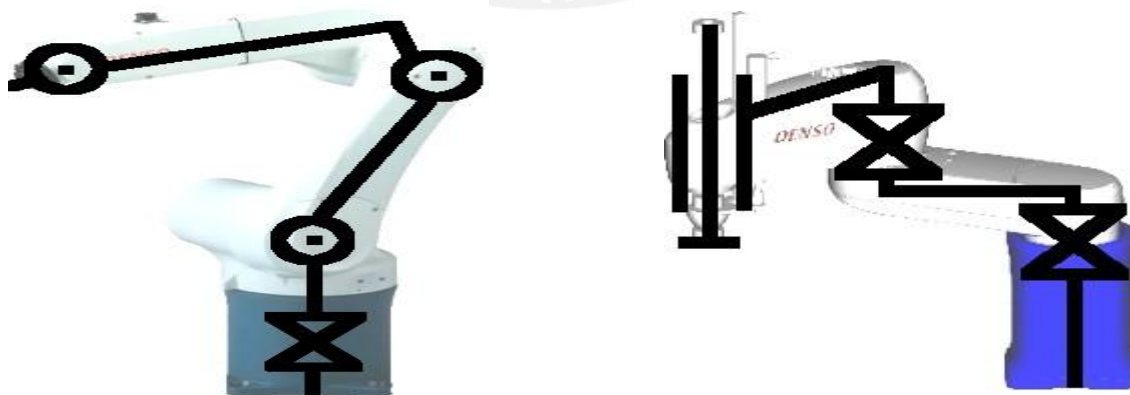


Figura 4. a) Brazo robot de 4 DOF y b) 3 DOF [9]

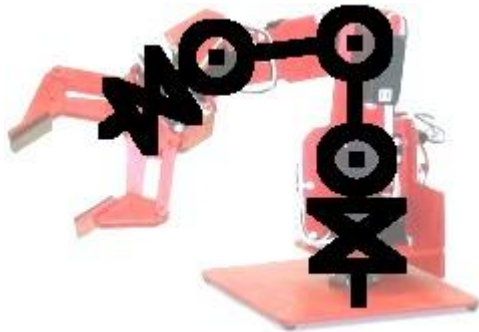


Figura 5. Brazo robot de 5 DOF [9]

### 1.3.2 Espacio de trabajo del robot

El **espacio de trabajo** de un robot manipulador es el conjunto total de coordenadas espaciales alcanzado por el efector final y depende de la geometría del robot así como de las restricciones mecánicas de las uniones. Está dividido en el **espacio de trabajo alcanzable** que es el conjunto completo de puntos que puede alcanzar el manipulador; y el **espacio de trabajo dextroso**, constituido por aquellos puntos que el manipulador puede alcanzar con una orientación arbitraria del efector final. Este último es parte del primero.

En las figuras desde la 6 hasta la 9 se muestran algunos robots y sus respectivos espacios de trabajo [1]:

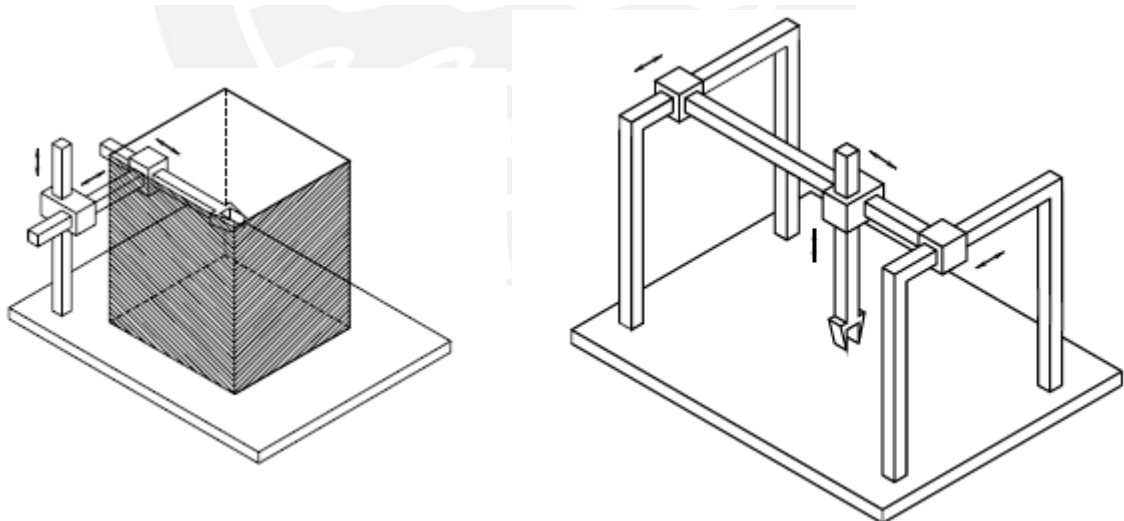


Figura 6. Manipulador Cartesiano y Manipulador Gantry

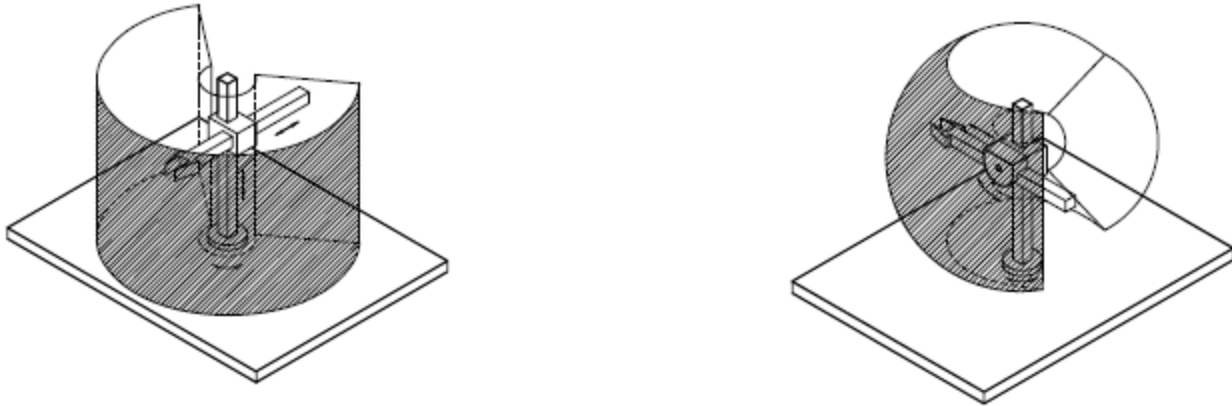


Figura 7 . Manipulador Cilíndrico y Manipulador Esférico

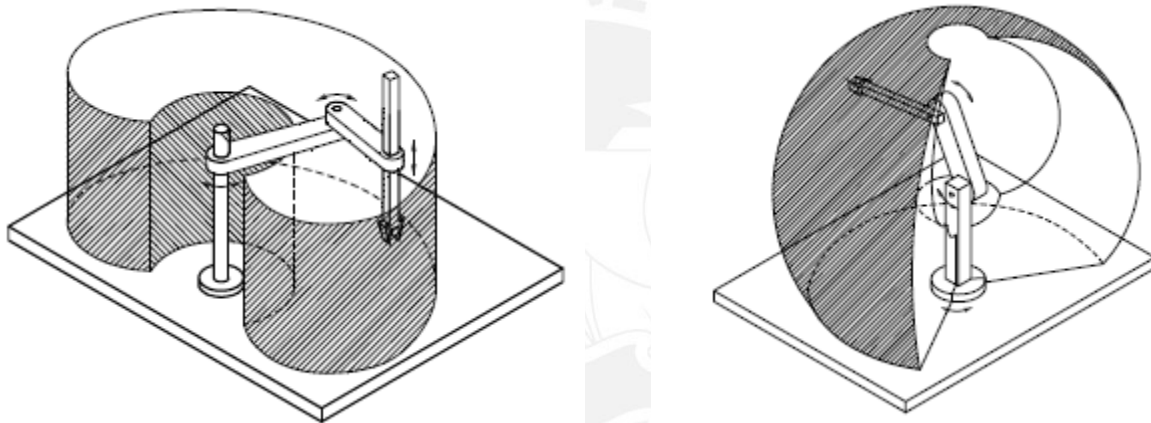


Figura 8. Manipulador SCARA y Manipulador Antropomórfico

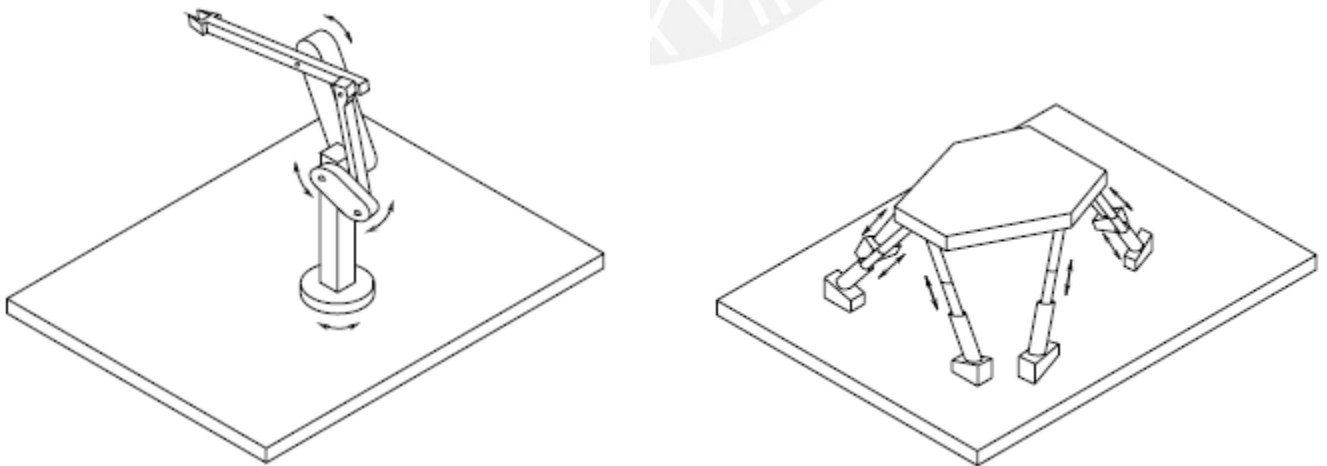


Figura 9. Manipulador con paralelogramo y Manipulador Paralelo

### 1.3.3 Cálculos de las fuerzas de las uniones

Este cálculo nos permite determinar las características de los motores del brazo robot y para ello estos motores deben ser capaces de poder mover el peso de cada unión y el peso máximo que debe mover el brazo robot en la peor posición (uniones extendidas horizontalmente), de manera de asegurarse que aún en esa condición, el brazo robot se moverá. Calculadas las fuerzas se multiplican por las distancias a las juntas para obtener los momentos de cada motor.

Como ejemplo consideremos el brazo robot de 3GDL mostrado en la figura 10, donde la información requerida es:

- el peso en cada tramo ( $W1$  y  $W2$ ),
- el peso de cada unión ( $W4$ ),
- el peso del objeto a transportar ( $W3$ ) y
- la longitud de cada tramo ( $L1$  y  $L2$ ).

Se calculan los torques del robot manipulador, y se considera que el centro de masa de cada tramo está en la mitad de su longitud:

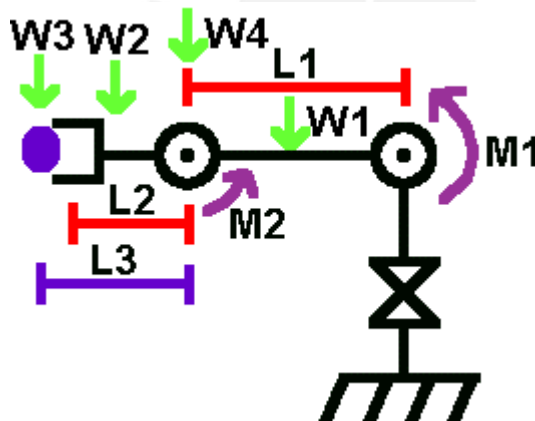


Figura 10. Fuerzas y distancias de un Robot de 3 GDL [9]

Torque de la junta 1:

$$M1 = L1/2 * W1 + L1 * W4 + (L1 + L2/2) * W2 + (L1 + L3) * W3$$

Torque de la junta 2:

$$M2 = L2/2 * W2 + L3 * W3$$

### 1.4 Hardware de brazos robot

De acuerdo a la información encontrada en [10,11,12,13,14,15 y 16], se puede apreciar de los casos analizados que cuando se trata de construir prototipos de brazos robots, la mayoría de ellos utilizan para el hardware, Circuitos Integrados de Aplicación Específica

(ASICs), pocos usan elementos discretos, lo hacen básicamente por motivos de ahorro. En cuanto a software, todos emplean software comerciales.

En el caso de brazos robots industriales comerciales, no dan información de su hardware ni del software que emplean, es el Know-How de su negocio y en sus catálogos o información comercial solo figuran datos como alcance, potencia, aplicación, carga máxima, etc., pero no de su electrónica.



## CAPÍTULO 2

### CINEMÁTICA Y DINÁMICA DEL ROBOT DE 5 GDL

#### 2.1 Cinemática Directa

Consiste en determinar la posición y orientación del extremo del robot en función de las coordenadas de cada articulación; es decir se plantea la siguiente solución:

$$x = f_x(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5)$$

$$y = f_y(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5)$$

$$z = f_z(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5)$$

$$\alpha = f_\alpha(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5)$$

$$\beta = f_\beta(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5)$$

$$\gamma = f_\gamma(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5)$$

Para ello haremos uso de las matrices homogéneas de transformación T por lo tanto se necesita determinar los diferentes sistemas de referencia solidarios a cada eslabón del robot, incluyendo el sistema de referencia fijo que se colocará en la base del robot  $X_0Y_0Z_0$ , tal como se muestra en la figura 11.

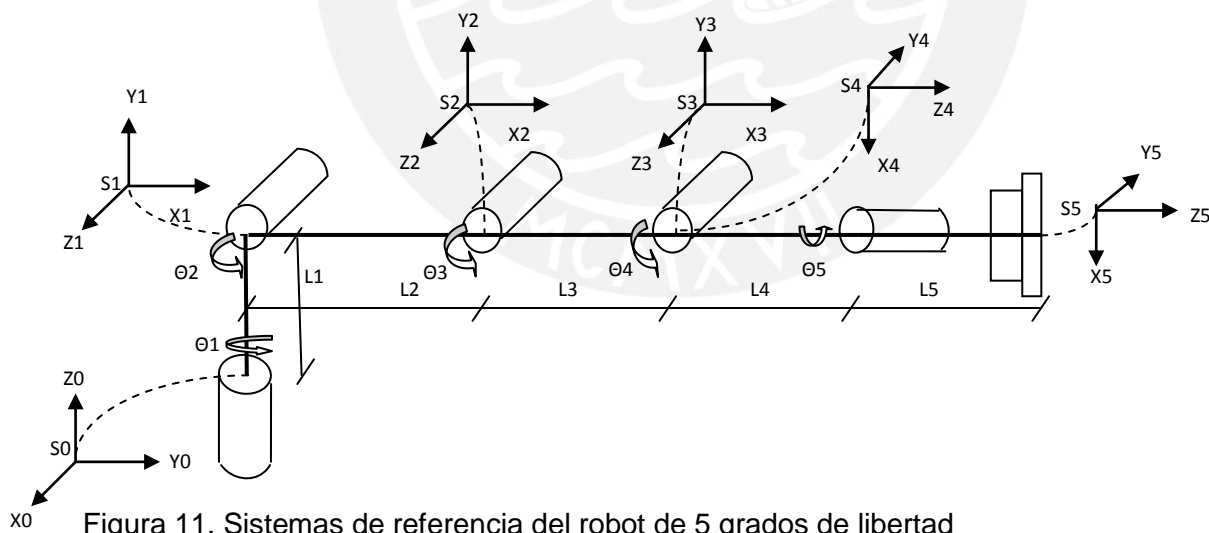


Figura 11. Sistemas de referencia del robot de 5 grados de libertad

Según la transformación homogénea  ${}^{i-1}A_i$  es la matriz que relaciona a 2 uniones continuas de un robot, por lo tanto  ${}^0A_1$  representa la posición y orientación del sistema de referencia solidario al primer eslabón con respecto al sistema de referencia solidario a la base,  ${}^1A_2$  describe la posición y orientación del segundo eslabón respecto al primero y así sucesivamente.

La posición y orientación del último eslabón del robot de 5 grados de libertad respecto a la base, será:

$${}^0A_5 = {}^0A_1 {}^1A_2 {}^2A_3 {}^3A_4 {}^4A_5$$

Según Denavit y Hartenger (D-H) las ecuaciones cinemáticas que relacionan los sistemas de coordenadas de uniones consecutivas y la del brazo completo se rigen por las siguientes transformaciones:

- Rotación alrededor del eje  $z_{i-1}$  un ángulo  $\theta_i$
- Traslación a lo largo del eje  $z_{i-1}$  una distancia  $d_i$ ; vector  $\mathbf{d}_i(0,0,d_i)$
- Traslación a lo largo del eje  $x_i$  una distancia  $a_i$ ; vector  $\mathbf{a}_i(a_i,0,0)$
- Rotación alrededor del eje  $x_i$  un ángulo  $\alpha_i$

Por lo tanto  ${}^{i-1}A_i = T(z, \theta_i) T(0,0,d_i) T(a_i,0,0) T(x, \alpha_i)$

Reemplazando las matrices y realizando el producto se tiene:

$${}^{i-1}A_i = \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i & 0 & 0 \\ s\theta_i & c\theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c\alpha_i & -s\alpha_i & 0 \\ 0 & s\alpha_i & c\alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^{i-1}A_i = \begin{bmatrix} C\theta_i & -C\alpha_i S\theta_i & S\alpha_i S\theta_i & a_i C\theta_i \\ S\theta_i & C\alpha_i C\theta_i & -S\alpha_i C\theta_i & a_i S\theta_i \\ 0 & S\alpha_i & C\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

donde  $\theta_i$ ,  $d_i$ ,  $a_i$  y  $\alpha_i$  son los parámetros D-H del eslabón  $i$ .

El algoritmo de Denavit- Hartenberg (D-H) para la obtención del modelo es:

**DH1.** 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.

**DH2.** Numerar cada articulación comenzando por 1 (la correspondiente al primer grado de libertad y acabando en  $n$ ).

