



Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de Ingeniería

Doctorado en Ingeniería

“DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y CONTROL DE UN ROBOT DIDÁCTICO DE 6 GRADOS DE LIBERTAD”

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de

Doctor en Ingeniería

Presenta:

M.C. Carlos Alberto González Gutiérrez

Dirigido por:

Dr. Juvenal Rodríguez Reséndiz

SINODALES

Dr. Juvenal Rodríguez Reséndiz
Presidente

Dr. Edgar Alejandro Rivas Araiza
Secretario

Dr. Roberto Augusto Gómez Loenzo
Vocal

Dr. Jorge Domingo Mendiola Santibáñez
Suplente

Dr. Domingo José Gómez Meléndez
Suplente

Dr. Aurelio Domínguez González
Director de la Facultad

Edgar RIVAS A.

Dr. Irineo Torres Pacheco
Director de Investigación y Posgrado.

Centro Universitario
Santiago de Querétaro, Qro.
Mayo del 2013
México

Resumen

En el presente trabajo se presenta el diseño mecánico, construcción y control de un robot manipulador de seis grados de libertad, que será utilizado con fines didácticos. Por esta razón el robot es de bajo costo y de arquitectura abierta. Se utiliza lenguaje C y una computadora personal para controlar el robot. Esto permite utilizar cualquier algoritmo de control que se desee. Con el fin de presentar resultados experimentales se utiliza un controlador PD más compensación de gravedad y sin medición de la velocidad. Esto requiere obtener y validar experimentalmente el modelo de pares gravitacionales del robot. Se muestra la mejora obtenida en el desempeño del robot cuando se usa este modelo para compensar el efecto de la gravedad. Un aspecto interesante es que el término de compensación de la gravedad es obtenido sin requerir el conocimiento de parámetros de los eslabones tales como sus masas y la ubicación de sus centros de masa o los parámetros de los motores usados como actuadores como las constantes de par o las resistencias eléctricas. Se muestra el correcto funcionamiento del robot mediante experimentos en los que controla la posición del robot en valores constantes y otros en los que el robot debe seguir una trayectoria que es enseñada punto a punto. Dado que el controlador PD más compensación de gravedad utilizado está diseñado para regulación de posición y no para seguimiento de trayectorias, un aspecto que se desea estudiar es la rapidez de las trayectorias que el robot puede seguir satisfactoriamente con este controlador.

Se realiza la construcción de un sistema de retroalimentación de un servo simple para aplicaciones de control de movimiento que es adecuado para utilizarla en aplicaciones educativas. La implementación de hardware se basa en un servo amplificador basado en un microcontrolador (mC), DSP y FPGA como controlador de movimiento. Un nuevo sistema de arquitectura híbrida basada en la fase digital, proporcionando una tarjeta servo amplificadora de bajo costo y un controlador de alto rendimiento, que se puede utilizar como una base para una aplicación industrial o en robótica.

Palabras clave: Robots manipuladores, Control de posición, Compensación de la gravedad, Control PD, FPGA, DSP

Abstract

In this work the mechanical design, construction and control of a six degrees of freedom (DOF) robot manipulator are presented. This robot is to be used in didactic applications, hence, this robot has to be low-cost and open-architecture. A personal computer based in C programming language is used to program and control the robot. This allows the use of any desired control algorithm. A PD controller plus gravity compensation, without velocity measurements, is used to test the robot. Because of this the corresponding gravity effects model is computed and validated through experiments. An important feature of the obtained gravity effects model is that it is not given in terms of either the mechanical parameters of the robot links (such as masses and centers of mass) or parameters of the DC-motor actuators (electrical resistances and torque constants). Performance of the robot is shown through several experiments where either robot positions are regulated at constant values or robot positions have to track a preestablished desired sequence of points. We stress that PD controllers plus gravity compensation are designed to solve the position regulation problem instead of the trajectory tracking problem, hence, an important objective in this work is to determine the speed of the trajectories that the robot can follow satisfactorily with this control scheme.

For constructing a simple servo loop for motion control applications which is suitable for educational applications is presented. The entire hardware implementation is demonstrated, focusing on a microcontroller-based (μC) servo amplifier and a Field Programmable Gate Array-Digital Signal Processor (FPGA-DSP) motion controller. A novel hybrid architecture-based digital stage is featured providing a low-cost servo drive and a high performance controller, which can be used as a basis for an industrial and robotics application

Keywords: Robot manipulators, position control, gravity compensation, PD control, FPGA

Dedicatoria

Mi tesis la dedico con todo mi amor y cariño.

A ti Dios que me diste la oportunidad de vivir y regalarme una familia maravillosa.

Con mucho cariño principalmente a mis padres que me dieron la vida y que estuvieron hasta el último momento conmigo, a ti madre que te fuiste al cielo creyendo en mí.

A mi esposa que me dio su apoyo y confianza y que siempre me dio un aliento ante las adversidades.

A mis hijos Carlos y Alberto que siempre dispusieron de su tiempo para que lo utilizara en esta tesis.

A mis hermanos Juan, José Luis, Patricia, Andrés, Maru, Vicente, Alicia y Gloria gracias por apoyarme siempre, los quiero mucho. Y a mis cuñados por estar conmigo y consentirme tanto.

A todos mis amigos, por estar conmigo en todo este tiempo donde he vivido momentos felices y tristes, muchas gracias.

Y a mis profesores por confiar en mí, Dr. Gilberto Herrera, Dr. Juvenal Rodríguez Reséndiz, Mtro. Sergio Cervantes, Dr. Jorge Mendiola nunca los olvidare.

Agradecimientos

Me gustaría que estas líneas sirvieran para expresar mi más profundo y sincero agradecimiento a todas aquellas personas que con su ayuda han colaborado en la realización del presente trabajo, en especial al Dr. Juvenal Rodríguez Reséndiz, director de esta investigación, por la orientación, el seguimiento y la supervisión continúa de la misma, pero sobre todo por la motivación y el apoyo recibido a lo largo de estos años.

Un agradecimiento muy especial merece la comprensión, paciencia y el ánimo recibido de mi familia y amigos, especialmente el Mtro. Ramón Ortega Rubio y la Mtra. Silvia Silva por su apoyo incondicional.

A todos ellos, muchas gracias.

Índice General

Resumen.....	i
Abstract.....	ii
Dedicatoria.....	iii
Agradecimientos.....	iv
Indice General.....	v
Capitulo 1.....	1
Introducción.....	1
Capitulo 2.....	4
Antecedentes.....	4
2.1 Morfología del Robot.....	10
2.2 Tipos de Articulaciones.....	13
2.3 Resolución y repetibilidad.....	16
Capitulo 3.....	17
3.1 Diseño.....	17
3.1.1 Solid Works.....	18
3.2 Construcción.....	19
3.2.1 Fabricación de partes Mecánicas.....	20
3.2.2 Ensamble Mecánico.....	20
3.3 Reductores.....	21
3.4 Articulaciones Rotacionales.....	23
3.5 Sistema de Control.....	25
3.5.1 Encoder.....	26
3.6 Modelacion del Sistema.....	28
3.7 Control de Voltaje.....	29
3.8 Sistema de Control y Adquisicion de datos.....	33
3.8.1 Obtencion de datos del hardware.....	34
Capitulo 4.....	37
4.1 Cinemática.....	37
4.2 Cinemática Inversa.....	40
4.3 Resultados experimentales.....	43
4.3 Simulación.....	43
4.4 Dinámica.....	49
4.4.1 Consideraciones Dinámicas.....	49
4.5 Dinámica Inversa.....	50
4.6 Experimentacion Realizada.....	51
Capitulo 5.....	61
5.1 Control.....	61
5.2 Resultados Experimentales.....	68
5.3 Regulacion de Posicion.....	68
5.4 Resultados experimentales.....	72
5.4 Seguimiento de trayectorias.....	72
Capitulo 6.....	74
6.1 Conclusiones.....	74
6.2 Resultados Generales.....	77
6.3 Aportaciones.....	79
Anexo I: Artículos.....	

Referencias.....	80
Anexo 1 Constancia	82
Anexo 2 Configuraciones	83
Anexo 3 Tarjetas de Control	86
Tarjeta de adquisición de datos 6008 NI.....	86
Tarjeta Galil Motion 4	91
Anexo 4.....	91
Programas utilizados.....	93
Programación en C++	93
Anexo 5.....	99
Diseño en Solid Works... ..	99
Anexo 6	103
Estudio de Mercado.....	103

Capítulo 1

Introducción

Actualmente, en la industria metal mecánica el uso de manipuladores robóticos es cada vez más extenso pues emplearlos representa una mayor calidad en el producto final, incremento de la productividad y disminución de riesgos de trabajo. Esto motiva el que en las universidades se impartan cursos sobre la programación y el control de robots. Además del interés científico y académico que despierta el hecho de que los robots manipuladores ofrecen un amplio espectro en la formulación de problemas teórico-prácticos, debido a la naturaleza no lineal y multivariable de su comportamiento dinámico. Sin embargo, hoy en día la mayoría de las escuelas relacionadas con el estudio de robots no cuentan con prototipos didácticos que les permitan familiarizarse de manera experimental con los conocimientos adquiridos en el aula. La principal razón para esto es el alto costo de estos equipos. Esta situación es especialmente cierta en países en vías de desarrollo como el nuestro. Es importante resaltar que si un laboratorio de robótica no posee la infraestructura adecuada para el quehacer científico, entonces la vinculación con el sector productivo y con su entorno social será pobre por no decir escasa. Vincular la actividad académica con el mundo de la industria encontrará solución cuando las empresas del país vean en las universidades y centros de investigación de México una alternativa adecuada para encontrar solución a sus problemas reales, en consecuencia un atractivo para la industria es que las universidades y los centros de investigación ofrezcan el potencial a los planteamientos de la industria, esto será posible si los laboratorios cuentan con la infraestructura adecuada y evidentemente con los recursos humanos para cubrir tales exigencias. La comunidad académica y científica de México desde hace algunos años ha experimentado un crecimiento en cuanto al número de instituciones involucradas, número de investigadores que la componen, calidad y cantidad de graduados y publicaciones. Sin embargo, México aún cuenta con una pobre infraestructura en materia de laboratorios de robótica. Tomando en cuenta esta carencia, nace como motivación del presente proyecto contribuir al desarrollo y generación de recursos humanos e infraestructura para laboratorios de robótica con propósitos de investigación científica y aplicaciones industriales.

En la actualidad el Laboratorio de Instrumentación y Control de Procesos de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro no cuenta con estaciones robotizadas para las prácticas de los estudiantes en las áreas de control y automatización. Esto constituye la principal motivación del presente trabajo: se diseña, construye y controla un robot manipulador didáctico de seis grados de libertad. Cabe señalar que actualmente los manipuladores Industriales comerciales para uso didáctico tienen un costo elevado que oscila entre los 400 y 800 mil pesos y, además, son de arquitectura cerrada. Esta es una gran desventaja porque el usuario no puede modificar el esquema de control que estos robots traen de fábrica, lo cual representa una limitante importante en el tipo de práctica experimental que el alumno puede realizar con estos robots.

Las principales escuelas que cuentan con robots manipuladores para prácticas en Querétaro son:

Escuela	Cantidad De Robots	Tipo de Robot y Modelo.
Instituto Tecnológico de Queretano	2	Robot de 5 grados de libertad, angular didáctico, Marca Mitsubishi, Modelo RV-M1, didáctico, comprado en el año 1999.
Universidad del Valle de México	1	Robot de 5 grados de libertad, angular, didáctico, Marca Mitsubishi, adquirido en 2000.
Universidad Autónoma de Querétaro.	2	Robot de 6 grados de libertad, angular, Industrial, Marca Romat, modelo 56 adquirido en el año1998.
CIATEQ	1	Robot de 6 grados de libertad, angular, Industrial Mitsubishi, Modelo Kuka. Adquirido en 2000.

Estas escuelas e Instituciones son las que actualmente tienen robots manipuladores para realizar prácticas e Investigaciones en sus laboratorios. Cabe señalar que la UAQ y el CIATEQ es donde se realiza actualmente investigación sobre la mejora de los robots manipuladores. Las escuelas y universidades restantes que se encuentran en Querétaro están en proceso de adquirir algún tipo de robot para investigación.

El robot manipulador didáctico que se presenta en este trabajo está diseñado con el fin de que permita hacer el estudio experimental de nuevos algoritmos y técnicas de control no lineal. La razón de esto es que los controladores no lineales propuestos en esta investigación están orientados hacia la obtención de mejores desempeños en los robots manipuladores. También se introduce la compensación del efecto de la gravedad sobre el robot a través de un modelo de pares gravitacionales que es obtenido y validado experimentalmente. Así, se utiliza un controlador PD con compensación de gravedad para resolver el problema de posicionamiento de robots y este mismo esquema es probado en la solución del problema de seguimiento de trayectorias que son enseñadas punto a punto.

El conocimiento del efecto de la gravedad en un manipulador permitiera compensarla, al hacerlo los comportamientos no lineales producidos por el efecto gravitacional son cancelados, de modo que el robot puede ser controlado como si se tratara de un sistema lineal usando solamente un controlador PD. Aunque este tipo de controlador no está diseñado para el seguimiento de trayectorias, sin embargo, parte del trabajo realizado está dirigido a estudiar la rapidez de las trayectorias que pueden ser seguidas satisfactoriamente con este controlador. La justificación de esta parte del estudio radica en el hecho de que en muchas aplicaciones industriales el seguimiento de trayectorias de robots se consigue utilizando controladores PD o PID e implementarlos en una didáctica de aprendizaje sustancial. Se presentan algunos resultados experimentales que muestran el buen desempeño del robot construido.

Para el sistema de control de movimiento se hará uso de tecnologías de alto desempeño con FPGAs y DSPs, tomando en cuenta que los procesos industriales (Mendoza, 2010), máquinas herramientas y robots constan de numerosos motores y el tener controles para cada uno resulta costoso. Se propone implementar un sistema de control multi-eje que incorpore un mayor número de controladores en un solo equipo siendo más eficiente, flexible y de bajo costo.

Debido a la arquitectura abierta del robot manipulador construido que se propone, se podrá programar fácilmente el algoritmo de control que se desee. De este modo se provee una plataforma flexible para la experimentación mediante una didáctica y aprendizaje integral.

Capítulo 2

Antecedentes

La ciencia y la tecnología se han convertido en protagonistas de las transformaciones vividas por los pueblos en las últimas décadas y son elementos fundamentales para el desarrollo del país. La investigación científica y la tecnológica constituyen factores imprescindibles del progreso nacional, por tanto, la investigación y desarrollo es una de las funciones sustantivas dentro de nuestra formación Académica. El mundo experimenta un continuo avance en la ciencia y tecnología sin precedentes en la humanidad. México como país en desarrollo, está entrando a la era de la modernización tecnológica industrial y en general en todos los niveles de la vida moderna.

La robótica esta destinada a satisfacer necesidades en beneficio del hombre. Los países industrializados (Japón, E.U. y países europeos) contienen en sus líneas de producción sistemas automatizados a través de robots manipuladores con un alto índice de calidad en sus productos. La robótica juega un papel destacado en el proceso de modernización y es particularmente importante en la generación de tecnología. En los últimos años la robótica ha mostrado perspectivas prometedoras gracias al desarrollo tecnológico así como a los avances teóricos del control automático, lo que permite la viabilidad de su aplicación real en la sociedad y en la industria.

El buen entendimiento de la robótica, está condicionado al conocimiento de un conjunto muy amplio de disciplinas tales como física, computación, matemáticas, electrónica, mecánica, control automático, ingeniería eléctrica, visión artificial entre otras. La robótica es un campo interdisciplinario de la tecnología moderna que aborda la investigación y desarrollo de una clase importante de sistemas mecánicos denominados robots. Una de tantas definiciones es la adoptada por el *Robot Institute of America* (RIA) un robot es un manipulador multifuncional,

reprogramable, diseñado para mover materiales, partes, herramientas o dispositivos especializados a través de movimientos programados para la ejecución de una variedad de tareas.

Los procesos productivos tienden a utilizar el control automático para mejorar la productividad, la calidad, abaratar costos, evitar riesgos y en general para incrementar la calidad de vida del hombre.

La necesidad cada vez más apremiante de aumentar la productividad y conseguir productos acabados de una calidad uniforme, esta haciendo que la industria gire cada vez más hacia la automatización basada en computadora.

En el contexto industrial podemos definir la automatización como una tecnología que está relacionada con el empleo de sistemas mecánicos y electrónicos basados en computadoras para la operación y control de la producción. En consecuencia, la robótica es una forma de automatización programable industrial. Un robot industrial es una máquina programable de uso general que tiene algunas características antropomórficas o humanoides. La característica humanoide más típica de los robots actuales es la de sus brazos móviles, se tratan más bien de máquinas con un solo brazo que casi siempre opera desde una posición fija en la superficie de la fábrica.

Virtualmente, la mayoría de los robots industriales son simplemente brazos electromecánicos que tienen una herramienta en su extremo final. El brazo es el mecanismo de manipulación fundamental de cualquier robot industrial. Hoy en día, los robots manipuladores ofrecen una clara y prometedora perspectiva para la automatización industrial, representando nuevas fronteras para el desarrollo y bienestar de la sociedad. Actualmente, los robots manipuladores tienen amplia gama de aplicaciones en el mundo real; por lo que la Automatización como área multidisciplinaria del conocimiento y por ende generadora de tecnología representa una área estratégica para el país, ya que su impacto no solo repercute en aspecto políticos y económicos, también forma parte importante de la vida cotidiana y como elemento impulsor en la educación, cultura, y en general en diversos sectores de la sociedad.

A continuación se presenta una pequeña reseña de los desarrollos más destacables en la historia de la robótica.

Con el objetivo de diseñar una máquina flexible, adaptable al entorno y de fácil manejo, George Devol, pionero de la Robótica Industrial, patentó en 1948, un manipulador programable que fue el germen del robot industrial.

En 1948 R.C. Goertz del Argonne National Laboratory, desarrolló, con el fin de manipular elementos radioactivos sin riesgo para el operador, el primer telemanipulador, este consistía en un dispositivo mecánico maestro-esclavo. El manipulador maestro, reproducía fielmente los movimientos de este.

Años más tarde, en 1954, Goertz hizo uso de la tecnología electrónica y del servo control sustituyendo la transmisión mecánica por la eléctrica, desarrollando así el primer telemanipulador con servo control bilateral. Otro de los pioneros de la tele manipulación fue Ralph Mosher, ingeniero de la General Electric que en 1958 desarrollo un dispositivo denominado Handy-Man, consistente en dos brazos mecánicos teleoperados mediante un maestro del tipo denominado exoesqueleto. Por su propia concepción, un telemanipulador precisa el mando continuo de un operador, y salvo por las aportaciones incorporadas con el concepto del control supervisado y la mejora de la telepresencia promovida hoy día por la realidad virtual, sus capacidades no han variado mucho respecto a las de sus orígenes.

En 1968 J.F. Engelberger visitó Japón y poco más tarde se firmaron acuerdos con Kawasaki para la construcción de robots tipo Unimate.

El crecimiento de la robótica en Japón aventaja en breve a los Estados Unidos gracias a Nissan, que formó la primera asociación robótica del mundo, la Asociación de Robótica industrial de Japón (JIRA) en 1972. Dos años más tarde se formó el Instituto de Robótica de América (RIA), que en 1984 cambió su nombre por el de Asociación de Industrias Robóticas, manteniendo las mismas siglas (RIA). Por su parte Europa tuvo un despertar más tardío. En 1973 la firma sueca ASEA construyó el primer robot con accionamiento totalmente eléctrico. En 1980 se fundó la Federación Internacional de Robótica con sede en Estocolmo, Suecia.

La configuración de los primeros robots respondía a las denominadas configuraciones esférica y antropomórfica, de uso especialmente válido para la manipulación. En 1982, el profesor Makino de la Universidad Yamanashi de Japón, desarrolla el concepto de robot SCARA (*Selective*

Compliance Assembly Robot Arm) que busca un robot con un número reducido en grados de libertad (3 o 4), a un costo limitado y una configuración orientada al ensamblado de piezas.

Ha sido la fusión de electrónica y mecánica la que ha hecho posible al robot moderno y los japoneses han acuñado el término "mecatrónica" para describir esta fusión. El año 1980 la producción de robots industriales aumentó considerablemente respecto a lo anterior. La primera generación de robots era reprogramable, de tipo brazo, dispositivos manipuladores que sólo podían memorizar movimientos repetitivos, asistidos por sensores internos que les ayudan a realizar sus movimientos con precisión. La segunda generación de robots entra en escena a finales de los 70, tienen sensores externos (tacto y visión por lo general) que dan al robot información (realimentación) del mundo exterior. Estos robots pueden hacer elecciones limitadas o tomar decisiones y reaccionar ante el entorno de trabajo, se les conoce como robots adaptativos. La tercera generación acaba de surgir, está surgiendo en estos años, emplean la inteligencia artificial (IA) y hacen uso de los ordenadores tan avanzados de los que se puede disponer en la actualidad. Estos ordenadores no sólo trabajan con números, sino que también trabajan con los propios programas, hacen razonamientos lógicos y aprenden.

Durante años los robots han sido considerados útiles sólo si se empleaban como manipuladores industriales. Recientemente han irrumpido varios roles nuevos para los robots. A diferencia de los tradicionales robots fijos de manipulación y fabricación, estos nuevos robots móviles pueden realizar tareas en un gran número de entornos distintos. A estos robots no industriales se les conoce como robots de servicio. Los robots de servicio proporcionan muchas funciones de utilidad, Por ejemplo, hay prototipos que recorren los pasillos de los hospitales y cárceles para servir alimentos, otros navegan en oficinas para repartir el correo a los empleados. Los robots de servicios son idealmente adecuados al trabajo en áreas demasiado peligrosas para la vida humana y a explorar lugares anteriormente prohibidos a los seres humanos. Han probado ser valiosos en situaciones de alto riesgo como en la desactivación de bombas y en entornos contaminados radioactiva y químicamente.

Hoy en día se busca tener un control absoluto de los robots para generar el mayor adelanto industrial nunca antes visto. Las numerosas aplicaciones de los robots manipuladores originan de manera importante el desarrollo de herramientas analíticas que garanticen un mejor desempeño de estos sistemas.

En los robots el movimiento del órgano final es importante, como la manera en la cual se logra un cambio en las coordenadas del robot. Esto es, en general, un problema muy relevante debido al hecho de que los robots son utilizados frecuentemente para trasladar objetos de un lugar a otro; para lograr esto, diferentes estrategias han sido propuestas, las cuales son en su mayoría definidas a partir de un modelo matemático del robot manipulador. Por esta razón el modelo dinámico de los robots es importante porque puede ser usado para simular su sistema robótico en computadora; ahora sí, experimentamos el comportamiento del modelo dinámico bajo ciertas condiciones de operación es posible predecir como se va a comportar el sistema robótico cuando se presenten variables del sistema., por otra parte se pueden experimentar técnicas de control sustitutas; un control sofisticado necesita usar un modelo dinámico real para encontrar las condiciones optimas para el control, en operaciones de alta velocidad, y un punto importante que no se puede dejar de mencionar es el análisis dinámico de un manipulador donde se revelan todas las reacciones de las uniones, fuerzas (momentos), esto es necesario para el diseño y la construcción mecánica.

En el modelo dinámico de un manipulador aparecen principalmente cuatro términos; las fuerzas debidas a la inercia, las fuerzas centrífugas y de Coriolis, el término de fuerzas o pares gravitacionales y el término debido a las fuerzas externas, entendiendo este último como el par aplicado a cada unión. Los pares gravitacionales en nuestro estudio generan un punto importante, debido a que una vez modelado este termino se puede emplear para compensar el efecto de gravedad en controladores, haciendo con esto que el controlador tenga un mejor desempeño ya que al diseñar la ley de control sin el termino de la gravedad esta se simplifica. Es importante mencionar que la mayoría de los métodos que son usados para calcular la ley de control en robots manipuladores son métodos que utilizan su modelo matemático explícitamente; sin embargo, en la práctica no es posible obtener un modelo matemático que represente exactamente el comportamiento dinámico del robot manipulador. Lo anterior provoca que los resultados que se obtienen para el modelo matemático no coincidan con los resultados prácticos. Este problema ha sido considerado por diversos autores, entre los cuales se encuentran [6], [7], [8], [9], donde la idea principal ha sido lograr robustez del sistema de control del robot manipulador. Algunas de las técnicas empleadas para lograr dicho objetivo son: control adaptable, control robusto no lineal, etc, de las cuales experimentaremos con uso de técnicas no lineales.

Los sistemas de control de movimiento juegan un papel importante en el control de los diferentes tipos de servo sistemas. La mayoría de sistemas de control de movimiento se basan en un Procesador de Señales Digitales (DSPs) soluciones en un chip como FPGA (Field Programmable

Gate Array), en base a microprocesador (μP) y microcontrolador (μC). Un sistema de control de movimiento multi-eje necesita muchas funciones con el fin de realizar de forma rápida y precisa las complejas tareas necesarias el control de robots industriales y sistemas de automatización (Chan *et al.*, 2007), (Visioli *et al.*, 2002). Estos incluyen la generación de perfiles velocidad, la interpolación, adquisición de datos así como la integración de uno o más lazos de control Proporcional Integral Derivativo (PID). Los métodos numéricos convencionales para estas funciones tienen aspectos difíciles. Complicadas multiplicaciones, divisiones y el cálculo de funciones trigonométricas son requeridas para realizar cálculos de forma repetitiva (Cho *et al.*, 2009). Bajo estas circunstancias, es necesario desarrollar controladores electrónicos con un alto poder de cómputo y además contar con sistemas de comunicación internos y externos de muy alta velocidad. Las soluciones On-Chip incluyen, en un solo chip, el algoritmo de control y los módulos para la interfaz con la etapa de potencia, tales como generadores de modulación por ancho de pulso (PWM), interfaces de cuadratura para encoder (QIE), entradas y salidas de propósito general (GPIO) etc. (Bueno *et al.*, 2009). Un FPGA proporciona una solución entre un circuito integrado de aplicación específica (ASIC) y un procesador de propósito general (Gu *et al.*, 2010). Por el contrario, DSP y computadoras personales (PC) tienen arquitecturas pipelined. El tiempo de cálculo de un controlador basado en FPGA puede ser relativamente corto sin tomar en cuenta la complejidad del algoritmo de control debido a su arquitectura de procesamiento paralelo (Cho *et al.*, 2009). Además el controlador es más barato, robusto y compacto; por otro lado, las fallas en el proceso de ensamblaje se reducen considerablemente.

Objetivo General

Diseño, construcción y control de un robot manipulador de seis grados de libertad, que será utilizado con fines didácticos de arquitectura abierta.

Desarrollar una tarjeta multi eje, para el control de movimiento basado en FPGA y DSP, que permita ejecutar tareas de alto desempeño y de gran confiabilidad a un bajo costo; además de que pueda ser incorporada en sistemas que requieren el control de diversos motores, como son máquinas herramientas y robots.

Objetivos Particulares

1. Robot utilizado para fines didácticos.
2. Presentar resultados experimentales que utiliza un controlador PD más compensación de la gravedad y sin medición de la velocidad.
3. Experimentar con el robot la Cinemática y Dinámica para aplicación didáctica.
4. Desarrollar un prototipo electrónico de control basado en dispositivos de bajo costo.
5. Desarrollo de una interfaz gráfica de usuario amigable en Visual studio C# 2010, para una fácil manipulación del operador.
6. Una interfaz de comunicación de alta velocidad de transferencia de datos entre las tecnologías implementadas para el análisis y manipulación de señales.
7. Una topología de reconfiguración en marcha On the Fly, que a diferencia de otras metodologías, la planteada en este proyecto permite un esquema de modularidad.

2.1 Morfología del robot

Los robots manipuladores son esencialmente brazos articulados. De forma más precisa, un manipulador convencional es una cadena cinemática abierta formada por un conjunto de cuerpos rígidos (eslabones), o elementos de la cadena, conectados mediante articulaciones o pares cinemáticos (uniones) como se muestra en la figura 2.1. Uno de los extremos de la cadena cinemática se encuentra fija (base) mientras que en el otro se encuentra el órgano terminal con el que se realizará la tarea encomendada al robot manipulador. Las articulaciones (uniones) permiten el movimiento relativo entre los sucesivos eslabones. Esto normalmente es conseguido colocando un actuador (motor eléctrico) en cada una de las articulaciones. Si no existe elasticidad en los eslabones que forman el robot, ni en las articulaciones que los unen, se dice que el robot es rígido. Un parámetro importante de cualquier robot manipulador lo constituye el número de grados de libertad que posee. Los grados de libertad son el número de parámetros independientes que fijan la situación del órgano terminal. El número de grados de libertad suele coincidir con el número de articulaciones de la cadena cinemática.

