



**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA MECATRÓNICO  
DE DOS GRADOS DE LIBERTAD.**

**Por:**

**JHEIFER MANUEL PÁEZ ALMENTERO  
NELSON JAVIER MARSIGLIA IBÁÑEZ**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA Y MECATRÓNICA  
CARTAGENA DE INDIAS  
2012**





**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA MECATRÓNICO  
DE DOS GRADOS DE LIBERTAD.**

**Por:**

**JHEIFER MANUEL PÁEZ ALMENTERO  
NELSON JAVIER MARSIGLIA IBÁÑEZ**

**Trabajo de grado presentado para optar el título de Ingeniero  
Mecatrónico.**

**Phd. Eugenio Yime Rodríguez.  
Director**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERIA MECÁNICA Y MECATRÓNICA  
CARTAGENA DE INDIAS  
2012**





Cartagena de indias D.T. y C. 23 de Noviembre del 2012.

Señores:  
COMITÉ CURRICULAR.  
UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR.  
Facultad de Ingenierías. Cartagena.

Estimados Señores.

Luego de revisar el trabajo de grado “**Diseño y construcción de un sistema mecatrónico de dos grados de libertad**” de los estudiantes Jheifer Manuel Páez Almentero y Nelson Javier Marsiglia Ibáñez; considero que cumple con los objetivos propuestos, por lo que estoy de acuerdo en presentarlo formalmente para su calificación y así optar por el título de Ingeniero Mecatrónico.

Cordialmente

---

Eugenio Yime Rodríguez.  
Director del proyecto.



# Índice general

<b>1. Introducción</b>	<b>9</b>
1.1. Antecedentes . . . . .	9
1.2. Objetivos. . . . .	11
1.3. Justificación . . . . .	13
<b>2. Estado del arte</b>	<b>15</b>
2.1. Ejemplos similares sobre sistemas mecatrónicos . . . . .	15
2.2. Motores Eléctricos . . . . .	20
2.2.1. Los Motores Eléctricos en la Industria . . . . .	21
2.3. Microcontroladores . . . . .	21
2.3.1. Los microcontroladores y la robótica. . . . .	24
2.3.2. La PC para controlar robots a través de microcontroladores. . . . .	24
2.4. Teoría de Control PID. . . . .	25
2.4.1. Controlador proporcional (P) . . . . .	25
2.4.2. Controlador Proporcional-Integral (PI) . . . . .	27
2.4.3. Controlador proporcional-integral-derivativo (PID) . . . . .	28
2.5. Mecanismos. . . . .	29
2.5.1. Mecanismos y Máquinas. . . . .	30
2.5.2. Grados de libertad. . . . .	31
2.6. Mecanismo de Cinco barras. . . . .	33
2.6.1. Descripción. . . . .	33
2.6.2. Análisis cinemático directo . . . . .	33
2.6.3. Análisis cinemático inverso. . . . .	38
<b>3. Diseño Mecatrónico del Mecanismo Cinco Barras.</b>	<b>41</b>
3.1. Diseño Mecánico. . . . .	41
3.1.1. Análisis Cinemático: Espacio de trabajo y longitudes deseadas. . . . .	41
3.1.2. Análisis Dinámico: Motores eléctricos, Análisis de esfuerzos. . . . .	44
3.1.3. Herramientas de simulación mecánica. . . . .	45
3.2. Sistema Electrónico. . . . .	47
3.2.1. Descripción general. . . . .	47
3.2.2. Sensor. . . . .	48
3.2.3. Calculador de setpoint. . . . .	48
3.2.4. Controlador. . . . .	48
3.2.5. Amplificador de potencia. . . . .	48

3.2.6.	Uso de <b>Proteus</b> ® para diseño y simulación electrónica. . . . .	49
3.2.7.	Planta. . . . .	49
3.2.8.	Comunicación. . . . .	49
3.2.9.	Software: función para implementar el control PID. . . . .	52
3.3.	Uso de <b>Mplab</b> ® para software de control y comunicación. . . . .	52
<b>4.</b>	<b>Pruebas experimentales.</b>	<b>55</b>
4.1.	Matlab®y Simulink®: . . . . .	55
4.2.	Mplab®. . . . .	57
4.3.	Proteus®. . . . .	57
4.4.	Recorrido del efector final en Matlab®. . . . .	60
<b>5.</b>	<b>Conclusiones y Recomendaciones.</b>	<b>65</b>

# Índice de figuras

2.1. Ejemplos de sistemas, Bolton (2001) . . . . .	16
2.2. Robots y su interacción con el entorno, Anibal Ollero (2001) . . . . .	17
2.3. Primer robot industrial paralelo, Rafael Aracil (2006) . . . . .	19
2.4. Esquema de motor eléctrico. (www.reliance.com) . . . . .	21
2.5. Foto de motores eléctricos asíncronos trifásicos. (Interempresas.net) . . . . .	22
2.6. Campos de aplicación de los microcontroladores, Enrique Mandado Pérez (2007) . . . . .	23
2.7. Estructura de un controlador PID. (es.wikipedia.org) . . . . .	29
2.8. Mecanismo en el espacio tridimensional. US patent No. 4,976,582 . . . . .	30
2.9. Ejemplar de robot cinco barras DexTAR. (www.etsmtl.ca). . . . .	34
2.10. Esquema del mecanismo cinco barras. Los autores. . . . .	38
3.1. Espacio de trabajo del mecanismo cinco barras. Los autores. . . . .	44
3.2. Motorreductor 14 kgcm con encoder. (www.dynamoelectronics.com) . . . . .	45
3.3. Simulación del mecanismo cinco barras en Solid edge. Los autores. . . . .	46
3.4. Esquema básico del funcionamiento del controlador. Los autores. . . . .	47
3.5. Diagrama de bloques del sistema sin perturbaciones. . . . .	47
3.6. Ganancia de voltaje usando un amplificador operacional. Los autores. . . . .	48
3.7. Estructura de un microcontrolador PIC 18F2431. <b>Microchip</b> ®. Los autores. . . . .	49
3.8. Esquema de tarjeta de control en <b>Proteus</b> ®. . . . .	50
3.9. Esquema de tarjeta de comunicación en <b>Proteus</b> ®. . . . .	50
3.10. Control en cascada usado en proyecto. Los autores. . . . .	51
3.11. Estructura de un microcontrolador PIC 18F2550. Microchip ® . . . . .	51
3.12. Diagrama de flujo programa realizado en el entorno MPLAB. . . . .	53
4.1. Diagrama de bloques Simulink del mecanismo cinco barras. . . . .	56
4.2. Tiempo de ejecución PID. Mplab®. . . . .	57
4.3. Tiempo máximo para enviar datos. Proteus®. . . . .	58
4.4. Segundo tiempo máximo para enviar datos. Proteus®. . . . .	59
4.5. Entrada paso $\theta_2$ . . . . .	59
4.6. Entrada paso $\theta_5$ . . . . .	60
4.7. Trayectoria del círculo realizada por el mecanismo robótico. Matlab®. . . . .	61
4.8. Error de posición de $\theta_2$ en función del tiempo (segundos). Matlab®. . . . .	61
4.9. Error de posición de $\theta_5$ en función del tiempo (segundos). Matlab®. . . . .	62

4.10. Error de posición en eje X en centímetros. Matlab®. . . . .	63
4.11. Error de posición en eje Y en centímetros. Matlab®. . . . .	63
5.1. Imagen 1 mecanismo robótico ensamblado. . . . .	67
5.2. Imagen 2 mecanismo robótico ensamblado. . . . .	68
5.3. Imagen 3 mecanismo robótico ensamblado. . . . .	69
5.4. Imagen 4 mecanismo robótico ensamblado. . . . .	70

# Índice de tablas

2.1. Composición de los sistemas mecatrónicos. . . . .	16
2.2. Clasificación de los motores . . . . .	20
3.1. Medidas de eslabones mecanismo cinco barras. . . . .	42





# Capítulo 1

## Introducción

La importancia de los sistemas mecatrónicos se evidencia en las numerosas aplicaciones que actualmente existen, que abarcan desde el sector industrial, como son las máquinas y procesos automatizados, el sector médico, como son los dispositivos médicos sensorizados con bombas de flujos y sensores de presión, hasta el sector del hogar, como son los dispositivos domóticos.

Los sistemas mecatrónicos se utilizan principalmente porque contribuyen en la reducción de costo, son más confiables y flexibles que un equipo puramente mecánico, logran alcanzar mayor precisión y volúmenes de producción. Todo lo anterior gracias a que desde las primeras etapas del proceso de diseño se inculcran las disciplinas de electrónica, mecánica e informática.

### 1.1. Antecedentes

Los estudios sobre sistemas mecatrónicos tienen sus antecedentes en investigaciones realizadas por Turing en 1936 [14], por Norbert Wiener en 1948 [23], las máquinas de control numérico, desarrolladas en 1946 por Devol [15], los manipuladores, ya sean teleoperados, en 1951 por Goertz [3], o robotizados en 1954 por Devol, y los autómatas programables, desarrollados por Bedford Associates en 1958 [25].

En 1969, Tetsuro Mori, un ingeniero de la empresa japonesa Yaskawa Electric Co. utilizó el término mecatrónica, recibiendo aquella en 1971, el derecho a su marca. En 1982 Yaskawa permite el libre uso del término. En los años setenta, la Mecatrónica se ocupó principalmente de la tecnología de servomecanismos usada en productos como puertas automáticas, máquinas automáticas de autoservicio y cámaras autofocus[25].

En este enfoque pronto se aplicaron métodos avanzados de control. En los años ochenta, cuando la tecnología de la información fue introducida, los ingenieros empe-

zaron a incluir microprocesadores en los sistemas mecánicos para mejorar su desempeño. Las máquinas de control numérico y los robots se volvieron más compactos, mientras que las aplicaciones automotrices como los mandos electrónicos del motor y los sistemas anticerrado y frenado se hicieron extensas.

Por los años noventa, se agregó la tecnología de comunicaciones, creando productos que podían conectarse en amplias redes. Este avance hizo posibles funciones como la operación remota de manipuladores robóticos. Al mismo tiempo, se están usando novedosos microsensores y microactuadores en nuevos productos. Los sistemas microelectromecánicos como los diminutos acelerómetros de silicio que activan las bolsas de aire en los automóviles[25].

## 1.2. Objetivos.

### Objetivo General.

Construir un robot planar paralelo empleando técnicas de diseño, con comunicación USB, de fácil programación, de bajo costo y hecho con materiales accesibles.

**Objetivos Específicos.**

- Diseñar el sistema mecatrónico utilizando herramientas teóricas y tutoriales.
- Ensamblar los elementos mecánicos y electrónicos que hacen parte del prototipo.
- Realizar la comunicación eficiente entre el usuario y la máquina a través de un puerto USB.
- Entregar un hardware de control de corriente y de posición totalmente funcional, reconfigurable y reprogramable.

## 1.3. Justificación

En el marco de un mundo en pos de la globalización que plantea unos escenarios austeros de competencia empresarial e industrial, los avances tecnológicos se posicionan como medios importantes para el aumento de la productividad empresarial y el posicionamiento de éstas en el mercado. De ahí que diseñar un sistema mecatrónico de dos grados que facilite la mano de obra de las empresas, contribuye significativamente al aumento de la productividad tan deseado dentro de este contexto.

El presente documento recepcional se realiza primordialmente porque hay que poner en práctica los conocimientos adquiridos durante la carrera profesional. Además, es necesario enfatizar en el control de motores, ya que casi todas las aplicaciones mecatrónicas lo requieren. Existe una necesidad de adquirir un hardware de bajo costo, de control didáctico, reconfigurable y reprogramable y esto es aplicable al sistema mecatrónico desarrollado en este proyecto de grado.

El mecanismo de cinco barras ha sido seleccionado para realizar este proyecto de grado debido a que es un mecanismo ligero que se presta para realizar un análisis completo de sus características dinámicas sin pensar en la dificultad que podría presentarse en su análisis matemático debido a que su espacio de trabajo es el plano. Por tal razón, se busca incentivar las investigaciones relacionadas con el diseño y construcción de estos sistemas, beneficiando específicamente a la comunidad académica de la Universidad Tecnológica de Bolívar.



# Capítulo 2

## Estado del arte

### 2.1. Ejemplos similares sobre sistemas mecatrónicos

Según Bolton [6], la mecatrónica describe la interacción de sistemas de control compuestos por microcontroladores y microprocesadores, sistemas eléctricos y sistemas mecánicos. Por ello no deben considerarse estos de manera aislada sino mirarse todos como un conjunto entre sí.

Existen muchos dispositivos que requieren de sistemas mecatrónicos para funcionar como por ejemplo los autos, robots, máquinas-herramientas, lavadoras, cámaras y muchos otros dispositivos. Entre los beneficios que se obtienen al diseñar estos sistemas se encuentran el coste reducido, la confiabilidad y flexibilidad que se puede generar a través de la fusión de estas tres tradicionales ramas de la ingeniería. Uno de los beneficios de la mecatrónica es el enfoque concurrente que desarrolla entre sus disciplinas, de manera que no se detiene a analizar cada una secuencialmente.

Los sistemas de medición son una parte fundamental de la mecatrónica y ejemplos de ellos tenemos los sensores y sistemas de medición, sistemas de mando y accionamiento, análisis del comportamiento de los sistemas, sistemas de control y sistemas de microprocesadores.

En la figura 2.1 se presentan claramente ejemplos de sistemas. En el primer ejemplo se ilustra el comportamiento de un sistema mecánico ilustrado por un motor el cual recibe como entrada la energía eléctrica y da como salida la rotación de su eje. El segundo ejemplo muestra un sistema de medición de temperatura teniendo como entrada la temperatura y como salida un número de la de ésta representado en una escala. En el último ejemplo se muestra un sistema de calefacción central que toma como señal de referencia la temperatura requerida para ajustarla al valor establecido.

Un concepto importante en el entorno de la ingeniería mecatrónica es el de sistema. Según Bolton, [6] **un sistema puede concebirse como una caja con una entrada y una salida y de la cual no nos interesa su contenido, sino la re-**

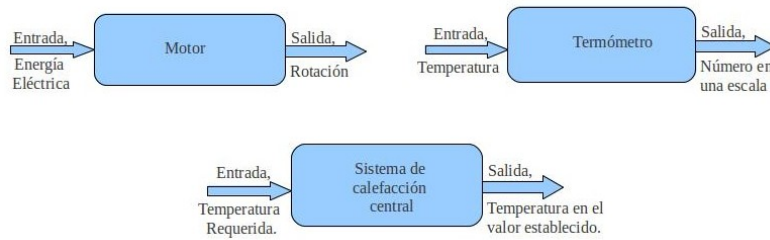


Figura 2.1: Ejemplos de sistemas, Bolton (2001)

**lación que existe entre la salida y la entrada.** Por ejemplo un motor se podría considerar como un sistema cuya entrada es la alimentación de energía eléctrica y la salida es la rotación de un eje. La descripción de los sistemas mecatrónicos se ilustra en la tabla 2.1

Sistemas Mecatrónicos		
Sistema Mecánico	Sistema Electrónico	Sistema de control
Actuadores y elementos de máquinas	Sensores y tarjetas electrónicas	Plc's, Microprocesadores, Microcontroladores y PC.

Tabla 2.1: Composición de los sistemas mecatrónicos.

Un sistema de medición se podría considerar como una caja negra que se utiliza para medir. Su entrada es la magnitud que se desea medir y su salida es el valor correspondiente a dicha magnitud.

Un sistema de control puede considerarse como una caja negra que sirve para controlar la salida de un valor o secuencia de valores determinados.

En general, Bolton define que los sistemas de medición están formados por otros elementos:

1. Un sensor, el cual responde a la cantidad que se mide, dando como salida una señal relacionada con dicha cantidad. Un termopar es un ejemplo de sensor de temperatura. Su entrada es una temperatura y su salida es una f.e.m. (fuerza electromotriz), la cual se relaciona con el valor de la temperatura respectiva.
2. Un acondicionador de señal el cual toma la señal del sensor y la manipula para convertirla a una forma adecuada para su presentación visual o, como en



el caso de un sistema de control, para que ejerza una acción de control. Por ejemplo, la salida que produce un termopar es una f.e.m. tan pequeña, que debe alimentarse a través de un amplificador para obtener una señal mayor. El amplificador es el acondicionador de la señal.

3. Un sistema de presentación visual (Pantalla o display), es donde se despliega la salida producida por el acondicionador de señal. Por ejemplo, una aguja que se mueve a través de una escala, o bien una lectura digital.