**DH3.** 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.

**DH4.** Para  $i$  de 0 a  $n-1$ , situar el eje  $Z_i$ , sobre el eje de la articulación  $i+1$ .

**DH5.** 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  $Z_0$ .

**DH6.** 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  $i+1$ .

**DH7.** Situar  $X_i$  en la línea normal común a  $Z_{i-1}$  y  $Z_i$ .

**DH8.** Situar  $Y_i$  de modo que forme un sistema dextrógiro con  $X_i$  y  $Z_i$ .

**DH9.** 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  $Z_n$ .

**DH10.** 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.

**DH11.** 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.

**DH12.** 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 ( $S_i$ ).

**DH13.** Obtener  $a_i$  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 ( $S_i$ ).

**DH14.** Obtener las matrices de transformación  $i-1A_i$ .

**DH15.** Obtener la matriz de transformación que relaciona el sistema de la base con el del extremo del robot  $T = 0A_1, 1A_2 \dots n-1A_n$ .

**DH16.** 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.

Para realizar el modelado del robot de 5 GDL se usó como herramienta el toolbox de robótica de Matlab; la primera parte que corresponde a la definición gráfica del modelo virtual del robot se basó en el uso de los modelos de las articulaciones y eslabones que el toolbox presenta, para lo cual primero presentaremos estos indicando la manera en la que se los usará (ver figura 12):

- Eslabón: Estructura que une dos articulaciones representada gráficamente mediante un línea negra.
- Articulación: Estructura que corresponde a la unión de dos eslabones y que se presentan para dos posibles formas de movimiento; giro (R- revolución), desplazamiento (P-prismatic):



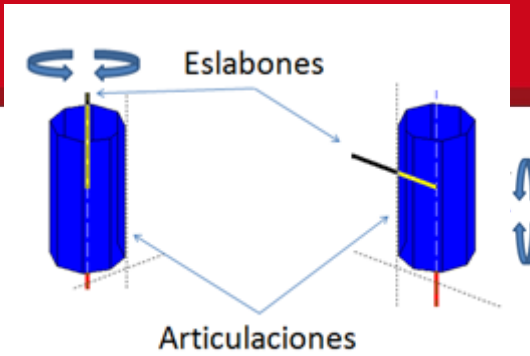


Figura 12. Eslabones y articulaciones

El de la izquierda corresponde a un giro axial del eslabón y el de la derecha a un giro radial ambos del tipo revolución (R).

En la figura 13 a la izquierda se puede ver los desplazamientos axiales, y la derecha un desplazamiento radial.

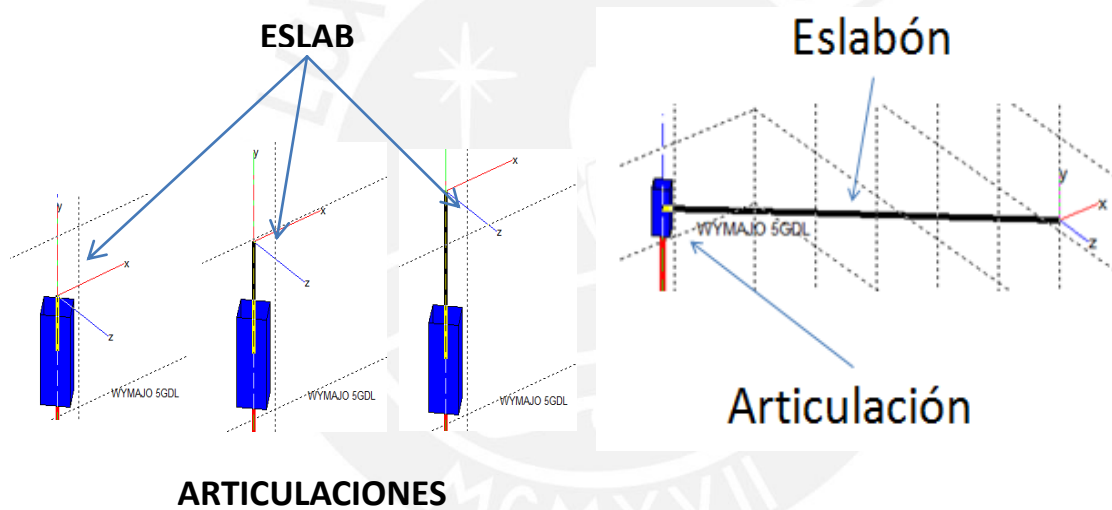


Figura 13 . Desplazamiento axial y desplazamiento radial

A continuación procederemos a usar el comando “robot” mediante el cual iremos definiendo los parámetros D-H de cada una de las articulaciones y eslabones que corresponden de forma que logremos implementar el modelo virtual.

**ARTICULACIÓN 1**

Para ver los parámetros D-H de la articulación 1 se debe tener en cuenta lo siguiente:  
De acuerdo a los ejes de las articulaciones 0 y 1 se tienen los sistemas de referencia S0 y S1 como se muestran en la figura 14.



Figura 14. Sistemas de referencia S0 y S1

Si giramos un ángulo de  $90^\circ$  en el eje Z0, es decir, un giro en el eje Z0 que va desde X0 a Y0 tendremos el sistema S'0 mostrado en la figura 15.

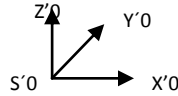


Figura 15. Sistema de referencia S'0

La distancia a lo largo del eje Z0 que separa los 2 sistemas de referencia S0 y S1 es L1, por lo tanto  $d1 = L1$ . Una vez hecho esto, los dos sistemas de referencia coinciden, por lo tanto,  $a0 = a1 = 0$ . Si ahora giramos  $\alpha = 90^\circ$  el eje X'0 de Y'0 a Z'0, entonces nos queda el sistema de referencia S''0. Ver figura 16

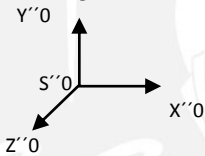


Figura 16. Sistema de referencia S''0

El cual coincide con el sistema de referencia S1. En la figura 17 se muestra el 1er Grado de Libertad de giro radial del eslabón l1 de 17.5cm de longitud.

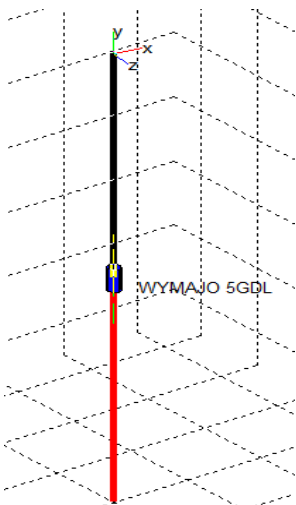


Figura 17. 1er GDL

Para el primer grado de libertad, la posición del extremo está definida por los ejes coordenados xyz de colores azul, rojo y verde. La línea roja indica el soporte el cual no interviene en el modelo.

Los parámetros D-H usados son:

GDL	$\theta$	d	a	$\alpha$
1	$\theta_1+90$	l1	0	90

### ARTICULACIÓN 2

En la figura 18 se muestran los sistemas de referencia S1 y S2, los cuales están ubicados en un mismo plano.



Figura 18. Sistemas de referencia S1 y S2

Se aprecia que el valor de  $\theta$  lo constituye el ángulo  $\theta_2$  que gira la articulación 2, al estar ambos sistemas en un mismo plano respecto a  $Z_1$ ,  $d=0$ ; la distancia entre los sistemas a lo largo del eje  $X_2$  es a igual a  $L_2$  y no hay variación de ángulo con respecto al eje  $X_2$ , entonces  $\alpha = 0$ .

En la figura 19 se muestra el 2do Grado de Libertad de giro radial del eslabón I2 de 28cm: de longitud.

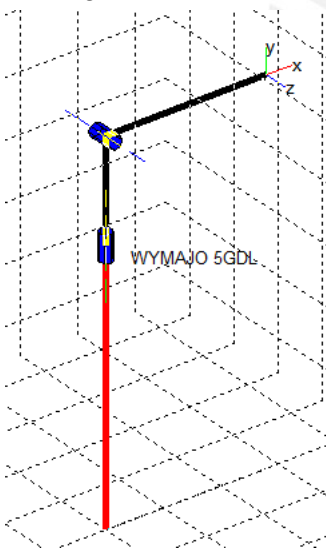


Figura 19. 2do GDL

Para el 2do grado de libertad, la posición de la articulación está en el extremo del anterior y realiza un movimiento radial.

Los parámetros D-H usados son:

GDL	$\theta$	d	a	$\alpha$
2	$\theta_2$	0	$l_2$	0

### ARTICULACIÓN 3

Exactamente lo mismo sucede entre los sistemas 2 y 3.

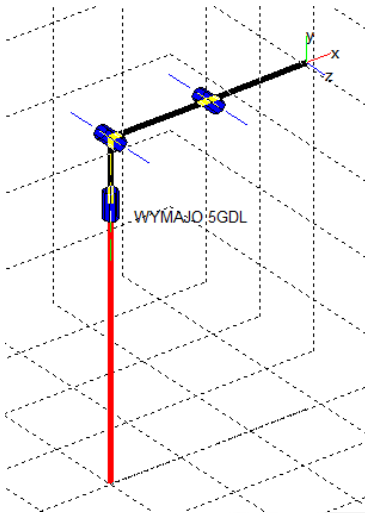
En la figura 20 se muestran los sistemas de referencia S2 y S3, los cuales están ubicados en un mismo plano.



Figura 20. Sistemas de referencia S2 y S3

Se aprecia que el valor de  $\theta$  lo constituye el ángulo  $\theta_3$  que gira la articulación 3, al estar ambos sistemas en un mismo plano respecto a  $Z_2$ ,  $d = 0$ ; la distancia entre los sistemas a lo largo del eje  $X_3$  es  $a = L_3$  y no hay variación de ángulo con respecto al eje  $X_3$ , entonces  $\alpha = 0$ .

En la figura 21 se muestra el 3er Grado de Libertad de giro radial del eslabón I3 de 28cm de longitud.



Para el 3er grado de libertad, la posición de la articulación está en el extremo del anterior y realiza un movimiento radial.

Los parámetros D-H usados son:

GDL	$\theta$	d	a	$\alpha$
3	$\theta_3$	0	$L_3$	0

Figura 21. 3er GDL

**ARTICULACIÓN 4**

Para ver los parámetros D-H de la articulación 4 se debe tener en cuenta lo siguiente:

De acuerdo a los ejes de las articulaciones 3 y 4 se tienen los sistemas de referencia S3 y S4 como se muestran en la figura 22.



Figura 22. Sistemas de referencia S3 y S4

Si giramos un ángulo  $\theta_4 = -90^\circ$  en el eje  $Z_3$ , es decir, un giro en el eje  $Z_3$  que va desde  $Y_3$  a  $X_3$  tendremos el sistema  $S'3$  mostrado en la figura 23.

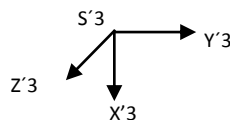


Figura 23. Sistema de referencia S'3

Si los 2 sistemas de referencia S3 y S4 coinciden, entonces las distancias  $d_4$  y  $a_4$  son ceros.

Finalmente si giramos  $\alpha_4 = -90^\circ$ , es decir  $90^\circ$  en el eje  $X'3$  en el sentido de  $Z'3$  a  $Y'3$  (negativo), tendremos el sistema  $S''3$  mostrado en la figura 24.

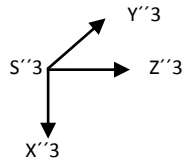


Figura 24. Sistema de referencia  $S''3$

Este sistema de referencia  $S''3$  coincide con el sistema de referencia S4 mostrado en la figura 2.14.

En la figura 25 se muestra el 4to Grado de Libertad de giro radial del eslabón I4 de 19cm de longitud.

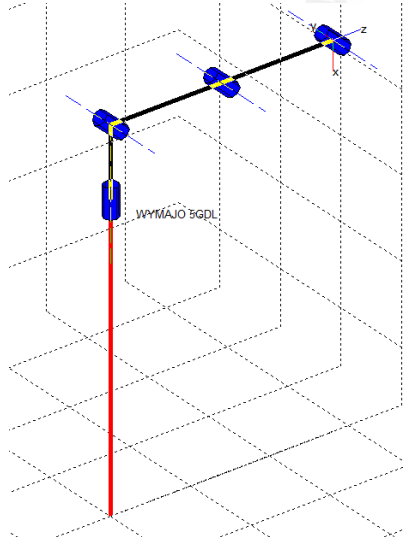


Figura 25. 4to GDL

Para el 4to grado de libertad, la posición de la articulación está en el extremo del anterior, pero se ha definido de longitud cero para poder situar la articulación del siguiente eslabón en el mismo lugar y con un movimiento axial.

Los parámetros D-H usados son:

GDL	$\theta$	$d$	$a$	$\alpha$
4	$\theta_4 - 90$	0	0	-90

### ARTICULACIÓN 5

En la figura 26 se muestran los sistemas de referencia S4 y S5, los cuales están ubicados en un mismo plano.



Figura 26. Sistemas de referencia S4 y S5

Se aprecia que el valor de  $\theta$  lo constituye el ángulo que gira la articulación  $5 = \theta_5$ ; la distancia entre los sistemas de referencia a lo largo del eje Z4 es  $d = L_4 + L_5$ ; una vez desplazado el S4 la distancia  $d$ , ambos sistemas coinciden y por lo tanto  $a = 0$ ; y además no hay variación de ángulo con respecto al eje X5, entonces  $\alpha = 0$ .

En la figura 27 se muestra el 5<sup>to</sup> Grado de Libertad de giro radial del eslabón I5 de 19cm de longitud.

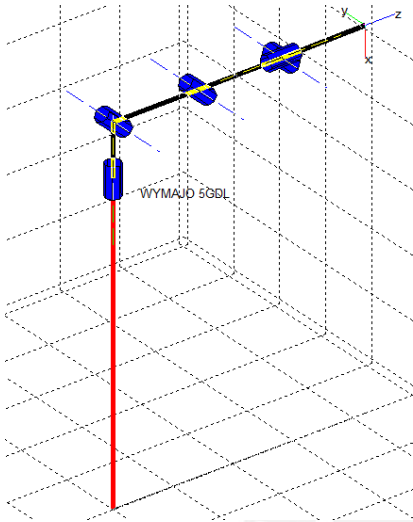


Figura 27. 5to GDL

Para el 5to grado de libertad, la posición de la articulación está en el extremo del anterior, se ha definido el eslabón de longitud igual a  $L_4 + L_5$  girando estos de manera axial.

Los parámetros D-H usados son:

GDL	$\theta$	d	a	$\alpha$
5	$\theta_5$	$L_4 + L_5$	0	0

Resumiendo, en la tabla 2 se tienen los parámetros D-H del robot de 5GDL:

Tabla 2. Parámetros D-H del robot de 5 gdl

Articulación	$\theta$	d	a	$\alpha$
1	$\theta_1 + 90^\circ$	$L_1$	0	$90^\circ$
2	$\theta_2$	0	$L_2$	0
3	$\theta_3$	0	$L_3$	0
4	$\theta_4 - 90^\circ$	0	0	$-90^\circ$
5	$\theta_5$	$L_4 + L_5$	0	0

Elaboración: Propia

Los datos del robot de 5 GDL son:

- **L1 = 17.5 cm**, con ejes  $Z_0$  Y  $Z_1$  a 2 cm de distancia d.
- **L2 = 28 cm**, ejes paralelos.
- **L3 = 28 cm**, ejes paralelos.
- **L4 = 19 cm**, del harmonic drive del M4 hasta el harmonic drive del motor 5, ejes en cuadratura, con  $d = 0$ cm.
- **L5 = 09 cm**, del harmonic drive del M5 hasta el centro del gripper.

Se usó el toolbox de Robótica de MATLAB generando el robot “Wimajo”, cuyo programa conteniendo las matrices necesarias, se describe a continuación:

```
%DefWimajo Define los parametros del Robot Wimajo=p560
%

l1=0.175;l2=0.28;l3=0.28;l4=0.19;l5=0.09;
d1=0.09;d2=0.14;d3=0.14;d4=0.1;d5=0.05;
m1=2.6;m2=2.816;m3=2.096;m4=0.795;m5=2.973;

clear L

%Parámetros de DH
%      alfa  a    teta  d  sigma offset convención
L{1} = link([pi/2  0  pi/2  l1 0 0], 'standard');
L{2} = link([0  l2  0 0  0  0], 'standard');
L{3} = link([0  l3  0 0  0  0], 'standard');
L{4} = link([-pi/2  0  0-pi/2  0  0  pi/2], 'standard');
L{5} = link([0  0  0  l5+l5  0  0], 'standard');

%Masas de los eslabones
L{1}.m = m1;
L{2}.m = m2;
L{3}.m = m3;
L{4}.m = m4;
L{5}.m = m5;

%Coordenadas de los centro de masas de cada eslabón
L{1}.r = [ 0  0  l1/2];
L{2}.r = [ 0  0  0];
L{3}.r = [ 0  0  l3/2];
L{4}.r = [ 0  0  0];
L{5}.r = [ 0  0  0];

% Tensores de Inercia (Ixx,Iyy,Izz,Ixy,Iyz,Ixz)
L{1}.I = [.13  .524  .539  0  0  0];
L{2}.I = [.13  .524  .539  0  0  0];
L{3}.I = [ .066  .086  .0125  0  0  0];
L{4}.I = [ 1.8e-3  1.3e-3  1.8e-3  0  0  0];
L{5}.I = [ .3e-3  .4e-3  .3e-3  0  0  0];

% Inercia del motor que acciona al elemento
L{1}.Jm = 200e-6;
L{2}.Jm = 200e-6;
L{3}.Jm = 200e-6;
L{4}.Jm = 33e-6;
L{5}.Jm = 33e-6;

% Coeficiente de reducción del actuador del elemento
L{1}.G = 1;
L{2}.G = 1;
L{3}.G = 1;
```

```
L{4}.G = 1;
L{5}.G = 1;

% Rozamiento viscoso del actuador del elemento
L{1}.B = .817e-6;
L{2}.B = .817e-6;
L{3}.B = 1.38e-6;
L{4}.B = 71.2e-6;
L{5}.B = 82.6e-6;
% Rozamiento de Coulomb en la dirección positiva y negativa del actuador
% del elemento
L{1}.Tc = [ 0 0];
L{2}.Tc = [ 0 0];
L{3}.Tc = [ 0 0];
L{4}.Tc = [ 0 0];
L{5}.Tc = [ 0 0];

qz = [0 0 0 0 0];% 0]; % zero angles, L shaped pose
qr = [0 pi/2 -pi/2 0 0];% -pi/2]; % ready pose, arm up
qstretch = [0 0 -pi/2 0 0];% -pi/2];

% Definición del robot.
p560 = robot(L, 'p560', 'UPM', 'Robot Wimajo 5 GDL ');
Wimajo.name = 'p560';
Wimajo.manuf = 'UPM';
```

Para corroborar la configuración del robot y correlacionar sus coordenadas articulares y espaciales, definimos el robot y luego aplicamos el comando drivebot.

El programa está contenido en el Anexo 1.