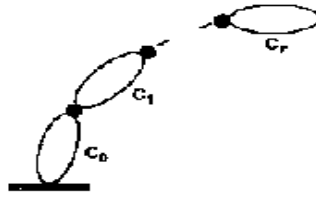


Figura 2.1 Cadena cinemática abierta

Los robots industriales también son conocidos como brazos robots o brazos mecánicos, por analogía con el brazo humano, y se componen de la base la cual puede rotar 360° grados alrededor de su eje de giro, además de que poseen articulaciones para hombro y codo. En el extremo final del codo tienen una parte mecánica denominada muñeca que le permite orientar a la herramienta final que es la que determina la aplicación a realizar. En la figura 2.2 se muestra un robot industrial de la compañía ABB para aplicaciones de traslado de cajas o estibado; un ejemplar de esta naturaleza tiene un peso aproximado de 3 toneladas, puede alcanzar una altura de 4 metros y velocidad de movimiento de 3000 mm/seg.



Figura 2.2. Robot ABB Industrial

Dentro de las características de los robots industriales se encuentra el que trabajan sin descansar las 24 horas del día, todos los días del año, por lo que en aplicaciones industriales superan en desempeño a las personas, ya que los robots no se fatigan ni se cansan, y tienen la habilidad de repetir el proceso siempre con el mismo tiempo y la misma calidad (repetitividad).

Robot Industrial: oficialmente la ISO (International Organization for Standardization) lo define como un manipulador multipropósito, reprogramable y controlado automáticamente en tres o más ejes. Entre las compañías más importantes que diseñan y construyen robots industriales se encuentran FANUC, ABB, KUKA, MOTOMAN, EPSON; cuentan

con una gran diversidad de modelos de robots para diferentes aplicaciones industriales.

Las principales aplicaciones que tienen los robots industriales son proceso de pintado de carrocerías automotrices, accesorios, cubetas, tinas, cajas, soldadura de punto y por arco en carrocerías automotrices, puertas y diversas piezas industriales; traslado de herramientas, estibado y empaquetado de materiales, etc. En forma general, un robot industrial está formado por los siguientes elementos descritos brevemente: Articulaciones o uniones formadas por servomotores que permiten la conexión y movimiento relativo entre dos eslabones consecutivos del robot. Dependiendo del tipo de movimiento que produzcan las articulaciones del robot pueden ser de tipo rotacional o lineal. Las articulaciones de tipo lineal también son conocidas como prismáticas. Las unidades de medición que se asocian a una articulación de tipo rotacional están dadas en radianes o grados, mientras que para una articulación de tipo lineal generalmente se encuentran en metros.

Actuadores: suministran las señales necesarias a las articulaciones para producir movimiento. Los actuadores empleados en robótica pueden ser servomotores, elementos neumáticos, eléctricos o hidráulicos.

Sensores: proporcionan información del estado interno del robot. Posición y velocidad articular son las variables más comunes en el sistema de sensores. En aplicaciones específicas, se emplean sensores de fuerza para conocer la interacción con el medio ambiente, cámaras de videos para localizar objetos en el espacio de trabajo. La capacidad de percepción del robot es mejorada a través del sistema de sensores que le permite responder a su entorno de manera versátil y autónoma. En robótica son de particular interés los encoders ópticos, ya que estos proporcionan información del desplazamiento articular. En general los encoders ópticos consisten de una fuente de luz (emisor) que incide directamente sobre el lado frontal de un disco o plato con ranuras transparentes, colocado directamente en el rotor del motor que al girar permite el paso de ciertos rayos de luz, el detector de luz (receptor) registra los rayos infrarrojos que han pasado por las ranuras del disco, esta señal de luz es acoplada a un circuito electrónico para generar. La configuración de la estructura mecánica de los robots industriales no busca una réplica humana sino funcional, Tabla 2.1.

Brazo Humano	Brazo Robótico
Huesos	Eslabones
Músculos	Accionadores
Tendones	Transmisiones
Nervios	Cables de Señal

Tabla 2.1. Similitudes del Brazo Robot con Brazo Humano

Los robots manipuladores son, esencialmente, brazos articulados.

Ubicada en el extremo del Robot, está la muñeca que permite orientar en el espacio de trabajo el elemento Terminal (pinza, pistola de soldar, ventosas, herramientas, etc.)

Estructura cinemática

Un manipulador industrial convencional es una cadena cinemática abierta formada por un conjunto de eslabones o elementos de cadena interrelacionados mediante articulaciones o pares cinemáticos.

Cada uno de los movimientos independientes que puede realizar una articulación con respecto a la anterior se denomina grado de libertad Figura 2.3.

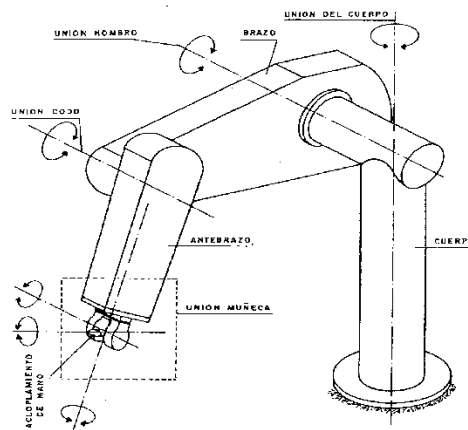


Figura 2.3 Grados de Libertad

Cada uno de los movimientos independientes que puede realizar una articulación con respecto a la anterior se denomina grado de libertad.

2.2 Tipos de Articulaciones

Existen diferentes tipos de articulaciones. Las más utilizadas en robótica son las que se indican en la figura 2.4.

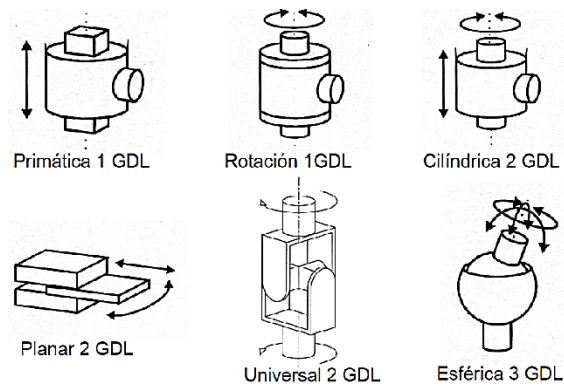


Figura. 2.4 Tipos de articulaciones robóticas

Las uniones son elementos rígidos que se emplean para la conexión de diversas articulaciones del robot. En una cadena de unión-articulación de robot. En una cadena de unión-articulación-unión, se le denomina unión de entrada al eslabón que está más cerca de la base del robot, a la otra unión por consiguiente se le llama unión de salida. La unión de salida es la que se desplaza con respecto a la unión de entrada.

El movimiento de las uniones puede ser lineal o rotacional. Las articulaciones lineales implican un movimiento deslizante o de translación de las uniones de conexión, este movimiento puede ser generado por pistones o por medio de hacer deslizar el elemento sobre un carril o guía usando dispositivos mecánicos, eléctricos o neumáticos.

La articulación de rotación suministra un grado de libertad consistente en una rotación alrededor del eje de la articulación. Está articulación es la más empleada. En la articulación prismática hay un grado de libertad que consiste en una translación a lo largo del eje de la articulación. En la articulación cilíndrica existen dos grados de libertad: una rotación y una translación. La articulación planar está caracterizada por el movimiento de desplazamiento en un plano, existiendo por lo tanto, dos grados de libertad. Por último, la articulación esférica combina tres giros en tres direcciones perpendiculares en el espacio.

Articulación Rotacional, el eje de rotación es perpendicular a los ejes de las dos uniones, figura 2.5.

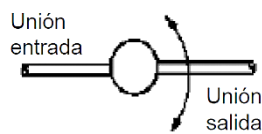


Figura 2.5 Articulación Rotacional

Articulación de Torsión, la cual realiza un movimiento de torsión entre las uniones de entrada y salida, y el eje de torsión de esta articulación es paralela al eje de las dos uniones, figura 2.6.

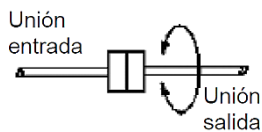


Figura 2.6 Articulación de Torsión

Articulación de Revolución, en este tipo de eje de rotación es paralelo al eje de la unión de entrada y perpendicular al de la unión de salida, es decir la unión de salida gira alrededor de la entrada, figura 2.7.

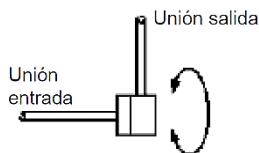


Figura 2.7 Articulación de Revolución

Las articulaciones usadas entre los correspondientes eslabones definen los diferentes tipos de configuraciones de robot. Las más conocidas son las siguientes: cartesiana, cilíndrica, polar y angular (figura 2.8).

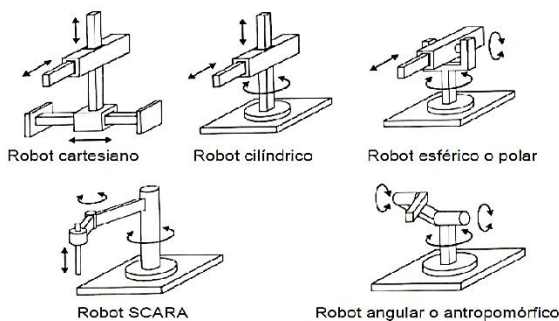


Figura 2.8 Estructuras de configuraciones robots manipuladores Cartesiana, cilíndrica, polar y angular.

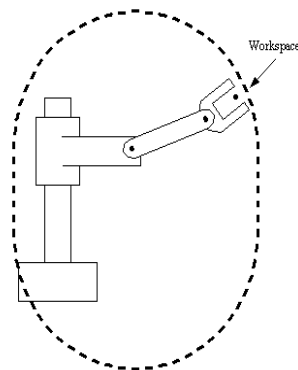


Figura 2.9 Espacio de Trabajo de un Robot.

La configuración a utilizar depende, entre otras cosas, del volumen de trabajo (figura 2.9) y la tarea a realizar. El término volumen de trabajo se refiere al espacio dentro del cual el robot puede posicionar su extremo y realizar la tarea encomendada. Con la configuración de brazo articulado el volumen de trabajo puede el de una esfera. A continuación se estudian cada una de las

configuraciones de robots mencionadas y se concluye sobre la conveniencia de usar una de ellas en este trabajo.

2.3 resolución y repetitividad.

Precisión de movimientos

La precisión de movimientos en un robot industrial depende de tres factores:

La resolución espacial, la exactitud y la repetitividad.

Resolución espacial se define como el incremento más pequeño de movimiento que puede ejecutar un robot. La resolución espacial depende directamente del control del sistema y de las inexactitudes mecánicas del robot.

La resolución espacial depende del control del sistema porque este, precisamente, es el medio para controlar todos los incrementos individuales de una articulación. Su valor está limitado por la resolución de captadores de posición y convertidores A/D y D/A, por el número de bits con los que se realizan las operaciones aritméticas en la CPU y por los elementos motrices, si son discretos. La resolución espacial también depende de las inexactitudes mecánicas que se encuentran estrechamente relacionadas con la calidad de componentes que se conforman con las uniones y las articulaciones. Como ejemplos de inexactitudes mecánicas pueden citarse la holgura de los engranes, las tensiones en las poleas, las fugas de fluidos, etc.

Exactitud Se refiere a la capacidad de un robot para situar el extremo de su muñeca en un punto señalado dentro del volumen de trabajo. La exactitud mantiene una relación directa con la resolución espacial, es decir, con la capacidad de control del robot de dividir en incrementos muy pequeños el volumen de trabajo. Un robot presenta una mayor exactitud cuando su brazo opera cerca de la base. A medida que el brazo se aleja de la base, la exactitud se irá haciendo menor. Esto se debe a que las inexactitudes mecánicas se incrementan al ser extendido el brazo. Otro factor que afecta a la exactitud es el peso de la carga, las cargas más pesadas reducen la exactitud (incrementar las inexactitudes mecánicas).

Repetitividad radio de la esfera que abarca los puntos alcanzados por el robot tras suficientes movimientos, al ordenarle ir al mismo punto de destino programado, con condiciones de carga, temperatura, etc, iguales.

Capítulo 3

Diseño y Construcción

3.1 Diseño

El diseño del robot se planea en base a las funciones que éste realizará. Dado que el robot a construir debe ser didáctico, éste debe realizar tareas interesantes desde este punto de vista. Se propone diseñar un robot manipulador de seis grados de libertad que sea capaz de recorrer trayectorias en un plano así como transportarse a diferentes lugares de su entorno de trabajo [1]. Con base en la información que se ha estudiado en el capítulo anterior se puede abordar el diseño y construcción del robot. A continuación se listan las características anatómicas del manipulador robótico que se propone (figura 3.1):

- Configuración de brazo articulado con 6 grados de libertad
- Volumen de trabajo: esfera parcial.
- Articulaciones rotacionales.

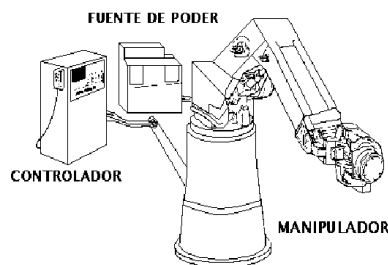


Figura 3.1 Brazo Articulado.

El diseño se debe en gran parte a la creatividad e ingenio sustentable para el desarrollo del mismo, la aplicación de mecanismos y materia prima que tiene este robot fue planteada para que esté a la altura de robots manipuladores didácticos comerciales. El diseño de robot manipulador didáctico es de características de estructura parecida a la de un robot industrial, pero con aportaciones de ideas nuevas sobre el diseño, con el fin de experimentar e Investigar controladores más eficientes que los que hay en día, como un compensador de pares gravitacionales del controlador PD no lineal. El diseño se realizó con el software de SolidWorks.

3.1.1 SolidWorks

La idea principal de usar SolidWorks como herramienta de dibujo es que se trata de un software que ayuda a desarrollar rápidamente proyectos de diseño, es una herramienta que ayuda a resolver rápidamente cálculos de diseño mientras se dibuja y ayuda a realizar dibujos en tres dimensiones. En los dibujos de tres dimensiones se aprecia claramente el aspecto de un diseño que aun no ha sido fabricado y eso ayuda a administrarse en todos los sentidos del diseño. El SolidWorks se utilizó primero para hacer un diseño en el plano (X,Y) (ver anexo A.1) y, en base a esto, posteriormente se procedió a elaborar el diseño en tres dimensiones figura 3.2. Los comandos más utilizados en un proyecto de estas características se muestran en la tabla 3.1.

Line	Multilane	1. ALAMBRIN	}	change	{	Thickness Elev
Point	Offset					
Array	Trim					
Erase	linear Dimensión	2. SUPERFICIES	}	Rulesurf Edgesurf Tabsurf Revsurf	{	Surftab1 Surftab2
Ellipse	Rotate 3D					
Circle	Hide					
Polyline	3dface					
Spiline	Vports	3. SÓLIDOS	}	Extrude Revolve	{	Unión Subtract Intersect
Extrude	Ucs					

Tabla 3.1 Comandos y estructura de SolidWorks

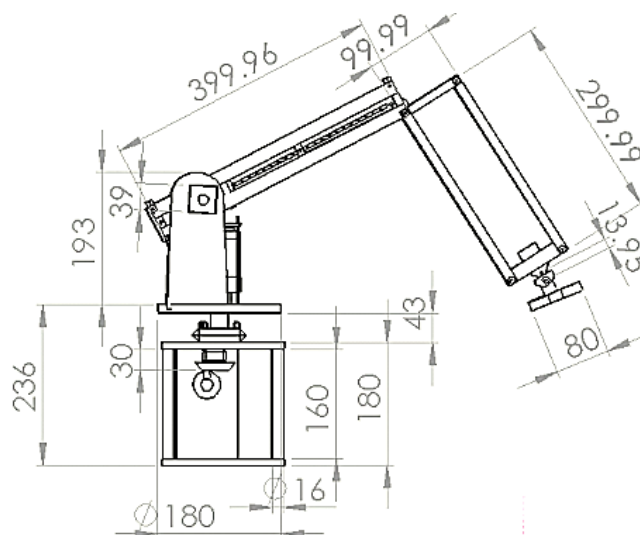


Figura 3.2 Diseño de Robot 6 DOF con dimensiones reales

Este paquete es muy útil porque permite generar sólidos y superficies en tres dimensiones, lo cual hace más entendible la presentación del diseño.

3.2 Construcción

En la tabla 3.2 se muestra el material utilizado durante el proceso de construcción del robot manipulador didáctico.

CANTIDAD	DESCRIPCION
1	PLACA DE ACERO 62RC 30X50X5mm
1 mto.	BARRA DE ALUMINIO HUECO 13X13mm
3mto	PERFIL DE LUMINIO DE 10mm
6	MOTORES CD CON REDUCTORES
3.	FUNDICION DE ALUMINIO
1mto	BARRA DE 4mm DIAMETRO
1	REDUCTORES ½"
18	BALEROS 12.7mm DIAM.EXT-6.5 DIAM INT
8	POTENCIOMETROS DE PRECISION 10K, 2V
100	SEGUROS MECANICOS TIPO E 3/16", 1/4.
20	TORILLOS DE GOTA 3/16" X 1"
½ mto.	FIBRA DE CARBONO
4	BROCAS 6,7,8 mm y 3/16"
2	MACHUELOS 6mm y 3/16 std.

Tabla 3.2 Material utilizado para la fabricación del robot articulado.

Mecánicamente un robot está formado por una serie de elementos o eslabones unidos mediante articulaciones que permiten un movimiento relativo entre cada dos eslabones consecutivos. Cada uno de los movimientos independientes que puede realizar cada articulación con respecto a la anterior se denomina grado de libertad (GDL). El número de GDL del robot viene dado por la suma de GDL de cada articulación que la compone.

Las articulaciones utilizadas son únicamente de rotación, con un solo GDL cada una. Para posicionar y orientar un cuerpo en el espacio son necesarios 6 parámetros [3 de posición + 3 de orientación], es decir 6 GDL; pero en la práctica se utilizan 4 o 5 GDL por ser suficientes. Otros casos requieren más de 6 GDL para tener acceso a todos los puntos. Cuando el número de GDL es mayor que los necesarios, se dice que el robot es redundante.

3.2.1 Fabricación de partes mecánicas

Para la fabricación de partes mecánicas es necesario involucrarse con el manejo de las maquinas herramientas. En este trabajo se hizo uso de un torno horizontal, una fresadora vertical, un taladro vertical, una esmeriladora y una rectificadora plana, figura 3.3.



Figura 3.3 Maquinaria utilizada en la fabricación de partes mecánicas del Robot 6 DOF

En el torno se fabricaron piezas cilíndricas a ser usadas como ejes, algunos orificios en la base del robot, como es el caso del orificio donde va soportado el motor de la articulación 1, las flechas principales para el movimiento del segundo brazo, algunos bujes, los ejes de los brazos y realizar el ajuste de piezas.

Con la Fresadora se fabricó todo lo que regularmente tiene una geometría cuadrada como la placa con que cuenta la base del robot, la cual debió trabajarse hasta dejarla a la medida del diseño incluyendo orificios en puntos estratégicos. También se fabricaron las placas y barras que están por encima de la base. El taladro fue utilizado para realizar varios agujeros en varias piezas del robot donde no se necesita una medida muy precisa y ayuda a ahorrar tiempo, por ser más sencillo su uso. La rectificadora plana fue utilizada en el acabado de las superficies de los maquinados realizados en fresadora o torno que no tienen el suficientemente acabado. La rectificadora plana realiza un acabado tipo espejo.

3.2.2 Ensamble Mecánico

El diseño mecánico se planeó con un presupuesto reducido. Se buscaron mecanismos que ayudaran a realizar un robot didáctico capaz de poder hacer experimentación de control automático en él. Para el diseño mecánico se pensó en tres partes principales del robot las cuales son: 1) la base del mecanismo, es decir la parte que sostiene a los eslabones, que en este caso son seis, 2) tipos de eslabones, 3) partes mecánicas y material utilizado.

Base del robot didáctico: Se diseño una base que fuera sólida de material de fundición de acero inoxidable y que tuviera suficiente peso para mantener firme el robot durante la realización de sus

movimientos, es decir, soportar el peso de los motores de CD, las transmisiones de engranes de las tres articulaciones y dos eslabones de material de fibra de carbono, figura 3.4.

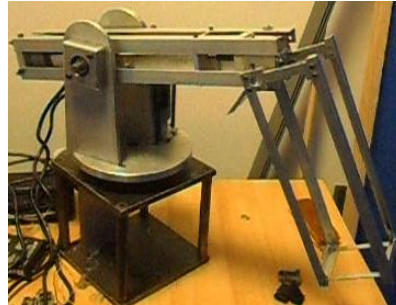


Figura 3.4 Construcción de Robot 6 DOF

3.3 Reductores

A los reductores utilizados en la robótica se les exige condiciones de funcionamiento muy restrictivas. La exigencia de estas características viene motivada por las altas prestaciones que se le piden al robot en cuanto a precisión y velocidad de posicionamiento. La tabla 3.3 muestra valores típicos de reductores para robótica actualmente empleados.

Características	Valores típicos
Relación de reducción	50 ÷ 300
Peso y tamaño	0.1 ÷ 30 kg
Momento de inercia	10^{-4} kg · m ²
Velocidades de entrada máxima	6000 ÷ 7000 rpm
Par de salida nominal	5700 Nm
Par de salida máximo	7900 Nm
Juego angular	0 ÷ 2 °
Rigidez torsional	100 ÷ 2000 Nm/rad
Rendimiento	85 % ÷ 98 %

Tabla 3.3. Características de reductores para la robótica

Se buscan reductores de bajo peso, reducido tamaño, bajo rozamiento y que al mismo tiempo sean capaces de realizar una reducción elevada de velocidad en un único paso. Se tiende a minimizar su momento de inercia.

El par de salida nominal permisible T_2 depende del par de entrada T_1 y de la relación de transmisión a través de la relación:

$$T_2 = nT_1 \frac{\omega_1}{\omega_2}$$

Donde el rendimiento n puede llegar a ser cerca del 100% y la relación de reducción de velocidades $\omega_1 =$ velocidad de entrada; $\omega_2 =$ velocidad de salida.

Para nuestro caso el reductor de movimiento empleado es un tornillo sin fin y corona así como un reductor planetario que se implementan para transmitir grandes esfuerzos, y como reductores de velocidad aumentando la potencia de transmisión. Generalmente trabajan en ejes que se cruzan a 90° . Tiene la desventaja de no ser reversible el sentido de giro, pero controlable con el giro de la flecha de motor. En las construcciones de mayor calidad la corona está fabricada de bronce y el tornillo sin fin, de acero templado con el fin de reducir el rozamiento. Si este mecanismo transmite grandes esfuerzos es necesario que esté muy bien lubricado para matizar los desgastes por fricción.

El número de entradas de un tornillo sin fin suele ser de una a ocho ver figura 3.5.

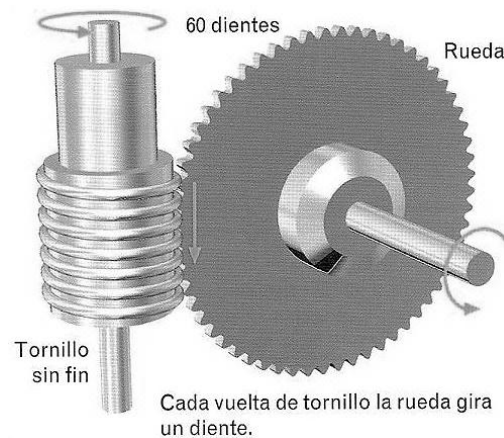


Figura 3.5 Transmisión de Movimiento, Tornillo Sin Fin.

Los datos de cálculo de estos engranajes están en tablas de mecanizado, pero una fórmula básica está dada por:

$$pn = 2\pi rm \quad \text{Donde} \quad m = \frac{pn}{2\pi r}$$

Siendo

r El radio de la rueda.

p El paso del tornillo (separación entre dos filetes consecutivos de rosca).

- m El número de vueltas que da la rueda.
- n El número de vueltas que da el tornillo.

El radio de la rueda dentada debe medirse desde su centro hasta el punto más alejado del piñón, ya que es este punto el que se mueve con la velocidad de avance del tornillo.

3.4 Articulaciones Rotacionales

Mecánicamente los componentes principales de robots manipuladores. Están formados por una serie de elementos estructurales sólidos o eslabones unidos mediante articulaciones que permiten un movimiento relativo entre cada dos eslabones consecutivos, figura 3.6.

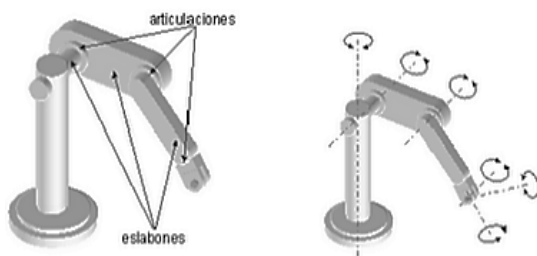


Figura 3.6 Eslabones y articulaciones de un robot

El robot a diseñar es del tipo manipulador robótico industrial. Inicialmente será diseñado para que cumpla funciones de posicionamiento, a medida que avance la investigación se irá añadiendo la capacidad de carga, descarga, manipulación y traslado de objetos; y finalmente pueda ser adaptado para que realice otras aplicaciones como pintura y soldadura, entre otras.

Un eslabón es uno de los elementos básicos de una cadena cinemática. Es un cuerpo rígido encargado de transmitir los distintos movimientos. Poseen puntos de unión llamados nodos.

Como se mencionó anteriormente, el robot será del tipo manipulador, y contará con seis eslabones y seis grados de libertad (movimiento que puede realizar cada articulación con respecto a la anterior). Cada uno de los grados de libertad será una articulación del tipo rotacional. Tanto los seis eslabones como las seis articulaciones (o grados de libertad para este caso) servirán para posicionar el extremo del robot en la posición deseada y permitirá realizar ejercicios de posicionamiento espacial.

Se diseña y construye una articulación rotacional (q_1) que se encuentre en la parte central de la base del robot, donde se acopla un servo motor Brushless (sin escobillas) con encoder incremental

de alto rendimiento adecuado para aplicaciones de posición, velocidad y aceleración. Mediante el modelado siguiente, figura 3.7.

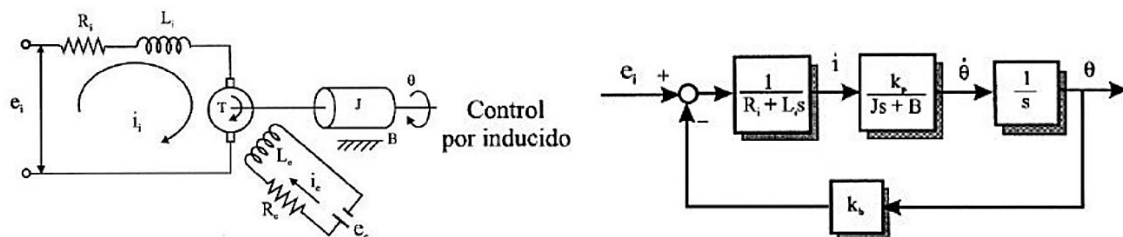


Figura 3.7 Motor DC. Esquema y Función de transferencia

Para mejorar el comportamiento de este tipo de motores, el campo de excitación se genera mediante imanes permanentes, con lo que se evitan fluctuaciones del mismo. Las velocidades de rotación que se consiguen con estos motores son del orden de 1000 a 3000 r.p.m, con un comportamiento muy lineal y bajas constantes de tiempo.

Este motor tiene un par elevado a la relación de inercia por lo que es ideal para aplicaciones punto a punto que requieran una rápida aceleración junto con un sistema de transmisión de movimiento tornillo sin fin corona, acoplado a la flecha del motor y con el encoder de este, es posible medir la posición y servir como lazo de retroalimentación en el sistema de control. Por otra parte, la forma en que se diseña esta articulación no tiene efectos de la gravedad. Se presenta la figura del servo motor y algunas características importantes tomadas en cuenta para los primeros tres grados del robot manipulador.



Especificaciones
Encoder incremental diferencial de cuadratura
Resolución: 1000 líneas, con un índice de pulso
Potencia de entrada: 5VDC \pm 5% a 120 mA máx.
Señales de salida: Conductor de línea AM26LS31 20 mA
Momento de inercia: 3.5×10^{-3} en onzas sec^2 (2.5×10^{-5} $\text{kg} \cdot \text{m}^2$)
Aceleración máxima: 100000 rad/s^2 máx.
Máxima velocidad: 5000 rpm máx.
Temperatura de funcionamiento: -20°C a 100°C
Temperatura de almacenamiento: -40°C a 125°C
Humedad relativa: 98% sin condensación

Figura 3.8 Servo motor utilizado y especificaciones.

