

BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA
Facultad de Ciencias de la Computación



Control de Posición de un Eslabón conectado a un Motor de
Transmisión Directa

TESIS PROFESIONAL

PARA OBTENER EL TÍTULO DE
LICENCIADO EN CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN

PRESENTA

Asaf López Escobar

ASESOR

M.C. Apolonio Ata Pérez

COASESOR

Dr. Alejandro Rangel Huerta

Resumen

Los sistemas de control son parte importante en el desarrollo tecnológico y hoy en día son indispensables en el avance de la civilización moderna. Actualmente la industria es inconcebible sin algún tipo de control que le garantice que todos sus procesos se ejecuten de forma eficiente y precisa.

Con el avance tecnológico, los procesos a controlar se hicieron cada vez más complejos, ante lo cual se requirió de herramientas que facilitan el monitoreo y control de estos procesos. Las computadoras personales (PC's) permiten este monitoreo, ya que son capaces de procesar grandes cantidades de información y brindar respuestas confiables. Para ello las PC's requieren de tarjetas de adquisición de datos. Gracias al control por computadora es más fácil el monitoreo de los grandes procesos industriales actuales, como por ejemplo, el control de robots manipuladores en las líneas de ensamble de las grandes plantas automotrices.

En la presente tesis, con base en el sistema propuesto en [9], se desarrolla un Sistema de Control en lazo cerrado a un motor de transmisión directa conectado a un eslabón de un brazo robótico a través de una PC, aplicando un controlador proporcional y un controlador proporcional integral. Este sistema permite posicionar al motor de forma rápida y precisa en una posición deseada. Para ello nos ayudamos de dos tarjetas de adquisición de datos (DAQS) que nos permiten establecer la comunicación entre el motor y la PC. Una tarjeta nos permite leer la posición del motor y la otra enviar los voltajes necesarios para desplazar al motor a la posición deseada.

Abstract

Control systems were an important part in the technological development and nowadays they are indispensable in the advance of the modern civilization. Currently, industry cannot be conceived without any kind of Control, which allows industry to guarantee that all its processes execute in an efficient and precise way.

With advances in technology, processes to being controlled became more complex, which demanded a tool that would facilitate the monitoring and control of these processes. Personal computers (PC's) allowed such monitoring because computers are capable to process a large amount of information and give reliable answers. For that the PC's need the help of the Data acquisition cards. Because of the control per computers control and monitoring of the currently industrial processes became easier, for example, the control of the industrial manipulators robots.

In this thesis, based in the system proposed in [9], a closed loop Control System to a DC motor connected to a robotic arm by using a proportional controller and an integral proportional controller is developed. This system allows to place the motor in a desired position in an quick and precise way. To achieve this we need to use two data acquisition cards(DAQs) which let to establish the communication between the PC and the motor. One card reads the shaft position of the motor and the another one sends the voltages necessary to move the motor.

Agradecimientos

Deseo agradecer a **mis padres** por ser la base de mi vida y un ejemplo a seguir. Este trabajo es de ustedes, fruto de sus sacrificios, amor y espera infinita.

A **mis hermanos** por el apoyo brindado en todo momento.

Deseo expresar mi más sincero agradecimiento a mi asesor de tesis MC. **Apolonio Ata Pérez** y a mi coasesor Dr. **Alejandro Rangel Huerta** por su apoyo, su paciencia y orientación constante durante la elaboración de mi tesis, pero sobre todo, por su amistad invaluable.

A la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (**BUAP**) por la excelente formación académica otorgada y los apoyos facilitados.

A todos los miembros de **mi familia**, ya que sin su apoyo y cariño no habría sido posible llevar a feliz término la elaboración del presente trabajo.

Especial agradecimiento a **Guadalupe, Angeles y Juan Antonio**, por su confianza, apoyo incondicional, y sobre todo por su maravillosa amistad.

Agradezco a la **Dra. Lourdes Sandoval** por la ayuda prestada para la realización de esta tesis, mil gracias.

A todos **mis amigos** por su amistad invaluable y su apoyo en los momentos difíciles.

Índice general

Resumen	I
Abstract	II
Agradecimientos	III
Índice General	IV
Lista de Figuras	VII
Lista de Tablas	IX
Capítulo 1. Introducción	1
Capítulo 2. Sistemas de Control Y Controladores	3
2.1. Introducción	3
2.2. Breve Historia del Control	4
2.3. Sistemas de Control	8
2.3.1. Sistemas de Control en Lazo Abierto	10
2.3.2. Sistemas de Control en Lazo Cerrado	11
2.4. Controladores	12
2.4.1. Controlador On/Off	13
2.4.2. Controlador Proporcional (P).	14
2.4.3. Controlador Integral (I).	15
2.4.4. Controlador Derivativo (D).	16
2.4.5. Controlador Proporcional Integrativo (PID).	16
2.5. Tipos de Control	17

2.5.1. Control Adaptativo	18
2.5.2. Control Robusto	20
2.5.3. Control Óptimo	21
2.5.4. Control Estocástico	24
2.5.5. Control Predictivo	24
2.5.6. Control de Trayectoria	26
2.5.7. Control de Movimiento	28
Capítulo 3. Motores y Tarjetas de Adquisición de Datos	31
3.1. Introducción	31
3.2. Motores.	32
3.2.1. Motores de Corriente Directa.	33
3.2.2. Motores Paso a Paso.	35
3.2.3. Motores de Transmisión Directa.	36
3.2.4. Comparativa entre un motor de Transmisión Directa y un motor de Corriente Directa.	37
3.2.5. Dynaserv Motor de Transmisión Directa.	39
3.3. Tarjetas de Adquisición de Datos	40
3.3.1. Características de las Tarjetas de Adquisición de Datos.	42
3.3.2. Tarjeta Decodificadora de Cuadratura(PCL-833).	44
3.3.3. Tarjeta Convertidora de D/A(PCI-1720).	47
Capítulo 4. Sistema de Control PI de Posición	50
4.1. Introducción	50
4.2. Módulo de Sensor de Posición	52
4.3. Módulo de Movimiento del Motor	56
4.4. Módulo de Control	62
4.5. Software PI de Control de Posición	65
Capítulo 5. Pruebas Y Resultados	72
5.1. Introducción	72
5.2. Posicionamiento del motor.	73
5.3. Seguimiento de una Onda Cuadrada	80
5.4. Conclusiones	81
5.5. Trabajo Futuro	83

ÍNDICE GENERAL	VI
Bibliografía	84
Referencias	85

Lista de Figuras

2.1. Regulador Flotante de Ketsibios	5
2.2. Regulador Centrífugo de Watt	6
2.3. Diagrama básico de un Sistema de Control	10
2.4. Diagrama de un Sistema de Control en Lazo Abierto	11
2.5. Diagrama de un Sistema de Control en Lazo Cerrado	11
2.6. Comportamiento de un controlador On/Off	14
2.7. Comportamiento de un controlador Proporcional	15
2.8. Diagrama a bloques de un Control Adaptativo	19
2.9. Planteamiento de un Sistema de Control Robusto	22
2.10. Estructura básica de un Controlador Predictivo.	26
2.11. Control de Trayectoria en lazo cerrado.	28
3.1. Motor de Corriente Directa	33
3.2. Estator de un motor de corriente directa	34
3.3. Rotor de un motor de corriente directa	35
3.4. Esquema de un Motor de Transmisión Directa	36
3.5. Funcionamiento de un Motor de Transmisión Directa	37
3.6. Motor de Corriente Directa VS Motor de Transmisión Directa.	38
3.7. Dynaserv Motor de Transmisión Directa	40
3.8. Proceso de Adquisición de Datos	42
3.9. Tarjeta Decodificadora de Cuadratura de 3 ejes(PCL-833)	44
3.10. Asignación de Pins del Conector DB-25 de la PCL-833	46
3.11. Encoder de Cuadratura	47
3.12. Tarjeta Convertidora D/A de 4 canales de salida(PCI-1720)	48
3.13. Asignación de Pins del Conector DB-37 de la PCI-1720	49

4.1. Diagrama de Bloques del Sistema de control PI de Posición	51
4.2. Componentes del Módulo de Sensor de Posición.	53
4.3. Configuración de los pines del conector CN1 del driver.	54
4.4. Conexión de la PCL-833 con los motores.	55
4.5. Componentes del Módulo de Movimiento del Motor.	57
4.6. Configuración Pines del conector CN1 del Driver	58
4.7. Conexión de la PCI-1720 con el Driver del Motor	59
4.8. Conexión entre los drivers y las tarjetas de adquisición de datos. . . .	61
4.9. Diagrama de Flujo del Controlador PI	64
4.10. Ventana Inicial del Software de Control PI de Posición	66
4.11. Ventana Principal del Software PI de Control de Posición	68
4.12. Sección del Software PI de Control de Posición donde se ejecuta el algoritmo PI	69
4.13. Sección del Software PI de Control de Posición donde se ejecuta el algoritmo PI siguiendo un pulso cuadrado	70
4.14. Sección del Software PI de Control de Posición Integral donde se manda un voltaje al motor sin aplicar algoritmo alguno	70
4.15. Sección del Software PI de Control de Posición donde se traza la gráfica que ilustra el comportamiento del Algoritmo	71
5.1. Primera prueba de posicionamiento aplicando únicamente un control proporcional.	74
5.2. Segunda prueba de posicionamiento aplicando únicamente un control proporcional.	75
5.3. Tercera prueba de posicionamiento aplicando únicamente un control proporcional.	76
5.4. Primera prueba de posicionamiento aplicando un control proporcional integral.	77
5.5. Prueba de posicionamiento aplicando únicamente un control proporcional integral.	79
5.6. Prueba de seguimiento de un pulso cuadrado aplicando un control proporcional.	80
5.7. Prueba de seguimiento de un pulso cuadrado aplicando un control proporcional integral.	81

Lista de Tablas

2.1. Ejemplos de acciones de control en sistemas comunes.	17
4.1. Correspondencia entre los pines de los conectores DB-25 de la PCL-833 y los pines de los drivers del motor.	56
4.2. Correspondencia entre los pines de los conectores DB-37 de la PCI-1720 y los pines de los drivers del motor.	60
4.3. Conexión final entre las tarjetas y los motores.	62

Capítulo 1

Introducción

En este capítulo se presenta la descripción del problema, se muestra el contexto en el que se desarrolla la presente tesis y se explica de manera breve el contenido de cada uno de los capítulos que la conforman.

Prácticamente en cada aspecto de las actividades de nuestra vida diaria se encuentra presente algún tipo de control, desde los reguladores de temperatura usados en los hogares, los sistemas *absorbe impactos* de los reproductores de cd, los sistemas de pilotos automáticos hasta en el control de procesos en las plantas industriales modernas.

El **control automático de procesos** nació con la Revolución Industrial ante la necesidad de controlar las máquinas desarrolladas gracias a los avances tecnológicos de esa época. Prácticamente el control ha ido evolucionando junto al desarrollo tecnológico, esto debido a que los procesos a controlar fueron cada vez más complejos debido a la tecnología con la que se ha ido disponiendo, ante lo cual se requieren de herramientas que permitan un mejor control de estos procesos. Las computadoras han sido pieza fundamental en el diseño e implementación de los sistemas de control complejos, hoy en día la mayoría de los procesos industriales actuales son monitoreados y controlados a través de una computadora.

Es por ello que el estudio y diseño de Sistemas de Control Digital es importante actualmente. Dentro de la carrera de Ciencias de la Computación el análisis de sistemas de control es parte fundamental dentro de la preparación académica del estudiante, pero no se cuenta con sistemas físicos que muestren en forma práctica la

teoría aprendida en los libros.

Un Sistema de Control busca que mediante una acción de control un proceso se comporte de la manera esperada así como que el resultado (salida del proceso) sea el esperado. Tales acciones de control son las que deciden que acción se requiere ejecutar para obtener la respuesta deseada.

En [9] se aplica un control Proporcional Integral Derivativo (PID) a una cabeza de impresora usando una tarjeta convertidora de D/A. En la presente tesis, basándose en las ideas propuestas en el control PID aplicado a una cabeza de impresora, se desarrolla un sistema de control en lazo cerrado a un motor de transmisión directa conectado a un eslabón de un brazo robótico a través de una PC aplicando un controlador PI, con la ayuda de 2 tarjetas de adquisición de datos, una convertidora de D/A y una decodificadora de cuadratura que nos permitirán enviar voltajes y sensar la posición del motor respectivamente por la PC.

La presente tesis se encuentra organizada de la siguiente manera:

En el capítulo 2 se expone una introducción a los Sistemas de Control, se define al control de sistemas, se presentan los tipos básicos de sistemas de control y sus aplicaciones, así como los controladores más comunes usados en los sistemas de control. Este capítulo muestra los conceptos necesarios para comprender la parte teórica de la implementación del sistema.

En el capítulo 3 se presentan los componentes utilizados en la implementación de la parte física del sistema (planta y sensores). Se hablará de los motores de corriente directa ó continua y de los motores de transmisión directa, y se hará una comparativa entre ambos, también hablaremos de las tarjetas de adquisición de datos y en particular se dará una descripción de la PCI-1720 y de la PCL-833, que son las tarjetas usadas.

En el capítulo 4 se describe la implementación del sistema: las partes que lo componen, los algoritmos empleados así como se introduce la interfaz gráfica del sistema sobre la cual se ejecutan los algoritmos de control.

En el capítulo 5 se presentan algunos ejemplos de ejecución del sistema, así como se exponen las conclusiones y el trabajo futuro.

Capítulo 2

Sistemas de Control Y Controladores

En este capítulo se presentan, de manera breve, algunos conceptos importantes referentes al contenido de la presente tesis.

Se da una breve introducción acerca de los sistemas de control y de los controladores más usados.

2.1. Introducción

La acción de controlar implica aplicar ciertas estrategias para alcanzar ciertos objetivos deseados [6]. Los inicios del control se remontan desde el propio inicio de la humanidad, esto debido al deseo y principalmente a la necesidad del hombre de dominar su entorno en su afán de subsistencia. La búsqueda para alcanzar tales objetivos requiere de usar un sistema que implante ciertas estrategias de control. Estas estrategias usadas en un inicio fueron la observación de su entorno para crear modelos que le permitieran interactuar con el medio ambiente para resolver problemas de la vida diaria.

Básicamente en sus inicios los sistemas de control se diseñaban mediante el método de *prueba y error*, la intuición era la principal herramienta con la que se contaba, con el paso del tiempo y ante los avances tecnológicos y de las ciencias, los sistemas a controlar se volvieron más complejos, por lo que los modelos se hicieron más sofisticados, ante la complejidad de estos sistemas comenzaron a emplearse las matemáticas para

el análisis de la estabilidad de estos sistemas, surgiendo los modelos matemáticos llegando a convertirse, posteriormente, en el lenguaje de la teoría de control automático.

Un modelo matemático de un sistema real constituye una representación abstracta realizada en términos de lenguaje y simbología matemática (ecuaciones algebraicas, ecuaciones diferenciales, etc.) de las cuales resaltan propiedades importantes del sistema en estudio y nos proporciona una visión más real del sistema que reflejan un comportamiento muy preciso.

La evolución del control automático ha ido de la mano con la evolución de la tecnología. Las necesidades de la industria y los progresos tecnológicos, son los que han marcado el desarrollo del control de sistemas no lineales. Actualmente el control automático está presente en cada aspecto de nuestra vida diaria, desde los reguladores de temperatura en los hogares hasta en los sistemas de vehículos espaciales, de guiado de misiles, los sistemas de pilotos automáticos y en los procesos modernos industriales y de fabricación. La industria por ejemplo hoy en día es inconcebible sin algún sistema de control que garantice un óptimo funcionamiento de todos sus procesos.

2.2. Breve Historia del Control

Los inicios del control automático se remontan desde hace cientos de años, algunos Sistemas de Control los encontramos a lo largo de la historia de la humanidad.

Los primeros dispositivos se remontan entre los años 300 A.C y 1200 D.C. con la necesidad de los griegos y los árabes por medir de forma exacta el tiempo. El primer dispositivo realimentado fue el reloj de agua inventado por el griego Ketsibios en Egipto, aproximadamente en el tercer siglo A.C.

El reloj de agua fué implementado mediante un regulador de flotador, el cual tenía la función de mantener el nivel del agua de un tanque a una profundidad constante. Al ser la profundidad del agua constante, se produce un flujo también constante que pasa por un tubo y llena un segundo tanque. Según sea el nivel del segundo tanque

así será el tiempo transcurrido. El flotador de este reloj funcionaba de manera que mediante una válvula se controlaba el nivel del agua del tanque por lo que la misma se abría en caso de que el nivel del tanque bajara y se cerraba cuando se llegaba al nivel deseado. El flotador era el encargado de medir el nivel del tanque e indicarle a la válvula como debía permanecer[14]. La figura 2.1 muestra al regulador flotante desarrollado por Ketsibios.

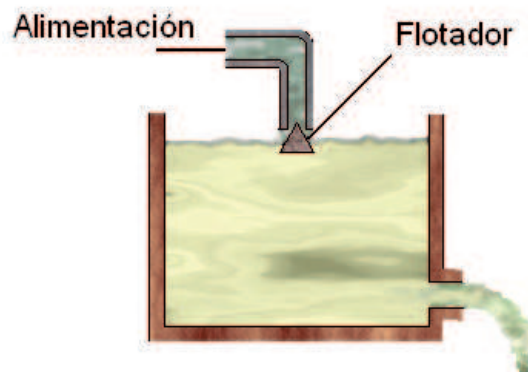


Figura 2.1: Regulador Flotante de Ketsibios

La Revolución Industrial fue un detonante de los sistemas de control automático, durante esta época surgieron los molinos de viento, las calderas y hornos avanzados, así como las máquinas de vapor. Estos dispositivos no podían regularse a mano de manera adecuada, por lo que surgió la necesidad de introducir en ellos un control automático. Ante esto se inventaron los reguladores flotantes, de temperatura y de presión, además de dispositivos para el control de velocidad.

En 1674, el físico francés Denis Papin se percató de que la temperatura de ebullición del agua y otros líquidos depende de la presión a la que están sometidos, en el año 1707 inventa el primer regulador de presión para calderas de vapor, este regulador fue una especie de regulador de seguridad semejante a la válvula de las ollas a presión.

El primer regulador con retroalimentación automática usado en un proceso industrial fue el regulador centrífugo de James Watt, este dispositivo desarrollado en 1769 para controlar la velocidad de una máquina de vapor. Este dispositivo totalmente mecánico medía la velocidad del eje motriz y utilizaba el movimiento centrífugo del volante para controlar la válvula y, por tanto, la cantidad de vapor que entraba en la

máquina. Conforme aumenta la velocidad, se elevan los contrapesos, alejándose del eje y cerrando la válvula [4]. La figura 2.2 muestra al regulador centrífugo de Watt.

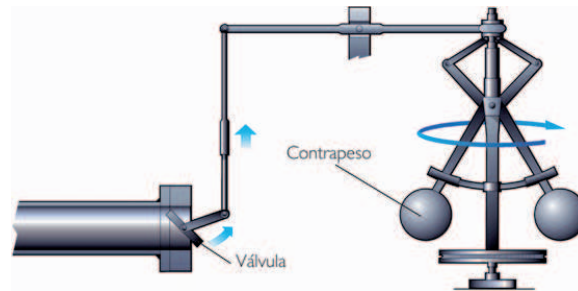


Figura 2.2: Regulador Centrífugo de Watt

El diseño de los sistemas de control realimentado antes de la Revolución Industrial estaba desarrollándose por medio de *prueba y error*, la intuición era la principal herramienta en la ingeniería, por lo que se le consideraba más un arte que una ciencia. Sin embargo, fue a mediados del año 1800, cuando se comenzó a emplear a las matemáticas para el análisis de la estabilidad de estos sistemas, llegando a convertirse, posteriormente, en el lenguaje de la teoría del control automático. Como las matemáticas es la lengua formal de la teoría del control automático, se podría llamar al período anterior la *prehistoria* de la teoría del control.

La primera herramienta matemática usada en el estudio del control fueron las ecuaciones diferenciales. En 1840 el astrónomo británico G.B. Airy estudio la estabilidad de los sistemas en lazo cerrado empleando ecuaciones diferenciales en su análisis. Airy desarrolló un dispositivo para el control del posicionamiento de un telescopio. El sistema, realimentado, permitía compensar el movimiento de rotación de la tierra, de manera que el telescopio podía permanecer largo tiempo apuntando a una determinada estrella. Desafortunadamente, Airy descubrió que, debido a un inapropiado diseño del lazo de realimentación, el sistema tendía a oscilar.

En 1868 J.C. Maxwell analizó la estabilidad del regulador de bolas de Watt. Su técnica consistía en linealizar las ecuaciones diferenciales que describían el comportamiento del sistema, y en obtener, a partir de dicha linealización, la ecuación característica del mismo. Maxwell estudió el efecto que los diferentes parámetros del sistema

tenían sobre la estabilidad, y demostró que el sistema era estable si las raíces de la ecuación característica (polos) tenían parte real negativa. Con el trabajo de Maxwell podemos afirmar que la teoría de control comenzó a establecerse firmemente.

Hasta principios del siglo XX el análisis matemático de los Sistemas de Control era empleando las ecuaciones diferenciales, pero gracias al desarrollo de los teléfonos y los avances de la comunicación se empezó a usar el análisis en el dominio de la frecuencia. Esto en gran parte a los estudios que se realizaron para resolver el ruido que se amplificaba con los amplificadores repetidores necesarios en la implementación de las primeras redes de comunicación que se extendían a distancias muy grandes.

En la primera mitad del siglo XX se observan dos factores importantes que contribuyeron a generar avances en cuanto al control en el dominio de la frecuencia; primero la necesidad industrial de tener instrumentos capaces de medir, grabar y controlar presiones y otras variables, y la segunda fue la necesidad surgida durante las guerras mundiales con el avance tecnológico al buscar contar con el mejor y más sofisticado armamento.

Ya en 1922 lo valioso de un controlador PID (Proporcional Integral Derivativo) había sido mostrado por Minorsky. La función proporcional se conocía desde el comienzo del relé. Sin embargo, la parte integral no se conoció hasta 1920 y la derivativa en 1930.

Algunos ejemplos de sistemas desarrollados entre el periodo de las dos guerras podemos citar entre otros un motor de vapor que además incluía el principio de realimentación, y que sirvió en el barco más grande y avanzado de ese momento. Con la primera guerra mundial un problema delicado fue el control de las aeronaves de esa época; los aviones debían ser sumamente maniobrables y se disponía de una gran gama de instrumentos indicadores, como los horizontes artificiales y los estabilizadores que eran necesarios para el bombardeo. Después de 1918 se incrementó el interés por el avión teledirigido y el piloto automático. Se puede observar entonces que un problema durante el período de las guerras mundiales, fue el control de la exactitud en el posicionamiento de las armas a bordo de barcos y aviones en movimiento.

En la última parte de este siglo, las necesidades de la industria y los progresos tecnológicos son los que han marcado el desarrollo del control de sistemas no lineales.

La teoría de control clásica (época marcada por el análisis en el dominio de la frecuencia) era muy apropiada para los problemas de diseños de control que se presentaron durante y después de las Guerras Mundiales, en el que los sistemas eran lineales, pero conforme las plantas modernas con muchas entradas y salidas se volvieron más y más complejas, la descripción de un sistema de control moderno requirió una gran cantidad de ecuaciones. La teoría de control clásica que trata de los sistemas con una entrada y una salida, pierde su solidez ante sistemas con entradas y salidas múltiples.

La teoría de control moderna (referida de nuevo al dominio del tiempo)comenzaba a requerir herramientas para resolver las complicadas ecuaciones matriciales no lineales que se planteaban. Por fortuna, en 1960 se realizaron grandes avances en el campo de la tecnología digital. De no ser por las computadoras, la teoría de control moderna hubiera visto muy limitadas sus aplicaciones. Desde 1960 debido a que la disponibilidad de las computadoras digitales hizo posible el análisis en el dominio del tiempo de sistemas complejos, la teoría de control moderna, basada en el análisis en el dominio del tiempo y la síntesis a partir de variables de estados, se ha desarrollado para enfrentar la creciente complejidad de las plantas modernas y los requerimientos limitativos respecto a la precisión, el peso y el coste en aplicaciones militares, espaciales e industriales.