Los comandos a ingresar en MATLAB son:

```
>> p560
>> drivebot(p560)
```

Con los cursores de las articulaciones se navega por todas las posiciones posibles del robot que muestra el Matlab en la figura 28:

a) Primera posición

Q1	
x	0.84
y	0
Z	0.175

q1	q2	q3	q4	q5
0	0	0	0	0



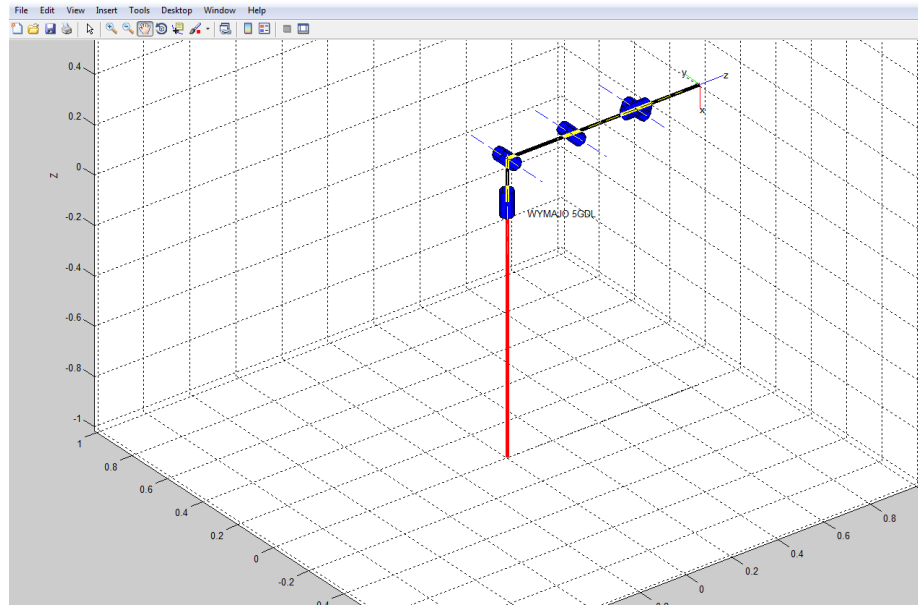


Figura 28. Pantalla del Matlab

b) Segunda posición

Q2	
x	-0.346
y	0.027
z	0.545

q1	q2	q3	q4	q5
-0.077572	0.085327	1.8617	0.2715	-0.38785

Las figuras 29 y 30 muestran las posiciones para distintas configuraciones de las articulaciones.

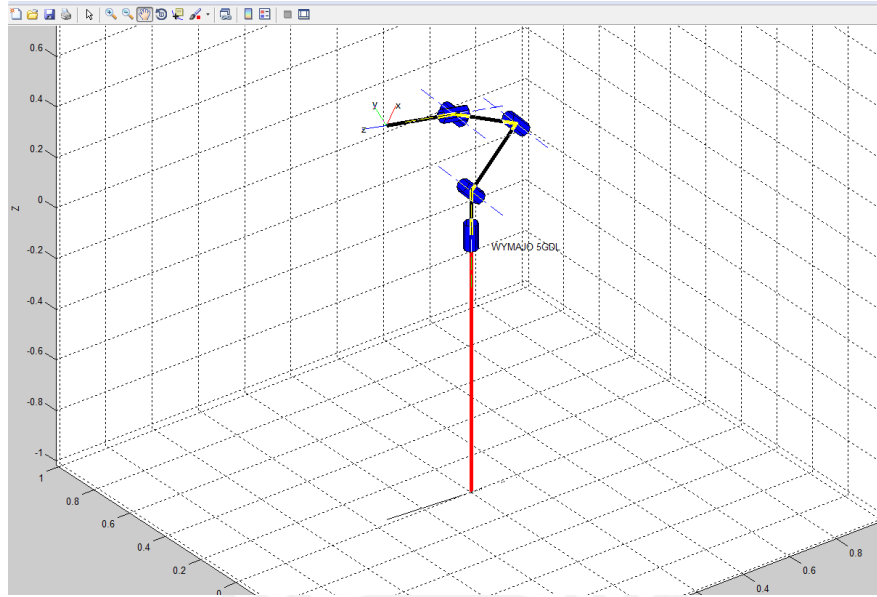


Figura 29. Nueva posición según articulaciones para segunda posición

c) Tercera posición

Q3	
x	0.797
y	-0.062
z	0.341

q1	q2	q3	q4	q5
-0.077572	0.54299	-0.50421	0	0

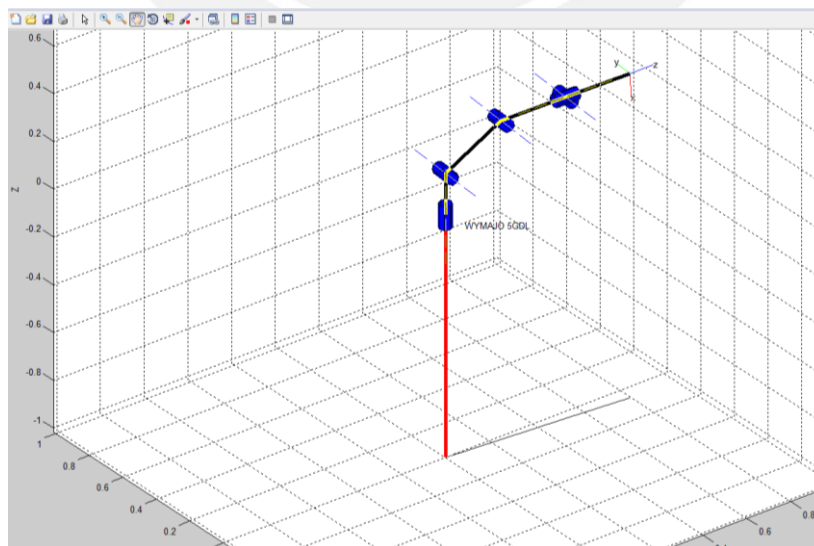


Figura 30. Nueva posición según articulaciones para tercera posición

Se probó la cinemática directa en 3 puntos aplicando el programa fkine que se muestra en el Anexo 2

En MATLAB ingresamos las coordenadas de la articulación y después corremos el comando fkine para nuestro robot p560, y estos son los resultados:

```
>> q = [0 0 0 0]
q = 0 0 0 0 0
>> T = fkine(p560,q)
T = 0.0000 0.0000 1.0000 0.8400
    -0.0000 1.0000 -0.0000 -0.0000
    -1.0000 -0.0000 0.0000 0.1750
    0 0 0 1.0000
```

Las 3 primeras columnas son las coordenadas de los vectores n, o y a.  
La cuarta columna contiene las coordenadas Px, Py y Pz del actuador final, que coincide con las coordenadas del punto Q1.

**2.2 Cinemática Inversa**

Brinda las coordenadas articulares del robot  $q = [q_1, q_2, q_3, q_4, q_5]^T$  en función de la posición y orientación de su extremo según una localización espacial.

Estas ecuaciones dependen de la configuración del robot, y se simplifican considerando que los 3 primeros grados de libertad del robot tienen una estructura planar, es decir fijado  $\theta_1$ , los movimientos de los motores 2 y 3 quedan contenidos en un plano vertical, y por lo tanto se pueden determinar a través de métodos geométricos. Los dos grados de libertad restantes determinan la orientación del extremo del robot.

Considerando esto tendremos en la figura 31:

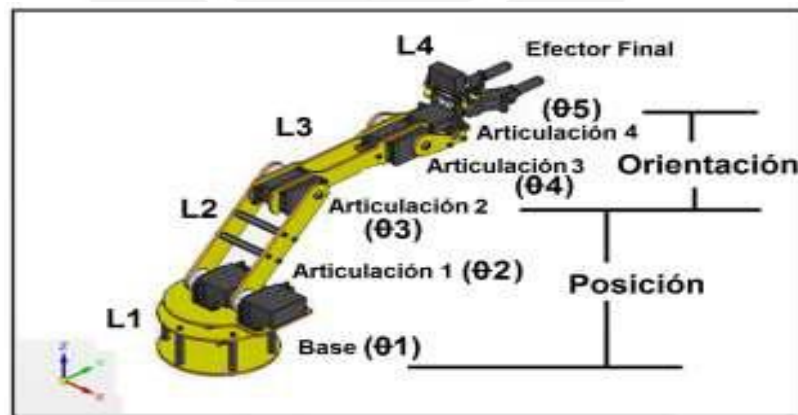


Figura 31. Articulaciones que definen la posición y orientación

Si las coordenadas del extremo del actuador están definidas por el vector Px, Py y Pz, tal como se muestra en la figura 32:

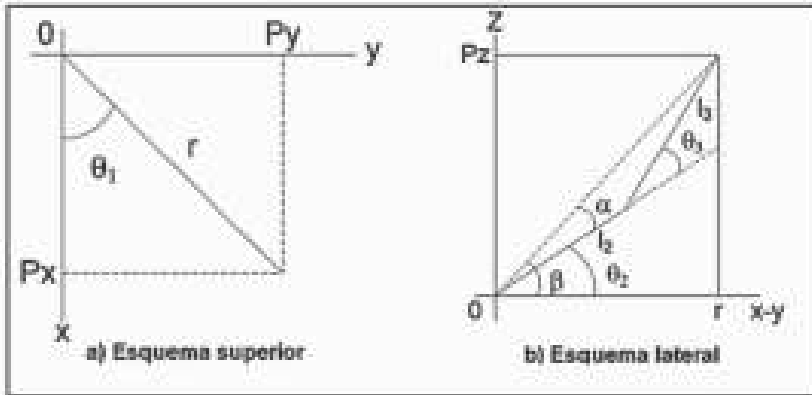


Figura 32. Vista superior y lateral del extremo del robot

Entonces las ecuaciones que conforman el modelo geométrico inverso para los tres grados de posicionamiento ( $q_1, q_2, q_3$ ) son:

$$q_1 = \tan^{-1}(P_y/P_x)$$

$$q_2 = \tan^{-1}\left(\frac{P_z - l_1}{\sqrt{P_x^2 + P_y^2}}\right) + \cos^{-1}\left(\frac{P_x^2 + P_y^2 + (P_z - l_1)^2 + L_2^2 + L_3^2}{2L_3\sqrt{P_x^2 + P_y^2 - (P_z - l_1)^2}}\right)$$

$$q_3 = -\cos^{-1}\left(\frac{P_x^2 + P_y^2 + (P_z - l_1)^2 - L_2^2 - L_3^2}{2L_2L_3}\right)$$

Teniendo en cuenta que las articulaciones cuatro y cinco son las que aportan la orientación del efector final ( $q_4$  y  $q_5$ ), y conociendo los valores de los ángulos de Euler en su configuración (ZYZ)  $[\phi, \theta, \psi]$ , se tiene que:

$$q_4 = -(q_2 + q_3) - \theta + 90$$

$$q_5 = 180 - \psi$$

El brazo robot de 5 GDL puede girar los siguientes ángulos:

- $\theta_1 = \pm 360^\circ$
- $-45^\circ \leq \theta_2 \leq 225^\circ$
- $-135^\circ \leq \theta_3 \leq 135^\circ$
- $-135^\circ \leq \theta_4 \leq 135^\circ$
- $\theta_5 = \pm 360^\circ$

Se utilizó el programa ikine para probar la cinemática inversa en los 3 puntos aplicados en la cinemática directa. El programa ikine está en el Anexo 3.

Corroborando la cinemática inversa del primer punto  $q = [0,0,0,0,0]$  , ingresamos en MATLAB la siguiente sentencia:

```
>> qi = ikine(p560,T)
qi =
    0    0    0    0    0
```

Con esto se ve que **q = qi**

### 2.3 Dinámica Directa

Describe la evolución temporal de las coordenadas del robot en función de las fuerzas y pares que intervienen.

Los pesos de cada eslabón se muestran en la tabla 3:

Tabla 3. Pesos de cada eslabón del robot de 5 GDL

	Kg	Kg
<b>Peso de la carga:</b>	1	<b>1</b>
<b>Peso que maneja el M5:</b>	1.973	<b>2.973</b>
Peso del gripper más casco del M5:	1.973	
<b>Peso que maneja el M4:</b>	1.86	<b>4.833</b>
Peso del M5	0.13	
alma,brida,harmonic drive del M5	0.394	
acople del eslabón 4 y 5	0.795	
casco del M4	0.541	
<b>Peso que maneja el M3:</b>	4.941	<b>9.774</b>
Peso del M4	0.507	
estructura, brida, rodamientos, tornillos	1.204	
eslabón une M3 y M4	2.096	
casco del M3	1.134	
<b>Peso que maneja el M2:</b>	6.278	<b>16.052</b>
Peso del M3	1.377	
estructura, rodamientos, distanciador, tapa	1.519	
bridas y harmonic drive	0.513	
tornillos	0.053	

eslabón une M2 y M3	2.816	
<b>Peso que maneja el M1:</b>	<b>8.477</b>	<b>24.529</b>
Peso del M2	1.385	
estructura, har.drive, distanciador, rodamientos, disco, tornillos	2.778	
casco del M2	1.07	
acople de eslabón 1 y 2	2.6	
tapa de acople	0.644	

Adicionalmente se tienen los siguientes pesos:

Motor M1	1.36
anillo ditanciador, harmonic drive	0.516
alma con anillo de tapa	2.011
Elaboración: Propia	

Se usó el programa fdyn, el cual figura en el Anexo 4.

Para probar **fdyn** se generó el programa dind.m que figura en el Anexo 5 y de la función taufunc1 que figura en el Anexo 6.

Como nuestro robot Wimajo establece:

```
qz = [0 0 0 0 0]; % valor inicial
qr = [0 pi/2 -pi/2 0 0]; % valor final
```

Entonces ejecutando el programa dind.m obtenemos 1269 líneas de valores [tsim,q,qd], de los cuales se muestra solo un grupo de resultados en el Anexo 7.

Se realizaron gráficas de las velocidades, aceleraciones, trayectorias por cada articulación; para ello se ejecutó el programa kitrajdyn.m que figura en el Anexo 8, y las gráficas de los desplazamientos, velocidades, aceleraciones, torques, gravedades e inercias de las 5 articulaciones se muestran en el Anexo 9.

A su vez el programa kitrajdyn,m hizo uso del programa jtraj que figura en el Anexo 10.

Este programa nos brinda [q qd qdd] el cual es utilizado para calcular las trayectorias, velocidades y aceleraciones angulares por articulación.

## 2.4 Dinámica Inversa

Expresa las fuerzas y pares que intervienen en función de la evolución de las coordenadas articulares y sus derivadas.

Un modelo dinámico completo debe incluir la dinámica de las barras o eslabones, la del sistema de transmisión, de los actuadores y la de sus equipos electrónicos de control. Estos elementos incorporan al modelo dinámico nuevas inercias, rozamientos, saturaciones de los circuitos electrónicos, etc, aumentando su complejidad. En esta aplicación NO se considera carga y dado que el sistema de transmisión está conformado por harmonic drive con reducciones de velocidad que se muestran en la tabla 4, entonces de acuerdo a [1] este brazo robot puede funcionar de forma desacoplada, es decir sin tener en cuenta los pares de perturbación.

Tabla 4. Factores de reducción de los Harmonic Drive

Harmonic Drive	Código	Factor de reducción
1	FB-25-120-2-GR	120
2	FB-32-120-2-GR	160
3	FB-25-120-2-GR	120
4	FB-20-130-2-GR	130
5	FB-14-100-2-GR	100

Elaboración: Propia

Finalmente los torques en cada articulación se calculan utilizando el comando rne, que figura en el Anexo 11.

De acuerdo al ítem 1.3.3, los valores de torques en cada articulación afectadas por el Factor de reducción de sus Harmonic Drives son menores que los torques picos según las hojas de datos de los respectivos motores:

Torque de articulación 5 = 0.0131 N-m < 0.14 N-m del Motor 5

Torque de articulación 4 = 0.0703 N-m < 0.52 N-m del Motor 4

Torque de articulación 3 = 0.2489 N-m < 6.24 N-m del Motor 3

Torque de articulación 2 = 0.3992 N-m < 6.24 N-m del Motor 2

Torque de articulación 1 = 0.4839 N-m < 3.47 N-m del Motor 1


Lo que confirma que los motores heredados cumplen los requerimientos del robot.


## CAPÍTULO 3


## ESTRUCTURA MECÁNICA DEL BRAZO ROBOT DE 5 GDL


## 3.1 Ensamblaje mecánico del brazo robot de 5 GDL


A continuación se listan los planos mecánicos de todo el robot de 5GDL, los mismos que figuran en el Anexo 12


 L1-A0-BRAZO ROBOTICO 5GDL


 L3-A2-BASE 1


 L4-A3-DISCO MOTOR 1


 L5-A3-ACOPLE 1


 L6-A3-ANILLO DISTANCIADOR 1


 L7-A3-ANILLO DE RODAMIENTO 1


 L8-A3-ALMA 1


 L9-A3-ANILLO DE APOYO 1


 L10-A3-TAPA SUPERIOR 1


 L11-A3-BRIDA SUPERIOR 1


 L12-A2-HOMBRO


 L13-A3-TAPA HOMBRO


 L14-A3-ALMA 2


 L15-A3-ACOPLE 2

 L16-A3-ANILLO DE RODAMIENTO 2


 L17-A3-DISTANCIADOR INFERIOR 2


 L18-A3-DISTANCIADOR SUPERIOR 2


 L19-A3-BRIDA SUPERIOR 2


 L20-A3-BASE 2


 L21-A3-TAPA INFERIOR 2


 L22-A2-BRAZO 1

 L23-A3-ALMA 3


 L24-A3-ACOPLE 3


 L25-A3-DISTANCIADOR 3


 L27-A3-BRIDA SUPERIOR 3


 L28-A3-BASE 3


 L29-A3-TAPA INFERIOR 3


 L30-A2-BRAZO 2


 L31-A3-ALMA 4


 L32-A3-ACOPLE 4


 L33-A3-BRIDA 4


 L34-A3-BASE 4


 L35-A2-BRAZO 3


 L36-A3-ACOPLE 5

 L37-A4-PLAQUITA 5


 L38-A3-ALMA 5

 L39-A3-BRIDA 5

 L40-A3-BASE 5

 L41-A3-TAPA INFERIOR 5

 L42-A4-PLANCHA SWITCH

 L43-A4-PLANCHA TOPE



## CAPÍTULO 4

### DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL CIRCUITO ELECTRÓNICO

#### 4.1 Alcance

El alcance será operar un brazo robot capaz de realizar los movimientos de cada articulación, controlados desde el teclado de una PC, dentro del rango que define la propia estructura mecánica, los cuales se detallan a continuación:

$$\begin{aligned} \theta_1 &= \pm 360^\circ \\ -45^\circ &\leq \theta_2 \leq 225^\circ \\ -135^\circ &\leq \theta_3 \leq 135^\circ \\ -135^\circ &\leq \theta_4 \leq 135^\circ \\ \theta_5 &= \pm 360^\circ \end{aligned}$$

Salvo la primera y quinta articulación, en caso se sobrepase estos ángulos, o si se produce una sobrecarga de los motores, el robot se detendrá.

