Instituto Tecnológico de Costa Rica

Escuela de Ingeniería Electrónica

Diseño e implementación de control automático para el robot HRA934

Informe final del Proyecto de graduación para optar por el título de Ingeniero Electrónico con el grado académico de Licenciatura

Ramiro Vargas Quirós

Cartago, Noviembre de 2010

INSTITUTO TECNOLOGICO DE COSTA RICA

ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRONICA

PROYECTO DE GRADUACIÓN

TRIBUNAL EVALUADOR

Proyecto de Graduación defendido ante el presente Tribunal Evaluador como requisito para optar por el título de Ingeniero en Electrónica con el grado académico de Licenciatura, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Miembros del Tribunal

Ing. Leonardo Rivas Arce

Profesor lector

Ing. Aníbal Coto Cortés

Profesor lector

Ing. José Alberto Díaz García

Profesor asesor

Los miembros de este Tribunal dan fe de que el presente trabajo de graduación ha sido aprobado y cumple con las normas establecidas por la Escuela de Ingeniería Electrónica

Cartago, 13 de Diciembre de 2010

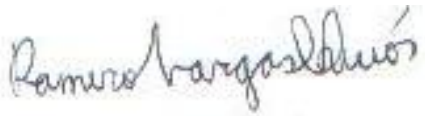
Declaratoria de autenticidad

Declaro que el presente Proyecto de Graduación ha sido realizado enteramente por mi persona, utilizando y aplicando literatura referente al tema e introduciendo conocimientos propios.

En los casos en que he utilizado bibliografía, he procedido a indicar las fuentes mediante las respectivas citas bibliográficas.

En consecuencia, asumo la responsabilidad total por el trabajo de graduación realizado y por el contenido del correspondiente informe final.

Cartago, 13 de Diciembre de 2011



Ramiro Vargas Quirós
1-1161-0819

Agradecimiento

Agradezco a Nuestro Señor Dios.

Agradezco a mi familia, a la gente que quiero, por estar conmigo mientras yo esté en este mundo.

Agradezco a las personas que me ayudaron a la realización de este Proyecto: Ing. Peter Zeledón, Ing. Mauricio Espinoza, Ing. José Alberto Díaz, señor Gerardo Herrera.

Y para mis Amigos, el cariño por siempre.

Resumen

En este informe se detalla el desarrollo de un sistema de control automático para el robot HRA934. Este es un sistema fabricado hace más de dos décadas (años 80) y presentaba varios problemas:

- Ausencia de documentación técnica detallada del fabricante
- Utilizaba un sistema de control manual, alambrado y rígido, que lo incapacitaba para utilizarlo en aplicaciones nuevas de alto nivel.
- Presentaba daños físicos que lo tenían fuera de operación

Por esta razón se optó por diseñar y construir un sistema de control automático que sustituyera el control manual, con ayuda de herramientas actuales: software de simulación, tarjetas de adquisición de datos, etc.

El procedimiento que se llevó a cabo para realizar el proyecto fue el siguiente:

- Investigar el funcionamiento básico del robot
- Rehabilitar el robot
- Obtener el modelo del sistema
- Diseñar e implementar el sistema de control

Este informe explica cómo se llevo a cabo cada uno de los pasos anteriores, justificando los motivos que lo hicieron necesario. Así mismo, se analizan los resultados del diseño de cada etapa para validar los resultados.

Palabras clave: robótica, sistemas de control, modelo matemático, tarjeta de desarrollo.

Abstract

This document details the development of an electronic automatic control system, which goal is controlling the robot HRA934. This system was manufacturated in 80´s decade, and had some problems:

- Lack of manufacturer´s detailed technical documentation
- The original control system was manually operated, and programmed on low-level hardware, incompatible with high level applications.
- It was out of operation due to damage caused by user´s misuse and vandalism.

It was decided to design and build an electronic automatic control system to replace the old control system. The project took advantage of modern tools: simulation software, data acquisition boards, etc.

The performed procedure was:

- Investigating the robot basic operation
- Restoring the robot
- Modeling the system
- Designing and building the control system

The report explains how all the steps were performed, justifying them. Finally, the results from each phase were analyzed to evaluate the project success.

Keywords: robotics, control system, compensator, mathematical model, development board.

Índice general

1 Introducción 1
1.1 Importancia del campo de estudio de la robótica 1
1.2 Problema existente 2
1.3 Solución seleccionada 3
2 Meta y objetivos 5
2.1 Meta 5
2.2 Objetivo general 5
2.3 Objetivos específicos 5
2.4 Lista de comprobación 5
3 Marco teórico 7
3.1 Operación del robot 7
3.2 Circuito hidráulico 7
3.3 Sistema de control de presión 9
3.4 Operación de los actuadores 9
3.5 Antecedentes Bibliográficos 10
3.6 Principios electrónicos relacionados con la solución 10
4 Procedimiento metodológico 12
4.1 Reconocimiento y definición del problema 12
4.2 Definición de las restricciones 12
4.3 Análisis de información 13
4.4 Evaluación de las alternativas y síntesis de una solución 13
4.5 Procedimiento de solución 13
4.6 Divulgación del proyecto 15
5 Rehabilitación del robot 16
5.1 Investigando la alimentación del robot 16
5.2 Señales de activación de las articulaciones 17
5.3 Calibración de los sensores 17
5.3.1 Sensor de Base 19
5.3.2 Resumen de los resultados 20
5.4 Espacio de trabajo 20
5.5 Tiempo muerto 20
5.6 Recopilación de los resultados del estudio 21

5.7 Reconstrucción del hardware 21
5.7.1 Computadora personal (PC) 23
5.7.2 Tarjeta de Acople 23
5.7.3 Oscilador 27
5.7.4 Tarjeta de amplificación 27
5.7.5 Tarjeta de Sensores 30
5.7.6 Tarjeta de Ejecución 33
5.7.7 Resultados del diseño de las etapas de Hardware 36
5.8 Etapas de Software 36
5.8.1 Criterios de diseño 40
5.8.2 Rutina Interfaz 41
5.8.3 Rutina Configuración 42
5.8.4 Rutina Controlador 42
5.8.5 Actuadores 43
5.8.6 Resultados del software 44
6 Desarrollo de un modelo matemático 45
6.1 Procedimiento experimental 45
6.2 Modelo de Base Horaria 47
7 El controlador 51
7.1 Funciones del controlador 51
7.2 Procedimiento de diseño 51
7.3 Controlador para el robot 53
7.4 Consideraciones de diseño 53
7.4.1 Exactitud 53
7.4.2 Doble función de transferencia 54
7.5 Parámetros del controlador 55
7.6 Diseño del controlador para Base 55
7.6.1 Cálculos 55
7.7 Diseño para las articulaciones 58
7.8 Resultados del diseño del controlador 60
8 Análisis de resultados 65
8.1 Resultados de la investigación del sistema 65
8.2 Resultados del hardware 65
8.3 Análisis de resultados del software de Interfaz y de control 65

8.4 Análisis de los resultados del proyecto 66
9 Conclusiones y recomendaciones 67
9.1 Conclusiones del Hardware 67
9.2 Conclusiones del Modelo 67
9.3 Conclusiones del controlador 68
9.4 Conclusiones del software 69
9.5 Conclusiones de la realización del proyecto 69
9.6 Recomendaciones del Hardware 69
9.7 Recomendaciones del Modelado 70
9.8 Recomendaciones del controlador 70
9.9 Recomendaciones del software 71
9.10 Recomendaciones de seguridad 71
9.11 Recomendaciones de implementación 71
10 Referencias 72
10.1 Bibliografía 72
10.2 Documentos de datos técnicos 73
11 Apéndices 74
Apéndice 1. Glosario 74
Apéndice 2. Abreviaturas 75
Apéndice 3. Procedimientos de medición 77
11.1.1 Medición de transductores y señales de activación 77
11.1.2 Calibración de los sensores 78
11.1.3 Medición del tiempo muerto 78
Apéndice 4. Hoja de datos del robot HRA934 80
11.1 Introducción 80
11.1.1 Control de electroválvulas 81
11.1.2 Circuito hidráulico 82
11.1.3 Transductores 82
11.2 Cinemática 84
11.3 Características mecánicas 86
11.4 Control de válvulas 87
11.5 Sensores 88
11.6 Funciones de transferencia 88
11.7 Alimentación 89

Apéndice 5. Verificación de los circuitos 92
11.8 Verificación de Tarjeta de Acople. 92
11.8.1 Comprobación de la Tarjeta de Sensores 93
11.8.2 Comprobación Tarjeta de Amplificación 95
Apéndice 6. Verificación del controlador 97
Apéndice 7. Manual de usuario 104
11.8.3 Introducción 104
11.8.4 Precauciones 105
11.9 107
11.9.1 Antes de iniciar 107
11.9.2 Manipulando el robot con la Interfaz 109
11.9.3 Problemas de funcionamiento 112
Apéndice 8. Funciones básicas de Labview 114
Apéndice 9. Librerías de Labview 115
11.9.4 Creando un polo y un cero 115
11.9.5 Planta.vi 116
11.9.6 Controlador.vi 117
Apéndice 10. Programas 119
Apéndice 11. Calibración de los sensores 121
11.9.7 Sensor de Hombro 121
11.9.8 Sensor de Brazo 122
11.9.9 Sensor de Pinza I 123
11.9.10 Sensor de Pinza II 124
11.9.11 Sensor de Pinza C 125
Apéndice 12. Mediciones para el modelado de las articulaciones 126
12 Anexos 130
Anexo B. 1. Documentos de datos técnicos 130
12.1.1 Manual de usuario del brazo robótico HRA934 [12] 130
12.1.2 Amplificador Operacional LM324 [19] 132
12.1.3 Transistores complementarios 2N3955 y MJ2955 [14] 133
12.1.4 Tarjeta de desarrollo NI-6008 [20] 134
12.1.5 Diodo 1N4004 [12] 136
12.1.6 Puente de diodos KBU8M8D [18] 137
Anexo B. 2. Hoja de información 138

1 Introducción

1.1 Importancia del campo de estudio de la robótica

La robótica es un campo de estudio cada vez más importancia en la medicina, industria, agricultura, entretenimiento y otras aplicaciones.

En los procesos industriales mejora la calidad de los productos, disminuye el precio y permite al ser humano enfocarse en las actividades creativas como el diseño de nuevos productos, al dejar de lado los trabajos repetitivos y peligrosos para las maquinas.

En la medicina, la robótica permite un mayor control de los instrumentos médicos y disminuye la probabilidad del error humano. Además, permite realizar labores dentro del cuerpo, difíciles de realizar por una persona.

En el aspecto recreativo, se viene a la mente películas como Jurassic Park, E.T, Star Wars, etc, las cuales no se hubieran podido realizar sin la ayuda de la robótica. También los juegos mecánicos, ej. montañas rusas.

Costa Rica puede beneficiarse de la aplicación de los robots en tales campos. Puede encontrarse un beneficio económico en el lado de la industria, considerando que nuestro país está experimentando un auge en la instalación de empresas que producen bienes manufacturados (procesadores, electrodomésticos, etc). Por otra parte, Costa Rica siempre ha estado a la cabeza en lo que respecta a innovación médica en Centroamérica. Estudiar el campo de la robótica puede ser útil para garantizar el bienestar de los pacientes de las instituciones médicas de nuestro país. La mecanización de ciertos productos agrícolas de exportación también sería útil para incrementar el ingreso económico nacional.

Adicionalmente, otras actividades como el reciclaje de materiales puede sacar provecho de los robots para hacerse más eficiente y más seguro para las personas que se dedican a ello.

Estos beneficios en suma, permitirían a la población costarricense aumentar su calidad de vida.

Como se sabe, la labor de la Universidad de Costa Rica, entre otras, es realizar investigación que genere resultados beneficiosos a la nación en las formas anteriormente expuestas. Por esta razón se considera conveniente que la Universidad de Costa Rica, a través de la Escuela de Ing. Eléctrica, invierta en la realización de este proyecto.

1.2 Problema existente

Actualmente la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Costa Rica posee un brazo robótico hidráulico con seis grados de libertad, modelo HRA934, marca FeedBack y de fabricación en Inglaterra. En la Figura 1-1 se tiene una ilustración del robot.