Con el acoplamiento de los servomotores al Robot, la función de las primeras tres articulaciones ayudan al movimiento rotacional mayor. La primera articulación permite que el brazo realice

movimientos circulares alrededor de la base. Las articulaciones dos y tres permiten el movimiento del brazo articulado. Las siguientes 3 articulaciones son la muñeca y mano que toma la pieza. El peso aproximado de la base y los dos eslabones de fibra de carbonó (brazo articulado) junto con la mano, incluyendo los correspondientes servo motores brushless y motores de CD, reductores y potenciómetros es de 20.5 Kg. Para los primeros tres grados de libertad y 0.8 kg para la muñeca y mano del manipulador En la figura 3.9 se muestra una fotografía del Robot construido en su totalidad.

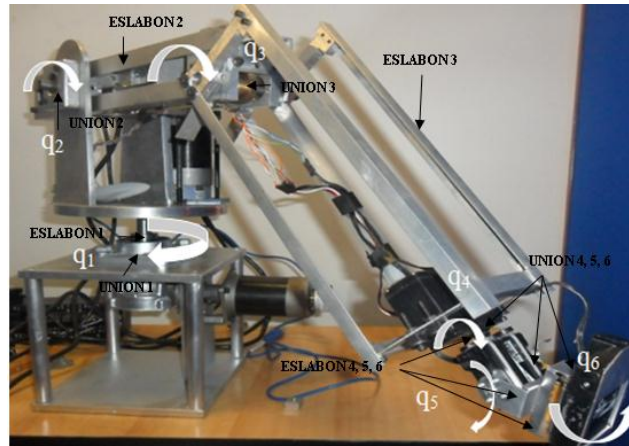


Figura 3.9 Una vista del robot construido, se muestran las articulaciones (uniones) $q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6$ y los eslabones.

3.5 Sistema de control

Sistema

Un sistema es una combinación de componentes que actúan juntos y realizan un objetivo determinado. A un sistema se le puede considerar como una caja negra que tiene una entrada y una salida.

Sistema de control

Se considera un sistema de control si la salida se controla de modo que pueda adoptar un valor o cambio en particular de alguna manera definida figura 3.10.

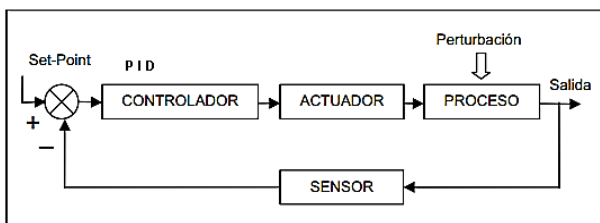


Figura 3.10 Sistema de control retroalimentado

3.5.1 Encoder

Los codificadores rotativos (rotary encoders), también llamados codificadores de eje motriz rotativo o codificadores de ángulo rotativo de eje, son transductores electromecánicos que convierten rotación del eje en pulsos de salida, que pueden ser contados para medir las evoluciones del eje motriz o ángulos de dicho eje. Estos proporcionan información de régimen y posicionamiento en lazos cerrados. Un contador rotativo puede sensar un número de posiciones discretas por revolución. El número es llamado puntos por revolución de un motor por pasos. La velocidad de un codificador está en unidades de cuenta por segundo. Los codificadores rotativos pueden medir el ángulo del eje del motor y del tornillo de posicionamiento para informar de la posición indirectamente, pero estos también pueden medir la respuesta de las maquinas rotativas directamente.

Los codificadores rotativos más populares son los codificadores ópticos incrementales de ángulo de rotación de eje y los codificadores ópticos absolutos de ángulo de rotación de eje. Los rangos de resolución van de 50 ciclos por revolución del eje a 20,000 cuentas por revolución.

Las partes básicas de un codificador óptico incremental de ángulo de rotación de eje son mostradas en la siguiente figura 3.11 Un disco de código montado sobre el eje codificador rota entre una fuente de luz interna, típicamente un diodo emisor de luz (LED), en un lado y una máscara y un sistema fotodetector sobre el lado opuesto. El disco de código incremental contiene una plantilla de segmentos opacos y transparentes igualmente espaciados, las señales electrónicas que son generadas por la plaqueta electrónica del codificador, son alimentadas en un controlador de movimiento que calcula la posición y velocidad para propósitos de retroalimentación. Una vista expandida de un codificador incremental de grado industrial es mostrada en la figura 3.12

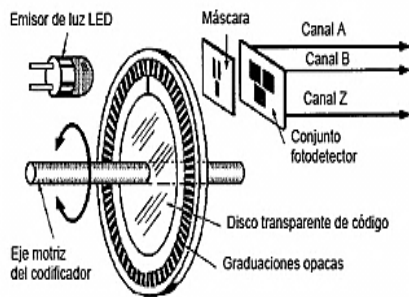


Figura 3.11 Elementos básicos de un codificador rotativo incremental

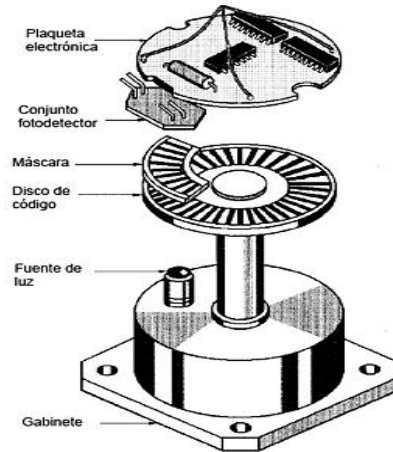


Figura 3.12 Vista expandida de un codificador óptico rotativo incremental.

El codificador de cuadratura es el tipo más común de codificador incremental. La luz del led que pasa a través del disco de código rotativo y la máscara es recortada antes de alcanzar el sistema fotodetector. Las señales de salida del conjunto son convertidas en pulsos cuadrados de dos canales (A y B), como se ve en la figura 3.13. El número de pulsos cuadrados en cada canal es igual al número de segmentos de disco de código que pasa por los fotodetectores a medida que el disco rota, pero las formas de onda están 90° fuera de fase. Si por ejemplo los pulsos en el canal A adelantaran a los del canal B, el disco está rotando en sentido contrario a las manecillas del reloj. Al monitorear tanto el número de pulsos como las fases relativas de las señales A y B, tanto la posición como la dirección pueden ser determinadas. Además los codificadores incluyen en su mayoría un tercer canal de salida Z para obtener una referencia cero p señal índice que ocurre una vez por revolución.

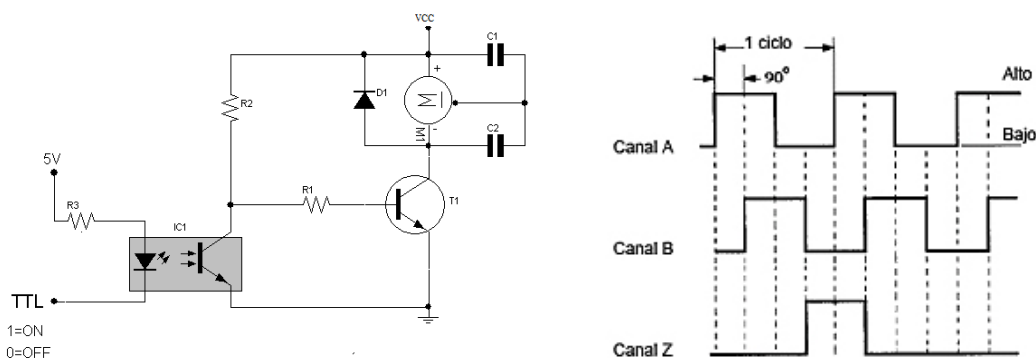


Figura 3.13 a) Principio de funcionamiento, b) Los canales A y B proveen la detección de posición bidireccional. Si el canal A se adelanta al B, la dirección es en sentido horario; si el canal B se adelanta al canal A, la dirección es sentido Antihorario. El canal Z proporciona una referencia cero para la determinación para las rotaciones del disco.

La parte del sistema de control de movimiento que fue utilizado figura 3.13, incluye amplificadores, motores, y codificadores. Estos elementos se describen a continuación. Un motor convierte la corriente en el par, que produce movimiento. Cada eje de movimiento requiere un motor de tamaño adecuado para mover la carga a la velocidad y aceleración requerida.

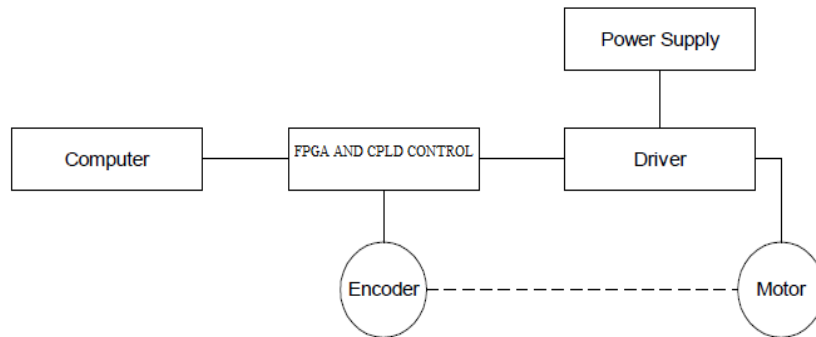


Figura 3.13 Sistema de control de movimiento utilizado.

3.6 Modelación del sistema

Los elementos de un servosistema incluyen el motor, el codificador y el controlador. Estos elementos se muestran en la Fig. 3.14. El modelo matemático de los distintos componentes se indican a continuación.

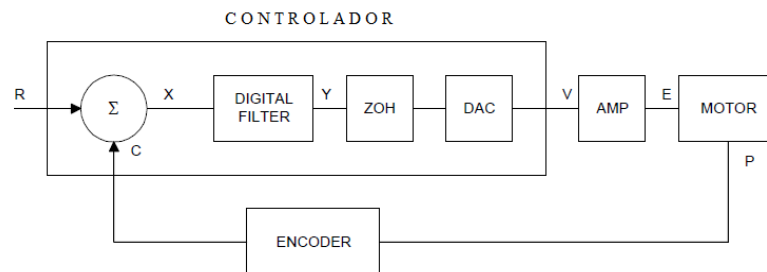


Figura 3.14 Elementos del servosistema incluidos en el proyecto

3.7 Control de Voltaje

El amplificador es una fuente de tensión con una ganancia de K_v [V / V], el modelo matemático figura 3.15, que relaciona la función de transferencia de posición P y entrada de voltaje de la siguiente manera que:

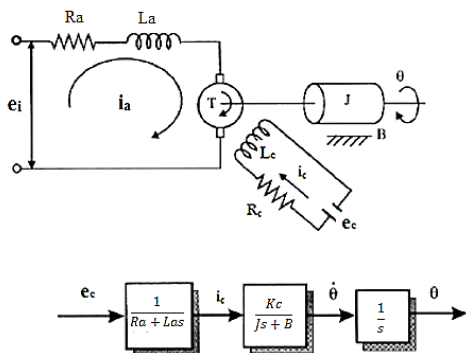


Figura 3.15 Modelado de posición de un motor DC.

$$\frac{P}{V} = \frac{K_v}{[K_T S(ST_m + 1)(ST_e + 1)]}$$

Dónde:

$$T_m = \frac{RJ}{K_t^2} \quad [s]$$

y

$$T_e = \frac{L}{R} \quad [s]$$

K_t Torque constante [Nm/A]

R Resistencia de Armadura Ω

J Carga e inercia del motor [kg.m²]

L Inductancia de armadura [H]

Se consideraron los siguientes parámetros de los motores

$$K_t = 14.16 \text{ oz} \cdot \text{in/A} = 0.1 \text{ Nm/A}$$

$$R = 2 \Omega$$

$$J = 0.0283 \text{ oz-in-s}^2 = 2.10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$L = 0.004H$$

$$T_m = 0.04 \text{ s}$$

Te = 0.002 s

Kv = 4 Ganancia del Amplificador

La función de transferencia obtenida es:

$$\frac{P}{V} = \frac{40}{[S(0.04S + 1)(0.002S + 1)]}$$

Mediante el software Matlab podemos obtener la función de transferencia y apoyar a la parte didáctica de nuestro proyecto como se muestra en el programa.

```
%-----  
%Software Matlab  
%ensayo de simulación de Motores  
% control por corriente  
% Sistemas realimentados  
%-----  
  
% Introducimos las ecuaciones para calcular la función de transferencia  
  
J=0.01;  
b=0.1;  
K=0.01;  
R=1;  
L=0.5;  
num=K;  
den=[(J*L) ((J*R)+(L*b)) ((b*R)+K^2)];  
sys=tf(num,den)  
  
% A traves de Laplace obtenemos la salida en función del tiempo  
  
syms s  
sys=ilaplace(s)  
  
% Obtenemos la señal de salida del sistema  
  
step(num,den,0:0.1:3)  
title('Señal de salida del sistema')
```

Encoder

El codificador genera pulsos de N por la revolución. Se emite dos señales, canales A y B, que están en cuadratura. Debido a la relación entre los canales de cuadratura del codificador, la resolución de la posición se incrementa a 4N cuentas cuadratura / rev.

El modelo del codificador puede ser representado por una ganancia de: $K_f = 4N/2\pi$ [cuenta / rad]

Para los motores usados tenemos 1000 líneas por revolución, el Encoder se modela como

$$K_f = \frac{4 \times 1000}{2 \times \pi} = 638$$

DAC

El DAC o convertidor analógico a digital es de 16-bit para un voltaje analógico. El intervalo de entrada de los números es 65536 y el rango de voltaje de salida es de +/-10V. Por lo tanto, la ganancia efectiva de la DAC es $K = 20/65536 = 0,0003$ [V / cuenta]

Filtro Digital

Como parte del sistema de control para servomotores se ha implementado un filtro digital con tres elementos en serie y que son PID, low-pass y un filtro de muesca. Los elementos usados para aplicar la función de transferencia son:

$$\text{PID} \quad D(z) = \frac{K(Z-A)}{Z} + \frac{CZ}{Z-1}$$

$$\text{Low-pass} \quad L(z) = \frac{1-B}{Z-B}$$

$$\text{Notch} \quad N(z) = \frac{(Z-z)(Z-\bar{z})}{(Z-p)(Z-\bar{p})}$$

Los parámetros de los filtros, K, A, C y B son seleccionados por las instrucciones de Kp, Kd, el KI y el PL, respectivamente.

La relación entre los coeficientes del filtro y las instrucciones son:

$$K = (KP + KD) \cdot 4$$

$$A = KD / (KP + KD)$$

$$C = KI / 2$$

$$B = PL$$

La función de transferencia $G(s)$ equivalente del PID y Low-pass (pasa bajas)

$$G(s) = (P + sD + I/s) \cdot a / (S+a)$$

Donde,

$$P = 4KP$$

$$D = 4T \cdot KD$$

$$I = KI / 2T$$

$$a = \frac{1}{T} \ln\left(\frac{1}{B}\right)$$

T es el valor del periodo de muestreo, B son los polos del sistema, se tomaron los siguientes valores para:

$$KP = 4$$

$$KD = 36$$

$$KI = 2$$

$$PL = 0.75$$

$$T = 0.001 \text{ s}$$

Los coeficientes del filtro digital son:

$$K = 160$$

$$A = 0.9$$

$$C = 1$$

$$a = 250 \text{ rad/s}$$

La función de Transferencia del Filtro Digital $G(s)$ es:

$$G(s) = [16 + 0.144s + 1000/s] \cdot 250 / (s+250)$$

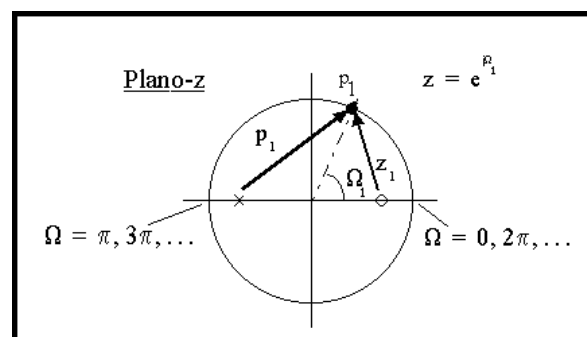


Figura 3.16 Plano Z, se muestran los polos complejos P_1, p_1

El filtro de muesca tiene dos ceros complejos, Z y Z_1 , y dos polos complejos, P y p, figura 3.16. El efecto del filtro de muesca es cancelar la resonancia afectar mediante la colocación de los ceros complejos en la parte superior del polos de resonancia. Los polos de muesca, P y P, son programables y se seleccionan para tener suficiente amortiguación. Lo mejor es seleccionar los

parámetros de primer nivel por los términos de frecuencia. Los polos y los ceros tienen una frecuencia en Hz.

3.8 Sistema de Control y adquisición de datos.

Se desarrolló un controlador electrónico con un alto poder de cómputo que cuenta con sistemas de comunicación interna y externa de muy alta velocidad. Se hizo uso de On-Chip, que incluye en un solo chip, el algoritmo de control y los módulos para la interfaz con la etapa de potencia, tales como generadores de modulación por ancho de pulso (PWM), interfaces de cuadratura para encoder (QIE), entradas y salidas de propósito general (GPIO) etc. (Bueno *et al*, 2009). Un FPGA que proporciona una solución entre un circuito integrado de aplicación específica (ASIC) y un procesador de propósito general (Gu *et al.*, 2010). Por el contrario, DSP y computadoras personales (PC) tienen arquitecturas pipelined. El tiempo de cálculo de un controlador basado en FPGA puede ser relativamente corto sin tomar en cuenta la complejidad del algoritmo de control debido a su arquitectura de procesamiento paralelo (Cho *et al*, 2009). Además el controlador es más barato, robusto y compacto; por otro lado, las fallas en el proceso de ensamblaje se reducen considerablemente. Este sistema de control para servomotores fue comparado con el de la marca Galil DMC 18X6. La arquitectura híbrida del sistema es mostrada en la siguiente figura 3.17.

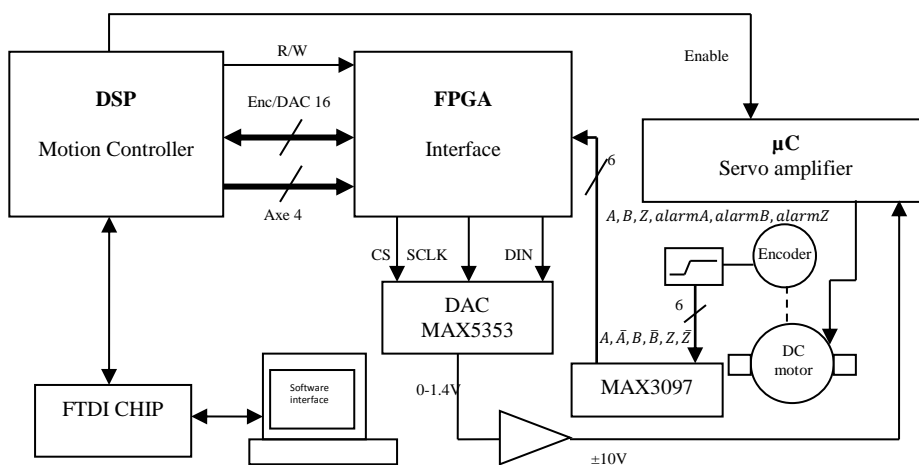
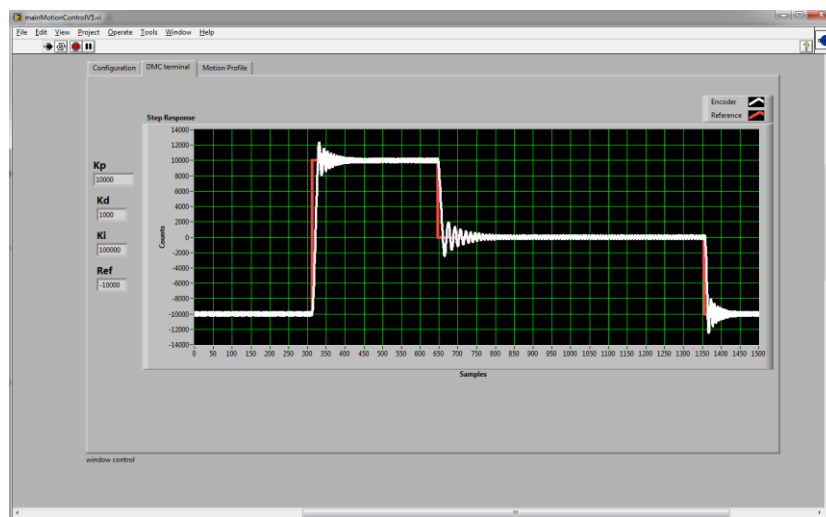


Figura 3.17 Esquema General del sistema de control basado en una arquitectura híbrida

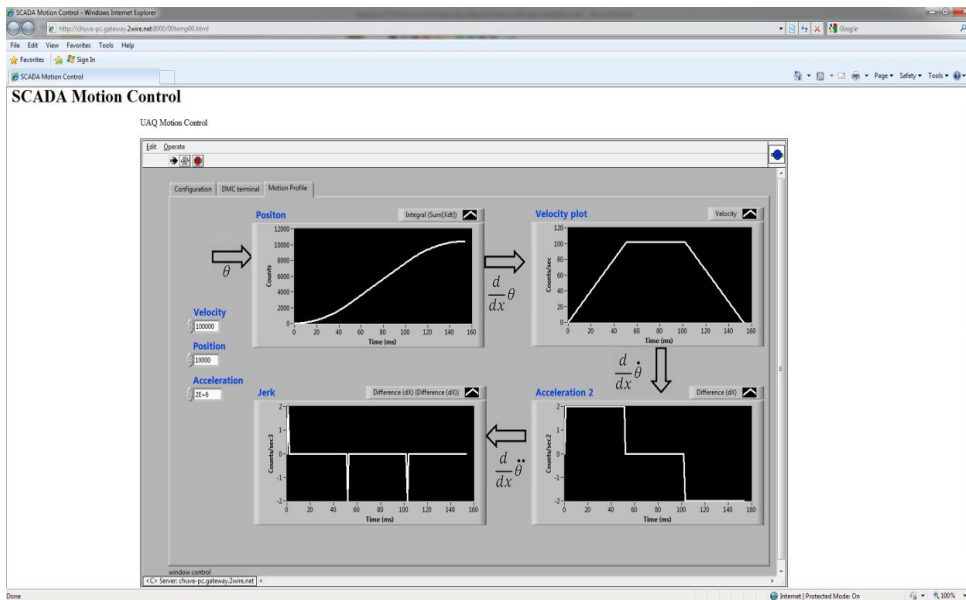
La parte de control y adquisición de datos de los servomotores se basa en un controlador de movimiento DSP, FPGA y DAC MAX 5353, El usuario mediante un software da instrucciones a un FPGA para controlar todo el procesamiento de datos y retroalimentación de movimiento de cada motor, dentro de este proceso resuelve la cinemática directa e inversa y mediante convertidores DAC, este a su vez da instrucciones al DSP para que se encargue solamente de estar enviando señales al servo amplificador para que sea efectuada la información.

3.8.1 Obtención de datos del hardware

Se muestra la estación de trabajo que se construyó y que servirá como una herramienta didáctica para el aprendizaje. El funcionamiento del controlador se mejora mediante la sintonización. Esto puede cambiar la respuesta en estado estacionario y transitorio. Se probó la tarjeta con los motores en movimiento donde se pueden apreciar los valores de tiempo de respuesta, amortiguación, etc., que se representa en la figura 3.18. La figura 3.19 muestra el perfil de movimiento generado y su velocidad respectiva, aceleración y posición.



La figura. 3.18 Panel frontal en LabVIEW, 9000-cuentas de respuesta y la reacción mejorada ajustando $K_p = 100000$, $K_d = 900000$ y $K_i = 1000$



La figura. 3.19 SCADA la velocidad trapezoidal, generación de trayectoria para la velocidad, la aceleración, la posición.

En la parte de orientación del robot propuesto para tres grados de libertad se realiza el sistema de adquisición de datos y que está basado en la tarjeta NI 6008. Las características técnicas de esta tarjeta se presentan en el anexo 4. Esta tarjeta cuenta con dos convertidores digital/analógico, cada uno de los cuales puede entregar un voltaje de 0 a +5 volts. Esto significa que antes de aplicar este voltaje al correspondiente amplificador de potencia es necesario dar un tratamiento a esta señal de manera que el rango de 0 a +5 volts sea transformado en el rango de -6 a +6 volts. Este último rango representa los voltajes que pueden ser aplicados a los motores de CD usados como actuadores, los cuales deben ser positivos y negativos con el fin de poder invertir su sentido de giro cuando sea necesario. Para conseguir dicho cambio de rango de voltajes se debe hacer la siguiente operación:

$$V_o = \frac{12}{5}V_{IN} - 6$$

Donde V_{IN} es un voltaje numéricamente igual al voltaje entregado por el convertidor digital/analógico (0 a +5 volts) y V_o es el voltaje que se aplica directamente al motor de CD (-6 a +6 volts). Esta operación es realizada utilizando el amplificador operacional LM12CL, el cual puede entregar hasta 2 amperes de corriente de salida. Nótese que la operación requerida es conseguida conectando el LM12CL en el modo de sumador inversor. Es importante mencionar

que la señal proveniente del convertidor digital/análogo es reforzada previamente usando un amplificador operacional TL081 conectado en la configuración de seguidor de voltaje (ganancia unitaria). La salida de dicho seguidor de voltaje es lo que se utiliza como la señal V_{IN} . En la figura 3.20 se muestra el diagrama eléctrico correspondiente a esta parte. Finalmente, en el anexo 3 se lista el programa en lenguaje C++ utilizado para controlar el robot.

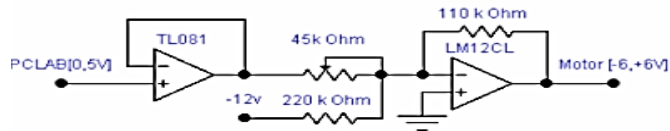


Figura 3.20 Circuito eléctrico del amplificador de potencia.

Capítulo 4

4.1 Cinemática

Se puede hablar dentro del análisis de la cinemática de los robots manipuladores que existen, hay dos formas de determinar su posición y orientación, la cual depende de qué tipo de variable se esté manejando; estas dos formas son conocidas como la cinemática directa y la cinemática inversa. Se puede apreciar su relación en la Figura 4.1 [13].



Figura 4.1 Relación entre las cinemáticas directa e inversa.

Para el análisis de la cinemática, se tomó en cuenta los primeros 5 grados de libertad para hacer más explícita la investigación, los símbolos usados son:

l_1 Longitud del primer eslabón.

l_2 Longitud del primer eslabón.

l_3 Longitud de la garra.

Θ_1 Angulo de la cintura.

Θ_2 Angulo del hombro.

Θ_3 Angulo del codo.

Θ_4 Angulo de elevación.

Θ_5 Angulo de giro.

4.1.1 Cinemática directa

La cinemática directa es aquella en la que para obtener la posición y orientación del efector final es necesario establecer un marco de referencia fijo (X_0 , Y_0 , Z_0) para el cual todos los objetos incluyendo al manipulador son referenciados situándolo dentro, fuera o en la base del robot [13].

Para el Robot propuesto el marco de referencia, está situado en su base como lo muestra la Figura 4.2 (a), sin embargo para el análisis se considera el punto de origen al inicio del primer eslabón, puesto que la distancia del punto de origen que tiene el robot y el propuesto, es una distancia fija que no afecta el análisis. Los ejes para el marco de referencias se muestran en la Figura 4.2 (b).

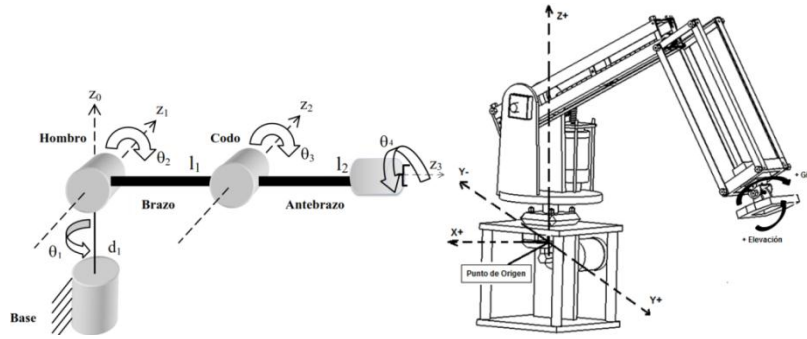


Figura 4.2. (a) Marco de referencias para el análisis, b) Marco de referencia del robot.

Para el Robot propuesto se optó por emplear la convención referenciada en Denavit-Hartenberg(D-H); en las que se usan las coordenadas y las transformaciones homogéneas para simplificar las transformaciones entre el marco de referencia y las uniones. [13][14] [15] [16] [17].

La Tabla 4.1 que continuación se muestra es la convención aplicada al robot propuesto (D-H).

Cadena	θ_i	d_i	a_{i-1}	α_{i-1}
1	θ_1	d_1	0	0
2	θ_2	d_2	0	-90
3	θ_3	0	l_1	0
4	θ_4	0	l_2	0
5	θ_5	0	l_3	90

Tabla 4.1 parámetros D-H del robot.