2.3. Sistemas de Control

Antes de analizar los Sistemas de Control, es preciso definir algunos términos básicos.

Variable controlada y variable manipulada: La variable *controlada* es la cantidad o condición que se mide y controla. La variable *manipulada* es la cantidad o condición que el controlador modifica para afectar el valor de la variable controlada.

Plantas: Una planta puede ser una parte de un equipo, un conjunto de elementos de una máquina que funcionan juntos, y cuyo objetivo es efectuar una operación particular. En esta tesis se llamará planta a cualquier objeto físico que se va a controlar.

Procesos: Un proceso es cualquier operación que se va a controlar.

Sistemas: Un sistema es una combinación de componentes que actúan juntos y realizan un objetivo determinado.

Perturbaciones: Una perturbación es una señal que tiende a afectar negativamente el valor de salida de un sistema.

Control Realimentado: Se refiere a una operación que, en presencia de perturbaciones, tiende a reducir la diferencia entre la salida de un sistema y alguna entrada de referencia, y lo realiza tomando en cuenta esta diferencia.

En [8] se define un sistema de control como:

El conjunto de elementos que interactúan para conseguir que la salida de un proceso se comporte tal y como se desea, mediante una acción de control.

Tomando en cuenta los conceptos básicos presentados anteriormente definidos en [7] y en base a la definición de un sistema de control, se puede ampliar el concepto de un Sistema de Control como : *una acción que permite que un proceso llevado a cabo por una planta alcance ciertos objetivos deseados, dicha acción consiste en medir el valor de la variable controlada del sistema y aplicar la variable manipulada para corregir o disminuir los errores obtenidos en la ejecución del proceso.*

Los componentes básicos de un sistema de control se pueden describir mediante los objetivos de control(entradas), los componentes del sistema de control y los resultados ó salidas. La figura 2.3 muestra un esquema básico de un sistema de control donde se aprecian también sus componentes.

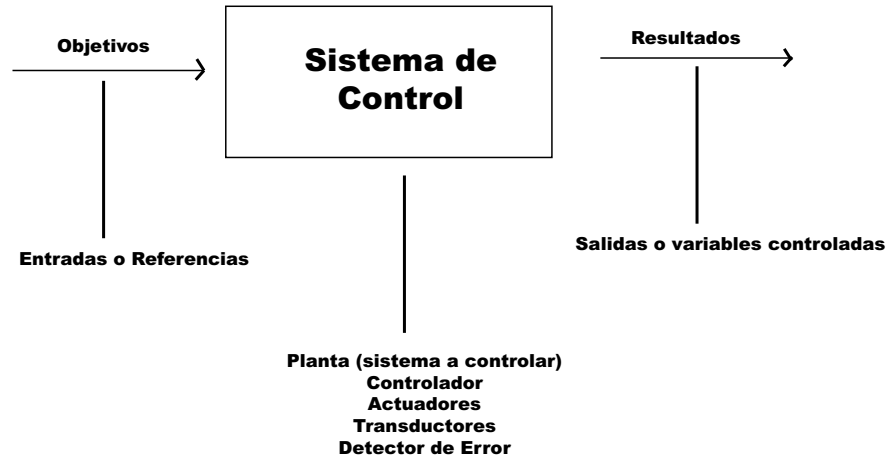


Figura 2.3: Diagrama básico de un Sistema de Control

Existen dos formas básicas de sistemas de control, una es la denominada en **lazo abierto** y a la otra en **lazo cerrado**.

2.3.1. Sistemas de Control en Lazo Abierto

En estos sistemas la salida no tiene efecto sobre la acción de control, es decir, la salida no se mide ni se realimenta para compararla con la entrada. Un ejemplo muy sencillo de un sistema de control en lazo abierto es un calefactor eléctrico que solo tiene un selector con dos opciones de disipación de calor.

Por lo que la entrada al sistema está determinada por la posición del selector que se ha escogido. La temperatura producida en la habitación acondicionada por el calefactor está determinada únicamente por una de las dos opciones del selector. Si se presentan cambios en las condiciones de operación, por ejemplo que alguien abra una ventana, no se logrará la temperatura deseada porque no hay modo de que el calor de salida se ajuste para compensar tal cambio[3]. Este sistema ilustra el funcionamiento de un sistema de control en lazo abierto en el que no existe información que se alimente de regreso al calefactor para ajustarlo y mantener una temperatura constante.



Figura 2.4: Diagrama de un Sistema de Control en Lazo Abierto

La figura 2.4 muestra un diagrama básico de un sistema de control en lazo abierto en donde la acción de control es el hecho de escoger alguna de las dos opciones del selector del calefactor y la planta es el mismo calefactor eléctrico.

2.3.2. Sistemas de Control en Lazo Cerrado

En los sistemas de control en lazo cerrado la señal de salida tiene efecto sobre la acción de control. A esto se le llama *retroalimentación*, por lo cual a estos sistemas también se les denomina sistemas de control retroalimentados.

La definición estándar de un sistema de control de lazo cerrado retroalimentado es la siguiente: un sistema de control con realimentación es aquel que tiende a mantener una relación prescrita de una variable del sistema con otra, comparando estas variables y usando las diferencias como medio de control[4]. La figura 2.5 ilustra estos sistemas.

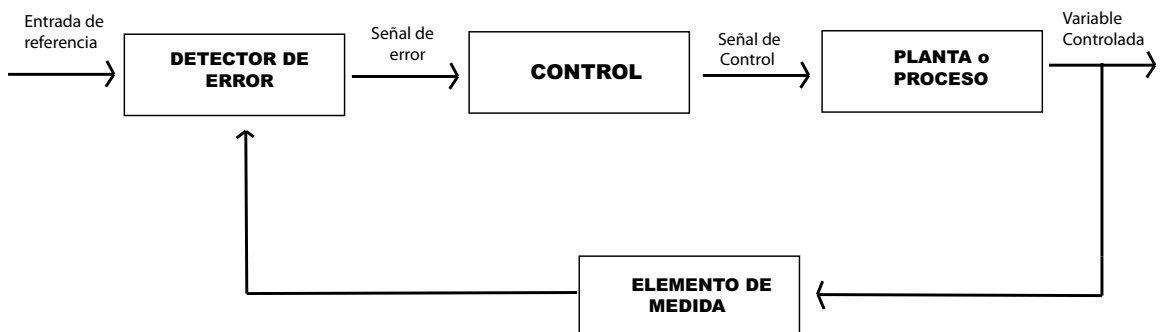


Figura 2.5: Diagrama de un Sistema de Control en Lazo Cerrado

La señal controlada debe compararse y realimentarse con la entrada, con lo cual se genera una señal de control que será proporcional a la diferencia encontrada entre la señal de entrada y la señal de salida. Esto da como ventaja que estos sistemas son menos sensibles a las perturbaciones externas y a las variaciones internas en los parámetros del sistema. El ejemplo anterior del calefactor eléctrico puede convertirse en un sistema en lazo cerrado si con el uso de un termómetro se monitorea la temperatura en la habitación y enciende y apaga el calefactor para mantener la temperatura constante.

En este ejemplo existe la retroalimentación de una señal a la entrada referente a la temperatura, con lo que la entrada del sistema se ajusta según si su salida es la temperatura requerida. Así, la entrada al calefactor depende de la desviación (error) de la temperatura real con la temperatura deseada.

Cuando se retroalimenta, se trata de asegurar que el sistema considerado se controle apropiadamente. Esto trae consigo la cuestión de estabilidad e inestabilidad. Estabilidad significa que el sistema opere dentro de los límites de comportamiento considerablemente estrechos. Por otra parte, inestabilidad implica que algunas variables del sistema crecen a valores inaceptablemente grandes. En el caso del sistema en lazo abierto, no se pone en duda si el sistema es estable o no, ya que los elementos de control se fijan una vez y ahí se mantienen.

Es posible que se considere que un sistema en lazo cerrado es una mejor opción que un sistema en lazo abierto, teniendo en cuenta lo explicado anteriormente; un sistema en lazo abierto es mucho más sencillo y no presenta problemas de inestabilidad, aunque esto sucedería si los parámetros del sistema se desvían de los valores esperados lo que reduciría el desempeño, los únicos casos en los que se puede aplicar un control en lazo abierto es cuando se conoce de antemano el desempeño del sistema. Esto no sucede en la mayoría de los casos, es decir, el desempeño no se conoce ante lo cual, para producir la respuesta deseada se necesita de un sistema en lazo cerrado [9].

2.4. Controladores

Los controladores son el núcleo de los sistemas de control, un controlador es el algoritmo que dicta la acción de control que deberá ejecutarse en el sistema, basándose en las señales recibidas de los sensores y comparando dichas señales con los objetivos

deseados.

Un buen controlador determinará el éxito de un sistema ya que como su nombre lo indica estos controlan cada uno de los movimientos de la planta y guarda sus posiciones, determinando la acción que ha de ejecutarse en la planta por medio de los actuadores tomando en cuenta las mediciones de los sensores.

Un ejemplo que ilustra la importancia de los controladores es el problema de jugar tenis a un gran nivel internacional. Dos atributos son esenciales para poder jugar a gran nivel, buena visión (sensores) y fuerza muscular (actuadores). Pero esto no es suficiente, la coordinación entre ojos y brazos y piernas es crucial para el éxito. Es decir, los sensores proveen los ojos y los actuadores los músculos; el controlador la destreza [18].

Existen diversos algoritmos de control, los cuales de acuerdo a sus características son más eficientes, para ciertos sistemas. De los más estudiados en nuestra Facultad podemos nombrar controladores On-Off, controladores P, controladores PI, controladores PD, controladores PID, etc.

2.4.1. Controlador On/Off

Un controlador On/Off es una forma sencilla de implementar un control con retroalimentación. Este tipo de control es también llamado como control de dos posiciones ya que su funcionamiento se basa en dos estados; la señal de error de entrada es una salida de encendido (On) o de apagado (Off).

Aunque es un control muy sencillo de realizar, posee una oscilación alrededor del estado deseado, ya que el proceso consiste en activar el controlador cuando el estado esté por debajo de un límite inferior y desactivarla cuando este por encima de un límite superior. Esta oscilación puede o no ser aceptable, dependiendo de la amplitud y longitud del ciclo. El tiempo de cada ciclo depende del tiempo muerto, el cual determina cuanto tiempo toma a la señal de medición para revertir su dirección una vez que se cruza el límite superior y la salida del controlador cambia. La amplitud de la señal depende de la rapidez con que la señal de medición cambia durante cada ciclo. Si el ciclo no es muy rápido este tipo de control es muy aceptable, en cambio, si la medición del proceso es mas sensible a los cambios en el suministro , la amplitud y frecuencia del ciclo comienza a incrementarse , en algún punto el ciclo se

volverá inaceptable y deberá de implementarse algún otro tipo de control.

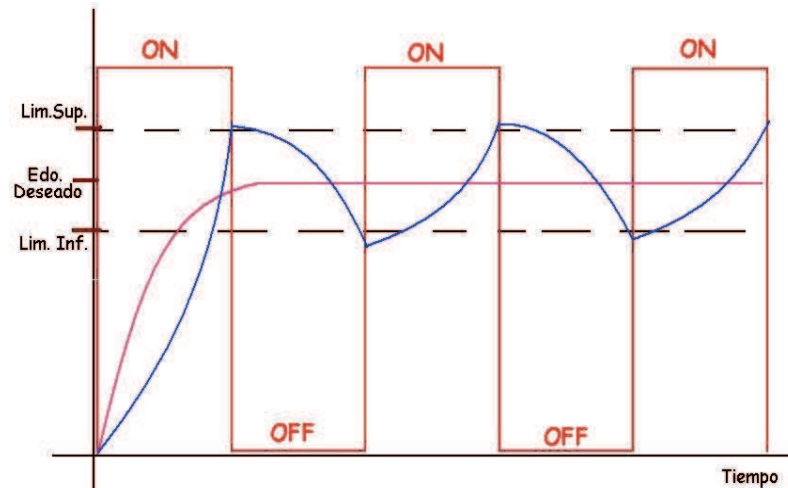


Figura 2.6: Comportamiento de un controlador On/Off

La figura 2.6 muestra el comportamiento de un controlador On/Off.

2.4.2. Controlador Proporcional (P).

Proporcional significa que el cambio presente en la salida del controlador es un múltiplo del porcentaje de cambio en la medición, es decir, la salida es proporcional al error; cuanto mayor sea el error, mayor será la salida. Este múltiplo es llamado la ganancia (Constante Proporcional) del controlador.

El funcionamiento de este controlador es básicamente ajustar una ganancia que haga que su producto con el error en estado estacionario sea casi nulo, en la mayoría de los casos el valor de está ganancia solo serán óptimos en un cierto rango. Existe un valor límite en la constante proporcional a partir del cuál, en algunos casos, el sistema alcanza valores superiores al estado deseado, lo que se le llama sobreoscilación. En caso contrario, si la ganancia no está dentro de el rango óptimo el sistema de estabilizará por debajo del estado deseado. La figura 2.7 ilustra lo anterior.

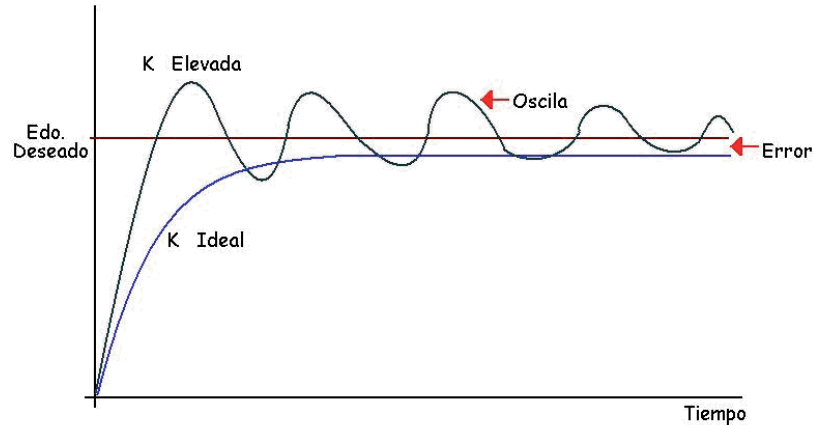


Figura 2.7: Comportamiento de un controlador Proporcional

La fórmula del controlador proporcional está dada por:

$$P_{sal} = K_p e(t) \quad (2.4.1)$$

donde:

P_{sal} = Salida del sistema.

K_p = Ganancia (Constante) Proporcional.

$e(t)$ = Error.

2.4.3. Controlador Integral (I).

El control integral tiene como propósito disminuir y eliminar el error en estado estacionario, provocado por la parte proporcional del control.

En este tipo de controladores la salida en el tiempo es proporcional a la integral de la señal de error entre $t = 0$ y t . El error es integrado, lo cual tiene la función de promediarlo o sumarlo por un periodo de tiempo determinado; luego es multiplicado por una constante de integración I , donde I representa la constante de integración.

Con un control proporcional, es necesario que exista error para tener una acción de control distinta de cero. Con acción integral, un error pequeño positivo siempre nos dará una acción de control creciente, y si fuera negativo, la señal de control será decreciente.

La fórmula del controlador integral está dada por:

$$I_{sal} = K_i \int_0^t e^t dt \quad (2.4.2)$$

donde:

I_{sal} = Salida del sistema.

K_i = Ganancia (Constante) Integral.

$\int_0^t e^t dt$ = Integral de error en el tiempo t .

2.4.4. Controlador Derivativo (D).

La acción derivativa se manifiesta cuando hay un cambio en el valor absoluto del error. La función de la acción derivativa es mantener el error al mínimo corrigiéndolo proporcionalmente con la velocidad misma que se produce; de esta manera se evita que el error se incremente. Para ello se deriva la señal de error con respecto al tiempo y se multiplica por una constante llamada ganancia (constante) derivativa.

La fórmula del controlador derivativo está dada por:

$$D_{sal} = K_d \frac{de}{dt} \quad (2.4.3)$$

donde:

D_{sal} = Salida del sistema.

K_d = Ganancia (Constante) Derivativa.

$\frac{de}{dt}$ = Derivada del error en el tiempo t .

2.4.5. Controlador Proporcional Integrativo (PID).

Ya se han descrito los controladores básicos, pero también se ha visto que cada uno presenta ciertos defectos, es por ello que para reducir el error en un sistema se combinan estos controladores.

El controlador Proporcional estabiliza el sistema cuando se elige una ganancia adecuada, pero está siempre deja un error que se mantiene en el tiempo (debido a lo cual se lo denomina error estacionario) con respecto al estado deseado, por lo que al agregarle un controlador Integral, el cual por medio de una suma con respecto al error,

lo decrementa hasta volverlo cero, así el control integral elimina el error estacionario, pero es a costa de mayor tiempo para estabilizar el sistema, entonces recurrimos al controlador Derivativo, el cuál puede efectuar correcciones antes que la magnitud del error sea significativa, ya que actúa en forma proporcional a la *velocidad de variación del error*, con lo que se optimiza el tiempo logrando una mejora en tiempo y en exactitud.

El controlador Proporcional Integral Derivativo se obtiene de sumar la acción de control proporcional más la acción de control Integral más la acción de control derivativa. La fórmula del controlador PID está dada por:

$$U(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e^t dt + K_d \frac{de}{dt} \quad (2.4.4)$$

Como ya se han descrito, cada tipo de controlador o sus combinaciones tienen ciertas ventajas que los hacen lo suficientemente buenos para ser aplicados en algunos sistemas. La tabla 2.1 muestra que tipos de controladores son los más usados en algunos sistemas comunes.

Sistema a Controlar	Acciones básicas a aplicar
Control de Presión de Líquidos	P+I
Control de Presión de Gases	P
Control de Caudal	P+I
Control de Temperatura	P+I+D
Control de Nivel	P
Control de Presión de Vapores	P+I+D

Tabla 2.1: Ejemplos de acciones de control en sistemas comunes.

2.5. Tipos de Control

En la sección 2.2 se presenta la Historia y Evolución del Control Automático, se puede observar que prácticamente todos los avances sobre el control vienen de la mano con los avances tecnológicos surgidos a lo largo de la historia de la humanidad, especialmente en los dos últimos siglos pasados. Gracias a estos avances tecnológicos las plantas modernas son mucho más complejas, los alcances son mucho más grandes

y con la tecnología actual se puede lograr objetivos mas complejos, pero esto ha originado que la industria sea mucho mas compleja que antaño. Ante esto surgen problemas como lo son que la descripción de estos sistemas complejos requiere de un gran número de ecuaciones, lo que ocasiona que modelar estos sistemas requiere de técnicas especiales dentro del control moderno.

Estos problemas inherentes a los sistemas actuales que provocan errores en el desempeño óptimo o esperado del problema se han solventado con técnicas que dan nombre a varios tipos de control, mismos que hoy en día los encontramos implementados en las diferentes ramas de la industria moderna. Entre ellas se encuentran el Control Adaptativo, Control Óptimo, Control Predictivo, Control Estocástico, Control de Trayectoria y al Control de Movimiento que es donde se encuentra situado el presente trabajo.

2.5.1. Control Adaptativo

Un controlador adaptativo es un controlador que puede modificar su comportamiento en respuesta a cambios en la dinámica del sistema y a las perturbaciones [10]. El término adaptativo significa cambiar el comportamiento conforme a nuevas circunstancias.

Los controladores convencionales estan diseñados para controlar sistemas cuyos parámetros son constantes, por ejemplo, cuando se pretende regular un sistema en un punto fijo de operación, estos controladores ofrecen aproximaciones que pueden ser consideradas como buenas, aún cuando existan perturbaciones pequeñas que no afecten en demasía al resultado final del controlador. Pero cuando el punto de funcionamiento cambia, el resultado podría ya no ser considerado como bueno.

La retrolimentación como ya se ha visto, permite estabilizar sistemas inestables y mejorar la robustez de un sistema ante las variaciones de comportamiento de algunas de las partes de sistema o de la planta. Pero en casi todos los sistemas retrolimentados se presentan dos problemas que afecta el desempeño del sistema. Primero que no se conozca completamente la dinámica de la planta, y segundo la presencia de perturbaciones desconocidas, lo cual ocasionaría que el resultado final no fuese el óptimo, con lo que el control adaptativo surge como una posible solución a tales problemas.

Básicamente en el control adaptativo se trata de otorgarle al sistema de control una cierta capacidad que le permita juzgar su propio funcionamiento y aplicar las medidas correctivas necesarias a sus propios parámetros con el propósito de alcanzar el desempeño óptimo antes tales condiciones y/o cambios[9].

La definición mas aceptada de un control adaptativo lo define como un tipo especial de control no lineal en el que el estado de proceso puede ser separado en dos escalas de tiempo que evolucionan a diferente velocidad. La parte lenta corresponde a los cambios de los parámetros y por consiguiente a la velocidad con la cual los parámetros son modificados y la rápida corresponde a la dinámica del bucle ordinario de retroalimentación.

El comportamiento óptimo de un sistema se logra encontrando la condición para la cual un sistema determinado funciona de la mejor forma posible. En el control adaptativo esto se define por medio del índice de desempeño que da al sistema el comportamiento óptimo, esto se realiza dentro de un mecanismo de adaptación, el cual compara el índice deseado con un índice de funcionamiento procesando el error y ajustando los parámetros del sistema. La figura 2.8 muestra un diagrama de bloques que ilustra al control adaptativo.

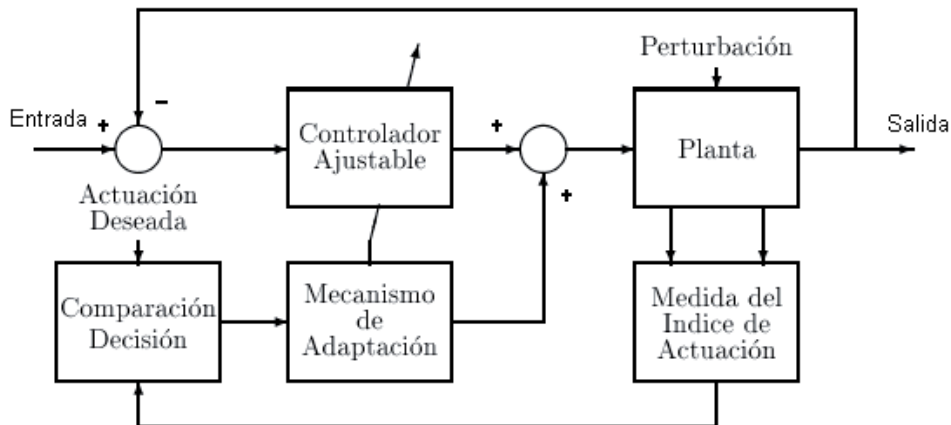


Figura 2.8: Diagrama a bloques de un Control Adaptativo

Los controles adaptativos pueden ser divididos en dos grupos, los *controladores adaptativos con modelo de referencia* (MRAC) que logran un comportamiento de lazo

cerrado dado por un modelo de referencia ante una entrada dada y los *reguladores autoajustables* (STR) que son de lazo abierto y modifican los parámetros del sistema a partir de una tabla previamente calculada para distintos puntos de funcionamiento, en función de una variable auxiliar.

Un ejemplo del uso de un controlador adaptativo se encuentra en las centrales eléctricas termosolares. En estas surge el problema que la fuente (energía solar) para poder obtener energía eléctrica es intermitente, por lo que estas plantas requieren de sofisticados sistemas de control como lo es el control adaptativo.

2.5.2. Control Robusto

Un proceso real puede ser extremadamente complejo para ser descrito de forma precisa por un modelo matemático, a lo que se le denomina errores de modelado, cualquier modelo matemático de un proceso real va a ser impreciso, ello gracias a las perturbaciones externas que afectan el desempeño del sistema así como perturbaciones por la relación entre el sistema físico y el modelo matemático. A esta última se le llama incertidumbre del modelo [2].