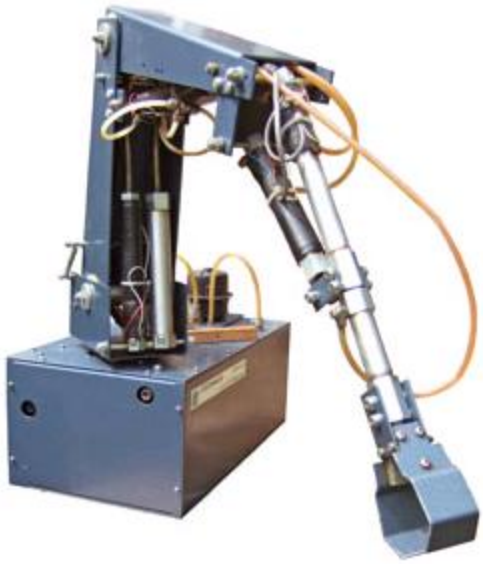


Figura 1-1 Robot HRA934 [4]

Los problemas que presentaba el sistema son ausencia de documentación técnica y daños físicos. Dado que el robot está fuera del inventario actual del fabricante, no hay documentación actualizada ni repuestos para él. Por eso, se planteó la posibilidad de rediseñar con la tecnología actual un sistema de control automático, de manera que se pueda recuperar el mecanismo, utilizando otros recursos disponibles en la Escuela de Ingeniería Eléctrica (software de control, tarjetas de adquisición de datos) y que resultara más económico.

Resumiendo, el robot HRA934 ubicado en la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Costa Rica no poseía un sistema de control requerido para manipularlo. Esto causaba que los estudiantes no pudieran aprovechar este recurso para el aprendizaje en el campo de la robótica, control y mecatrónica.

1.3 Solución seleccionada

La solución al problema planteado en la Sección 1.1 es diseñar y construir un sistema de control automático que permita manipular las articulaciones del robot en forma controlada. La empresa para la que se desarrolló el proyecto, Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Costa Rica, estableció las siguientes restricciones para el proyecto:

- La Interfaz debe visualizarse en una pantalla de computadora
- Se debe minimizar el costo de adquisición de componentes; reutilizando en lo posible los existentes: fuentes osciloscopio, software, etc.
- El proyecto es de fin académico, por lo que debe estar orientado al uso de estudiantes.

Las características requeridas son:

- Permitir controlar el ángulo de cada articulación según una referencia de entrada
- Compensar el efecto de posibles perturbaciones externas que afecten la posición u orientación de la pinza en forma indeseada.
- Llevar a cabo las funciones anteriores, de modo que la posición final de la articulación se alcance en un tiempo y con una precisión determinadas, dentro de los límites que permite el sistema mecánico.
- Mostrar al usuario la información del sistema en una pantalla
- Permitir al usuario configurar el tipo de control que se desea aplicar al sistema.
- Establecer mecanismos de protección para los circuitos y el software diseñado.
- Dejar el sistema abierto a mejoras posteriores a la implementación

Por lo tanto, se planteó el diseñar un sistema de control automático electrónico, como una solución al problema. Un sistema de control automático se define como “un sistema que controla la salida (en este caso el ángulo de rotación de las articulaciones) de acuerdo a una manera predeterminada, por medio de la señal de control” [6]. En particular, el control será de Lazo Cerrado.

Para diseñar el sistema de control, se requirió tomar en cuenta las siguientes etapas: Interfaz, Planta, Sensor, Compensador y Actuadores. Estos bloques se detallarán en la Sección 3 (Marco teórico).

En la Figura 1-2 se muestra el diagrama de bloques del sistema de control automático electrónico que se diseñó e implementó como solución. La consigna corresponde al ángulo deseado para cada articulación, que se introduce en el sistema de modo que la salida final sea la orientación espacial de la articulación.

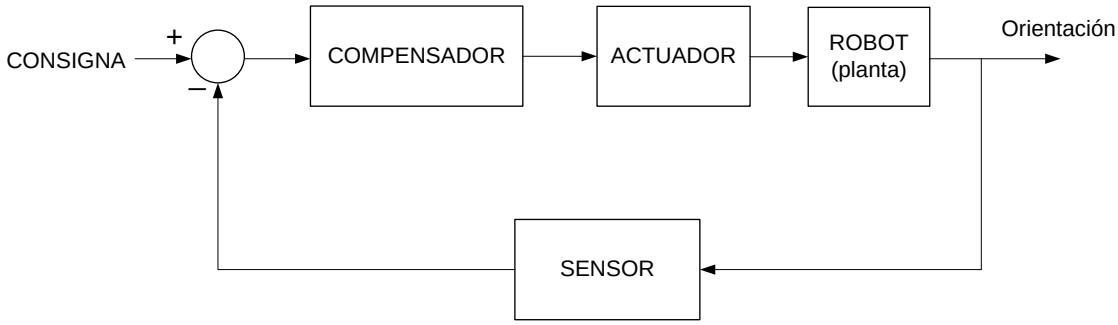


Figura 1-2 Diagrama de bloques del sistema de control

2 Meta y objetivos

2.1 Meta

Diseñar e implementar un sistema de control automático electrónico que permita controlar el robot con las respectivas especificaciones de diseño.

2.2 Objetivo general

Diseñar y construir un sistema de control automático electrónico que permita controlar la rotación de cada articulación.

2.3 Objetivos específicos

a) Objetivos de hardware

- Rehabilitar el robot

b) Objetivos de software

- Diseñar y construir un compensador electrónico que permita rotar las articulaciones del robot, y que cumpla con los parámetros de diseño establecidos dentro de un rango según lo indica su modelo matemático.
- Diseñar y programar una Interfaz con pantalla para la manipulación de la rotación de las articulaciones.

c) Objetivos de documentación

- Elaborar la documentación del proyecto.

2.4 Lista de comprobación

Al finalizar el proyecto, como comprobación de su ejecución, se entregará una lista de comprobación, la cual se muestra en la Tabla 2-1.

Tabla 2-1 Lista de comprobación

Objetivo específico	A entregar	Entregado (S/N)
1	Circuitos montados en protoboard: Mediciones experimentales de comprobación, diagramas, planos eléctricos.	
2	Interfaz gráfica Algoritmos, programa, código fuente, pruebas de funcionamiento.	
3	Documentación: • Informe escrito del proyecto • Manual de usuario • Hoja de datos del robot • Video demostrativo del funcionamiento	

3 Marco teórico

En esta sección se explicará el funcionamiento del robot en forma detallada, de modo que el lector comprenda cómo se relaciona la parte del sistema existente con el desarrollo de la solución.

3.1 Operación del robot

En la Figura 3-1 se muestra el diagrama de bloques.

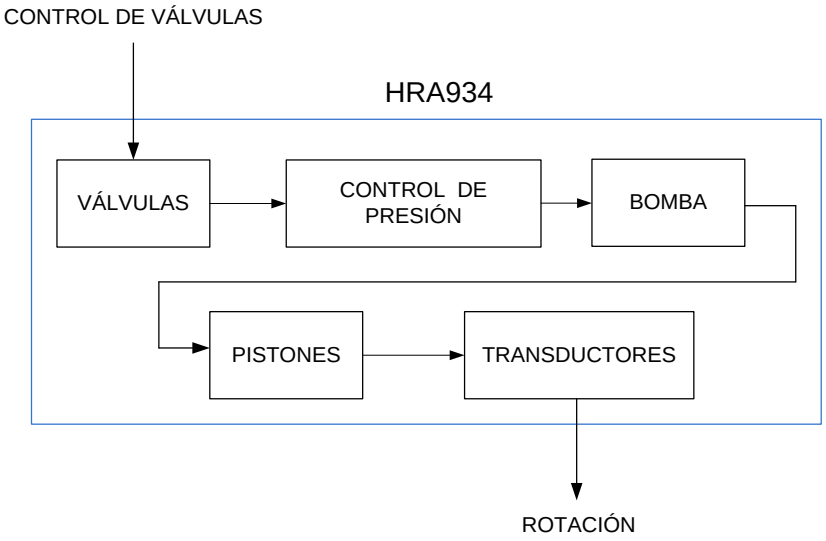


Figura 3-1 Diagrama de bloques del robot

Se describirá brevemente la operación del robot, antes de detallar cada bloque. El control de presión es una serie de componentes que se encargan de mantener la presión a un nivel determinado en el sistema. Cuando una válvula se abre, activada por el control de válvulas (parte del sistema de control), el cambio en la presión que genera esta apertura causa que el control de presión trate de estabilizarla, activando la bomba. Esto causa que fluya aceite desde el depósito hasta el pistón correspondiente, lo cual genera la rotación deseada. Al moverse el miembro, el transductor LVDT convierte el ángulo en una señal eléctrica. Si se cierra la válvula, el control de presión decide que ya no se requiere mover la bomba, lo cual detiene la circulación de aceite y por lo tanto el movimiento de los pistones.

3.2 Circuito hidráulico

El circuito hidráulico completo se compone de lo siguientes elementos:

- mangueras de transmisión
- bomba
- electroválvulas
- pistones
- válvula de seguridad
- válvula de no-retorno
- interruptor de presión
- depósito de aceite
- acumulador de aire

En la Figura 3-2 se muestra el circuito hidráulico formado por estos elementos.

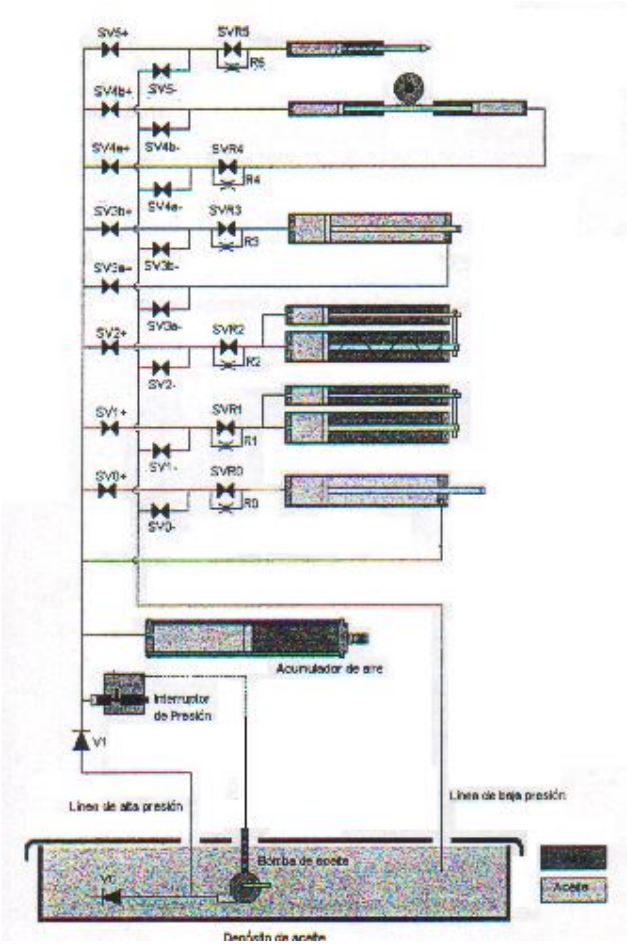


Figura 3-2 Circuito hidráulico [11]

A continuación se detalla el funcionamiento del circuito hidráulico. La bomba eleva la presión del aceite, haciéndolo circular por las mangueras desde la zona de alta presión a la zona de baja presión. Las electroválvulas permiten el desvío de aceite de dos maneras: de la zona de alta presión hacia los pistones, y de los pistones hacia la zona de baja presión[11]. Esto causa una acción de avance o retroceso, respectivamente. Cada conjunto electroválvulas-pistón es un actuador del sistema, que ejecuta una acción física sobre el robot. La operación de los Actuadores se detalla en una sección posterior.

El acumulador de aire comprime aire en el interior de un cilindro. Esto permite almacenar energía potencial que puede utilizarse posteriormente para elevar la presión sin que sea necesario activar continuamente la bomba [11].

3.3 Sistema de control de presión

El sistema posee varios componentes diseñados para mantener la presión y protegerlo de las elevaciones excesivas de presión: válvula de seguridad, válvula de no-retorno e interruptor de seguridad.

La válvula de seguridad (V0 en la Figura 3-2) conecta la zona de alta presión con la de baja presión para aliviar la carga de la bomba cuando la presión aumenta excesivamente [11].

La válvula de No-retorno (V1 en la Figura 3-2) separa la zona de alta presión de la de baja presión en el momento en que se ha alcanzado la presión deseada, haciendo que la bomba trabaje en forma intermitente [11].

El interruptor de presión permite ajustar el nivel de presión deseado para operar el sistema [11].Mientras la presión sea menor a la especificada como límite, permite que la bomba funcione.

3.4 Operación de los actuadores

Las electroválvulas de entrada, nombradas en el diagrama de la Figura 3-2 como “SVn+”, se encargan de abrir el paso del aceite hacia dentro de los pistones, haciendo a los émbolos[1] avanzar. Las electroválvulas de salida, rotuladas como “SVn-“, permiten la salida del aceite desde el pistón hacia la zona de baja presión. En este caso el émbolo retrocede por el peso de la estructura.

En la
Tabla 3-1 se resume la operación de los pistones según el estado de las electroválvulas.