De acuerdo a la Tabla I, las matrices homogéneas ${}^{i-1}A_i$ para el robot quedaría como:

$$A_i = \text{Rot}_{z,\theta_i} \text{Trans}_{x,a_i} \text{Trans}_{x,a_i} \text{Rot}_{x,\alpha_i}$$

$${}^0_1A = \begin{bmatrix} c\theta_1 & -s\theta_1 & 0 & 0 \\ s\theta_1 & c\theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

$${}^1_2A = \begin{bmatrix} c\theta_2 & -s\theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -s\theta_2 & -c\theta_2 & 0 & d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

$${}^2_3A = \begin{bmatrix} c\theta_3 & -s\theta_2 & 0 & l_1 \\ s\theta_3 & c\theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

$${}^3_4A = \begin{bmatrix} c\theta_4 & -s\theta_4 & 0 & l_2 \\ s\theta_4 & c\theta_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

$${}^4_5A = \begin{bmatrix} c\theta_5 & -s\theta_5 & 0 & l_2 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ s\theta_5 & c\theta_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

Donde por simplicidad se utiliza:

c= coseno; s= seno.

Por lo tanto la matriz de transformación homogénea T queda dada por:

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

$$T = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & P_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & P_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

$$r_{11} = c_1 c_{234} c_5 - s_1 s_5 \quad (4.7)$$

$$r_{21} = s_1 c_{234} c_5 - c_1 s_5 \quad (4.8)$$

$$r_{31} = -s_{234} c_5 \quad (4.9)$$

$$r_{12} = -c_1 c_{234} s_5 - s_1 c_5 \quad (4.10)$$

$$r_{22} = -s_1 c_{234} s_5 + c_1 c_5 \quad (4.11)$$

$$r_{32} = s_{234} s_5 \quad (4.12)$$

$$r_{13} = c_1 s_{234} \quad (4.13)$$

$$r_{23} = s_1 s_{234} \quad (4.14)$$

$$r_{33} = c_{234} \quad (4.15)$$

Por lo que las coordenadas de la posición del efector final en el punto TCP (Punto Central de la Herramienta) de la Figura 4.3 y tomando como punto de origen el inicio del primer eslabón también mostrado en la misma figura, se tiene:

$$P_x = \left((c_1 c_2 c_3 - c_2 s_2 s_3) c_4 + (-c_1 c_2 s_3 - c_1 s_2 c_3) s_4 \right) l_3 + (c_1 c_2 c_3 - c_1 s_2 s_3) l_2 + c_1 c_2 l_1 \quad (4.16)$$

$$P_y = \left((s_1 c_2 c_3 - s_1 s_2 s_3) c_4 + (-s_1 c_2 s_3 - s_1 s_2 c_3) s_4 \right) l_3 + (s_1 c_2 c_3 - s_1 s_2 s_3) l_2 + s_1 c_2 l_1 \quad (4.17)$$

$$P_z = \left((-s_2 c_3 - c_2 s_3) c_4 + (s_2 s_3 - c_2 c_3) s_4 \right) l_3 + (-s_2 c_3 - c_2 s_3) l_2 + d_1 + d_2 \quad (4.18)$$

Para determinar la orientación del efector final se empleó la matriz de rotación que se encuentra dentro de la ecuación (4.6)

$${}^0_5R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

Donde la ecuación (4.19) representa los vectores de orientación dados por **n**, **s** y **a**:

$${}^0_5R = \begin{bmatrix} n_x & s_x & a_x \\ n_y & s_y & a_y \\ n_z & s_z & a_z \end{bmatrix} \quad (4.20)$$

Los tres vectores **n**, **s**, **a** y TCP son definidos como se ilustra en la Figura 4.3 El vector de aproximación del efector final es “**a**”; el vector de orientación “**s**” es la dirección que especifica la orientación de la mano entre los dedos; el vector normal “**n**” es seleccionado para completar la definición del sistema coordinado usando la regla de la mano derecha. [9][15].

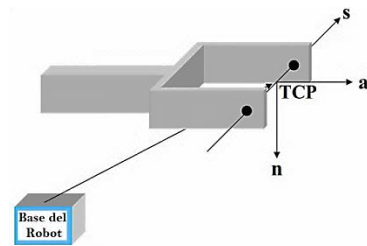


Figura 4.3. Robot y efector final, mostrando la definición de **n**, **s**, **a** y TCP.

4.2 Cinemática inversa

Con la cinemática inversa se tiene el caso contrario a la cinemática directa, es decir, ahora con las coordenadas x , y y z , se desea determinar los ángulos Θ_1 , Θ_2 , Θ_3 para cada articulación sin considerar la parte de orientación (Θ_4 , Θ_5). La Figura 4.4, muestra un modelo tipo de alambre para simplificar el análisis. Para la solución de la cinemática inversa se optó por el método geométrico que emplea relaciones geométricas y trigonométricas (resolución de triángulos) este método se

puede consultar en [13], [15] entre otros. Por la estructura que conforma al robot propuesto es posible tener dos soluciones para el mismo punto, por lo que se hizo el análisis de las configuraciones codo abajo y codo arriba el cual se desarrolla a continuación.

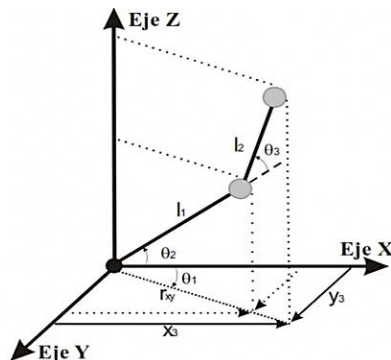


Figura 4.4. DCL de la cinemática inversa.

En la Figura. 4.5, se muestra la solución de la cinemática inversa con el método geométrico para la configuración codo abajo y a continuación su desarrollo matemático:

Cálculo de θ_1 para el giro en la cintura

$$\theta_1 = \tan^{-1} \left(\frac{y_3}{x_3} \right) \quad (4.21)$$

Cálculo de θ_2 para el giro del hombro

$$r_{xy} = \frac{x_3}{\cos \theta_1} \quad (4.22)$$

$$r_{xyz} = \sqrt{r_{xy}^2 + z_3^2} \quad (4.23)$$

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{z_3}{r_{xy}} \right) \quad (4.24)$$

Por la ley de cosenos

$$\alpha = \cos^{-1} \left[\frac{(l_1^2 + r_{xyz}^2 - l_2^2)}{2l_1 r_{xyz}} \right] \quad (4.25)$$

$$\theta_2 = \beta - \alpha \quad (4.26)$$

Cálculo de θ_3 para el giro en el codo

$$l_{1y} = l_1 \sin \theta_2 \quad (4.27)$$

$$z_2 = l_{1y} \quad (4.28)$$

$$l_{1x} = l_1 \cos \theta_2 \quad (4.29)$$

$$xy_2 = l_{1x} \quad (4.30)$$

$$l_{2xy} = r_{xy} - l_{1x} \quad (4.31)$$

$$l_{2z} = z_3 - z_2 \quad (4.32)$$

$$\tan \omega = \left(\frac{l_{2xy}}{l_{2z}} \right) \quad (4.33)$$

$$\omega = \tan^{-1} \left(\frac{l_{2xy}}{l_{2z}} \right) \quad (4.34)$$

$$\theta_3 = \omega - \theta_2 \quad (4.35)$$

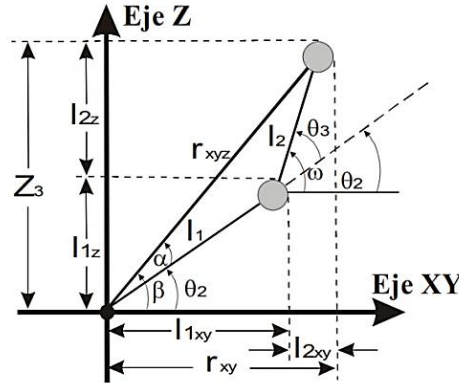


Figura 4.5. Proyección en un plano para la configuración codo abajo.

En la Figura 4.6 se muestra la solución de la cinemática inversa con el método geométrico para la configuración codo arriba y a continuación su desarrollo matemático:

Cálculo de Θ_1 para el giro en la cintura

Como este ángulo es el mismo para la configuración codo abajo y codo arriba, se toma la ecuación (4.21) para su determinación.

Cálculo de Θ_2 para el giro en el hombro

$$\theta_2 = \beta + \omega \quad (4.36)$$

Para el cálculo de β y α se retoma de la ecuación (4.22) a la (4.24) para su determinación.

Cálculo de Θ_3 para el giro en el codo

$$\theta_3 = \theta_2 - \omega \quad (4.37)$$

Para el cálculo de ω se retoma de la ecuación (4.27) a la (4.35) para su determinación.

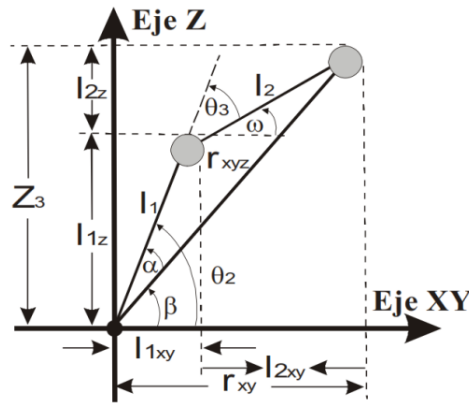


Figura 4.6 Proyección en un plano para la configuración codo arriba.

4.3 Resultados Experimentales

Simulación

Se presentan las simulaciones para cada modelo obtenido del brazo robot. Estos modelos están en función de las coordenadas generalizadas de las uniones, así como también las dimensiones geométricas del eslabón, La simulación o el control fuera de línea de un robot, utiliza la computadora para calcular las condiciones necesarias para ejecutar el diseño de trayectoria para el efector final. La simulación de modelos matemáticos, proporciona una buena idea a los usuarios acerca de la operación y el desempeño del robot. [18][20]. La creación de ambientes interactivos proporciona a los estudiantes y docentes, herramientas de análisis y desarrollo cuando no se cuenta con la estructura física. Si se cuenta con los prototipos físicos, el laboratorio virtual sirve como primer paso para la realización de pruebas y para la construcción de laboratorios remotos. Para los modelos cinemáticos, la simulación fue realizada en el editor de Matlab y Simulink, el cual cuenta con una opción gráfica en 3D que permite rotar la figura obtenida, en este caso un modelo de alambre, desde cualquier ángulo que se desee, como se puede apreciar en las Figura 4.8 y 4.9. Se optó por esta herramienta computacional por que se busca tener una representación gráfica de los modelos, para visualizar las posibles formas geométricas que permitan adquirir la estructura del robot para alcanzar una posición y orientación deseada. Para llevar a cabo las simulaciones de los modelos obtenidos fue necesaria la utilización de una herramienta que permitiera su fácil manejo. Dado que el objetivo de este trabajo es simular para un aprendizaje cognitivo, se optó por emplear

un software que cubre las características pertinentes para estas necesidades, siendo Matlab el que presentó mayores ventajas para trabajar con él (como la disponibilidad, el conocimiento, lo amigable que es, su modo gráfico 2 y 3D mediante el esquema de la Figura 4.7. Las ecuaciones cinemáticas de movimientos se introdujeron en el editor para realizar la simulación de la cinemática directa teniendo como resultados la Figura 4.8 y 4.9. Estas figuras sólo son un ejemplo de una posición definida arbitrariamente.

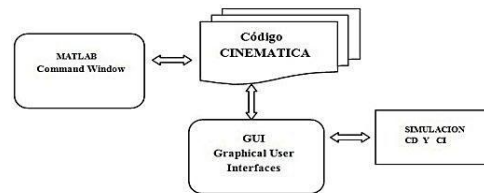


Figura 4.7 Esquema general para la simulación en Matlab GUI

Descripción del programa y simulación propuesta

En esta propuesta de solución se presenta el programa de simulación, el cual es un sistema básico de diseño y simulación gráfica sencilla por computadora mediante el esquema de la Figura 4.7. Una vez hecho el programa se hace una interfaz gráfica en Matlab GUI (graphical user interface) donde se puede observar el resultado de la ubicación del efector final simplemente haciendo mención de la CD o dando los ángulos para encontrar una posición CI. Los dos eslabones o estructuras rígidas que representan al robot con trazo rojo y azul. Se requiere la realización del programa en Matlab con los algoritmos antes vistos en este trabajo y a los alumnos se les capacita para tener conocimientos específicos previos de informática y el fácil manejo del programa para que interactúen con él, además mantener al alumno permanentemente informado sobre el accionar del programa. Los gráficos que se pueden obtener en esta simulación pueden observarse en tres dimensiones y referirse a cualquier punto en específico. El mostrar esta simulación en pantalla. Ayuda gráficamente a la ubicación física del brazo robot en su área de trabajo, así como también la tabla de valores que lo parametriza, es decir, estructuración de la pantalla, redacción de los textos, presencia de efectos motivadores e informativos del avance del alumno. En la simulación propuesta es que se pueda interactuar con el alumno y la información que se despliegue en pantalla y el manejo de conocimientos explicados con anterioridad fortalecerá su aprendizaje cognitivo. El justificar la computadora desde el punto de vista pedagógico. Está en función del programa que aporta en forma innovadora al proceso de aprendizaje, satisface las necesidades e intereses del profesor y de los alumnos y se adapta a diferentes situaciones de aprendizaje [22]. A

continuación se muestra la Tabla 4.2, donde aparece un cuadro de diálogo que aparece en pantalla en el momento de ejecutar el programa y se muestran resultados de la simulación de CD y CI ayudando al alumno a una mejor comprensión de este tema, mediante desplegado y gráfico acercados a la realidad.

```

SIMULACIÓN DE LA CINEMÁTICA DIRECTA DEL ROBOT
-----

¿Cual es el valor del ángulo de la cintura en grados?: 45
¿Cual es el valor del ángulo del hombro en grados?: 60
¿Cual es el valor del ángulo del codo en grados?: 30
¿Cual es el valor del ángulo de elevación (pitch) en grados?: 45
Valor del ángulo de giro (roll) en grados: 0

Longitud del primer eslabón en cm: 22
Longitud del segundo eslabón en cm: 30
Longitud de la garra (grripper) en cm: 5

Los valores de las coordenadas finales del segundo eslabón son:

X = 7.77817
Y = 7.77817
Z = 49.05256
    
```

TABLA 4.2 Cuadro de dialogo de la cinemática directa en la Windows de Matlab

Se puede notar, que el usuario incluso tiene la libertad de cambiar algunos parámetros del robot y que el programa calcula y determina si es posible realizar la simulación de acuerdo a los valores propuestos por el usuario, en caso de que el programa encuentre algún error, es decir, que los ángulos propuestos por el usuario sobrepasaran los límites físicos del robot, el programa preguntará cuántas veces sea necesario el valor hasta encontrar uno válido. El resultado de la ubicación del efector final aparece de inmediato una vez que se terminó de introducir el último dato requerido por el programa, dicho resultado está expresado en centímetros en un espacio cartesiano. Otra opción de visualizar el resultado de la simulación es a través de la gráfica que aparece en forma simultánea con los resultados, la gráfica tiene la opción de cambiar la perspectiva, razón por la que el usuario tiene un espacio disponible en tercera dimensión (3D) que si lo desea puede “voltear” y/o girar en cualquier dirección al robot. La visualización gráfica de los resultados se puede apreciar en las figuras 4.8 y 4.9 que se muestran a continuación.

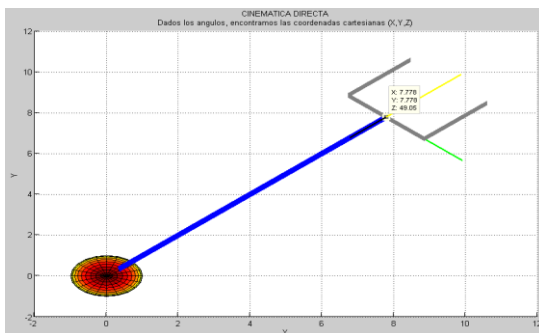


Figura 4.8. Visualización Grafica con puntos Px, Py en 2D.

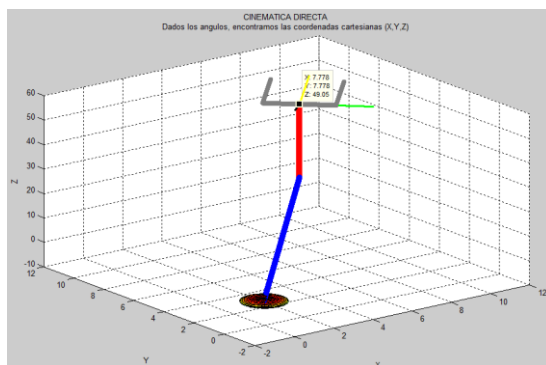


Figura 4.9. Visualización Grafica con puntos Px, Py, Pz en 3D.

La cinemática inversa obtiene como resultado los ángulos necesarios para llegar a una posición deseada en donde se encuentra el efector final, por lo que es necesario introducir como valores iniciales las coordenadas cartesianas (xyz).

A continuación se muestra la Tabla 4.3 que aparece en pantalla en el momento de ejecutar el programa, en el que se puede notar, que el usuario incluso tiene la libertad de cambiar algunos parámetros del robot y que el programa calcula y determina si es posible realizar la simulación de acuerdo a los valores propuestos por usuario, en caso de que el programa encuentre algún error, es decir, que la posición que se desea alcanzar está fuera del alcance del robot de acuerdo a las longitudes de eslabones introducidas, el programa preguntará cuantas veces sea necesario el valor hasta encontrar uno válido.

```

SIMULACIÓN DE LA CINEMÁTICA INVERSA DEL ROBOT
-----
Longitud del primer eslabón en cm:    22
Longitud del segundo eslabón en cm:  30
Longitud de la garra (gripper) en cm:  5

Valor de la coordenada en X: 7.77817
Valor de la coordenada en Y: 7.77817
Valor de la coordenada en Z: 49.05256
Valor del ángulo de elevación (pitch) en grados: 45
Valor del ángulo de giro (roll) en grados: 0

La simulación la desea con configuración Codo Arriba (1) o Codo Abajo

    Cuando los ángulos calculados se encuentran en el segundo
    cuadrante, el ángulo mostrado es el complementario

Los valores de los ángulos en codo abajo son:
Cintura =    45.00
Hombro  =    60.00
Codo    =   -150.00

Recuerde que los límites físicos (en grados) en el robot son:
Cintura de  0 a 310
Hombro de -35 a 130
Codo   de -130 a 130>>

```

TABLA 4.3 Cuadro de Dialogo de la cinemática inversa.

El resultado de los ángulos requeridos para cada articulación aparecen de inmediato una vez que se terminó de introducir el último dato requerido por el programa, dicho resultado está expresado en grados en coordenadas angulares. Por otra parte la aplicación de la cinemática inversa puede

ser simulada con codo arriba y codo abajo para verificar que esté llegando exactamente al mismo punto como se muestra en la Tabla 4.4 y 4.5 con la Figura 4.10 y 4.11 respectivamente, mediante la ventana principal de Windows de Matlab.

```

SIMULACIÓN DE LA CINEMÁTICA INVERSA DEL ROBOT
-----

Longitud del primer eslabón en cm:    22
Longitud del segundo eslabón en cm:  30
Longitud de la garra (grripper) en cm: 5

Valor de la coordenada en X: 7.77817
Valor de la coordenada en Y: 7.77817
Valor de la coordenada en Z: 49.05256
Valor del ángulo de elevación (pitch) en grados: 45
Valor del ángulo de giro (roll) en grados: 0

La simulación la desea con configuración Codo Arriba (1) o Codo Abajo (0): 1

    Cuando los ángulos calculados se encuentran en el segundo
    cuadrante, el ángulo mostrado es el complementario

Los valores de los ángulos en codo arriba son:
Cintura =    45.00
Hombro  =    94.72
Codo    =    30.00

Recuerde que los límites físicos (en grados) en el robot son:
Cintura de  0 a 310
Hombro de -35 a 130
Codo   de -130 a 130>> |
    
```

TABLA 4.4 Cuadro de Dialogo de la cinemática inversa, codo arriba

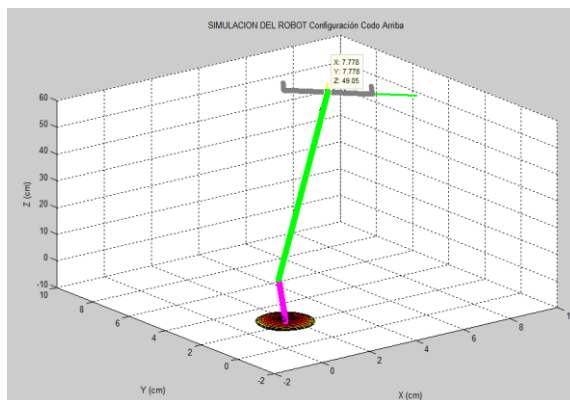


Figura 4.10 Codo arriba (Vista Isométrica)

```

SIMULACIÓN DE LA CINEMÁTICA INVERSA DEL ROBOT
-----

Longitud del primer eslabón en cm:    22
Longitud del segundo eslabón en cm:  30
Longitud de la garra (grripper) en cm: 5

Valor de la coordenada en X: 7.77817
Valor de la coordenada en Y: 7.77817
Valor de la coordenada en Z: 49.05256
Valor del ángulo de elevación (pitch) en grados: 45
Valor del ángulo de giro (roll) en grados: 0

La simulación la desea con configuración Codo Arriba (1) o Codo Abajo (0): 0

    Cuando los ángulos calculados se encuentran en el segundo
    cuadrante, el ángulo mostrado es el complementario

Los valores de los ángulos en codo abajo son:
Cintura =    45.00
Hombro  =    60.00
Codo    =   -150.00

Recuerde que los límites físicos (en grados) en el robot son:
Cintura de  0 a 310
Hombro de -35 a 130
Codo   de -130 a 130>> |
    
```

TABLA 4.5 Cuadro de Dialogo de la cinemática inversa, codo abajo.

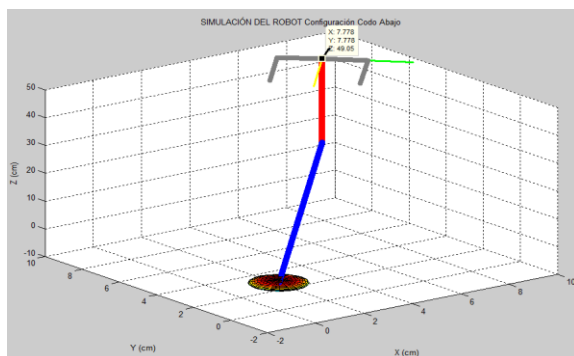


Figura 4.11 Codo abajo (Vista Isométrica), se observa que llega al mismo punto de codo arriba.

Una forma generalizada de la simulación hecha, es mediante la interfaz gráfica y que es para alumnos que tienen poco conocimiento de Matlab, solo es necesario que pongan las dimensiones del robot en estudio y algunos ángulos de cintura hombro codo, pitch y Roll para encontrar la CD y poder analizar gráficamente al robot como se muestra en la Figura 4.12.

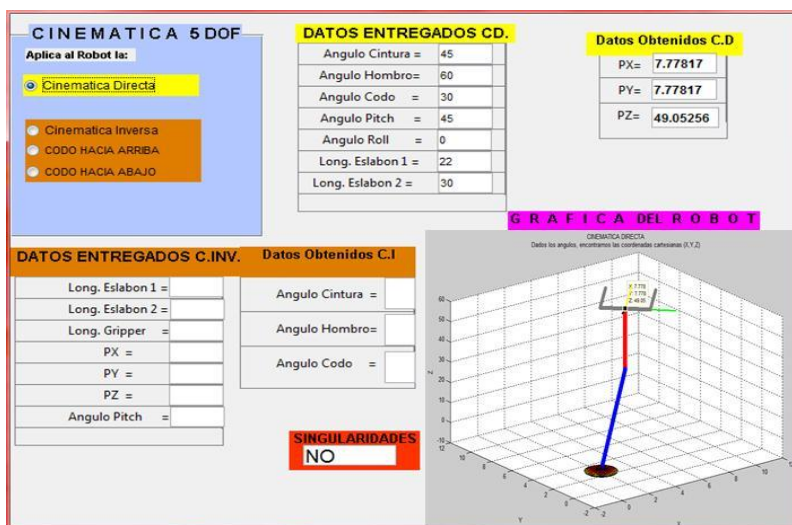


Figura 4.12. Presentación de la pantalla del programa de simulación en Matlab-GUI, para CD y CI con ángulos positivos (codo abajo) y ángulos negativos (codo arriba).

Para comprobar y dar por hecho el correcto desarrollo de los modelos cinemáticos el alumno podrá hacer la comparación entre el modelo directo y el modelo inverso. Esta comparación se refiere a que las salidas resultantes del modelo cinemático directo que fueron introducidas en las entradas del modelo cinemático inverso y viceversa, con ello se puede apreciar una total congruencia en los resultados, esto será suficiente para validar su análisis por software, hay que mencionar que el desarrollo que se analizó, son métodos completamente diferentes de CD y CI pero con resultados exactos, tal y como se pudo ver en la simulación. Esta misma aplicación se

considera como un proyecto de apoyo en la implementación de la metodología de aprendizaje basado en proyectos (ABP) en una asignatura de robótica durante el curso académico [19]. Por otra parte el aprendizaje pedagógico es más claro con una herramienta como esta y que se ha implementado en la materia de Robótica de la Universidad Autónoma de Querétaro y la Universidad del Valle de México campus Querétaro. Este análisis de la cinemática directa e inversa el alumno lo comprueba validando sus resultados obtenidos en simulación con la puesta en marcha del robot prototipo en forma real como se hizo en los laboratorios de estas universidades.

4.4 Dinámica

Un robot manipulador es básicamente un dispositivo posicionador. Para controlar la posición se deben conocer las propiedades dinámicas del manipulador en orden para conocer las fuerzas ejercidas sobre él, que son las causantes de su movimiento.

Tal como la cinemática, en la dinámica también existen las dinámicas directa e inversa y su relación se puede apreciar en la figura 4.13

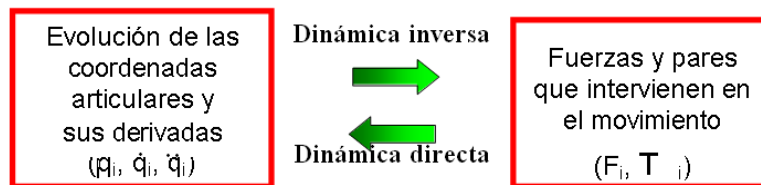


Figura 4.13 Relación entre las dinámicas directa e inversa.

4.4.1 Consideraciones dinámicas

El modelado dinámico inverso se realizó bajo los siguientes criterios:

Para el desarrollo del modelo se omitieron los dos últimos grados de libertad, ya que pertenecen a la orientación del efector final y sus efectos no son significativos para el comportamiento dinámico del robot. En general se consideró al manipulador como un sistema rígido, concentrando las masas en el centro de cada eslabón tal y como lo muestra la figura 2.14; fueron considerados los efectos de fricción provocados por las transmisiones mecánicas que en este caso se da por engranajes (esta consideración es importante ya que

estos efectos pueden alcanzar un orden de un 25% del par requerido para mover al manipulador en situaciones típicas [Craig 89]). Esto hace que el sistema sea no conservativo, sin embargo, el sistema puede ser resuelto por medio de la formulación de Lagrange y finalmente aplicando la función de disipación de Rayleigh, se permite adicionar los efectos de fricción al modelo dinámico. En el análisis de cada eslabón, los efectos de las Energías Cinética y Potencial de los eslabones anteriores (si existen) repercuten en el análisis del eslabón en cuestión. Las pérdidas debidas a las holguras y excentricidades en los engranajes, así como la eficiencia del motor fueron despreciadas dentro del análisis de la ecuación de movimiento de Lagrange.

4.5 Dinámica inversa

Resolver las ecuaciones dinámicas de movimiento para el robot no es una tarea simple debido a los grandes números de grados de libertad y sistemas no lineales que lo componen; para poder definir dichas ecuaciones se empleó la formulación de movimiento de Lagrange. Como lo representa la figura 4.13, el modelo dinámico inverso expresa las fuerzas y pares que intervienen, en función de la evolución temporal de las coordenadas articulares y sus derivadas.