En la figura 2.2 se ilustra el esquema básico de un robot. Allí pueden identificarse la acción del sistema de control, los sensores y actuadores necesarios para su funcionamiento.

Aracil, et. al., [1] describe este robot como utilizando un carro para desplazarse y con un brazo para manipular objetos que se encuentren en su trayectoria.

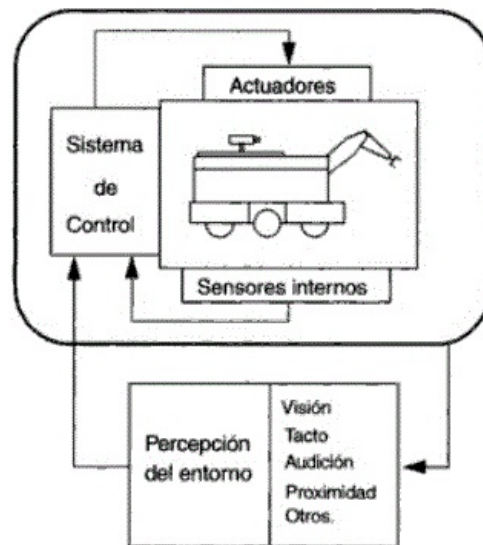


Figura 2.2: Robots y su interacción con el entorno, Anibal Ollero (2001)

Ollero [5] define que en robótica para procesar la información, se utilizan bucles para re-alimentar la información suministrada por los sensores del robot, y estos pueden ser internos o externos. De esta manera se puede obtener un control óptimo del control de movimientos del robot.

Ollero [5] menciona que para procesar la información se deben tener en cuenta tres funciones importantes que se encuentran detalladas a continuación: el control

de movimientos, percepción y planificación.

En un sentido amplio, el sistema de control involucra tanto bucles de re-alimentación de información suministrada por los sensores internos, como del entorno. Los sensores internos miden el estado de la estructura mecánica y, en particular, giros o desplazamientos relativos entre articulaciones, velocidades, fuerzas y pares. Estos sensores permiten cerrar bucles de control de las articulaciones de la estructura mecánica.

Los sensores externos permiten dotar de sentidos al robot. La información que suministran es utilizada por el sistema de percepción para aprehender la realidad del entorno. Los sistemas de percepción sensorial hacen posible que un robot pueda adaptar automáticamente su comportamiento en función de las variaciones que se producen en su entorno, haciendo frente a situaciones imprevistas. Para ello el sistema de control del robot incorpora bucles de re-alimentación sensorial del entorno, generando automáticamente acciones en función de la comparación de dicha información sensorial con patrones de referencia.

Por último, la planificación tiene como objetivo encontrar una trayectoria desde una posición inicial a una posición objetivo, sin colisiones, y minimizando un determinado índice. En el caso más simple, el problema se plantea en un entorno que se supone conocido (existe un mapa previo) y estático. Se supone además que el robot es omnidireccional, que se mueve suficientemente lento y que es capaz de seguir el camino de forma perfecta.

Investigaciones realizadas por Aracil [1], et. al., acerca de los robots paralelos se deduce que estos presentan considerables ventajas sobre los robots seriales en el sentido de la manipulación de objetos. En el hombre las posibilidades de manipulación de objetos con un brazo se ven incrementadas cuando se utilizan los dos brazos simultáneamente. Un levantador de pesos, cuando utiliza los dos brazos consigue marcas más importantes que la suma de las que se conseguiría con cada una de sus brazos individualmente. Como tantos desarrollos tecnológicos, inspirados en la observación de las leyes de la naturaleza, las consideraciones anteriores son las que pueden conducir a concebir para los robots el uso de estructuras paralelas, alternativas de las tradicionales en serie, que, por esta cualidad, se denominan paralelos.

Según Aracil et. al. [1] se define un robot paralelo como una estructura mecánica está formada por un mecanismo de cadena cerrada en la que el efector final se une a base por al menos dos cadenas cinemáticas independientes. Un ejemplo típico de este tipo de mecanismos es el ilustrado en la figura 2.3, que en este caso fue el primer robot industrial de tipo paralelo. Este robot fue construido en 1940 inicialmente para aplicaciones de figuras con spray. Tenía 5 grados de libertad y consistía en tres brazos de dos eslabones cada uno.

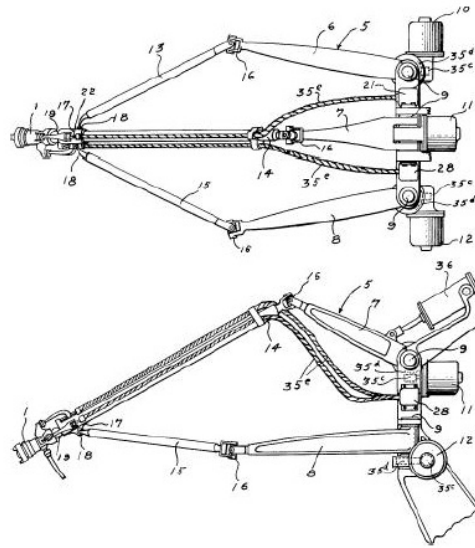


Figura 2.3: Primer robot industrial paralelo, Rafael Aracil (2006)

Aracil [1] menciona que la definición anterior puede entrar en conflicto con los desarrollos sobre robots coordinados que también forman cadenas cinemáticas cerradas. Los robots paralelos simplifican estas cadenas de forma que cada una de ellas dispone, en general de un único actuador, reduciendo así su complejidad y permitiendo canalizar mejor la energía de los accionadores hacia mejorar las prestaciones del robot, bien en cuanto a velocidad de movimiento o a capacidad de carga de su efector.

Los robots paralelos se pueden clasificar según el tipo de movimientos que son capaces de realizar, y se pueden distinguir dos grupos, los robots planares y los espaciales. Los mecanismos planares son aquellos en los que su movimiento se reduce al plano. Por tanto pueden tener 2 o 3 grados de libertad, correspondientes al movimiento de traslación en el plano y a una de rotación sobre un eje perpendicular al mismo.

Los robots espaciales son aquellos que evolucionan en todo el espacio tridimensional. Algunos de ellos disponen de los tres grados de traslación, otros tan solo son capaces de orientarse.

Un ejemplar de los mecanismos paralelos más básicos es el mecanismo de cinco barras el cual está formado por por cuatro eslabones que se encuentran unidos por cinco articulaciones rotacionales (Briones). Este mecanismo servirá de base para el desarrollo de este proyecto.

## 2.2. Motores Eléctricos

Según Giancoli [10] los motores eléctricos son aquellos dispositivos que transforman la energía eléctrica en energía mecánica (de rotación). Su funcionamiento se basa en el principio del galvanómetro exceptuando la aparición del resorte. Esto causa que la bobina pueda girar de manera continua en una dirección.

Arrijoja [2] realiza una descripción de los motores eléctricos, y expone la siguiente definición: Los motores eléctricos sirven para producir movimiento a través de una corriente eléctrica. En las aplicaciones con robots, se utilizan mucho, por lo que es necesario conocerlos. Existen diferentes tipos de motores, y todos tienen algunas características que necesitamos aprender.

Cuando una corriente eléctrica pasa por un conductor, se produce un campo magnético. Este campo magnético puede interactuar con otros campos magnéticos como los imanes permanentes. Podemos enrollar el hilo conductor alrededor de un núcleo de hierro y darle muchas vueltas, lo cual hará que se concentre el campo electromagnético. Si aproximamos a un imán a nuestro conductor enrollado, cuando pasemos una corriente por él, se producirá un campo que interactuará con el del imán. Si los campos son de polaridades iguales se repelerán y si tienen polaridades diferentes se atraerán. En caso de que los campos sean lo suficientemente grandes incluso obtendremos movimiento por parte de los componentes debido a las fuerzas electromagnéticas.

Los motores se dividen en dos categorías: los de corriente alterna y los de corriente directa. En la tabla 2.2 se realiza una descripción de los motores eléctricos según sus diferentes categorías. Los motores de corriente alterna como su nombre lo indica son aquellos que funcionan con corriente alterna y los de corriente directa funcionan con corriente directa. La corriente alterna es aquella en la cual los electrones en el circuito se mueven en una dirección para luego cambiar a dirección contraria alternando de aquí para allá con respecto a posiciones relativamente fijas. La corriente directa representa el flujo de cargas en una dirección. (Hewitt [12])

Motores Eléctricos				
Motores de corriente alterna			Motores de corriente continua	
Motores universales	Motores síncronos	Motores de Jaula de ardilla	Motores continuos	Motores paso a paso

Tabla 2.2: Clasificación de los motores

Arrijoja [2] menciona que aunque se pueden utilizar ambos en proyectos robóticos, es muy común que, en los robots autónomos alimentados con baterías se utilicen los motores de corriente directa. Los motores de corriente directa también son llamados

motores **DC** por sus siglas en inglés, que significan **Direct Current**. Los motores D.C. pueden clasificarse también en **motores continuos** y **motores paso a paso**. Los motores continuos son más comunes, cuando les aplicamos una corriente giran de manera constante. Este tipo de motores los encontramos en los ventiladores o en los automóviles eléctricos de juguete. Cuando la corriente se interrumpe, el motor se detiene. En la figura 2.4 se muestra una descripción detallada del motor.

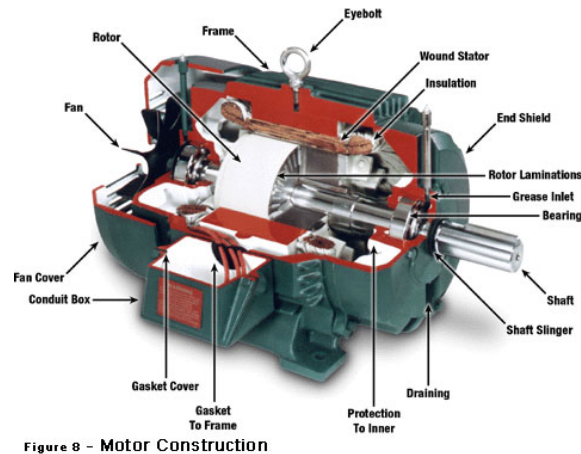


Figura 2.4: Esquema de motor eléctrico. ([www.reliance.com](http://www.reliance.com))

Los motores paso a paso son diferentes. En este caso, cuando aplicamos una corriente eléctrica, el motor gira, pero solamente unos cuantos grados, y luego se detiene. Si queremos que el motor tenga un movimiento continuo, debemos proveerle una corriente punzante para lograrlo. Este tipo de motor es utilizado cuando necesitamos tener un control más preciso sobre el robot.(Arrioja [2])

### 2.2.1. Los Motores Eléctricos en la Industria

Los motores eléctricos tienen gran influencia en el entorno industrial ya que podemos encontrar aplicaciones de estos en blowers, bombas, compresores, molinos, peletizadoras y todo aquel material que incluya movimiento rotativo para generar energía mecánica. Ejemplos de motores industriales se muestran en la figura 2.5. Estos motores eléctricos convierten la energía eléctrica en energía eléctrica en energía mecánica, la cual finalmente desarrolla un trabajo.(Harper [11])

## 2.3. Microcontroladores

Según Santamaria [20] un microcontrolador es un sistema de microprocesador incluido todo el en un chip. Este sistema está constituido por la CPU del procesa-



Figura 2.5: Foto de motores eléctricos asíncronos trifásicos. (Interempresas.net)

dor, memoria y elementos periféricos de tal manera que se pueda realizar un sistema de control simplemente anexando los elementos exteriores. Entre las diferentes características de los microcontroladores se destaca la memoria del programa y de ella existen varios tipos entre los cuales tenemos: ROM, PROM, REEPROM. La capacidad de la memoria del programa varía comúnmente en rangos de 1kb a 32kb y de 128 bytes a 2 Kbytes de memoria de datos, aunque existe la posibilidad de expandir estas memorias externamente.

A continuación se describen algunas características de los periféricos que utilizan los microcontroladores. El primer elemento periférico incluido son los puertos de entrada/salida. Estos circuitos integrados poseen normalmente de 2 a 6 puertos de entrada/salida de 8 bits que pueden ser programados individualmente como entrada o como salida y con unas ciertas características.

Otra definición de los microcontroladores es la que da Mandado Pérez [19]. Un microcontrolador (Microcontroller) es un circuito integrado digital monolítico que contiene todos los elementos de un procesador digital secuencial síncrono programable de arquitectura Harvard o Princeton (Von Neumann). Se le puede denominar también microcomputador integrado o empotrado (Embedded processor) y está especialmente orientado a tareas de control y comunicaciones.

Por ser pequeño, Los microcontroladores permiten empotrar un procesador programable en muchos productos industriales. Su coste reducido y su consumo de energía y velocidad adaptables, resultan apropiados para numerosas aplicaciones. Además, poseen mecanismos de seguridad de funcionamiento (Safety) y proporcionan protección del equipos electrónico contra copias y modificaciones del programa

no autorizadas (Security).

Los microcontroladores tienen muchas aplicaciones en los sistemas electrónicos que se usan en la vida cotidiana. Se utilizan para la realización de sistemas electrónicos empotrados en otros sistemas (eléctricos, mecánicos, etc.) como por ejemplo electrodomésticos (Televisor, lavadora, microondas, etc.), sistemas informáticos (ratón, impresora, etc.), sistemas de maquinaria (circuito de control del brazo de un robot, etc.) o sistemas de automoción, circuito de control de frenado, circuito de control de la climatización, etc.). En todas estas aplicaciones los microcontroladores emulan a (se comportan igual que) numerosos sistemas digitales que antes se realizaban con circuitos integrados MSI (escala de integración media) y LSI (gran escala de integración) como por ejemplo circuitos contadores, comparadores, etc. En la figura 2.6 se muestran algunos ejemplos del campo de aplicación de los microcontroladores.

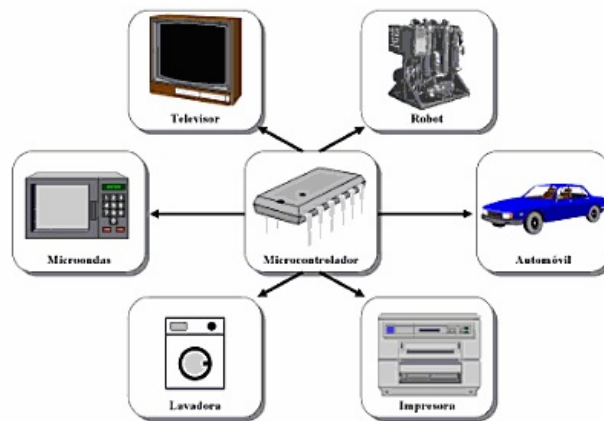


Figura 2.6: Campos de aplicación de los microcontroladores, Enrique Mandado Pérez (2007)

Mediante la introducción de los microcontroladores en los productos industriales se logra:

- Concebir y fabricar nuevos productos que no podrían existir sin electrónica, como por ejemplo los reproductores de sonido en formato MP3.
- Mejorar las prestaciones de productos ya existentes mediante la introducción de nuevas prestaciones y la elevación de los actuales, lo cual produce un gran valor añadido. Un ejemplo de ello es el sistema electrónico SiDePIC-USB.
- Facilitar la utilización de equipos complejos haciendo más sencilla la integración con el ser humano.

### 2.3.1. Los microcontroladores y la robótica.

Arrioja [2] expone que si se desea crear un robot autónomo, se puede hacer mediante el uso de un microcontrolador. Muchas veces, se utiliza el microcontrolador PIC. Lamentablemente, no todas las personas poseen los conocimientos necesarios para realizar esta programación en forma directa. En algunas ocasiones, la cantidad de lógica necesaria para la aplicación robótica puede exceder las capacidades del microcontrolador.

### 2.3.2. La PC para controlar robots a través de microcontroladores.

En la realización de un proyecto donde se involucre la construcción de un sistema robótico se debe tener en cuenta la comunicación que este prototipo debe tener con la PC, ya que esta va a ser la encargada de controlar el sistema. A través de los años se han realizado varios estudios y se han adoptado diversas técnicas para poder comunicar el robot con una computadora personal. Entre los diversos métodos utilizados se encuentran: el puerto paralelo, el puerto serial y ahora se usa comúnmente el puerto USB, aunque hay otras opciones más tecnológicas que involucran tecnología inalámbrica; entre ellas se destacan: wi-fi, gsm o bluetooth. La selección del tipo de comunicación depende de diferentes factores como el precio, los elementos e incluso la programación para que se realice una interacción óptima entre la PC y el mecanismo. A continuación se realizará una descripción de los tres primeros métodos expuestos anteriormente según lo expone Arrioja [2].