[1] Émbolo: parte móvil del pistón.

Tabla 3-1 Acción de los Actuadores

SVn+	SVn-	Acción
Cerrada	Cerrada	Estático
Cerrada	Abierta	Retroceso
Abierta	Cerrada	Avance
Abierta	Abierta	***Nula***

Según tiene en la tabla, cuando ambas válvulas (una de entrada y otra de salida) están abiertas se da un funcionamiento nulo. Esto se explica observando el diagrama de la Figura 3-2. El aceite circularía directamente de la zona de alta presión a la zona de baja presión, sin que se realice trabajo alguno [11]. Esto significa un desperdicio de energía.

3.5 Antecedentes Bibliográficos

Como punto de partida de la investigación, se realizó una reunión con el Ing. Peter Zeledón Méndez, quien realizó un proyecto de reparación del robot en el año 2000. Los resultados de su proyecto se documentan en [11]. Este informe se estudió antes de iniciar el proceso de la solución.

3.6 Principios electrónicos relacionados con la solución

Acople de señales. Al estudiar los detalles del funcionamiento del sistema, se averiguó que la Tarjeta Manejadora de Válvulas [11] del robot funciona con voltajes de 0V y 15V [11], en lógica negativa (0V activa y 15V desactiva la válvula). Puesto que se planeó diseñar un sistema de control electrónico, se previó el problema que representaba el hecho de que la mayoría de sistemas digitales funcionan con 0V y 5V, por lo que se requeriría un circuito de acople de señales.

Circuitos faltantes. Como se estableció en la Sección 1.1, no existe el circuito de interfaz para controlar las electroválvulas. Por eso, debe considerarse la construcción de un circuito que permita acoplar el software de control con las válvulas.

Otro circuito que no existía, es el que procesaba la salida de los transductores, para convertirlas en señales interpretables por un sistema de control digital.

Modelado del sistema. Como punto de partido de un sistema de control, se requiere conocer el modelo del robot, que el esquema de la Figura 1-2 corresponde a la planta.

4 Procedimiento metodológico

En este capítulo se explica detalladamente el procedimiento que se llevó a cabo para desarrollar la solución.

4.1 Reconocimiento y definición del problema

Para comprender el problema se realizaron los siguientes pasos

- Reunión con el ingeniero Peter Zeledón, quien había reparado el robot previamente en el año 2000. Él indicó el problema y aspectos generales del funcionamiento del sistema
- Se revisó el informe de la reparación que Zeledón realizó [11], para entender en detalle el funcionamiento del sistema.
- Se buscó referencias en Internet, que no dejaron información técnica útil.
- Se visitó el robot para observar en persona el mecanismo
- Debido a la falta de información escrita sobre el robot, se debió realizar pruebas experimentales para comprender el funcionamiento de los circuitos del robot.

4.2 Definición de las restricciones

El objetivo final del sistema de control desde el punto de vista de la Escuela es servir como herramienta de aprendizaje, por lo que se decidió que la solución debía adecuarse al uso de los estudiantes de la carrera de Ingeniería Eléctrica. Además, debido a limitaciones económicas, debía utilizarse hardware y software disponibles en la Escuela.

Las especificaciones del diseño del sistema de control, se harían en base a las características del sistema mecánico, pues de ellas depende el que se planteen en forma realista: sobreimpulso, tiempo de estabilización y error de estado estacionario (ver Glosario), de modo que sean alcanzables.

4.3 Análisis de información

Para obtener la información del funcionamiento del sistema, se consultó al Ing. Peter Zeledón, quien elaboró el Manual de reparación [11]. En dicha referencia se hallaron las siguientes características del sistema:

- Generalidades del funcionamiento del sistema
- Voltajes y corrientes de operación
- Componentes electrónicos del robot

Debido al daño de algunos componentes del robot y el vandalismo que habían sufrido, se concluyó que no era posible emprender el desarrollo del sistema de control, sin antes reponer esos subsistemas.

Ciertos datos tuvieron que averiguarse empíricamente:

- Correspondencia entre cada entrada de control digital y la respectiva electroválvula
- Espacio de trabajo del robot
- Modelo matemático del sistema mecánico
- Comportamiento eléctrico de los sensores

Para cada uno de estos puntos se elaboró un método para averiguarlo, el cual se explicará posteriormente en la Sección 5.

4.4 Evaluación de las alternativas y síntesis de una solución

En general, la solución proyectada es un sistema de control de Lazo Cerrado. Dentro de este tipo de sistema de control, hay distintas variantes en el diseño del controlador: PID, diseño por ubicación de polos, etc. Debido a que este tipo de decisiones se basa en distintos criterios para alcanzar las especificaciones, se decidió que el controlador fuera ajustable a través de la Interfaz. De este modo, el controlador no queda comprometido con ningún tipo de diseño en particular.

Las etapas de hardware se diseñaron también de modo que no estuvieran comprometidas con ningún tipo de controlador digital en particular. De este modo sirven como plataforma para utilizar diversos dispositivos digitales como controladores.

4.5 Procedimiento de solución

Como se ha explicado anteriormente, la meta del Proyecto es diseñar un sistema de control que permita cumplir con unas especificaciones de diseño (Sección 2.1).

Sin embargo, se está partiendo de un sistema que está dañado e incompleto (Sección 1).Además no existe documentación de referencia que permita iniciar el diseño de un sistema de control.

Para diseñar un sistema de control se requiere contar con lo siguiente

- El robot funcionando plenamente
- Circuitos que sirvan como plataforma para el software de la solución
- Modelo matemático de las plantas a controlar

Puesto que se carece de los elementos anteriores, se decidió que el proceso de la solución se llevara de acuerdo con los pasos mostrados en la Figura 4-1.

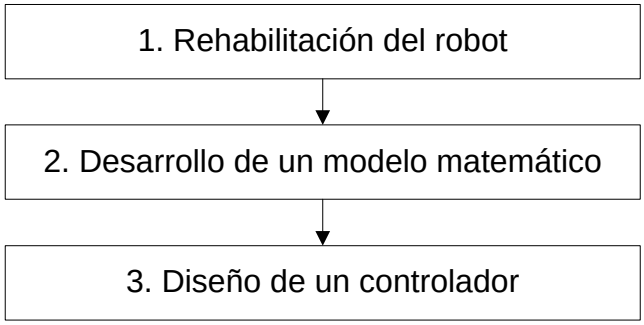


Figura 4-1 Proceso de la solución

A continuación se explicará brevemente en qué consiste cada etapa, antes de detallarla en los capítulos siguientes.

A. Rehabilitación del robot. Al estar dañado el robot y carecer de información suficiente de él, es imposible iniciar el diseño de un controlador. Es necesario estudiar el sistema para comprender su operación, para desarrollar los circuitos que requiriera y posteriormente crear un controlador.

Por las razones mencionadas, esta etapa se dividió en dos partes:

- **Estudio del sistema**. Consiste en averiguar en qué consiste cada circuito del robot y cada señal necesaria para operar el sistema en su forma más simple. El objetivo es poder manipular los actuadores del robot en Lazo Abierto y poder leer los sensores.

- **Diseño e implementación del hardware requerido.** Una vez comprendido el funcionamiento del robot, se requirió añadir circuitos que hacían falta al sistema para acondicionar la señal de los sensores y poder interfazar los actuadores con un sistema digital externo. Estos circuitos de bajo nivel sirvieron de base para más tarde implementar el control.

- Diseñar y programar un software de Interfaz y de Control que se ejecuta sobre la plataforma de hardware de bajo nivel que se construyó previamente

Esta etapa se explica completamente en la Sección 5.

B. Desarrollo de un modelo matemático. Es el punto de partida para cualquier sistema de control que se quiera implementar. El resultado de esta etapa es un conjunto de ecuaciones que modelan cada articulación. Esto es detalladamente explicado en la Sección 6.

C. Diseño de un controlador. Consiste en crear un controlador, que de acuerdo con la Teoría del Control Automático permita manipular el robot. Se desarrollará a profundidad en la Sección 7.

4.6 Divulgación del proyecto

Para dar a conocer el resultado de este proyecto, se llevó a cabo los siguientes pasos:

- Escribir una hoja de datos del robot HRA934 (Apéndice 4), que permitirá conocer detalles eléctricos y mecánicos. Esto sirve de base para conocer el funcionamiento del sistema, antes de utilizar el sistema de control.

- Elaborar un manual de usuario (Apéndice 7), paso a paso, de cómo usar el sistema. Contiene desde cómo conectarlo, hasta cómo modificar el controlador.

- Se entrenó al supervisor del Laboratorio, Ing. Mauricio Espinoza, para que comprendiera mejor el uso del equipo.

- Mostrar el sistema a estudiantes de la Escuela, para que conozcan del Proyecto a pesar de no estar en cursos relacionados con él.

5 Rehabilitación del robot

Debido a la ausencia de documentación que detallara el funcionamiento eléctrico y mecánico, y a los daños del hardware, se debió recurrir a procedimientos de ingeniería inversa (definición en Apéndice 1) para averiguar lo siguiente:

- cómo alimentar el robot
- cuáles señales son necesarias para activar las articulaciones
- cómo leer la posición de las articulaciones
- otras características que se requerían considerar para el diseño del control

Después de examinar el robot en su estado original, al comparar el sistema con los diagramas eléctricos contenidos en el Manual de Reparación [11], se encontró que carecía de los siguientes circuitos:

- interfaz digital
- oscilador senoidal
- acondicionador de sensores
- software de control

Estos elementos son necesarios para implementar un controlador digital, así que fue necesario diseñarlos e implementarlos antes de proceder con el resto de pasos de la solución.

5.1 Investigando la alimentación del robot

En [11]se explica detalladamente cómo funciona la fuente de voltaje. La dificultad encontrada era que el robot y la caja donde se aloja la fuente carecían de rotulación que indicara la correcta conexión de los terminales. Por eso se requirió destapar el chasis del robot y la fuente para estudiarlas.

Primeramente se procedió con la **fuente de potencia**. De acuerdo con [11], la fuente nominalmente puede entregar 200W. Debido a la magnitud de la potencia, debía procederse con precaución antes de conectarla. Antes de conectarla se estudió los diagramas eléctricos existentes de la fuente para entender su funcionamiento. Posteriormente, se destapó y se analizó la conexión de los cables, pues los componentes del circuito no tenían rotulación que especificara a cuál elemento del diagrama esquemático correspondía. Cuando se aseguró que los cables estuvieran apropiadamente conectados, y no hubiera cortos o cables sueltos, se conectó a la alimentación CA de 120V. Esto garantizó que cuando se conectara al robot, no hubiera problemas eléctricos.

El robot recibe su alimentación y retorna la salida de los sensores a través del conector B, ubicado en el chasis del robot. Su ubicación se ilustra en la Figura 5-1.

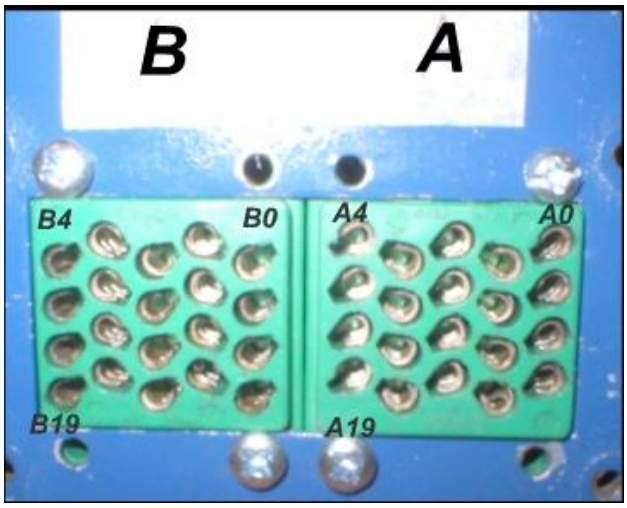


Figura 5-1 Conectores A y B

La ubicación de cada función en las patillas del conector se enumera en la Sección11.1.1.

5.2 Señales de activación de las articulaciones

Al destapar el chasis del robot, se halló la Tarjeta Manejadora de Válvulas. Utilizando el medidor de continuidad del multímetro, se halló el cable que representa la Tierra en el conector A. También se halló la conexión entre varias entradas de la Tarjeta con A. Leyendo del manual que dichas entradas se activan con 15V, se decidió activar una por una las entradas para medir la reacción del robot. El procedimiento de medición utilizado se encuentra en la Sección 11.1.1

Gracias a esto se construyó una tabla que relaciona las entradas con la función que realiza el robot (Tabla 11-6, p. 91)

Problema encontrado. Al realizar esta prueba, se encontró que varios transductores se quedaron sin reaccionar. Se abrió el chasis del robot para medir los voltajes en la Tarjeta de Preamplificación, y se encontró que uno de cables se había soltado, además que varios integrados de esta Tarjeta (LM324) estaban dañados, por lo que se solucionó esta dificultad sustituyéndolos. Este problema causó confusión al principio, pues no se sabía qué era la causa exacta de la falla

5.3 Calibración de los sensores

Esta etapa consiste en relacionar el ángulo articular con la tensión de salida correspondiente en la Tarjeta de Sensores, hasta obtener una relación matemática Ángulo-Tensión, del tipo

$$A = f(T)$$

En otras palabras, puede tomarse como una calibración matemática de cada sensor, que posteriormente será utilizada por el software de control. Este procedimiento se llevó a cabo después de construir la Tarjeta de Sensores, lo cual se aborda en la Sección5.7.