Como se comentó anteriormente, el método para la solución de la dinámica inversa fue la formulación de movimiento de Lagrange; este método se eligió entre otros tantos por que representaba menos complejidad al aplicarlo al robot propuesto, debido a sus grados de libertad. La figura 4.14 muestra las condiciones dinámicas del manipulador y donde cada variable está definida de la siguiente manera:

- W= Carga aplicada
- m_i = Masa del i-ésimo eslabón
- g = Constante de gravedad
- l = Radio de giro para la masa de la base
- a = Longitud del primer eslabón
- b = Longitud del segundo eslabón
- I_i = Inercia i-ésima del eslabón
- V_i = Velocidad lineal del i-ésimo eslabón

$K_i =$ Energía cinética del i -ésimo eslabón

$P_i =$ Energía potencial del i -ésimo eslabón

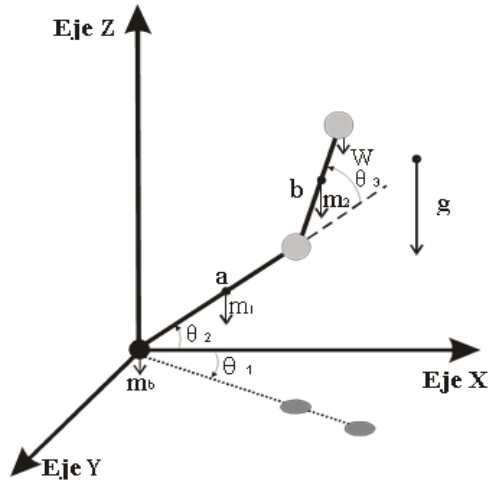


Figura. 4.14 DCL de la dinámica inversa.

4.6 Experimentación realizada

Como ya se vio el robot manipulador articulado de cinco GDL, siendo los tres primeros los que proporcionan la posición del efector final y los dos restantes son los que determinan su orientación; para la validación del modelo dinámico sólo se emplearon los GDL que determinan la posición, siendo éstos los de mayor influencia en efectos dinámicos sobre el par requerido para mover la estructura del robot.

Las figuras que contienen gráficas obtenidas de los experimentos, en todos los casos, se tuvo un muestreo de 20 segundos con el osciloscopio, sin embargo, en ocasiones se “recortaron” las gráficas por los tiempos muertos existentes para una mejor visualización de los resultados. En todos los casos; el motor₁ corresponde a la articulación de cintura, registrado por el osciloscopio en el canal uno; el motor₂ corresponde a la articulación de hombro, registrado

por el osciloscopio en el canal dos y finalmente el motor₃ corresponde a la articulación de codo, registrado por el osciloscopio en el canal tres.

Los puntos *a* y *b* determinan medio ciclo, por lo que del punto *a* al punto *c* sería un ciclo completo.

Las pruebas realizadas en simulación, en todos los casos se incluyó la fricción viscosa vista en el capítulo 2 (debido a la fricción existente entre los engranes); los coeficientes de fricción utilizados se obtuvieron de tablas de materiales. Como los engranes que intervienen en los movimientos de los motores uno, dos y tres son de acero, su coeficiente de fricción oscila de 0.054 a 0.19 por lo que los valores de los coeficientes de fricción que se tomaron están en este rango.

Prueba 1 (cintura)

El objetivo de esta prueba es el obtener una señal de corriente que se pueda convertir a par visualizando su evolución en la articulación de cintura haciendo que el robot se comporte como un péndulo horizontal para poder validar el modelo dinámico inverso.

Condiciones iniciales

En esta prueba, la única articulación que tiene movimiento es la de cintura, la articulación de hombro permanece a 0° respecto a la horizontal al igual que la de codo. La figura 4.15 muestra el movimiento del desplazamiento en la prueba y la tabla 4.6 contiene los datos de las posiciones inicial, final y el desplazamiento total en la prueba.

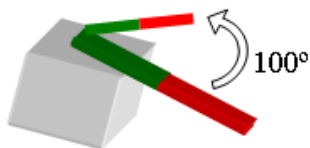


Figura 4.15 Movimiento de cintura.

Posición inicial:	0°
Posición final:	100°
Desplazamiento total:	100°

Tabla 4-6 Condiciones de movimiento.

Resultados del experimento

La tabla 4.7 contiene datos generales de la prueba, en la cual se observa el comportamiento de la corriente demandada en cada motor a lo largo de la prueba, registrada a través de los canales del osciloscopio (figura 4.15) para cada motor respectivamente así como nombre del programa.

Prueba 1	
Motor ₁	CH 1
Motor ₂	CH 2
Motor ₃	CH 3
Programa	EJE1B
Archivo	TEK00000.PCX
Velocidad	70%
Desplazamiento	≈100°
Movimiento	CIRCULAR

Pantalla del osciloscopio en la prueba 1.

Tabla 4-7 Datos de prueba 1

Registro de tiempos en la prueba

Nombre del programa	Tiempo completo	Núm. de prueba	Tiempo de ida	Tiempo de regreso	Tiempo de un ciclo	Velocidad porcentual
EJE1B	21''50	1	3''50	3''50	07''00	70 %

Tabla 4-8 Tiempos registrados en prueba 1.

Nota: Los tiempos son estimados y están dados en segundos y centésimas de segundo.

Graficación de los datos de la corriente

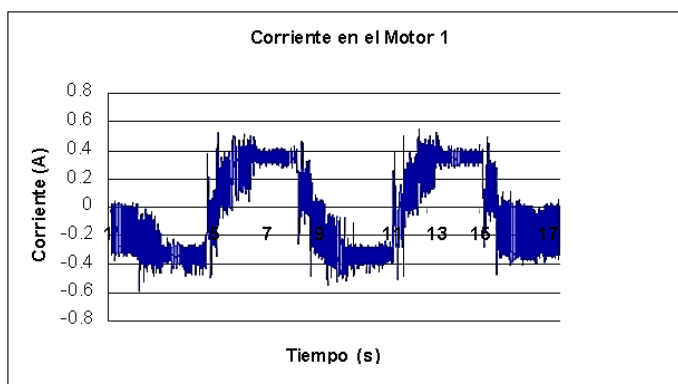


Figura 4.16 Gráfica de Corriente en prueba 1.

Relación de engranaje

La relación de engranaje: $n = N_2 / N_1$

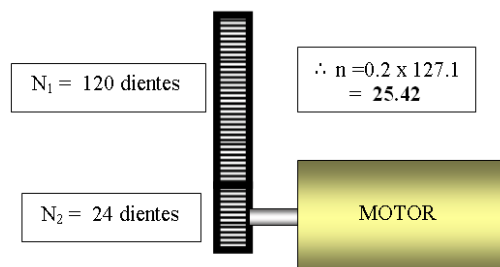


Figura 4.17 Transmisión mecánica en la cintura.

Esta relación de engranaje se considera de este modo, puesto que se tiene un arreglo de tipo planetario.

Comparación de señal de prueba vs. Simulación

La figura 4.17 muestra la señal de par requerido por la articulación de la cintura, obtenida al transformar la señal de corriente demandada por el motor₁ en la prueba 1.

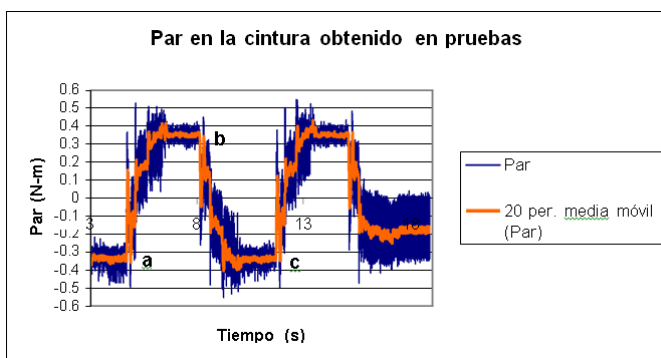


Figura 4.17 Gráfica del par en prueba 1 en experimentos.

La figura 4.18 muestra la señal de par requerido para el movimiento de cintura en simulación bajo las mismas condiciones de la prueba 1.

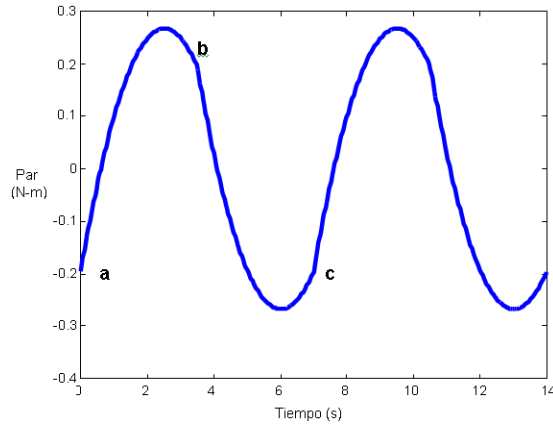


Figura 4.18 Gráfica del par en prueba 1 en simulación.

Al comparar los puntos *abc* de las figuras 4.17 y 4.18, se puede apreciar la similitud en forma y magnitud que tienen uno respecto a otro.

Prueba 2 (hombro)

El objetivo de esta prueba es el obtener una señal de corriente que se pueda convertir a par visualizando su evolución en la articulación de hombro haciendo que el Robot se comporte como un péndulo simple para poder validar el modelo dinámico inverso visto.

Condiciones iniciales

En esta prueba, la única articulación que tiene movimiento es la de hombro, la articulación de codo permanece a 0° respecto a la de hombro y la de cintura permanece fija. La figura 4.19 muestra el movimiento del desplazamiento en la prueba y la tabla 4.9 contiene los datos de las posiciones inicial, final y el desplazamiento total en la prueba.

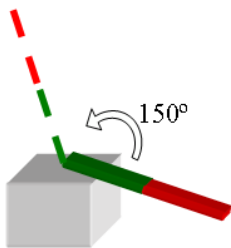


Figura 4.19 Movimiento de hombro.

Posición	- 27° respecto a la horizontal
Posición	123° respecto a la horizontal
Desplazamien	150°

Tabla 4.9 Condiciones de movimiento.

Resultados del experimento

La tabla 4.10 contiene datos generales de la prueba, en la cual se observa el comportamiento de

la corriente demandada en cada motor a lo largo de la prueba, registrada a través de los canales del osciloscopio (figura 4.19) para cada motor respectivamente así como nombre del programa.

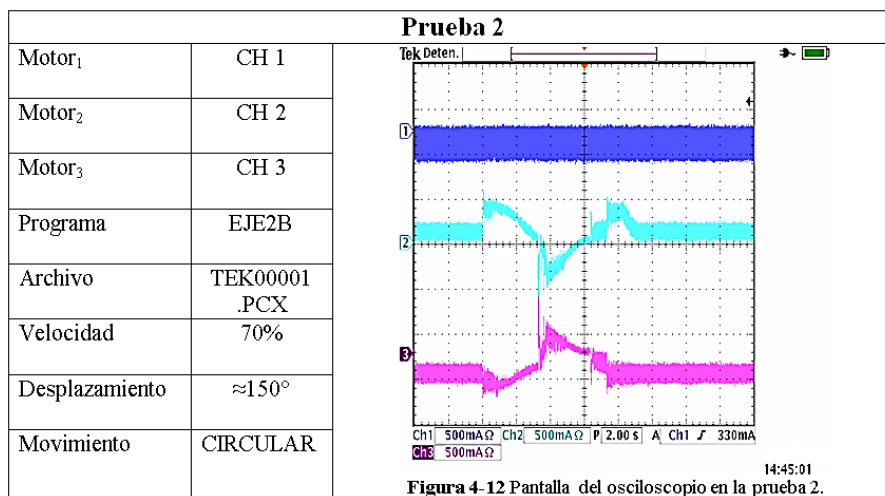


Tabla 4-10 Datos de prueba 2.

Registro de tiempos en la prueba

Nombre del programa	Tiempo completo	Núm. de prueba	Tiempo de ida	Tiempo de regreso	Tiempo de un ciclo	Velocidad porcentual
EJE2B	26''12	2	3''50	3''50	07''00	70 %

Tabla 4.11 Tiempos registrados en prueba 2.

Nota: Los tiempos están dados en segundos y centésimas de segundo.

Graficación de los datos de la corriente

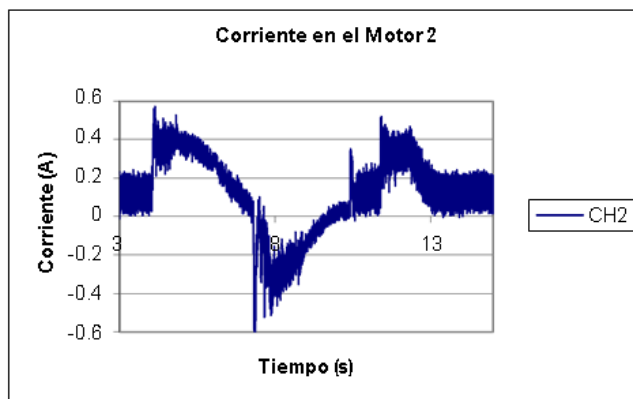


Figura 4.20 Gráfica de corriente en prueba 2.

Relación de engranaje

La relación de engranaje: $n = N_1 / N_2$

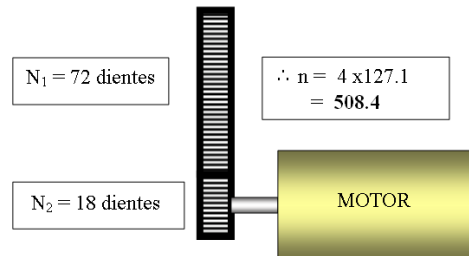


Figura 4.21 Transmisión mecánica en el hombro.

Comparación de señal de prueba vs. Simulación

La figura 4-22 muestra la señal de par requerido por la articulación del hombro, obtenida al transformar la señal de corriente demandada por el motor₂ en la prueba 2.

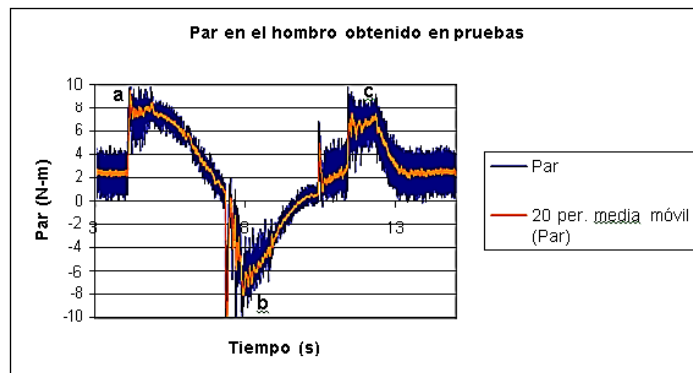


Figura 4.22 Gráfica del par en prueba 2 en experimentos.

La figura 4.23 muestra la señal de par requerido para el movimiento del hombro en simulación bajo las mismas condiciones de la prueba 2

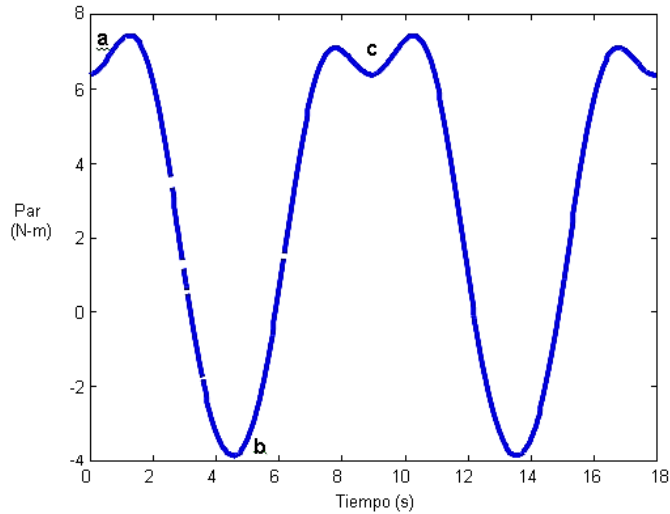


Figura 4.23 Gráfica del par en prueba 2 en simulación.

Al comparar los puntos *abc* de las figuras 4.22 y 4.23, se puede apreciar la similitud en forma y magnitud que tienen uno respecto a otro.

Prueba 3 (codo)

El objetivo de esta prueba es el obtener una señal de corriente que se pueda convertir a par visualizando su evolución en la articulación de codo haciendo que el Robot se comporte como un péndulo simple para poder validar el modelo dinámico inverso visto.

Condiciones iniciales

En esta prueba, la única articulación que tiene movimiento es la del codo, la articulación de hombro permanece a 90° respecto a la horizontal y la cintura permanece fija. La figura 4.24 muestra el movimiento del desplazamiento en la prueba y la tabla 4.12 contiene los datos de las posiciones inicial, final y el desplazamiento total en la prueba.

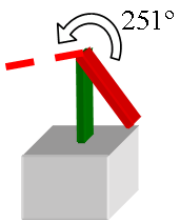


Figura 4.24 Movimiento del codo.

Posición inicial:	- 63° respecto a la horizontal
Posición final:	188° respecto a la horizontal
Desplazamiento total:	251°

Tabla 4-12 Condiciones de movimiento.

Resultados del experimento

La tabla 4.13 contiene datos generales de la prueba, en la cual se observa el comportamiento de la corriente demandada en cada motor a lo largo de la prueba, registrada a través de los canales del osciloscopio (figura 4.24) para cada motor respectivamente así como nombre del programa.

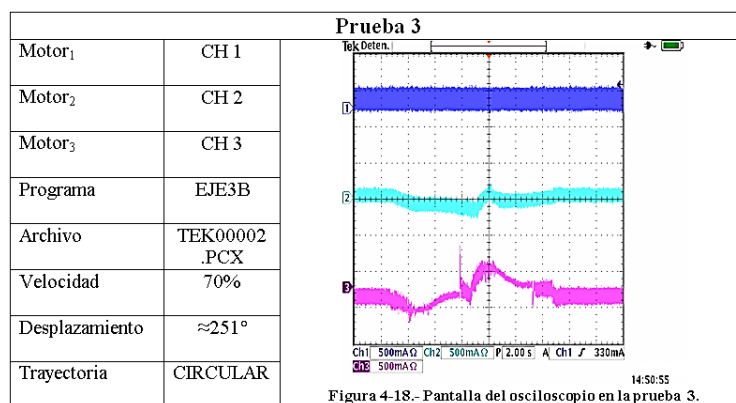


Figura 4-18.- Pantalla del osciloscopio en la prueba 3.

Tabla 4-13 Datos de prueba 3

Registro de tiempos en la prueba

Nombre del programa	Tiempo completo	Núm. de prueba	Tiempo de ida	Tiempo de regreso	Tiempo de un ciclo	Velocidad porcentual
EJE3B	36''50	3	6''00	6''00	12''00	70 %

Tabla 4.14 Tiempos registrados en prueba 3.

Nota: Los tiempos están dados en segundos y centésimas de segundo.

Graficación de los datos de la corriente

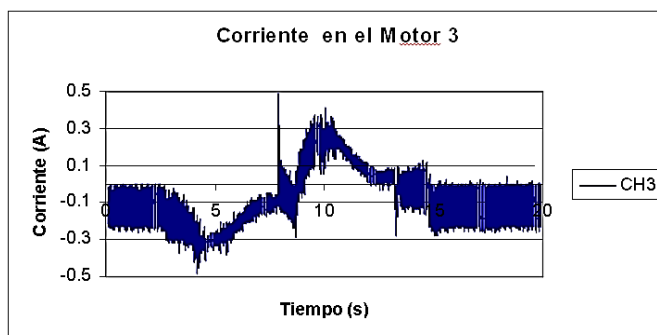


Figura 4.25 Gráfica de corriente en prueba 3.

Relación de engranaje

La relación de engranaje: $n_1 = N_1 / N_2$, $n_2 = N_2 / N_3$, $n = n_1 n_2$

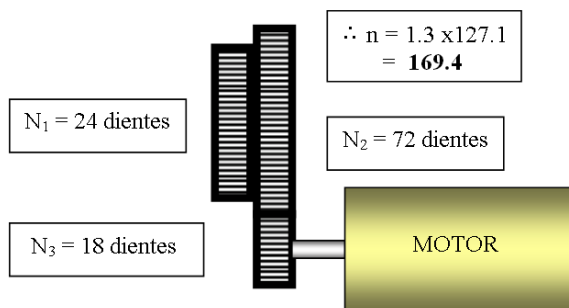


Figura 4-26 Transmisión mecánica en el codo.

Comparación de señal de prueba vs. Simulación

La figura 4.26 muestra la señal de par requerido por la articulación del codo, obtenida al transformar la señal de corriente demandada por el motor₃ en la prueba 3.

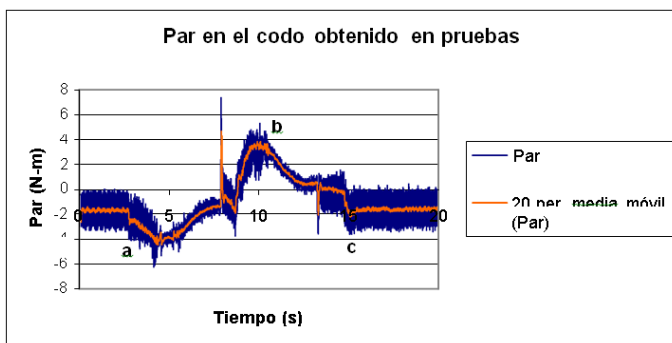


Figura 4.26 Gráfica del par en prueba 3 en experimentos.

La figura 4.27 muestra la señal de par requerido para el movimiento de codo en simulación bajo las mismas condiciones de la prueba 3.

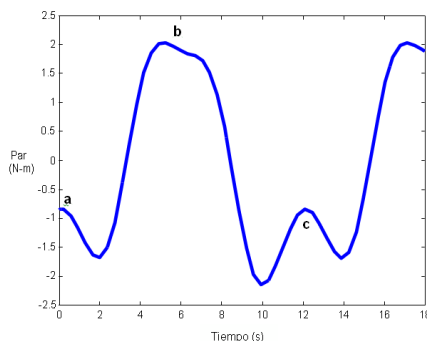


Figura 4.27 Gráfica del par en prueba 3 en simulación.

Al comparar los puntos *abc* de las figuras 4-26 y 4.27, se puede apreciar la similitud en forma y magnitud que tienen uno respecto a otro.

Capítulo 5

5.1 Control

En esta sección se muestra la manera en que el efecto de la gravedad sobre el robot puede ser compensado. Esto es haciendo uso del modelo dinámico de un robot rígido de n grados de libertad [9]:

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) = \tau \quad (5.1)$$

donde el punto “ \cdot ” representa derivación con respecto al tiempo, $q = [q_1, \dots, q_n]^T$ es un vector que representa las posiciones de cada una de las uniones, $M(q)$ es una matriz de $n \times n$, simétrica, definida [2][4] positiva conocida como matriz de inercia [5], $C(q, \dot{q})\dot{q}$ es un vector de $n \times 1$ conocido como el término de efectos centrífugos y de Coriolis, $g(q)$ es un vector de $n \times 1$ conocido como el término de efectos gravitacionales y $\tau = [\tau_1, \dots, \tau_n]^T$ es un vector llamado vector de fuerzas externas que representa los pares aplicados por los actuadores en las uniones del manipulador. Con el fin de hacer más sencilla la notación, a partir de aquí se asume que $n = 3$, lo cual corresponde al caso del robot bajo estudio en este trabajo.

Los movimientos del robot son lentos [6], consecuencia de los términos de la inercia, de fuerzas centrífugas y de Coriolis que tienen poco efecto [3][9]; en este caso el término gravitacional es el único realmente importante.

El par que deben generar los actuadores para compensar el efecto de la gravedad, se obtiene del modelo (1), [12] considerando que el robot está en reposo, es decir, las velocidades y las aceleraciones son cero:

$$g(q) = \tau \quad (5.2)$$

Por otro lado, $g(q)$ está dado como el gradiente de la energía potencial del robot completo:

$$g(q) = \frac{\partial U(q)}{\partial q} \quad (5.3)$$

donde $U(q)$ representa la energía potencial del robot, la cual se obtiene como la suma de las energías potenciales de cada uno de los eslabones (Spong y Vidyasagar, 1989):

$$U(q) = U_1(q) + U_2(q) + U_3(q) \quad (5.4)$$

Donde $U_i(q)$, $i=1,2,3$, representa la energía potencial del eslabón i . De acuerdo a la nomenclatura presentada en la figura 8 y siguiendo un procedimiento como el mostrado en [8], a continuación una descripción de los parámetros del robot para su análisis de la figura 5.1.

La distancia entre los ejes de giro y los centros de masas se denota por lc_1 y lc_2 respectivamente. I_1 e I_2 expresan los momentos de inercia de los eslabones [4] con respecto al eje que pasa a través de sus centros de masas y que es perpendicular al plano x-y. Los grados de libertad están asociados a los ángulos q_1 que se mide desde la posición vertical hacia abajo y q_2 que se mide a partir de la extensión del eslabón 1 hasta el eslabón 2, siendo ambos positivos en sentido contrario al movimiento de las manecillas del reloj.

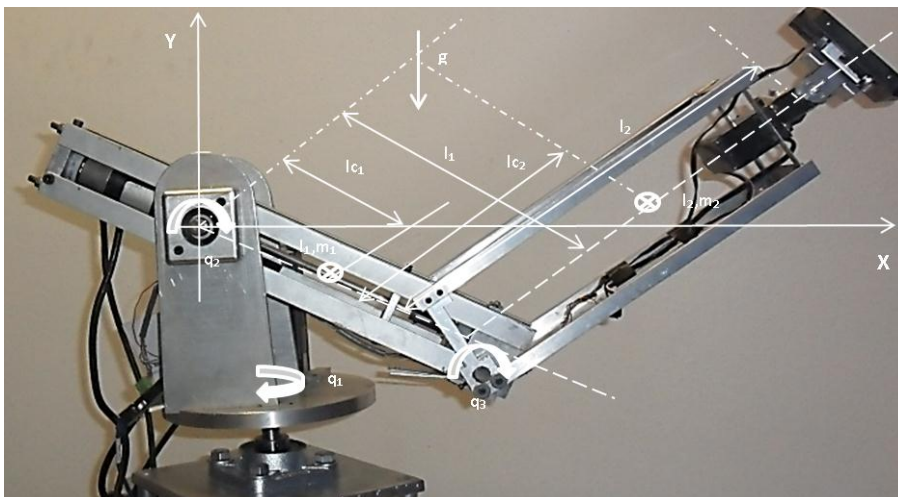


Figura 5.1 Robot manipulador didáctico de 3 grados de libertad.

Por lo tanto se obtiene:

$$U_1(q) = 0$$

$$U_2(q) = m_1 l_{c1} g \cos(q_2) \quad (5.5)$$

$$U_3(q) = m_2 l_1 g \cos(q_2) + m_2 l_{c2} g \cos(q_2 + q_3)$$

Usando (5.3) y (5.5):

$$g_1(q) = 0$$

$$g_2(q) = [m_1 l_{c1} + m_2 l_1] g \operatorname{sen}(q_2) + m_2 g l_{c2} \operatorname{sen}(q_2 + q_3) \quad (5.6)$$

$$g_3(q) = m_2 g l_{c2} \operatorname{sen}(q_2 + q_3)$$

Donde $g(q) = [g_1(q), g_2(q), g_3(q)]^T$. Estas expresiones determinan el par que deben generar los actuadores para compensar el efecto de la gravedad [4][10][11][12]. Sin embargo, estos pares son generados por los motores (actuadores) a través de un voltaje que se aplica a sus terminales. Por tanto, debe obtenerse una relación entre el voltaje que debe aplicarse a los motores con el fin de que produzcan el par dado en (6). Para esto es indispensable contar con el modelo matemático de los motores [7] de CD:

$$J_m \ddot{q} + (f_m + K_a K_b R_a^{-1}) \dot{q} + \tau = K_a R_a r V \quad (5.7)$$

Donde J_m , R_a , K_a , son matrices diagonales de $(n \times n)$ que representan respectivamente, las inercias de los motores, resistencias de armadura, constantes de par, r es la matriz que representa el motor colocado en la unión i , τ_i es el de $(1 \times n)$ compuesto por los pares de carga [1], [2], V es el vector de $(1 \times n)$ compuesto por los voltajes de armadura de cada uno de los motores.

$q = [r_1 q_1, \dots, r_n q_n]^T$, el par de carga τ corresponde al par aplicado sobre las uniones en (5.1), es decir:

$$[\tau_1, \dots, \tau_n]^T = \tau = M(q) \ddot{q} + C(q, \dot{q}) \dot{q} + g(q) \quad (5.8)$$

Considerando de nuevo velocidades y aceleraciones cero se obtiene:

$$V_g = R_a K_a^{-1} r^{-1} g(q) \quad (5.9)$$

Donde se ha usado V_g con el fin de subrayar que se trata del voltaje necesario para compensar el efecto de la gravedad solamente. Sustituyendo (5.6) en (5.9) se tiene:

$$V_{g1} = 0$$

$$V_{g2} = r^{-1} K_a^{-1} R_a \left[m_1 l_{c1} + m_2 l_1 \right] g \operatorname{sen}(q_2) + m_2 g l_{c2} \operatorname{sen}(q_2 + q_3) \quad (5.10)$$

$$V_{g3} = r^{-1} K_a^{-1} R_a \left[m_2 g l_{c2} \operatorname{sen}(q_2 + q_3) \right]$$

Donde V_{g1} , V_{g2} , y V_{g3} representan los voltajes que deben aplicarse para compensar el efecto de la gravedad. Sin embargo, un inconveniente de estas expresiones es que su cálculo depende de algunos parámetros del robot que son difícilmente conocidos con exactitud en la práctica. A continuación se presenta una manera de calcular los voltajes V_{g1} , V_{g2} , y V_{g3} dados en (5.10), sin necesidad de conocer con exactitud los parámetros involucrados. Defínanse las siguientes constantes:

$$\begin{aligned} -\frac{Ra_2}{Ka_2 r_2} m_2 g l_{c1} &= \delta_1 \\ -\frac{Ra_2}{Ka_2 r_2} m_2 g l_1 &= \delta_2 \\ -\frac{Ra_2}{Ka_2 r_2} m_2 g l_{c2} &= \delta_3 \\ -\frac{Ra_3}{Ka_3 r_3} m_2 g l_{c2} &= \delta_4 \\ \delta_1 + \delta_2 &= \delta_5 \end{aligned} \quad (5.11)$$

Usando (5.10) y (5.11), se obtiene el voltaje suministrado a cada motor de la siguiente manera:

$$Vg = \begin{bmatrix} V_{g1} \\ V_{g2} \\ V_{g3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \delta_5 \operatorname{sen}(q_2) + \delta_3 \operatorname{sen}(q_2 + q_3) \\ \delta_4 \operatorname{sen}(q_2 + q_3) \end{bmatrix} \quad (5.12)$$

Supóngase que el robot es colocado en la configuración mostrada en la figura 5.2 a).