Las técnicas de control robusto abarcan todos aquellos problemas en los cuales se consideran las incertidumbres en el modelo con el fin de controlar un proceso real de manera eficaz. Para ello es necesario tener información sobre las posibles causas de incertidumbre, evaluando su efecto sobre el comportamiento del sistema.

Dependiendo de las causas que provocan la incertidumbre dentro de un proceso, podemos diferenciar dos tipos de incertidumbre: incertidumbre no estructurada e incertidumbre estructurada.

En la incertidumbre no estructurada solo se conoce que el modelo no concuerda exactamente con la planta real, posiblemente puede conocerse también el tamaño de las desviaciones de determinadas medidas de entrada y salida. La incertidumbre estructurada se debe a algunos elementos de la planta, en la forma de tolerancia de sus valores.

Las técnicas de diseño de controladores robustos tienen como objetivo garantizar las condiciones de estabilidad y desempeño, pese a los distintos comportamientos que puedan presentar los sistemas. Uno de los objetivos principales es que el sistema

sea estable en lazo cerrado para unas condiciones de trabajo dadas, a este objetivo se le conoce como *estabilidad nominal* (NS).

Una vez conseguida la estabilidad es necesario que ciertas variables presenten un comportamiento adecuado y, en algunos casos, óptimo respecto a un índice de comportamiento que se llama *comportamiento nominal* (NP).

Otro requerimiento es que el sistema sea estable en lazo cerrado para el conjunto de posibles plantas que se pueden dar como consecuencia de la incertidumbre en el modelo de la planta, a lo que se le conoce como Estabilidad Robusta(RS).

Si además se considera que para todas las plantas posibles no basta con que el sistema de control permanezca estable sino que han de cumplirse unas especificaciones de funcionamiento, lo que es el *comportamiento robusto* (RP).

En la figura 2.9 se observa el plantamiento de un sistema de control robusto así como los términos descritos anteriormente.

Las principales aplicaciones de la teoría de control robusto las encontramos en el control de procesos químicos, en la robótica, estructuras flexibles y en control de aeronaves.

2.5.3. Control Óptimo

La complejidad de muchos sistemas del mundo real actual es tal, que utilizando procesos matemáticos básicos es casi imposible tratar de solucionar un problema de control de sistemas, sobre todo ya que en estos existen infinidad de entradas y múltiples salidas. Ante esto, el delimitar el problema para tratar de obtener cierta información acerca de su comportamiento, lo suficiente para que se pueda conformar un modelo matemático fiable y sencillo que minimize los cálculos, es de gran ayuda.

El objetivo del control óptimo es buscar uno ó varios puntos que cumplan con las restricciones impuestas a un problema dado y que proporcione el mayor y/o el menor valor (dependiendo del objetivo del problema) de una función a optimizar [1],

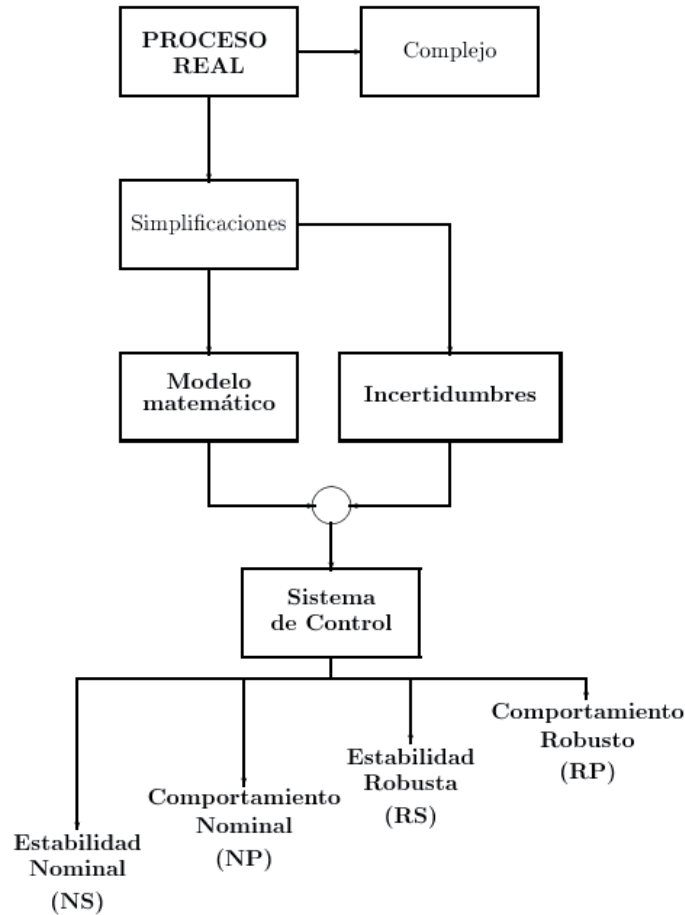


Figura 2.9: Planteamiento de un Sistema de Control Robusto

es decir, el control óptimo se basa en determinar las señales de control que causarán que un proceso satisfaga las restricciones físicas y al mismo tiempo minimizar ó maximizar algún criterio de desempeño.

Los objetivos del control son realizar un diseño de forma que el sistema tenga el mejor comportamiento general posible. Por ejemplo, que ante una señal de entrada, la respuesta (señal de salida) sea lo más rápida posible y se aproxime en ese tiempo a un valor requerido; ya sea maximizando o minimizando cierto índice, teniendo en cuenta sobre todo las restricciones del sistema.

Al estudiar el control óptimo se pretende encontrar una trayectoria, tal que una

determinada función de costo, que depende de la trayectoria del sistema, sea la óptima respecto a algún criterio establecido mediante una función. Cada una de las funciones, utilizadas para resolver un problema como este, tiene que cumplir un conjunto de restricciones. Estas restricciones son las ecuaciones que describen el sistema, en general una o varias ecuaciones diferenciales en el caso continuo y en diferencias para el caso discreto.

Para poder diseñar un control óptimo en primer lugar hay que delimitar el problema, es decir, dividir un sistema complejo en subistemas pequeños, pero sin simplificar demasiado el problema. Un punto importante que debe ser tomado en cuenta al modelar un sistema es que se debe considerar que el sistema interactúa con su entorno. Una vez delimitado el problema, se construye un modelo matemático para poder elegir un criterio sobre el cual basar la evaluación del diseño. Además se debe incluir en el diseño todas las variables que afectan las operaciones del sistema o la definición del diseño, ya que al dejar de lado variables importantes conduce a soluciones erróneas distintas al sistema real. Se debe considerar que algunas variables dependen de factores externos y están fuera de los límites del sistema en cuestión. La forma más utilizada en la práctica para obtener una función objetivo es ajustar, ya sea en el sistema real o utilizando un modelo, las entradas y los parámetros de los controladores. Por ejemplo, tomando en cuenta varias coordenadas de entrada a la vez y observando cuál es su salida. El modelo a construir también debe poseer ecuaciones de equilibrio, relaciones de diseño y ecuaciones de propiedades físicas que describan los fenómenos físicos que tienen lugar en el sistema.

Los problemas de control asociados con estos sistemas pueden ser la producción de algún producto químico o quirúrgico de la forma más eficiente posible; aterrizaje automático de aviones, aterrizajes suaves sobre la Luna, optimizar el rendimiento de un simple motor de un carro inyectado por medio de un microprocesador, donde se regula hasta la cantidad de gasolina inyectada a cada bujía; regulaciones de funciones corporales, tales como los latidos del corazón, presión sanguínea, temperatura, y el siempre presente problema de controlar la inflación económica.

2.5.4. Control Estocástico

Un proceso físico estocástico es cualquier proceso regido por las leyes de la probabilidad. Algunos ejemplos de estos procesos son la evolución de la población, el movimiento de partículas microscópicas sujetas a impactos moleculares, el movimiento de las estrellas en el espacio, etc. Un proceso matemático estocástico es una estructura matemática inspirada según el concepto de un proceso físico estocástico.

El control estocástico es una rama de la teoría de control en la que básicamente se trata de predecir y reducir las magnitudes y límites de las perturbaciones aleatorias de un sistema de control optimizando el diseño de un controlador. El objetivo de control es determinar las entradas de un proceso con el fin de alcanzar ciertos objetivos deseados a pesar de las perturbaciones aleatorias que se puedan presentar [17]. Tales desviaciones ocurren cuando por ejemplo ruido arbitrario ó procesos perturbatorios están presentes en un sistema de control, por lo que el sistema no sigue su curso y se desvía de este una cantidad que varía aleatoriamente. En contraste con las señales deterministas, una señal aleatoria no puede ser descrita como una función. Está es desconocida para el diseñador, aunque algunas de sus propiedades son conocidas.

Algunas aplicaciones de los sistemas de control estocásticos los encontramos por ejemplo en el modelado y control de las turbinas de viento o el modelado y control de robots estacionarios y móviles.

2.5.5. Control Predictivo

El control predictivo tiene como objetivo resolver de forma efectiva problemas de control y automatización de procesos industriales que se caracterizan por presentar un comportamiento dinámico, multivariable y/o inestable. El control predictivo no es una estrategia de control específica, sino que trata más bien de un campo muy amplio de métodos de control desarrollados en torno a ciertas ideas comunes, entre las que podemos citar a las siguientes:

- * Uso explícito de un modelo para predecir la salida del proceso en futuros instantes de tiempo (horizonte).

- * Cálculo de las señales de control minimizando una cierta función objetivo.
- * Estrategia deslizante, de forma que en cada instante el horizonte se va desplazando hacia el futuro, lo que implica aplicar la primera señal de control en cada instante y desechar el resto, repitiendo el cálculo en cada instante de muestreo.

El control predictivo integra disciplinas como el control óptimo y el control estocástico. La estrategia de control utiliza el modelo matemático del proceso a controlar para predecir el comportamiento futuro de dicho sistema para predecir la señal de control futura [15].

Existen varios tipos de control predictivo, siendo el más utilizado el *control predictivo basado en modelo* (CPBM), también llamado MPC (por sus siglas en inglés *model predictive control*). El control predictivo basado en modelo se puede definir como una estrategia de control que se basa en la utilización de forma explícita de un modelo matemático interno del proceso a controlar (modelo de predicción), el cual se utiliza para predecir la evolución de las variables a controlar a lo largo de un horizonte temporal de predicción especificado por el operador. De este modo se puede calcular las variables manipuladas futuras (señal de control futura) para lograr que en dicho horizonte, las variables controladas converjan en sus respectivos valores de referencia.

La forma en que trabajan los controladores MPC se resume en tres partes, que son las siguientes:

- 1 En cada instante y haciendo uso del modelo del proceso se predicen las futuras salidas para un determinado horizonte de predicción.
- 2 El conjunto de señales de control se calcula optimizando un determinado criterio en el que se pretende mantener el proceso lo más próximo posible a la trayectoria de referencia.
- 3 La señal de control es enviada al proceso mientras que las siguientes señales de control son desechadas, puesto que el siguiente instante de

muestreo ya se conoce y se repite el paso 1 con este nuevo valor y todas las secuencias son actualizadas.

La figura 2.10 muestra el funcionamiento de un control predictivo basado en modelo. Se usa un modelo para predecir las salidas futuras del proceso, basándose en las futuras señales de control propuestas. Estas señales son calculadas por el optimizador teniendo en cuenta la función de coste (donde aparece el futuro error de seguimiento) así como las restricciones. Por tanto el modelo juega un papel decisivo en el controlador. El modelo elegido debe ser capaz de capturar la dinámica del proceso para poder predecir las salidas futuras al mismo tiempo que debe ser sencillo de usar y de comprender.

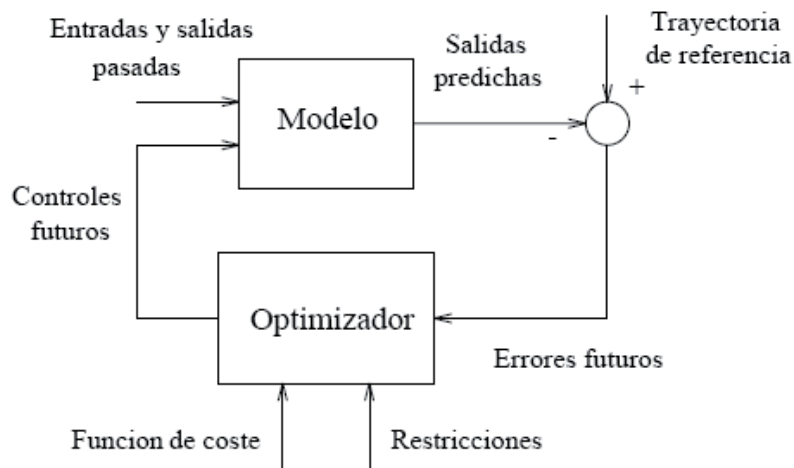


Figura 2.10: Estructura básica de un Controlador Predictivo.

2.5.6. Control de Trayectoria

Actualmente en la industria los robots manipuladores son parte esencial en las líneas de producción de las fábricas. Ante ello un buen sistema de control es fundamental, el control de trayectoria se encarga de determinar los movimientos requeridos de cada parte del robot para que el actuador final pueda ser desplazado a la posición requerida y orientación en el espacio.

Para realizar una determinada tarea el robot manipulador debe moverse desde un punto inicial a un punto final. Este movimiento puede ser realizado según infinitas

trayectorias espaciales. Existen varios tipos de trayectorias entre las que se pueden citar las trayectorias punto a punto, trayectorias coordinadas ó isócronas y las trayectorias continuas.

Trayectorias punto a punto.

En este tipo de trayectorias, cada articulación evoluciona desde su posición inicial a la posición final sin realizar consideración alguna sobre el estado o evolución de las demás articulaciones. Existen dos tipos de trayectorias punto a punto; movimiento eje a eje y movimiento simultáneo de ejes.

Movimiento eje a eje: Solo se mueve un eje cada vez. Comenzará a moverse la primera articulación, y una vez que está haya alcanzado su punto final lo hará la segunda, y así sucesivamente.

Movimiento simultáneo de ejes: En este caso todos los actuadores comienzan simultáneamente a mover las articulaciones del robot manipulador a una velocidad específica para cada una de ellas. Dado que la distancia a recorrer y las velocidades serán en general diferentes, cada una acabará su movimiento en un instante diferente.

Trayectorias coordinadas o isócronas.

Para evitar que algunos actuadores trabajen forzando sus velocidades y aceleraciones, teniendo que esperar después la conclusión del movimiento de la articulación más lenta, puede hacerse un cálculo previo, averiguando cuál es está articulación y que tiempo invertirá.

Se relentizará entonces el movimiento del resto de los ejes para que inviertan el mismo tiempo en su movimiento, acabando todos ellos simultáneamente. Se tiene así que todas las articulaciones se coordinan comenzando y acabando su movimiento a la vez, adaptándose todas a la más lenta.

Trayectorias Continuas.

Cuando se pretende que la trayectoria que sigue el extremo del robot manipulador sea conocida por el usuario, es preciso calcular de manera continua las trayectorias

articulares. Típicamente, las trayectorias que el usuario pretende que el robot manipulador describa, son trayectorias en línea recta o en arco de un círculo. El resultado será que cada articulación sigue un movimiento aparentemente caótico con posibles cambios de dirección y velocidad, sin coordinación con el resto de las articulaciones. Sin embargo, el resultado conjunto será que el extremo del robot manipulador describirá la trayectoria deseada.

Como se ha descrito anteriormente, un sistema de control en lazo cerrado es de gran ayuda para que el desempeño de un sistema sea bueno, aún cuando existan diversos factores que provoquen diferentes condiciones de operación tales como variaciones en el comportamiento del sistema mecánico del robot manipulador, cambios en la fricción, variaciones ambientales, entre otros. Ante esto, un control de trayectoria necesita ir sensando las posiciones para corregir los posibles errores en la trayectoria del robot manipulador.

El uso de sensores es necesario en un control en lazo cerrado, estos permiten que la posición sea sensada y realimentada para dar una señal de error que es usada para manejar al actuador con el fin de seguir la trayectoria deseada. La figura 2.11 ilustra lo anterior.

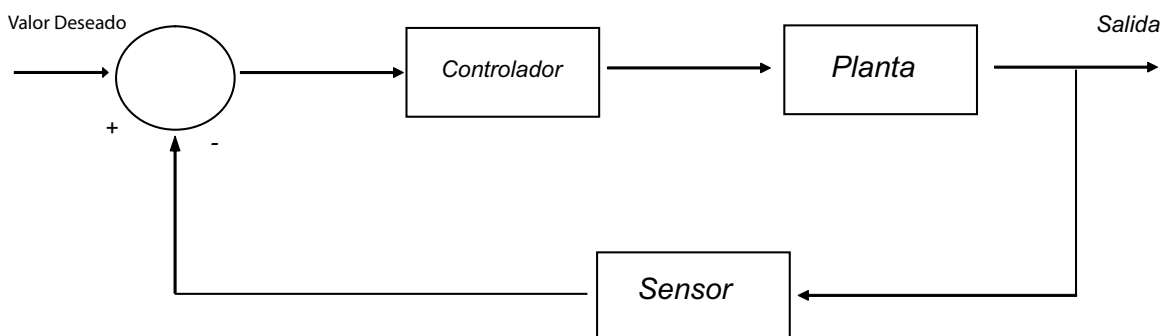


Figura 2.11: Control de Trayectoria en lazo cerrado.

2.5.7. Control de Movimiento

Muchas de las aplicaciones de los robots manipuladores en la industria, tales como ensamble o soldadura, requieren de la ejecución de una trayectoria específica. El control de movimiento se encarga de controlar la ejecución de esa trayectoria por el robot

manipulador.

El problema de control de movimiento en robot manipuladores consiste en determinar los pares aplicados por los actuadores a sus articulaciones, de tal forma que las posiciones asociadas a las coordenadas articulares de robot manipulador sigan con exactitud la posición deseada variante en el tiempo. Es decir, consiste en encontrar una **trayectoria** tal que lleve al robot manipulador desde una posición inicial hasta una posición deseada sin importar las condiciones iniciales y evitando saturar a los actuadores [9].

Para el control de movimiento se definen los siguientes términos:

Posición de Casa: Es la posición de inicial ó de inicio del robot manipulador.

Posición deseada: Es la posición a la cuál se quiere que llegue el actuador del robot manipulador.

Espacio de trabajo: Se define como el volumen donde el robot puede barrer todos los puntos intermedios posibles.

Cuando el robot manipulador se desplaza libremente en su espacio de trabajo y no existe una interacción con el entorno físico se dice que el robot manipulador tiene un movimiento libre (no restringido), y el problema de control de movimiento consiste en determinar los pares aplicados a las articulaciones para que estas sigan con exactitud una posición articular y que el error tienda a cero. Entonces, el hecho de realizar un control de posición consiste en llevar al robot manipulador a una posición deseada a partir de una posición inicial (en este caso la posición inicial será la posición de casa, donde la posición deseada debe ser dada como un vector de ángulos (posiciones articulares) que describan puntos en el espacio y que dichos puntos estén dentro del espacio de trabajo del robot manipulador.

Los controladores más usados en el control de movimiento son el PD, PI y el PID, siendo el PID el más frecuente de ellos. Este tipo de controladores sin embargo, presentan algunas deficiencias al ser implementados. Estos controladores no toman en cuenta que los servomotores tienen un límite con respecto a la fuerza ó torque

que establecen para manipular los eslabones de un robot manipulador por lo tanto es necesario tener en cuenta esto cuando se ajustan sus ganancias para no saturar a los servomotores y evitar problemas de vibración y calibración.

De lo anterior surge el problema de que existen un cierto tope de ganancias que se le puede proporcionar al controlador, ya que excediendo este tope el par aplicado al motor es superior al limite que puede soportar provocando el bloqueo o la perdida de control del motor. Otro problema que este tipo de controladores no toma en cuenta es que en la mayoria de los motores el torque no es lineal; esto es, si la fuerza máxima que se le puede aplicar a un motor para moverlo a su máxima velocidad es aplicandole 5 Volts y la mínima es de 0 volts, no siempre al aplicar valores cercanos a los 0 volts el motor se moverá mínimamente, si no que hay que aplicar un voltaje que genere la fuerza suficiente para que el motor venza su propio peso y logre moverse.

Capítulo 3

Motores y Tarjetas de Adquisición de Datos

En este capítulo se describirán de manera breve los componentes físicos usados en la presente tesis, como lo son los motores y las tarjetas de adquisición de datos.

3.1. Introducción

En el capítulo anterior se han descrito las partes que conforman un sistema de control. Básicamente se aprecia que un sistema de control esta formado por los *objetivos de control*, los *controladores* (algoritmos que dictan la acción a ejecutar) y la *planta* (sistema a controlar).

Para que los controladores decidan que acción habrá de ejecutarse para lograr el objetivo de control, necesita de saber que esta pasando, para después determinar la forma de actuar al estado deseado, los sensores son los que le permiten ver al sistema y los actuadores son aquellos elementos que pueden provocar un efecto sobre un sistema(proceso automatizado).

Retomando el ejemplo del jugador de tenis mencionado en el capítulo anterior, el objetivo de control es lograr jugar a un gran nivel profesionalmente. Parte fundamental para lograrlo aparte de los controladores (quienes proveen la destreza) es tener

buena visión y fuerza muscular. Los ojos son los sensores en nuestro sistema y los músculos los actuadores.

En la industria los sistemas funcionan de manera similar, teniendo algunos actuadores que reciben la orden de los controladores quienes se basan en la información obtenida por los sensores.

Los actuadores son dispositivos capaces de generar una fuerza a partir de líquidos, de energía eléctrica y gaseosa. Los que trabajan a partir de líquidos son los actuadores hidráulicos, los que funcionan a partir de energía eléctrica son llamados actuadores eléctricos y los actuadores neumáticos son los que funcionan a partir de una fuerza gaseosa.

Un sensor es un dispositivo capaz de transformar magnitudes físicas o químicas, llamadas variables de instrumentación, en magnitudes eléctricas. Las variables de instrumentación dependen del tipo de sensor y pueden ser por ejemplo temperatura, intensidad luminosa, distancia, aceleración, inclinación, desplazamiento, presión, fuerza, torsión, humedad, pH, etc.

En el presente trabajo se emplearán motores de transmisión directa como actuadores y el sensor que permitirá conocer la posición del motor es una tarjeta de encoder de cuadratura. El motor será movido gracias a los voltajes que se le enviarán a través de una tarjeta convertidora de D/A. A continuación se describirán estos elementos.

3.2. Motores.

Un motor es una máquina destinada a producir movimiento a expensas de otra fuente de energía. El motor nace por la necesidad de trabajos que, bien por duración, intensidad, manejabilidad ó mantenimiento no pueden ser realizados por el hombre o por animales.

Existen varios tipos de motores que se clasifican comunmente en motores térmicos, de combustión interna, eléctricos. etc.

Los **motores eléctricos** son máquinas rotatorias que transforman la energía

eléctrica en energía mecánica [20]. Un motor eléctrico presenta varias ventajas entre las cuales podemos citar que su tamaño es reducido (contiene un número mucho más pequeño de piezas mecánicas que un motor de combustión interna o uno de una máquina de vapor), son los más ágiles de todos en lo que respecta a variación de potencia y pueden pasar instantáneamente desde la posición de reposo a la de funcionamiento al máximo, tienen un par de giro constante y aprovechan de forma eficiente la cantidad de energía que se le aplica.

Por estos motivos son ampliamente utilizados en instalaciones industriales y demás aplicaciones que no requieran autonomía respecto de la fuente de energía, dado que la energía eléctrica es difícil de almacenar.

3.2.1. Motores de Corriente Directa.

Los motores de corriente directa (DC por sus siglas en inglés), también llamados de corriente continua son máquinas rotatorias que transforman la energía eléctrica en energía mecánica. En la figura 3.1 se muestra un motor de corriente directa.