Debido a la ausencia de documentación sobre el comportamiento de los transductores LVDT y al diseño de la Tarjeta de Sensores como un circuito nuevo, no existe una referencia que indique cómo se comportará la tensión de salida de cada sensor al moverse la articulación. Por eso debió averiguarse empíricamente la relación entre ángulo y tensión.

Para obtener la relación matemática se definió el siguiente procedimiento:

- Rotar la articulación a un nuevo ángulo
- Medir con un instrumento apropiado el ángulo
- Medir la tensión del sensor
- Tabular los resultados en un software de regresión matemática
- Obtener la ecuación matemática que relaciona ángulo A con tensión T
- $A = f(T)$

- Analizar la confiabilidad, para determinar si se puede finalizar el procedimiento, o es requerido repetirlo

Para llevar los pasos del 1 al 3, se utiliza el procedimiento de la Sección 11.1.2

Para llevar a cabo los pasos del 5 al 6, los datos tabulados se procesan con el software Excel, obteniendo una relación matemática entre ambas variables. El coeficiente de correlación (R^2) es un indicador de la confiabilidad de las relaciones obtenidas; entre más cercano a 1, es más confiable. Existen varios procedimientos para realizar la correlación matemática de las variables de interés. La elección depende de qué tanta precisión se desee y de las fuentes de error de la medición. Debe tomarse en cuenta que el circuito es susceptible al ruido electromagnético de los circuitos cercanos; al ruido de la instalación eléctrica de 60 Hz que se le puede introducir, etc. Por eso, se considerará que un coeficiente R^2 mayor o igual a 95% será condición suficiente para aceptar la ecuación obtenida como buena.

$$R^2 \geq 95\% \qquad (5.1)$$

Habiendo explicado el procedimiento de medición, se mostrará su ejecución para la articulación Base.

5.3.1 Sensor de Base

La Tabla 5-1contiene los datos tomados de tensión y ángulo.

Tabla 5-1 Mediciones de sensor de Base

Tensión (V)	Ángulo (º)
0.43	136.5
0.51	127.0
0.59	106.7
0.61	104.0
0.67	96.0
0.675	94.7
0.75	82.0
0.75	83.0
0.82	72.8
0.86	62.3
0.85	67.4

El proceso de estos datos en Excel, junto con la regresión matemática se muestra en la Figura 5-2. En dicha Figura puede observarse el resultado de la regresión.

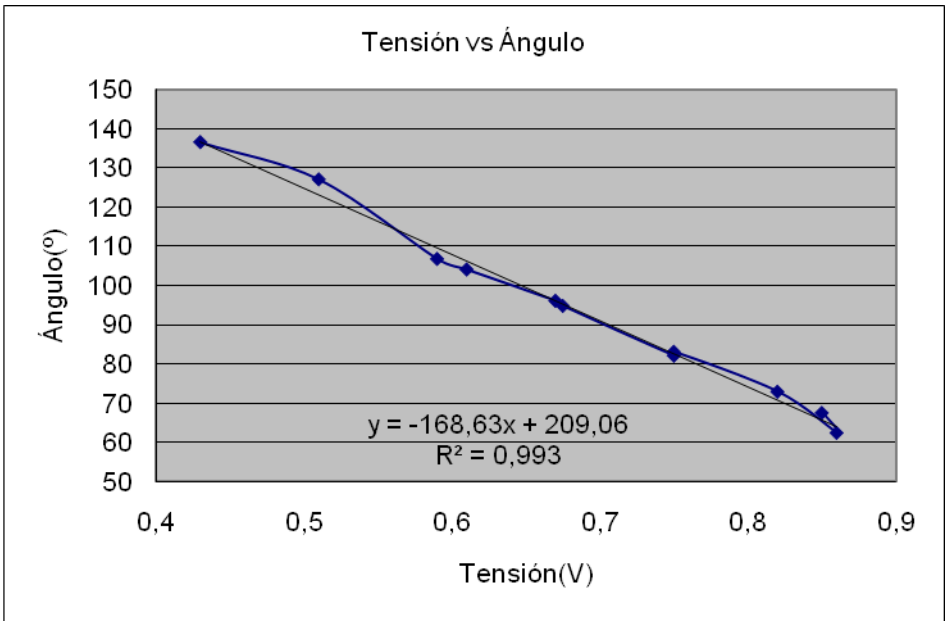


Figura 5-2 Mediciones del sensor de base

La ecuación final que relaciona la tensión ángulo se muestra en la Tabla 5-2.

Tabla 5-2 Ecuación final A=f(T) para Base

Ecuación	Coeficiente de correlación (%)
A = -168.63T + 209.06	99.3

Puesto que el procedimiento es repetitivo para cada una de las otras articulaciones (Hombro, Brazo, Pinza I, Pinza II y Pinza C), se detalló solamente los pasos para Base, con el fin de aliviar la lectura de este informe. El lector interesado en estudiar el procedimiento completo de las demás articulaciones, puede revisar los datos en el Apéndice 11.

5.3.2 Resumen de los resultados

La Tabla 5-3 contiene las ecuaciones obtenidas para cada articulación, así como el coeficiente de correlación.

Tabla 5-3 Ecuaciones obtenidas

Articulación	Ecuación	R^2 (%)
Base	A = -168.63T + 209.06	99.3
Hombro	A = -105.06T + 25.34	98.1
Brazo	$A = 112.44T^2 - 225.32T + 36.019$	99.3
Pinza I	A= -151.73T+ 99.243	99.3
Pinza II	$A = -383.54T^2 + 723.34T - 88.404$	99.3
Pinza C	A= 4.2458T + 1.466	99.0

Mirando los coeficientes obtenidos, todos son superiores a 98%, por lo que se considera que el resultado es satisfactorio. Esto permitirá continuar con las siguientes etapas en el desarrollo de la solución.

5.4 Espacio de trabajo

El espacio de trabajo es el volumen del espacio que puede ser recorrido por las articulaciones [3]. En este caso, se describió para cada articulación como el límite al que puede rotar cada articulación al desplazarse en cada dirección. El circuito de medición es el mostrado en la Figura 11-1. Los resultados están en el Apéndice 4, Sección 11.3.

5.5 Tiempo muerto

El tiempo muerto (ver definición en Glosario) se determinó a partir de los gráficos de la medición de la respuesta del sistema a Lazo Abierto. El procedimiento se muestra en el Apéndice 4, Sección 11.3.

De acuerdo al análisis del circuito hidráulico, se tiene que el tiempo muerto está relacionado principalmente por la conmutación de las electroválvulas, proceso que toma una duración aproximadamente constante. Sin embargo, hay una serie factores cuasi-aleatorios, para los que su contribución de retraso se considera variable:

- Tiempo de reacción del control de presión
- Longitud de las mangueras
- Tiempo de reacción del sistema electrónico

Por esta razón, se debe considerar los valores máximos y mínimos de este tiempo muerto. Los resultados se muestran en el Apéndice 4, Sección 11.3.

5.6 Recopilación de los resultados del estudio

Con el fin de unificar los resultados de las mediciones de esta sección, todas se unieron en el documento “Hoja de datos del Robot HRA934” (Apéndice 4).

5.7 Reconstrucción del hardware

Después de conocer el funcionamiento del robot, se comprendió que se requería circuitos que sirvieran de plataforma para el software de control.

Como se ha explicado antes, las tarjetas del sistema fueron dañadas, por lo que debió diseñarse los circuitos que cumplieran las funciones de acople de señales de control, sensado de articulaciones y alimentación de los transductores.
Los criterios que se utilizaron para desarrollar el hardware son los siguientes:

- Conexión con un controlador electrónico alojado en una computadora
- Compatibilidad de voltajes con salidas tipo TTL
- Independencia del software de control

Tomando en cuenta que para desarrollar un sistema de control se requiere controlar los actuadores, leer los sensores y que el estado actual, se llegó a la conclusión que las etapas de hardware requeridas por la solución son las mostradas en la Figura 5-3.

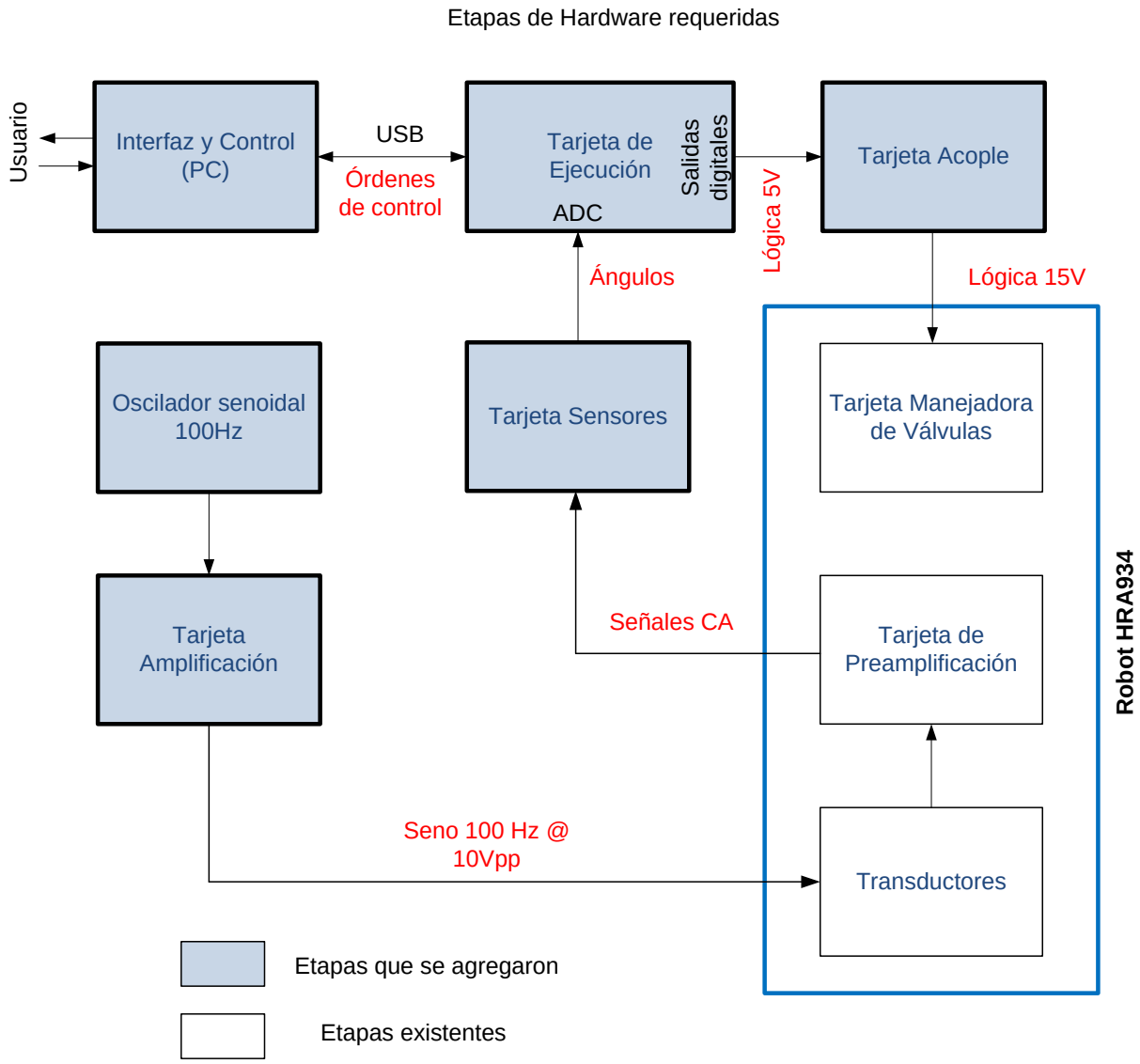


Figura 5-3 Circuitos requeridos por la solución

En la mencionada figura, se destacan en color celeste el hardware que debió aportase al sistema, mientras que los de fondo blanco ya estaban en el robot. Así mismo, en color rojo se muestra el tipo de señales que se transmiten entre ellos. Los bloques que se diseñaron y fabricaron son:

- Tarjeta de Acople
- Tarjeta de Amplificación
- Tarjeta de Sensores

Otros bloques que debieron agregarse al sistema, aunque no diseñarse, son:

- Computadora personal (PC)

- Tarjeta de Ejecución

En las secciones siguientes se explicará el funcionamiento y la justificación de la existencia de cada uno de los bloques.