Así mismo se podrá ejecutar movimientos que impliquen activación simultánea de varios motores.

#### 4.2 Diagrama de Bloques

En la figura 33 se muestra el diagrama de bloques del circuito electrónico del brazo robot de 5 GDL.

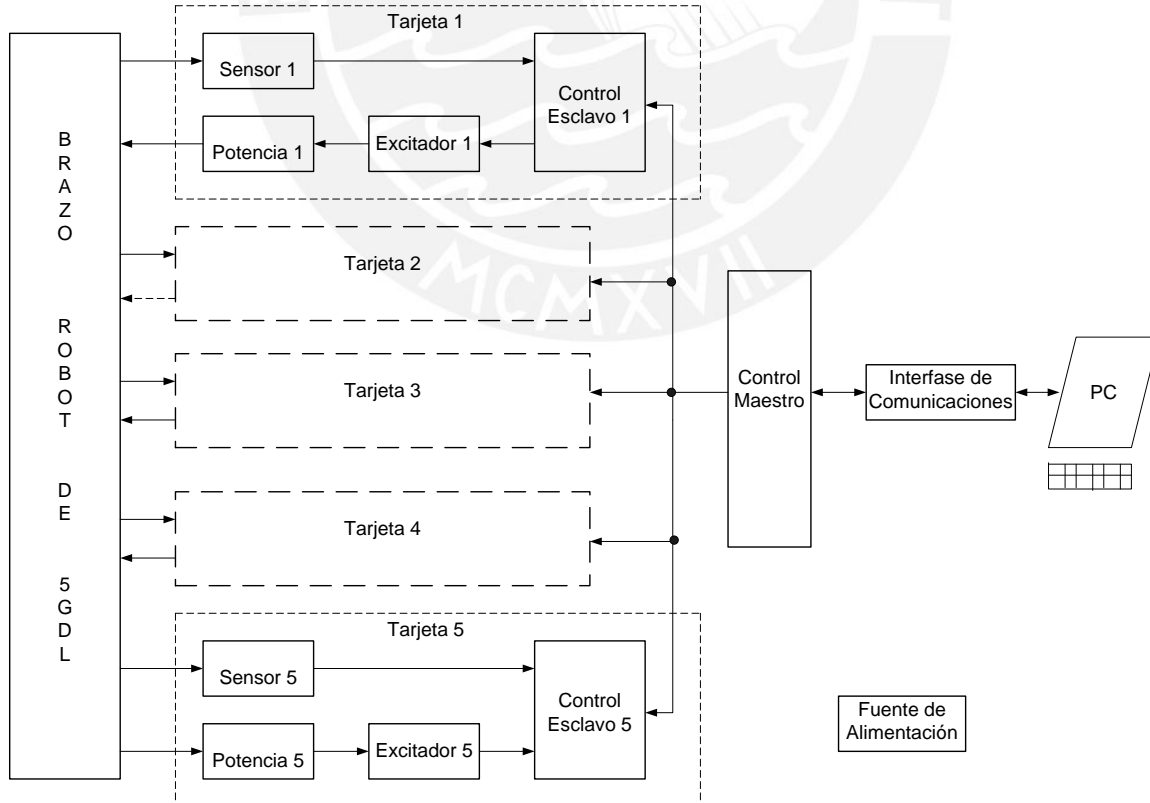


Figura 33. Diagrama de bloques del circuito electrónico

A continuación desarrollamos cada bloque.

#### 4.2.1 Bloque Sensor

Está compuesto por 2 tipos de sensores: los sensores de posición y de contacto.

##### Sensores de posición

Sirven para determinar la posición de los motores. Todos los motores llevarán su propio sensor, y se los ha seleccionado principalmente por sus dimensiones que caben según diseño mecánico, los que resumimos en la tabla 5:

Tabla 5. Lista de los diferentes sensores de posición para cada motor

SENSOR DE POSICIÓN	MOTOR	V de alimentación [V]	Tipo de salida	PPR
Dynapar/M532048/020B8	M1	5 a 12 ± 10%	Colector abierto (OC)	2048
Dynapar/M532048/020B8	M2	5 a 12 ± 10%	Colector abierto (OC)	2048
Dynapar/M532048/020B8	M3	5 a 12 ± 10%	Colector abierto (OC)	2048
Dynapar/M151024/020A8	M4	5 a 12 ± 10%	Colector abierto (OC)	1024
Heads 9140	M5	4.5 a 5.5	Colector abierto (OC)	512

Elaboración: Propia

El tipo de salida de los sensores de posición Dynapar (encoder) adquiridos son Open Collector, como acondicionador de señal es necesaria una resistencia de pull-up de 2K alimentado con 5 VDC. Las hojas de datos de todos los encoder figuran en el Anexo 13.

##### Sensor de contacto

Para poder detener el movimiento de los brazos del robot en caso lleguen a su máxima excursión angular, se requiere de sensores robustos que le indiquen a los controles esclavos cuando detener su marcha.

Se utilizarán 2 llaves de fin de carrera para cada uno de los motores M2, M3 y M4, los cuales estarán conectados a los controles esclavos según la figura 34:

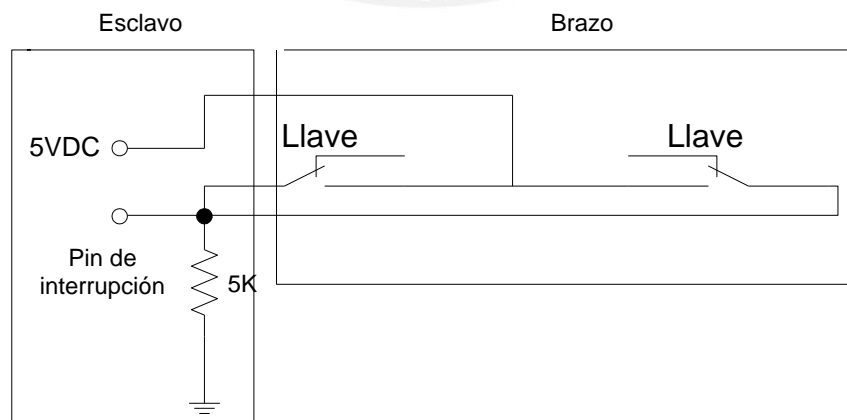


Figura 34. Conexión de las llaves de fin de carrera

Las llaves están colocadas en los extremos de los brazos L2, L3 y L4, ver Vista AA del plano L1-A0, mientras estos no lleguen a los extremos de su desplazamiento angular, el Pin de interrupción del esclavo es 0 VDC. Cuando se llegue a cualquiera de los extremos de su desplazamiento angular, el Pin de interrupción del esclavo se eleva a 5 VDC.

#### 4.2.2 Bloque de Potencia

El requerimiento principal de la etapa de potencia es que todas las articulaciones del robot deben moverse en ambos sentidos y para ello se usan motores DC.

A continuación, en la tabla 6, se muestran los motores heredados.

Tabla 6. Lista de los motores que usará el brazo robot de 5GDL

MOTOR	Marca/modelo	Voltaje de alimentación [V]	Potencia [W]	Velocidad Máx. [rpm]
M1	Magmotor/S23-K-100E	12 - 120	70	4,000
M2	Magmotor/S28-K-100E	12 - 120	80	4,000
M3	Magmotor/S28- K-100E	12 - 120	80	4,000
M4	Magmotor/S15-0-150E	12 - 120	70	4,000
M5	Pittman/8693 24.0 V	24	17	7,370

Elaboración: Propia

Alimentados con 15VDC se han hecho pruebas de los Motores en vacío y frenándolos manualmente y no superan los 2 A. Los primeros 4 motores soportan hasta 7A pico.

Las hojas de datos de todos los motores figuran en el Anexo 13.

Se alimentarán todos los motores con una fuente de alimentación de 15VDC.

#### 4.2.3 Bloque Excitador

Para determinar rápidamente que los motores adquiridos puedan funcionar adecuadamente reduciendo el tiempo de diseño y desarrollo de este bloque, se ha decidido usar el CI Dual VNH2SP30 Motor Driver Carrier MD03A, ver figura 4.3, cuya hoja de datos técnicos figuran en el Anexo 13 y con más detalle en <https://www.pololu.com/product/708>, el cual nos proporciona 2 pines CS para el sensado de corriente del motor, uno para cada puente H.

Este integrado tiene una tensión máxima de alimentación de 16VDC, por lo tanto se alimentará con la misma fuente con que se alimentan los motores (15VDC).

El diagrama esquemático del excitador de la figura 35 muestra los componentes internos del mismo así como sus pines, donde el pin 9 de salida CS se acopla a un filtro pasa bajos; por lo tanto su salida es DC. Se le agregó adicionalmente un condensador de 100 uF para reducir el voltaje de rizado y obtener una señal de salida con menor rizado.

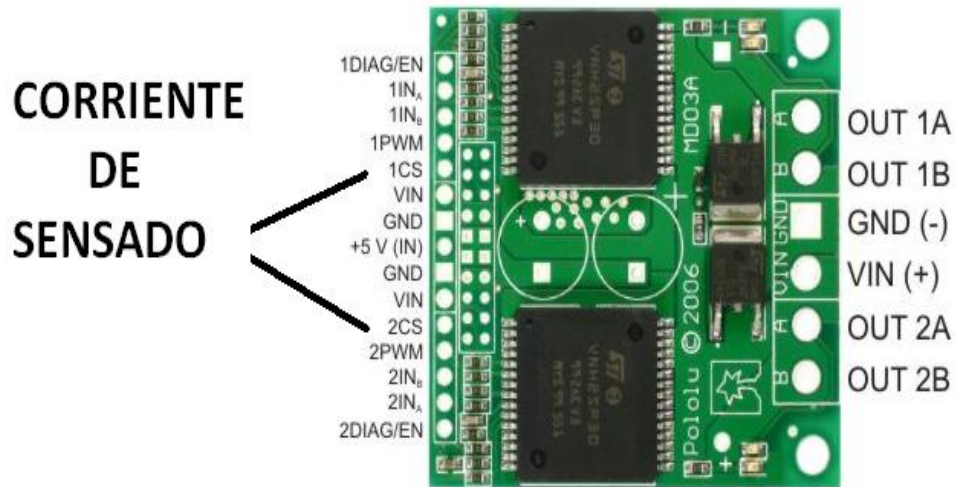


Figura 35. CI del excitador

Según la hoja de datos del excitador, a la salida del pin 9 CS obtenemos aproximadamente 0.13 V/A; por ello, necesitamos amplificar esta señal para hacerla más sensible.

Se utiliza un amplificador no inversor de ganancia 3, la figura 36 muestra el diagrama esquemático del amplificador, una vez obtenida esta señal se utilizará un comparador analógico para detectar sobrecorrientes.

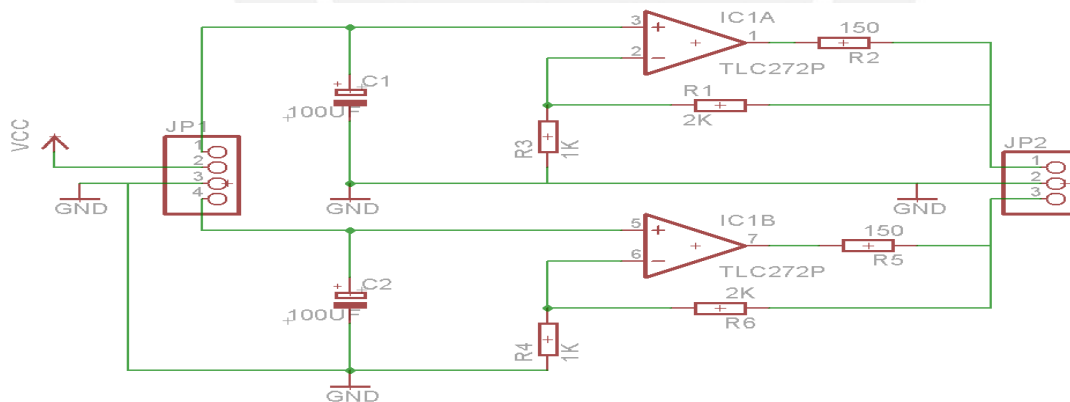


Figura 36. Amplificador No Inversor

#### 4.2.4 Bloque Control

Está compuesto por un Control Maestro y 5 Controles esclavos idénticos, uno para cada motor del robot de 5 GDL.

#### 4.2.4.1 Circuito Esclavo

Basado en el micro procesador Atmega8A-AU de montaje superficial es el encargado de operar el circuito excitador y de procesar los datos enviados por el bloque de sensado (encoder) para determinar la posición angular de cada articulación. También se encarga de sensar los datos del circuito de protección y del sensor de fin de carrera con el objetivo de tomar las medidas de control frente a incidentes en el proceso de operación tales como sobre carga o tratar de posicionarse fuera de su rango de alcance respectivamente.

La figura 37 muestra el circuito esquemático de un control Esclavo (del motor M1 sin sensor de fin de carrera, para que la articulación pueda girar 360° sin restricciones):

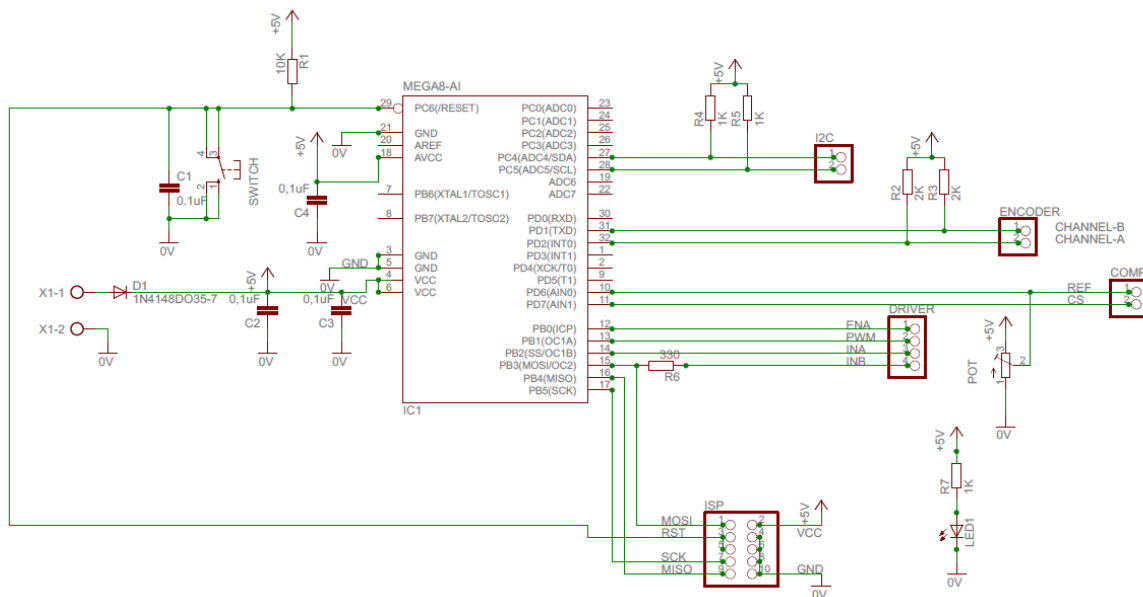


Figura 37. Diagrama esquemático del Control Esclavo 1

A través de los pines 27 y 28 el esclavo recibe las señales del I<sup>2</sup>C del maestro, según fabricante cada línea requiere de una resistencia de pull-up de 1K.

Por los pines 31 y 32 reciben la señal de los encoder, también necesitan resistencia de pull-up de 2K.

Por los pines 10 y 11 ingresan las señales al comparador analógico, el pin 10 es el voltaje de referencia fijada a través del potenciómetro de 5K, y por el pin 11 ingresa la señal del sensado de corriente amplificada.

Con los pines 12, 13, 14 y 15 se controla al excitador VNH2SP30.

Por los pines 15,16 y 17 se realiza la programación del esclavo.

La figura 38 muestra el circuito impreso de la cara de cobreada de un control esclavo.

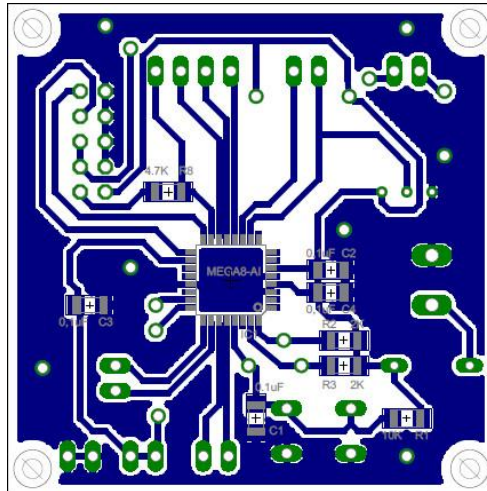


Figura 38. Circuito impreso de la cara cobreada de un control esclavo

La figura 39 muestra el circuito impreso de la cara de los componentes de un control esclavo.

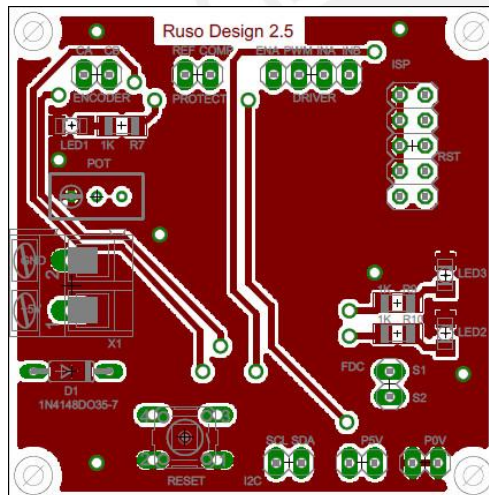


Figura 39. Circuito impreso de la cara de los componentes

#### 4.2.4.2 Circuito Maestro

Es el circuito que se encarga de la comunicación con la computadora, y además de la comunicación con los circuitos esclavos necesarios para la operación del brazo robótico. Está basado en el micro procesador Atmega8A-AU. La figura 40 muestra el diagrama esquemático del control maestro.

Por los pines 2 y 3 se comunica con la PC.

Por los pines 27 y 28 se comunica con todos los esclavos con un protocolo I2C.

El pin 1 es de reset y los pines 7 y 8 la alimentación y tierra respectivamente.