Nótese que $q_2 = 90^\circ$ $q_3 = 0^\circ$. Usando estos valores y (5.12) se obtiene:

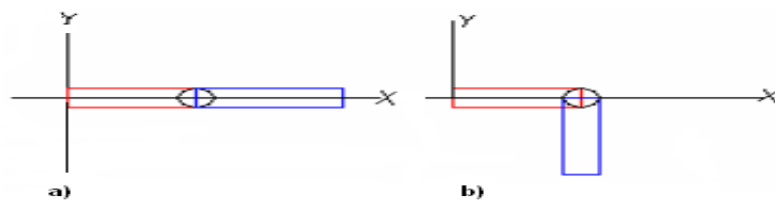


Figura 5.2 a) configuración $q_2 = 90^\circ$ $q_3 = 0^\circ$ y b) $q_2 = 90^\circ$ $q_3 = -90^\circ$.

$$Vg = \begin{bmatrix} 0 \\ 2.7 \text{ volts} \\ 0.7 \text{ volts} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \delta_5 + \delta_3 \\ \delta_4 \end{bmatrix} \quad (5.13)$$

Donde 2.7 y el numero 0.7 son los voltajes que se necesita aplicar a los motores correspondientes para mantener en equilibrio al robot en la configuración mostrada en la figura 5.2. Considérese ahora la configuración mostrada en la figura 5.2 b). Nótese que $q_2 = 90^\circ$ $q_3 = -90^\circ$. Usando estos valores y (5.12) se obtiene:

$$Vg = \begin{bmatrix} 0 \\ 2.2 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \delta_5 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5.14)$$

Donde 2.2 volts y 0 volts, son los voltajes que se necesitan aplicar a los motores correspondientes para mantener en equilibrio al robot en la configuración mostrada en la figura 5.2 b). Esto significa que:

$$\delta_3 = 0.5 \text{ volt}$$

$$\delta_4 = 0.7 \text{ volt} \tag{5.15}$$

$$\delta_5 = 2.2 \text{ volt}$$

En la siguiente Figura 5.3 se muestran otras configuraciones experimentales utilizadas para identificar los parámetros del modelo de pares gravitacionales, sirviendo estas para confirmar los parámetros del modelo.

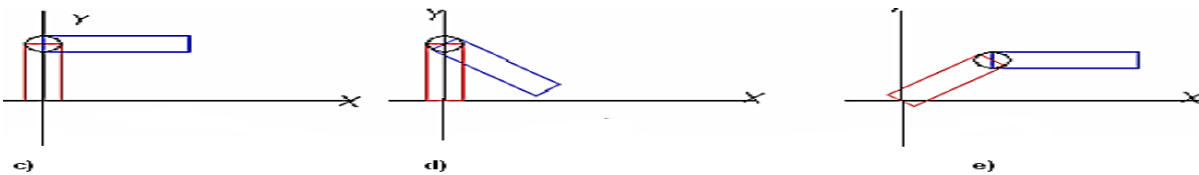


Figura 5.3 otras configuraciones experimentales utilizadas para identificar los parámetros del modelo de pares gravitacionales.

Finalmente, el controlador PD con compensación de gravedad debe ser también calculado en términos de voltajes a aplicar a los actuadores (motores). El controlador PD con compensación de gravedad está dado en términos de los pares aplicados como:

$$\tau = Kp(q_d - q) - Kd \dot{q} + g(q) \tag{5.16}$$

Donde q_d representa la posición deseada constante y q es la posición actual. Usando (5.7) y (5.8) se obtiene:

$$[M(q) + J_m] \ddot{q} + C(q, \dot{q}) \dot{q} + (f_m + K_a K_b R_a^{-1}) \dot{q} + g(q) = K_a R_a r V \tag{5.17}$$

Nótese que este modelo tiene las mismas propiedades que el modelo dado en (5.1). Lo único nuevo es un término de fricción viscosa que no requiere ningún cuidado especial. Esto significa que podemos considerar que, en este caso, el par está dado como:

$$\tau = K_a R_a^{-1} r V \tag{5.18}$$

Por otro lado, se sabe que el controlador PD esta dado en términos de par como:

$$\tau = Kp(q_d - q) - Kd \dot{q} + g(q) \quad (5.19)$$

Igualando (5.18) y (5.19) se tiene que el controlador PD puede calcularse en términos de voltajes aplicados a los motores como:

$$V = R_a K_a^{-1} r^{-1} \left[K_p (q_d - q) - K_d \dot{q} \right] + R_a K_a^{-1} r^{-1} g(q) \quad (5.20)$$

Si se hacen las siguientes definiciones:

$$\bar{K}p = R_a K_a^{-1} r^{-1} Kp$$

$$\bar{K}d = R_a K_a^{-1} r^{-1} Kd$$

y se usa (5.12) se puede escribir:

$$V = \bar{K}p(q_d - q) - \bar{K}d \dot{q} + \begin{bmatrix} 0 \\ 2.2 \text{ sen}(q_2) + 0.5 \text{ sen}(q_2 + q_3) \\ 0.7 \text{ sen}(q_2 + q_3) \end{bmatrix} \quad (5.21)$$

Donde se han utilizado los valores numéricos dados en (5.15). Nótese que no es necesario conocer

R_a , K_a y r para obtener los valores de $\bar{K}p$ y $\bar{K}d$ pues $\bar{K}p$ y $\bar{K}d$ solo necesitan ser positivos.

Finalmente, se puede evitar la necesidad de medir la velocidad \dot{q} , requerida en (5.21) se, del siguiente modo. El controlador (5.21) será construido usando una computadora digital, es decir, utilizando una base de tiempo discreta. Esto significa que se puede escribir $t=kT$, $k=0, 1, 2, 3, \dots$ con T una constante positiva pequeña. Se puede sacar provecho de esta situación para calcular un aproximado de la velocidad del siguiente modo.

$$\dot{q} \approx \frac{q(kT) - q([k-1]T)}{T}, \quad T \rightarrow 0 \quad (5.22)$$

5.2 Resultados Experimentales

En esta parte se presentan los resultados obtenidos experimentalmente cuando 1) se regula la posición del robot en configuraciones deseadas y 2) se realiza una tarea de seguimiento de trayectorias. Es importante mencionar que se encontró que las mediciones de posición están contaminadas de ruido, debido a que se usan potenciómetros para hacer dichas mediciones. Se debe aclarar que, aunque este ruido no deteriora de manera apreciable el desempeño de robot, sin embargo, se utilizaron filtros digitales con el fin de conseguir una mejor presentación de los resultados experimentales reportados en esta parte del trabajo. Esto significa que no se utilizaron los filtros en línea sino que, una vez que han adquirido todos los datos correspondientes a un experimento, estos se hacen pasar por el filtro mencionado fuera de línea sólo para contar con una mejor presentación de los resultados gráficos. Los filtros son de primer orden y están dados como:

$$q_e(kT) = aq_e([k-1]T) + bq([k-1]T)$$

donde $a=0.97$, $b=0.03$, de manera que los filtros tienen ganancia unitaria en estado estacionario, k representa el tiempo discreto, $q_e[k]T$ representa la salida del filtro y $q[k-1]T$ representa la posición medida de la articulación correspondiente. El periodo de muestreo utilizado es el mismo que el que se utilizó para controlar el robot es de 1 milisegundo. El programa utilizado en los experimentos que se presentan a continuación se encuentra listado en el anexo 4. Los datos obtenidos en cada experimento se almacenan en un archivo con extensión .txt una vez que se termina el experimento. De esta manera se ahorra tiempo de ejecución del programa. Finalmente, una vez que los datos están almacenados en el archivo (disco duro) se utiliza un archivo de MatLab para obtener las representaciones gráficas de los resultados presentados a continuación. Es en este archivo de MatLab donde se utiliza el filtro digital mostrado anteriormente.

5.3 Regulación de posición.

La figura 5.4 muestra las configuraciones inicial y final del robot utilizadas en esta parte. Esta figura presenta las configuraciones del robot en un plano vertical. Nótese que el efecto de

gravedad es importante en la configuración final utilizada. Se realizaron dos experimentos diferentes. En uno se utilizó el controlador PD sin el término de compensación de gravedad mientras que en el otro se incluyó el término de compensación de gravedad. Esto se hizo con el fin de comprobar que la inclusión del término de compensación de la gravedad verdaderamente mejora el desempeño del controlador y, al mismo tiempo, utilizar estos resultados como una manera de validar experimentalmente el modelo de pares gravitacionales obtenido en el capítulo anterior. En ambos experimentos se utilizaron las ganancias proporcional y derivativa $K_p=5.5$ y $k_d=0.5$, para ambas articulaciones, y como valores deseados se usaron $q_{d2}=2.8$ y $q_{d3}=3.58$. Los resultados obtenidos se muestran en la figura 5.5, para el caso de la articulación 2, y en la figura 5.6, para el caso de la articulación 3.

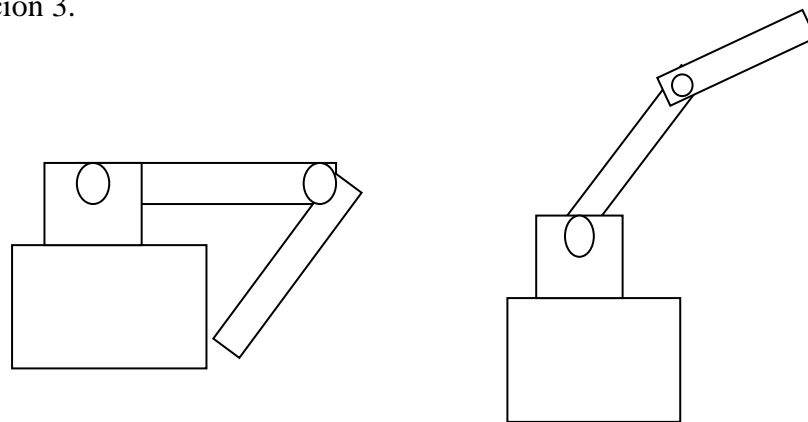


Figura 5.4 Configuración inicial y configuración final.

Utilizando el compensador en la articulación 2.

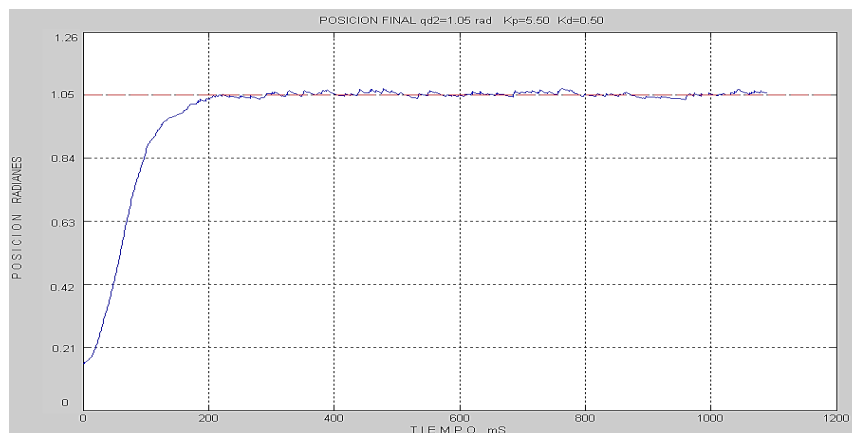


Figura 5.5 a) Con el compensador $q_{d2}=1.05$ rad, $K_p=5.50$ y $K_d=0.50$

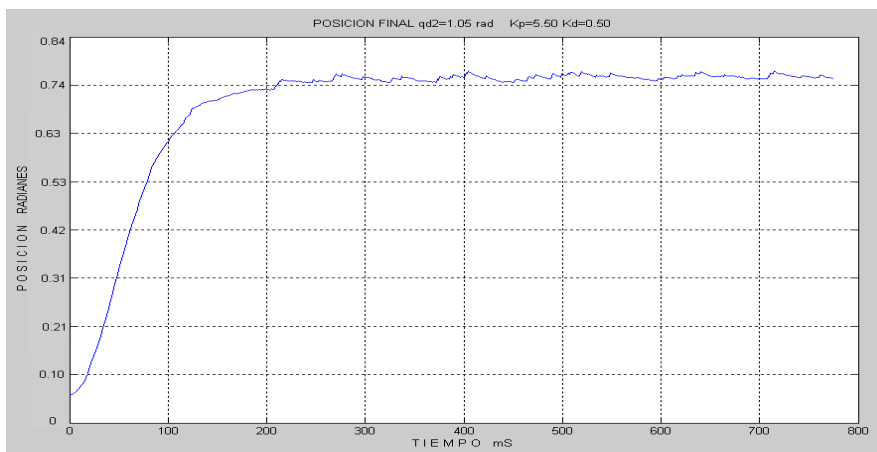


Figura 5.5 b) Posiciones medidas en la articulación 2, Sin compensar la respuesta nunca llega a la referencia de 1.05 Rad.

Utilizando el compensador en la articulación 3.

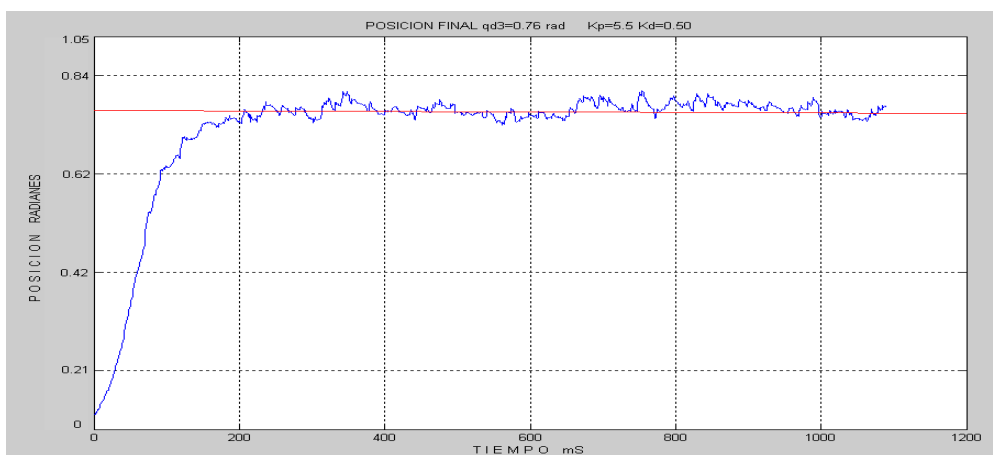


Figura 5.6 a) Con el compensador $q_{d2}=0.76$ rad, $K_p=5.50$ y $K_d=0.50$

Sin el compensador

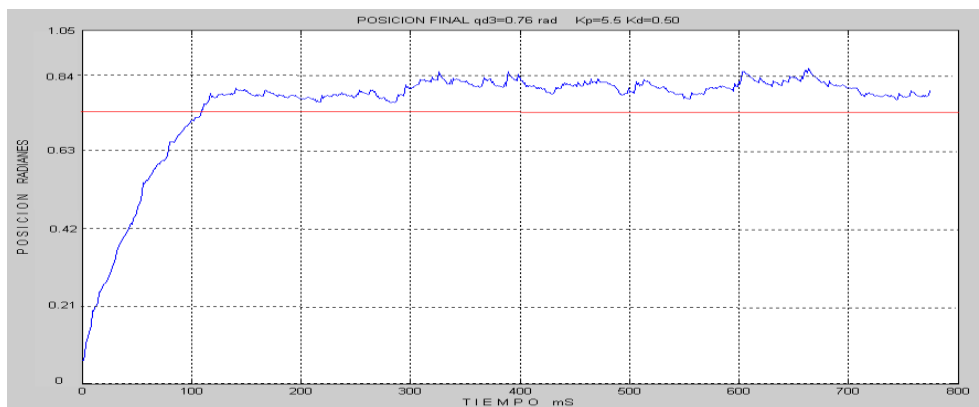


Figura 5.6 Posiciones medidas en la articulación q_3 . Sin el compensador la respuesta esperada no llega a 0.76 Rad.

Nótese que las posiciones deseadas son alcanzadas cuando se incluye el término de compensación de la gravedad, mientras que un error en estado estacionario diferente de cero existe cuando no se utiliza dicho término de compensación. Estos resultados justifican claramente la conveniencia de utilizar el término de compensación de gravedad en el controlador propuesto y, al mismo tiempo, representan una validación experimental del modelo de pares gravitacionales obtenido en el capítulo anterior.

Aunque en este trabajo sólo se reporta un experimento, sin embargo, es conveniente mencionar que se hicieron varios experimentos diferentes en los cuales se observaron resultados similares. En el anexo 3 se presentan varias figuras que representan algunas de las configuraciones diferentes utilizadas en dichos experimentos.

En la figura 5.7 se presentan resultados obtenidos cuando se hacen varios cambios sucesivos en los valores deseados de posición. Las ganancias del controlador utilizadas son las mismas que las usadas anteriormente y sólo se usa el caso en el cual se utiliza el término de compensación de la gravedad.

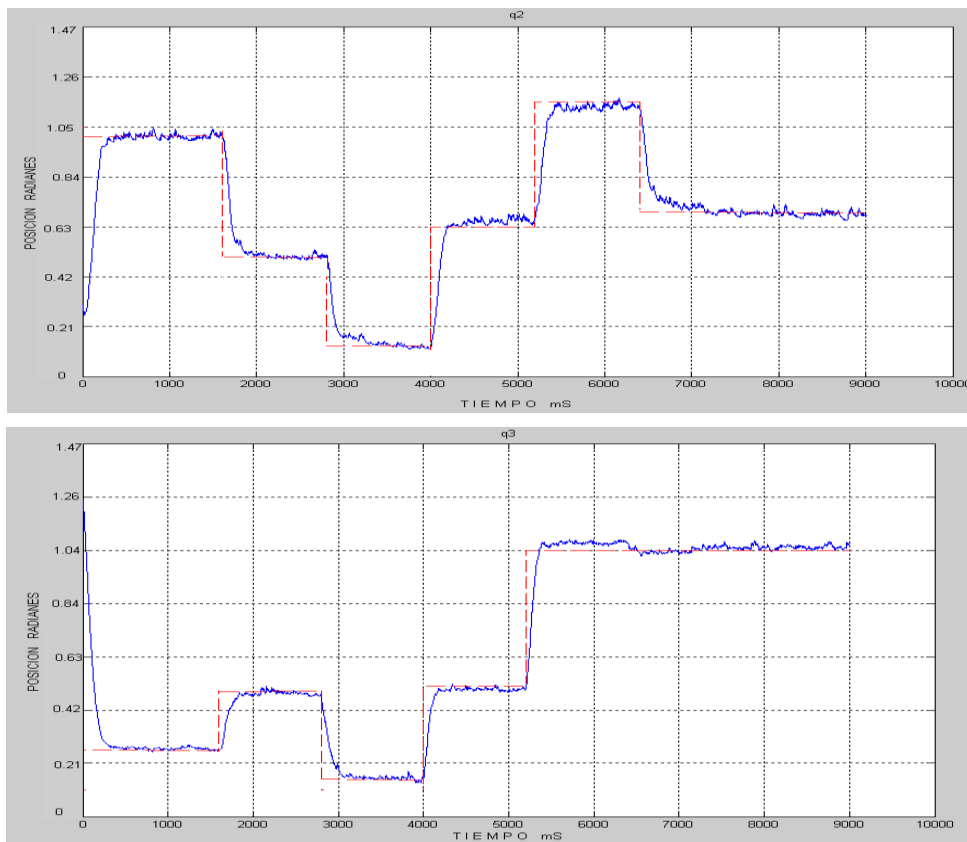


Figura 5.7 Respuesta ante varios cambios en los valores deseados de posición.

5.4 Resultados experimentales

Seguimiento de trayectorias

A continuación se presentan resultados experimentales con los se estudia el comportamiento del robot construido cuando se resuelve el problema de seguimiento de trayectorias. Debido a que el controlador PD utilizado solo está diseñado para regulación de posición, las trayectorias a ser seguidas deben construirse especificando una secuencia de valores deseados de posición (constantes) los cuales son cambiados cada 200 milisegundos. De esta manera, se consigue convertir el problema de regulación de posición en un problema de seguimiento de trayectorias.

Se utilizan las mismas ganancias proporcional y derivativa para el controlador y también se incluye el término de compensación de la gravedad. Los resultados obtenidos se muestran en la figura 5.8 Nótese que las posiciones de ambas articulaciones siguen satisfactoriamente a las trayectorias especificadas.

Un aspecto interesante que se puede subrayar en estos resultados es el hecho de que, debido a la rapidez con que cambian los valores deseados de posición, el robot debe seguir un nuevo valor deseado antes de detenerse. Esto reduce el efecto de la fricción, el cual es más apreciable cuando el robot se mueve a pequeñas velocidades. Esta es la razón por la cual el error en estado estacionario puede ser mayor cuando se usa regulación de posición que cuando se siguen trayectorias, sobre todo si no la trayectoria deseada no cambia de dirección.

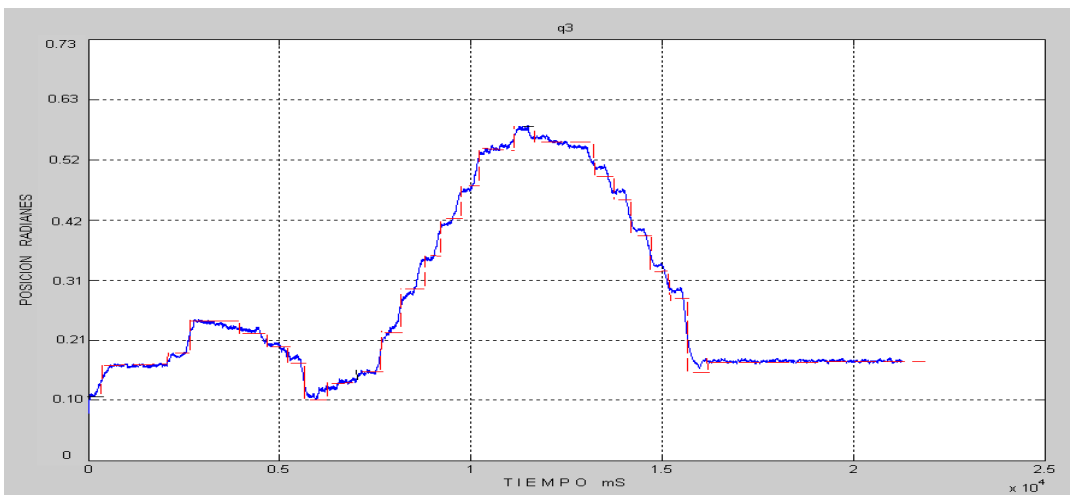
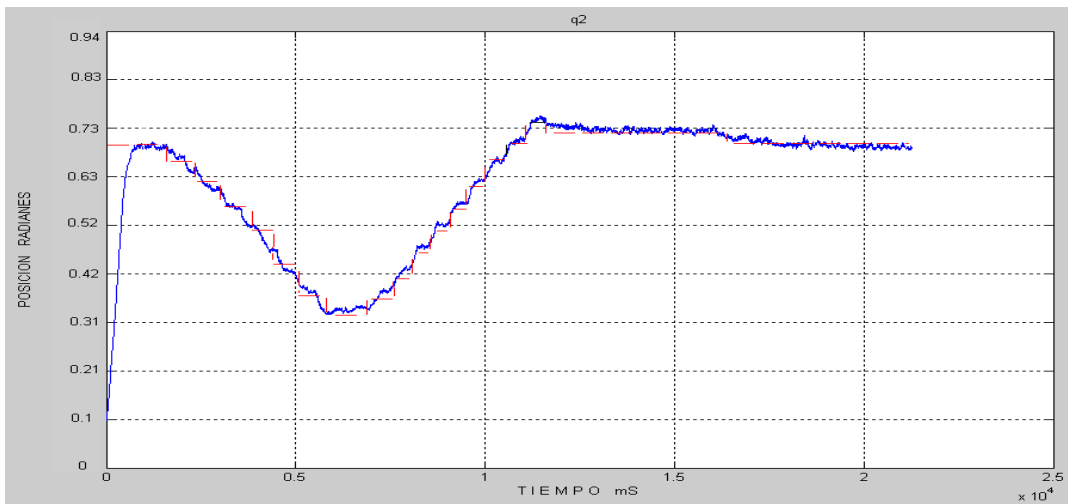


Figura 5.8 Se muestra la respuesta a un seguimiento de trayectoria donde el resultado es aceptable de acuerdo a los cambios bruscos de las articulaciones.

Capítulo 6

6.1 Conclusiones

En este capítulo se concentran los resultados de la investigación y las aportaciones que conlleva este trabajo, esperando que sean una base para la institución de una línea de investigación dedicada a la robótica.

Todos los proyectos de tesis en el área de Robótica tienen la característica de ser multidisciplinarios, esto les da un grado mayor de dificultad a la investigación. En el caso particular de este trabajo se involucran la ingeniería electrónica, la ingeniería mecánica, las ciencias computacionales y la ingeniería de control.

Después de haber realizado una descripción general de la robótica dentro del capítulo 1 y particularizar en los robots industriales, se definió como objetivo el desarrollar los modelos matemáticos cinemáticos y dinámico tanto directo como inverso para ambos casos para el robot.

Los modelos cinemáticos fueron resueltos usando métodos formales como la convención D-H para el modelo directo y el método geométrico para el modelo inverso. Para la obtención de estos modelos se emplearon conocimientos de álgebra lineal, geometría y trigonometría. Para la obtención de los modelos dinámicos se utilizó básicamente dinámica de Lagrange, lo cual requirió el empleo de conocimientos en el área de matemáticas y física que en general se puede asociar a conceptos mecánicos. La validez de estos modelos fue determinada mediante experimentos de simulación en una PC. Para ello fue necesario aprender el uso de la herramienta computacional Matlab/Simulink en su modo edición y programación en bloques. Como paso inicial para la validación, fue necesario determinar los parámetros involucrados en cada uno de los modelos.

Un parámetro importante para la dinámica es el cálculo del peso de los componentes o elementos mecánicos del robot, lo cual se logró mediante el empleo de un software de diseño asistido por computadora llamado Pro-Engineer. Primero se dibujaron las piezas más significativas del robot para que después de introducirle la densidad correspondiente a cada pieza según el tipo de material del que se encuentran hechas, y el software proporciona el peso de las piezas; de

manera sencilla, precisa y más confiable que si hubiesen sido realizados manualmente empleando el método analítico de superposición según términos de mecánica. A pesar de que se tenían bases acerca del manejo de este software.

La medición de las variables de corriente demandada por cada servomotor (actuadores en cintura, hombro y codo) se realizó con un osciloscopio de cuatro canales con opción a guardar datos en disco duro; equipo electrónico moderno que fue necesario aprender a utilizar para estos fines.

El diseño y creación de infinidad de prácticas para uso didáctico así como para la tesis en general, implicó un estudio extenso de los manuales de operación y programación del robot; en la programación se adquirió el conocimiento de los comandos de ACL más básicos para la elaboración de rutinas.

En la parte electrónica se contribuyó a la creación de una tarjeta de control para servomotores a un bajo costo y no solamente por la calidad de material de los circuitos usados sino por la forma de hacer más eficientes las tecnologías actuales de la electrónica (actualmente en proceso de patente).

En este trabajo de Investigación se ha diseñado, construido y controlado un robot manipulador que será utilizado con fines didácticos. Una justificación importante de este trabajo es proveer a la Universidades públicas, Autónomas un robot que pueda ser utilizado para prácticas de control, electrónica, programación y automatización. La razón de esto es que los robots son interesantes desde el punto de vista de análisis y control y desde el punto de vista de aplicaciones industriales importantes.