Figura 3.1: Motor de Corriente Directa

El principio de funcionamiento de un motor de corriente directa es muy simple, un conductor por el que pase una corriente eléctrica que causa un campo magnético a su alrededor tiende a ser expulsado si se quiere introducir en otro campo magnético, por lo que las fuerzas magnéticas quedan rechazadas.

El motor de corriente directa está compuesto de 2 partes fundamentales: el *rotor* y el *estator*.

Estator.

El estátor es la parte fija de un motor de corriente directa, el cual protege y soporta la parte no giratoria del motor (rotor). La figura 3.2 muestra el estator y sus componentes principales.

Los imanes del estator son los que producen un campo magnético sobre el rotor. Este se envuelve con alambre, a través del cual las escobillas pasan corriente. El conmutador hace que la corriente siempre sea enviada por medio de la armadura, la cual esta construida por una colección de vueltas de conductor, para que produzca el torque máximo en la dirección deseada. Si se invierte la dirección de la corriente, la dirección del torque se invierte también .



Figura 3.2: Estator de un motor de corriente directa

Rotor.

El rotor es el componente que gira (rota) en un motor de corriente directa. La figura 3.3 muestra un rotor y sus componentes principales.

El núcleo y el embobinado, juntos construyen lo que se denomina inducido del motor. Cuando se introduce una corriente a través de los devanados del inducido, se establece un campo magnético opuesto al campo producido por el estator. Esto proporciona un par de fuerzas o torque de motor en el rotor, lo que provoca que el eje del rotor gire. Cuando el rotor gira, la escobilla y el conmutador desvían la corriente al inducido, por lo que el campo permanece opuesto a uno de los campos

establecidos por los imanes. En esta posición el par de torsión proporcionado por el rotor es constante en toda la rotación.

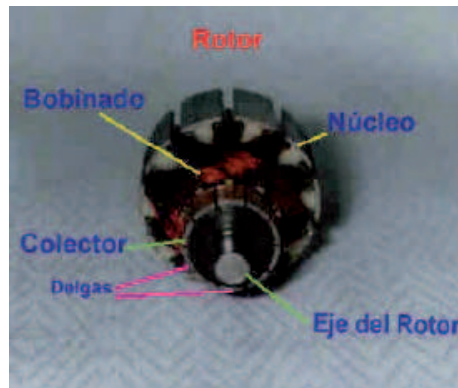


Figura 3.3: Rotor de un motor de corriente directa

A diferencia de los motores de paso y los servomecanismos, los motores de DC no pueden ser posicionados y/o enclavados en una posición específica. Estos simplemente giran a la máxima velocidad y en el sentido que la alimentación aplicada se los permite.

3.2.2. Motores Paso a Paso.

Los motores de DC son muy efectivos en muchas labores cotidianas, pero debido a problemas tales como la inercia o su dificultad para controlar su velocidad, se desarrollaron otros tipos de motores, cuya característica principal es la precisión de giro, estos son los motores paso a paso o también llamados de pasos. Un motor de este tipo no sólo puede controlar la cantidad de vueltas y la dirección de las mismas sino una infinidad de ellas.

Los motores de paso tienen una gran cantidad aplicaciones en la robótica con una interfaz con la PC, debido a que una computadora es el elemento ideal para generar las señales pulsadas de control, de velocidad o dirección.

Su principio de funcionamiento internamente está compuesto por dos bobinas con punto medio. Estas bobinas se ubican en lo que se denomina estator, es decir, la cabeza exterior del motor. Además del estator este tipo de motor está compuesto por

una parte móvil estriada denominada rotor. Cuando se aplica tensión a cualquiera de las bobinas existentes, éstas generan un campo magnético. Ante esta situación una estría del motor se alinea con este campo desplazándose así un determinado número de grados. A este desplazamiento se le denomina *paso*. Si se deja de alimentar la antes mencionada bobina y se alimenta la siguiente el rotor girará otro paso la dirección dada. En función de las veces que se repita dicha frecuencia se logra que el rotor gire una determinada cantidad de vueltas o grados en un sentido u otro.

3.2.3. Motores de Transmisión Directa.

El concepto de transmisión directa, fue establecido por H. Asada en 1980; consiste en que el sistema de engranes tradicional sea completamente eliminado. En este tipo de motores desaparece el eje, el rotor es la parte de la coraza que gira con respecto al estator el cual permanece estático[13]. La figura 3.4 muestra el esquema básico un motor de transmisión directa.

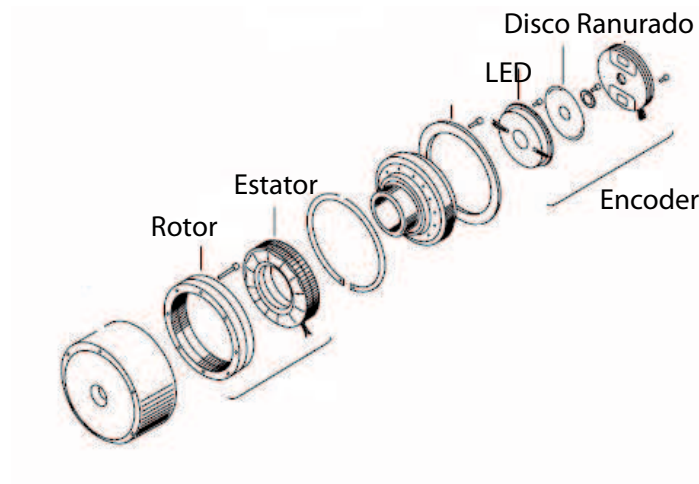


Figura 3.4: Esquema de un Motor de Transmisión Directa

Principio de funcionamiento.

Los motores de transmisión directa pueden proveer un gran torque aún cuando estos pueden ser relativamente pequeños. La figura 3.5 muestra que el torque es proporcional al cuadrado de la suma del flujo magnético, (ϕ_m) generado por el

magneto permanente (estator) y del flujo magnético, (ϕ_c) generado por el estator.

Dos factores ayudan a que un motor de transmisión directa genere un gran torque. Primero, ya que el radio del motor es grande, las fuerzas tangenciales entre el rotor y el estator producen un torque adicional, esto debido a que trabajan a una gran distancia. Segundo, demasiados dentados o ranuras del rotor y del estator crean muchos flujos magnéticos por revolución del motor. Mientras mas flujos el torque se incrementará[16].

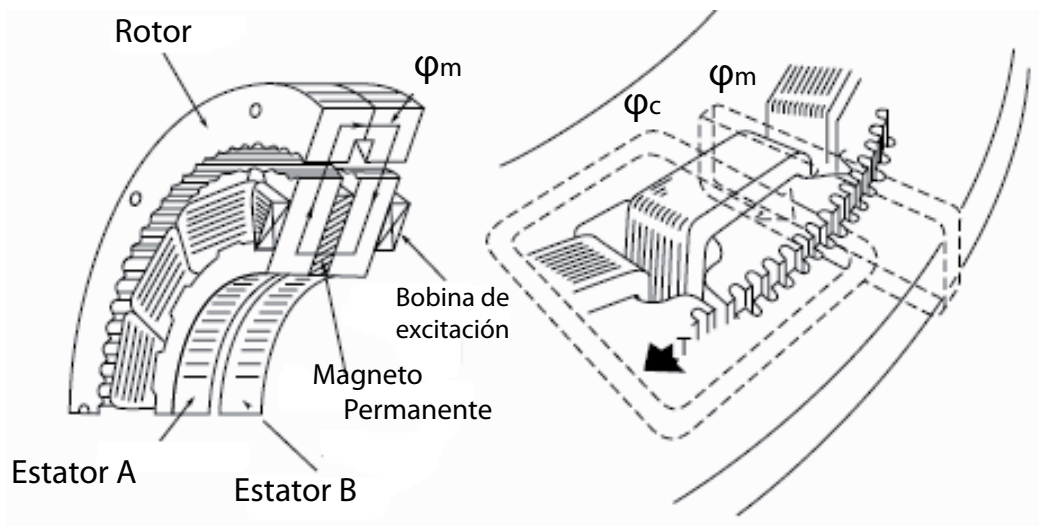


Figura 3.5: Funcionamiento de un Motor de Transmisión Directa

3.2.4. Comparativa entre un motor de Transmisión Directa y un motor de Corriente Directa.

Los motores de transmisión directa acoplan la carga del sistema directamente al motor sin engranes y sin incorporar el eje típico de los motores de corriente directa. La mayoría de los servomotores no tienen el torque o la resolución requerida para satisfacer la mayoría de las aplicaciones en las que son utilizados. Para solventar esto y cumplir con los requerimientos necesitados, se provee a los motores de diversos mecanismos, como lo es un reductor de velocidad.

Sin embargo, los reductores de velocidad presentan problemas inherentes a su

propio diseño. Estos dependen de aplicar cierta fricción por unas escobillas para lograr reducir la velocidad. Esto logra incrementar el torque y la resolución, pero a costa de velocidad y precisión. Los motores de transmisión directa no integran estas escobillas ni engranes por lo que eliminan dicha fricción. La figura 3.6 muestra la construcción de un motor de transmisión directa en comparación con un motor de corriente directa.

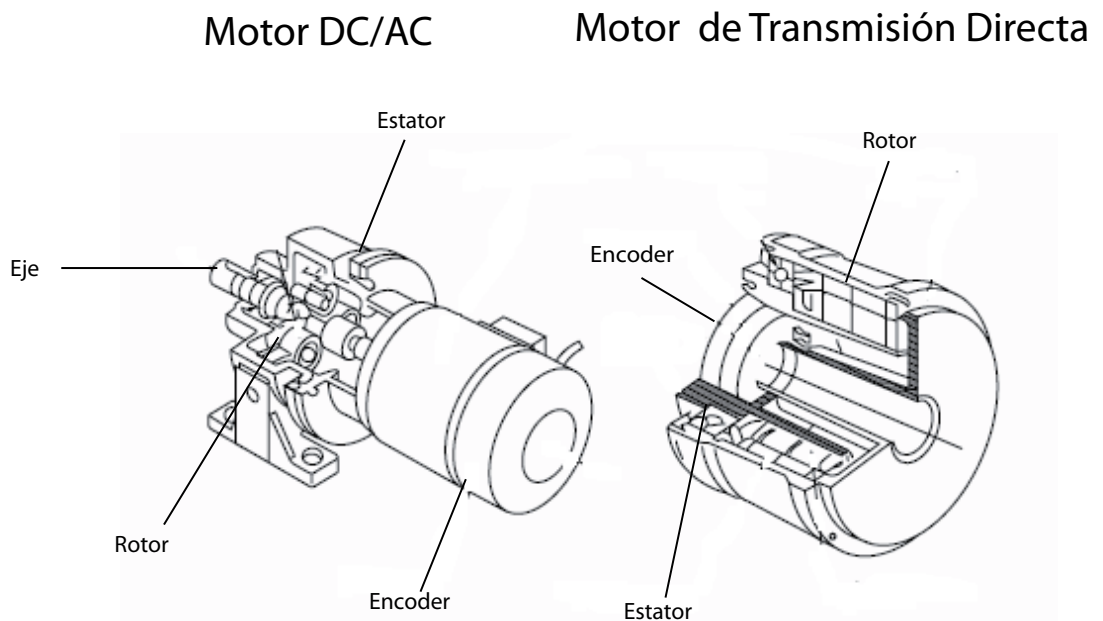


Figura 3.6: Motor de Corriente Directa VS Motor de Transmisión Directa.

Las principales ventajas de usar un motor de transmisión directa radican en que: eliminan el fenómeno de fricción y reducen significativamente las vibraciones ó falta de movimiento, por lo que son frecuentemente utilizados en la robótica, además de tener un gran torque sin la necesidad de tener un tamaño muy grande. También la exactitud en el posicionamiento es mucho mejor que un motor de corriente directa, ya que a diferencia de estos que no pueden ser posicionados en una posición específica y solo pueden moverse a la velocidad y sentido que su alimentación les indica, los motores de transmisión directa pueden ser usados como motores paso a paso.

3.2.5. Dynaserv Motor de Transmisión Directa.

En la presente tesis se trabaja con un motor de transmisión directa Dynaserv modelo DM-1015-B-115 de la Cia. Compumotor®. Las características principales son las siguientes:

- * Velocidad de 2.0 rps.
- * Torque de 15 Nm.
- * Diametro de 6".
- * Voltaje de Entrada de 60V.

Al emplear este tipo de motores se aprovechan las ventajas ya descritas anteriormente, como lo son un mejor desempeño en comparación con los motores de Corriente Directa, su precisión y el torque proporcionado por este tipo de motores. Estos motores pueden satisfacer necesidades de tipo industrial debido a su gran precisión y torque. El modelo empleado proporciona una resolución de hasta 655,360 puntos por vuelta, lo que proporciona resoluciones milimétricas, necesarias por ejemplo cuando se desea soldar una pieza, donde la precisión debe ser exacta.

Estos motores son suministrados en un kit que comprende tres elementos: Motor, Encoder y su respectivo Driver. La figura 3.7 muestra estos elementos. El Driver es la interfaz entre la tarjeta y el motor, es el corazón de los sistemas Dynaserv, ya que su función es el enviar y recibir señales de la tarjeta a los motores y viceversa, principalmente las señales de los encoders para interpretar la posición de cada motor.

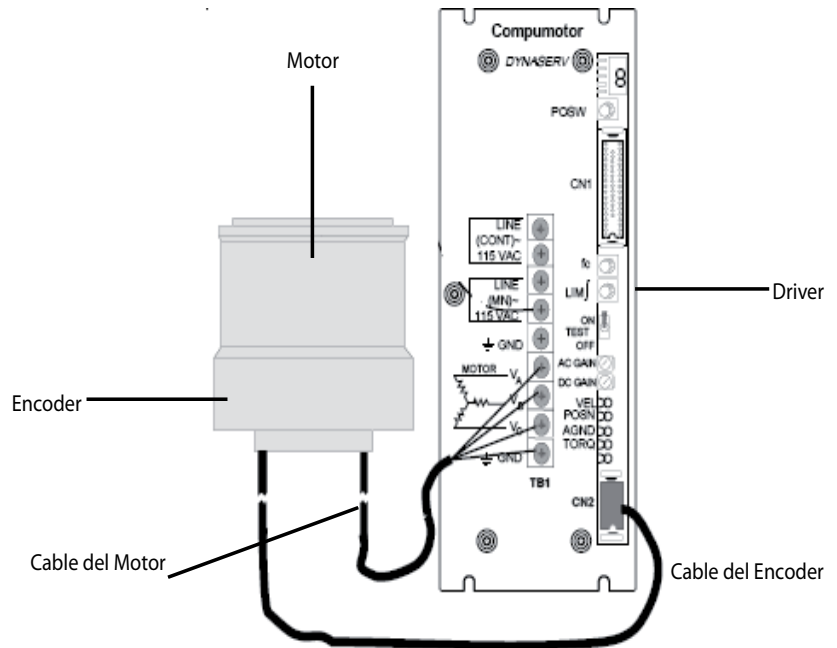


Figura 3.7: Dynaserv Motor de Transmisión Directa

3.3. Tarjetas de Adquisición de Datos

La adquisición de datos consiste en la toma de muestras del mundo real para generar datos que pueden ser manipulados por una computadora[19].

Cuando una computadora digital es usada como controlador de un sistema físico, el proceso de convertir la señal de tal manera que en un mismo sistema puedan interactuar la parte digital y la parte analógica es esencial. Este proceso consiste en tomar un conjunto de variables físicas y digitalizarlas (conversión A/D), así como las señales digitales convertirlas en magnitudes físicas (conversión D/A).

Un *controlador digital*, en el cual una computadora es el corazón, se han ido volviendo cada día más y más comunes sobre todo en la industria. Esto gracias a los avances que se han logrado en cuanto a las computadoras se refiere.

Entre los avances de la lógica digital usada en el control se encuentran por

ejemplo la gran flexibilidad de los programas de control en la toma de decisiones, un programa que caracterize ó ejecute un control digital puede ser modificado para adaptarse a algún cambio en el diseño general de algún sistema, sin realizar modificaciones de Hardware. La posibilidad de manejar una gran cantidad de datos ó variables, mejor confiabilidad, menor influencia del ruido y de interferencias, menor costo y tamaño son algunas de las ventajas ofrecidas por los controladores digitales[5].

Los controladores digitales y las computadoras en sí, necesitan de una interfaz con el mundo físico, que tome un conjunto de variables físicas y las digitalize. Esta interfaz son los *módulos ó tarjetas de adquisición de datos*, comunmente llamadas DAQ's.

Las tarjetas DAQ permiten la entrada y salida de datos de la computadora a otros aparatos donde se conectan sensores para interactuar con el mundo real. Las tarjetas tienen un comportamiento similar a un puerto más en la computadora, como cualquier otro periférico requiere de sus parámetros de programación, y hasta protocolos de comunicación por lo que se requiere de controladores o drivers que manejen la programación a bajo nivel (lenguaje que entienden las máquinas) y permitan programar aplicaciones con los beneficios de dichas tarjetas de una forma sencilla en algún lenguaje de alto nivel (lenguaje orientado a la forma de pensar humana) .

El proceso de adquisición de datos del mundo físico conlleva los siguientes pasos fundamentales:

- 1 Utilización de un sensor/transductor adecuado para la variable que se desea medir, el cual permite detectar y convertir la variable física en una señal analógica de voltaje o corriente eléctrica.
- 2 Acondicionamiento de la señal eléctrica en la que se resuelven problemas relacionados con la señal obtenida como por ejemplo ruido, amplitud y/o potencia de la misma.
- 3 Convertidor Analógico Digital, que es la resolución, que puede ser definida como el número de bits que utiliza el conversor para representar la señal analógica eléctricamente.

- 4 Almacenamiento en forma digital de los datos, los cuales podrán ser almacenados y desplegados por la computadora.

La figura 3.8 muestra un diagrama donde se muestran los puntos mencionados.

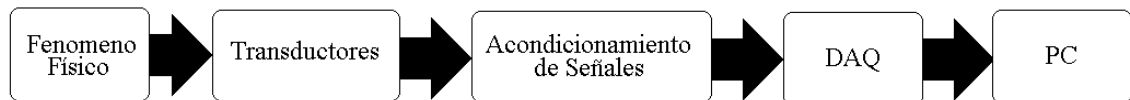


Figura 3.8: Proceso de Adquisición de Datos

3.3.1. Características de las Tarjetas de Adquisición de Datos.

Las tarjetas de adquisición de datos realizan funciones específicas que se desprenden del fenómeno físico el cual se quiere medir y digitalizar. Citando como ejemplo las dos tarjetas empleadas en la presente tesis; la tarjeta PCI-1720 de la marca Advantech, que es una convertidora digital/análogica la cual se encarga de convertir las señales digitales en una señal analógica(voltaje) necesaria para mover el motor, y la tarjeta PCL-833 de la misma marca, que es una tarjeta de *Encoder* de Cuadratura la cual recibe y codifica la posición del motor enviada por el decodificador de cuadratura, se observa que la primera tarjeta debe de contar con salidas analógicas que le permitan enviar una magnitud física en este caso voltajes y la segunda tarjeta necesita de entradas digitales que le permitan recibir las posiciones del motor. De la función específica de cada una tenemos que necesitan de entradas digitales o analógicas, salidas digitales o analógicas, contadores, etc, pero todas las tarjetas tienen funciones generales ó comunes, entre las que encontramos entradas analógicas, frecuencia de muestreo, resolución, niveles de entrada, salidas analógicas, temporizadores, etc.

Entradas Analógicas.

El número de entradas analógicas que tiene una tarjeta son básicamente el número de canales que dispone. La frecuencia de muestreo, la resolución y los niveles de entrada son parámetros dentro de las entradas analógicas. Generalmente muchos de estos parámetros se pueden configurar por software.

Las señales diferenciales se basan en que las dos terminales de una entrada corresponden con dos terminales de entrada de la tarjeta de adquisición de datos. Es decir, que no existe ninguna terminal referenciada a masa. De esta forma se elimina la tensión en modo común. Esta configuración de entrada es útil para la adquisición de señales de bajo nivel.

El modulo del convertidor analógico-digital recibe un voltaje de entrada analógico y después de un determinado tiempo produce un código con salida digital que representa a la entrada analógica con una precisión y resolución determinada. Dado que el número de bits que se obtienen de un convertidor es finito, el código de salida deberá ser siempre el correspondiente al valor mas cercano que puede representarse mediante los bits, la conversión digital efectúa una cuantificación en la entrada analógica, acotándola entre dos niveles consecutivos cuya distancia es precisamente el grado de resolución obtenido.

Frecuencia de Muestreo.

Determina la velocidad a la que se producen las conversiones del ADC. Una frecuencia de muestreo elevada proporciona señales con mayor calidad de definición de tiempo; al mismo tiempo aumenta el flujo de datos hacia el procesador. Por tanto, se habrá de buscar un valor de compromiso que haga óptimo el funcionamiento del sistema.

Resolución.

Indica el número de bits que utiliza el convertidor A/D. para cuantificar los niveles de la señal analógica. Cuanto mayor sea el número de bits del DAC, mayor será el numero de niveles de la señal que se puede representar.

Niveles de Entrada.

Son los límites de entrada de tensión de la tarjeta de adquisición de datos. Es común diferenciar entre señales unipolares y bipolares. Las señales unipolares admiten únicamente niveles de tensión positivos mientras que las bipolares permiten las dos polaridades.

Salidas Analógicas.

Básicamente las características técnicas de las salidas analógicas son las mismas comentadas para las entradas analógicas, en sentido inverso para el modulo del convertidor digital analógico.

Temporizadores.

Son líneas útiles para muchas aplicaciones tales como contar el número de veces que se produce un evento, generar bases de tiempo para procesos digitales o generación de pulsos.

3.3.2. Tarjeta Decodificadora de Cuadratura(PCL-833).

La tarjeta PCL-833 es una tarjeta decodificadora de cuadratura insertable en el bus ISA de una PC. Esta tarjeta permite a la PC realizar monitoreo de posición para los sistemas de control de movimiento[12]. Cada entrada incluye un circuito decodificador para la codificación de cuadratura incremental. La figura 3.9 muestra la PCL-833.

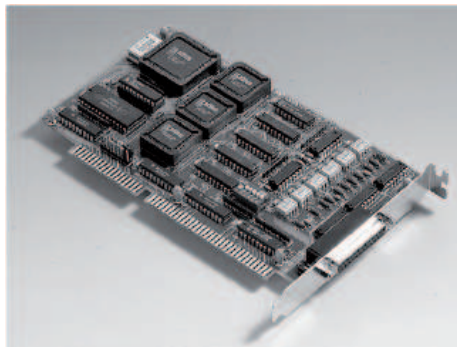


Figura 3.9: Tarjeta Decodificadora de Cuadratura de 3 ejes(PCL-833)

Las entradas aceptan tanto señales diferenciales como comunes. La PCL-833 tiene tres contadores de 24 bits independientes. Las entradas de cuadratura trabajan con o sin un index lo que permite una retrolimentación lineal ó rotatoria. El rango mayor de entrada de cuadratura es de 1.0 MHz, y el máximo en el modo de contador es de 2.4 MHz.

Especificaciones.

A continuación se presenta un listado con las especificaciones de la PCL-833.

Encoder

- * **Entrada (tipo.)** Diferencial ó común.
- * **Resolución.** x1, x2, x4. (seleccionable).
- * **Rango de Entrada.** 12 V max.
- * **Frecuencia max de entrada.** 2.4MHz.

Contadores.

- * **Canales:** 3
- * **Resolución:** 24 bits
- * **Compatibilidad:** 5 V/TTL
- * **Frecuencia max de entrada:** 2.4MHz.
- * **Modos de Conteo:** 3(cuadratura, ascendente/descendente, pulso/dirección)

General.

- * **Bus:** ISA
- * **Certificaciones:** CE
- * **Conector:** DB-25 hembra
- * **Dimensiones:** 185 x 100 mm
- * **Consumo de Poder:** Tipico(5 V @ 700 mA, 12 V @ 15 mA)

Esta tarjeta es utilizada para las siguientes aplicaciones: control de movimiento, sensado de posición, monitoreo y medición, robótica y control de máquinas.