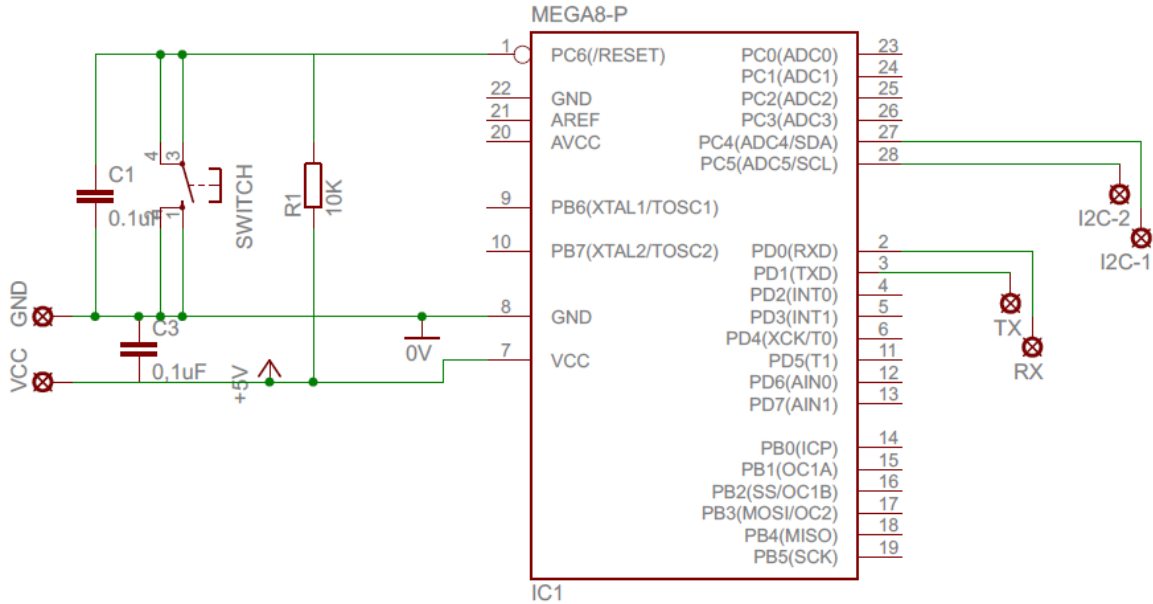


Figura 40. Diagrama esquemático del Control Maestro

La figura 41 muestra el circuito impreso de la cara cobreada del control maestro.

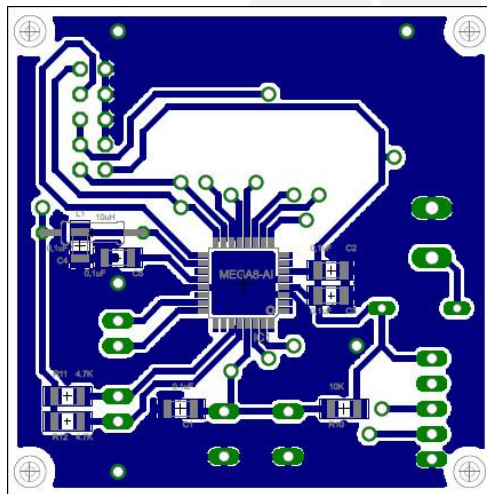


Figura 41. Cara cobreada del control maestro

La figura 42 muestra el circuito impreso de la cara de los componentes del control maestro.

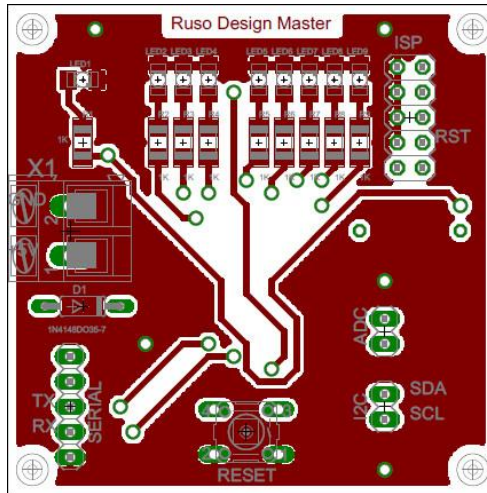


Figura 42. Cara de los componentes del control maestro

#### 4.2.5 Bloque Interface de Comunicación

La comunicación maestro-esclavo se realiza mediante el protocolo I<sup>2</sup>C; mientras que la comunicación del maestro con la PC se realiza mediante el protocolo ft232 usb.

##### 4.2.5.1 Comunicación Maestro - PC

Se hizo uso del bus estándar industrial USB para la comunicación entre el circuito maestro y la interface de datos en la computadora.

Se decidió utilizar el USB por lo siguiente:

- Permite la conexión de una variedad de dispositivos periféricos, entre ellos a los microcontroladores.
- Desplazó a los puertos paralelo y serial.
- Uso masivo de los puertos USB en la tecnología actual.
- Alcance máximo de 5 metros para la comunicación sin pérdida de información.
- Velocidad de transferencia de hasta 480 Mbitps (60MB/s) con USB 2.0 cuyo cable posee 4 líneas.

Se utilizó el CI CH340 para la conversión de USB a RS-232, el dispositivo se muestra en la figura 43



Figura 43. Tarjeta de conversión USB a RS232



La figura 44 muestra el diagrama esquemático de conversión USB a DB9 ida y vuelta.

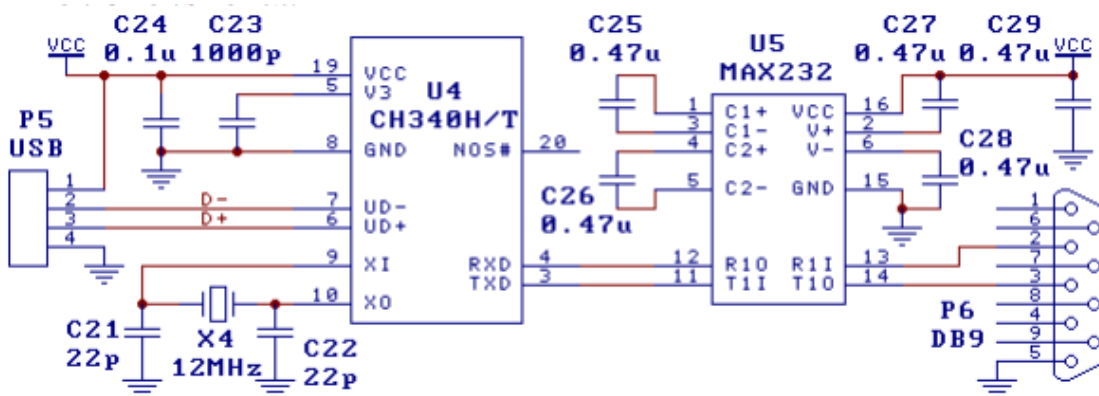


Figura 44. Circuito esquemático de conversión USB a DB9 ida y vuelta

#### 4.2.5.2 Comunicación Maestro - Esclavos

Se usó el bus de comunicaciones en serie I<sup>2</sup>C para la comunicación del control Maestro con todos los controles Esclavos.

Muy usado en la industria para comunicar circuitos integrados que están presentes en el mismo circuito impreso, si es así solo requieren de 2 líneas para transmitir información, SDA para los datos y SCL para el reloj; se necesitaría una tercera línea (GND) en caso no estuvieran en el mismo circuito impreso.

La figura 45 muestra un ejemplo de conexión entre un uC Maestro y 5 uC esclavos. Se aprecia las resistencias de Pullup requeridas por SDA y SCL.

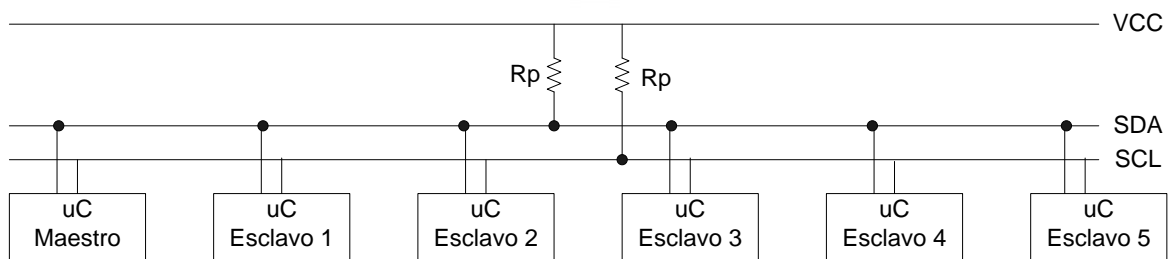


Figura 45. Conexión entre un microcontrolador Maestro y 5 microcontroladores Esclavos

#### 4.2.6 Bloque Fuente de Alimentación

La fuente de alimentación debe brindar los voltajes y corrientes a todo el sistema, para ello resumimos en la tabla 7 los requerimientos de cada motor, que son los que más consumen:

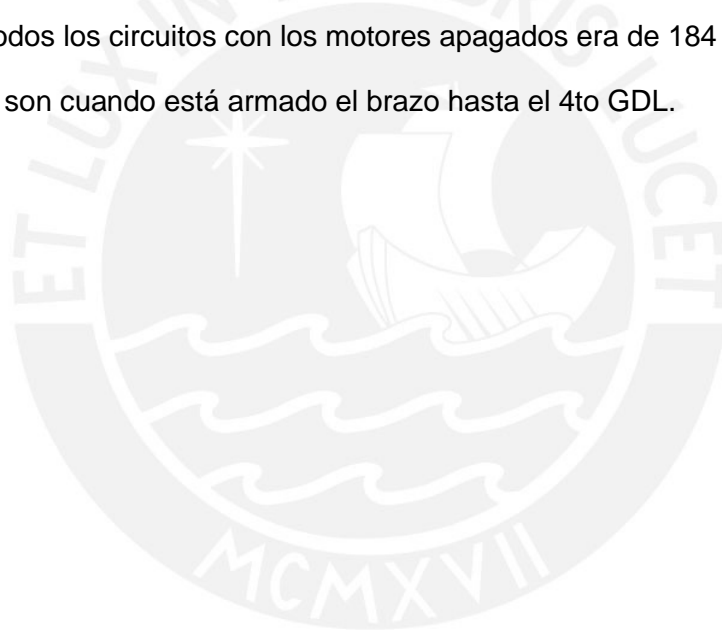
Tabla 7. Cuadro de voltajes y corrientes de los motores

Tarjetas	Voltaje [V]	Corriente [A]
Motor 1	15	0.8
Motor 2	15	2.2
Motor 3	15	0.9
Motor 4	15	0.7
Motor 5	15	-

Elaboración: Propia

El consumo de todos los circuitos con los motores apagados era de 184 mA.

Estos consumos son cuando está armado el brazo hasta el 4to GDL.



## CAPÍTULO 5

### SOFTWARE Y CONTROL DEL BRAZO MANIPULADOR

#### 5.1 Control Cinemático

Una de las funciones del control cinemático es unir un conjunto de puntos en el espacio articular por los que se quiere que pasen las articulaciones del robot en un instante determinado.

El algoritmo utilizado para generar la trayectoria que une dos puntos consecutivos es el interpolador cúbico de la ecuación (5.1):

$$q(t) = a + b(t - t^{i-1}) + c(t - t^{i-1})^2 + d(t - t^{i-1})^3 \quad t^{i-1} < t < t^i \quad (5.1)$$

$$a = q^{i-1} \quad b = \dot{q}^{i-1} \quad c = \frac{3}{T^2}(q^i - q^{i-1}) - \frac{2}{T^2}\dot{q}^{i-1} - \frac{1}{T^2}\dot{q}^i$$

$$d = -\frac{2}{T^3}(q^i - q^{i-1}) + \frac{1}{T^2}(\dot{q}^{i-1} + \dot{q}^i) \quad T = t^i - t^{i-1}$$

Los parámetros a,b,c y d permiten fijar la continuidad en la posición y en la velocidad para cada par de puntos consecutivos.

Se utilizó un algoritmo simplificado donde no aparecen los requerimientos de velocidad en b (=0), c y d.

La forma de fijar las velocidades de paso es aplicar este sencillo criterio:

$$\dot{q}^i = \begin{cases} 0 & \text{si } \text{signo}(q^i - q^{i-1}) \neq \text{signo}(q^{i+1} - q^i) \\ \frac{1}{2} \left[ \frac{q^{i+1} - q^i}{t^{i+1} - t^i} + \frac{q^i - q^{i-1}}{t^i - t^{i-1}} \right] & \text{si } \text{signo}(q^i - q^{i-1}) = \text{signo}(q^{i+1} - q^i) \end{cases} \quad (5.2)$$

#### 5.2 Control Dinámico

Esto hace que la trayectoria descrita por el robot  $q(t)$  sea lo más fiel posible a la generada por el control cinemático  $q_c(t)$ , para ello utiliza el modelo dinámico de la planta (robot de 5 GDL) y en este caso el control PID.

##### 5.2.1 Efecto del harmonic drive

Dado que los factores de reducción de los harmonic drive son elevados, entonces el torque de perturbación es despreciable y puede considerarse que las articulaciones del robot de 5 GDL están desacopladas [1,7]; es decir, el par motor en cada articulación solo

afecta a su propia articulación estando relacionadas con una ecuación diferencial lineal de 2do orden. Además el control más adecuado para cada articulación es el control PID que garantiza las especificaciones de funcionamiento ante perturbaciones o imprecisiones de las matrices de inercia y rozamiento viscoso.

### 5.2.2 Control PD

Dado que el robot es excitado por motores eléctricos de corriente continua con reductores harmonic drive, su modelo se muestra en la figura 46,

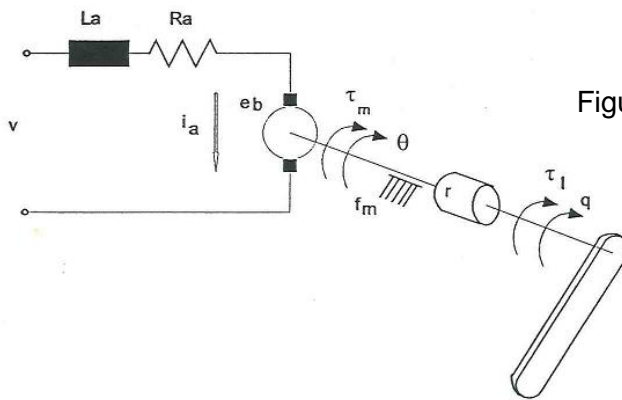


Figura 46. Modelo de planta a controlar por cada controlador

donde:  $\theta$  = posición angular del eje del motor  
 $q$  = posición angular de la articulación robótica  
 $r$  = relación de reducción del harmonic drive  
 $\tau_m$  = par en el eje del motor  
 $\tau_l$  = par de carga en el eje de la articulación  
 $K_a$  = constante de par del motor  
 $R_a$  = resistencia de armadura del motor  
 $L_a$  = inductancia de armadura del motor  
 $K_b$  = constante de fuerza contraelectromotriz del motor  
 $i_a$  = corriente de armadura del motor  
 $E_b$  = fuerza contraelectromotriz del motor  
 $V$  = tensión de armadura del motor  
 $J_m$  = momento de inercia del motor y el reductor  
 $f_m$  = par de fricción del motor y el reductor

Las ecuaciones dinámicas eléctricas y mecánicas son:

$$\tau_m = k_a i_a \quad (5.3)$$

$$v = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + e_b \quad (5.4)$$

$$e_b = k_b \dot{\theta} \quad (5.5)$$

$$\theta = r q \quad (5.6)$$

$$\tau_m = J_m \ddot{\theta} + f_m \dot{\theta} + \frac{\tau_l}{r} \quad (5.7)$$

Considerando que  $L_a/R_a \ll J_m/f_m$  (lo cual se mostrará en tabla 12), la figura 47 muestra el esquema de bloques de una junta articular.

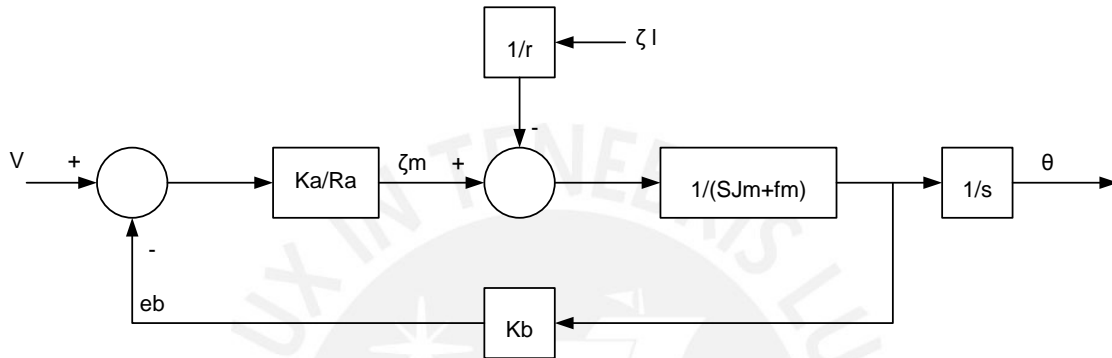


Figura 47. Esquema de bloques de una junta articular

La función transferencia posición angular vs tensión de armadura del motor será:

$$\frac{\theta(s)}{v(s)} = \frac{k_a/R_a}{s(J_m s + f_m + \frac{k_b k_a}{R_a})} = \frac{k_a}{s(J_m R_a s + f_m R_a + k_b k_a)} \quad (5.8)$$

Por otro lado, considerando la inercia del propio eslabón en cada articulación y dejar las dinámicas acopladas no lineales para el término de la perturbación; para cada articulación se tiene:

$$J \ddot{\theta} + F \dot{\theta} = kv - d/r \quad (5.9)$$

donde  $J = J_m + m_{kk}(q)/r^2 \quad (5.10)$

$$F = f_m + k_b k_a / R_a \quad (5.11)$$

$$K = k_a / R_a \quad (5.12)$$

Dado que  $r \geq 100$ , entonces  $r^2 \gg 1$ , por lo que  $J = J_m$

Aplicando la transformada de Laplace, se obtiene:

$$J s^2 \theta(s) + F s \theta(s) = kv(s) - \frac{d(s)}{r} \quad (5.13)$$

Lo que nos lleva al diagrama de bloques simplificado de una junta articular de la figura 48

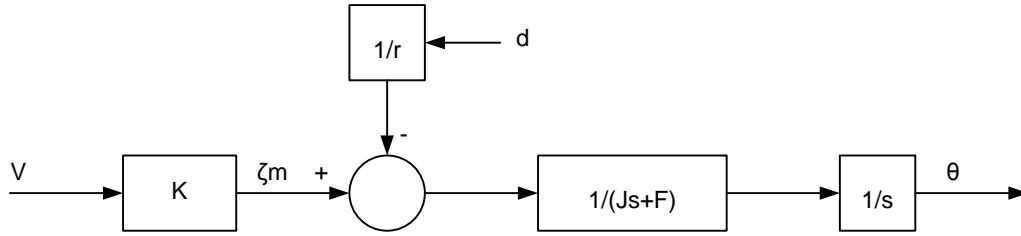


Figura 48. Diagrama de bloques simplificado de una junta articular

A continuación se justificará la suposición hecha de la relación entre constantes eléctricas y constantes mecánicas obtenidas en [8].