5.7.1 Computadora personal (PC)

La PC tiene la función de alojar y ejecutar el software de Interfaz y de Control. Las razones por las que se considera conveniente utilizar una computadora son:

- Posee los elementos requeridos para la interfaz: teclado, pantalla
- Permite programarse en lenguaje de alto nivel
- No requiere hacer una inversión de compra, al existir en la Escuela

El modelo utilizado tiene las siguientes características:

- Procesador Intel QuadCore @ 2.4 GHz
- 1 GB de memoria Ram
- 100 GB de Disco Duro
- Software Labview 8

5.7.2 Tarjeta de Acople

La función de esta tarjeta es acoplar la salidas digitales de control, que son tipo TTL de 5V con las entradas de la Tarjeta Manejadora de Válvulas, las cual operan a 15V [11]. Debido a esta diferencia de tensiones, se utilizan optoacopladores para poder manipular la Tarjeta Manejadora desde la Tarjeta de Ejecución.

Este circuito se diseñó de modo que no estuviera ligado con ningún sistema de control en particular. Más bien, al poseer entradas digitales de 5V son compatibles con tecnología de compuertas TTL/CMOS, por lo que puede controlarse con cualquier fuente de señal digital: PIC, Tarjeta de Desarrollo, computadora, dipswitch, etc.

En la Figura 5-4 se muestra el diagrama eléctrico de uno de los acoples. La tarjeta está formada por un arreglo de 19 de estos.

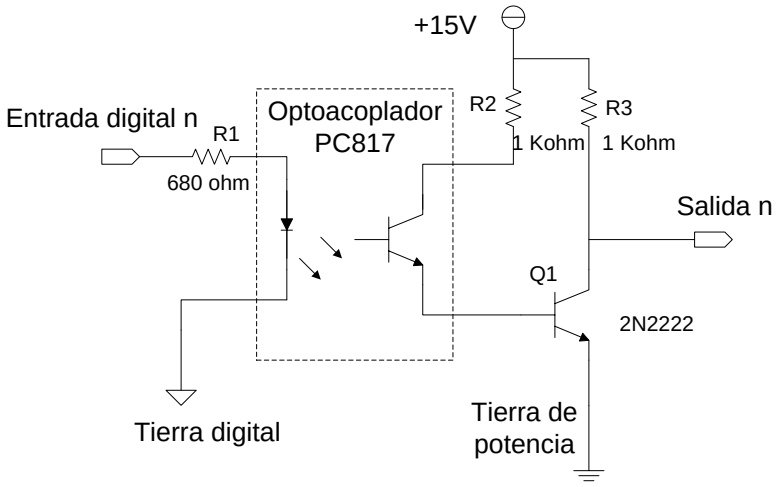


Figura 5-4 Diagrama eléctrico de cada acople de la Tarjeta de Acople

El funcionamiento del circuito se presenta a continuación. Cuando la entrada digital se activa con Alto lógico (5 V), circula corriente a través del diodo emisor de luz en el optoacoplador y su resistencia limitadora R1. Esto cierra el fototransistor, haciendo que circule corriente hacia la base de Q1, polarizándolo y haciendo que entre en saturación. La salida queda al nivel de tierra, por lo que se tiene un 0 lógico de salida.

Por el contrario, cuando a la entrada se aplica Bajo lógico (0 V), no hay circulación de corriente por el diodo y por tanto el fototransistor queda en estado de abierto y tampoco circula corriente por Q1, por lo que la salida es 15V (1 lógico). En la Tabla 5-4 se sintetiza el funcionamiento lógico del circuito, para los 19 optoacopladores.

Tabla 5-4 Tabla de verdad del acople

Entrada	Salida
0 (0V)	1 (15V)
1 (5V)	0 (0V)

Desde el punto de vista eléctrico, se justifica la elección de los componentes. La entrada digital se planeó que fuera controlada por Tarjeta de Adquisición de datos USB-6008 (se justifica más adelante). De acuerdo a la hoja de datos de este dispositivo, cada salida puede drenar una corriente máxima de 8.35 mA [20]. Además, tiene conectada una resistencia pull-up de 680 Ω a sus salidas, por ser de colector abierto. Cuando la salida del USB-6008 está en Bajo, la corriente que conduce la es

$$I = \frac{5V}{680\Omega} = 7.35mA$$

En estado Alto, la salida del 6008 entrega al led del optoacoplador una corriente de

$$I_{LED} = \frac{5V - V_{LED}}{R_{PullUp} + R_1} \quad (5.2)$$

Evaluando,

$$I_{LED} = \frac{5V - 1.2V}{2 \cdot 680\Omega} = 2.79mA$$

pues la hoja de datos del optoacoplador Sharp PC817 [16] indica una caída de voltaje típica de 1.2V en el LED. El valor de la resistencia esta multiplicado por dos, pues la resistencia pull-up de la salida del 6008 está en serie con la resistencia limitadora de corriente del LED.

La hoja de datos [16] prevee una razón de transferencia de corriente CTR entre 200% y 400%. Suponiendo el caso de la menor transferencia, que es el crítico, la corriente del transistor de salida del optoacoplador es

$$I_{Q0} = CTR \cdot I_{LED} \quad (5.3)$$

$$I_{Q0} = 5.58mA$$

La corriente IQ circula por la base del transistor Q1 hacia su emisor. La corriente máxima CE de Q1 es

$$I_{Q1} = \frac{15V - V_{CE}}{R3} \quad (5.4)$$

De las hojas de datos del 2N2222, la tensión V_{CE} de saturación es 1V como máximo. Por tanto, esto da un valor mínimo de corriente de saturación de

$$I_{Q1(SAT)} = 14mA$$

Sabiendo que la ganancia de corriente estática (β) es mínimo 50, se tiene que la corriente de Q_1 es

$$I_{Q1} = \beta I_{Q0} = 279mA$$

Debido a que esta corriente es mayor que la mínima requerida para alcanzar el estado de saturación ($I_{Q1(SAT)}$), se garantiza que el transistor Q1 queda activado por el optoacoplador.

La asignación de patillas de este circuito se muestra en la Tabla 5-5.

Tabla 5-5 Patillas de la Tarjeta de Acople

Función	Entrada	Salida
Base horario	I1	O1
Base Antihorario	I2	O2
Hombro Arriba	I3	O3
Hombro Abajo	I4	O4
Brazo Arriba	I5	O5
Brazo Abajo	I6	O6
Pinza I Arriba	I7	O7
Pinza I Abajo	I8	O8
Pinza II Horario	I9	O9
Pinza II Antihorario	I10	O10
Pinza C Abre	I11	O11
Pinza C Cierra	I12	O12

La construcción de este bloque se muestra en la Figura 5-5.

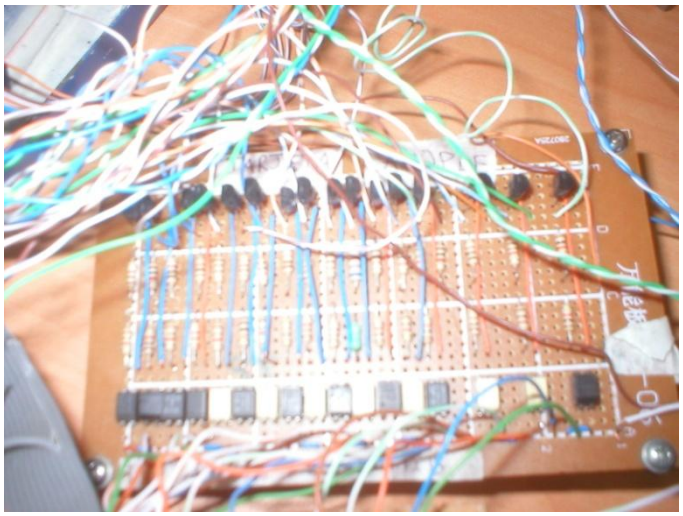


Figura 5-5 Tarjeta de Acople construida en una placa universal

5.7.3 Oscilador

Dado que los transductores son transformadores LVDT, requieren una tensión de excitación alterna senoidal de 100Hz y amplitud 10Vpp [11]. El oscilador es el circuito que proporciona esta onda.

Para implementar este circuito se dispuso de un generador de ondas propiedad de la Escuela, modelo Tektronix CFG253 [15], el cual se muestra en la Figura 5-6.

Figura 5-6 Generador de funciones Tektronix CFG253 [15]

La limitación de este dispositivo es su corriente máxima de salida, la cual es de 500 mA, según su hoja de datos [15]. No puede alimentar directamente los transductores, pues estos requieren aproximadamente 4A [11]; por lo que se requiere insertar un amplificador de corriente entre esta etapa y los transductores.

5.7.4 Tarjeta de amplificación

Los transductores consumen una corriente de aproximadamente 4A[11], la cual es superior a la corriente que puede entregar el Oscilador (500 mA). Por esta razón se decidió diseñar este circuito amplificador de corriente.

En la Figura 5-7 se muestra el diseño del amplificador de corriente. Es un del tipo “AB” y se utiliza para aislar la fuente de entrada de la carga ZL.

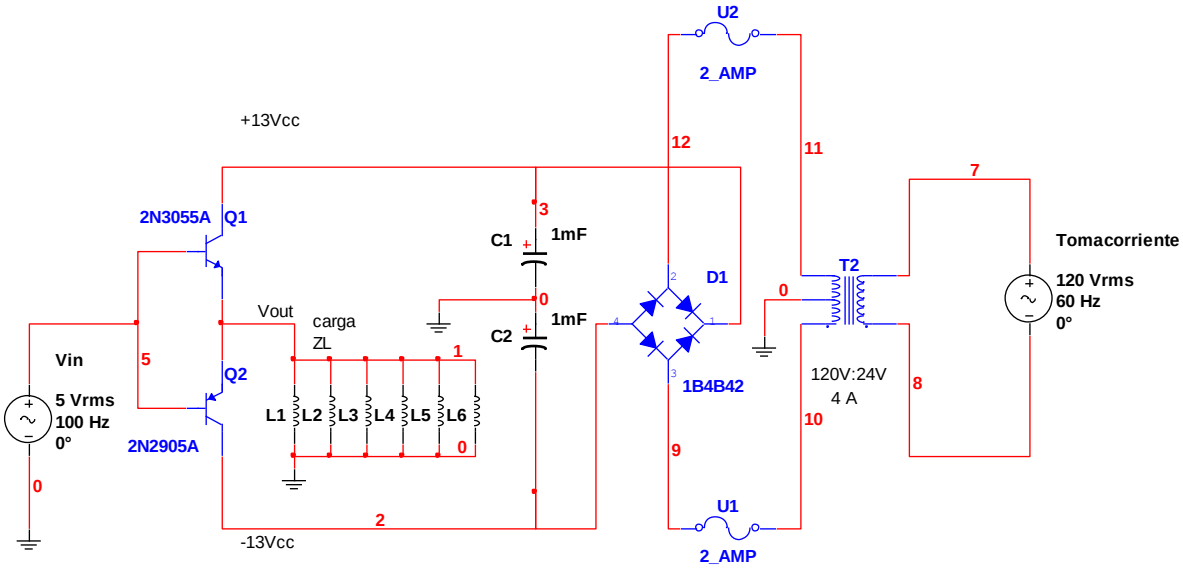


Figura 5-7 Diagrama eléctrico de la Tarjeta de Amplificación

El circuito refleja la tensión de entrada Vin en la carga, mientras que son los transistores bipolares Q1 y Q2 los que entreguen la corriente a la carga, que es el bobinado del transductor LVDT. Cuando la entrada Vin es positiva, se aplica el siguiente análisis:

El diodo base-emisor de Q1 se polariza directamente si Vin> 0, lo cual hace a Q1 conducir, trabajando en su zona activa. El diodo base-emisor de Q2 por el contrario queda polarizado inversamente, por lo que Q2 queda abierto entre colector y emisor. Aplicando Ley de Mallas:

$$Vin - V_{BE} = Vout \qquad (5.5)$$

Donde V_{BE} es la caída de voltaje en el diodo Base-Emisor de Q1, aproximadamente 0.7 V, de acuerdo a la teoría de semiconductores (citar a alguien). Por lo que se tiene que el voltaje de salida $Vout$ equivale aproximadamente a

$$Vin - 0.7\ V = Vout \qquad (5.6)$$

La corriente que entrega Vin a la carga se muestra aquí

$$I = \frac{Vout}{ZL} \qquad (5.7)$$

Debido a la amplificación β de corriente de base Ib del transistor, que es

$$\beta \cdot Ib = Ic \qquad (5.8)$$

se tiene que la corriente Ib que entrega la fuente de entrada es β veces menor que la requiere la carga (Ic). Esta característica de la etapa "AB" es la que evita exigir toda la corriente de carga a Vin. El análisis para el ciclo negativo de Vin es similar. El transistor polarizado es Q2, para el cual las mismas ecuaciones son válidas.