En el laboratorio de Robótica de la Facultad de Ciencias de la Computación se cuenta con varias tarjetas de la marca Advantech, ya que estas además de ser de gran utilidad en las aplicaciones arriba mencionadas, son de fácil instalación, conexión y

programado. Advantech distribuye con sus tarjetas los manuales, controladores necesarios para la instalación para diversas plataformas, un *tester* y software compatible con todas las tarjetas de esta marca. Así mismo, la conexión es sencilla, ya que como se cita en las especificaciones generales, la tarjeta tiene un conector DB-25 hembra. La figura mostrada abajo muestra la configuración del conector de la PCL-833.

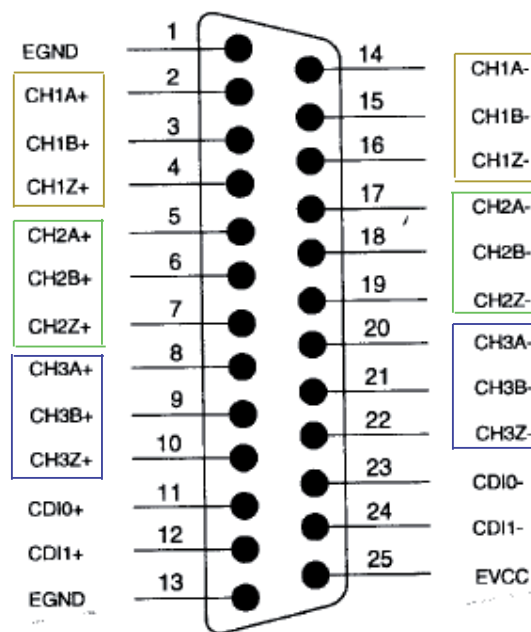


Figura 3.10: Asignación de Pins del Conector DB-25 de la PCL-833

Introducción a los Decodificadores de Cuadratura.

En el capítulo anterior se mencionó que los motores de DC y los motores de transmisión directa tienen integrado un encoder de cuadratura con el fin de sensar y conocer su posición en un determinado momento. La PCL-833 lee las señales enviadas por el encoder. Esta tarjeta tiene 3 canales de entrada por lo que permite trabajar con 3 motores simultáneamente.

Básicamente un encoder de cuadratura consiste en un disco giratorio, el cual posee un gran número de ranuras. Una fuente de luz estacionaria se encuentra montada fija a un lado del disco, en el lado opuesto directamente enfrente del emisor de luz se hallan ubicadas dos fototransistores como se muestra en la figura 3.11. Dichos

fototransistores se encuentran desalineadas respecto a las ranuras del disco giratorio en una distancia de $1/4$ de la distancia existente entre dos ranuras, lo que permite disponer de 2 señales comunmente llamadas Canal A y Canal B desfasadas 90° entre sí. Cuando el disco gira en el sentido de las manecillas del reloj el fototransistor 'A' recibe luz, mientras que el fototransistor 'B' está a oscuras, pero luego de una rotación adicional de $1/4$ de la distancia entre ranuras, la celda 'B' tendrá luz incidente [12].

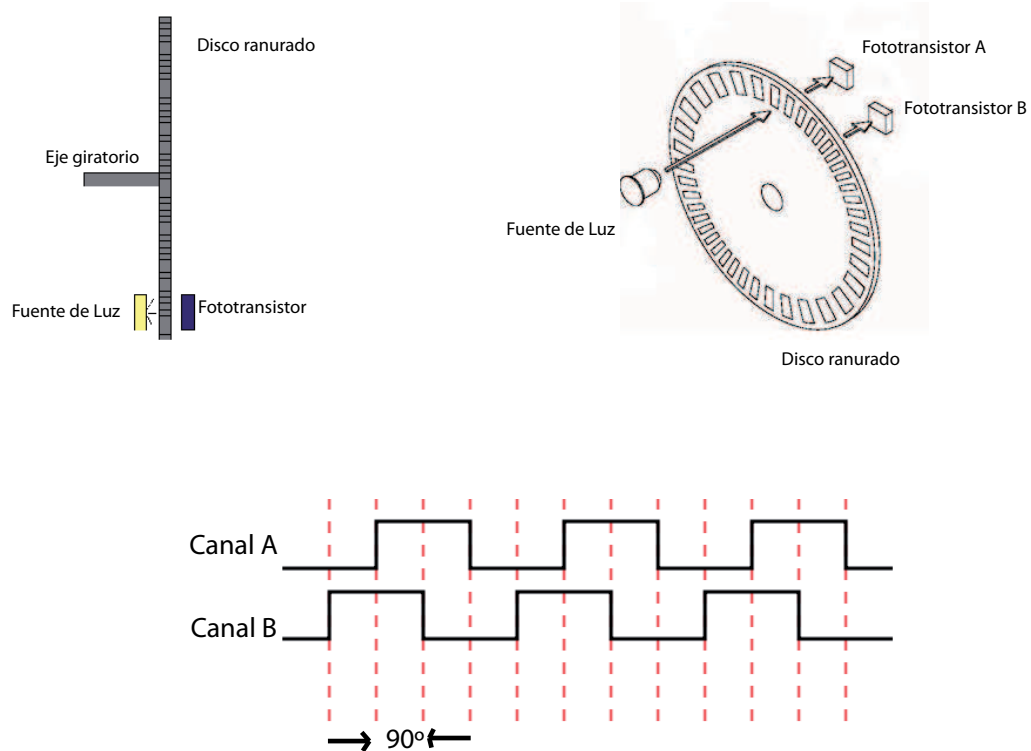


Figura 3.11: Encoder de Cuadratura

El encoder genera pulsos que indican la posición actual del motor, dichos pulsos son representados como una onda cuadrada como se ilustra en la figura anterior, por lo cual son llamados de *cuadratura*. Estos pulsos son enviados y decodificados por la PCL-833.

3.3.3. Tarjeta Convertidora de D/A(PCI-1720).

La PCI-1720 es una tarjeta convertidora analógico a digital de 4 canales de salida insertable en el bus PCI de una PC. Esta tarjeta usa un controlador PCI para

comunicarse con el bus PCI. Las configuraciones tales como la dirección base y la asignación de interrupciones son controladas automáticamente por software[11].

Una de las características principales de esta tarjeta es que se puede configurar los 4 canales de salida para trabajar con rangos diferentes: 0 a +5V, 0 a +10V, $\pm 5V$, $\pm 10V$. Entre las aplicaciones en las que se puede usar esta tarjeta están: control de procesos, fuente de voltaje programable, y servo control. La figura 3.12 muestra la tarjeta PCI-1720.

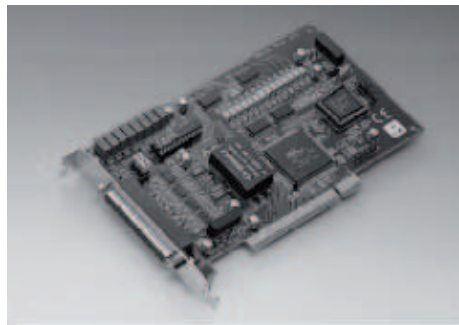


Figura 3.12: Tarjeta Convertidora D/A de 4 canales de salida(PCI-1720)

Especificaciones.

A continuación se presenta un listado con las especificaciones de la PCI-1720.

Salida D/A.

- * **Canales:** 4 canales aislados de salida
- * **Resolución:** 12 bits
- * **Rango de Salida:** 0 a +5V, 0 a +10V, $\pm 5V$, $\pm 10V$

General.

- * **Bus:** PCI
- * **Conector:** DB-37 hembra
- * **Dimensiones:** 175 x 100 mm

Capítulo 4

Sistema de Control PI de Posición

En este capítulo se presenta el desarrollo de la tesis, la metodología empleada, la implementación física así como el algoritmo empleado. Finalmente se muestra las ventanas que conforman al Sistema PI de Control de Posición.

4.1. Introducción

El control automático de procesos como se ha descrito anteriormente se encuentra en las mayoría de los procesos tanto cotidianos como en la industria. Más aún, el control digital es ya parte común en donde se necesita un control de grandes procesos en donde se tengan gran cantidad de variables o elementos a controlar, o en donde la intervención del hombre suponga un riesgo para el mismo. Ante esto, el estudio y entendimiento del funcionamiento e implementación de los sistemas de control más comunes empleados en la industria es fundamental en la preparación del futuro ingeniero o licenciado en sistemas.

Dentro del laboratorio de Robótica no se cuenta con sistemas que ilustren el funcionamiento de los tipos de control básicos, ante lo cual surgió la necesidad de implementar un sistema cuya finalidad es que los alumnos de la Facultad de Ciencias de la Computación estudien de cerca a los controladores más comunes, específicamente a los del tipo proporcional integral, aprovechando el material disponible.

El objetivo general de la presente tesis es *posicionar el motor de un eslabón del brazo robótico lo más rápido y preciso posible, usando un controlador proporcional integral (PI)*, a través de una PC con la ayuda de dos tarjetas de adquisición de datos, una que permite enviar los voltajes al motor y la otra que permitan sensar la posición del motor. Cabe mencionar que la posición del eslabón esta asociada a una posición del motor, es decir, de ahora en adelante se usa el termino *desplazar al motor* para referirse a que este efectúa un giro sobre su eje. A continuación se describe el sistema desarrollado.

El **sistema PI de control de posición** esta dividido en tres partes las cuales se encargan de sensar la posición del motor, de enviar el voltaje adecuado para desplazar al motor a la posición deseada y de determinar tal voltaje. Los módulos que realizan estas funciones son respectivamente el *módulo de sensor de posición*, el *módulo de movimiento del motor* y el *módulo de control*. La figura 4.1 muestra el diagrama a bloques del sistema PI de control de posición.

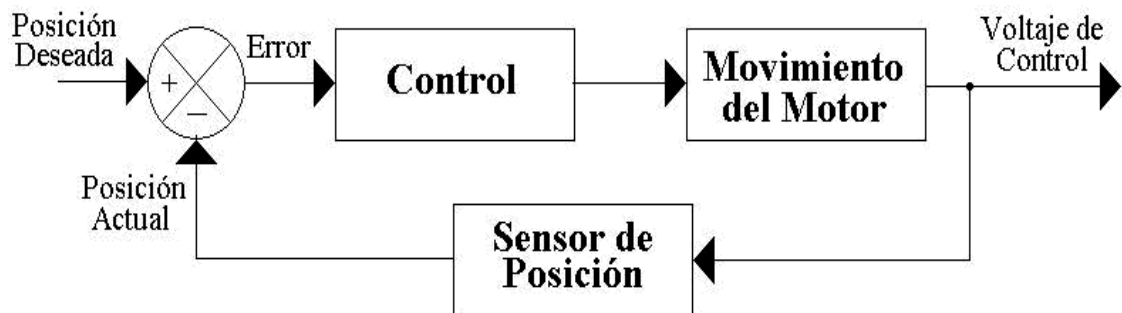


Figura 4.1: Diagrama de Bloques del Sistema de control PI de Posición

A continuación se detallará la implementación de estos tres módulos y del software de control PI con el que se controla al motor. Como se observa en la figura anterior el *sistema PI de control de posición* es un sistema de control en lazo cerrado o retroalimentado.

4.2. Módulo de Sensor de Posición

Este módulo es el encargado de determinar la posición actual del motor y enviarla al módulo de Control para que este, basándose en la diferencia entre la posición deseada y la posición actual, obtenga un error y calcule en base a tal error el **voltaje de control** adecuado para lograr el objetivo deseado. El módulo de sensor de posición está conformado por 3 elementos principales, los cuales son: el *encoder* de cuadratura, el *driver* del motor y la tarjeta de encoder de cuadratura (PCL-833), que son interconectados entre ellos para que al final el módulo de control reciba la posición del motor.

El driver es la interfaz entre el motor y el exterior, en este caso es la interfaz entre el motor y las tarjetas de adquisición de datos. Su función es el enviar y recibir señales de la tarjeta a los motores y viceversa, principalmente las señales de los *encoders* para interpretar la posición de cada motor. El driver empleado en este proyecto es de la empresa *Parker Motion and Control*, serie *DM Dynaserv*. Este *driver* ofrece una alta estabilidad en sistemas con servomotores, contiene el ya mencionado sistema para *encoders* ópticos en respuesta de retroalimentación, o mejor conocido como lazo cerrado.

La serie DM puede ser operada en cualquiera de los tres modos que ofrece, que son posición, velocidad o torque. En modo de posición el *driver* acepta entradas de paso y dirección, y en modo de velocidad y torque requiere $\pm 10V$ de entrada, en este proyecto fue configurado para trabajar en modo de posición. El *driver* provee de un *display* de siete segmentos para que el usuario verifique el estado del mismo, si existe un error en el sistema.

El driver dispone de 2 conectores denominados CN1 y CN2 para poder comunicarse con el exterior. El conector CN2 es el que comunica al *driver* con el encoder, para ello se cuenta con un cable con un conector Honda de 16 pines, el cuál se distribuye ya precableado. El conector CN1 permite la comunicación con las tarjetas, este conector recibe los voltajes que son enviados por la tarjeta convertidora de D/A (PCI-1720) además de enviar la posición leída por el encoder a la tarjeta de decodificadora de cuadratura (PCL-833). La figura 4.2 muestra al driver y al motor con su *encoder*. Se puede observar la distribución de los conectores así como del *display*.

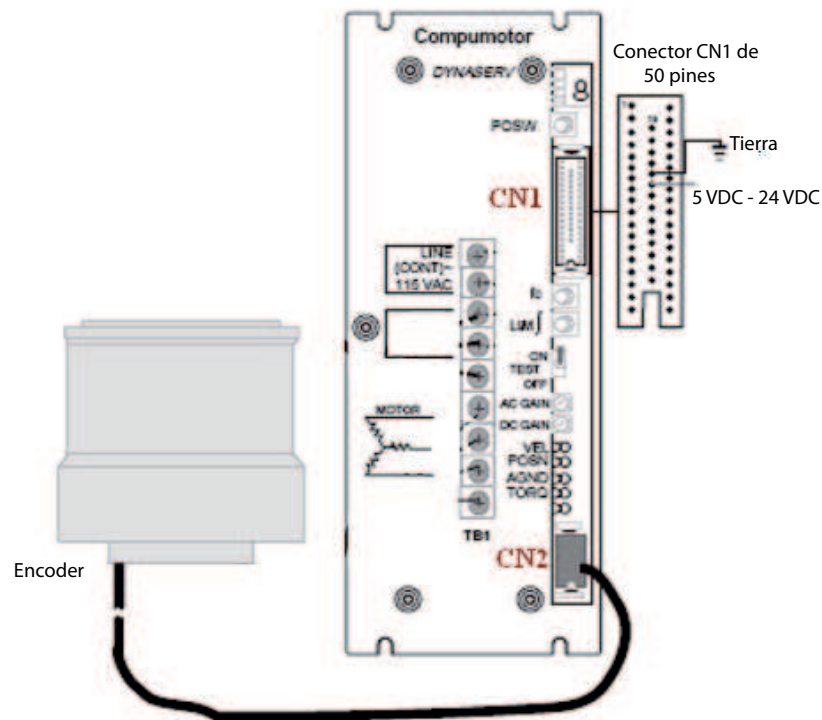


Figura 4.2: Componentes del Módulo de Sensor de Posición.

La figura anterior muestra la conexión entre el *driver* y el *encoder*. El siguiente paso es comunicar el *driver* con la PCL-833, para ello se hizo un cable cuyos extremos son de un lado un conector Honda de 50 pines el cual se conecta con el conector CN1 del *driver*, y en el otro extremo un conector DB-25 el cual irá conectado con la PCL-833. Para ello es necesario conocer la configuración de los pines tanto del conector CN1 del *driver* como del conector de la tarjeta PCL-833, esto para que los pines de entrada de la PCL coincidan con los pines de salida de la CN1. La figura 4.3 muestra la configuración de los pines del conector CN1 del *driver*.

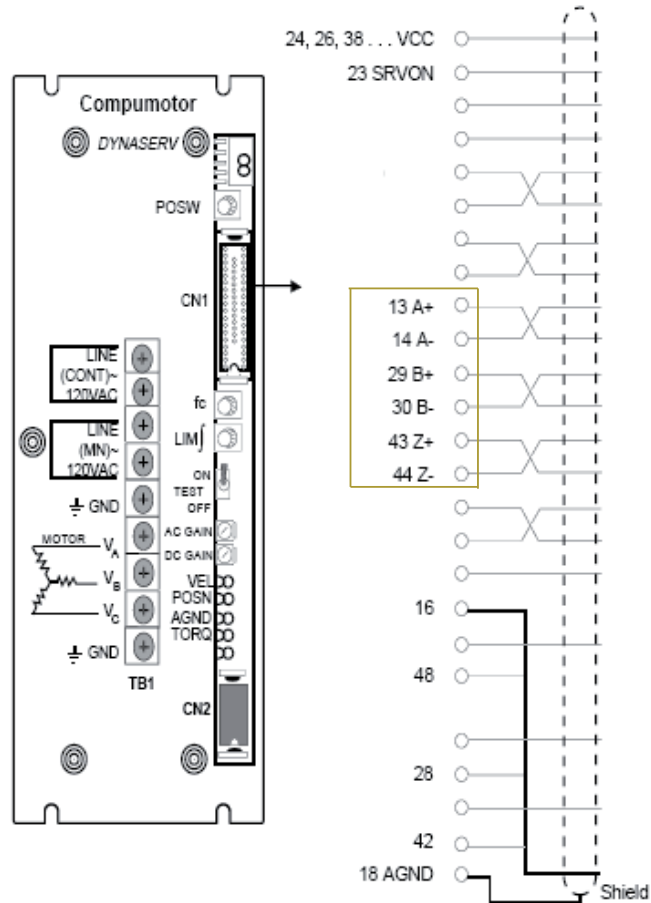


Figura 4.3: Configuración de los pines del conector CN1 del driver.

En la figura anterior se observan los pines a través de los cuales se enviarán las señales hacia la PCL-833, la figura 3.10 muestra la configuración de pines del conector DB-25 de la PCL-833, por lo que basándose en estas figuras es fácil observar la correspondencia entre los pines de los conectores del *driver* y de la PCL-833. La figura 4.4 ilustra la conexión entre la PCL-833 y los drivers de los motores.

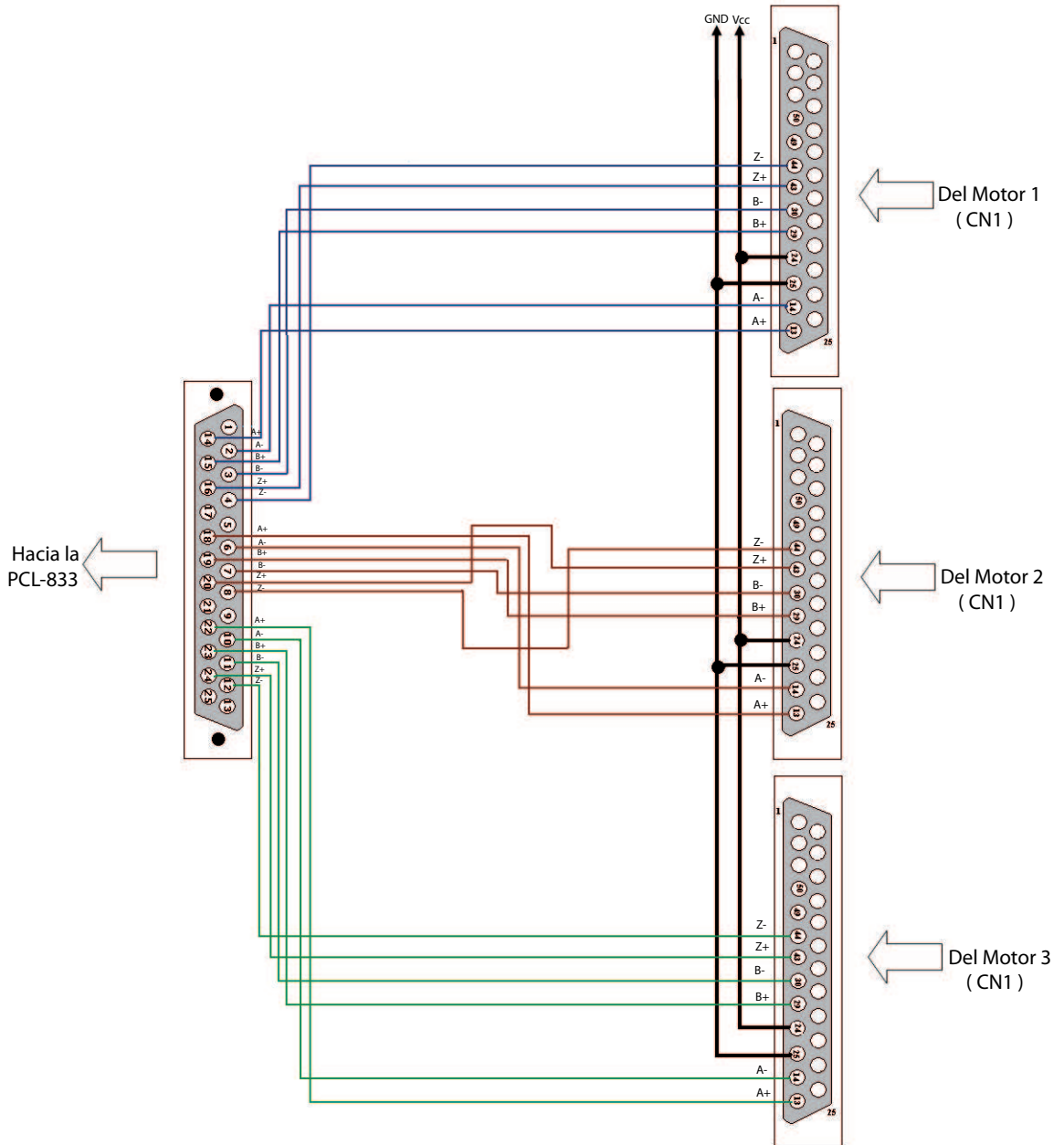


Figura 4.4: Conexión de la PCL-833 con los motores.

Como ya se ha descrito anteriormente, la PCL-833 permite trabajar con 3 motores al mismo tiempo por lo que tiene 3 canales de entrada como se puede observar en la figura 3.10. Aunque en la presente tesis solo se trabajará con un solo motor, para fines

prácticos se han cableado ya los 3 motores del brazo robótico con la tarjeta PCL-833.

Se puede observar que cada color representa un canal de entrada de la PCL-833 y que a cada canal de entrada le corresponde la señal del encoder de cuadratura de un motor, a los cuales se les ha denominado *Motor 1*, *Motor 2* y *Motor 3*. Teniendo como referencia a un brazo, los motores son las *articulaciones* que permitirán que el brazo se desplace, el motor 1 corresponde al *hombro*, el motor 2 corresponde a un *codo* y el motor 3 corresponde a la *muñeca* de un brazo. En el presente proyecto solo se trabaja con el Motor 3, por lo que únicamente existirá transferencia de datos entre los pines del conector CN1 el driver del **Motor 3** y los pines del **canal 3** de la PCL-833. El lector observará que existen dos líneas en negro que conectan los pines 23 y 24 de cada driver a una fuente externa que suministra **tierra** y **5 V** respectivamente, esto es para habilitar al motor ya que en caso contrario simplemente no se podrá trabajar con el motor.

La tabla 4.1 muestra la correspondencia entre los pines de los conectores.

Señal	Pin PCL-833 Canal 1	Pin PCL-833 Canal 2	Pin PCL-833 Canal3	Pin CN1 driver Motor x
A+	2	5	8	13
A-	14	17	20	14
B+	3	6	9	29
B-	15	18	21	30
Z+	4	7	10	43
Z-	16	19	22	44

Tabla 4.1: Correspondencia entre los pines de los conectores DB-25 de la PCL-833 y los pines de los drivers del motor.