El puerto paralelo era sencillo de utilizar, pero existían limitaciones respecto de la cantidad de bits que se podían usar para la salida y para la entrada de datos. El puerto serial permitía transferir más información, pero, por el hecho de ser serial, se complicaba el circuito necesario para la comunicación con el robot. Hacer la propia tarjeta de interfaz permitía tener la cantidad necesaria de bits de entrada o de salida, e, incluso, leer valores analógicos, pero se necesitaban conocimientos avanzados de electrónica para lograrlo. En la actualidad, la mayor parte de las nuevas computadoras, en especial las laptops, ya no presentan puertos seriales ni paralelos.

Es necesario que se utilicen nuevas opciones para nuestros proyectos de conectividad con el mundo real. La alternativa que se puede utilizar es el puerto USB.

El uso de la PC para controlar el robot brinda varias ventajas. La primera de ellas es que se cuenta con un significativo poder de cómputo. Con una PC, es posible programar lógicas mucho más avanzadas e introducir, dentro de nuestros programas, los algoritmos de inteligencia artificial necesarios para que el robot se comporte de manera más inteligente. Además, la gran capacidad de memoria y almacenamiento de las PC permite, incluso, que el robot sea capaz de generar sus propios mapas y



de modificarlos según cambien las condiciones de su entorno.

## 2.4. Teoría de Control PID.

Un controlador PID es aquel en la que la señal del error en bucle cerrado es el resultado de la suma de los tres términos que son proporcionales al error, derivada del error e integral del error (Ollero [5]). Este controlador es utilizado ampliamente en la industria y consta de dos tipos: el analógico y el digital (que es una transformación del tipo analógico).

Los estudios sobre controladores pid y su comportamiento se encuentran en investigaciones realizadas por Smith et al [21]. A continuación se describe los tipos de controlador pid y las características de sus elementos: proporcional, integral, derivativo.

Los controladores pid analógicos, son principalmente de tipo hidráulico, neumático, electrónico, eléctrico o sus combinaciones. En la actualidad muchos de estos se transforman en formas digitales mediante el uso de microprocesadores.

Para determinar la acción del controlador, el ingeniero debe conocer:

1. Los requerimiento de control del proceso.
2. La acción de la válvula de control u otro elemento final de control.

Ambas cosas se deben tener en cuenta. La acción del controlador se determina generalmente mediante un interruptor en el panel lateral de los controladores neumáticos o electrónicos, mediante un bit de configuración en la mayoría de los controladores que tienen como base un microprocesador.

La manera en que los controladores por retroalimentación toman una decisión para mantener el punto de control, es mediante el cálculo de la salida con base en la diferencia entre la variable que se controla y el punto de control. Para explicar el control PID debemos conocer los diferentes tipos de controladores.

### 2.4.1. Controlador proporcional (P)

Es el tipo más simple de controlador, con excepción del controlador de dos estados, la ecuación con que se describe su funcionamiento es la siguiente:

$$m(t) = \bar{m} + K_c(r(t) - c(t)) \quad (2.1)$$

o

$$m(t) = \bar{m} + K_c e(t) \quad (2.2)$$

Donde:

- $m(t)$  = Salida del controlador, psig o mA.
- $r(t)$  = Punto de control, psig o mA.
- $c(t)$  = Variable que se controla, psig o mA.
- $e(t)$  = Señal de error, psig o mA; esta es la diferencia entre el punto de control y la variable que se controla.
- $K_c$  = Ganancia del controlador,  $\frac{psi}{psi}$  o  $\frac{mA}{mA}$ .
- $\bar{m}$  = Valor base, psig o mA. El significado de este valor es la salida del controlador cuando el error es cero; durante la calibración del controlador, en el medio de la escala 9 psig o 12 mA.

Es interesante notar que la ecuación 2.1 es para un controlador de acción inversa; si la variable que se controla,  $c(t)$ , se incrementa en un valor superior al punto de control,  $r(t)$ , el error se vuelve negativo y, como se ve en la ecuación, la salida del controlador,  $m(t)$ , decrece. La manera común con que se designa matemáticamente un controlador de acción directa es haciendo negativa la ganancia del controlador,  $K$ ; sin embargo, se debe recordar que en los controladores industriales no hay ganancias negativas, sino únicamente positivas, lo cual se resuelve con el selector inverso/directo. La  $K$  negativa se utiliza cuando se hace el análisis matemático de un sistema de control en el que se requiere un controlador de acción directa.

En las ecuaciones 2.1 y 2.2 se ve que la salida del controlador es proporcional al error entre el punto de control y la variable que se controla; la proporcionalidad la da la ganancia del controlador  $K$ ; con esta ganancia o sensibilidad del controlador se determina cuánto se modifica la salida del controlador con un cierto cambio de error.

Los controladores que son únicamente proporcionales tienen la ventaja de que solo cuentan con un parámetro de ajuste  $K$ , sin embargo, adolecen de una gran desventaja, operan con una DESVIACIÓN, o “error de estado estacionario” en la variable que se controla.

Tanto mayor es el valor de  $K_c$ , tanto menor es la desviación, pero la respuesta al proceso se hace más oscilatoria; sin embargo, para la mayoría de los procesos existe un valor máximo de  $K_c$ , más allá del cual el proceso se hace inestable.

Para obtener la función de transferencia del controlador proporcional, la ecuación 2.1 se puede escribir como:

$$m(t) - \bar{m} = K_c(e(t) - 0)$$

Se definen las siguientes variables de desviación:

$$M(t) = m(t) - \bar{m} \quad (2.3)$$

$$E(t) = e(t) - 0 \quad (2.4)$$

Entonces

$$M(t) = K_c E(t)$$

### 2.4.2. Controlador Proporcional-Integral (PI)

La mayoría de los procesos no se pueden controlar con una desviación, es decir, se deben controlar en el punto de control, y en estos casos se debe añadir inteligencia al controlador proporcional, para eliminar la desviación. Esta nueva inteligencia o nuevo modo de control es la acción integral o de reajuste y en consecuencia, el controlador se convierte en un controlador proporcional-integral (PI). La siguiente es su ecuación descriptiva:

$$m(t) = \bar{m} + K_c[r(t) - c(t)] + \frac{K_c}{\tau_I} \int [r(t) - c(t)] dt \quad (2.5)$$

$$m(t) = \bar{m} + K_c e(t) + \frac{K_c}{\tau_I} \int e(t) dt \quad (2.6)$$

donde  $\tau_I$  = tiempo de integración o reajuste minutos/repetición. Por lo tanto, el controlador PI tiene dos parámetros:  $K$  y  $\tau_I$ , que se deben ajustar para obtener un control satisfactorio.

Para entender el significado físico del tiempo de reajuste  $\tau_I$ , considérese el ejemplo hipotético que se muestra en la figura, donde  $\tau_I$  es el tiempo que toma al controlador repetir la acción proporcional y, en consecuencia, las unidades son minutos/repetición. Tanto menor es el valor de  $\tau_I$ , cuanto más pronunciada es la curva de respuesta, lo cual significa que la respuesta del controlador se hace más rápida.

Otra manera de explicar esto es mediante la observación de la ecuación 2.6, tanto menor es el valor de  $\tau_I$ , cuanto mayor es el término delante de la integral,  $\frac{K_c}{\tau_I}$  y, en consecuencia, se le da mayor peso a la acción integral o de reajuste.

De la ecuación 2.6 también se nota que, mientras está presente el término de error, el controlador se mantiene cambiando su respuesta y, por lo tanto, integrando el error, para eliminarlo; recuérdese que integración también quiere decir sumatoria.

En resumen, los controladores proporcionales-integracionales tienen dos parámetros de ajuste: la ganancia o banda proporcional y el tiempo de reajuste o rapidez de reajuste; la ventaja de este controlador es que la acción de integración o de reajuste elimina la desviación.

### 2.4.3. Controlador proporcional-integral-derivativo (PID)

Algunas veces se añade otro modo de control al controlador PI, este nuevo modo de control es la acción derivativa, que también se conoce como rapidez de derivación o preactuación; tiene como propósito anticipar hacia dónde va el proceso, mediante la observación de la rapidez para el cambio del error, su derivada. La ecuación descriptiva es la siguiente:

$$m(t) = \bar{m} + K_c e(t) + \frac{K_c}{\tau_I} \int e(t) dt + K_c \tau_D \frac{d(e(t))}{dt} \quad (2.7)$$

Donde  $\tau_D$  = rapidez de derivación en minutos.

Por lo tanto el controlador PID tiene tres parámetros,  $K_c$  o  $PB$ ,  $\tau_I$  o  $\tau_I^R$  y  $\tau_D$ , que se deben ajustar para obtener un control satisfactorio. Nótese que sólo existe un parámetro para ajuste de derivación,  $\tau_D$  el cual tiene las mismas unidades, minutos, para todos los fabricantes.

Los controladores PID se utilizan en procesos donde las constantes de tiempo son largas. Ejemplos típicos de ello son los circuitos de temperatura y los de concentración. Los procesos en que las constantes de tiempo son cortas (capacitancia pequeña) son rápidos y susceptibles al ruido del proceso, son característicos de este tipo de proceso los circuitos de control de flujo y los circuitos para controlar la

presión en corrientes de líquidos. Los procesos donde la constante de tiempo es larga (capacitancia grande) son generalmente amortiguados y, en consecuencia, menos susceptibles al ruido; sin embargo, se debe estar alerta, ya que se puede tener un proceso con constante de tiempo larga. El esquema del controlador PID se muestra en la figura 2.7.

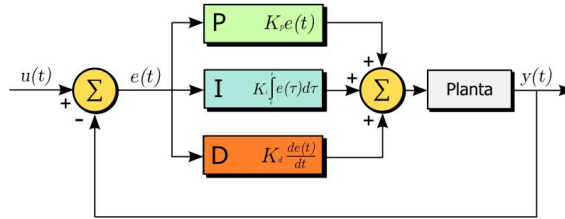


Figura 2.7: Estructura de un controlador PID. (es.wikipedia.org)

La función de transferencia de un controlador PID “ideal” se obtiene a partir de la ecuación 2.7, la cual se reordena como sigue:

$$m(t) - \bar{m} = K_c(e(t) - 0) + \frac{K_c}{\tau_I} \int (e(t) - 0) dt + K_c \tau_D \frac{d(e(t) - 0)}{dt} \quad (2.8)$$

Se usan las mismas definiciones de variables de desviación que aparecen en las ecuaciones 2.3 y 2.4, se obtiene la transformada de Laplace y se reordena para obtener:

$$\frac{M(s)}{E(s)} = K_c \left( 1 + \frac{1}{\tau_I s} \right) \left( \frac{\tau_D s + 1}{\alpha \tau_D s + 1} \right) \quad (2.9)$$

Los valores típicos de  $\alpha$  están entre 0.05 y 0.1.

En resumen, los controladores PID tienen tres parámetros de ajuste: la ganancia o banda proporcional, el tiempo de reajuste o rapidez de reajuste y la rapidez derivativa. La rapidez derivativa se da siempre en minutos. Los controladores PID se recomiendan para circuitos con constante de tiempo larga en los que no hay ruido. La ventaja del modo derivativo es la capacidad de “ver hacia dónde se dirige el proceso”.

## 2.5. Mecanismos.

Según wikipedia [24] un mecanismo es una máquina simple en un conjunto que a través de sólidos resistentes, elementos elásticos, etc, móviles unos respecto de otros,

unidos entre sí mediante diferentes tipos de uniones llamadas así pares cinemáticos (pernos, uniones de contacto, pasadores, etc.) cuyo propósito es la transmisión de energía mecánica y de su estudio se encarga la energía mecánica. Para el diseño se deben tener en cuenta las relaciones que ejercen sus reacciones (fuerzas y momentos) entre estos que se analizan en las características cinemáticas y dinámicas definidas también por su geometría. Norton [16] describe las diferencias que existen entre los mecanismos y las máquinas, y además explica como puede analizarse el concepto de grado de libertad, el cual define la movilidad del mecanismo a través de un área de trabajo.

### 2.5.1. Mecanismos y Máquinas.

Para definir un mecanismo, se utilizará la definición expuesta por Norton [16]. Un mecanismo es un dispositivo que transforma el movimiento en un patrón deseable, y por lo general desarrolla fuerzas muy bajas y transmite poca potencia. Una máquina, en general, contiene mecanismos que están diseñados para producir y transmitir fuerzas significativas. Algunos ejemplos de mecanismos pueden ser un sacapuntas, un obturador de cámara fotográfica, un reloj análogo, una silla plegable, una lámpara de escritorio ajustable y un paraguas. En la figura 2.8 se ilustra un ejemplo de mecanismo en el espacio tridimensional.

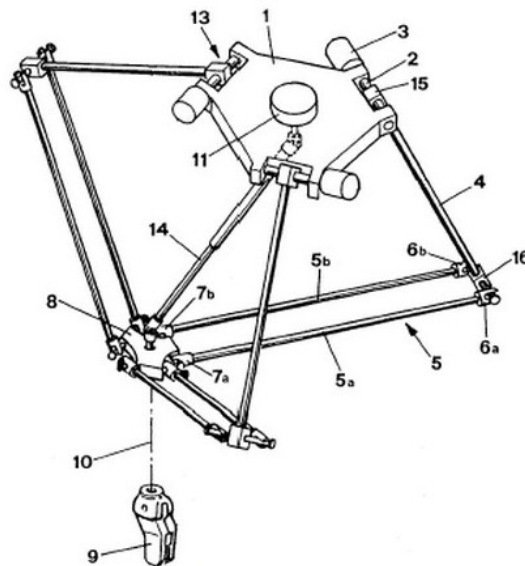


Figura 2.8: Mecanismo en el espacio tridimensional. US patent No. 4,976,582

Algunos ejemplos de máquinas que poseen movimientos similares a los mecanismos antes mencionados son un procesador de alimentos, la puerta de la bóveda de un banco, la transmisión de un automóvil, una niveladora, un robot y un juego

mecánico de un parque de diversiones. No existe una clara línea divisoria entre mecanismos y máquinas. Difieren en su grado y no en su clase. Si las fuerzas o niveles de energía en el dispositivo son significativos, se considerará como una máquina; si no es así será considerado como un mecanismo. Una definición útil de trabajo de un mecanismo es un sistema de elementos acomodados para transmitir movimiento de una forma predeterminada. Ésta puede ser convertida en una definición de una máquina si se le agregan las palabras y energía después de la palabra movimiento.

Los mecanismos, si se cargan en exceso y funcionan a bajas velocidades, en ocasiones se pueden tratar de una manera estricta como dispositivos cinemáticos; es decir, se pueden analizar cinemáticamente sin considerar las fuerzas. Las máquinas (y mecanismos que funcionan a altas velocidades), por otra parte, primero deben tratarse como mecanismos, sus velocidades y aceleraciones analizadas cinemáticamente y, posteriormente, como sistemas dinámicos en los que las fuerzas estáticas y dinámicas producidas por esas aceleraciones son analizadas mediante principios de cinética.

### 2.5.2. Grados de libertad.

La movilidad de un sistema mecánico ( $M$ ) se puede clasificar de acuerdo con el número de grados de libertad ( $GDL$ ) que posee. El  $GDL$  del sistema es igual al número de parámetros (mediciones) independientes que se requieren para definir de manera única su posición en el espacio en cualquier instante de tiempo. Hay que observar que  $GDL$  se define con respecto a un marco de referencia seleccionado. Un cuerpo rígido en movimiento plano tiene tres Grados de Libertad para definir la posición del sistema, tales como dos longitudes y un ángulo. Cualquier cuerpo rígido en el espacio tridimensional tiene seis  $GDL$ . Son necesarios seis parámetros para definir sus seis  $GDL$ . Un conjunto posible de parámetros que podría utilizarse es: tres longitudes ( $x, y, z$ ) más tres ángulos ( $\theta, \phi, \rho$ ).

El concepto de grados de libertad ( $GDL$ ) es fundamental tanto para la síntesis como para el análisis de mecanismos. El grado de libertad (también llamado movilidad ( $M$ )) de un sistema se define como:

#### **Grado de libertad:**

El número de entradas que se necesita proporcionar para crear una salida predecible. (Norton [16])

También:

El número de coordenadas independientes requerido para definir su posición. (Norton [16])

Al inicio del proceso de diseño, casi siempre se dispone de alguna definición general del movimiento de salida deseado. El número de entradas necesario para obtener una salida puede o no ser especificado. En este caso, el costo es la restricción principal. Cada entrada requerida necesitará algún tipo de accionador, ya sea un operador humano o un “esclavo” en la forma de un motor, solenoide, cilindro neumático u otro dispositivo convertidor de energía. Las acciones de estos dispositivos de entrada deberían ser coordinadas por un controlador, el cual debe contar con algo de inteligencia. Ahora con frecuencia este control es proporcionado por una computadora, pero también puede ser mecánicamente programado en el diseño del mecanismo.