Respecto a la implementación del circuito, se utilizó los transistores NPN 2N3055 (Q1) y PNP MJ2955 (Q2). Según se puede ver en la *hoja de datos,* ambos son complementarios; se diseñaron para trabajar en un sistema de amplificación de este tipo. Soportan una corriente de hasta 15 amperios, un voltaje Colector-Emisor de 70 V y β entre 20 y 70. Evaluando numéricamente con los datos conocidos de corriente de base, $Ic = 4A$ y β=20 (caso crítico), se despeja de (5.8).

$$Ib = \frac{Ic}{\beta} \qquad (5.9)$$

$$Ib = 200mA$$

La corriente de base Ib entregada por el oscilador es menor que su valor máximo permitido de 500 mA. Se cumple la exigencia de potencia de la carga, y por esta razón se concluye que el diseño es suficiente.

También puede observarse en la Figura 5-7 la forma en que se alimentó el circuito. Debido a que la carga una corriente de 4A, se decidió alimentar todo el circuito con una fuente propia. El transformador entrega la potencia eléctrica y el puente de diodos rectifica la tensión. Las características de este transformador es: reducción de 120Vrms a 24 Vrms y corriente máxima de 6 A, lo que provee la potencia requerida por el circuito. El puente de diodos soporta una corriente de hasta 8A y 250V en polarización reversa [18]. Por esta razón se considera que son apropiados para implementar el circuito.

Parte del montaje en protoboard de la Tarjeta, se puede observar en la Figura 5-8.

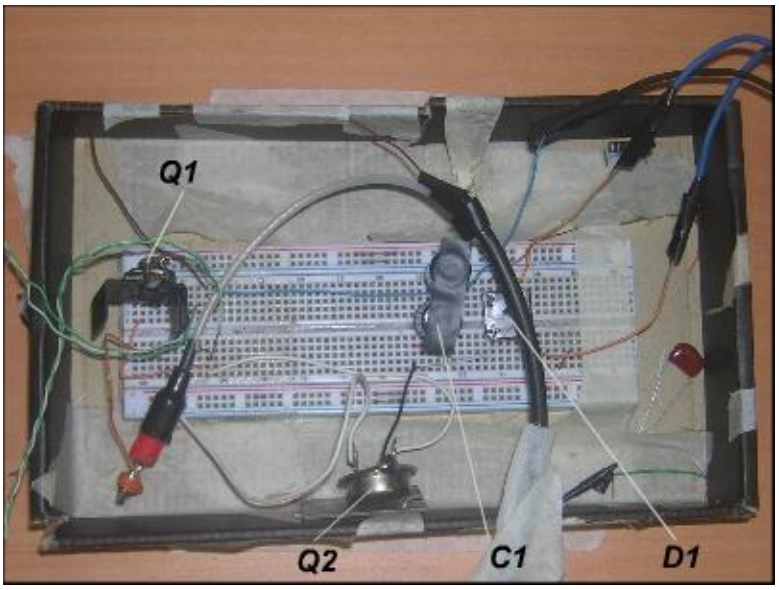


Figura 5-8 Montaje de la Tarjeta de Amplificación en protoboard

5.7.5 Tarjeta de Sensores

Los transductores convierten el desplazamiento del émbolo de cada cilindro en una tensión alterna de salida. Este tipo de onda es inadecuado para procesarse en los sistemas digitales que se podrían utilizar para programar el sistema de control (PIC, computadora, etc). Por eso, la Tarjeta de Sensores realiza el acondicionamiento dela tensión de entrada proveniente de cada transductor, de modo que transforme la salida en una tensión CD, apta para ser utilizada por un dispositivo control digital.

El circuito está conformado por seis rectificadores de precisión o circuitos MAV (Valor medio absoluto) [2]. Cada uno es independiente y se encarga de convertir la señal de voltaje CA de cada transductor en una señal CD, de este modo se puede utilizar en el sistema digital de control.

La entrada de cada rectificador es una tensión alterna de frecuencia 100 Hz, cuya magnitud varía en función del ángulo del miembro respectivo. La salida del sistema es una señal CD cuyo valor varía proporcionalmente al ángulo que se está midiendo. En la Sección 5.3 se explica cuál es la relación matemática entre esta tensión de salida y el ángulo.

En Figura 5-9 se muestra el diagrama eléctrico de un solo rectificador.

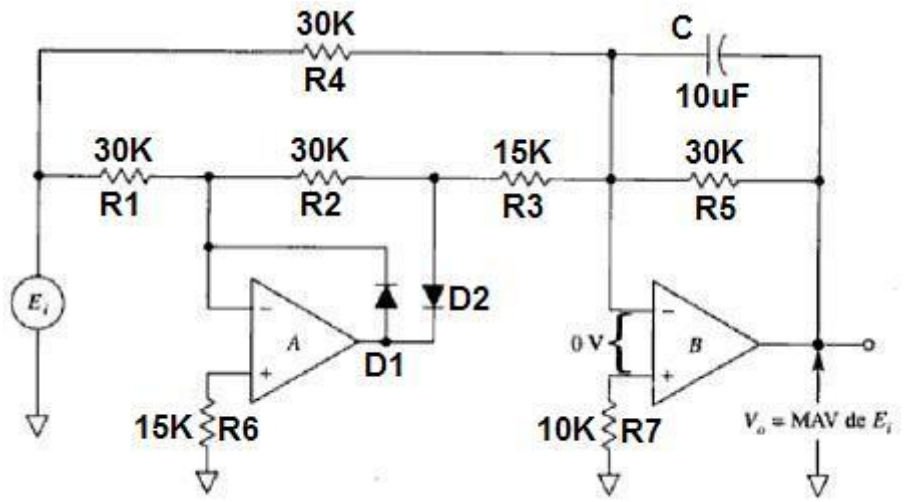


Figura 5-9 Diagrama eléctrico del circuito MAV [2]

El rectificador de precisión rectifica la señal CA de entrada compensando la caída de tensión de los diodos rectificadores D1 y D2. La salida del circuito se grafica en la Figura 5-10.

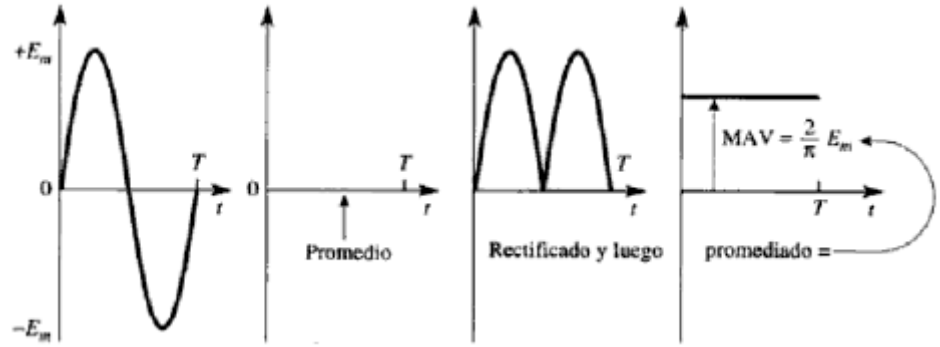


Figura 5-10 Salida del MAV [2]

La salida del circuito es

$$Vo = \frac{2}{\pi} E_m \qquad (5.10)$$

donde E_m es la amplitud de la onda seno de entrada. Su demostración es la siguiente. El amplificador B funciona como sumador inversor de la salida de A y de la tensión de entrada Ei [2]. Para el caso de Ei positivo, se muestra las tensiones en la Figura 5-11.

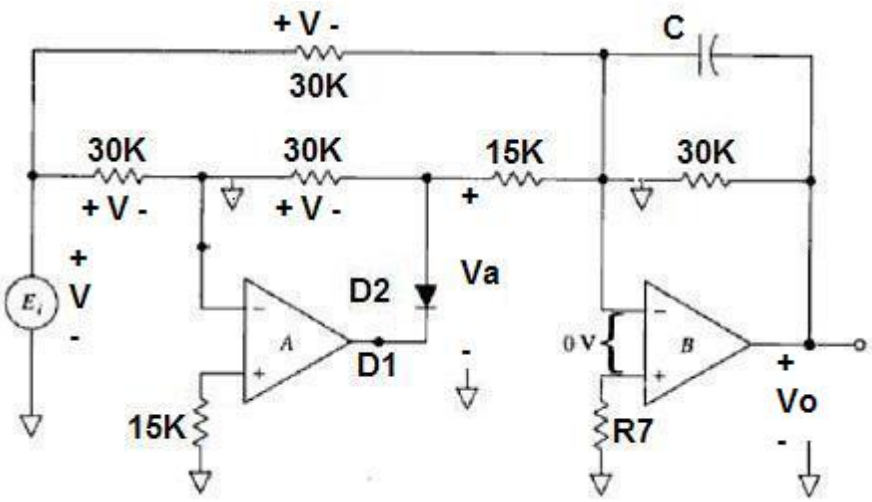


Figura 5-11 Análisis del MAV para entradas positivas [2]

Tomando en cuenta los cortocircuitos virtuales y aplicando Ley de Mallas, se tiene

$$-V + V + V + Va = 0$$

$$Va = -V$$

En este caso, la salida dada por el sumador sin tomar en cuenta el capacitor C es

$$Vo = -\left(\frac{30K}{30K}V - \frac{30K}{15K}V\right)$$

$$Vo = V$$

Para entradas negativas, el funcionamiento de A es similar. La salida es $Va = -V$. La respuesta del sumador es

$$Vo = -\left(\frac{30K}{30K}V - \frac{30K}{15K}V\right)$$

$$Vo = V$$

El capacitor C se encarga de promediar el voltaje de salida Vo [2], de modo que se tiene como resultado final

$$\mathrm{Vo} = \frac{2}{\pi}\mathrm{V} \qquad (5.10)$$

Al construir el diseño en una placa universal, el resultado obtenido está en la Figura 5-12.

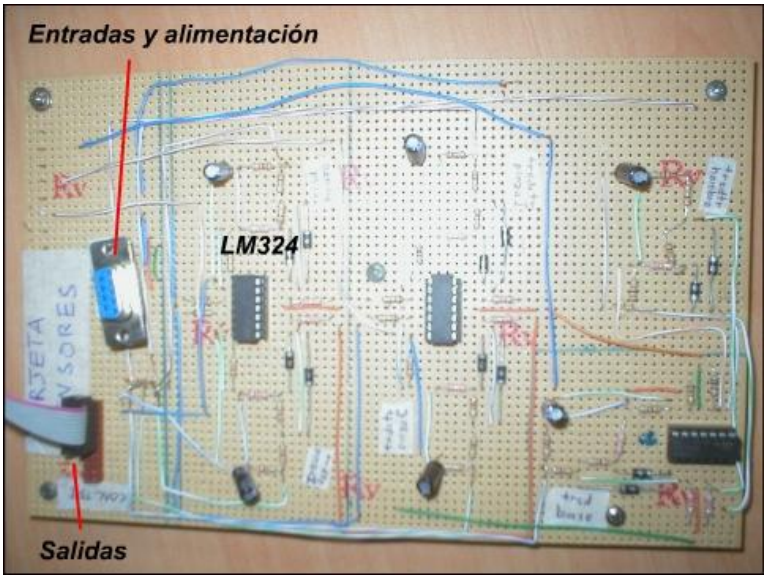


Figura 5-12 Construcción de la Tarjeta de sensores en placa universal

5.7.6 Tarjeta de Ejecución

La función de este circuito es adquirir las señales analógicas provenientes de los sensores y transmitir las señales digitales de control hacia la Tarjeta de Acople. De este modo, permite al software de Interfaz y Control alojado en una computadora personal (PC) comunicarse con el resto del sistema, como se puede observar en la Figura 5-3.

Esta etapa es necesaria, debido a que la computadora personal en la que se programó la Interfaz y el Controlador no posee los suficientes ADCs para leer los sensores, ni los suficientes pines digitales libres para activar las electroválvulas.

Como opciones para implementar este bloque, la Escuela poseía varias tarjetas de adquisición de datos modelos National Instruments PCI-1200 y USB-6008.Se eligió la USB-6008, debido a que cumple con las siguientes características[20]:

- 12 salidas digitales compatibles con TTL/CMOS
- 2 salidas analógicas de 12 bits
- Entradas analógicas de 12 bits
- Conexión USB
- Compatibilidad con lenguaje Labview

El diagrama de bloques de la Tarjeta de Ejecución se muestra en la Figura 5-13.