4.3. Módulo de Movimiento del Motor

Este módulo es el encargado de enviar el voltaje de control determinado en el módulo de control al motor para que este se desplace a la posición deseada, y al igual que el módulo de sensor de posición esta conformado por 3 elementos principales: el motor de transmisión directa, el *driver* del motor y la tarjeta convertidora de D/A (PCI-1720), que son conectados entre ellos para que el motor reciba el voltaje de

control. A continuación se detalla la forma en que se conectan estos elementos.

El primer paso es conectar el motor de transmisión directa con su respectivo driver. La figura 4.5 muestra la conexión entre el motor y el driver.

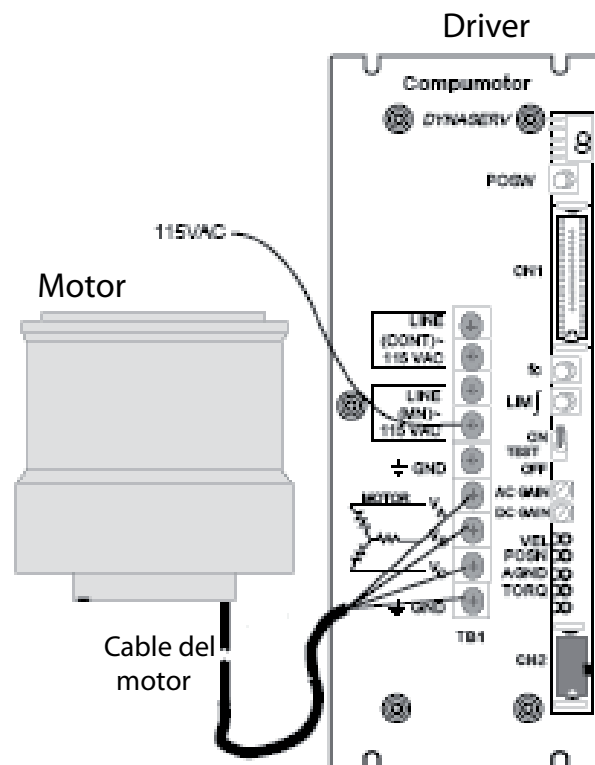


Figura 4.5: Componentes del Módulo de Movimiento del Motor.

Después de conectar al motor con el driver se procede a establecer la comunicación entre el driver y la PCI-1720. Para ello hay que tener en cuenta la correspondencia entre los pines del conector CN1 del driver y del conector de la PCI.1720. La figura 4.6 muestra la configuración de los pines del conector CN1 del driver que reciben los voltajes enviados a través de la PCI-1720.

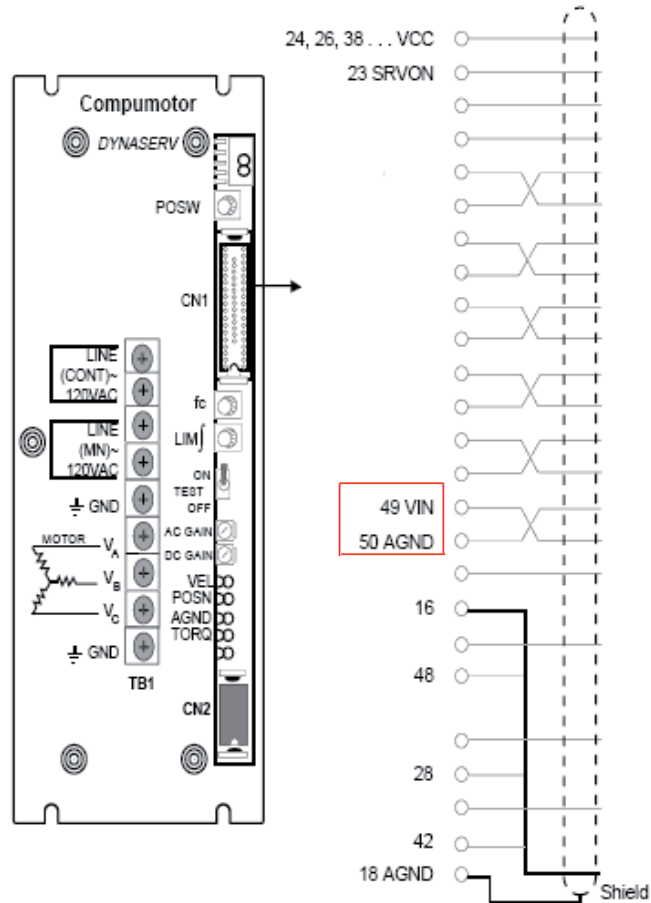


Figura 4.6: Configuración Pines del conector CN1 del Driver

De la figura 3.13 se obtiene la configuración de los pines del conector DB-37 de la PCI-1720. Podemos observar que esta tarjeta tiene 4 canales de salida, lo que permite enviar voltajes a 4 motores diferentes, aunque en este caso se conectara con 3 motores, que son los mismos que se mencionan en el módulo anterior. La figura 4.7 muestra la conexión entre la PCI-1720 y los drivers de estos 3 motores.

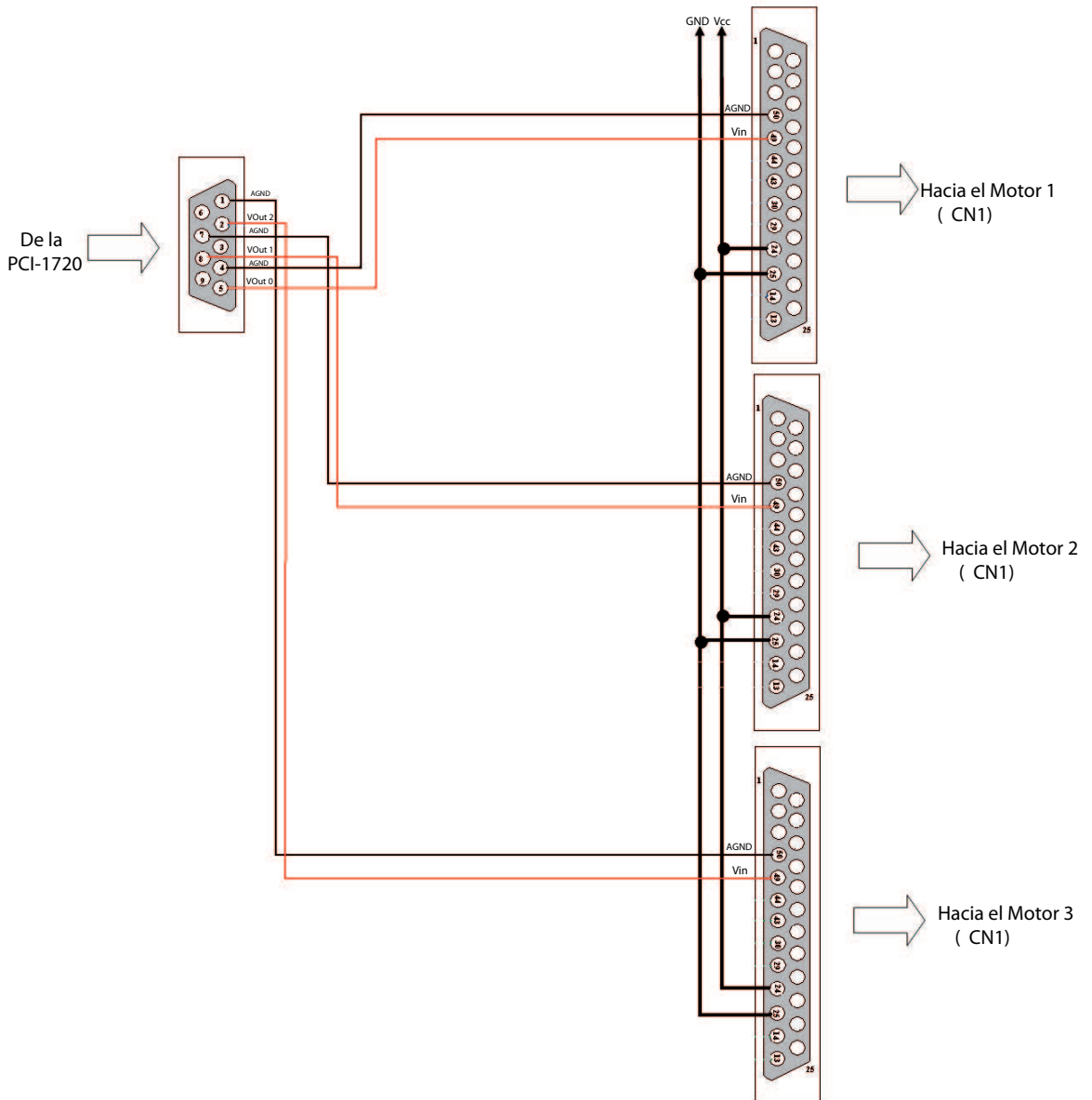


Figura 4.7: Conexión de la PCI-1720 con el Driver del Motor

En esta figura se observa igual las conexiones entre los drivers y la fuente externa que le proporcionan un voltaje de 5v al pin 24 y tierra al pin 23 para poder habilitar al motor. Esta conexión es la misma que se muestra en el diagrama de la figura 4.4. La tabla 4.2 muestra con mas claridad la correspondencia entre los 3 primeros canales de salida de la PCI-1720 y el conector CN1 del driver de un motor.

Señal	Pin PCI-1720 Canal 1	Pin PCI-1720 Canal 2	Pin PCI-1720 Canal3	Pin CN1 driver Motor x
Vout	5	8	11	49
AGND	6	9	12	50

Tabla 4.2: Correspondencia entre los pines de los conectores DB-37 de la PCI-1720 y los pines de los drivers del motor.

De la tabla anterior se observan los pines que corresponden de un canal de salida de la tarjeta a los pines de entrada del conector CN1 del driver. Al trabajar únicamente con un solo motor, en este caso el motor 3, solo existe transferencia de datos entre el driver del motor 3 y los pines correspondientes al canal 3 de la PCI-1720. Igualmente el cable que une a la tarjeta con los drivers ya cuenta con las líneas que comunican los pines de los primeros tres canales de salida de la PCI-1720 con los drivers de los 3 motores del brazo.

Finalmente la figura 4.8 muestra la configuración final de la conexión entre el driver y las tarjetas de adquisición de datos, tanto para el envío de voltajes al motor como para la lectura de la posición del mismo.

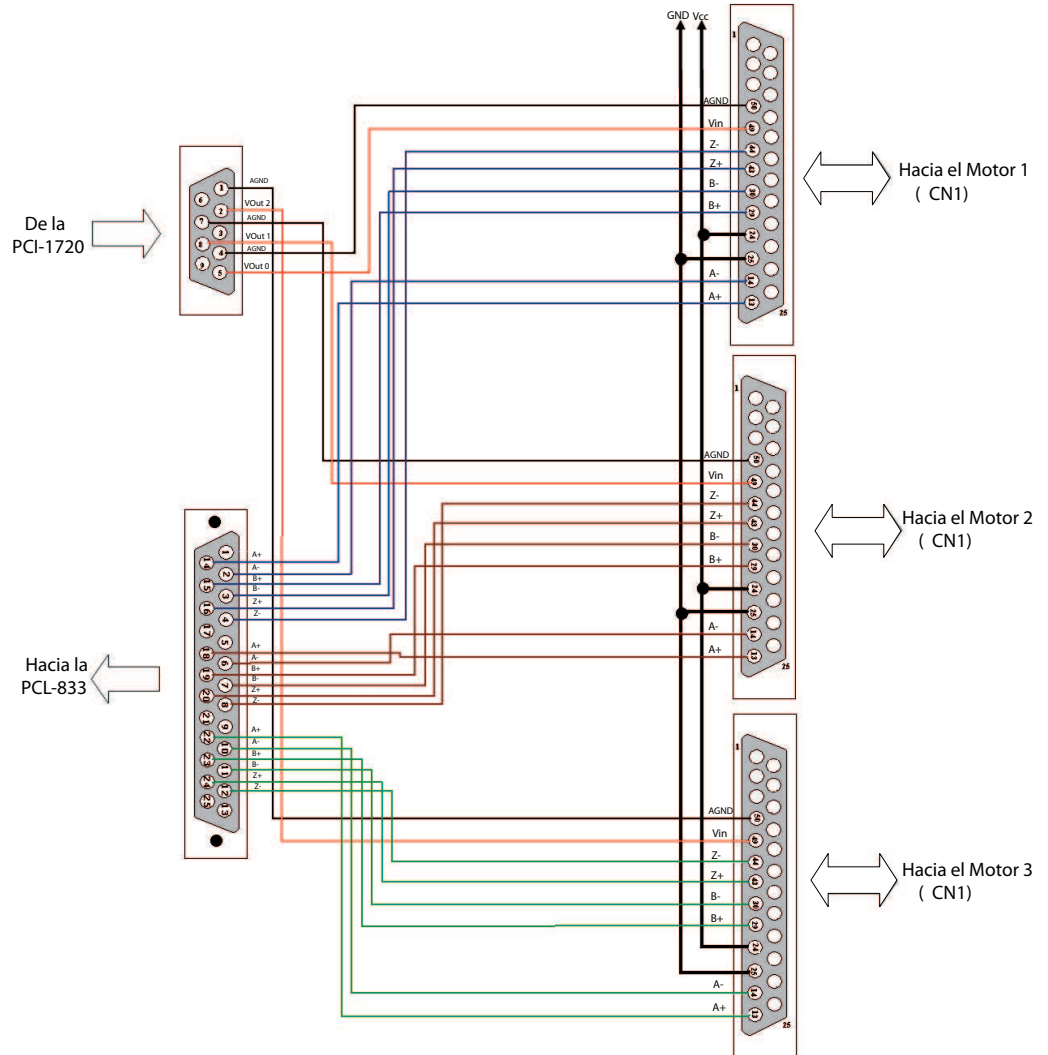


Figura 4.8: Conexión entre los drivers y las tarjetas de adquisición de datos.

La tabla 4.3 muestra con más claridad la correspondencia entre los pines de las tarjetas y los drivers de los motores que se muestran en la figura anterior.

		No. de Pin			
Señal		Canal 1	Canal 2	Canal 3	CN1 Driver Motor x (3)
PCL - 833	A+	2	5	8	13
	A-	14	17	20	14
	B+	3	6	9	29
	B-	15	18	21	30
	Z+	4	7	10	43
	Z-	16	19	22	44
PCI- 1720	AGND	5	8	11	49
	VIN	6	9	12	50
Fuente	5v				23
externa	GND				24

Tabla 4.3: Conexión final entre las tarjetas y los motores.

4.4. Módulo de Control

Este módulo es el encargado de determinar el voltaje de control adecuado para que el motor llegue a la posición deseada lo mas rápido y preciso posible. Para ello se utiliza un controlador proporcional integral, el cuál es el encargado de determinar el voltaje de control.

Como se ha mencionado anteriormente, los **controladores** son el núcleo de los sistemas de control ya que son los algoritmos que determinan la acción de control que se ejecuta para lograr el objetivo deseado.

En los subcapítulos anteriores se ha descrito la forma en que se conectan el motor de transmisión y el encoder de cuadratura con las tarjetas de adquisición de datos, es decir, como se comunica la PC con el motor, para que basándose en los datos recibidos por el encoder de cuadratura determine la acción de control que sera enviada al motor por medio de la PCI-1720.

Este módulo esta conformado básicamente por la PC donde se ejecuta el algoritmo de Control. El algoritmo PI utilizado es el siguiente:

1. Leer ganancia proporcional.

2. Leer ganancia integral.
3. Leer posición actual del motor.
4. Leer posición deseada del motor.
5. El error actual es la diferencia entre la posición deseada y la posición actual del motor.
6. ¿El error actual es igual a cero?. Sí pasa a 7, no pasa a 8
7. Voltaje de control es igual a cero; Pasa a 11.
8. Voltaje de control es el error por la ganancia proporcional.
9. Error acumulado es igual al error acumulado más el error actual.
10. Voltaje de control es igual al voltaje de control más el error acumulado por la ganancia integral.
11. Aplica el voltaje de control al motor.

La figura 4.9 muestra el diagrama de flujo que esquematiza al algoritmo PI utilizado.

Tanto la ganancia proporcional como la integral son determinadas por el usuario y guardadas para su uso, la posición deseada también es introducida por el usuario ya que el mismo usuario determinará a que posición deseara desplazar al motor. La posición actual de motor se recibe a través de la PCL-833. El voltaje de Control nos indica la velocidad a la que hay que mover al motor para que llegue a la posición deseada, mientras mas grande sea el error, el voltaje de control será mayor decrementandose conforme se acerque el motor a la posición deseada. El voltaje de control es enviado al motor por la PCI-1720.

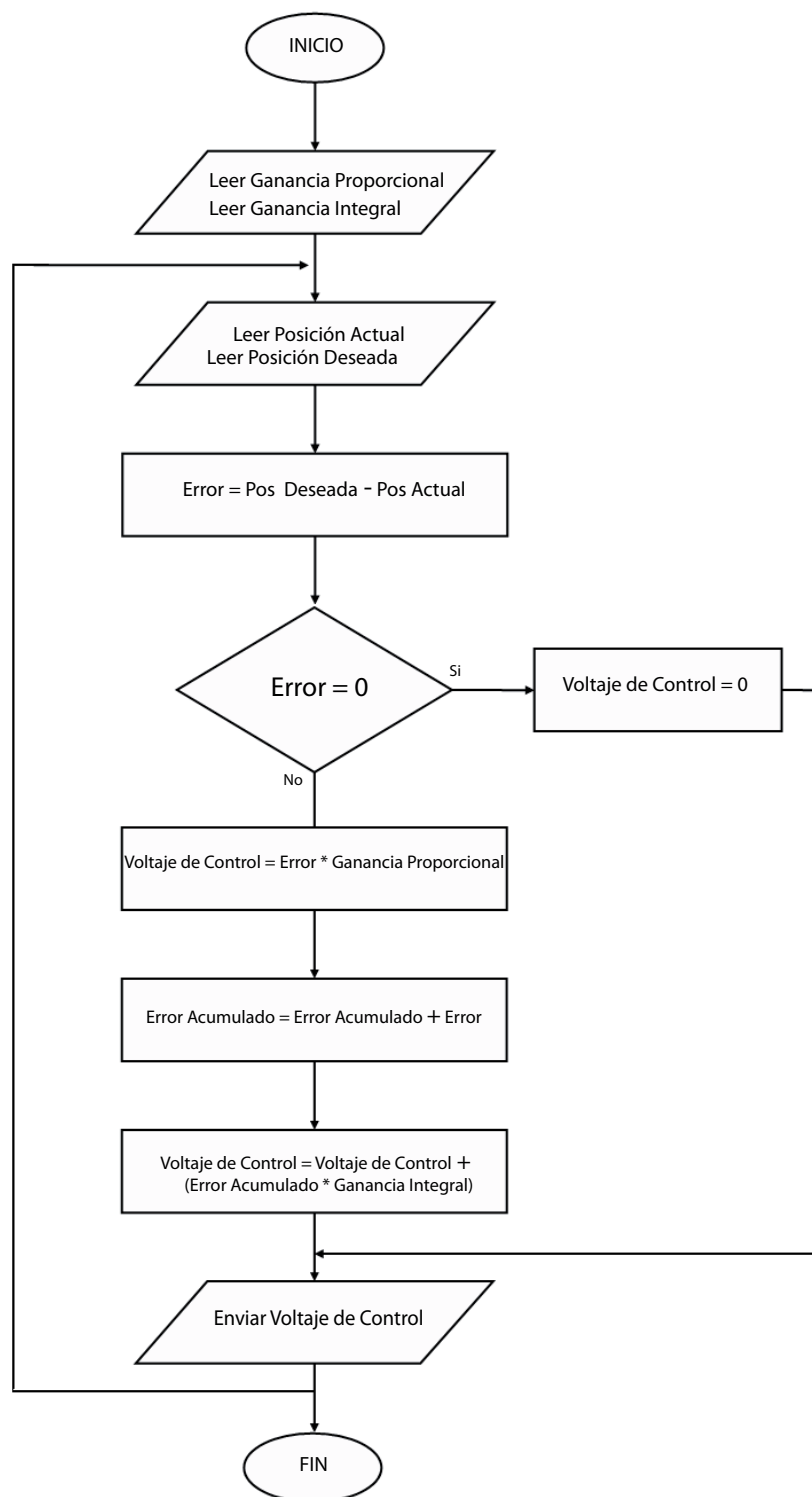


Figura 4.9: Diagrama de Flujo del Controlador PI

Del diagrama anterior podemos observar claramente lo que se ha explicado en los capítulos anteriores; el control proporcional no es más que la multiplicación del error por una constante (ganancia proporcional) que se guarda en una variable llamada voltaje de control.

Posteriormente se calcula el control integral, el cual en la variable error acumulado va sumando los errores al paso del tiempo, y es que de ahí recibe el nombre de integral, ya que la integral representa una suma; y también es multiplicada por una ganancia integral y sumada al voltaje de control.

Nótese que se puede aplicar únicamente un control proporcional estableciendo de inicio una ganancia integral igual a cero, lo que volvería nulo al valor del control integral, al igual que se puede aplicar solo un control integral poniendo a cero la ganancia proporcional.

A continuación se presenta el sistema desarrollado, el cual se denomina **Software PI de Control de Posición**. El sistema (algoritmos de control e interfaz gráfica) fue implementado en el entorno de programación Microsoft Visual Basic 6.0 usando una PC Pentium III a 450 MHz con 64 MB de memoria RAM y Microsoft Millennium. El *Software PI de Control de Posición* en el cuál está implementando el algoritmo PI cuenta con tres subrutinas las cuales tienen funciones específicas. La primera solo permiten el envío de voltajes al motor así como la lectura de la posición del mismo pero sin aplicar algún algoritmo de control de por medio, la segunda subrutina aplica un control Proporcional/Proporcional Integral para posicionar al motor en una posición deseada y la tercera subrutina hace que motor siga un pulso cuadrado aplicando un control Proporcional/Proporcional Integral.

4.5. Software PI de Control de Posición

El programa consta de dos ventanas, en la primera se configuran e inicializan las tarjetas a ocupar y en la segunda se introducen los datos para poder aplicar el algoritmo de control, así como mostrar un gráfico que ilustre el desempeño del

algoritmo.

La figura 4.10 muestra la ventana inicial del software. Se observa claramente que esta pantalla se puede dividir en dos partes; en la parte izquierda se encuentran las opciones para la tarjeta de encoder de cuadratura, como lo son el canal de entrada, la resolución y como almacena los datos provenientes del encoder. En la parte derecha se encuentran las opciones de la tarjeta convertidora de D/A, para esta únicamente se debe especificar el canal de salida.



Figura 4.10: Ventana Inicial del Software de Control PI de Posición

El software PI fue montado sobre una plataforma general distribuida por Advantech para el manejo de sus tarjetas. Esta plataforma reconoce todas las tarjetas de la marca Advantech siempre y cuando se encuentren presentes físicamente y habilitadas en la PC. Así mismo esta plataforma solo permite trabajar con una sola tarjeta a la vez. El software PI ya fue configurado para detectar y trabajar con dos tarjetas, específicamente con la PCL-833 y la PCI-1720. Para ello al ejecutar el software se configuran y preparan estas dos tarjetas automáticamente, por lo cual solo queda

definir sus opciones por parte del usuario.

Para la PCL-833 se configura el canal de entrada, el modo de entrada que no es más que la resolución del encoder y como se almacenan los datos provenientes del encoder. Dependiendo del motor que se este sensando su posición se habilita un canal de entrada, en este caso el canal que corresponde al motor con el que se trabaja es el canal 2, el cual corresponde al Motor 3 del brazo robótico. En la parte de modo de entrada se pueden elegir la resolución del encoder, siendo AB X4 la más alta, AB X2 la mediana y AB X1 la menor resolución posible. A mayor resolución mayor será la precisión del motor.

Para la PCI-1720 solo se configura el canal de salida que corresponda al motor con el que se este trabajando, en este caso se habilita el canal de Salida 2 que corresponde al Motor 3. Al presionar el botón Habilitar se muestra la pantalla principal del software.