Las cadenas cinemáticas o mecanismos pueden ser abiertos o cerrados. Un mecanismo cerrado no tendrá puntos de fijación abiertos o nodos, y puede tener uno o más grados de libertad. Un mecanismo abierto con más de un eslabón siempre tendrá más de un grado de libertad, por lo que requiere tantos actuadores (motores) como grados de libertad tenga. Un ejemplo común de un mecanismo abierto es un robot industrial.

Un mecanismo con varios *GDL*, tal como un robot, estará limitado en sus movimientos en tanto se suministre el número de entradas necesario para controlar todos sus *GDL*.

### Grados de Libertad en Mecanismos Planos.

Norton [16] dice que para determinar el grado de libertad de cualquier mecanismo se debe considerar el número de eslabones, así como las juntas y las interacciones entre ellos. El *GDL* de cualquier ensamble de eslabones se puede pronosticar con una investigación de la **condición de Gruebler**. Cualquier eslabón en un plano tiene tres *GDL*. Por consiguiente, un sistema de  $L$  eslabones no conectados en el mismo plano tendrá  $3L$  *GDL*, donde los dos eslabones no conectados tienen en total seis *GDL*. Además, cuando cualquier eslabón está conectado a tierra o unido al marco de referencia, se eliminarán sus tres *GDL*. Este razonamiento lleva a la **ecuación de Gruebler 2.10**:

$$M = 3L - 2J - 3G \quad (2.10)$$

Donde:

- $M$  = Grados de libertad o movilidad.
- $L$  = Número de eslabones.
- $J$  = Número de juntas.
- $G$  = Número de eslabones conectados a tierra.

Hay que observar que en cualquier mecanismo real, aun cuando más de un eslabón de la cadena cinemática esté conectado a tierra, el efecto neto será crear un



eslabón a tierra de mayor orden y más grande, ya que solo puede haber un plano a tierra. Por lo tanto,  $G$  siempre es uno y la ecuación de Gruebler 2.11 se convierte en:

$$M = 3(L - 1) - 2J \quad (2.11)$$

El valor de  $J$  en las ecuaciones 2.10 y 2.11 debe reflejar el valor de todas las juntas en el mecanismo. Esto es, la semijuntas cuentan con  $1/2$  porque solo eliminan un grado de libertad. Esto es menos confuso si se utiliza la modificación de **Kutzbach** 2.12 de la ecuación de Gruebler en esta forma:

$$M = 3(L - 1) - 2J_1 - J_2 \quad (2.12)$$

Donde:

- $M$  = Grados de libertad o movilidad.
- $L$  = Número de eslabones.
- $J_1$  = Número de juntas de 1 *GDL*.
- $J_2$  = Número de juntas de 2 *GDL*.

El valor de  $J_1$  y  $J_2$  en estas ecuaciones debe ser determinado con cuidado para considerar todas las juntas completas, semijuntas y múltiples en cualquier eslabonamiento. Las juntas múltiples cuentan como uno menos que el número de eslabones unidos en dicha junta y se agregan a la categoría “completa” ( $J_1$ ). El *GDL* se puede determinar rápidamente a partir de esta expresión antes que se invierta tiempo en diseño más detallado. Es interesante señalar que esta ecuación no contiene información sobre tamaños y formas de los eslabones, sino solo de cantidad.

## 2.6. Mecanismo de Cinco barras.

### 2.6.1. Descripción.

Se trata de un mecanismo plano formado por cinco eslabones unidos por pares de revolución donde uno de los eslabones está fijo. Los dos pares unidos al eslabón fijo son actuados, mientras que los otros tres son pasivos, de modo que el mecanismo completo posee dos grados de libertad(*GDL*) (Donazar, [9]). En la figura 2.9 se muestra un ejemplar de tipo industrial de este mecanismo.

### 2.6.2. Análisis cinemático directo

Se utiliza fundamentalmente el álgebra vectorial y matricial para representar y describir la localización en el espacio tridimensional con respecto a un sistema de referencia fijo.

Las ecuaciones que rigen este análisis para el caso del mecanismo cinco barras son:



Figura 2.9: Ejemplar de robot cinco barras DexTAR. ([www.etsmtl.ca](http://www.etsmtl.ca)).

A continuación se resuelve el problema cinemático directo aplicando el método analítico.

El siguiente es el análisis de posiciones del mecanismo de cinco barras.

Ecuación vectorial:

$$L_1 @ \theta_2 + L_2 @ \theta_3 = L_5 @ \theta_1 + L_4 @ \theta_5 + L_3 @ \theta_4$$

Componentes rectangulares de cada vector:

Componentes en x:

$$L_1 \cos \theta_2 + L_2 \cos \theta_3 = L_5 \cos \theta_1 + L_4 \cos \theta_5 + L_3 \cos \theta_4$$

Componentes en y:

$$L_1 \sin \theta_2 + L_2 \sin \theta_3 = L_5 \sin \theta_1 + L_4 \sin \theta_5 + L_3$$

2 ecuaciones con 2 incógnitas:  $\theta_3$  y  $\theta_4$ .

Se despeja  $\theta_3$ .

$$\begin{aligned} L_2 \cos \theta_3 &= L_5 \cos \theta_1 + L_4 \cos \theta_5 + L_3 \cos \theta_4 - L_1 \cos \theta_2 \\ L_2 \sin \theta_3 &= L_5 \sin \theta_1 + L_4 \sin \theta_5 + L_3 \sin \theta_4 - L_1 \sin \theta_2 \end{aligned}$$

Se sabe que  $\theta_1 = 0^\circ$

$$L_2 \cos \theta_3 = L_5 + L_4 \cos \theta_5 + L_3 \cos \theta_4 - L_1 \cos \theta_2 \quad (2.13)$$

$$L_2 \sin \theta_3 = L_4 \sin \theta_5 + L_3 \sin \theta_4 - L_1 \sin \theta_2 \quad (2.14)$$

Se elevan ambas ecuaciones al cuadrado.

Primero se muestra el desarrollo de la ecuación 2.13.

$$\begin{aligned} L_2^2 \cos^2 \theta_3 &= [(L_5 + L_4 \cos \theta_5) + (L_3 \cos \theta_4 - L_1 \cos \theta_2)]^2 \\ L_2^2 \cos^2 \theta_3 &= (L_5 + L_4 \cos \theta_5)^2 \\ &\quad + 2(L_5 + L_4 \cos \theta_5)(L_3 \cos \theta_4 - L_1 \cos \theta_2) \\ &\quad + (L_3 \cos \theta_4 - L_1 \cos \theta_2)^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} L_2^2 \cos^2 \theta_3 &= L_5^2 + 2(L_5 L_4 \cos \theta_5) + L_4^2 \cos^2 \theta_5 \\ &\quad + 2(L_5 L_3 \cos \theta_4 - L_1 L_5 \cos \theta_2) \\ &\quad + 2(L_3 L_4 \cos \theta_4 \cos \theta_5 - L_1 L_4 \cos \theta_2 \cos \theta_5) \\ &\quad + L_3^2 \cos^2 \theta_4 - 2(L_3 L_1 \cos \theta_2 \cos \theta_4) + L_1^2 \cos^2 \theta_2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} L_2^2 \cos^2 \theta_3 &= L_5^2 + 2L_5 L_4 \cos \theta_5 + L_4^2 \cos^2 \theta_5 \\ &\quad + 2L_5 L_3 \cos \theta_4 - 2L_1 L_5 \cos \theta_2 \\ &\quad + 2L_3 L_4 \cos \theta_4 \cos \theta_5 - 2L_1 L_4 \cos \theta_2 \cos \theta_5 \\ &\quad + L_3^2 \cos^2 \theta_4 - 2L_3 L_1 \cos \theta_2 \cos \theta_4 + L_1^2 \cos^2 \theta_2 \end{aligned}$$

$\begin{aligned} L_2^2 \cos^2 \theta_3 &= 2L_3(L_5 + L_4 \cos \theta_5 - L_1 \cos \theta_2) \cos \theta_4 \\ &\quad + L_5^2 + 2L_5 L_4 \cos \theta_5 + L_4^2 \cos^2 \theta_5 - 2L_1 L_5 \cos \theta_2 \\ &\quad - 2L_1 L_4 \cos \theta_2 \cos \theta_5 + L_3^2 \cos^2 \theta_4 + L_1^2 \cos^2 \theta_2 \end{aligned}$	(2.15)
---	--------

$$\boxed{A = 2L_3 (L_5 + L_4 \cos \theta_5 - L_1 \cos \theta_2)} \quad (2.16)$$

Desarrollo de la ecuación 2.14.

$$\begin{aligned} L_2^2 \sin^2 \theta_3 &= (L_4 \sin \theta_5 + L_3 \sin \theta_4 - L_1 \sin \theta_2)^2 \\ L_2^2 \sin^2 \theta_3 &= L_4^2 \sin^2 \theta_5 + 2L_4 \sin \theta_5 (L_3 \sin \theta_4 - L_1 \sin \theta_2) \\ &\quad + (L_3 \sin \theta_4 - L_1 \sin \theta_2)^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} L_2^2 \sin^2 \theta_3 &= L_4^2 \sin^2 \theta_5 + 2L_3 L_4 \sin \theta_4 \sin \theta_5 \\ &\quad - 2L_1 L_4 \sin \theta_2 \sin \theta_5 + L_3^2 \sin^2 \theta_4 \\ &\quad - L_3 L_1 \sin \theta_2 \sin \theta_4 + L_1^2 \sin^2 \theta_2 \end{aligned}$$

$$\boxed{L_2^2 \sin^2 \theta_3 = 2L_3 (L_4 \sin \theta_5 - L_1 \sin \theta_2) \sin \theta_4 + L_4^2 \sin^2 \theta_5 - 2L_1 L_4 \sin \theta_2 \sin \theta_5 + L_3^2 \sin^2 \theta_4 + L_1^2 \sin^2 \theta_2} \quad (2.17)$$

Se dice que:

$$\boxed{B = 2L_3 (L_4 \sin \theta_5 - L_1 \sin \theta_2)} \quad (2.18)$$

Se suman las ecuaciones 2.15 y 2.17 y se reemplazan las ecuaciones 2.16 y 2.18:

$$\begin{aligned} L_2^2 &= L_5^2 + L_4^2 + L_3^2 - L_2^2 + L_1^2 \\ &\quad - 2L_4 L_5 \cos \theta_5 - 2L_1 L_4 \cos \theta_2 \cos \theta_5 \\ &\quad + L_3^2 + L_1^2 - 2L_4 L_1 \sin \theta_2 \sin \theta_5 \\ &\quad + A \cos \theta_4 + B \sin \theta_4 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C &= L_1^2 - L_2^2 + L_3^2 + L_4^2 + L_5^2 + 2L_4 L_5 \cos \theta_2 \\ &\quad - 2L_1 L_4 \cos \theta_2 \cos \theta_5 - 2L_4 L_1 \sin \theta_2 \sin \theta_5 \end{aligned}$$

$$\boxed{A \cos \theta_4 + B \sin \theta_4 + C = 0} \quad (2.19)$$

En trigonometría se utilizan las siguientes identidades:

$$\boxed{\sin \theta_4 = \frac{2 \tan \frac{\theta_4}{2}}{1 + \tan^2 \frac{\theta_4}{2}}; \quad \cos \theta_4 = \frac{1 - \tan^2 \frac{\theta_4}{2}}{1 + \tan^2 \frac{\theta_4}{2}}} \quad (2.20)$$

Se reemplazan las ecuaciones 2.20 en la ecuación 2.19 y se obtiene lo siguiente:

$$A \left( \frac{1 - \tan^2 \frac{\theta_4}{2}}{1 + \tan^2 \frac{\theta_4}{2}} \right) + B \left( \frac{2 \tan \frac{\theta_4}{2}}{1 + \tan^2 \frac{\theta_4}{2}} \right) + C = 0$$

Se multiplica todo por  $1 + \tan^2 \frac{\theta_4}{2}$  :

$$A - A \tan^2 \frac{\theta_4}{2} + 2B \tan \frac{\theta_4}{2} + C + C \tan^2 \frac{\theta_4}{2} = 0$$

Agrupando Términos:

$$\tan^2 \frac{\theta_4}{2} (-A + C) + 2B \tan \frac{\theta_4}{2} + A + C = 0$$

Se dice que:

$$D = -A + C$$

$$E = 2B$$

$$F = A + C$$

La ecuación queda:

$$D \tan^2 \frac{\theta_4}{2} + E \tan \frac{\theta_4}{2} + F = 0$$

Resolución de la ecuación cuadrática:

$$\begin{aligned} \tan \frac{\theta_4}{2} &= \frac{-E \pm \sqrt{E^2 - 4DF}}{2D} \\ \frac{\theta_4}{2} &= \tan^{-1} \left( \frac{-E \pm \sqrt{E^2 - 4DF}}{2D} \right) \end{aligned}$$

El valor de  $\theta_4$  es:

$$\boxed{\theta_4 = 2 \tan^{-1} \left( \frac{-E \pm \sqrt{E^2 - 4DF}}{2D} \right)} \quad (2.21)$$

Reemplazando este valor en la ecuación se halla el valor de  $\theta_3$ .

$$\boxed{\theta_3 = \cos^{-1} \left( \frac{L_5 + L_4 \cos \theta_5 + L_3 \cos \theta_4 - L_1 \cos \theta_2}{L_2} \right)} \quad (2.22)$$

Con los valores de  $\theta_2$ ,  $\theta_3$ ,  $\theta_4$  y  $\theta_5$  se procede a calcular el valor de la posición del efector final.

$$\boxed{\begin{aligned} x &= (L_1)(\cos(\theta_2)) + (L_2)(\cos(\theta_3)) \\ y &= (L_1)(\sin(\theta_2)) + (L_2)(\sin(\theta_3)) \end{aligned}}$$

### 2.6.3. Análisis cinemático inverso.

La resolución del problema cinemático inverso consiste en hallar el conjunto de variables articulares que permiten posicionar el elemento terminal en una determinada posición y orientación (Donazar [9]).

la cinemática inversa determina las coordenadas articulares de cada actuador para una posición de la plataforma móvil conocida. Existen varios métodos para el cálculo de la cinemática inversa.

El esquema del mecanismo cinco barras para el cálculo de la cinemática inversa se muestra en la figura 2.10.

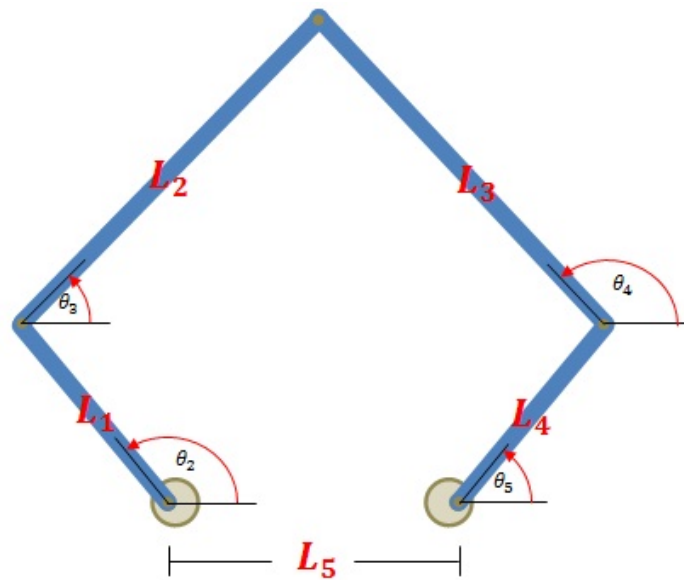


Figura 2.10: Esquema del mecanismo cinco barras. Los autores.