En la tabla 8 se muestran las constantes  $K_a$  y  $K_b$  obtenidas de las hojas de datos de los motores, y los valores de  $R_a$  y  $L_a$  que se obtuvieron de ensayar cada motor en serie con

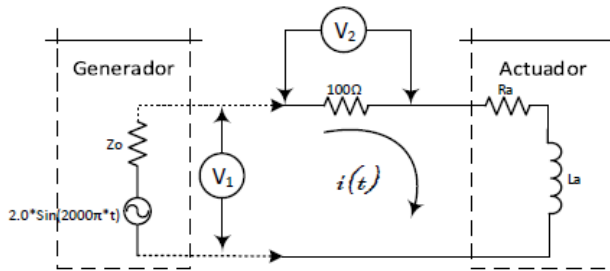


Figura 49. Circuito para determinar  $R_a$  y  $L_a$  en cada motor [8]

una fuente de voltaje alterno y una resistencia  $R = 100 \Omega$  (ver figura 49). De acá se obtiene:

$$\frac{V_1}{i(t)} = \sqrt{(wLa)^2 + (100 + Ra)^2} \quad (5.14)$$

$$\phi = \tan^{-1} \left( \frac{wLa}{100 + Ra} \right) \quad (5.15)$$

Nos quedan 2 ecuaciones con 2 incógnitas ( $R_a$  y  $L_a$ ).

Tabla 8. Valores calculados de  $R_a$  y  $L_a$  para cada motor

Actuador	$R_a$ (Ohm)	$L_a$ (mH)	$K_a = K_b$
M1	24.95	3.956	0.141
M2	20.87	5.287	0.257
M3	20.90	5.252	0.257
M4	21.93	0.174	0.031
M5	4.12	2.640	0.024

Elaboración: [8]

También el cálculo de cada par de fricción se realiza usando las ecuaciones 5.3 y 5.7, excitando cada motor a velocidad constante (aceleración = 0), midiendo las corrientes con Tabla 9. Valores de par de fricción de cada motor

Actuador	Velocidad (rad/s)	Corriente (A)	Par de fricción fm (Nm.s/rad)
M1	118.66	0.75	$8.90 \times 10^{-4}$
M2	41.86	1.23	$65.4 \times 10^{-4}$
M3	41.86	1.23	$65.4 \times 10^{-4}$
M4	45.10	0.99	$6.80 \times 10^{-4}$
M5	99.43	0.38	$0.91 \times 10^{-4}$

Elaboración: [8]

un multímetro Fluke 179, las revoluciones con sus respectivos sensores de posición y utilizando las constantes Ka encontradas en el paso anterior. La tabla 9 muestra los valores hallados.

Para el cálculo de las inercias con los datos de la tabla 10 y la tabla 3, se utilizaron las ecuaciones desde la 5.14 hasta la 5.18 que se detalla a continuación:

$$J_{5planta} = 1/2 m_{5load} (r_{51}^2 + r_{52}^2) + m_{load} L_5^2 \quad (5.14)$$

$$J_{4planta} = m_{5load} (L_5/2 + L_4)^2 + m_5 L_4^2 + m_{4load} (L_4/2)^2 + m_{load} (L_5 + L_4)^2 \quad (5.15)$$

$$J_{3planta} = m_{5load} (L_5/2 + L_4 + L_3)^2 + m_5 (L_4 + L_3)^2 + m_{4load} (L_4/2 + L_3)^2 + m_4 L_3^2 + m_{3load} (L_3/2)^2 + m_{load} (L_5 + L_4 + L_3)^2 \quad (5.16)$$

$$J_{2planta} = m_{5load} (L_5/2 + L_4 + L_3 + L_2)^2 + m_5 (L_4 + L_3 + L_2)^2 + m_{4load} (L_4/2 + L_3 + L_2)^2 + m_4 (L_3 + L_2)^2 + m_{3load} (L_3/2 + L_2)^2 + m_3 L_2^2 + m_{2load} (L_2/2)^2 + m_{load} (L_5 + L_4 + L_3 + L_2)^2 \quad (5.17)$$

$$J_{1planta} = m_{5load} (L_5/2 + L_4 + L_3 + L_2)^2 + m_5 (L_4 + L_3 + L_2)^2 + m_{4load} (L_4/2 + L_3 + L_2)^2 + m_4 (L_3 + L_2)^2 + m_{3load} (L_3/2 + L_2)^2 + m_3 L_2^2 + m_{2load} (L_2/2)^2 + m_{load} (L_5 + L_4 + L_3 + L_2)^2 + 1/2 m_{1load} (r_{11}^2 + r_{12}^2) \quad (5.18)$$

Tabla 10. Valores de masas, cargas y distancias

Articulación	$m_p$ (Kg)	$m_{pload}$ (Kg)	$r_{cm}$ (m)	$L_p$ (m)
1	1.360	7.092	0.0875	0.175
2	1.385	4.901	0.140	0.28
3	1.377	4.434	0.140	0.28
4	0.507	1.730	0.095	0.19
5	0.130	1.973	0.0450	0.09

Elaboración: [8]

donde:  $m_p$  = masa del actuador p  
 $m_{load}$  = masa manipulada por el actuador p  
 $r_{cm}$  = distancia al centro de masa  
 $L_p$  = longitud de la articulación p

El valor de los momentos de inercia de cada actuador valen:

$$J_m = J_{planta}/r^2 + J_{reductor} + J_{rotor}$$

Los 2 últimos se obtienen de las hojas de datos del harmonic drive y de los motores respectivamente.

La tabla 11 resume los resultados hallados.

Tabla 11. Momentos de Inercia de la planta, reductor, rotor y de cada actuador

Actuador	$J_{planta}$ (Kg - m <sup>2</sup> )	$J_{reductor}$ (Kg - m <sup>2</sup> )	$J_{rotor}$ (Kg - m <sup>2</sup> )	$J_m$ (Kg - m <sup>2</sup> )
M1	3.953	$0.36 \times 10^{-4}$	$0.423 \times 10^{-4}$	$3.528 \times 10^{-4}$
M2	3.913	$1.30 \times 10^{-4}$	$0.704 \times 10^{-4}$	$3.532 \times 10^{-4}$
M3	1.235	$0.36 \times 10^{-4}$	$0.704 \times 10^{-4}$	$1.921 \times 10^{-4}$
M4	0.207	$0.14 \times 10^{-4}$	$0.0190 \times 10^{-4}$	$0.281 \times 10^{-4}$
M5	0.0106	$0.033 \times 10^{-4}$	$0.0162 \times 10^{-4}$	$0.0598 \times 10^{-4}$

Elaboración: [8]

En la tabla 12 se comprueba la suposición hecha y por lo tanto se justifica el modelo simplificado a controlar de la figura 5.10.

Tabla 12. Comparación entre  $L_a/R_a$  y  $J_m/f_m$

Motor	$L_a/R_a$	$J_m/f_m$
1	$1.58 \times 10^{-4}$	$3964 \times 10^{-4}$
2	$2.53 \times 10^{-4}$	$540 \times 10^{-4}$
3	$2.51 \times 10^{-4}$	$293 \times 10^{-4}$
4	$0.0793 \times 10^{-4}$	$413 \times 10^{-4}$
5	$6.4 \times 10^{-4}$	$657 \times 10^{-4}$

Elaboración: Propia

De la ecuación (5. 13) se despeja  $\frac{\theta(s)}{v(s)} = \frac{k_a}{s(J_m R_a s + f_m R_a + k_a k_b)}$ , entonces las funciones

transferencia de cada articulación que se muestran en las ecuaciones desde la 5.19 a la 5.23 se obtienen al reemplazar las constantes  $R_a$ ,  $K_a$ ,  $K_b$ ,  $f_m$ , y  $J_m$  de la tablas 8, 9 y 11 respectivamente:

$$\frac{\theta_1(s)}{v_1(s)} = \frac{0.141}{s(0.00873s+0.042)} \tag{5.19}$$

$$\frac{\theta_2(s)}{v_2(s)} = \frac{0.257}{s(0.00736s+0.2024)} \tag{5.20}$$



$$\frac{\theta_3(s)}{v_3(s)} = \frac{0.257}{s(0.0040s+0.2026)} \quad (5.21)$$

$$\frac{\theta_4(s)}{v_4(s)} = \frac{0.031}{s(0.000611s+0.01587)} \quad (5.22)$$

$$\frac{\theta_5(s)}{v_5(s)} = \frac{0.024}{s(0.000023s+0.00095)} \quad (5.23)$$

Como se puede apreciar las funciones transferencias simplificadas de cada articulación poseen un polo en el origen, entonces el controlador a diseñar solo será del tipo PD cuya función transferencia está dada en la ecuación 5.24

$$D(s) = K_P(\theta_d - \theta) - K_D s \theta \quad (5.24)$$

La presencia de los harmonic drive permite considerar que el efecto de los pares de las otras articulaciones sobre uno de ellos es despreciable (par de perturbación = 0), entonces el error en estado estacionario para este controlador con una entrada tipo escalón, es cero; además el comportamiento dinámico del sistema con este controlador PD se determina analizando el polinomio característico que resultó de 2do orden, según lo analizado en el Anexo 14 que muestra la expresión de la posición angular y el error, en función de la referencia y la perturbación. La estabilidad del sistema según Routh-Hurwitz está dada por la ecuación 5.25:

$$K_P > \frac{J}{K(F+KK_D)} \quad (5.25)$$

Para hallar las constantes  $K_P$  y  $K_D$  se hizo la simulación dinámica de la planta utilizando la herramienta Simulink del software Matlab, donde se realizaron ajustes manuales al diagrama de bloques de la figura 50 para las funciones transferencias de cada articulación mostradas en las ecuaciones de 5.19 a 5.23, siendo el criterio de diseño fundamental que en cada una de ellas se tenga una respuesta críticamente amortiguado, y que el tiempo de establecimiento sea mínimo por ahora, ya que no es objetivo de la tesis este tiempo pues este se ajustará cuando los motores se alimenten con voltajes próximos a su rango típico superior. El bloque de saturación es  $\pm 15VDC$  como la salida del controlador.

También se pudieron haber hallado las constantes del controlador de manera experimental a través del método de Ziegler-Nichols, pero lamentablemente en esos momentos solo se tenía armado 2 GDL.

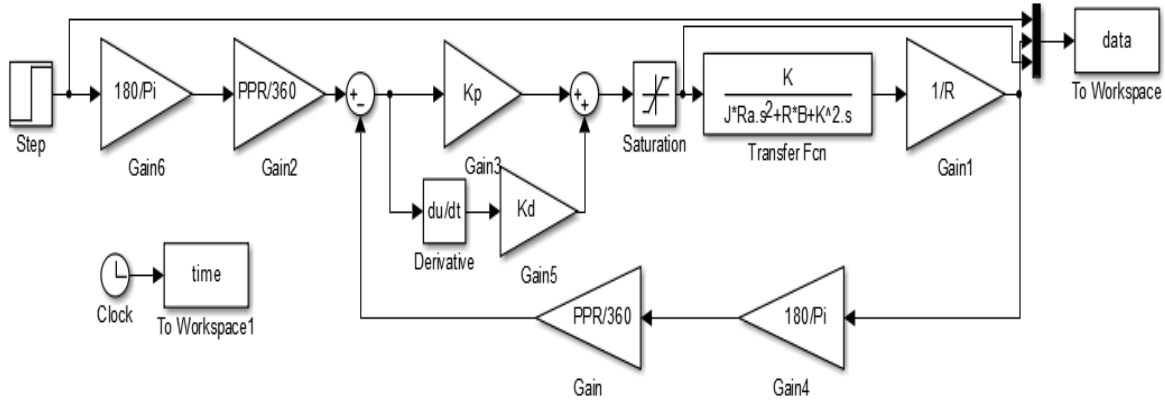


Figura 50. Diagrama de bloques de cada controlador y articulación

Los resultados se muestran en la tabla 13, donde \* implica que los sensores de posición Dynapar se malograron y se tuvieron que reemplazar por un optoacoplador y 1 disco centrado en el eje del motor con 51 agujeros cercanos a su borde.

Tabla 13. Tabla de los valores de las constantes KP y KD para cada controlador

Eslabón	Ángulo[°]	Ángulo [rad]	Parámetro PID			
			K <sub>P</sub>	K <sub>D</sub>	PPR	r
Grado1	90	1.57	27	2.37	51*	120
Grado2	40	0.7	22.5	0.33	51*	160
Grado3	30	0.52	46.13	0.78	2048	120
Grado4	70	1.22	0.57	0.94	1024	130

Elaboración: Propia

donde: PPR = pulsos por revolución

r = factor de reducción del harmonic drive

El controlador PD discreto obtenido del controlador PD continuo queda según lo muestra la ecuación 5.26:

$$D(z) = K_P + K_D * \frac{z-1}{Tz}$$

(5.26)

El algoritmo de cada controlador en transformada Z lo muestra la ecuación 5.27:

$$G_c[k] = K_P * e[k] + K_D * \frac{1}{T} * (e[k] - e[k - 1]) \tag{5.27}$$

donde: e[k] = señal de error recibido

T = período de muestreo

En el Anexo 18 se muestran 4 figuras de la sintonización de los motores M1 al M4.

### 5.3 Software

A continuación se detallan los programas del control Maestro, de los esclavos y la interfaz de usuario.

#### 5.3.1 Programa del Control Maestro

El control maestro tiene como única función recibir la trama enviada desde la interface de usuario y reenviarla a cada uno de los cinco controles esclavos; luego espera la siguiente trama enviada por la interface de usuario. Su diagrama de flujo se muestra en la figura 51.

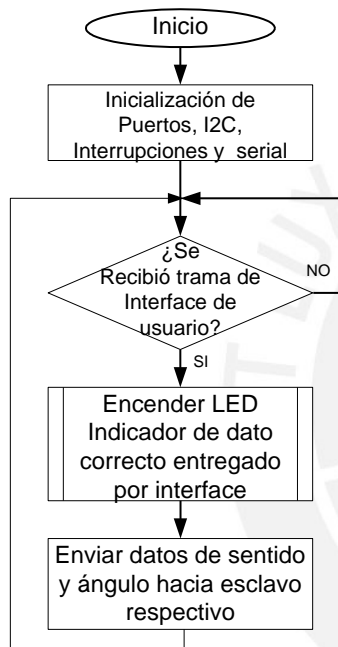


Figura 51. Diagrama de flujo del control maestro

El programa completo del Control Maestro se encuentra en el Anexo 15.

#### 5.3.2 Programa del Control Esclavo

Cada una de las tarjetas esclavas posee el mismo diagrama de flujo (ver figura 52) que consiste en estar a la espera de la trama enviada por el control maestro, una vez recibida la trama, separa el valor de ángulo y sentido de giro; traduce el valor de ángulo a una cantidad de pulsos requerida; luego actualiza el error de acuerdo al algoritmo de control PID; está siempre pendiente si se presenta una interrupción por sobre corriente o activación de una llave de fin de carrera; chequea si terminó el movimiento solicitado, en caso negativo actualiza error, en caso afirmativo detiene el motor respectivo y enciende un led indicador, esta misma acción la realiza en caso de presentarse una interrupción.

Hecho esto último, cada control esclavo se queda en espera hasta que le vuelva a llegar una siguiente trama del control maestro. El programa completo del Controlador Esclavo se encuentra en el Anexo 16.

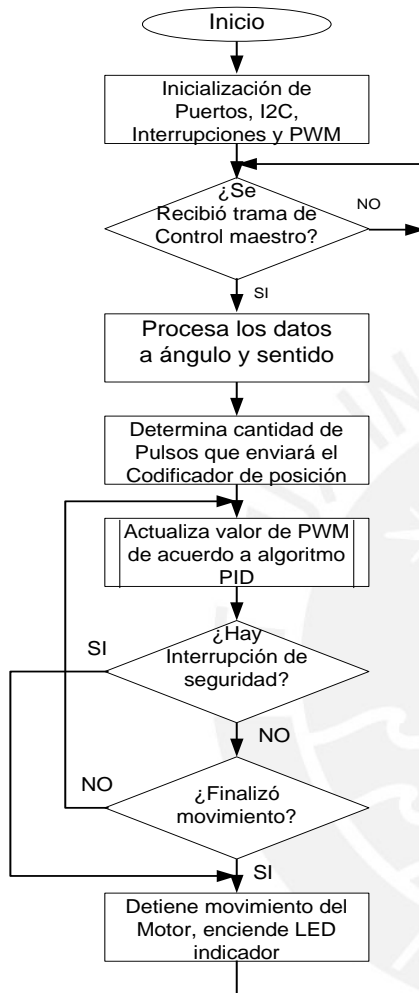


Figura 52. Diagrama de flujo de cada control esclavo

### 5.3.3 Interfaz de Usuario

Para el desarrollo del presente trabajo se eligió el Entorno de Desarrollo Integrado Visual Studio como interface de usuario debido a que trabaja con múltiples lenguajes de programación, entre ellos: C++, C sharp, Visual Basic.NET, Java, Python, etc; además permite una mejor interface más limpia y personalizable.

La interface de usuario es la encargada de realizar todos los cálculos, desde la cinemática directa, la cinemática inversa, cálculo de Jacobiano, interpolación hasta la generación de la trayectoria.

En la figura 53 se muestra la interface del usuario para la generación de TRAYECTORIAS EN ROBOT 5 GRADOS DE LIBERTAD, donde se aprecian 3 campos: CONEXIÓN, TRAYECTORIA y SIMULACIÓN 3D.



Figura 53. Interfaz gráfica del usuario

En el campo de CONEXIÓN se tienen los puntos:

1. Selección del puerto de comunicación, donde se tiene la caja de:
  - Actualizar Puertos USB Disponibles, y
  - Puerto seleccionado.
2. Realizar conexión, donde están las cajas Desconectar Sistema y Calibrar, y a la vez los indicadores de Sistema Apagado y Sistema Encendido.

En el campo de TRAYECTORIA se puede ejecutar esto o la cinemática inversa; acá se tiene los puntos:

3. Selección de trayectoria, que es cúbica.
4. El robot 5GDL se encuentra en esta posición, donde figuran las coordenadas cartesianas x,y,z del mismo.
5. Escoja posición final, donde usuario ingresa las coordenadas cartesianas x,y,z del punto destino para ejecutar una trayectoria.
6. Inversa y Saveang, son las coordenadas articulares de la posición inicial y las coordenadas articulares del punto intermedio de la trayectoria respectivamente. Cuando se ejecuta la segunda parte de la trayectoria, en Inversa aparecen las coordenadas articulares del punto intermedio, y en Saveang las coordenadas articulares de la posición final.

- Realizar trayectoria, que cuando se pulsa la caja de flecha, se inicia la trayectoria y aparecen en el campo Jacobiano los valores de cada fila de la mencionada matriz, las mismas que varían para cada punto de cálculo.