Normalmente el diseño cinemática del robot se realiza en función de la tarea que va a desarrollar. Sin embargo, debido a que en este caso el robot debe ser didáctico, no se tiene definida una tarea específica a desarrollar. Esto significa que el diseño cinemático debe hacerse en base simplemente al criterio de que el robot debe poder realizar tareas interesantes. Por ejemplo, un aspecto interesante es el verificar que el robot debe posicionarse en la configuración deseada a pesar de los efectos de la gravedad y por esta razón se decidió diseñar un robot que pueda tener movimientos en planos verticales. Por otro lado se diseño un robot de configuración angular (brazo articulado) porque de esta manera se obtiene un mecanismo que esta totalmente acoplado, es decir, los movimientos de cada articulación tienen efectos sobre todas las demás articulaciones, por lo que resulta en problemas de control interesantes.

La construcción del robot es una tarea compleja pues aparecen diversos problemas que tienen efectos adversos en el desempeño del robot. Uno de estos problemas aparece en el acoplamiento

mecánico de las articulaciones que unen a los diferentes eslabones. Estos acoplamientos deben ser rígidos y con poco o ningún juego mecánico pues de otra manera la precisión en el posicionamiento del robot puede deteriorarse gravemente. Sin embargo, estos problemas pueden ser reducidos a niveles satisfactorios mediante la selección de cajas de engranes adecuadas.

El robot construido es de arquitectura abierta con el fin de poder utilizar cualquier controlador de robots. Esto es muy importante porque actualmente existe una gran cantidad de controladores propuestos y es conveniente que se pueda experimentar con cualquiera de estos algoritmos y así ganar experiencia en cuanto a las ventajas y desventajas de los diferentes esquemas de control existentes para robots. Con el fin de conseguir esto, el robot es programado y controlado usando una computadora personal y un programa escrito en lenguaje C++. Además, se usa una tarjeta adquisitora de datos comercial como interfase entre la computadora y el robot. Con el fin de apreciar el desempeño obtenido se decidió utilizar un controlador PD más compensación de gravedad. Esto requiere de la obtención de un modelo de pares gravitacionales para el robot el cual se consiguió expresar en términos del voltaje aplicado a los actuadores del robot en lugar de las masas y centros de masa de los eslabones.

Se realizaron varios experimentos para analizar el desempeño del robot construido tanto en regulación de posición como en seguimiento. Los resultados obtenidos muestran un buen desempeño en ambas tareas. Es importante subrayar la presencia de algunos fenómenos adversos que afectan al desempeño obtenido: la fricción y el juego mecánico presentes en las articulaciones. Dicho fenómenos se ven favorecidos por la siguiente situación. Las cajas de engranes utilizadas no son de alto desempeño debido a que no existen cajas de reducción del alto desempeño para los bajos niveles de potencia utilizados en este diseño. Sin embargo, el desempeño obtenido a pesar de estos problemas es aceptable.

Finalmente, se puede afirmar que se ha conseguido construir un robot didáctico, de arquitectura abierta y de bajo costo (Lo cual se comprueba con un estudio realizado de diferentes robots didácticos comerciales que se encuentran actualmente en el mercado anexo 7), que será de gran utilidad para los alumnos de la Universidad Autónoma de Querétaro que estudien las temáticas relacionadas con programación y control de robots.

Realmente escribir todo lo que se hizo durante esta investigación sería muy extenso, por ello esta tesis sólo se concentra en lo más importante para satisfacer los alcances planteados en el inicio.

6.2 Resultados Generales

Para comprobar y dar por hecho el correcto desarrollo de los modelos Cinemáticos se llevó a cabo una comparación entre el modelo directo y el modelo inverso. Esta comparación se refiere a que las salidas resultantes del modelo cinemático directo, fueron introducidas en las entradas del modelo cinemático inverso y viceversa, con ello se pudo apreciar una total congruencia en los resultados, ya que se “recuperaba” el valor inicial para cada caso. Esto fue suficiente para validarlos por software, ya que el desarrollo de ambos fue por métodos completamente diferentes obteniendo resultados exactos, tal y como se pudo ver en el capítulo 4.

Por otro lado, los resultados que se obtuvieron del desarrollo del modelo dinámico inverso en un primer grado de validación, como el que se hizo en el capítulo 4 al comparar simples modelos desarrollados para péndulos y para un robot planar contra el modelo del Robot, fueron satisfactorios al dar resultados iguales, esto dio una credibilidad importante al desarrollo del modelo. La validación física que se realizó en el capítulo 4 se hizo a través de la comparación de las variables de par resultantes de la simulación del robot con las ecuaciones del modelo dinámico inverso con las pruebas físicas realizadas al Robot. En estas comparaciones se obtuvo un error del 30 al 40 %. Se debe tomar en cuenta que cuando se realiza una prueba a sistemas físicos es imposible realizarlas bajo condiciones ideales, ya que existen factores que son imposibles de controlar o eliminar. Estos factores pueden ser el no contar con una fuente de alimentación limpia de ruidos (en este caso los picos de corriente que se pueden presentar), la precisión en el equipo de muestreo, la repetibilidad del sistema, las pérdidas en los actuadores, fricciones no lineales, el propio desgaste físico del sistema, etc. Estas condiciones se pueden despreciar cuando se lleva a cabo una simulación en PC donde se pueden tener condiciones ideales al igual que el propio modelo. Los sistemas presentan normalmente no linealidades en su comportamiento, y las perturbaciones que se presentan resultan difíciles de determinar o de controlar. Por éstas y otras razones se presentan estas diferencias en cuanto a la magnitud del par requerido, sin embargo la tendencia general de la señal es muy similar y se comporta de acuerdo a predicciones lógicas. Otro factor de influencia en la diferencia de resultados se debe a la instrumentación tan rudimentaria que se utilizó para medir los eslabones del robot y las piezas que lo conforman. La dinámica directa, se pudo validar, como ya se vio en el capítulo 3, puesto que se desarrolla a partir de la dinámica inversa, además de haber sido resuelta por diferentes técnicas de solución algebraicas, desechando con esto posibles errores en su resolución.

A pesar de que en la propuesta de tesis de este trabajo, en un inicio se delimitó el modelo a no incluir efectos como las fricciones, durante el transcurso se consideró importante incluirlos ya que los experimentos demostraron un significativo mejoramiento en las señales y así, al hacer la comparación de señales, se tuvieron resultados más satisfactorios. En el caso en que dicho mejoramiento se notó significativamente fue en la prueba que en simulación se generaba un movimiento únicamente en la cintura (capítulo 4, prueba 1); a la hora de introducir la fricción se notó que la forma de la señal cambió y que la magnitud se acrecentó en un 20%, teniendo una similitud mayor con la señal adquirida de la corriente del motor1 transformada en par. Esto se puede apreciar en la figura 4.16, 4.18 y 4.19. En el caso en lo que las articulaciones de hombro y codo tenían movimiento; el hecho de incluir las fricciones sólo elevó la magnitud de la señal un 5%, dejando su forma sin cambio alguno considerable.

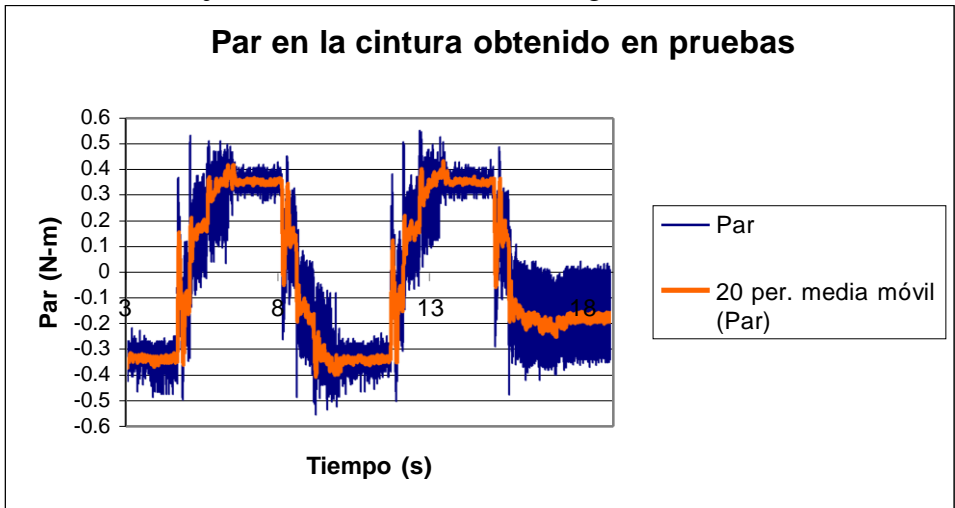
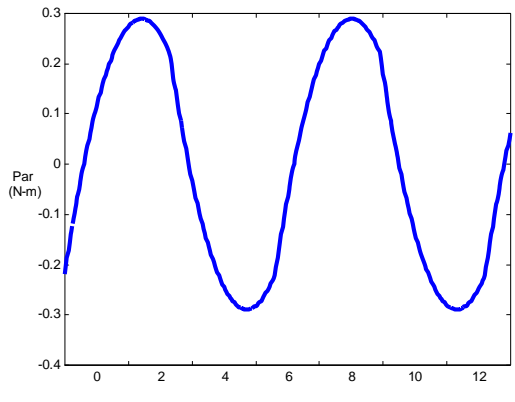
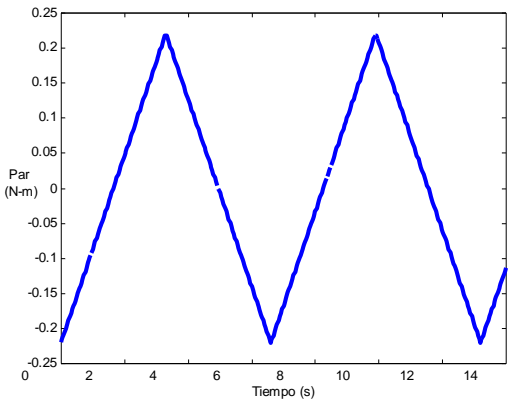


Figura 4.16 Par generado por el motor1 para mover la cintura



6.3 Aportaciones

Una de las aportaciones principales de este trabajo de tesis, es la puesta en operación del robot propuesto. Por los motivos que se explican en el siguiente párrafo.

La puesta en operación y documentación contribuye en forma teórica con la validación de los modelos matemáticos y todo lo que conllevó y en forma bastante tangible con las prácticas que se puede realizar con este robot. Por estas razones el material aquí plasmado es de ayuda tanto a profesores-investigadores y alumnado de la UAQ, UVM Querétaro y gente que tenga interés en el tema.

Los pasos necesarios que se siguieron para la puesta en operación del robot se documentaron y se les dio el formato de prácticas de laboratorio (una serie de seis prácticas), para que la infraestructura del laboratorio de mecatrónica de UVM y UAQ tengan un mejor aprovechamiento. Estas prácticas ya fueron realizadas por alumnado con gran éxito. Otra aportación es un simulador que sirve para cualquier manipulador articulado que sea de construcción similar al Robot, ya que basta introducir los parámetros deseados en un cuadro de diálogo (para la cinemática) o modificar los parámetros iniciales en un subsistema (para la dinámica).

6.4 Trabajos futuros

El limitar los trabajos futuros que se pueden realizar en robótica, sería muy aventurado e injusto, puesto que en este campo a pesar de que ya tiene formado más de medio siglo, la investigación y desarrollo están al día.

Como trabajos futuros se proponen los siguientes:

La publicación de este trabajo de tesis para darle difusión y demostrar los alcances que se tienen en la Maestría en Ingeniería Mecatrónica en crecimiento.

Nuevos sistemas de controladores nuevos que se pueden implementar con el Robot.

Control de robots 6 DoF vía Wi Fi para operaciones quirúrgicas.

Referencias

- [1] De Luca, A., and Manes, C., 1994. "Modelling of Robots in Contact with a Dynamic Environment," *IEEE Trans. Robotics and Automation*, Vol. 10, No. 4, pp. 542-548.
- [2] De Stutter, J., and Bruyninckx, H., 1996, "Force Control of Robot Manipulators," in W.S. Levine(ed), *Control Handbook*, pp. 1351-1358, CRC Press, Boca Raton, Florida.
- [3] De Shutters, J., Toros, D., Bruyninckx, H., et al., 1997 "Invariant Hybrid Force/Position Control of a Velocity Controlled Robot with Compliant en effectors Using Modal Decoupling", *Int. J. Robotics Research*, Vol. 16, No. 3, pp.340-356.
- [4] Khatib, O., 1995. "Inertial Properties in Robotic Manipulation: An Objet-Level Framework," *Int. J Robotics Research*. Vol. 14, No. 1, pp. 19-36.
- [5] Mills, J. K., and Goldenberg, A. A., 1989. "Force and Position Control of Manipulators During Constrained Motions Tasks," *IEEE Trans. Robotics & Automation*, Vol. 3, No. 1, pp. 43-53.
- [6] Nof, S.Y., *Handbook of industrial robotics*, John Wiley & Sons, Inc.,USA.,1989.
- [7] Ogata, k., *Ingeniería de control moderno*, Prentice Hall, México, 1993.
- [8] Rafael Kelly y Víctor Santibáñez, *Control de movimiento de Robots Manipuladores*, Prentice Hall, Madrid, España. 2003.
- [9] Spong, M.W and Vidyasagar, M. *Robot Dynamics and Control*, Jhon Wiley & Sons, Inc., New York. 1989.
- [10] Yoshikawa, T., 1997. "Dynamic Hybrid Position Force Control of Robot Manipulators Description of Hand Constraints and Calculation of Joint Driving Force," *IEEE J. Robotics & Automation*, Vol. 3, No. 5, pp. 386–392.
- [11] Yoshikawa, T., and Zheng, X.-Z., 1993. "Coordinated Dynamic Hybrid Position/Force Control for Multiple Robot Manipulators Handling One Constrained Object," *Int. J. Robotics Research*, Vol. 12, No. 3, pp. 219–230.

- [12] Yoshikawa, T., Sugie, T., and Tanaka, M., 1988. “Dynamic Hybrid Position Force Control of Robot Manipulators— Controller Design and Experiment,” *IEEE J. Robotics & Automation*, Vol. 4, No. 6, pp. 699–705.
- [13] A. Barrientos, L. F. Peñin, C. Balaguer, R. Aracil “Fundamentos de robótica”, McGraw Hill, 2000.
- [14] John J. Craig “Introduction to robotics mechanics and control”, Addison-Wesley Publishing Company, 1989
- [15] K. S. Fu, R. C. González, C. S. G. Lee, “Robótica”, McGraw Hill, 1988.
- [16] Mark W. Spong, M. Vidyasagar”, Robot dynamics and control”, John Wiley & Sons, 1989
- [17] Aníbal Ollero Baturone,”Robótica: Manipuladores y robots móviles”, Alfa omega marcombo, 2001.
- [18] Said M. Megahed,”Principles of robot modelling and simulation”, John Willey and Sons, 2009.
- [19] N. Aliane y S. Bemposta, “Una experiencia práctica de aprendizaje basado en proyecto en una asignatura de robótica”, *IEEE-RITA*, vol. 3, no. 2, pp. 11-16, 2008.
- [20] E.J. Avella-Rodríguez y R. A. Plazas-Rosas, “Laboratorio Virtual Para Simular el Robot de dos Articulaciones ELBOW”. Director J. M. Salamanca. Universidad Pedagógica Y Tecnológica De Colombia. Ingeniería Electrónica, 2010.
- [21] Mark W. Spong, M. Vidyasagar, “Robot dynamics and control”, John Wiley & Sons, 1989
- [22] N. Martínez, Z. García, M. M García. and G. L Ferreira . “Conceptual Maps and Cases Based Reasoning: A perspective for the Intelligent Teaching-Learning Systems”. *IEEE Latin America Transactions*, Vol. 8, No. 5 pp. 571-578, 2010.

Anexo 1 Constancia



El Gobierno del Estado de Querétaro
a través de su Consejo de Ciencia y Tecnología

Otorga la presente

CONSTANCIA

A: Ing. Carlos Alberto González Gutiérrez
Dr. Víctor Hernández Guzmán
Dr. Gilberto Herrera Ruiz
M. en C. Edgar Alejandro Rivas Araiza

Por haber participado en el Simposio “La Investigación y el Desarrollo Tecnológico en Querétaro 2005”, dentro del área Avance Tecnológico de la Industria, con el trabajo: “Diseño, construcción y control PD con compensación de pares gravitacionales de un robot manipulador didáctico”.

Santiago de Querétaro, 07 de septiembre del 2005

DR. ALEJANDRO LOZANO GUZMÁN
Director General del CONCYTEQ

LIC. MANUEL GARCIA QUINTANA
Presidente del Area de Avance Tecnológico de la
Industria



Anexo 2 Configuraciones

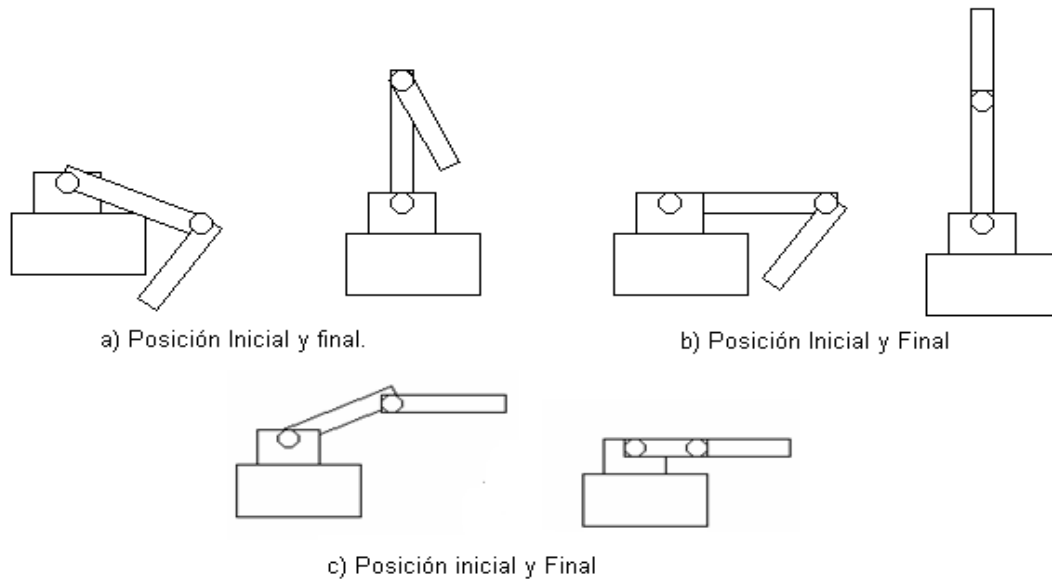
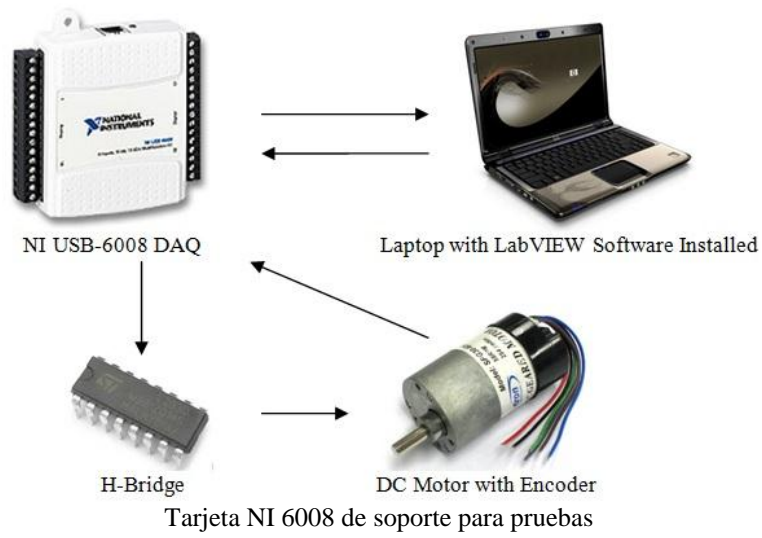


Figura A.2 En la experimentación se realizaron varias pruebas poniendo en diferentes configuraciones (posiciones de los eslabones) al robot articulado como se aprecia en la figura.

Anexo 3 Tarjetas de Control

Tarjeta de adquisición de datos NI 6008



A complete software product catalog is available free from your local PC-LabCard representative.

Product Specifications

Analog Input (A/D Converter)

Channels: 16 single-ended
Resolution: 12 bits
Input Range: Bipolar $\pm 10V$, $\pm 5V$, $\pm 2.5 V$, $\pm 1.25 V$,
 $\pm 0.625 V$, $\pm 0.3125 V$.

All input ranges are software programmable.

Overvoltage: Continuous $\pm 30V$ max.
Conversion type: Successive approximation
Converter: HADC574Z (built-in sample and hold)
Conversion speed: 30 KHz max.
Accuracy: 0.015 % of reading ± 1 bit
Linearity: ± 1 bit
Trigger mode: Software trigger, on-board programmable timer or external trigger.
Data transfer: Program control, Interrupt control or DMA
External trigger: TTL or compatible, load 0.4 mA max. at 0.5V (low) or 0.05 mA max. at 2.7V (high).

Analog Output (D/A Converter)

Channels :	2 channels.
Resolution :	12 bits.
Output Range :	0 to +5V or 0 to +10V with fixed -5V or -10V reference. Max. +10V or -10V with external DC or AC reference.
Reference voltage :	Internal : -5V (+/- 0.1V), -10V (+/- 0.2V). External : DC or AC, +/- 10V max.
Conversion type :	12 bit monolithic multiplying.
Analog devices :	AD7541AKN or equivalent.
Linearity :	+/- 1/2 bit.
Output drive :	+/- 5mA max.
Settling time :	30 microseconds.

Digital Input

Channel :	16 bits.
Level :	TTL compatible.
Input voltage :	Low — 0.8V max. High — 2.0V min.
Input load :	Low — 0.4mA max. at 0.5V. High — 0.05mA max. at 2.7V.

General Information

Digital Output

Channel: 16 bits
Level: TTL compatible
Output voltage: Low - Sink 8 mA at 0.5 V max.
High - Source -0.4 mA at 2.4V min.

Programmable Timer/Counter

Device: Intel 8253
Counters: 3 channels, 16-bit, 2 channels permanently connected to 2 MHz clock as programmable pacer, 1 channel free for user application
Input, gate: TTL/DTL/CMOS compatible
Time base: 2 MHz
Pacer output: 35 minutes/pulse to 0.5 MHz

Interrupt Channel

Level: IRQ 2 to 7, 10, 11, 12, 14, 15 jumper selectable
Enable: Via S0, S1 and S2 of CONTROL register

DMA Channel

Level: 1 or 3, jumper selectable
Enable: Via S0, S1 and S2 of CONTROL register

General Specifications

Power consumption : +5V : typ. 500mA, max. 1A
+12V : typ. 50mA, max. 100mA.
-12V : typ. 14mA, max. 20mA.

I/O connector : 20-pin post header for I/O connection. Adapter available to convert to 37 pin D-type connector.

I/O base address : Requires 16 consecutive address locations. Base address definable by the Dip switches for address line A8 - A4. (Factory setting is Hex 220).

Operating Temp : 0 to +50 deg.C.

Storage Temp : -20 to +65 deg.C.

Weight : 8.6 oz (243 gm).

La siguiente tabla muestra los registros de las direcciones base:

<u>Location</u>	<u>Read</u>	<u>Write</u>
Base + 0	Counter 0	Counter 0
+ 1	Counter 1	Counter 1
+ 2	Counter 2	Counter 2
+ 3	N/U*	Counter control
+ 4	A/D low byte	CH1 D/A low byte
+ 5	A/D high byte	CH1 D/A high byte
+ 6	D/I low byte	CH2 D/A low byte
+ 7	D/I high byte	CH2 D/A high byte
+ 8	N/U	Clear interrupt request
+ 9	N/U	Gain control
+10	N/U	MUX control
+11	N/U	Mode control
+12	N/U	Software A/D trigger
+13	N/U	D/O low byte
+14	N/U	D/O high byte
+15	N/U	N/U

* N/U = Not Used

Utilización de Tarjeta Galil Motion para soporte y referencia.



Analog Servo Drive

BE12A6

PIN FUNCTIONS

P1 - Signal Connector			
Pin	Name	Description / Notes	I/O
1	+5V 3mA OUT	±5 V @ 3 mA low power supply for customer use. Short circuit protected. Reference ground common with signal ground.	O
2	SIGNAL GND		GND
3	-5V 3mA OUT		O
4	+REF IN	Differential Reference Input (±10 V Operating Range, ±15 V Maximum Input)	I
5	-REF IN		I
6	ENCODER-B IN	Single-ended encoder channel B input. +5 V logic level.	I
7	ENCODER-A IN	Single-ended encoder channel A input. +5 V logic level.	I
8	CURRENT MONITOR	Current Monitor. Analog output signal proportional to the actual current output. Scaling is 2 A/V. Measure relative to signal ground.	O
9	INHIBIT IN	TTL level (+5 V) inhibit/enable input. Leave open to enable drive. Pull to ground to inhibit drive. Inhibit turns off all power devices.	I
10	+V HALL 30mA OUT	Low Power Supply For Hall Sensors (+6 V @ 30 mA). Referenced to signal ground. Short circuit protected.	O
11	GND	Signal Ground	GND
12	HALL 1	Single-ended Hall/Commutation Sensor Inputs (+5 V logic level)	I
13	HALL 2		I
14	HALL 3		I
15	VEL MONITOR OUT	Velocity Monitor. Analog output proportional to motor speed. In Encoder Velocity mode, output is proportional to the encoder line frequency. Encoder Velocity scaling is 22 kHz/V.	O
16	FAULT OUT	TTL level (+5 V) output becomes high when power devices are disabled due to at least one of the following conditions: inhibit, invalid Hall state, output short circuit, over voltage, over temperature, power-up reset.	O

P2 - Power Connector			
Pin	Name	Description / Notes	I/O
1	MOTOR A	Motor Phase A	O
2	MOTOR B	Motor Phase B	O
3	MOTOR C	Motor Phase C	O
4	POWER GND	Power Ground (Common With Signal Ground)	GND
5	HIGH VOLTAGE	DC Power Input	I

HARDWARE SETTINGS

Switch Functions

Switch	Description	Setting	
		On	Off
1	Open-loop mode selector. Activates internal PWM feedback.	Open-loop mode	Other modes
2	60/120 degree commutation phasing setting	120 degrees	60 degrees
3	Outer loop integration. Activates or deactivates integration. ON, by default, for current mode and OFF for other modes.	Inactive	Active
4	Test/Offset. Switches the function of the Test/Offset pot between an on-board command input for testing or a command offset adjustment. OFF by default.	Test	Offset

Mode Selection Table

	SW1	SW3	Encoder
CURRENT	OFF	ON	Not Connected
OPEN LOOP	ON	OFF	Not Connected
ENCODER VELOCITY*	OFF	OFF	Connected

*NOTE: Interchange P1-6 and P1-7 to change feedback polarity. This may be required to prevent a run-away condition.

Potentiometer Functions

Potentiometer	Description	Turning CW
1	Loop gain adjustment for open loop / velocity modes. Turn this pot fully CCW in current mode.	Increases gain
2	Current limit. It adjusts both continuous and peak current limit while maintaining their ratio.	Increases limit
3	Reference gain. Adjusts the ratio between input signal and output variables (voltage, current, or velocity).	Increases gain
4	Offset / Test. Used to adjust any imbalance in the input signal or in the amplifier. Can also be used as an on-board signal source for testing purposes.	Adjusts offset in negative direction

Note: Potentiometers are approximately linear and have 12 active turns with 1 inactive turn on each end.

Through-hole Components†

Location	Description
C8*	Velocity Loop Integrator. Through-hole capacitor that can be added for more precise velocity loop tuning. See section below on Tuning with Through-hole components for more details.

Tuning With Through-hole Components

In general, the drive will not need to be further tuned with through-hole components. However, for applications requiring more precise tuning than what is offered by the potentiometers and dipswitches, the drive can be manually modified with through-hole resistors and capacitors as denoted in the above table. By default, the through-hole locations are not populated when the drive is shipped. Before attempting to add through-hole components to the board, consult the section on loop tuning in the installation notes on the manufacturer's website. Some general rules of thumb to follow when adding through-hole components are:

- A larger resistor value will increase the proportional gain, and therefore create a faster response time.
- A larger capacitor value will increase the integration time, and therefore create a slower response time.