$P_x$  = Coordenada x efector final;

$P_y$  = Coordenada y efector final;

$C_x$  =  $P_x - L_5$ ;

$C_y$  =  $P_y$ ;

$A_1 = \frac{P_x^2 + P_y^2 + L_1^2 - L_2^2}{2L_1}$

$A_4 = \frac{C_x^2 + C_y^2 + L_4^2 - L_3^2}{2L_4}$

$$\begin{aligned} \theta_1 &= (2) \left( \tan^{-1} \left( \frac{P_y + \sqrt{P_y^2 - (A_1^2 - P_x^2)}}{A_1 + P_x} \right) \right) \\ \theta_4 &= (2) \tan \left( \frac{C_y - \sqrt{C_y^2 - (A_4^2 - C_x^2)}}{A_4 + C_x} \right) \end{aligned}$$

Cálculos de cinemática inversa:

$$A(L_1 \cos \theta_1, L_1 \sin \theta_1) \quad (2.23)$$

$$B(L_4 \cos \theta_4, L_4 \sin \theta_4) \quad (2.24)$$

$$L_2^2 = (P_x - L_1 \cos \theta_1)^2 + (P_y - L_1 \sin \theta_1)^2$$

$$L_2^2 = P_x^2 - 2P_x L_1 \cos \theta_1 + L_1^2 \cos^2 \theta_1 + P_y^2 - 2P_y L_1 \sin \theta_1 + L_1^2 \sin^2 \theta_1$$

$$L_2^2 = P_x^2 - 2P_x L_1 \cos \theta_1 + P_y^2 - 2P_y L_1 \sin \theta_1 + L_1^2 (\sin^2 \theta_1 + \cos^2 \theta_1)$$

$$0 = P_x^2 - 2P_x L_1 \cos \theta_1 + P_y^2 - 2P_y L_1 \sin \theta_1 + L_1^2 - L_2^2$$

$$0 = -2P_x L_1 \cos \theta_1 - 2P_y L_1 \sin \theta_1 + L_1^2 - L_2^2 + P_x^2 + P_y^2$$

$$0 = P_x \cos \theta_1 + P_y \sin \theta_1 + \frac{L_1^2 - L_2^2 + P_x^2 + P_y^2}{-2L_1}$$

$$A = \frac{P_x^2 + P_y^2 + L_1^2 - L_2^2}{-2L_1}$$

$$0 = P_x \cos \theta_1 + P_y \sin \theta_1 + A$$

A continuación se utilizan las fórmulas de la ecuación 2.20.

$$0 = P_x \left( \frac{1 - \tan^2 \theta_1}{1 + \tan^2 \theta_1} \right) + P_y \left( \frac{2 \tan^2 \theta_1}{1 + \tan^2 \theta_1} \right) + A$$

$$0 = P_x (1 - \tan^2 \theta_1) + P_y (2 \tan^2 \theta_1) + A(1 + \tan^2 \theta_1)$$

$$0 = (A - P_x) \tan^2 \left( \frac{\theta_1}{2} \right) + 2P_y \tan \left( \frac{\theta_1}{2} \right) + (P_x + A)$$

Usando la fórmula de la ecuación cuadrática se halla el valor del ángulo  $\theta_1$ .

$$\theta_1 = (2) \left( \tan^{-1} \left( \frac{P_y + \sqrt{P_y^2 - (A_1^2 - P_x^2)}}{A_1 + P_x} \right) \right)$$

Ahora partiendo de la coordenada B se halla el valor del ángulo  $\theta_4$  y se obtiene el siguiente resultado:

$$P_x = \text{Coordenada x efector final;}$$

$$P_y = \text{Coordenada y efector final;}$$

$$C_x = P_x - L_5;$$

$$C_y = P_y;$$

$$A_4 = \frac{C_x^2 + C_y^2 + L_4^2 - L_3^2}{2L_4}$$

$$\theta_4 = (2) \tan \left( \frac{C_y - \sqrt{C_y^2 - (A_4^2 - C_x^2)}}{A_4 + C_x} \right)$$



## Capítulo 3

# Diseño Mecatrónico del Mecanismo Cinco Barras.

### 3.1. Diseño Mecánico.

#### 3.1.1. Análisis Cinemático: Espacio de trabajo y longitudes deseadas.

El área de trabajo o campo de acción es el volumen espacial al que puede llegar el extremo del robot. Este volumen está determinado por el tamaño, forma y tipo de los eslabones que integran el robot, así como por las limitaciones de movimiento impuestas por el sistema de control. Nunca deberá utilizarse el efector colocado en la muñeca para la obtención del espacio de trabajo, ya que se trata de un elemento añadido al robot y el caso de variar el efector el área de trabajo se tendría que calcular de nuevo.

En catálogos suministrados por los fabricantes se suele indicar el área de trabajo mediante un dibujo acotado. Cuando la información es de tipo numérico, el área de trabajo se indica mediante el rango de recorrido de cada articulación.

El robot debe elegirse de modo que su área de trabajo (o campo de acción) le permita llegar a todos los puntos necesarios para llevar a cabo su tarea. En este sentido, no debe olvidarse la necesidad de incluir entre los puntos a acceder los correspondientes puntos de recogida de piezas (alimentadores), mesa de trabajo, puntos de salida de piezas, etc.

El que el robot pueda acceder a todo el espacio de trabajo no significa que lo pueda hacer con cualquier orientación. Existirán un conjunto de puntos, los más alejados y los más cercanos, a los que únicamente se podrá acceder con unas orientaciones determinadas, mientras que otros puntos admitirán cualquier orientación.

Se ha de tener en cuenta también la posible existencia de los denominados puntos

singulares. Se trata de puntos con una determinada orientación en el espacio sobre los que, por ejemplo, no es posible realizar una trayectoria rectilínea, bien porque el valor de los ejes en ese punto con esa orientación se encuentre indeterminado.

La disposición óptima de todos los elementos que compondrán la célula junto con el robot, es una delicada tarea por el gran número de variables a considerar. No basta con asegurar que todos los puntos necesarios quedan dentro del campo de acción del robot, sino que se deberá verificar que una vez situados los demás componentes de la célula, el robot no colisiones con ellos al efectuar sus movimientos.

En el caso del mecanismo cinco barras el área de trabajo está determinada por la longitud de sus eslabones. El mecanismo consta de una pareja de eslabones unida al eslabón a tierra. Esta pareja de eslabones cierra la cadena cinemática en el efector final. El área de trabajo debe determinarse con el objetivo de mostrar en que espacio del plano puede moverse este efector final. Cada pareja de eslabones cierra un círculo entre sí; la intersección entre estos dos círculos es la que determina el espacio de trabajo (figura 3.1).

A continuación se procederá a calcular esta área de trabajo. Según Stewart [22], el área de un sector circular viene dada por la siguiente ecuación:

$$A = \frac{1}{2}r^2\theta \quad (3.1)$$

La unión de los eslabones que se encuentran entre el efector final y el eslabón de tierra forma un círculo con radio en el eslabón de tierra. El área de la intersección de estos dos círculos es la que determina el espacio de trabajo. Consideremos la figura 3.1. Allí se observa que el el área de la intersección está dividida por la línea que atraviesa los puntos C y H. Esta área es simétrica porque los círculos tienen el mismo diámetro. El resultado del área total es la suma de las áreas divididas por la línea  $\overline{CH}$ . Para efectos de simplificación se calculará una de las secciones de las áreas y se multiplicará por 2 como resultado del área total. En primer lugar se realiza el cálculo del área de la sección circular usando la ecuación 3.1.

Los datos de cada una de las barras se muestran en la tabla 3.1.

Eslabones	Medidas
AB	17cm
BF	31cm
FE	31cm
ED	17cm
AD	19cm

Tabla 3.1: Medidas de eslabones mecanismo cinco barras.

El ángulo de HAC es  $157,17^\circ$ . Con él se procede a calcular el área del segmento circular HACJ aplicando la fórmula 3.1.

$$\begin{aligned}
 r &= 48 \\
 \theta &= (157,17)\left(\frac{\pi}{180}\right) \\
 A_{\text{arco}} &= (r^2)\frac{\theta}{2} \\
 A_{\text{arco}} &= 3160,08\text{cm}^2
 \end{aligned}$$

Después se procede a calcular el área del triángulo HAC. En primer lugar se calcula la distancia de la línea HC usando ley de los cosenos:

$$\overline{HC} = \sqrt{\overline{HA}^2 + \overline{AC}^2 - 2(\overline{HA})(\overline{AC}) \cos(157,17^\circ)}$$

Reemplazando valores tenemos:

$$\overline{HC} = 94,1\text{cm}$$

A continuación se halla la altura de este triángulo. Para esto se debe hallar el ángulo comprendido en el vértice del punto C con respecto a la línea  $\overline{CH}$ . Se aplica ley de los senos de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
 \frac{\sin(157,7^\circ)}{94,1} &= \frac{\sin(\alpha)}{48} \\
 \alpha &= \sin^{-1}\left(\frac{\sin(157,7^\circ)(48)}{94,1}\right) \\
 \alpha &= 11,42^\circ
 \end{aligned}$$

Entonces la altura del triángulo es:

$$h = 9,5\text{cm}$$

El área del triángulo está dada por:

$$\begin{aligned}
 A_T &= \frac{bxh}{2} \\
 A_T &= \frac{(94,1\text{cm})(9,5\text{cm})}{2} \\
 A_T &= 446,975\text{cm}^2
 \end{aligned}$$

Para hallar el área de la mitad de la intersección se utiliza la siguiente fórmula:

$$\begin{aligned}\frac{A}{2} &= A_{\text{arco}} + A_{\text{T}} \\ A &= (2)(3160,08\text{cm}^2 - 446,975\text{cm}^2) \\ A &= 5426,21\text{cm}^2\end{aligned}$$

Entonces el área total del espacio de trabajo del mecanismo cinco barras con las longitudes dadas en la tabla 3.1 es 5426,21cm<sup>2</sup>.

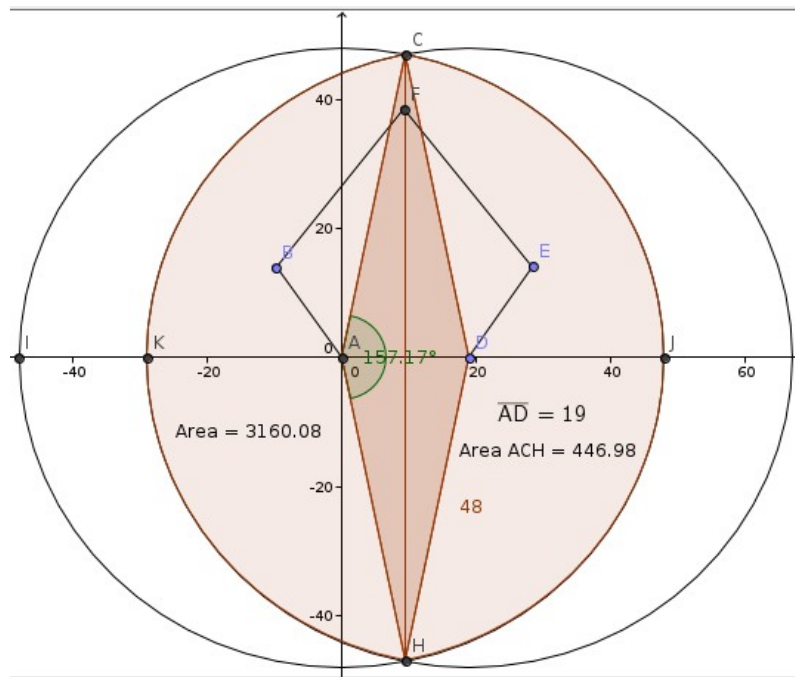


Figura 3.1: Espacio de trabajo del mecanismo cinco barras. Los autores.

### 3.1.2. Análisis Dinámico: Motores eléctricos, Análisis de esfuerzos.

Un motor tiene numerosas especificaciones, el significado y el propósito de algunas de ellas es obvio, en otras no es así. A continuación se analizarán algunas de ellas como el voltaje, la corriente absorbida, la velocidad y el torque, además se verá la relación que tienen estas magnitudes en el diseño del robot

El motor seleccionado es un motorreductor 14 kgcm 150 RPM con encoder otorgado por la empresa dynamo electronics (figura 3.2) .

**Voltaje:** Todos los motores tienen un valor de voltaje de operación, el voltaje del motor seleccionado para la aplicación robótica es de 12 voltios. El motor puede funcionar a voltajes mayores o menores que el especificado, lo único es que, si por



Figura 3.2: Motorreductor 14 kgcm con encoder. ([www.dynamo-electronics.com](http://www.dynamo-electronics.com))

ejemplo, se le aplican 8v a un motor de 12v, el motor correrá pero no a la velocidad y potencia para la cual fue diseñado, similarmente si se opera con valores superiores como 16v el motor correrá pero con mayor velocidad y potencia; este último fenómeno no es muy recomendable ya que puede causar que los bobinados se sobrecalienten y se origine un daño permanente en el motor.

### 3.1.3. Herramientas de simulación mecánica.

Para la selección de los motores se utilizará el software **Solid Edge®** junto con una herramienta que sirve para simulaciones del comportamiento dinámico de máquinas llamada **Dynamic designer®**.

Solid Edge es un programa parametrizado de diseño asistido por computadora de piezas tridimensionales. Permite el modelado de piezas de distintos materiales, doblado de chapas, ensamblaje de conjuntos, soldadura, funciones de dibujo en plano para ingenieros (wikipedia, [27]).

Solid edge proporciona capacidades de clase mundial para diseñar y construir modelos realistas en tres dimensiones que tienen la forma de piezas. Solid edge permite que contengan elementos sólidos 3D con el fin de entender con claridad si las piezas se ensamblan correctamente como un conjunto. Para determinar que el diseño del sistema mecatrónico rinda como se espera, el conjunto físico es construido y se realizan una serie de pruebas de laboratorio o pruebas de campo que generalmente son muy costosas. El problema con este diseño es que la validación se realiza demasiado tarde en el proceso. El objetivo de Solid edge es proporcionar la habilidad

suficiente para que el modelo del mecanismo robótico cumpla con los criterios de rendimiento expuesto en el plan de diseño.

Dynamic designer es una herramienta para simulación dinámica usada por solid edge que permite entender la verdadera función del diseño dinámico antes que el producto se ensamble en un montaje físico. Usando Dynamic designer se entenderá la mecánica del diseño antes de cortar metal a través del entorno de desarrollo Solid edge. Las ventajas que proporciona el uso de este software en este proyecto son: facilidad en las revisiones de diseño, menos costos en la realización de pruebas, e identificación de problemas de movimiento antes de construir y probar el conjunto físico (design-simulation [7]).

En la figura 3.3 se muestra la imagen de la simulación del mecanismo de cinco barras elaborado utilizando el entorno informático Solid edge junto con la herramienta Dynamic designer.

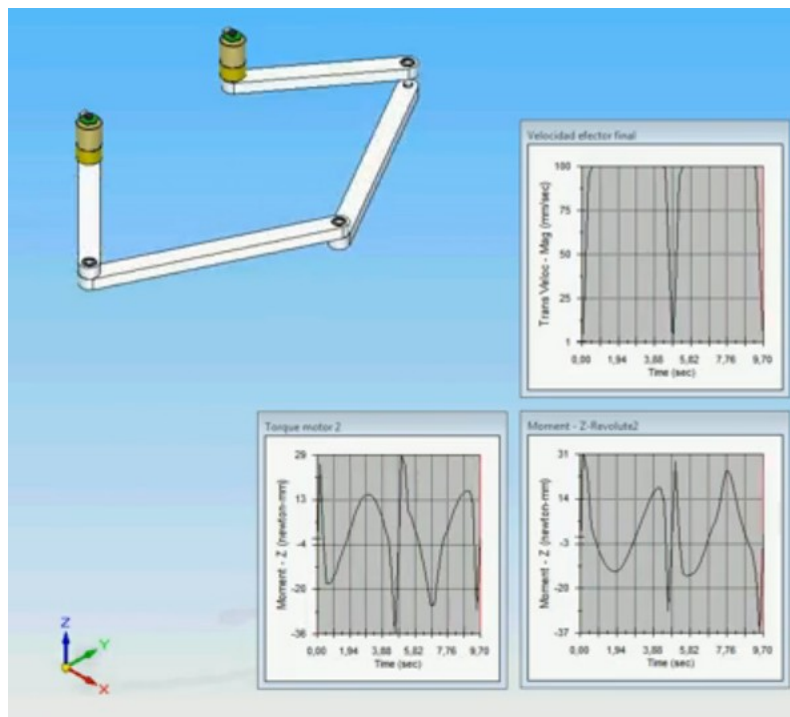


Figura 3.3: Simulación del mecanismo cinco barras en Solid edge. Los autores.

## 3.2. Sistema Electrónico.

### 3.2.1. Descripción general.

El micro controlador envía una señal (PWM, pulse-width modulation) al puente H, que esté de acuerdo a la señal PWM coloca +12V o -12V en el motor por medio de una señal con el mismo periodo y ciclo útil del la señal PWM, el motor se mueve y un encoder incremental envía al PIC los pulsos relativos al ángulo desplazado, el puente H L298 posee un pin de sensado, entonces conectamos una resistencia de bajo ohmiaje entre este y tierra y usando un amplificador operacional podemos aumentar la amplitud de la señal sensada y facilitar la captura. Para facilitar aun más la captura de la señal se utiliza un filtro RC. El esquema del funcionamiento del controlador se ilustra en la figura 3.4.