En el campo de SIMULACIÓN 3D hay un recuadro donde se graficará es desplazamiento que realiza el extremo del robot al ejecutar la trayectoria solicitada.

Debajo de la leyenda **7 Realizar trayectoria** hay una caja con título **C Directa** en caso que se requiera realizar la cinemática directa; aparece la ventana de la figura 54 como interface de usuario:

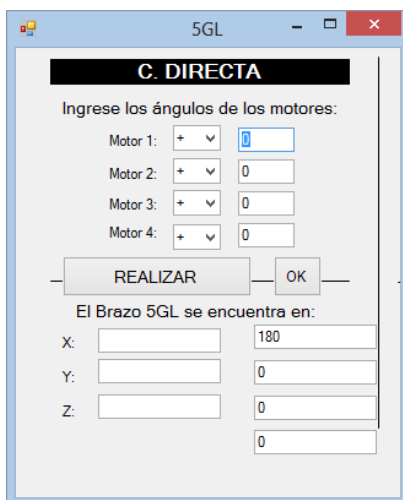


Figura 54. Vista de la interfaz de usuario para realizar cinemática directa

El usuario deberá ingresar los ángulos que deberán girar los motores con sus respectivos sentidos, + sentido horario, - sentido antihorario. Al presionar la caja REALIZAR, la PC ejecutará la cinemática directa y los resultados de las coordenadas espaciales aparecerán en las casillas x, y, z; y a su costado los valores de los ángulos.

Al presionar la caja OK, desaparece la ventana de C. Directa.

La figura 55 muestra la interface de usuario cuando se requiere hacer una actualización de datos.

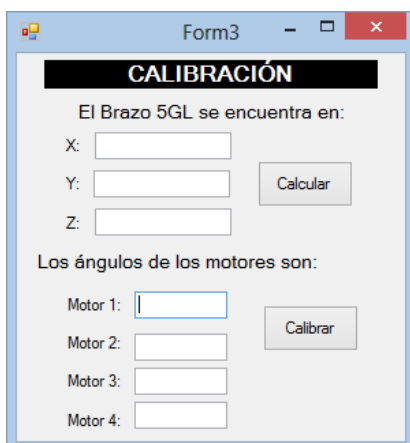


Figura 55. Vista de la interfaz de usuario cuando se requiere una actualización de datos

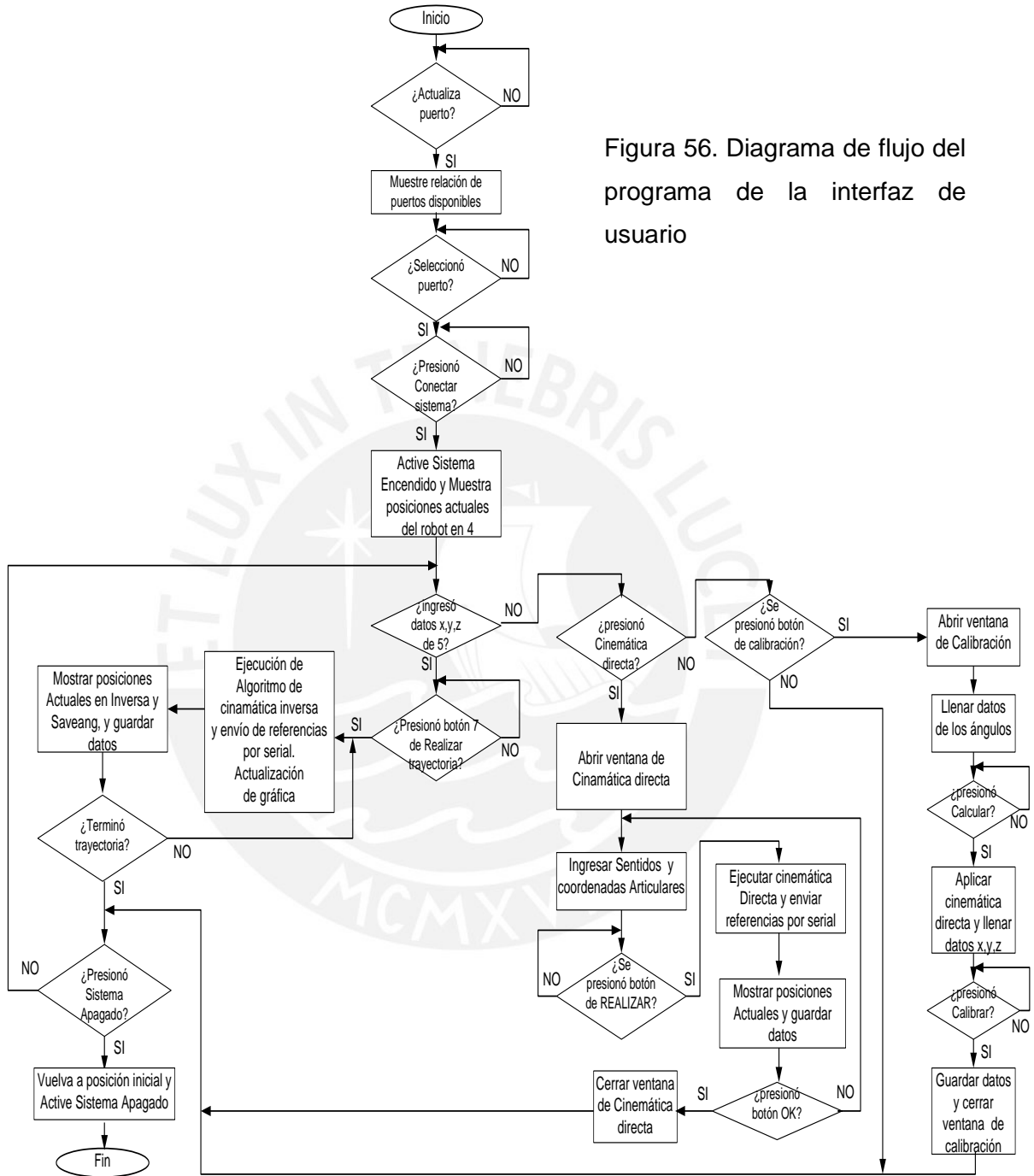


Figura 56. Diagrama de flujo del programa de la interfaz de usuario

Debajo de la leyenda: **Los ángulos de los motores son**, se ingresan los respectivos ángulos; una vez presionado la caja de **Calcular**, la interface de usuario ejecuta la cinemática directa para ingresar los resultados en las cajas X,Y,Z debajo de la leyenda: **El Brazo 5GDL se encuentra en:**. Después cuando se presione la caja **Calibrar**, se guardan los datos, se cierra la ventana de calibración y se regresa a la ventana principal.

La trama que genera la interface de usuario y que es enviada al controlador maestro tiene la composición de la figura 57:

ángulo 1	signo	@	ángulo 2	signo	@	ángulo 3	signo	@	ángulo 4	signo	@	ángulo 5	signo	@
----------	-------	---	----------	-------	---	----------	-------	---	----------	-------	---	----------	-------	---

Figura 57. Trama que envía la interfaz hacia el controlador Maestro

El campo de ángulo es de 3 bytes, donde se coloca el valor de ángulo que se desea que gire cada articulación, variando de 000 hasta 360°.

El campo de signo es de 1 byte, se coloca [+] si el ángulo que gira el motor es en el sentido horario y [-] en el sentido antihorario respecto a su posición de referencia.

Finalmente el campo de @ que indica fin de datos para cada motor.

En la figura 56 se muestra el diagrama de flujo de la interfaz de usuario.

El programa completo de la interfaz de usuario se encuentra en el Anexo 17.

Para simplificar el algoritmo de la cinemática inversa de 5 GDL, en la práctica se implementó otro algoritmo que primero halla el  $q_2$  antes que  $q_3$ ,  $q_4$  y  $q_5$  de manera de convertir un problema inverso de 5GDL a uno de 3GDL. Lo que hace este algoritmo es determinar posiciones que se aproximen al punto deseado muestreando desde 20° hasta 120° el motor 2. El valor de  $q_2$  es aquel cuya distancia entre el centro del motor 2 y el punto seleccionado sea mayor a 20 cm y menor a 56 cm.

El punto final del eslabón 2 se toma como punto inicial del algoritmo de cinemática inversa de 3GDL.



## CAPÍTULO 6

## ENSAYOS Y RESULTADOS DEL BRAZO ROBOT DE 5 GDL

Se llegó a ensamblar los 5 eslabones del brazo robot (ver figura 58), lamentablemente cuando se estaban haciendo ensayos del motor M5, este se malogró desplazándose el bobinado respecto al eje; por lo que los ensayos que se realizaron no contenían este motor con su respectivo brazo.

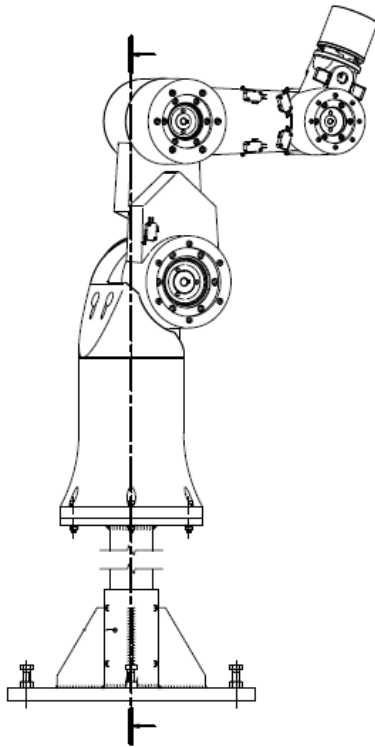


Figura 58. Brazo robot de 5 GDL

A continuación se describen los ensayos realizados y los resultados obtenidos estando ensamblado el brazo robot hasta el 4to GDL:

- Prueba de error máximo de cada motor
- Prueba de error de trayectoria del brazo 4

### 6.1 PRUEBA DE ERROR MÁXIMO DE CADA MOTOR

Para hallar el ángulo girado de cada motor se midió el arco desplazado y se dividió entre el radio de giro de cada motor. Se realizaron los siguientes ensayos:

#### Motor 1 poner foto

Se repitió 10 veces el movimiento del motor 1 desde su posición inicial hasta realizar un giro de 90°. Ver figuras 59 a) y b)

El error máximo hallado fue de  $4^\circ$

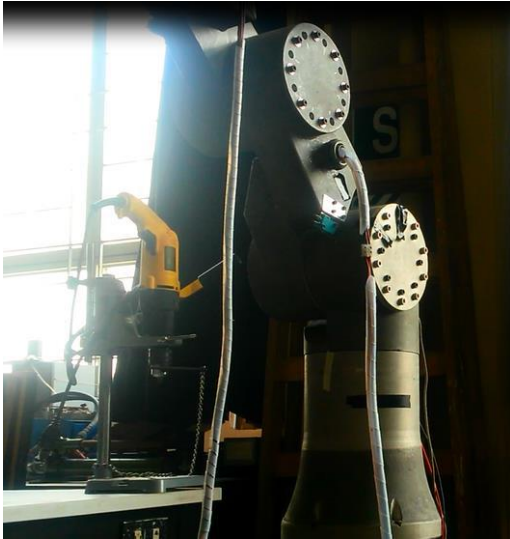


Figura 59. a) Posición a  $0^\circ$  del motor 1



b) Posición a  $90^\circ$  del motor 1

### Motor 2

Se repitió 10 veces el movimiento del motor 2 desde una posición vertical del brazo 2,  $40^\circ$  en sentido horario. Ver figuras 60 a) y b).

El error máximo hallado fue de  $7^\circ$

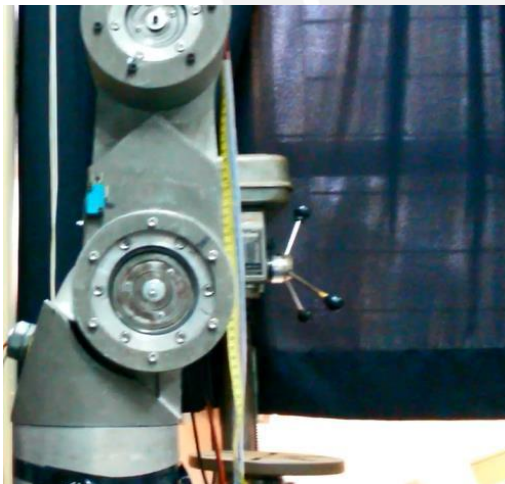
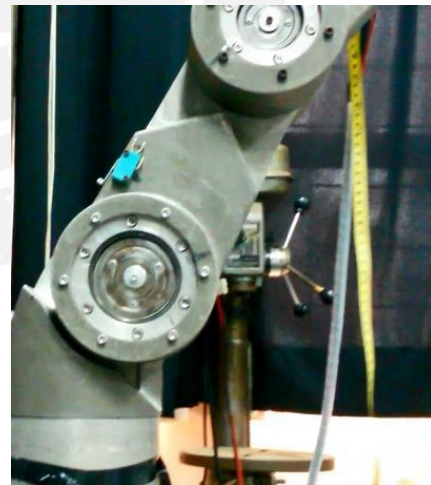


Figura 60. a) Posición a  $90^\circ$  del motor 2



b) Posición a  $50^\circ$  del motor 2

### Motor 3

Se repitió 10 veces el movimiento del motor 3 desde una posición de  $10^\circ$  del brazo 3 desde una posición horizontal,  $30^\circ$  en sentido horario. Ver figuras 61 a y b)

El error máximo hallado fue de  $3^\circ$



Figura 61. a) Posición a  $10^\circ$  del motor 3

b) Posición a  $40^\circ$  del motor 3

### Motor 4

Se repitió 10 veces el movimiento del motor 4 desde una posición horizontal del brazo 4,  $70^\circ$  en sentido antihorario. Ver figuras 62 a) y b)

El error máximo hallado fue de  $4^\circ$



Figura 62. a) Posición a  $0^\circ$  del motor 4

b) Posición a  $70^\circ$  del motor 4

**Motor 5**

Para este motor, como se comentó anteriormente, se montó en el brazo robot y luego de ser accionado, se desplazó el cuerpo del eje y se malogró; por lo tanto no se pudo hacer ensayos con el mismo.

En la tabla 14 se muestra el resumen de los errores máximos de cada articulación.

Tabla 14. Errores máximos de cada articulación

error max	[°]
q1	4
q2	7
q3	3
q4	4

Elaboración: Propia

**6.2 PRUEBA DE ERROR DE TRAYECTORIA DEL BRAZO 4**

Se generaron 2 trayectorias del brazo robot y se repitieron 4 veces cada una:

Trayectoria A.- Se programó el brazo robot para que se desplazara 4 veces a las coordenadas  $X=-0.3m$ ,  $Y=0.4m$  y  $Z=0.5m$  desde su posición de reposo.

Trayectoria B.- Se programó el brazo robot para que se desplazara 4 veces a las coordenadas  $X=0.4m$ ,  $Y=-0.3m$  y  $Z=0.6m$  desde su posición de reposo.

**TRAYECTORIA A**

Se programó el brazo robot para que se desplazara 4 veces a las coordenadas  $X=-0.3m$ ,  $Y=0.4m$  y  $Z=0.5m$  desde su posición de reposo. Para ello en la interface de usuario, en el campo de TRAYECTORIA, en el ítem 5 Escoja posición final, se ingresan los valores mencionados en las cajas de las coordenadas x,y,z, y a continuación se presiona la caja 7 de Realizar trayectoria.

La tabla 15 muestra: los valores medidos de las coordenadas x,y,z del extremo del 4to brazo para cada una de las 4 repeticiones, la posición teórica que debía moverse, el valor promedio de cada coordenada, y el error máximo y error mínimo de cada coordenada.

Tabla 15. Valores medidos de las coordenadas x,y,z en cm del extremo del 4to brazo para la trayectoria A

Pos Teorico	Prueba Real 1	Prueba Real 2	Prueba Real 3	Prueba Real 4	Promedio	e MAX	e min
-19	-19.45	-19.55	-19.7	-19.7	-19.6	0.7	0.45
26.5	25.7	26	26.4	25.9	26	0.8	0.1
57	57.3	56.5	56.8	54.6	56.3	2.4	0.3

Elaboración: Propia

Se puede apreciar que en la coordenada x el error absoluto máximo sería 0.7cm, en la coordenada y sería 0.8cm, y en la coordenada z sería 2.4cm; siendo en esta última coordenada donde se nota mayor error absoluto.

Dado que la ubicación del extremo del robot es en el espacio de coordenadas cartesiana, entonces calcularemos el volumen de error para cada prueba según la fórmula (6.1).

$$e = \sqrt{(x - x_o)^2 + (y - y_o)^2 + (z - z_o)^2} \tag{6.1}$$

donde  $x_o$ ,  $y_o$  y  $z_o$  son las coordenadas de la posición teórica y además  $x$ ,  $y$  y  $z$  son las coordenadas medidas para cada una de las 4 repeticiones.

La tabla 16 muestra el volumen de error para cada una de las 4 repeticiones, también el volumen de error máximo y el volumen de error mínimo.

Tabla 16. Volumen de error del extremo del 4to brazo para la trayectoria A

	Prueba Real1	Prueba Real2	Prueba Real3	Prueba Real4	Vol e MAX	Vol e min
Volumen de eA	1.0	0.9	0.7	2.6	2.6	0.7

Elaboración: Propia

Se puede apreciar que la ubicación del extremo 4to del brazo robot tiene un volumen de error máximo de 2.6 cm; es decir puede caer en cualquier posición dentro de una esfera de 2.6 cm de radio, siendo el eje de mayor fuente de error el eje z con 2.4 cm.

### TRAYECTORIA B

Se programó el brazo robot para que se desplazara 4 veces a las coordenadas  $X=0.4m$ ,  $Y = -0.3m$  y  $Z=0.6m$  desde su posición de reposo.

La tabla 17 muestra: los valores medidos de las coordenadas x,y,z en cm del extremo del 4to brazo para cada una de las 4 repeticiones, el valor teórico que debía moverse, el valor promedio de cada coordenada, y el error máximo y error mínimo de cada coordenada.

Tabla 17. Valores medidos de las coordenadas x,y,z del extremo del 4to brazo para la trayectoria B

Pos Teorico	Prueba Real1	Prueba Real2	Prueba Real3	Prueba Real4	e MAX	e min
22	19	18.5	19.2	19.3	3.5	2.7
-19	-15.6	-16.4	-16.2	-15.8	3.4	2.6
57	56.5	57.712	57.9	56.8	0.9	0.5

Elaboración: Propia

Se puede apreciar que en la coordenada x el error absoluto máximo sería 3.5 cm, en la coordenada y sería 3.4 cm, y en la coordenada z sería 0.9 cm; siendo la coordenada x donde se nota mayor error absoluto.

La tabla 18 muestra el volumen de error para cada una de las 4 repeticiones, también el volumen de error máximo y el volumen de error mínimo.