La figura 4.11 muestra la ventana principal del Software PI de Control de Posición. Esta ventana cuenta con 4 secciones que realizan funciones específicas, la parte denominada **Manual** tiene la función de enviar únicamente un voltaje que el usuario debe especificar sin aplicar algún algoritmo de por medio. La parte **Control Proporcional Integral(PI)** ejecuta el control PI, la parte denominada **Onda Cuadrada** ejecuta el control PI siguiendo un pulso cuadrado, y finalmente el en la parte inferior es empleada para trazar la gráfica que muestra el desempeño del algoritmo.

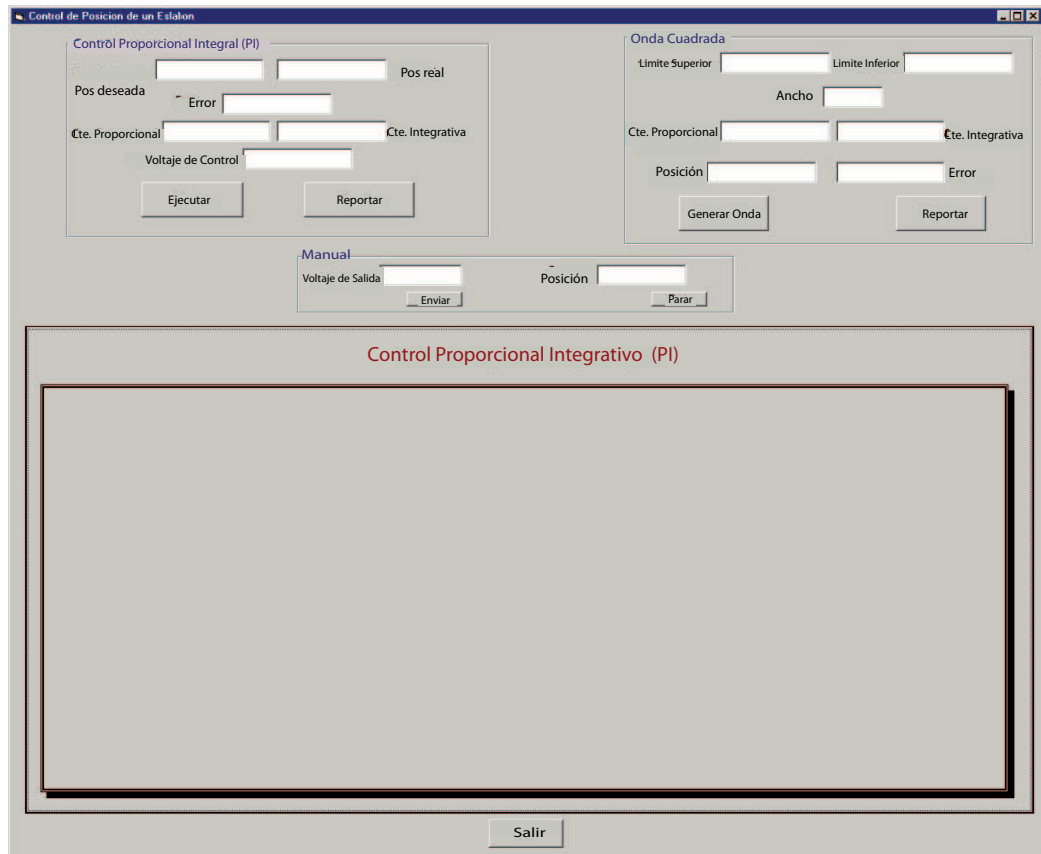


Figura 4.11: Ventana Principal del Software PI de Control de Posición

La figura 4.12 muestra la sección del software en donde se aplica el control PI. En esta se observa que se cuenta con varias opciones: *Posición Deseada* es la posición a la que se quiere desplazar al motor y es introducida por el usuario, *Constante Proporcional* como su nombre lo indica es la constante proporcional, que es utilizada para obtener la parte proporcional del algoritmo, *Constante Integral* es la constante integral y se usa para obtener la parte integral del algoritmo, estas dos constantes son introducidas por el usuario. Si se quiere aplicar únicamente un control proporcional (P) basta con poner en cero el valor de la constante integral, y viceversa, si se quiere aplicar únicamente un control integral (I) basta con poner en cero la constante proporcional. Para aplicar un control PI se introducen las dos constantes. Una vez introducidos estos tres datos se presiona el botón Ejecutar y el algoritmo comenzará a ejecutarse, determinando el Error que es la resta entre la *Posición Deseada* y la *Posición Real*, esta posición es la que es recibida del encoder de cuadratura. Con base a este error y a

las constantes el algoritmo determina el *Voltaje de Control*, los cuales son mostrados en todo momento. Una vez que el motor se aproximó a la posición deseada se presiona el boton Reportar el cuál termina el algoritmo y dibuja una gráfica en el recuadro mostrado en la figura 4.15.

The image shows a software interface for PI control. The title bar reads "Control Proporcional Integrativo". The interface includes the following elements:

- Two input fields for "Pos deseada" (desired position).
- One input field for "Pos real" (actual position).
- One input field for "Error".
- Two input fields for "Cte. Proporcional" (proportional gain).
- One input field for "Cte. Integrativa" (integral gain).
- One input field for "Voltaje de Control" (control voltage).
- Two buttons: "Ejecutar" (Execute) and "Reportar" (Report).

Figura 4.12: Sección del Software PI de Control de Posición donde se ejecuta el algoritmo PI

La figura 4.13 muestra la sección del sistema donde se le pide al motor que siga una onda cuadrada aplicando un control PI. El principio de funcionamiento es básicamente el mismo que cuando se ejecuta el control PI. El *límite superior* indica la posición a la que se mueve el motor en un inicio y el *límite inferior* es la posición a la que se le pide se mueva de regreso. El *Ancho* es el tiempo (en ms) que permanecerá en tal posición. También se introducen las constantes (ganancias) proporcional e integral al igual que en la sección de Control PI. Primero se introducen los límites, el ancho y las ganancias para posteriormente presionar el boton Ejecutar con lo cual el motor seguira un pulso cuadrado. Para terminar la ejecución del algoritmo se presiona el boton Reportar con el cuál también se manda a imprimir en el recuadro de la figura 4.15 la gráfica que ilustra el comportamiento del sistema.

Onda Cuadrada

Limite Superior Limite Inferior

Ancho

Cte. Proporcional Cte. Integrativa

Posición Error

Generar Onda Reportar

Figura 4.13: Sección del Software PI de Control de Posición donde se ejecuta el algoritmo PI siguiendo un pulso cuadrado

La figura 4.14 muestra la sección del programa en donde se mandan voltajes al motor manualmente, es decir, se introduce el voltaje de salida y al presionar el botón enviar solo se le enviará al motor este voltaje. Al presionar el botón Parar se dejará de enviar tal voltaje al motor y se dibujará la gráfica que ilustre el movimiento del motor. Este apartado sirve principalmente para verificar que el motor reciba voltajes y se reciban las posiciones del motor lo que permite comprobar fácilmente que la comunicación entre los componentes está correcta.

Manual

voltaje de salida Posición

Enviar Parar

Figura 4.14: Sección del Software PI de Control de Posición Integral donde se manda un voltaje al motor sin aplicar algoritmo alguno

Finalmente en la figura 4.15 se muestra la sección en donde se dibujara la gráfica que detallara el comportamiento de nuestro algoritmo.

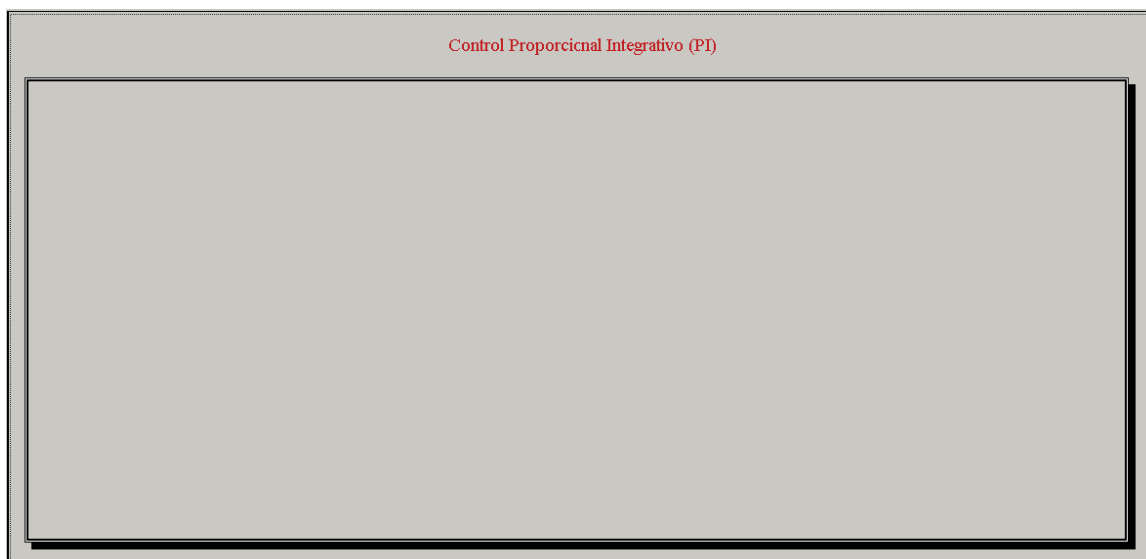


Figura 4.15: Sección del Software PI de Control de Posición donde se traza la gráfica que ilustra el comportamiento del Algoritmo

Capítulo 5

Pruebas Y Resultados

En este capítulo se presentan algunos ejemplos de ejecución del sistema.

5.1. Introducción

En el capítulo 2 se habló de los sistemas de control y de los controladores. Se ha explicado la importancia que tienen actualmente y sus aplicaciones. Es por ello que su clara comprensión es muy importante, sobre todo, observar físicamente que su comportamiento es tal y como lo describen los libros. En este capítulo se mostraran algunos ejemplos de ejecución del sistema que ilustren y detallen la teoría mencionada en los capítulos anteriores.

En la sección 2.4.2 se menciona como es el funcionamiento de un controlador proporcional, el cual básicamente es ajustar una ganancia que haga que su producto (de donde proviene su nombre de control proporcional) sea casi nulo en estado estacionario. También se describen las características de esta ganancia: en la mayoría de las veces esta ganancia solo es óptima en cierto rango de valores, ya que a partir de cierto rango hacia arriba se provoca una sobreoscilación (valores superiores a los deseados) o que a partir de tal rango hacia abajo el error en estado estacionario no sea lo suficientemente pequeño para considerar que el objetivo se ha cumplido.

También se mencionan las ventajas de usar un control integral aunado con el proporcional, la cual es reducir al máximo el error producido por el control proporcional en estado estacionario. A continuación se muestran algunos ejemplos de ejecución del Software PI de Control de Posición que ilustran el comportamiento descrito. Para ello

se *pide* al motor se desplace a una posición específica (*Posicionamiento*) y que siga un pulso cuadrado (*Seguimiento de una Onda Cuadrada*) primero aplicando un control proporcional (parte proporcional del algoritmo) y después aplicando un control proporcional integral (sumando la acción de control integral al control proporcional) para comparar los resultados y comprobar que en la práctica sucede lo que en los libros esta plasmado.

5.2. Posicionamiento del motor.

Para desplazar el motor a una posición deseada se utiliza el apartado denominado Control Proporcional Integral (PI), el cuál aplica este control al motor para que se logre el objetivo. Para ello se introduce la posición deseada y las ganancias, para después ejecutar el algoritmo y reportar su funcionamiento. Cabe mencionar que al momento de introducir alguno de estos valores en esta sección del Software automáticamente se deshabilitan las otras dos secciones Onda Cuadrada y Manual mencionada en la sección 4.5.

Ahora se procede a ajustar la ganancia proporcional de tal manera que el motor se desplace lo más cerca posible a la posición deseada. El motor de transmisión directa empleado acepta voltajes dentro del rango de $\pm 5V$. Este voltaje determina el torque necesario para desplazar al motor a la posición deseada. Tomando en cuenta lo anterior se tiene que la constante (ganancia) proporcional que sea introducida debe hacer que el producto entre el error de las posiciones deseadas y reales no sea mayor a un valor de 5 entero, sabiendo que el producto entre la ganancia y el error es el voltaje de control que se envía al motor para desplazarlo y que el motor solo acepta voltajes dentro del rango de los -5V y +5V.

La figura 5.1 muestra el comportamiento del sistema cuando se aplica únicamente un control proporcional al motor. Se pide al motor que se desplace un cuarto de vuelta, es decir que se desplace a la posición 163840 (una vuelta completa esta representada por 655360 puntos), con una ganancia igual a 0.000008.

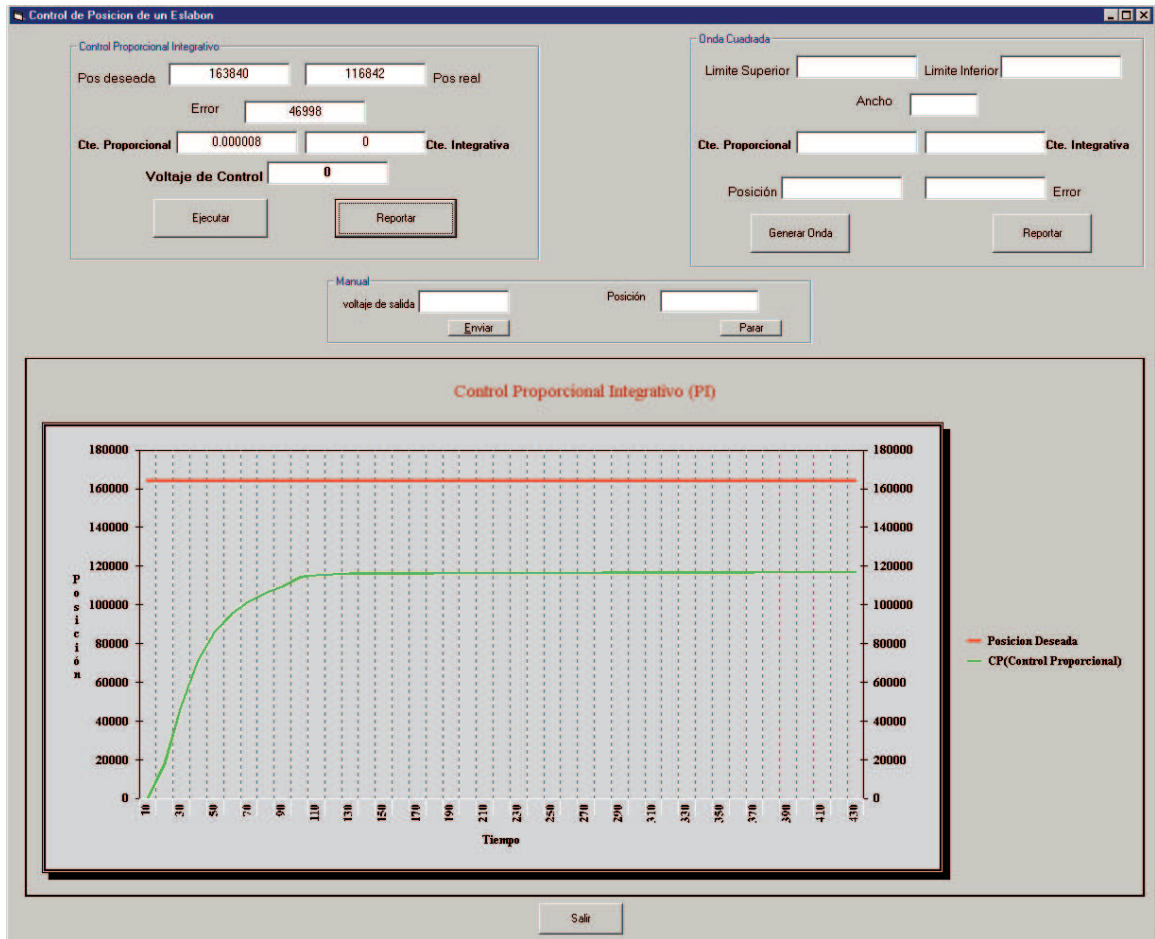


Figura 5.1: Primera prueba de posicionamiento aplicando únicamente un control proporcional.

De la figura anterior se observa que al aplicar esta ganancia el error en estado estacionario es de 46998 puntos, lo que es representa un error muy grande por lo que hay que ajustar esta ganancia para lograr un error menor. Para obtener una mejor apreciación de estos resultados se reporta el funcionamiento del sistema con una gráfica, donde tenemos en este caso que la línea roja representa la posición a la que se de desea llegar (posición deseada) y la línea verde representa la posición del motor durante la ejecución del sistema. La distancia (diferencia) entre estas líneas representa el error en cuanto al posicionamiento.

La figura 5.2 muestra el comportamiento del Sistema cuando se ajusta la ganancia proporcional anterior. La ganancia ahora en este caso es igual a 0.000012, con lo que se observa que el error se logra disminuir, aunque aún no es suficiente, esto se aprecia

mejor en la grafica, ya que se puede observar que la linea verde quedo mas próxima a la roja (posición deseada).

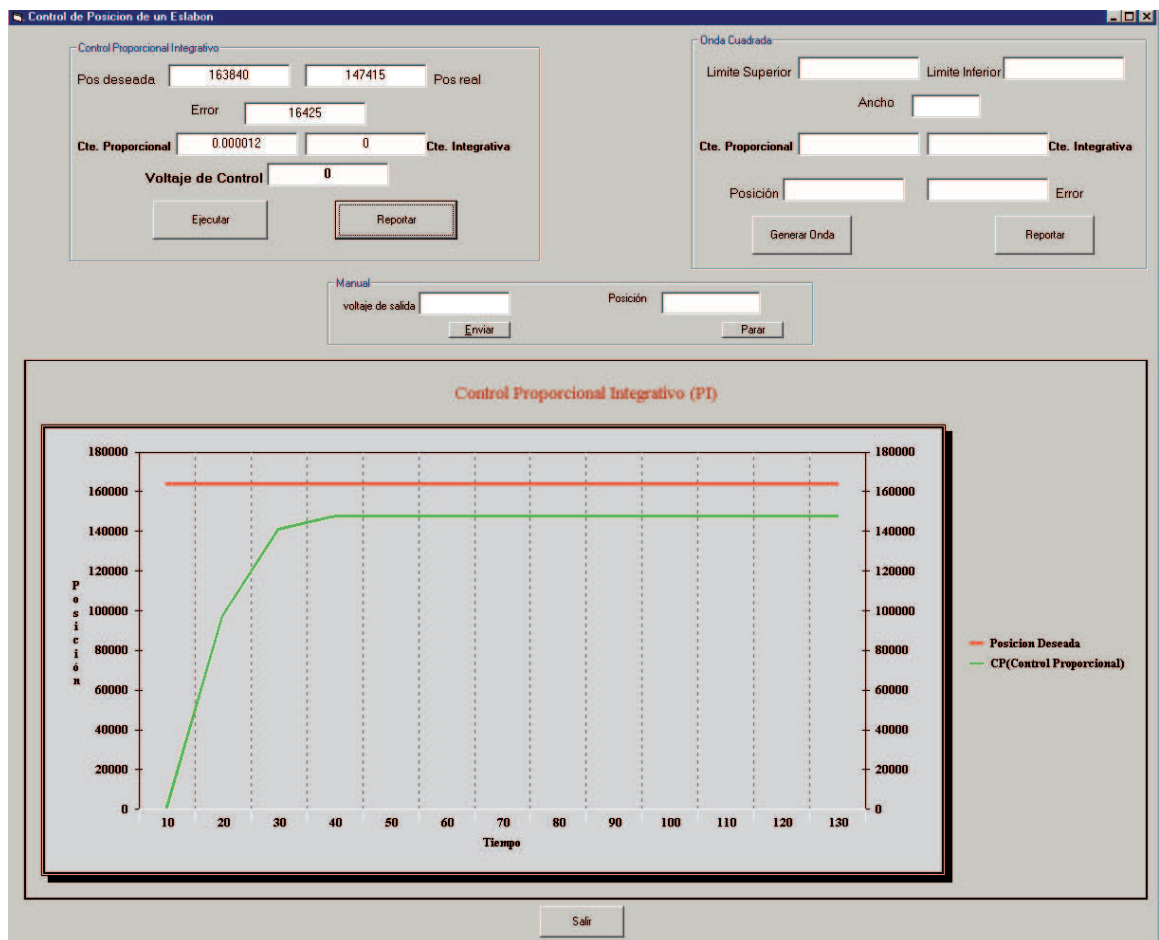


Figura 5.2: Segunda prueba de posicionamiento aplicando únicamente un control proporcional.

Como se ha mencionado, hay que ajustar la ganancia hasta encontrar el rango de valores que proporcionen errores pequeños. La figura 5.3 muestra el resultado obtenido aplicando una ganancia igual a 0.0000143, se observa como el controlador desplaza al motor a la posición 161790 (posición real) cuando la posición deseada es 163840 (un cuarto de vuelta), con lo cual se obtiene un error de 2050 puntos, lo que representa un error del 1.25 %.

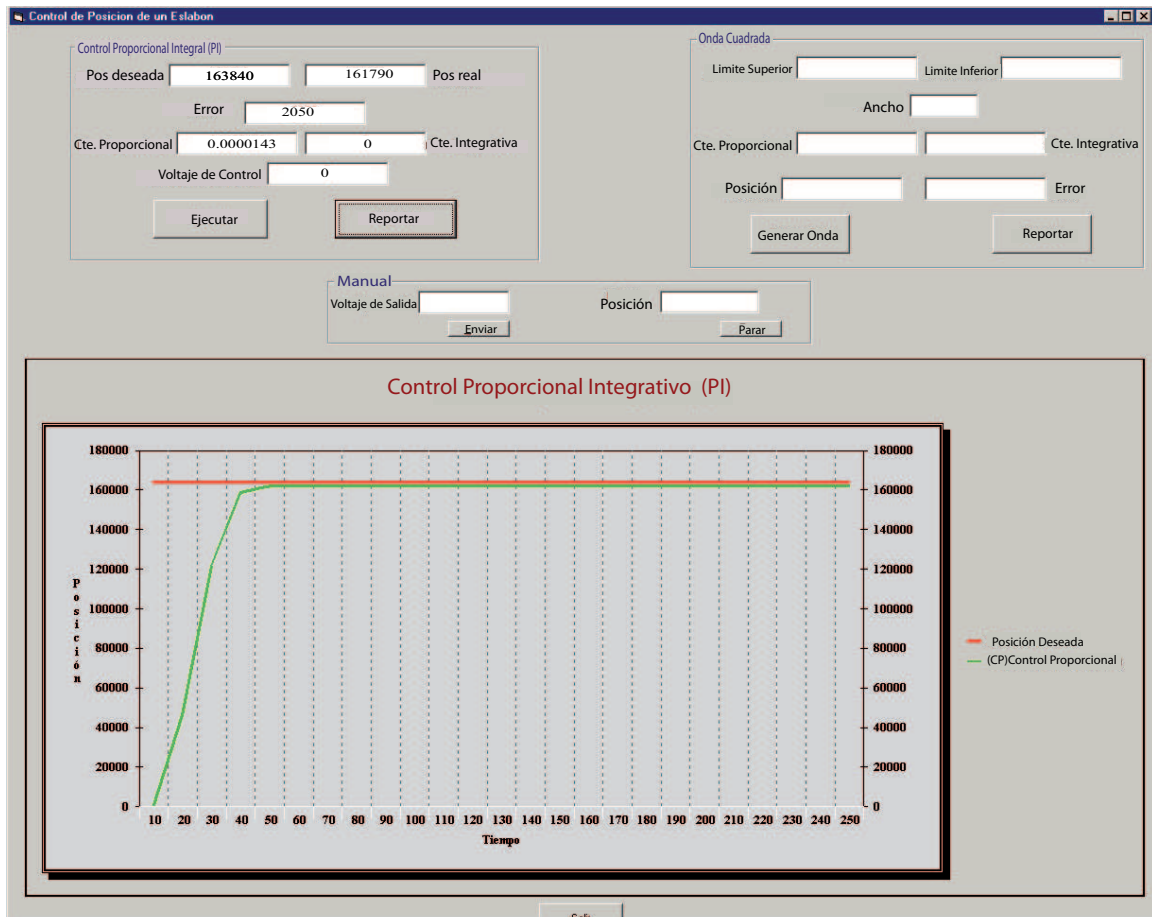


Figura 5.3: Tercera prueba de posicionamiento aplicando únicamente un control proporcional.