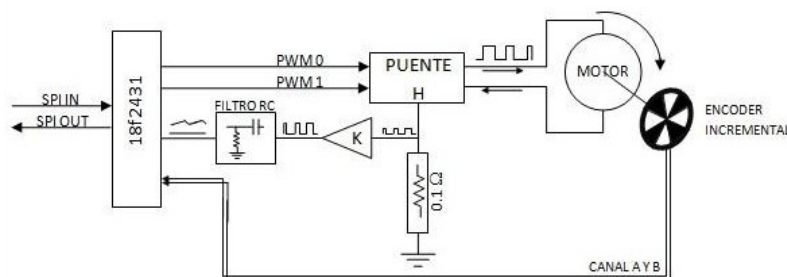


Figura 3.4: Esquema básico del funcionamiento del controlador. Los autores.

Al circuito se añade el pic 18f2550 con el fin de permitir que una computadora se comunique con el 18f2431 para actualizar el valor del setpoint de corriente y obtener la posición del motor y así cerrar el lazo de control de posición y velocidad o torque, o incluso el de posición, velocidad y torque. El pic 18f2550 se comunica con el pic 18f2431 por medio del protocolo de comunicación SPI y con la computadora por medio del protocolo USB. El diagrama de los bloques del sistema se muestra en la figura 3.5.

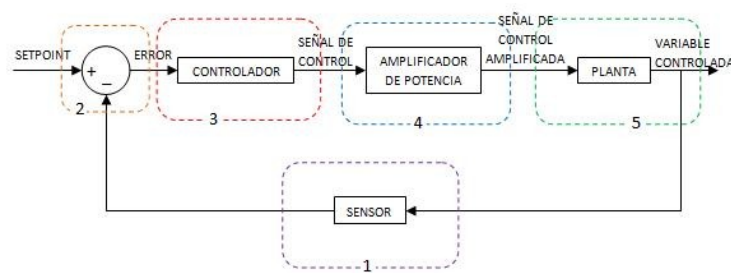


Figura 3.5: Diagrama de bloques del sistema sin perturbaciones.

### 3.2.2. Sensor.

Para la implementación de cualquier control, el sistema tiene que estar en la capacidad de medir la variable controlada, en nuestro caso el control va a ser implementado por un microcontrolador (PIC 18f2431) que posee un modulo ADC (Analog-to-digital converter), capaz de obtener indirectamente la corriente que pasa por el motor midiendo la diferencia de tensión presente en una resistencia colocada en serie con el motor, la diferencia de tensión a la que está sometida la resistencia se puede multiplicar por una ganancia (figura 3.6), de esa manera se varía el valor máximo al que puede llegar la corriente del motor variando también la resolución con la que el modulo ADC del PIC puede medir la corriente.

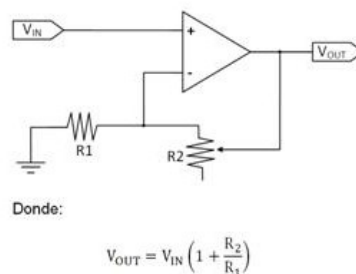


Figura 3.6: Ganancia de voltaje usando un amplificador operacional. Los autores.

### 3.2.3. Calculador de setpoint.

Una vez que el microcontrolador obtiene el valor del modulo ADC está en la capacidad de hacer las operaciones matemáticas necesarias para llegar al valor actual de la variable controlada, en este caso el modulo ADC arroja un valor que indica cuanto es la diferencia de tensión en la resistencia de sensado, y sabiendo el valor de esta se obtiene fácilmente el valor de la corriente que la atraviesa. El valor del error se obtiene cuando el pic resta el valor de la corriente al setpoint.

### 3.2.4. Controlador.

El algoritmo de control basado en control PID esta implementado por el microcontrolador pic 18f2431, que se ilustra en la figura 3.7.

### 3.2.5. Amplificador de potencia.

Utilizar puentes H para alimentar motores hace parte de las estrategias más utilizadas para controlar motores de corriente directa, el puente H básicamente es un arreglo de transistores, el circuito esquemático se la conexión de un motor y un



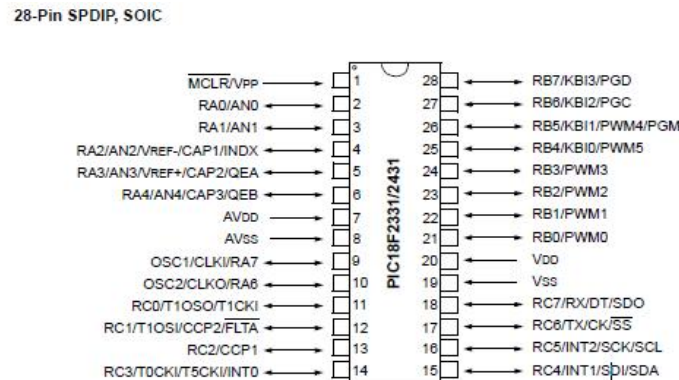


Figura 3.7: Estructura de un microcontrolador PIC 18F2431. **Microchip** ®. Los autores.

puente H deja ver una H, de ahí su nombre.

El puente H utilizado para el proyecto tiene la referencia L298N y es fabricado por la empresa SGS Thomsom Microelectronics. Posee doce pines de conexión.

### 3.2.6. Uso de Proteus ® para diseño y simulación electrónica.

Proteus es una compilación de programas de diseño y simulación electrónica, desarrollado por Labcenter Electronics que consta de los dos programas principales: Ares e Isis, y los módulos VSM y Electra. (wikipedia [26]). Este software se utilizó para el diseño y la simulación de la tarjeta electrónica de control, así como para el diseño de la tarjeta de comunicación. Proteus permitió realizar el plano electrónico a través de su herramienta Isis en el cual se utilizaron los componentes que se ensamblarían en las tarjetas. La herramienta Ares se utilizó con el fin de crear los circuitos impresos de ambas tarjetas para su posterior elaboración. En la figura 3.8 y ?? se encuentra el diseño de la tarjeta de control y la de comunicación en tres dimensiones elaborada a través de Proteus.

### 3.2.7. Planta.

La planta simplemente es un motor de corriente directa.

### 3.2.8. Comunicación.

Un punto muy importante en hardware de un controlador, es la capacidad de comunicarse con otros componentes que de alguna manera cierren el lazo de control para que la tarjeta solo se dedique a llevar la variable controlada al setpoint. En la figura 3.10 se ilustra el control en cascada para el proyecto.

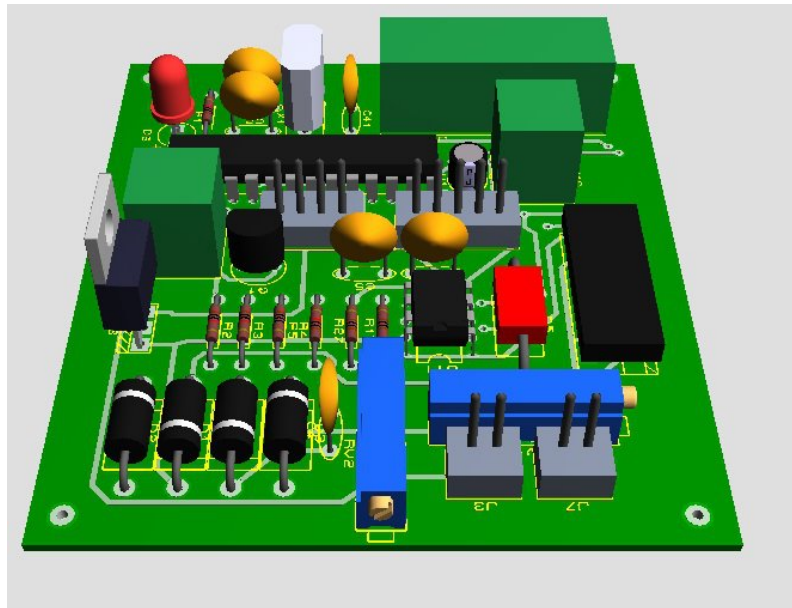


Figura 3.8: Esquema de tarjeta de control en **Proteus®**.

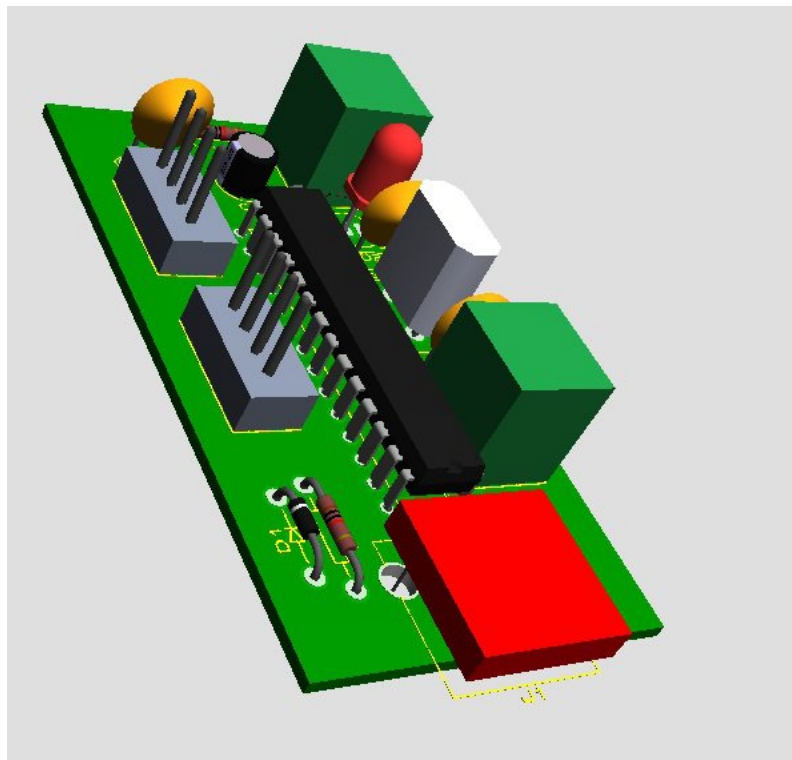


Figura 3.9: Esquema de tarjeta de comunicación en **Proteus®**.

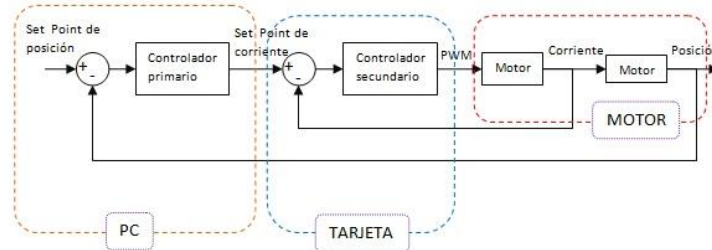


Figura 5. Control en cascada usado en proyecto

Figura 3.10: Control en cascada usado en proyecto. Los autores.

Una computadora personal es un dispositivo que facilita la planeación de trayectorias y el cálculo de los distintos setpoints necesarios para que sistema trabaje como se espera, eso lo hace cerrando el lazo de control al obtener el valor de la posición del motor y aplicar otro algoritmo de control, que en su defecto será un PID también, a eso se le llama control en cascada.

La forma elegida para comunicar el computador con el controlador es por medio del protocolo USB (Universal Serial Bus), ya que es el protocolo más común, el pic 18f2550 que se muestra en la figura 3.11 es el encargado de cargar y descargar datos desde y hacia la computadora, pero este no posee todos los componentes ni las demás ventajas que el pic18f2431, tales como un modulo ADC mucho más rápido o que posee un modulo QEI (quadrature enco inter). Por esa razón se añade comunicación SPI(Serial Peripheral Interface) entre el pic18f2550 y el pic18f2431, que es el encargado de aplicar el control PID de corriente.

28-Pin PDIP, SOIC

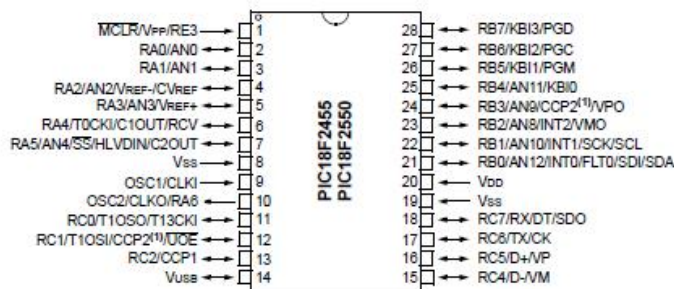


Figura 3.11: Estructura de un microcontrolador PIC 18F2550. Microchip ®

### 3.2.9. Software: función para implementar el control PID.

La función llamada control “PID loop” obtiene el valor de la diferencia de tensión en la resistencia de carga, y por simple ley de ohm obtiene el valor de la corriente actual del motor, calcula la velocidad del error, la suma del error y almacena el valor anterior, con eso se calcula el valor de outPID, y se activa el modulo PWM con una señal de un ciclo útil proporcional al valor de outPID.

#### Bucle de comunicación.

El controlador que implemente el PID de corriente, constantemente necesita actualizar el valor del setpoint, y enviar su posición actual, para cerrar el lazo de control. La comunicación entre los dos microcontroladores está basada en modo SPI, ya que es más rápida que otras tales como I2C y permite poseer un “chip select” muy útil para muchas aplicaciones en las que hay más de un motor.

La comunicación está apoyada en una interrupción de alto nivel, lo que en teoría evitaría que se pierdan tramas de datos.

### 3.3. Uso de Mplab® para software de control y comunicación.

El entorno para el desarrollo de aplicaciones con PIC se conoce como IDE (Integrated Development Environment). El fabricante microchip provee de forma gratuita el sistema conocido por MPLAB, que se basa en un editor, un ensamblador (MPASM) y un simulador (MPLAB SIM). Para programar en el lenguaje c es necesario adaptar un compilador; entre los más conocidos se encuentran: CCS, Hi tech, C18. El mplab se puede descargar gratuitamente de la página de Microchip ([www.microchip.com](http://www.microchip.com)) (Hermosa Donate [8]).

En la figura 3.12 se muestra el digrama de flujo con la lógica del programa utilizado para calcular el PID de posición.

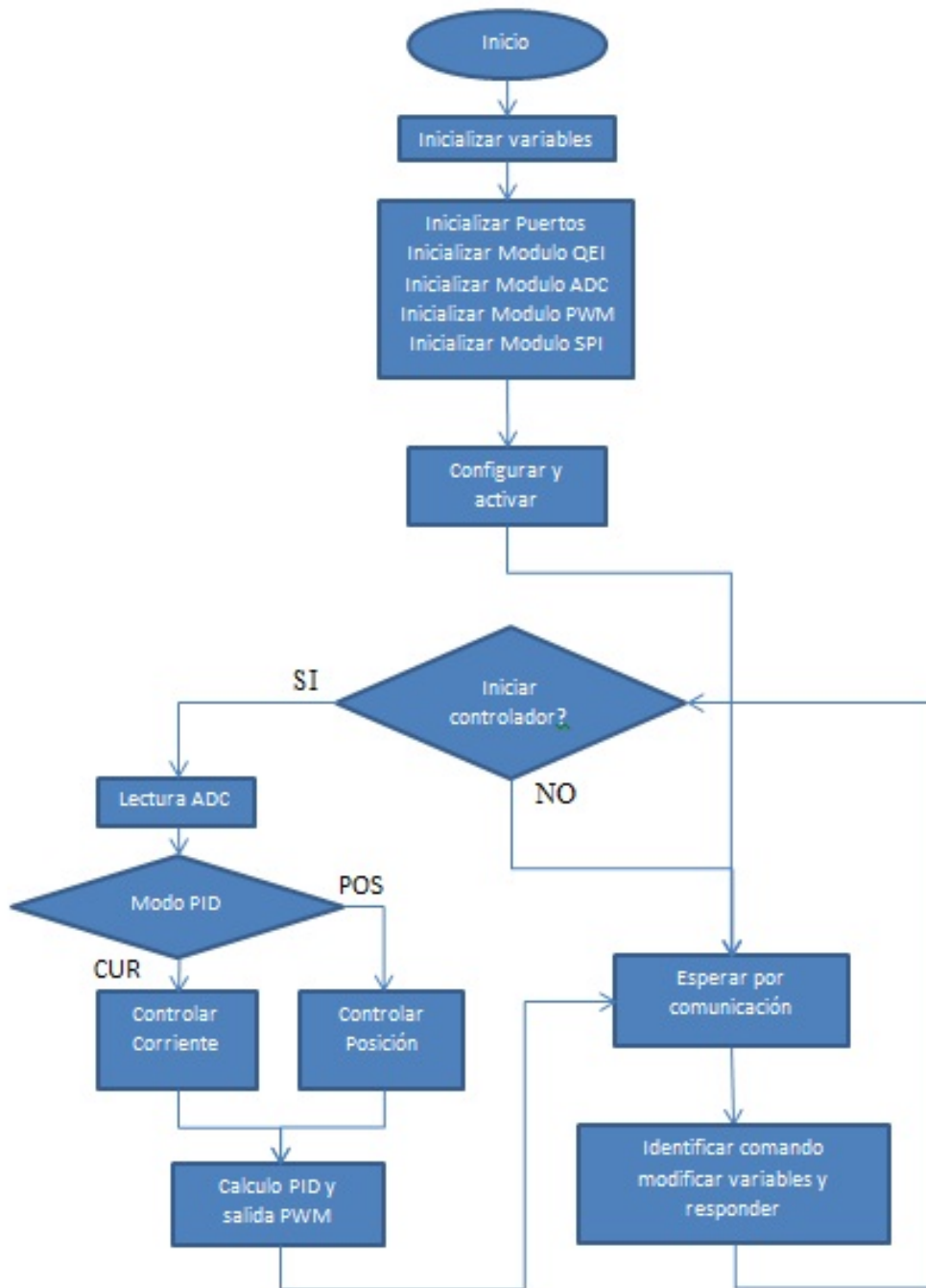


Figura 3.12: Diagrama de flujo programa realizado en el entorno MPLAB.