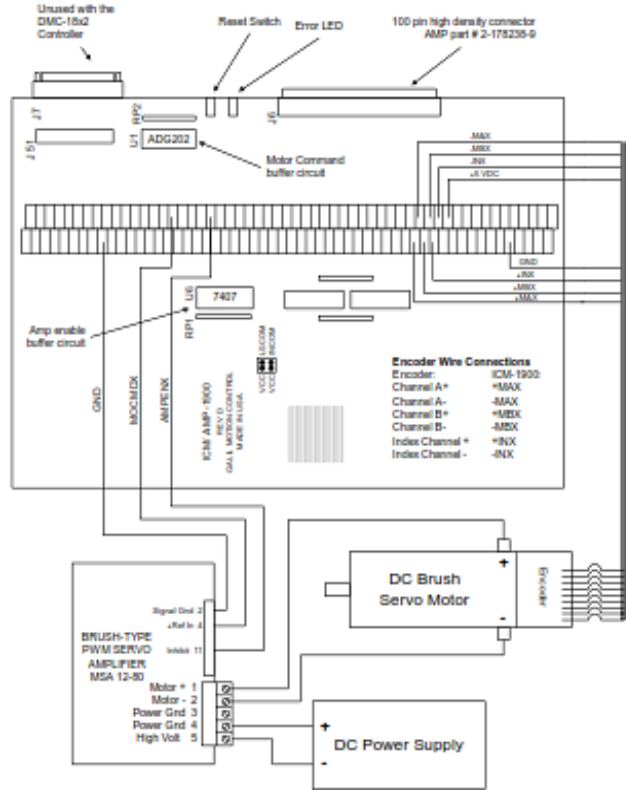
Proper tuning using the through-hole components will require careful observation of the loop response on a digital oscilloscope to find the optimal through-hole component values for the specific application.

†Note: Damage done to the drive while performing these modifications will void the warranty.

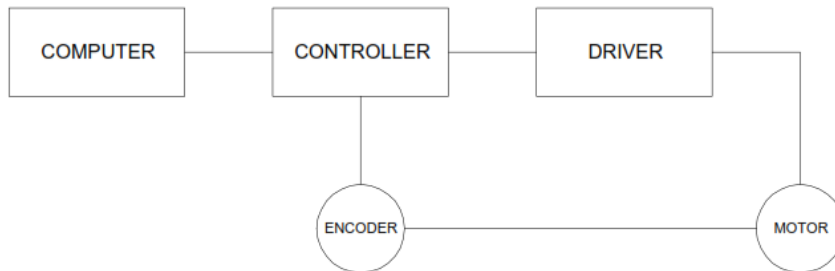
MECHANICAL INFORMATION

P1 - Signal Connector	
Connector Information	18-pin, 2.54 mm spaced, friction lock header
Mating Connector	Details
	Included with Drive

P2 - Power Connector	
Connector Information	5-port, 5.08 mm spaced, screw terminal
Mating Connector	Details
	Included with Drive

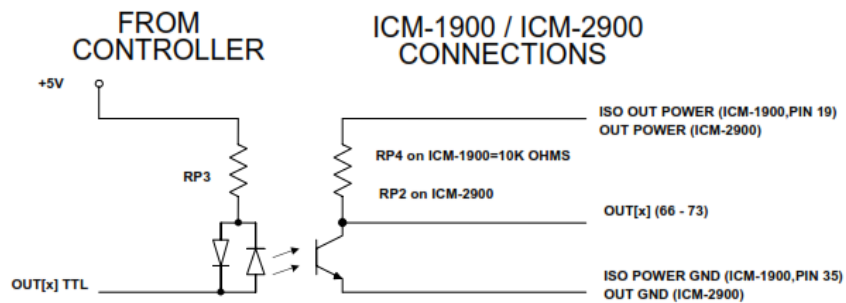


Lazo de control que se verifico con hardware comercial.



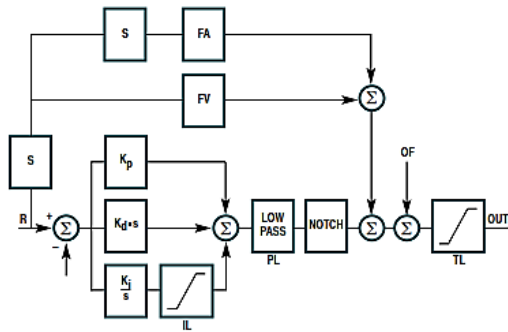
Elements of Servo Systems

Sistema de conexión e integración básica de hardware

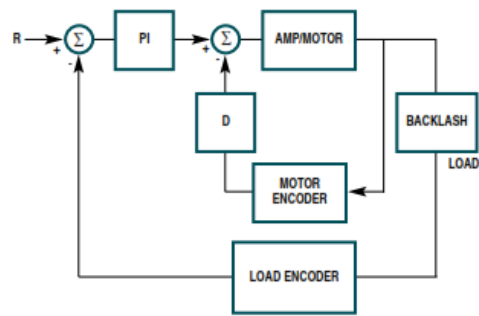


Esquema de control de referencia

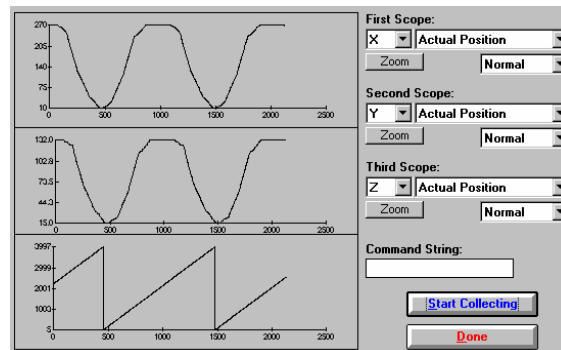
PID Block Diagram



Dual-loop Block Diagram



Verificación de posición (X,Y,Z) en tres de los ejes con tarjeta Galil Motion.



Anexo 4

Programas utilizados.

Programacion en C++

Programa en C++ utilizado para controlar el Robot

```
#include<dos.h>
#include<math.h>
#include<conio.h>
#include<stdio.h>

#define Base 0x220
#define S3 0.5
#define S4 0.7
#define S5 2.2

#define Byte2Word(x,y) ((x<<8) | y)
#define Delta(x,y) (x-y)

typedef struct{
    float q,
        q_ant,
        err_act,
        err_ant,
        delta,
        kp,
        kd,
        u;
}Motor;

float ADC(char Channel);
void DAC(float Voltaje,char Channel);
Motor Inicializa(Motor MotorX);

int main()
{
    Motor Motor1,Motor2,Motor3;
    /* Posiciones deseadas */
    float qd1=1.85,qd2=2.5,qd3=2.5;
    FILE *Arch;

    clrscr();

    if ((Arch = fopen("\\Dat0.txt", "w+")) == NULL)
    {
        fprintf(stderr, "Cannot open input file.\n");
        return 1;
    }

    /* Inicializa la estructura para cada motor con valores iniciales de cero */
    Motor1=Inicializa(Motor1);
```

```

Motor2=Inicializa(Motor3);
Motor3=Inicializa(Motor3);

/* Parametros de cada motor */
Motor1.kp=30.0;
Motor1.kd=0.0;
Motor2.kp=5.5;
Motor2.kd=0.5;
Motor3.kp=5.5;
Motor3.kd=0.5;

outportb(Base+9,0);//Configura registro de ganancia x1
outportb(Base+11,1);//Habilita disparo por software

Motor2.u=0.0;
DAC((Motor2.u+6)*(45.9/110.0),0);//Saca voltaje de mando para articulacion q1
Motor2.u=0.0;
DAC((Motor2.u+6)*(45.9/110.0),1);//Saca voltaje de mando para articulacion q1

getch();

while(!kbhit())
{
/* Actualiza posicion actual, la despliega y almacena la posicion anterior */
Motor1.q_ant=Motor1.q;
Motor1.q=ADC(0);
gotoxy(10,10);printf("Posicion Voltaje para q1: %f      ",Motor1.q);

/* Actualiza posicion actual, la despliega y almacena la posicion anterior */
Motor2.q_ant=Motor2.q;
Motor2.q=ADC(1);
gotoxy(10,11);printf("Posicion Voltaje para q2: %f      ",Motor2.q);

/* Actualiza posicion actual, la despliega y almacena la posicion anterior */
Motor3.q_ant=Motor3.q;
Motor3.q=ADC(2);
gotoxy(10,12);printf("Posicion Voltaje para q3: %f      ",Motor3.q);

/* Obtiene la diferencia entre la posicion actual y la anterior */
Motor1.delta=Delta(Motor1.q,Motor1.q_ant);
Motor2.delta=Delta(Motor2.q,Motor2.q_ant);
Motor3.delta=Delta(Motor3.q,Motor3.q_ant);

/*Actualiza el error actual y registra error anterior */
Motor1.err_ant=Motor1.err_act;
Motor1.err_act=qd1-Motor1.q;

/*Actualiza el error actual y registra error anterior */
Motor2.err_ant=Motor2.err_act;
Motor2.err_act=qd2-Motor2.q;

/*Actualiza el error actual y registra error anterior */
Motor3.err_ant=Motor3.err_act;
Motor3.err_act=qd3-Motor3.q;

/* Controlador para Motor1 */

```

```

    Motor1.u= Motor1.q * Motor1.err_act - Motor1.kd * Motor1.delta;
    if(Motor1.u>3.0)
        Motor1.u=3.0;
    if(Motor1.u<-3.0)
        Motor1.u=-3.0;

    /* Controlador para Motor2 */
    Motor2.u= Motor2.kp * Motor2.err_act - Motor2.kd * Motor2.delta + S5 *
sin(Motor2.q) + S3 * sin(Motor2.q + Motor3.q);
    if(Motor2.u>3.0)
        Motor2.u=3.0;
    if(Motor2.u<-3.0)
        Motor2.u=-3.0;

    /* Controlador para Motor3 */
    Motor3.u= Motor3.kp * Motor3.err_act - Motor3.kd * Motor3.delta + S4 *
sin(Motor2.q + Motor3.q);
//    Motor3.u*=(-1.0);
    if(Motor3.u>3.0)
        Motor3.u=3.0;
    if(Motor3.u<-3.0)
        Motor3.u=-3.0;
//    Motor1.u=1.2;
//    DAC((Motor1.u+6)*(45.9/110.0),0);//Saca voltaje de mando para articulacion q1

    DAC((Motor2.u+6)*(45.9/110.0),0);//Saca voltaje de mando para articulacion q1
    delay(1);

    DAC((Motor3.u+6)*(45.9/110.0),1);//Saca voltaje de mando para articulacion q1
    delay(1);

    fprintf(Arch, "%0.4f\t%0.4f\t%0.4f\t%0.4f\t%0.4f\t%0.4f\t\n", Motor1.q, Motor2.q, Motor3.q, Moto
r1.u, Motor2.u, Motor3.u);
    }

    Motor2.u=0.0;
    DAC((Motor2.u+6)*(45.9/110.0),0);//Saca voltaje de mando para articulacion q1
    Motor2.u=0.0;
    DAC((Motor2.u+6)*(45.9/110.0),1);//Saca voltaje de mando para articulacion q1
    fclose(Arch);
    return 1;
}

float ADC(char Channel)
{
    int Dato=0,Alto=0,Bajo=0;
    outportb(Base+10,Channel);//Selecciona Canal
    outportb(Base+12,0);//Inicia Conversion
    while(inportb(Base+5) & 0x10);//Espera el Fin de Conversion
    Alto=inportb(Base+5);//Leer Byte Alto del Resultado
    Bajo=inportb(Base+4);//Leer Byte Bajo del Resultado
    Dato=Byte2Word(Alto,Bajo);//Une los Bytes en un Dato de 16 Bits
    return(Dato/409.6-5.0);//Devuelve el valor del Voltaje Leido
}

void DAC(float Voltage,char Channel)

```

```

{
char alto=0,bajo=0;
int Dato=0;
Channel&=0x01;
Dato=(Voltage*4096.0)/5.0;
alto=Dato>>8;
bajo=Dato & 0xff;
outportb(Base+4+(Channel<<1),bajo);
outportb(Base+5+(Channel<<1),alto);
}

```

```

Motor Inicializa(Motor MotorX)

```

```

{
    MotorX.q=0,
    MotorX.q_ant=0,
    MotorX.err_act=0,
    MotorX.err_ant=0,
    MotorX.delta=0,
    MotorX.kp=0,
    MotorX.kd=0,
    MotorX.u=0;
    return MotorX;
}

```

Programa en Matlab utilizado para presentar los resultados gráficos

```

clear all
close all
clc
Datos=load('conx1.txt','txt');
%q indica posicion, u (variable de control) indica voltaje aplicado para llegar a la posicion
%que deseo
q1=Datos(:,1);
q2=Datos(:,2);
q3=Datos(:,3);
u1=Datos(:,4);
u2=Datos(:,5);
u3=Datos(:,6);
y(1)=q2(1);
%a=0.95;
%k=0.05;
a=0.97;
k=0.03;
for i=2:length(q2)
    y(i)=a*y(i-1)+k*q2(i-1);
end
figure(1)
plot(y,'r')
%plot(q2)
title('POSICION FINAL qd2=2.80 Kp=5.50 Kd=0.50')

```

```

%grid
y(1)=q3(1);
%a=0.95;
%k=0.05;
a=0.97;
k=0.03;
for i=2:length(q3)
    y(i)=a*y(i-1)+k*q3(i-1);
end
plot(y)

%plot(q3)
title('POSICION FINAL qd3=3.575 Kp=5.5 Kd=0.50')
grid
%figure
hold off
y(1)=u1(1);
%a=0.95;
%k=0.05;
a=0.97;
k=0.03;
for i=2:length(u1)
    y(i)=a*y(i-1)+k*u1(i-1);
end
figure(2)
plot(y)
%plot(u1)
xlabel('T I E M P O  mS')
ylabel('P O S I C I O N')
grid
y(1)=u2(1);
%a=0.95;
%k=0.05;
a=0.97;
k=0.03;
for i=2:length(u2)
    y(i)=a*y(i-1)+k*u2(i-1);
end
figure(3)
plot(y)
%plot(u2)
title('VARIABLE DE CONTROL (VOLTAJE APLICADO A q2)')
xlabel('T I E M P O  mS')
ylabel('V O L T A J E ')
grid
y(1)=u3(1);
%a=0.95;

```



```
%k=0.05;
a=0.97;
k=0.03;
for i=2:length(u3)
    y(i)=a*y(i-1)+k*u3(i-1);
end
figure(4)
plot(y)
%plot(u3)
title('VARIABLE DE CONTROL (VOLTAJE APLICADO A q3)')
xlabel('T I E M P O  mS')
ylabel('V O L T A J E ')
grid
```

Anexo 5

Diseño en SolidWorks

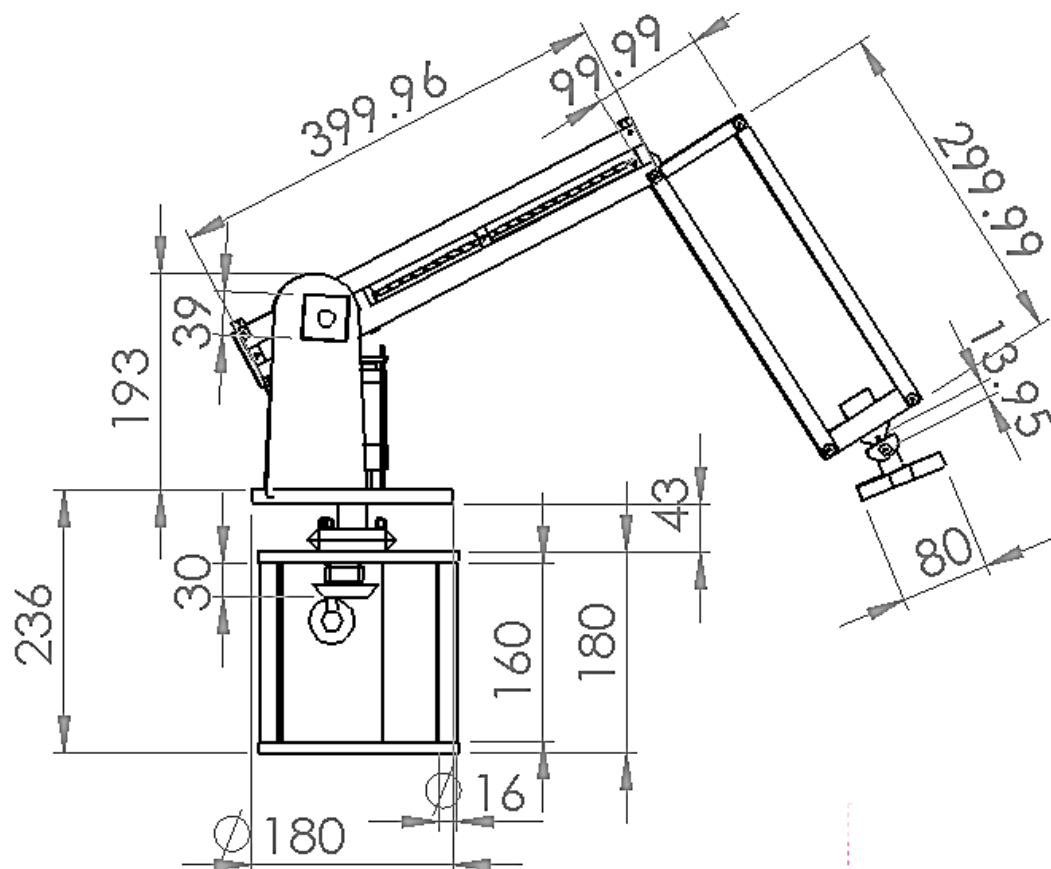


Figura A.5.1. Vistas lateral del robot.

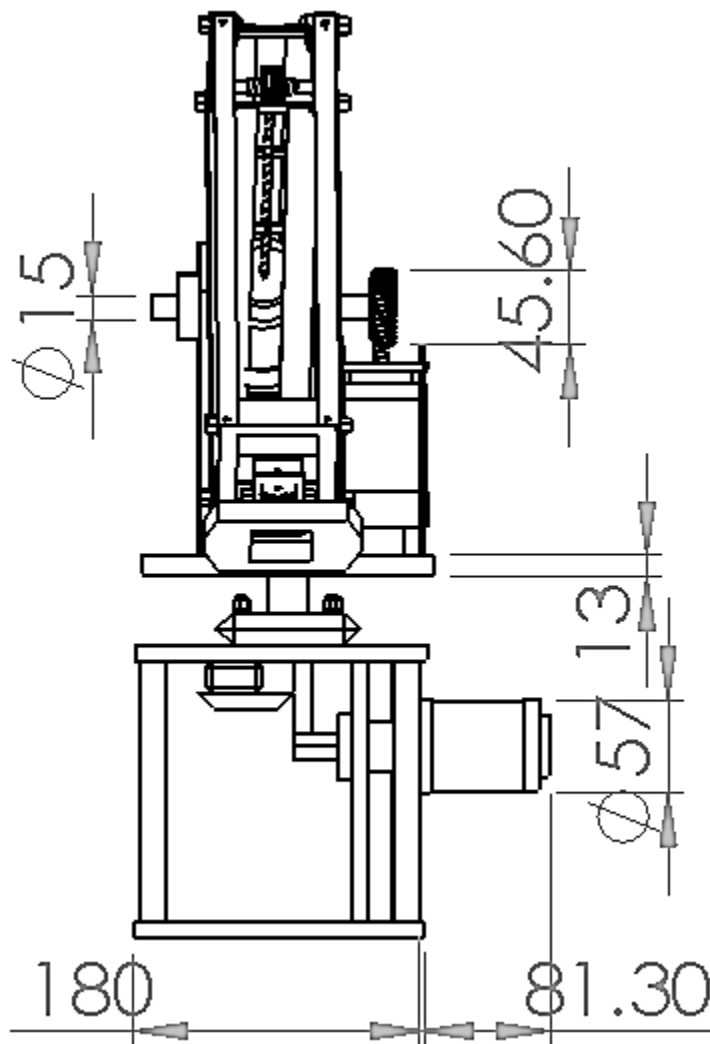


Figura A.5.1.1 Vista frontal del robot.

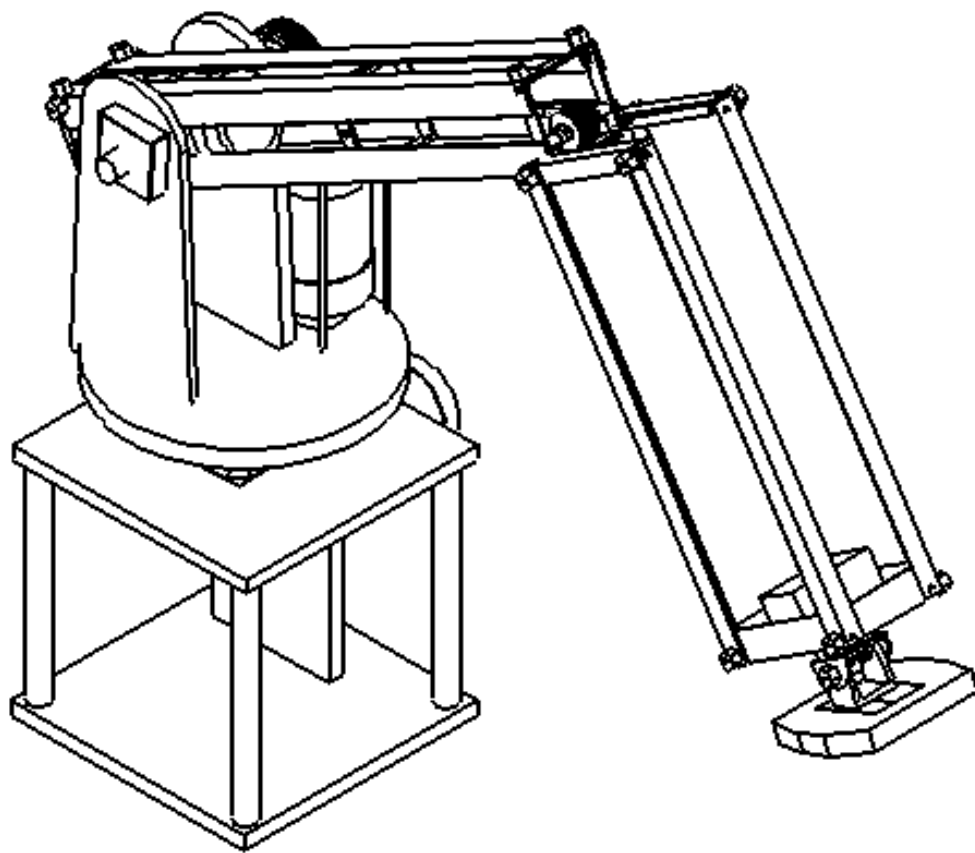
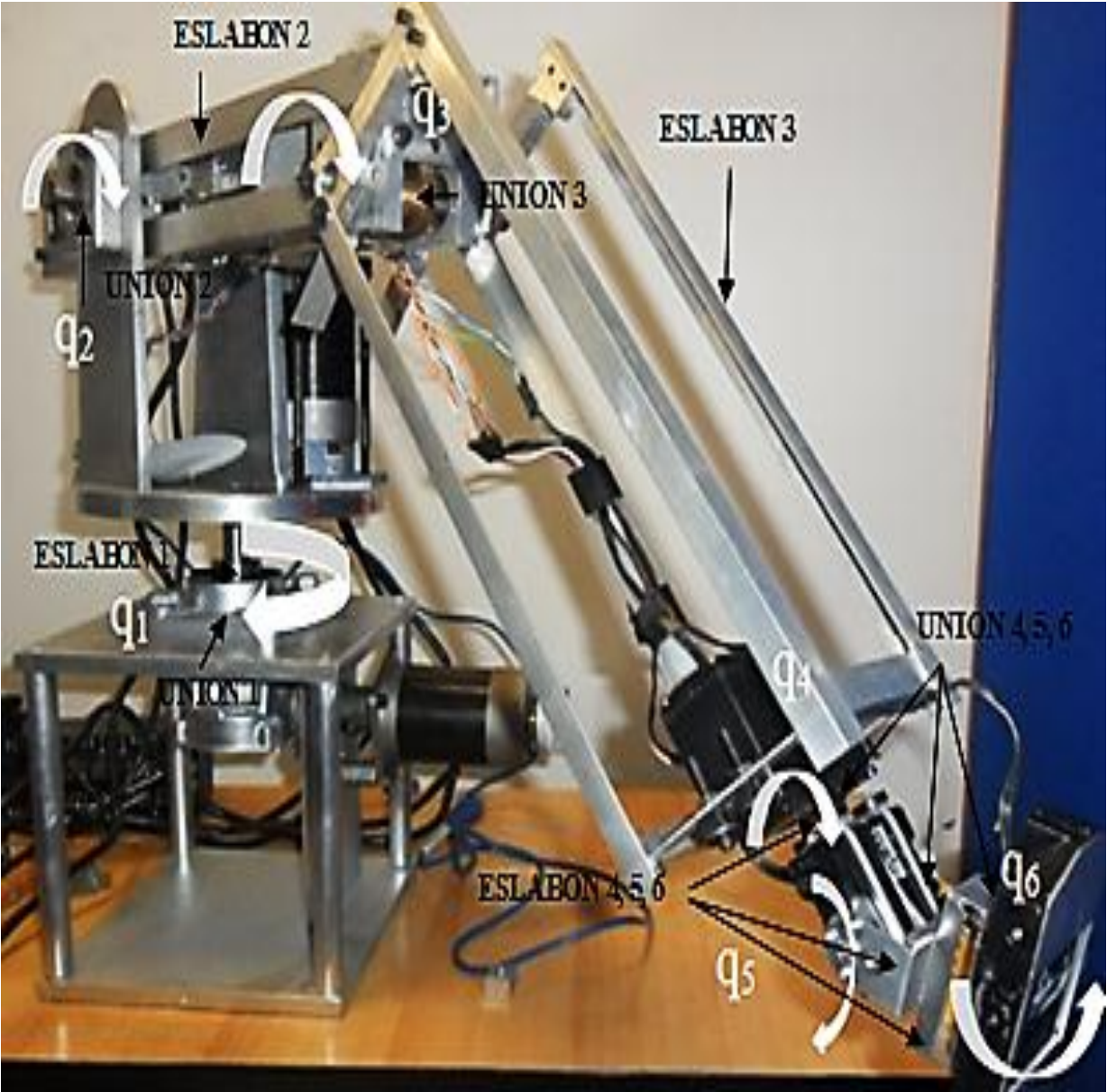


Figura A.5.2 Isométrico del robot.

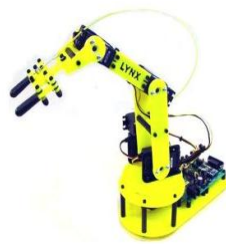


Anexo 6

Estudio de Mercado

En un estudio de mercado se encontró que hay robots didácticos con un precio que no es accesible para las escuelas, estos robots son capaz de de realizar movimientos rápidos y precisos de forma repetida. Los ejes que incluyen son de rotación de la base, hombro, codo y muñeca, posibilitando de esta manera varios movimientos independientes. Entre sus usos mas frecuentes, caben destacar: Aficionados a la robótica, enseñanza en escuelas y universidades, demostraciones y presentaciones, experimentos de inteligencia artificial, etc. Los robots que presentamos son comparados con el robot didáctico que se plantea en este proyecto.

Brazo Robot 5 Ejes PC S300105



Número de Ejes:	5 Incluyendo la pinza
Control de los servos:	Bucle cerrado local
Altura en reposo:	140 mm
Altura máxima:	368 mm
Alcance (adelante):	279 mm
Apertura de la pinza:	50 mm
Carga máxima extendido:	85 g / 3 oz aprox
Peso sin baterías:	603 g / 21.3 oz

Rango de giro por eje:	90° o 180 ° seleccionable
Precisión en cada eje:	.36° o .72° seleccionable
Consumo en movimiento:	130 mA cada servo
Velocidad de los servos:	90° en .24 segundos
Consumo del SSC:	4.7 mA

Precio \$9,700.00 dlls.

Brazo Manipulador LWR-UC3M-1.

Número de Ejes:	6 Incluyendo la pinza
Control de los servos:	Bucle cerrado local
Altura en reposo:	240 mm
Altura máxima:	1250 mm
Alcance (adelante):	955 mm
Carga máxima extendido:	3 Kg
Peso total: aprox.	18 Kg.
Reductores	Harmonic drive
Fabricado en	Aluminio y fibra de carbono.
Motores D.C.	Brushless (sin escobillas)

Costo \$ 18,000.00 dlls.

Robot Cobra 600



Número de Ejes:	4 Incluyendo la pinza
Control de los servos:	Bucle cerrado local
Altura en reposo:	600 mm
Altura máxima:	600 mm

Alcance (adelante):	1250 mm
Carga máxima extendido:	5 Kg
Peso total: aprox.	34 kg
Reductores	Harmonic drive
Fabricado en	Aluminio y Acero inoxidable
Motores D.C.	Brushless (sin escobillas)

Costo \$30,000 dls.

Las características de los robots mostrados son similares al robot didáctico construido, pero hay que resaltar que la arquitectura de estos robots comerciales es cerrada, sin ninguna posibilidad de poder realizar una reprogramación de su software de fábrica y cambio de mecanismos, a diferencia del propuesto en este proyecto.

El robot didáctico que se construyó tiene un costo aproximado de \$15,000.00 y el principal objetivo es que sirva para realizar prácticas e investigación en la U.A.Q. en el área de Robótica y Control. Por esta razón lo utilizaremos para probar controladores como el PD más compensación de la gravedad que es la otra parte de este trabajo.