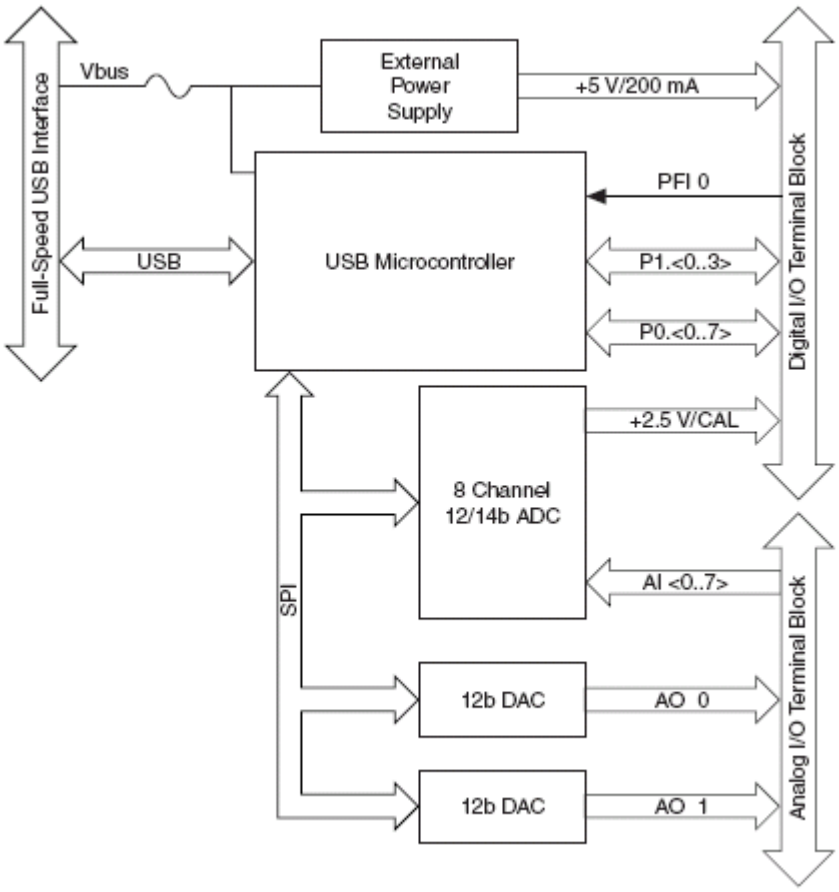


Figura 5-13 Diagrama de bloques de la Tarjeta de Ejecución [20]

Las salidas de la USB-6008 son tipo TTL/CMOS. Esto hace que sea directamente compatible con las entradas de la Tarjeta de Acople. Para interconectar ambas tarjetas, solo se requiere unir eléctricamente con cables los respectivos puertos. La correspondencia entre las salidas Tarjeta de Acople y las entradas de la Tarjeta de Ejecución se muestra en la Tabla 5-6.

Tabla 5-6Puerto digital de la Tarjeta de Ejecución

Pin de salida USB-6008	Entrada de Tarjeta de Acople	Función
17 P0.0	1	Base horaria
18 P0.1	2	Base antihoraria
19 P02	3	Hombro arriba
20 P0.3	4	Hombro abajo
21 P0.4	5	Brazo arriba
22 P0.5	6	Brazo abajo
23 P0.6	7	Pinza I arriba
24 P0.7	8	Pinza I abajo
25 P1.0	9	Pinza II horario
26 P1.1	10	Pinza II antihorario
27 P1.2	11	Pinza C abre
28 P1.3	12	Pinza C cierra
29 PFI0		
30 +2.5V		
31 +5V		
32 GND	Tierra de control	Tierra de control

Las entradas analógicas de la Tarjeta de Ejecución se conectarse directamente con las salidas de la Tarjeta de Sensores de la manera indicada en la Tabla 5-7. Debe destacarse el hecho de que la tarjeta USB-6008 tiene separadas las tierras de cada entrada analógica, por lo que deben cortocircuitarse entre sí, para tener una misma referencia [20].

Tabla 5-7 Puerto analógico de la Tarjeta de Ejecución

Pin de Entrada analógica USB- 6008	Pin de salida Tarjeta de Sensores	Función
3 AI4	6	Pinza II
4 GND	5	Tierra(*)
5 AI1	7	Hombro
6 AI5	2	Pinza C
7 GND	5	Tierra(*)
8 AI2	3	Brazo
10 GND	5	Tierra(*)
11 AI3	1	Pinza I
12 AI7	4	Sensor Base
13 GND	5	Tierra(*)

(*) Tierras unificadas

El aspecto de la Tarjeta de Ejecución se muestra en la Figura 5-14.

Figura 5-14 Tarjeta de Ejecución [20]

5.7.7 Resultados del diseño de las etapas de Hardware

Se estimuló las entradas de los circuitos diseñados y construidos, con estímulos del tipo que se esperaba utilizar en la realidad. Esto permitió comprobar si el funcionamiento real correspondió con la realidad.

En Apéndice 5 se muestra los resultados de las pruebas que se ejecutaron para comprobar si el comportamiento de los circuitos construidos es el esperado según el diseño. En base a las tablas (Tabla 11-7 hasta Tabla 11-14) mostradas en dicha sección (p. 92), se concluye que el diseño y la implementación de los circuitos han sido exitosas.

5.8 Etapas de Software

Así como se requirió hacer etapas de hardware de bajo nivel para controlar el robot, se requirió diseñar y programar algoritmos de control que permitieran implementar el sistema de control que se pretende llevar a cabo, sobre esos circuitos. Los criterios que se tomaron en cuenta para diseñar este software son los siguientes:

- Código Abierto
- Comprensible para nuevos usuarios
- Modularidad
- Reciclaje de código
- Parámetros configurables

Las etapas de software que se produjeron fueron las siguientes:

- Interfaz
- Controlador
- Sensor
- Configuración

En la Figura 5-15 se muestra la relación entre las rutinas anteriormente señaladas, así como su interacción con el usuario.

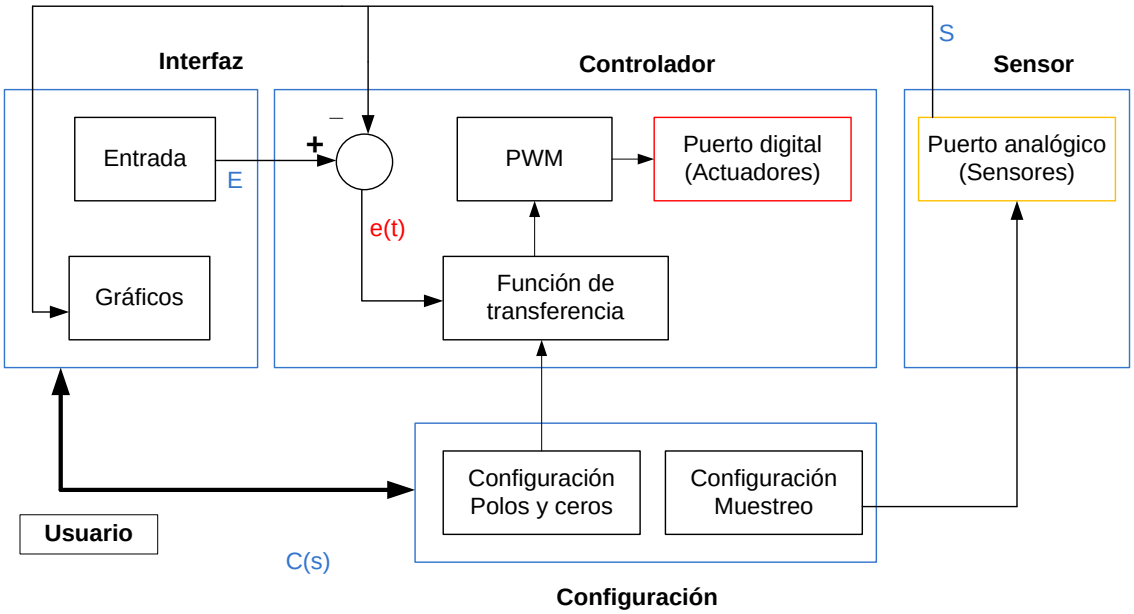


Figura 5-15 Rutinas de Software. E=Entrada. S=Salida. C(s)=T.F. del Controlador.

A continuación se explica cómo funcionan en conjunto las diferentes rutinas a grandes rasgos, antes de explicar detalladamente cada una, en una sección posterior.

La rutina de **Configuración**, permite introducir en forma de polos y ceros la función de transferencia del controlador que se desea implementar, a través de campos numéricos. También puede modificar el muestreo de los sensores del robot: tasa de muestreo, rango de voltaje, y número de pin de entrada por el que se leerá el sensor respectivo.

El usuario controla directamente en la computadora la rutina de **Interfaz**, la cual le provee gráficamente la información del sistema: estado del sistema, ángulo actual, estado de los actuadores, gráfico de los diferentes datos, etc.

Una vez que el usuario ha configurado el controlador deseado, utiliza a **Interfaz** para cambiar la entrada E del sistema, que representa la nueva salida (ángulo) S al que desea mover la articulación. Interfaz detecta cuando el usuario ha introducido una nueva consigna, y esto reinicia el algoritmo del sistema.

Interfaz le proporciona el ángulo de entrada E a **Controlador**, el cual calcula la señal de error e(t), de acuerdo a la ecuación

$$e(t) = E - S \qquad (5.11)$$

E es una señal de salida, proporcionada por la rutina de **Sensor**. El error se le aplica al generador de pulsos PWM, el cual es controlado por la función de transferencia del Controlador que anteriormente se configuró. Los pulsos se dirigen al puerto de salida digital, que directamente controla los Actuadores del robot, de forma que la articulación respectiva se dirija a la posición deseada, cumpliendo con los parámetros de diseño del controlador electrónico, cuyo diseño se desarrolla en la Sección 7.

Los pasos anteriormente explicados se resumen como diagrama algorítmico en la Figura 5-16.

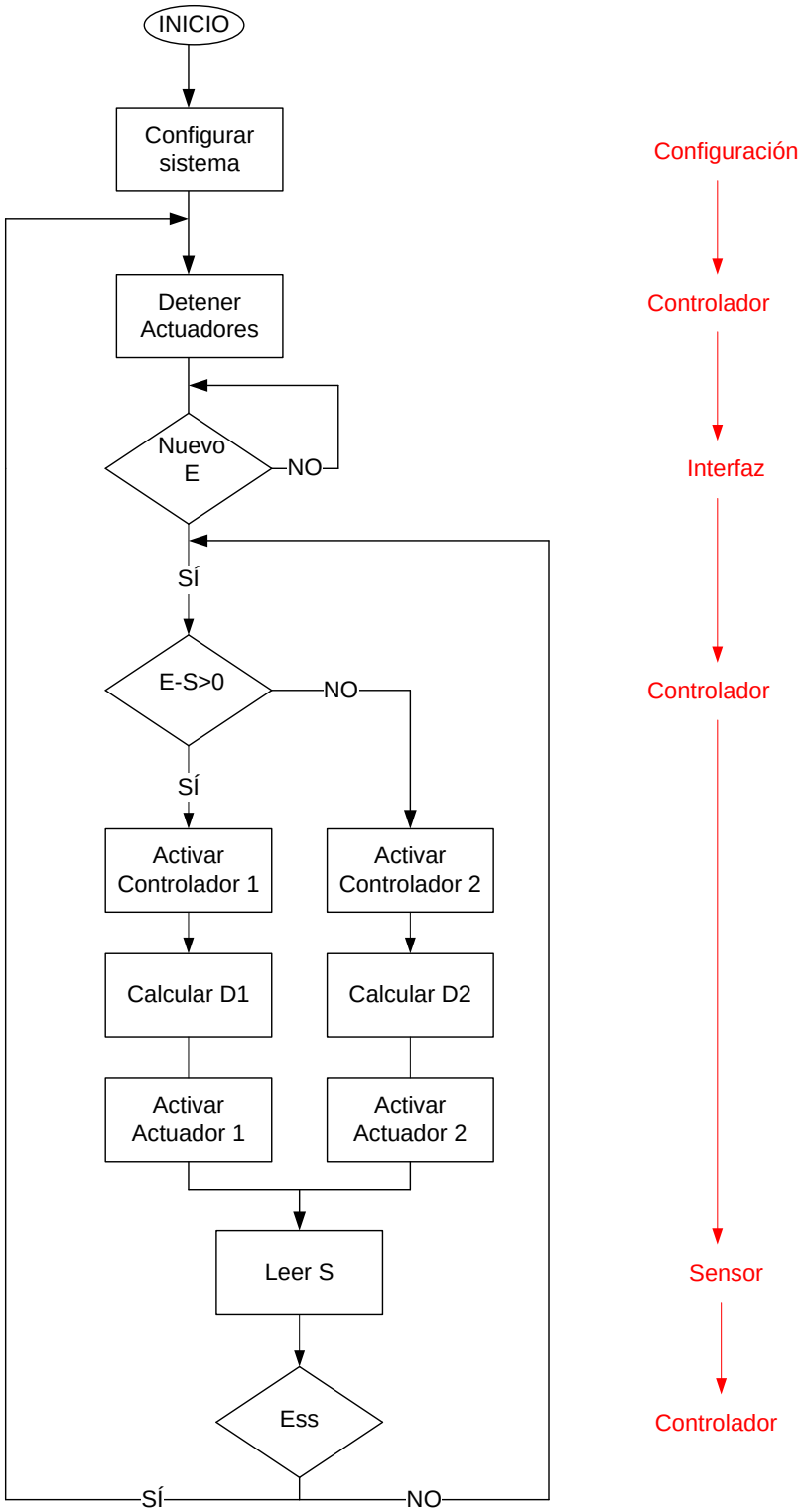


Figura 5-16 Algoritmo de la solución. En rojo se presenta la rutina específica que desarrolla cada paso

Algo importante que señalar en este algoritmo, es que cada articulación tiene dos funciones de transferencia distintas. Por esta razón, el controlador debe primero saber en qué dirección se moverá respecto al valor actual: hacia un valor menor o mayor. Dependiendo de esto, se activará una de las dos funciones de transferencia que contiene cada articulación. Cada una se encarga de controlar un respectivo generador de PWM, cuya salida es el ciclo de trabajo D. Esto se detallará más adelante.