# Capítulo 4

## Pruebas experimentales.

A continuación se muestran los programas utilizados para desarrollar nuestra aplicación.

### 4.1. Matlab® y Simulink®:

Matlab es una potente plataforma interactiva que utiliza el cálculo matricial para la computación numérica y que se ha extendido a todas las áreas de la ingeniería.

Simulink, una extensión de Matlab es el software que elegimos para hacer todos los cálculos relativos a la trayectoria del efector final, cinemática directa, cinemática inversa, el segundo lazo de PID, etc.

En futuras aplicaciones se puede cerrar el segundo lazo de control (lazo de corriente), estableciéndose así un control en cascada que permitiría usar las tarjetas de control en muchas otras aplicaciones en las que un solo lazo de control no es suficiente, tales como aquellas en las que la masa en movimiento es apreciablemente variable, incluso puede mejorar enormemente aplicaciones mas sencillas, como es nuestro robot cinco barras.

Para darle tal uso a Matlab es necesario que este sea capaz de comunicarse bidireccionalmente con las tarjetas controladoras, esto es posible gracias a la comunicación USB establecida entre el pic 18f2550 y la computadora, y a que Matlab permite integrarse con lenguajes tales como C, C++ y fortran.

La imagen 4.1 muestra el programa en Simulink que permite interactuar con el robot. A continuación se describirá cada uno de los componentes del programa:

1. Es la función path planing, este bloque es el encargado de planificar la trayectoria y los tiempos que demorará en robot siguiendo la misma, su entrada es

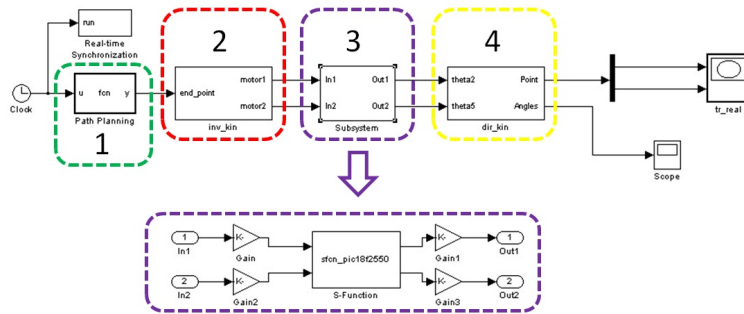


Figura 4.1: Diagrama de bloques Simulink del mecanismo cinco barras.

un vector de una dimensión que contiene el tiempo actual, su salida es un vector de dos dimensiones que contiene los puntos que conforman la trayectoria planificada del efector final.

2. Es el bloque que contiene las ecuaciones de la cinemática inversa del mecanismo cinco barras, este recibe la posición del efector final y entrega los ángulos  $\theta_2$  y  $\theta_5$  necesarios para llevar el efector final a dicha posición.
3. La s-function, este es el bloque que contiene el código en C o C++ necesario para llevar a cabo la comunicación USB con el pic 18f2550.

El código dentro de dicho bloque permite interactuar con la tarjeta controladora con comandos como:

- Programar modo control de posición.
- Programar modo control de corriente.
- Habilitar control PID.
- Deshabilitar control PID.
- Obtener valor de variable controlada.
- Obtener valor de salida del controlador PID.
- Cambiar setpoint.
- Cambiar constantes de PID.
- Y mucho más.

La s-function recibe los ángulos  $\theta_2$  y  $\theta_5$ , y estos serán los setpoints para la posición de los motores.



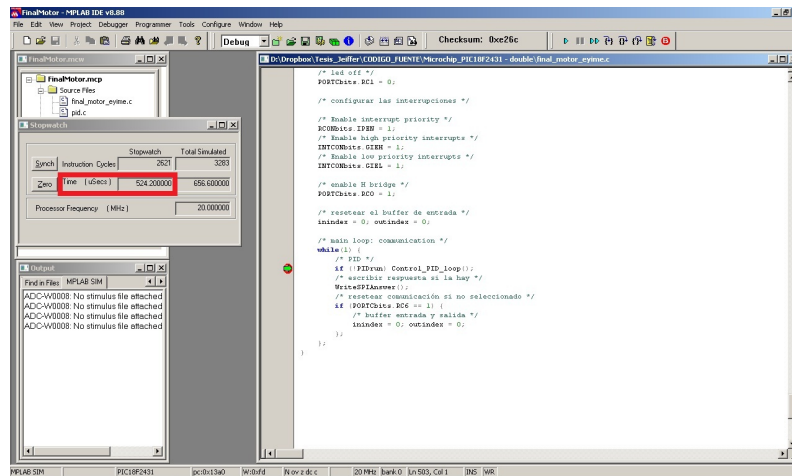


Figura 4.2: Tiempo de ejecución PID. Mplab®.

- Es el bloque que contiene la cinemática directa del mecanismo, este recibe los valores de posición reales de los motores, estos valores son  $\theta_2$  y  $\theta_5$ , por medio de este bloque se comprueba la posición real del efector final.

## 4.2. Mplab®.

Mplab Proporciona una herramienta llamada Mplab Sim, la cual sin duda es la mejor herramienta para estudiar los tiempos de ejecución de código para los microcontroladores pic, ya que Mplab es el compilador que recomienda Microchip®.

En la gráfica 4.2 se muestra que el tiempo de ejecución del cálculo de la ecuación del PID es de  $524,2\mu\text{S}$ .

## 4.3. Proteus®.

Proteus proporciona una gran herramienta, USB Analyzer, esta herramienta es concebida para el análisis de todas las peticiones y respuestas desde y hacia el dispositivo USB simulado.

En la gráfica 4.3 se logra observar que el tiempo promedio para que se complete la transferencia de los 64 Bytes (de los cuales solo se utilizan 4) desde la computadora al pic 18f2550 es de 1mS.

En la gráfica 4.4 se observa que el tiempo promedio para que se complete transferencia de información desde el pic 18f2431 a la computadora es de 18ms. Lo cual nos muestra que la comunicación SPI mantiene ocupado al controlador 18mS cada

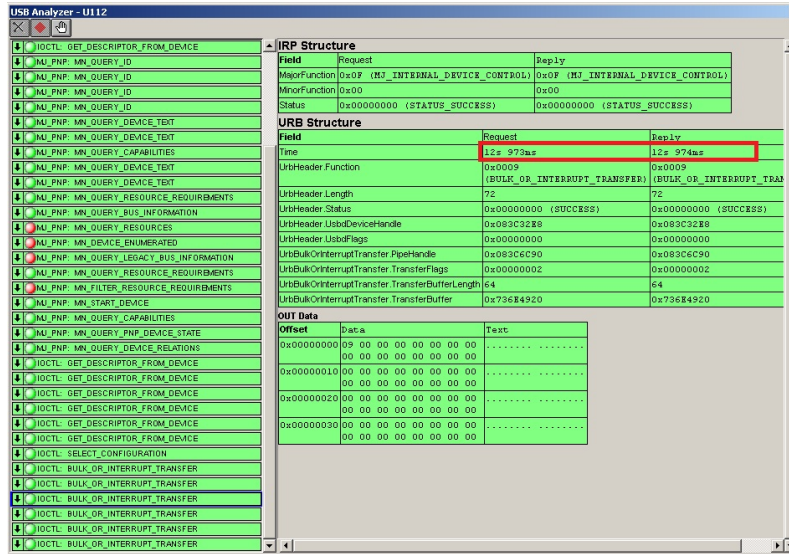


Figura 4.3: Tiempo máximo para enviar datos. Proteus®.

vez que le comunica algo o le pide información.

Las veces que ejecuta la ecuación del PID entre comunicaciones se calculan por medio de la ecuación siguiente:

$$\#de\ veces = \frac{t_m - t_c}{t_{PID}}$$

Esto es:

$$\frac{100mS - 36mS}{524,3\mu S} = 122veces$$

Donde:

$t_m$  : Tiempo de muestreo.

$t_c$  : Duración de la comunicación (cambio de setpoint más solicitud de posición de motor).

$t_{PID}$  : Duración de ejecución de la ecuación de PID.

En las figuras 4.5 y 4.6 se muestra la respuesta a una entrada paso para ambos motores, las constantes de PID son:  $K_P = 3,6$ ;  $K_I = 0,00167$ ;  $K_D = 0$ .

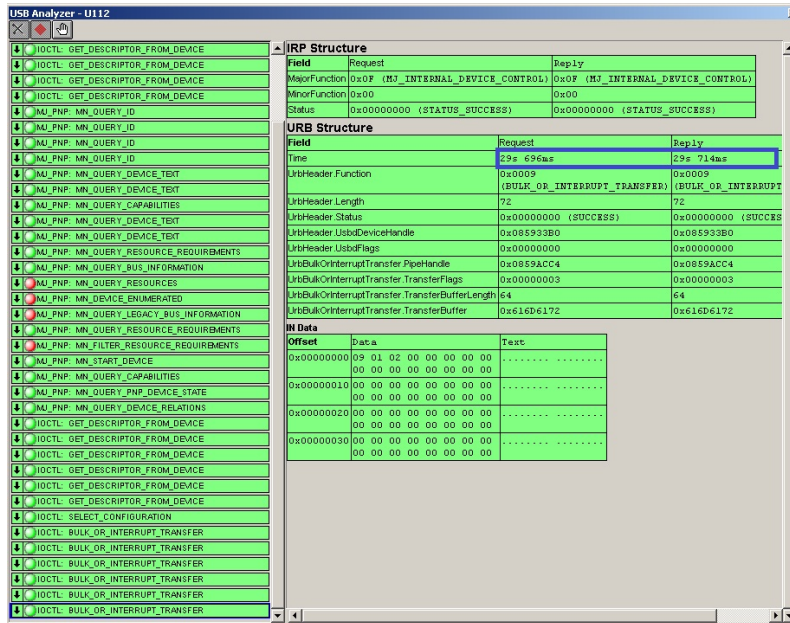


Figura 4.4: Segundo tiempo máximo para enviar datos. Proteus®.

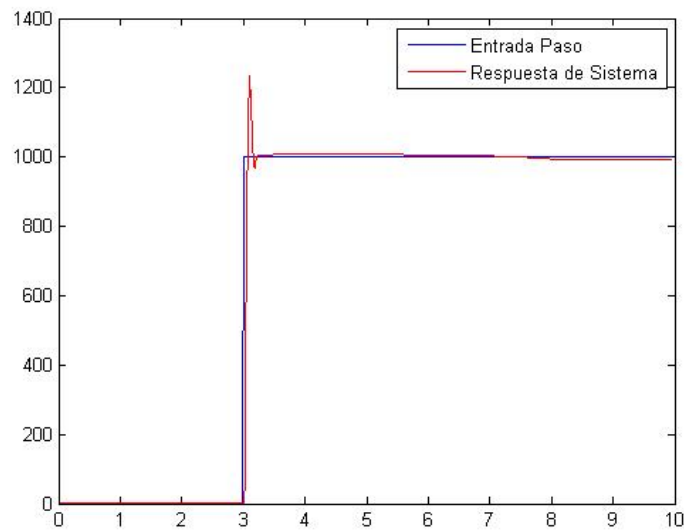
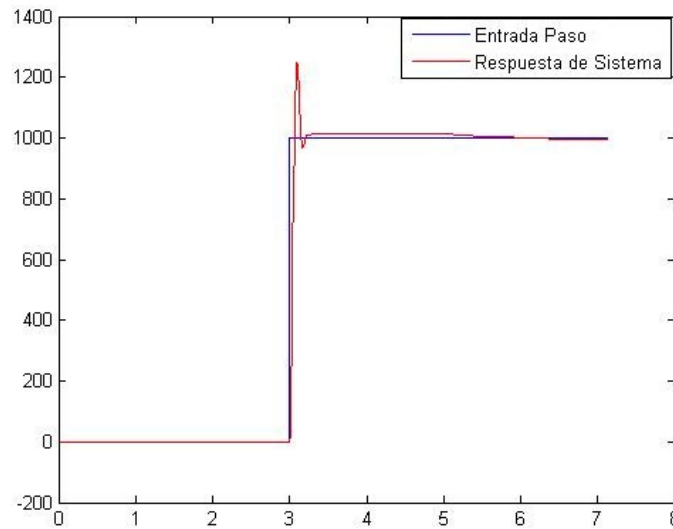


Figura 4.5: Entrada paso  $\theta_2$

Figura 4.6: Entrada paso  $\theta_5$ 

#### 4.4. Recorrido del efector final en Matlab®.

El siguiente test busca que el efector final del robot siga una trayectoria programada.

En Matlab, se programa un recorrido del efector final, teniendo en cuenta el espacio de trabajo de nuestro mecanismo, a continuación se aplica cinemática inversa a la trayectoria para obtener los ángulos  $\theta_2$  y  $\theta_5$  para que el mecanismo reproduzca el movimiento, luego se comunican dichas posiciones a las tarjetas controladora por medio del puerto USB y se espera que la misma lleven las barras a la posición especificada, efectuando así un lazo abierto con Matlab. Por medio del encoder y el módulo QEI el microcontrolador puede obtener la orientación real de la barra y así cerrar su propio lazo de control, e incluso respondernos con dicha información, información que por medio de las ecuaciones de cinemática directa del mecanismo cinco barras nos arroja aproximadamente la posición real del efector final.

Se programó la siguiente trayectoria:

Se ilustra en la figura 4.7 un círculo con centro en (13,32) e inicio de la trayectoria en (13,42) y se obtuvieron los siguientes datos (escala en centímetros):

Los errores de posición relativos a los ángulos  $\theta_2$  y  $\theta_5$  en grados.

Los resultados de las figuras 4.8 y 4.9 muestran un error máximo de 10 pulsos, es decir 0,8 grados.