Tabla 18. Volumen de error del extremo del 4to brazo para la trayectoria B

	Prueba Real1	Prueba Real2	Prueba Real3	Prueba Real4	Vol e MAX	Vol e min
Volumen de eB	4.6	4.4	4.1	4.2	4.6	4.1

Elaboración: Propia

Se puede apreciar que la ubicación del extremo 4to del brazo robot tiene un volumen de error máximo de 4.6 cm; es decir puede caer en cualquier posición dentro de una esfera de 4.6 cm de radio, siendo el eje de mayor fuente de error el x con 3.5 cm.

Adicionalmente se generaron 5 trayectorias del brazo robot y se repitieron 2 veces cada una:

**Trayectoria 1.-** Se programó el brazo robot para que se desplazara 2 veces a las coordenadas  $X=-0.21$  m,  $Y=0.27$  m y  $Z=0.55$  m desde su posición de reposo.

La tabla 19 muestra: los valores medidos de las coordenadas x,y,z en cm del extremo del 4to brazo para cada una de las 4 repeticiones, el valor teórico que debía moverse, el valor promedio de cada coordenada, y el error máximo y error mínimo de cada coordenada.

Tabla 19. Valores medidos de las coordenadas x,y,z en cm del extremo del 4to brazo para la trayectoria 1

	Pos Teorico	Pos 1.1	Pos 1.2	Promedio	e MAX	e min
x	21	24	21	22.5	3.00	0.00
y	27	32	26	29	5.00	1.00
z	55	52	61	56.5	6.00	3.00

Elaboración: Propia

Se puede apreciar que en la coordenada x el error absoluto máximo sería 3 cm, en la coordenada y sería 5 cm, y en la coordenada z sería 6 cm; siendo la coordenada z donde se nota mayor error absoluto.

La tabla 20 muestra el volumen de error para cada una de las 2 repeticiones, también el volumen de error máximo y el volumen de error mínimo.

Tabla 20. Volumen de error del extremo del 4to brazo para la trayectoria 1

Volumen de e 1.1	Volumen de e1.2	Vol e MAX	Vol e min
6.6	6.1	6.6	6.1

Elaboración: Propia

Se puede apreciar que la ubicación del extremo 4to del brazo robot tiene un volumen de error máximo de 6.6 cm; es decir puede caer en cualquier posición dentro de una esfera de 6.6 cm de radio, siendo el eje de mayor fuente de error el z con 6 cm.

**Trayectoria 2.-** Se programó el brazo robot para que se desplazara 2 veces a las coordenadas  $X=-0.30$  m,  $Y=0.15$  m y  $Z=0.559$  m desde su posición de reposo.

La tabla 21 muestra: los valores medidos de las coordenadas x,y,z en cm del extremo del 4to brazo para cada una de las 2 repeticiones, el valor teórico que debía moverse, el valor promedio de cada coordenada, y el error máximo y error mínimo de cada coordenada.

Tabla 21. Valores medidos de las coordenadas x,y,z en cm del extremo del 4to brazo para la trayectoria 2

	Pos Teorico	Pos 2.1	Pos 2.2	Promedio	e MAX	e min
x	-30	-30	-30	-30	0.00	0.00
y	15	23	20	21.5	8.00	5.00
z	55.9	52	50	51	3.90	5.90

Elaboración: Propia

Se puede apreciar que en la coordenada x no hay error, en la coordenada y sería 8 cm, y en la coordenada z sería 5.9 cm; siendo la coordenada y donde se nota mayor error absoluto.

La tabla 22 muestra el volumen de error para cada una de las 2 repeticiones, también el volumen de error máximo y el volumen de error mínimo.

Tabla 22. Volumen de error del extremo del 4to brazo para la trayectoria 2

Volumen de e 2.1	Volumen de e 2.2	Vol e MAX	Vol e min
8.9	7.7	8.9	7.7

Elaboración: Propia

Se puede apreciar que la ubicación del extremo 4to del brazo robot tiene un volumen de error máximo de 8.9 cm; es decir puede caer en cualquier posición dentro de una esfera de 8.9 cm de radio, siendo el eje y el de mayor fuente de error con 8 cm.

**Trayectoria 3.-** Se programó el brazo robot para que se desplazara 2 veces a las coordenadas  $X= 0.27.5$  m ,  $Y=- 0.456$  m y  $Z=0.5$  m desde su posición de reposo.

La tabla 23 muestra: los valores medidos de las coordenadas x,y,z en cm del extremo del 4to brazo para cada una de las 2 repeticiones, el valor teórico que debía moverse, el valor promedio de cada coordenada, y el error máximo y error mínimo de cada coordenada.

Tabla 23. Valores medidos de las coordenadas x,y,z en cm del extremo del 4to brazo para la trayectoria 3

	Pos Teorico	Pos 3.1	Pos 3.2	Promedio	e MAX	e min
x	27.5	28	30	29	2.50	0.50
y	-45.6	-42	-45	-43.5	3.60	0.60
z	26.4	30	30	30	3.60	3.60

Elaboración: Propia

Se puede apreciar que en la coordenada x el error máximo es 2.5 cm, en la coordenada y 3.6 cm, y en la coordenada z 3.6 cm; siendo las coordenada z e y donde las que presentan mayor error absoluto.

La tabla 24 muestra el volumen de error para cada una de las 2 repeticiones, también el volumen de error máximo y el volumen de error mínimo.

Tabla 24. Volumen de error del extremo del 4to brazo para la trayectoria 3

Volumen de e 3.1	Volumen de e 3.2	Vol e MAX	Vol e min
5.1	4.4	5.1	4.4

Elaboración: Propia

Se puede apreciar que la ubicación del extremo 4to del brazo robot tiene un volumen de error máximo de 5.1 cm; es decir puede caer en cualquier posición dentro de una esfera de 5.1 cm de radio, siendo el eje de mayor fuente de error el y y el z con 3.6 cm.

**Trayectoria 4.-** Se programó el brazo robot para que se desplazara 2 veces a las coordenadas  $X=-0.37$  m,  $Y=0.37$  m y  $Z=0.3119$  m desde su posición de reposo.

La tabla 25 muestra: los valores medidos de las coordenadas x,y,z en cm del extremo del 4to brazo para cada una de las 2 repeticiones, el valor teórico que debía moverse, el valor promedio de cada coordenada, y el error máximo y error mínimo de cada coordenada.

Tabla 25. Valores medidos de las coordenadas x,y,z en cm del extremo del 4to brazo para la trayectoria 4

	Pos Teorico	Pos 4.1	Pos 4.2	Promedio	e MAX	e min
x	37	32	36	34	1.00	5.00
y	37	40	32	36	3.00	5.00
z	31.19	36	36	36	4.81	4.81

Elaboración: Propia

Se puede apreciar que en la coordenada x el error máximo es 5 cm, en la coordenada y 5 cm, y en la coordenada z 4.81 cm; siendo las coordenada x e y donde las que presentan mayor error absoluto.



La tabla 26 muestra el volumen de error para cada una de las 2 repeticiones, también el volumen de error máximo y el volumen de error mínimo.

Tabla 26. Volumen de error del extremo del 4to brazo para la trayectoria 4

Volumen de e 4.1	Volumen de e 4.2	Vol e MAX	Vol e min
7.6	7.0	7.6	7.0

Elaboración: Propia

Se puede apreciar que la ubicación del extremo 4to del brazo robot tiene un volumen de error máximo de 7.6 cm; es decir puede caer en cualquier posición dentro de una esfera de 7.6 cm de radio, siendo el eje de mayor fuente de error el x e y con 5 cm.

**Trayectoria 5.-** Se programó el brazo robot para que se desplazara 2 veces a las coordenadas  $X=-0.274$ ,  $Y=-0.456$  y  $Z=0.26.46$  desde su posición de reposo.

La tabla 27 muestra: los valores medidos de las coordenadas x,y,z en cm del extremo del 4to brazo para cada una de las 2 repeticiones, el valor teórico que debía moverse, el valor promedio de cada coordenada, y el error máximo y error mínimo de cada coordenada.

Tabla 27. Valores medidos de las coordenadas x,y,z en cm del extremo del 4to brazo para la trayectoria 5

	Pos Teorico	Pos 5.1	Pos 5.2	Promedio	e MAX	e min
x	-27.4	-32	-35	-33.5	7.60	4.60
y	-45.6	-40	-42	-41	5.60	3.60
z	26.46	30	26	28	3.54	0.46

Elaboración: Propia

Se puede apreciar que en la coordenada x el error máximo es 7.6 cm, en la coordenada y 5.6 cm, y en la coordenada z 3.54 cm; siendo las coordenada x la que presentan mayor error absoluto.

La tabla 28 muestra el volumen de error para cada una de las 2 repeticiones, también el volumen de error máximo y el volumen de error mínimo.

Tabla 28. Volumen de error del extremo del 4to brazo para la trayectoria 5

Volumen de e 5.1	Volumen de e 5.2	Vol e MAX	Vol e min
8.1	8.4	8.4	8.1

Elaboración: Propia

Se puede apreciar que la ubicación del extremo 4to del brazo robot tiene un volumen de error máximo de 8.4 cm; es decir puede caer en cualquier posición dentro de una esfera de 8.4 cm de radio, siendo el eje de mayor fuente de error el x con 7.6 cm.

## CONCLUSIONES

- Se seleccionaron los sensores de posición marca Dynapar por ser de las medidas adecuadas según la estructura interna de los brazos del manipulador. La cantidad de pulsos de estos sensores no es crítica ya que aún considerando un sensor con 51 ppr, si se utilizan harmonic drive con factores de reducción iguales o mayores a 100, la cantidad mínima de pulsos al microcontrolador en cada revolución de una articulación son 5100 ppr, obteniendo una sensibilidad de 0.07°.
- Se seleccionó como excitador el CI Dual VNH2SP30 Motor Driver Carrier MD03A, el cual contiene 2 puentes H independientes para excitar 2 motores y trabaja hasta 16VDC. Si bien los motores heredados DC trabajan hasta los 120VDC, dado que se requiere un prototipo que permita probar el robot a velocidades menores que la nominal, este CI es una unidad compacta que reduce grandemente los tiempos de diseño e implementación, de tamaño mediano, posee sensado de corriente, y todo a un costo muy accesible (considerando que se requieren 6 excitadores). Se comprobó su funcionalidad.
- Se diseñó y construyó 5 tarjetas de control esclavo, una tarjeta de control maestro, todas en función a un microcontrolador ATMEGA 8A-AU. Adicionalmente se implementó una tarjeta que contiene una compuerta OR de 10 entradas con salidas complementarias, 5 de estas entradas son las salidas de sobrecorriente amplificadas de cada control esclavo y las otras 5 provienen de las llaves de fin de carrera, de manera que si en cada control esclavo se produce un exceso de corriente o se activa cualquiera de las llaves de fin de carrera, entonces la salida de esta compuerta OR se conecta a un pin de interrupción de todos los controles esclavos deteniendo inmediatamente el accionamiento de todos los motores y así evitar cualquier daño personal o material.
- Se seleccionó como interface de comunicación entre las tarjetas esclavas y la tarjeta maestra, al bus de comunicaciones en serie I<sup>2</sup>C, y como interface de comunicación entre la tarjeta maestra y la interface de usuario al bus estándar industrial USB y el CI CH340 para la conversión de USB a RS-232.

- No se ha seleccionado la fuente de alimentación dado que no se tiene montado el 5to eslabón. Se ha trabajado con una fuente de alimentación variable hasta 20 voltios y 8 A desarrollada en la Sección Electricidad y Electrónica, y no se ha requerido su máxima corriente, aún trabajando los 4 motores en simultáneo. Además hasta que no se alimente a los motores con su máximo voltaje, para desarrollar la máxima velocidad, no se debe seleccionar la fuente de alimentación.
- Se diseñó la interface de usuario en la PC en lenguaje Visual Studio, de manera que el usuario pueda decidir si realizar la cinemática Directa, la cinemática Inversa o la ejecución de trayectorias; y además apreciar el movimiento del brazo robot.
- Se diseñaron los programas de control en lenguaje C de los controles esclavos y del control maestro, logrando una comunicación efectiva entre la interface de usuario y los controladores esclavos.
- Se realizaron pruebas de cinemática directa que coincidieron totalmente con las del Matlab pues ambos algoritmos son idénticos; se realizaron un millón pruebas de cinemática inversa obteniéndose solo 1079 pruebas que superaban los 5 cm de error; y finalmente se realizaron pruebas de generación de trayectorias obteniéndose volúmenes de error mínimo de 0.7 cm de radio y volúmenes de error máximo de 8.9 cm de radio.

## TRABAJOS A FUTURO

### Para el subsistema mecánico

- Cuando se utilicen harmonic drive, rediseñar la parte mecánica que incluya piezas que minimizan el descentrado del harmonic, esto reduciría grandemente el rozamiento en los acoples que generaban problemas de funcionamiento ya que por ejemplo el motor 2 al ser alimentado con 15 VDC se trababa cuando estaba mas de 30° fuera de la vertical.
- Analizar la fijación de desplazamientos de los motores 2,3 y 4 que cuando funcionaban, se colocaron tornillos en los ejes de los mismos que evitaban el corrimiento de los harmonic drive.
- Reparar el motor 5 y determinar el motivo de la falla del mismo cuando se ensambla y actúa.
- Se ha obtenido una mejora en el diseño de los planos, sobre todo en relación a las medidas y tolerancias.
- 

### Para el subsistema electrónico

- Diseñar e implementar Excitadores de 120 VDC para aprovechar al máximo la capacidad de los motores.
- Seleccionar o diseñar la fuente de alimentación de 120VDC y la cantidad de corriente que requieran los motores funcionando a ese voltaje. Se ensayaron los motores M1 y M2 con 40 VDC y consumieron 1.5 A y 4A como máximo respectivamente, sin ninguna traba en su desplazamiento.
- Faltaba un encoder Dynapar para el motor 1, lamentablemente de tanto armar y desarmar el motor 2, el encoder 2 sufrió daños, restándonos 2 encoders para completar cada motor con su encoder. Dado que el proveedor demoró más de 1 año en enviarlo y además vinieron en mal estado pues nunca funcionaron, nos vimos obligados a diseñar e implementar 2 encoder conformados por un disco centrado en el eje de cada motor con 51 agujeros en su borde exterior, y un optoacoplador que generaba pulsos. Se le agregó a la salida del optoacoplador una compuerta Smith Trigger para obtener flancos bien definidos.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Antonio Barrientos Cruz, “Fundamentos de robótica”, McGraw-Hill/Interamericana, 2da Edición 2007
- [2] <http://www.ifr.org/industrial-robots/statistics/> , Executive\_Summary\_WR\_2014\_02 , 24 de abril del 2015
- [3] Lorenzo Sciavicco, Bruno Siciliano, “ Modelling and Control of Robot Manipulators”, Second Edition, Springer, 2000
- [4] Mark W. Spong, M. Vidyasagar, “Robot Dynamics and Control”, John Wiley & Sons, 1989
- [5] J. Norberto Pires, “Industrial robots programming: building applications for the factories of the future”, Springer, 2007
- [6] R. Kelly, V. Santibáñez and A. Loria , “Control of Robot Manipulators in Joint Space”, Springer, 2005
- [7] R. Carelli, “Dinámica y Control de Manipuladores Robóticos”, Pontificia Universidad Católica del Perú, Escuela de Graduados, Lima-Perú, Mayo de 2001
- [8] J. Chávez, “PROGRAMACIÓN DEL SISTEMA ELECTRÓNICO DE UN ROBOT MANIPULADOR DE CINCO GRADOS DE LIBERTAD”, Pontificia Universidad Católica del Perú, Tesis de Grado de Ingeniería Electrónica, Noviembre de 2014
- [9] [http://www.societyofrobots.com/robot\\_arm\\_tutorial.shtml](http://www.societyofrobots.com/robot_arm_tutorial.shtml) , 31 de agosto del 2013
- [10] Remote Control of Robot Arm with five DOF  
Vedran Vajnberger, Tarik Terzimehić, Semir Silajdžić and Nedim Osmić  
MIPRO 2011, May 23-27, 2011, Opatija, Croatia
- [11] A Mimicking Human Arm with 5 DOF Controlled by LabVIEW  
Basil Hamed IACSIT International Journal of Engineering and Technology, Vol.3 , No.1, February 2011 ISSN: 1793-8236  
[http://www.academia.edu/2442846/A\\_Mimicking\\_Human\\_Arm\\_with\\_5\\_DOF\\_Controlled\\_by\\_LabVIEW](http://www.academia.edu/2442846/A_Mimicking_Human_Arm_with_5_DOF_Controlled_by_LabVIEW)  
Revisado el 5 de mayo del 2013
- [12] HARDWARE INTERFACE FOR A 3-DOF SURGICAL ROBOT ARM  
Ahmet Atasay, Duygun Eral Barkana, Mehmed Ozkan  
Institute of Biomedical Engineering , Bogazici University  
Kandilli Kampus, 34684, Istanbul, Turkey
- [13] Tele-operation between Human and Robot Arm using Wearable Electronic Device  
HeeBae Song, Doik Kim, Mignon Park,  
JoonByung Park  
Proceedings of the 17th World Congress

The International Federation of Automatic Control  
Seoul, Korea, July 6-11, 2008

[14] 5 DOF Robotic Arm  
Portland State University

<http://www.nt.ntnu.no/users/skoge/prost/proceedings/ifac2008/data/papers/4017.pdf>

Revisado el 5 de mayo del 2013

[15] Diseño de un Observador Stepping para un Robot con Articulación Rotatoria Flexible,  
Universidad Autónoma de Nueva León  
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica  
División de Estudios de Postgrado  
Octubre del 2001

[16] EP 0426264 A2

[17] <http://es.scribd.com/doc/27352328/Cap-1-Libro-de-Texto-Robotica-Industrial>,  
Abril del 2013

[18] <http://www.learobotics.com/personal/andres/proyectos/pucho/documentacion/capitulo1.pdf>, Abril del 2013

[19] [http://cfievalladolid2.net/tecno/cyr\\_01/robotica/industrial.htm](http://cfievalladolid2.net/tecno/cyr_01/robotica/industrial.htm), Abril del 2013

[20] [http://www.societyofrobots.com/robot\\_arm\\_tutorial.shtml#forward\\_kinematics](http://www.societyofrobots.com/robot_arm_tutorial.shtml#forward_kinematics), Abril del 2013

[21] <http://www.garibay.com.es/doctorado/Robotica.pdf>, Abril del 2013

[22] <http://vertol.mit.edu>, Aerospace Controls Laboratory at MIT Abril del 2013

[23] <http://auvlab.mit.edu/>, AUV Lab at MIT Sea Grant., Abril del 2013

[24] <http://proton.ucting.udg.mx/materias/robotica/r166/r63/r63.htm>, Abril del 2013

[25] <http://biorob.epfl.ch/>, Biologically Inspired Robotics Group (BIRG), Abril del 2013