La figura anterior permite observar que el algoritmo P se comporto como cualquier algoritmo Proporcional, es decir, se aproximó a la posición deseada para después estabilizarse en la posición real, con un error estacionario de 2050 puntos. Cada columna de la gráfica representa 10 milisegundos, por lo que se observa que el motor se estabilizó a los 50 ms. A partir de ganancias mayores 0.0000143 se producen sobreoscilaciones, lo que significa que el motor recibe voltajes superiores a los que puede recibir, por lo que se produce un bloqueo para protegerlo de sobrecargas o que gire sin control, lo cual hablando de brazos robóticos es demasiado peligroso.

Se ha dicho en la sección 2.4.5 que al sumar un control integral a un proporcional se logra disminuir el error en estado estacionario. La figura 5.4 muestra el compor-

tamiento del sistema aplicando un control proporcional integral (PI) con la **ganancia proporcional** utilizada en el primer ejemplo y con una **ganancia integral** igual a 0.0000003. Ahora que se suma la acción de control integral a la acción de control proporcional del algoritmo se tendrá otra línea en el gráfico que permita observar mejor el comportamiento de la acción de control proporcional (CP) vs la acción de control proporcional más una acción de control integral (CPI). La línea roja representa la posición deseada, la línea azul representa las posiciones del motor durante la ejecución del sistema aplicando únicamente un control proporcional y la línea verde representa la posición del motor cuando a esta acción de control se le suma una acción de control integral.

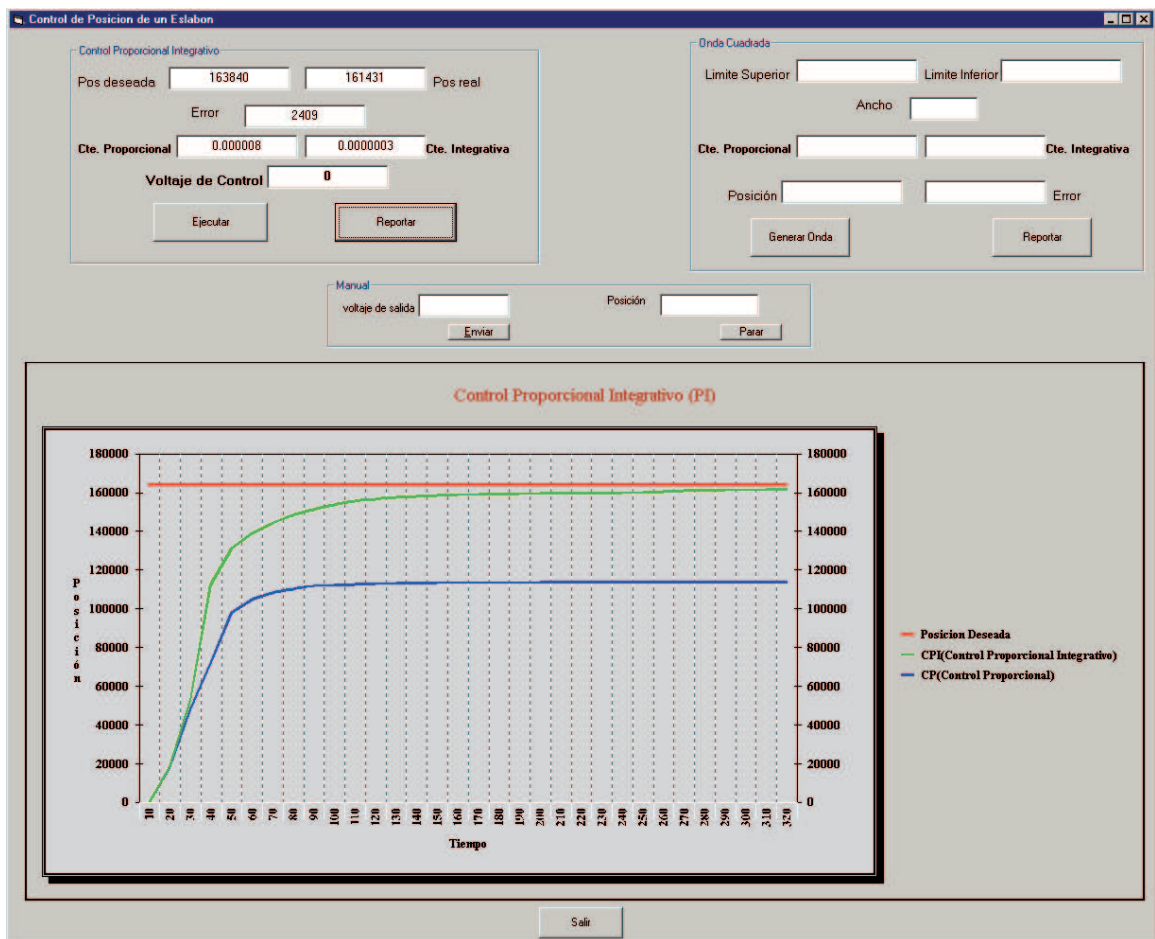


Figura 5.4: Primera prueba de posicionamiento aplicando un control proporcional integral.

Observando la figura anterior se pueden obtener algunas conclusiones. Al aplicar un control integral, el cual suma el error en el transcurso del tiempo y lo multiplica por una constante integral pero a costa de mayor tiempo, más el control proporcional, se logra reducir en efecto el error en estado estacionario, como se observa en la figura anterior (la línea verde que representa al control PI quedó más cerca que la línea azul que representa el control P). De hecho si se aplicara una ganancia menor, se reduce muy poco el error, por lo que también hay que ir ajustando esta ganancia, como se hizo con la ganancia proporcional. En el ejemplo anterior, la ganancia integral utilizada, aunada al control proporcional nos da un error *acceptable*, pero tomando más tiempo.

Para lograr un resultado mejor, se aplica un control proporcional utilizando la mayor ganancia proporcional posible dentro del rango de valores que ofrezcan resultados aceptable, es decir una ganancia que no provoque una sobreoscilación o un error demasiado grande. Para ello se aplica la ganancia mostrada en la figura 5.3, la cual como ya se mencionó, se aproxima al rango superior permitido el cual no provoca sobreoscilación alguna y que ofrece un error *acceptable*. La figura 5.5 muestra el comportamiento del sistema aplicando esta ganancia proporcional más una ganancia integral igual a 0.0000000093.

Se puede observar como el motor se aproxima más a la posición deseada al agregar un control integral al control proporcional ya aplicado. Para ello se estableció una constante (ganancia) Integral de 0.0000000093 y se obtuvo un error de 1392 puntos, ya que el motor se desplazó a la posición 162448, lo cual representa un error del 0.8%, lo que proporciona una mejora de casi 0.5% con respecto a solo aplicar un control proporcional.

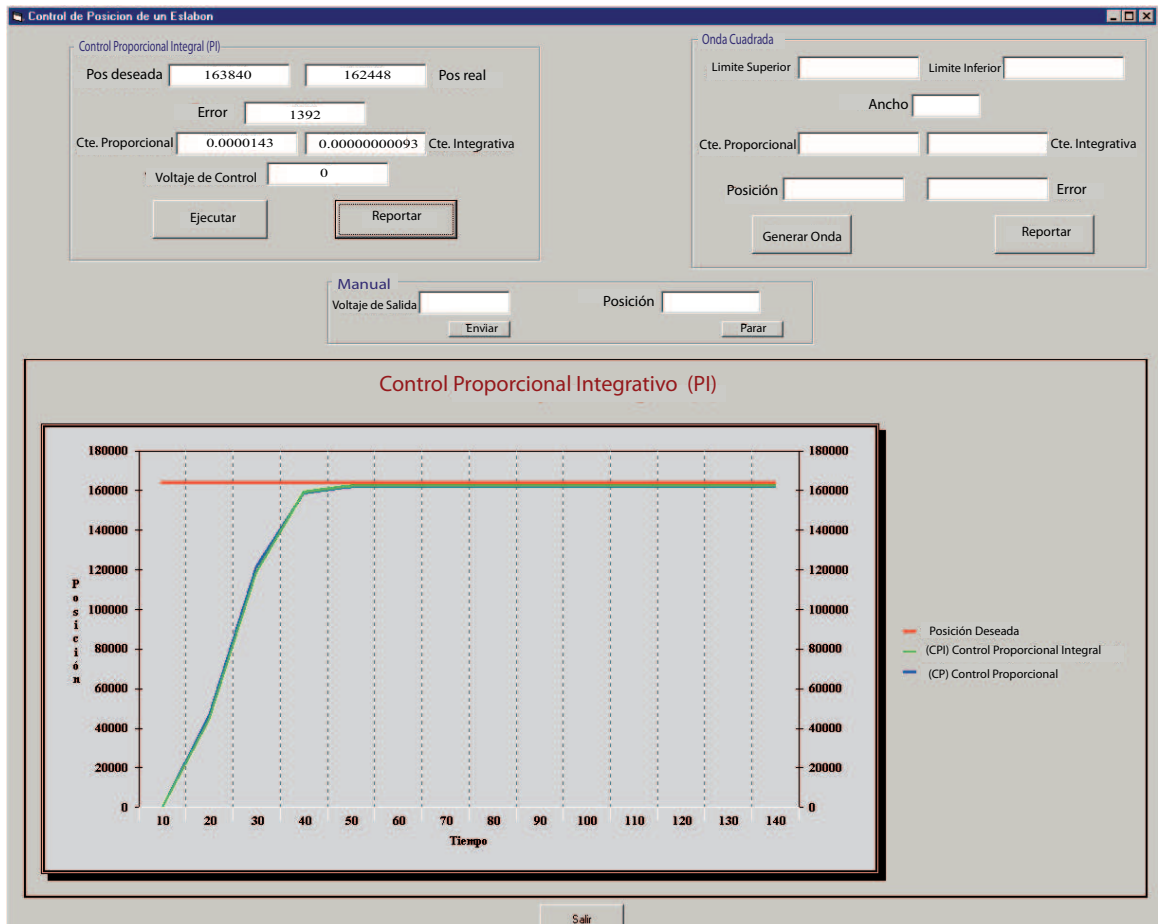


Figura 5.5: Prueba de posicionamiento aplicando únicamente un control proporcional integral.

De lo anterior se observa lo que se buscaba, dependiendo de las constantes (ganancias) es como se va a comportar el sistema, ajustando las ganancias se decrementará o disminuirá el error. De los gráficos anteriores se ve claramente que la conjunción de los dos controles permite obtener un mejor resultado, el control proporcional, como su nombre lo indica, dispara el voltaje de control de tal manera que se llegue la posición deseada lo más pronto posible, ya que el voltaje de control es proporcional al error, mientras más grande sea el error mayor será el voltaje de control aplicado al motor, y agregando un control integral, se reduce significativamente el error en estado estacionario producido en el control proporcional.

5.3. Seguimiento de una Onda Cuadrada

La figura 5.6 muestra el comportamiento del sistema cuando al motor se le pide que siga un onda cuadrada aplicando únicamente un control proporcional. Una onda cuadrada no es más que un pulso cuadrado que va de una posición a otra, y físicamente hace que el motor vaya de una posición a otra. Tales posiciones son el limite superior que indica hacia donde se tiene que desplazar el motor y el limite inferior, que indica hacia que posición tiene que dirigirse de regreso el motor. El ancho del pulso es el número de intervalos de tiempo que debe permanecer el motor en tal posición. Cada intervalo de tiempo tiene un valor de 10 ms. Este intervalo de tiempo es el mismo que se ocupa para la sección de posicionamiento del motor, cada línea vertical en las gráficas representa un intervalo de tiempo.

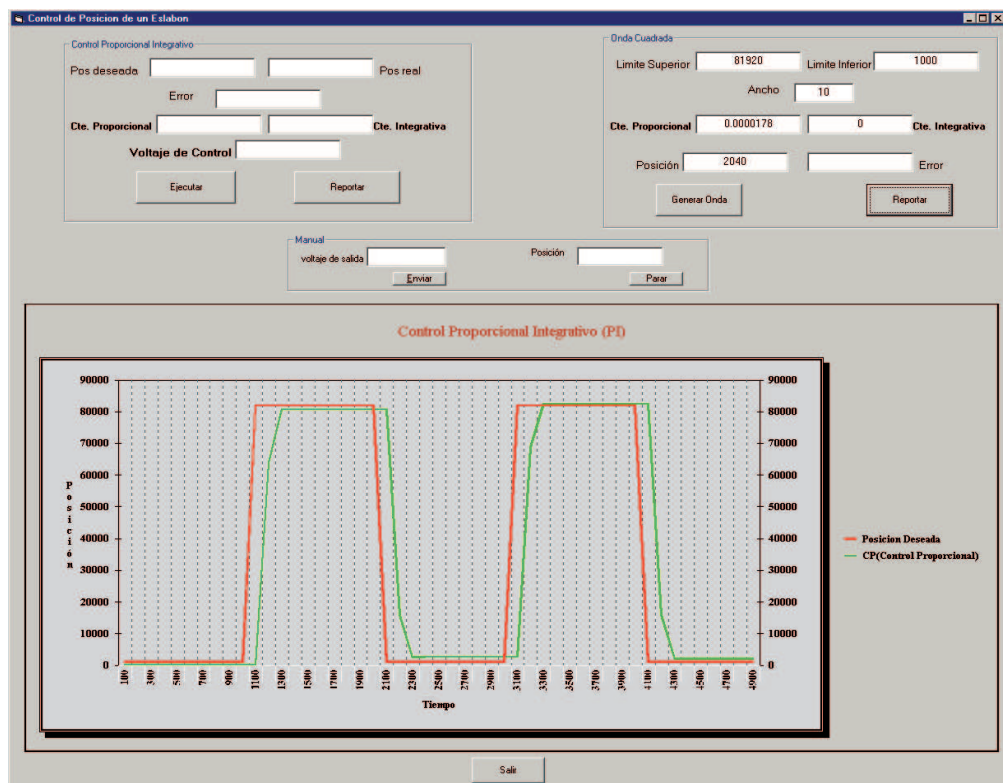


Figura 5.6: Prueba de seguimiento de un pulso cuadrado aplicando un control proporcional.

La figura 5.7 muestra el comportamiento de sistema al aplicar un control proporcional integral cuando al motor de transmisión directa se le pide siga la misma onda cuadrada mostrada en la figura anterior. Se puede observar como en las pruebas anteriores, que al unir estos dos tipos de control; proporcional e integral, se obtienen mejoras que cuando solo se usa un control proporcional.

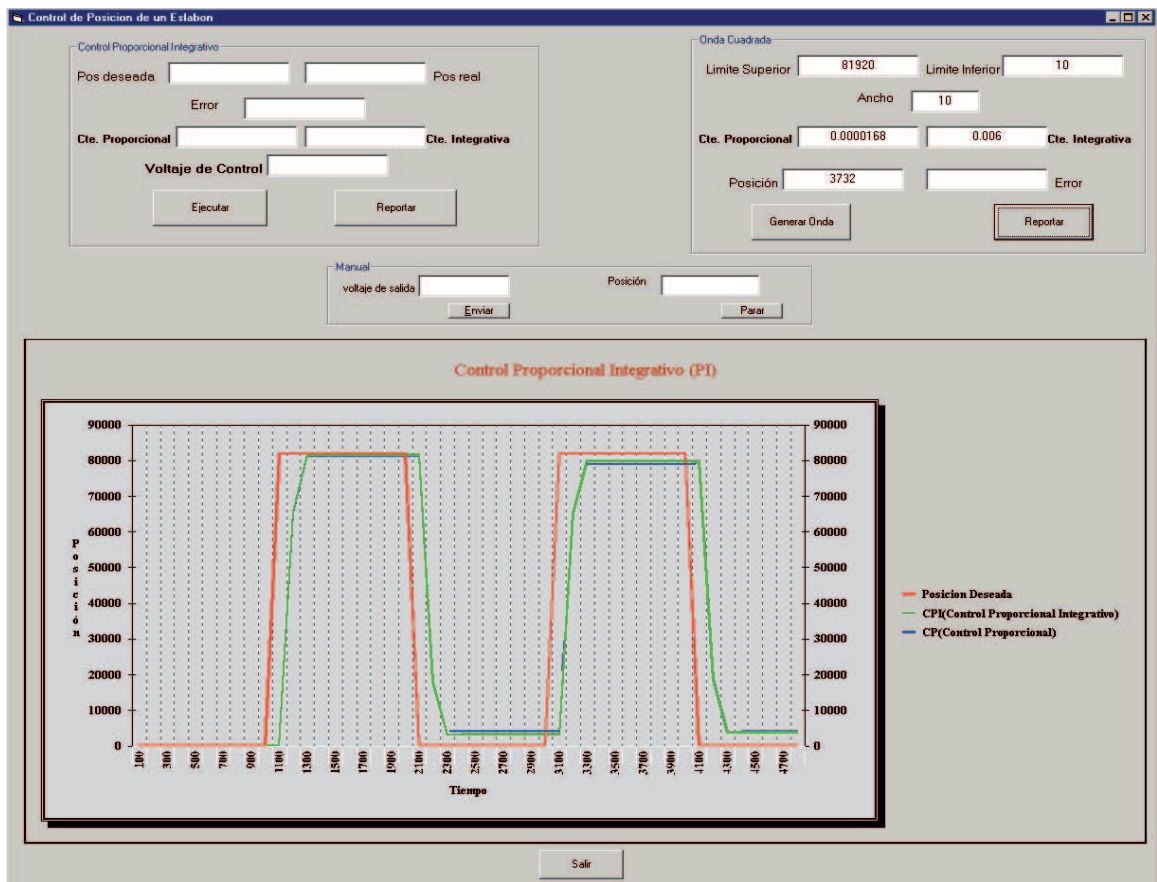


Figura 5.7: Prueba de seguimiento de un pulso cuadrado aplicando un control proporcional integral.

5.4. Conclusiones

Los sistemas de control son indispensables hoy en día y se encuentran en casi todos los procesos industriales en donde los mecanismos que garanticen un óptimo funcionamiento son de vital importancia. Estos mecanismos son los controladores,

dentro de los cuales, los más comunes que se encuentran son los controladores de tipo proporcional (P), proporcional integral (PI), y proporcional integral derivativo (PID), los cuales ofrecen buenos resultados y no son difíciles de implementar.

Es por ello que el estudio y una clara comprensión del funcionamiento e implementación de estos algoritmos es parte fundamental en la preparación universitaria, por lo que, dentro de este contexto surgió la necesidad de implementar un Sistema de Control que muestre en forma práctica a los algoritmos de control.

Este Sistema, el cual se denomina **Software PI de Control de Posición** cumple dicha función, ya que permite trabajar físicamente con un sistema de control de posición en lazo cerrado, además de que se observa que este se comporta tal y como se espera.

El algoritmo implementado fue de tipo proporcional integral, cuya función principal es posicionar de la manera más precisa y rápida posible un motor de transmisión directa conectado a un eslabón de un brazo robótico, para ello utilizando el material disponible en el laboratorio de Robótica de la FCC como lo son motores de transmisión directa y tarjetas de adquisición de datos mencionados en los primeros capítulos.

Este Sistema implementado es una gran aportación para el laboratorio de Robótica de la FCC ya que, en primer lugar se cuenta ya con un Software que permite aplicar tanto un control proporcional como un control proporcional integral al motor de transmisión directa y comparar el funcionamiento de estos dos tipos de control. Dicho software permite trabajar con uno o con los 3 motores al mismo tiempo en caso de que se requiera en futuros trabajos. Además de ello el laboratorio cuenta ya con las conexiones físicas que permiten el sensado y movimiento de los 3 motores del brazo, lo que permite trabajar físicamente con los 3 eslabones del brazo robótico por medio del software. Estas conexiones se quedan documentadas tanto en la presente tesis como físicamente, y basándose en estas configuraciones se pueden conectar algunas otras tarjetas con lo que será más fácil trabajar ya con los 3 motores en conjunto.

Basándose en los resultados obtenidos en las pruebas se confirma que estos algoritmos son eficientes, esto fundamentado en los rangos de error obtenidos: menos del 2% al aplicar un control proporcional y de menos de 1% al aplicar un control proporcional integral, los cuales para los fines educativos que persigue este trabajo son suficientes.

Con base en los puntos anteriores se ve claramente que este trabajo servirá como base para futuros proyectos dentro del Área de Robótica y Control Digital.

5.5. Trabajo Futuro

Entre las futuras aplicaciones de esta tesis se pueden mencionar entre otras la implementación de los algoritmos en los 3 motores para que el brazo robótico realice una función específica, como lo son: soldar, desplazar objetos o dibujar figuras sobre un pizarrón. Para ello utilizando un actuador final que se acople a la función que se quiera ejecutar.

Otra aplicación basándose en el software desarrollado es el control de un motor, o de los 3 a distancia, por medio de una webcam y de internet, para realizar una función específica o simplemente para posicionar los motores en una posición dada.

Bibliografía

- [1] V.M. Alfaro. *Monografía. Introducción al Control Óptimo*. Escuela de Ingeniería Eléctrica. Universidad de Costa Rica, 2002.
- [2] V.M. Alfaro. *Monografía. Introducción al Control Robusto*. Escuela de Ingeniería Eléctrica. Universidad de Costa Rica, 2002.
- [3] W. Bolton. *Ingeniería de Control*. Alfaomega, México, 2001.
- [4] Richard C. Dorf. *Sistemas Modernos de Control. Teoría y Práctica*. Addison-Wesley Iberoamericana, E.U.A, 1989.
- [5] M. Gopal. *Digital Control Engineering*. Wiley Eastern Limited, Nueva Delhi, India, 1998.
- [6] Benjamin C. Kuo. *Sistemas de Control Automático*. Pearson Educación, México, 1996.
- [7] Katsuhiko Ogata. *Ingeniería de Control Moderna*. Pearson Prentice-Hall, México, 1998.
- [8] J. M. Alcalá y M. R. Moreno S. G. Castro, D. B. Solé. *Teoría de Control Moderno*. Alfa-Omega, Barcelona, España.
- [9] Elisa Santre. Control pid de posición para una cabeza de impresora usando la tarjeta pci-711. 2005.
- [10] F. Rodríguez y M. López. *Control Adaptativo y Robusto*. Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Sevilla, España, 1996.

Referencias

- [11] Advantech Co. *PCI-1720 4-Channel Isolated D/A Output Card User Guide*, 1995.
- [12] Advantech Co. *PCL-833 3-axis Quadrature Encoder Card User Guide*, 1995.
- [13] Fernando Reyes Cortés. *Servomecanismos*. Cursos de Educación Continua, BUAP.
- [14] Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Industrial de Barcelona. Historia del control automático. <http://usuarios.lycos.es/automatica/temas/tema1/historia/HISTORIACTRLAUTOM.pdf>.
- [15] Henry Mendiburu Díaz. Introducción al control predictivo. <http://www.galeon.com/hamd/pdf/predictivo.pdf>.
- [16] Compumotor Division. *Dynaserv DM and DR Direct Drive Servos User Guide*, Marzo 1995.
- [17] Charlotta Johnson. History of automatic control. <http://www.control.lth.se/~lotta/tree.html>.
- [18] Paolo C. Rubio. Introducción al control automático. http://www.slideshare.net/ptah_enki/introduccion-al-control-automtico.
- [19] Wikipedia. Adquisición de datos. http://es.wikipedia.org/wiki/Adquisicion_de_datos.
- [20] Wikipedia. Motor de corriente continua. http://es.wikipedia.org/wiki/Motor_de_corriente_continua.