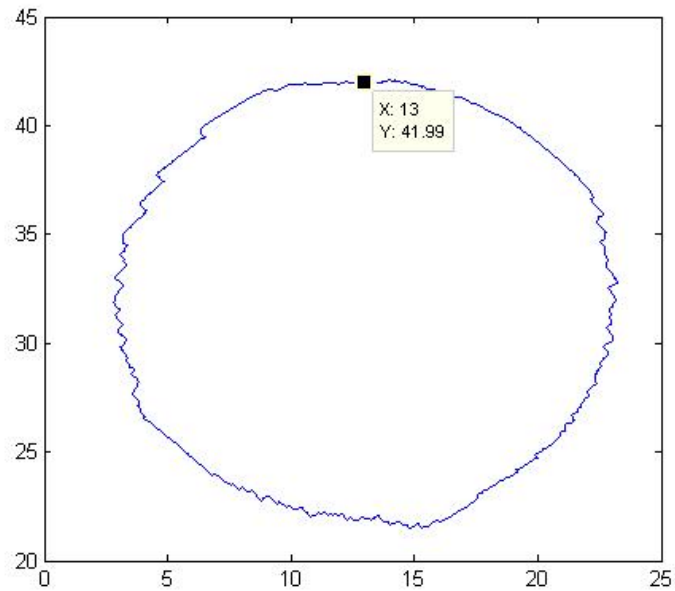
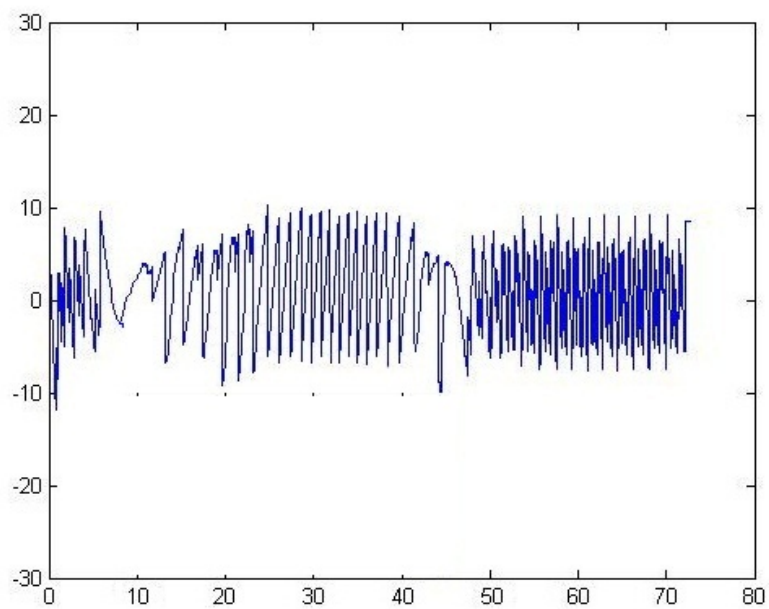


Figura 4.7: Trayectoria del círculo realizada por el mecanismo robótico. Matlab®.

Figura 4.8: Error de posición de  $\theta_2$  en función del tiempo (segundos). Matlab®.

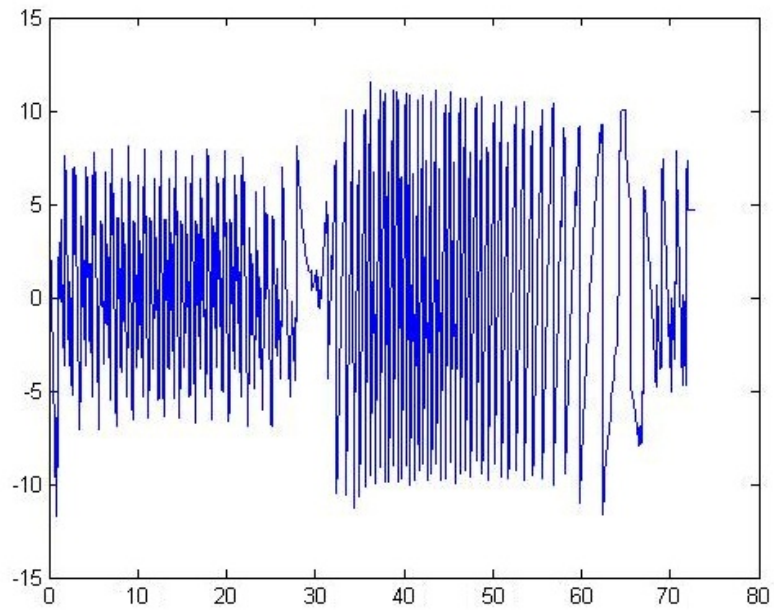


Figura 4.9: Error de posición de  $\theta_5$  en función del tiempo (segundos). Matlab®.

Los resultados del error de posición se ilustran en las figuras 4.10 y 4.11 tanto en el eje x como en el eje Y.

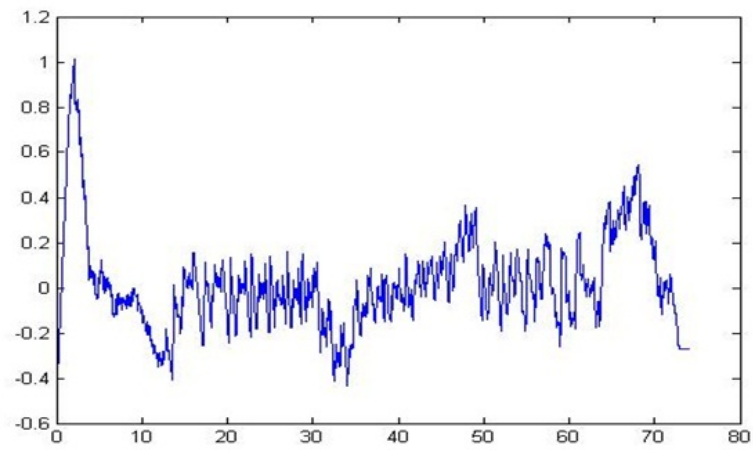


Figura 4.10: Error de posición en eje X en centímetros. Matlab®.

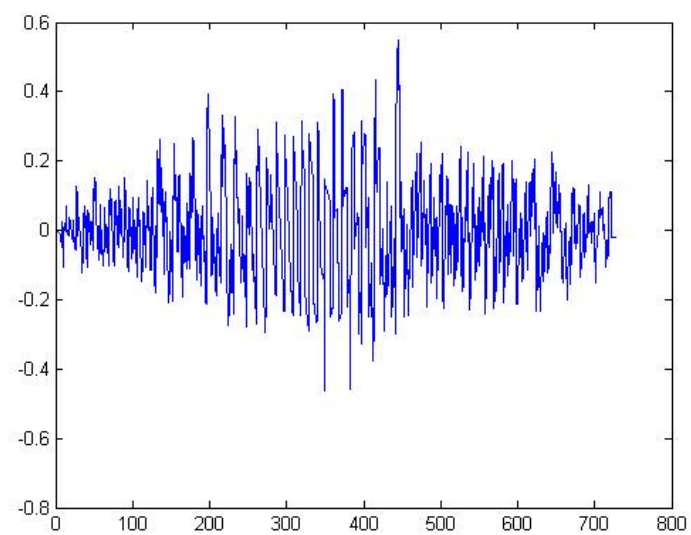


Figura 4.11: Error de posición en eje Y en centímetros. Matlab®.





## Capítulo 5

# Conclusiones y Recomendaciones.

El motor posee un encoder incremental con una resolución de 4288 pulsos por vuelta, esto muestra que la resolución final del sistema de posicionamiento es de  $0,084^\circ$  por pulso.

Un Error de posición de 10 pulsos equivale a  $0,8^\circ$ , no es mucho, pero debido a la configuración de las barras del mecanismo el robot es muy sensible a los errores de  $\theta_2$  y  $\theta_5$ , esto afecta enormemente la trayectoria. Este inconveniente es producto de la baja reducción del caja reductora, es de solo 67:1, para esta aplicación es necesario usar cajas reductoras con mas reducción.

El tiempo de muestreo empleado, que también domina los intervalos para cambio de setpoint, fue de 100mS debido a las restricciones del equipo de cómputo y a las características de Windows. Con tiempos de muestreo más pequeños se conseguirían trayectorias más lisas, ya que los cambios de setpoint son más fluidos, y el PID trabajaría en una zona donde las constantes  $K_P$ ,  $K_I$  y  $K_D$  no varían.

El sistema es un paso para futuros desarrollos, en algunos casos se consiguen tiempos de establecimientos menores a 30ms, así que para futuros trabajos donde se tenga mucho mas en cuenta los cálculos de las constantes de PID, y con un el tiempo de muestreo se espera una mejora sustancial en la forma y el tiempo de trazado de la trayectoria.

Como resultado de este trabajo se notará que es necesario hacer más esfuerzos para disminuir los tiempos de latencia de la comunicación USB y SPI, siendo la segunda mas critica, con esto se obtendrá “entretener” menos al microcontrolador que aplica el PID y así mejorar la respuesta del sistema.



# Anexos.

A continuación se muestran las imágenes del mecanismo robótico. (figuras 5.1, 5.2, 5.3, 5.4)

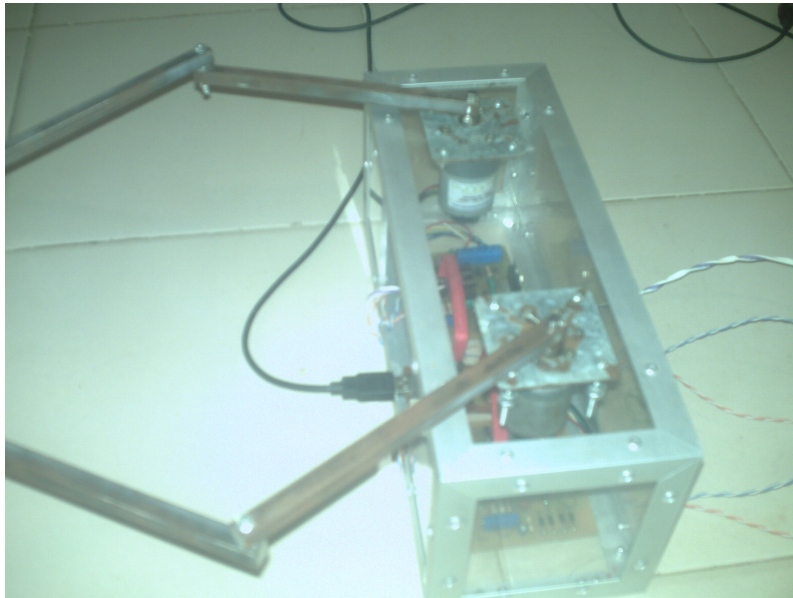


Figura 5.1: Imagen 1 mecanismo robótico ensamblado.

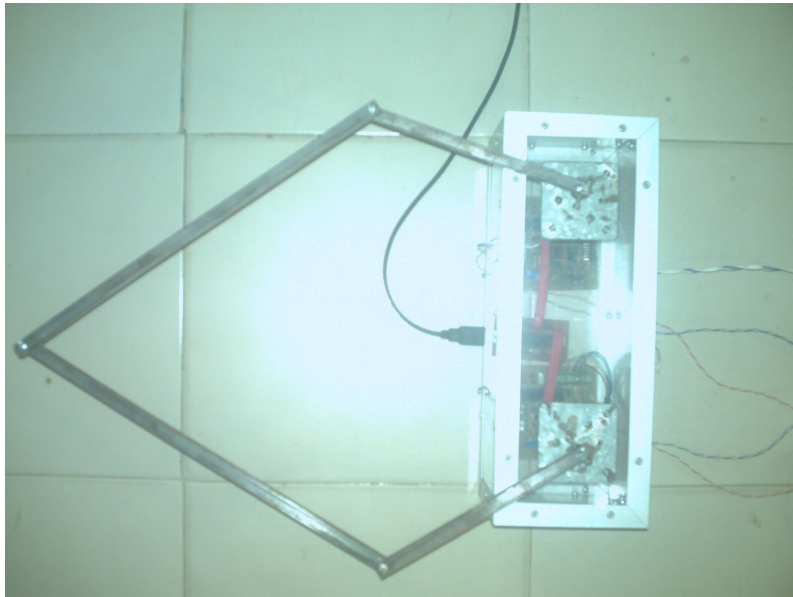


Figura 5.2: Imagen 2 mecanismo robótico ensamblado.



Figura 5.3: Imagen 3 mecanismo robótico ensamblado.

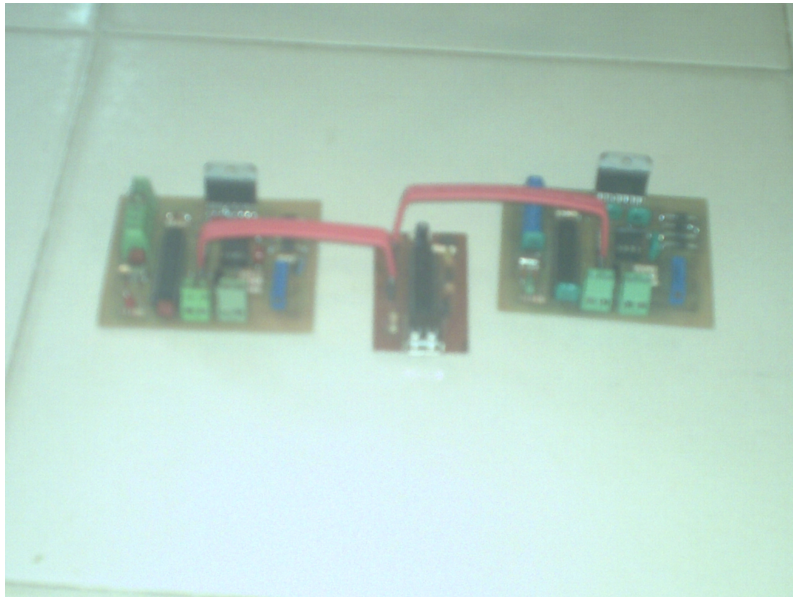


Figura 5.4: Imagen 4 mecanismo robótico ensamblado.

# Bibliografía

- [1] Rafael Aracil, Roque Saltarén, José María Sabater, and Oscar Reinoso. Robots paralelos: máquinas con un pasado para una robótica del futuro. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 2006.
- [2] Nicolás Arrijoja. *Robótica Avanzada*. Gradi s.a., 2010.
- [3] Mani Menon Ashok Kumar Hemal. *Robotics in Genitourinary Surgery*. Springer, 2011.
- [4] Antonio Barrientos, Luis Felipe Peñín, Carlos Balaguer, and Rafael Aracil. *Fundamentos de Robótica*. Mc Graw-Hill, 2007.
- [5] Anibal Ollero Baturone. *Robótica, manipuladores y robots móviles*. Marcombo s.a, 2001.
- [6] W. Bolton. *Mecatrónica. Sistemas de control en ingeniería mecánica y eléctrica*. Alfaomega, 2001.
- [7] Design-simulation. *How do you know your mechanical designs function correctly?* <http://www.design-simulation.com/DDM/SolidEdge/index.php>, 2012.
- [8] Antonio Hermosa Donate. *Electrónica digital fundamental y programable*. Marcombo s.a., 2010.
- [9] Jon Olsa Donazar. *Análisis del error provocado por holguras en las uniones y deformaciones en los eslabones en robots paralelos*. Universidad Pública de Navarra, 2011.
- [10] C. Douglas Giancoli. *Física, principios con aplicaciones. Sexta edición*. Pearson educación., 2006.
- [11] Enriquez Harper. *El abc del control automático de las máquinas eléctricas*. Limusa Noriega Editores, 2003.
- [12] Paul G. Hewitt. *Física conceptual*. Pearson educación, 2004.
- [13] Benjamin Kuo. *Sistemas de control automático*. Prentice Hall, 1996.
- [14] London Mathematical Society. *On computable numbers, with an application to the Entscheidungsproblem*, number 42, 1936.

- [15] Maria Angeles Moñino. *George Devol, pionero de la robótica. Su invento, el robot industrial, transformó las raíces de la industrial mundial*. <http://www.idg.es/pcworld/estructura/VersionImprimir.asp?idArticulo=175987>, 2006.
- [16] Robert L. Norton. *Diseño de Maquinaria*. Mc Graw-Hill, 2005.
- [17] Katsuhiko Ogata. *Ingeniería de control moderna*. Prentice Hall, 2004.
- [18] Joan Domindo Peña, Juan Gamiz Caro, and Antoni Grau Saldes. *Introducción a los autómatas programables*. Editorial UOC, 2003.
- [19] Enrique Mandado Pérez. *Microcontroladores PIC. Sistema integrado para el autoaprendizaje*. Marcombo Ediciones, 2007.
- [20] Eduardo Santamaría. *Eléctronica digital y microprocesadores*. Universidad Pontificia Comillas, 1993.
- [21] Carlos A. Smith and Armando B. Corripio. *Control Automático de Procesos*. Limusa Noriega Ediciones, 2000.
- [22] James Stewart. *Precálculo matemáticas para el cálculo*. Cengage learning, 2006.
- [23] Norbert Wiener. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. The Massachusetts Institute of Tecnology, 1948.
- [24] Wikipedia. *Mecanismo*. <http://es.wikipedia.org/wiki/Mecanismo>, 2012.
- [25] Wikipedia. *Mecatrónica*. <http://es.wikipedia.org/wiki/Mecatrónica>, 2012.
- [26] Wikipedia. *Proteus(electrónica)*. [http://es.wikipedia.org/wiki/Proteus\(electrónica\)](http://es.wikipedia.org/wiki/Proteus(electrónica)), 2012.
- [27] Wikipedia. *Solid edge*. <http://es.wikipedia.org/wiki/SolidEdge>, 2012.