A continuación se explica los criterios con que se implementó las etapas de software.

5.8.1 Criterios de diseño

Código abierto. Siendo el sistema de control de utilidad para varios cursos de la carrera de Ingeniería Eléctrica, el código fuente de la solución se entregará a los supervisores del área de Control Automático y Robótica de la Escuela. Esto permitirá que desarrollen diferentes versiones del software para los proyectos y actividades que deseen desarrollar con el robot HRA934.

Comprensible para nuevos usuarios. El sistema debe ser fácilmente comprensible para aquellos que aborden el diseño de un control por primera vez en este sistema. Por esta razón se elige utilizar el lenguaje Labview, el cual se basa en un paradigma gráfico, que permite entender intuitivamente la relación entre el algoritmo, el flujo de datos, las salidas y las entradas. Otra medida que se tomó para facilitar la compresión del sistema fue documentar el código, rotular minuciosamente los bloques que se utilizaron y elaborar la documentación escrita respectiva.

Modularidad. La modularidad facilita a nuevos usuarios realizar modificaciones en el programa, con independencia de las funciones que no se desea tocar. Por esta razón, la función de transferencia del Controlador de software se empaquetó en un único bloque, con parámetros de entrada configurables en forma de polos y ceros. Esto permite modificar el Controlador para experimentos y mejoras que un estudiante quiera hacer. El Apéndice 9 contiene una lista de las librerías generadas.

Reciclaje de código. El robot posee seis articulaciones que funcionan de manera similar. Por esta razón, se hizo un conjunto de rutinas que conforman un sistema genérico de control para una articulación. Lo que diferencia el programa para controlar una articulación de otra es:

- Función de transferencia de la articulación
- Rango de entrada E
- Conversión de voltaje del sensor hacia ángulo
- Función de Transferencia del Controlador C(s)

Para implementar el control para los seis miembros del robot, se copia y modifica el programa genérico, con los parámetros anteriormente mencionados. Esto ahorra tiempo al programar.

Parámetros configurables. Al usuario se le dejó la posibilidad de modificar mediante campos de entrada las siguientes características:

- Grado del filtro pasabajas de entrada de la Tarjeta de Ejecución [20]
- Gráficos de las señales de salida y entrada
- Polos y ceros del compensador

A continuación se explica en detalle el diseño de cada rutina.

5.8.2 Rutina Interfaz

Es la parte del programa visible al usuario. Se accede en la computadora a través de la pantalla, el ratón y el teclado. Sus funciones accesibles al usuario son

- Configurar un controlador en forma de polos y ceros
- Configurar el filtro de entrada
- Introducir la consigna
- Observar gráficos de salida y entrada en el tiempo
- Reportar información del sistema
- Forzar la articulación en una dirección ignorando el controlador

La vista del usuario se muestra en la Figura 5-17.

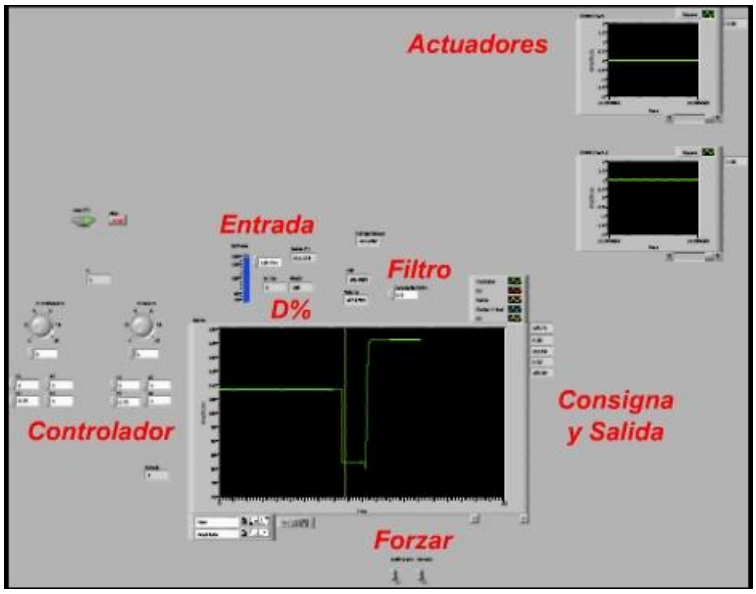


Figura 5-17 Rutina Interfaz

5.8.3 Rutina Configuración

Permite introducir un controlador de la forma

$$C(s) = K\frac{s-z1}{s-p1}\frac{s-z2}{s-p2} \tag{5.12}$$

También permite configurar un filtro pasabajas de la forma

$$F(s) = \frac{a}{s-1/a} \tag{5.13}$$

En la Figura 5-18 se muestra la visión que tiene el usuario de esta rutina

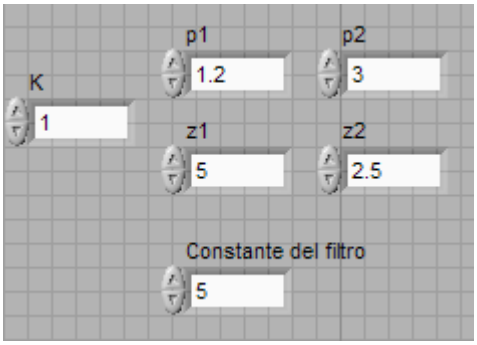


Figura 5-18 Rutina de Configuración

5.8.4 Rutina Controlador

Esta rutina que implementa el controlador. Recibe como entrada la señal de error e(t) y la función de transferencia que se introdujo a través de Configuración y manipula el actuador PWM para generar un ciclo de trabajo D que active los actuadores, de modo que la articulación alcance el valor deseado. Su código Labview se muestra en la Figura 5-19.

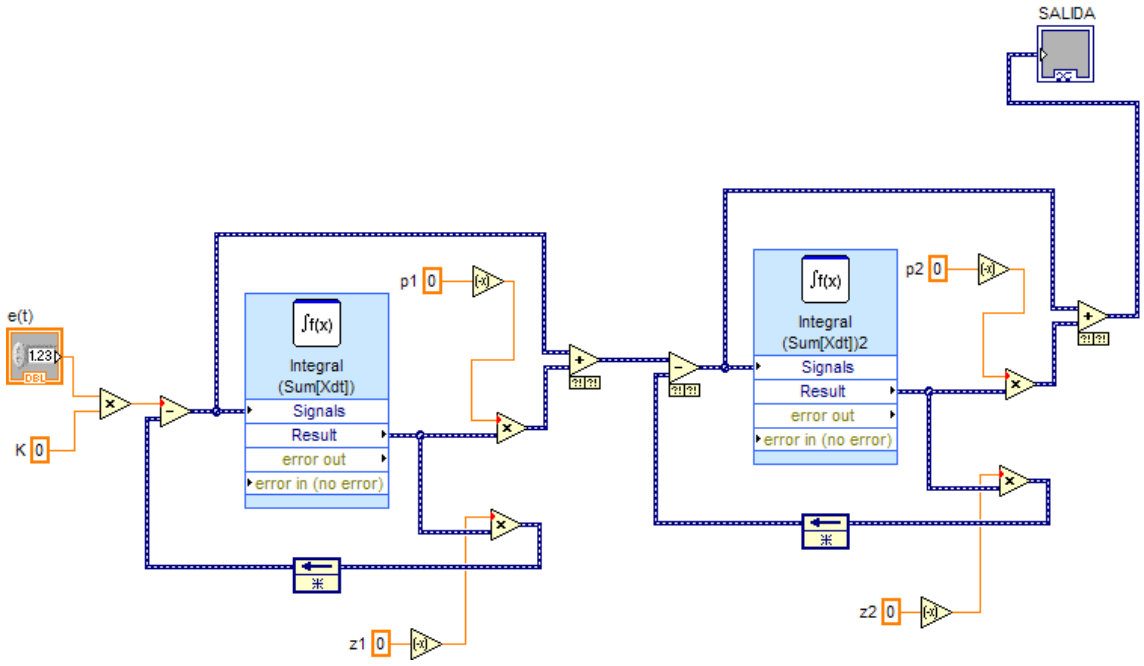


Figura 5-19 Rutina Controlador

En el Apéndice 9se demuestra que la función de transferencia de este arreglo es

$$C(s) = K\frac{s-z1}{s-p1}\frac{s-z2}{s-p2} \qquad (5.14)$$

Hay que destacar que antes de utilizar esta rutina, primero debe diseñarse un controlador propicio; de lo contrario el sistema no funcionará adecuadamente. El diseño de un controlador se dejará para la Sección 7.

Puede darse el caso en que el usuario desee manipular el sistema utilizando un controlador igual a 1, lo cual es equivalente a conectar directamente la señal de error diferencial con la planta (sistema no compensado). Para ello solamente debe dejar los campos de la ecuación
(5.14) igual a 1: K=1; z1=1; z2=1; p1=1 y p1=1.

5.8.5 Actuadores

Los actuadores hidráulicos del brazo son controlados con modulación de ancho de pulso PWM, que utiliza como base una onda cuadrada de 0.5 Hz. Hay que considerar que las electroválvulas del robot tienen un tiempo de conmutación de 0.2s, como se dedujo en la Sección 5.5. Si se le aplica a la electroválvula un pulso de control de menos de 0.2s de duración, no será efectivo y la válvula no conmutará.

Esto significa que la conmutación de una válvula consume un periodo total Tc de 0.4s. Por esta razón, la onda cuadrada opera con un ciclo de trabajo limitado. La deducción del rango es la siguiente

$$\frac{PeriodoActivo}{PeriodoCompleto} = Dmáx \quad (5.15)$$

$$\frac{T - Tc}{T} = Dmáx \quad (5.16)$$

donde T es el periodo de oscilación y Dmáx el ciclo de trabajo máximo. Evaluando con los datos que ya se conocen

$$Dmáx = 0.8 = 80\%$$

La relación entre ciclos de trabajo es

$$1 - Dmáx = Dmín$$

Evaluando,
$$Dmín = 0.2 = 20\%$$

Por lo tanto el rango válido de D está entre 20% y 80%.

$$20\% < D < 80\% \quad (5.17)$$

5.8.6 Resultados del software

Al terminar de diseñar y programar las etapas de software, el sistema ya posee los elementos necesarios para ejecutar un controlador que el usuario diseñe. Sin embargo, es necesario conocer el modelo de la articulación a controlar, para poder iniciar este proceso. De lo contrario, el improvisar un controlador cualquiera causaría comportamiento impredecible en la planta.

6 Desarrollo de un modelo matemático

Como paso inicial para el diseño de un sistema de control, se requiere tener el modelo de la planta de la articulación. Al no encontrarse documentación que indicara que alguna persona hubiera obtenido un modelo matemático previamente, se decidió obtener el modelo empírico.

En esta sección del informe, se considerará que el modelo empírico de la planta contiene también a la función del actuador, y que la realimentación es unitaria.

6.1 Procedimiento experimental

Para hallar los modelos reales de cada articulación, se utilizó el procedimiento ilustrado en la Figura 6-1.

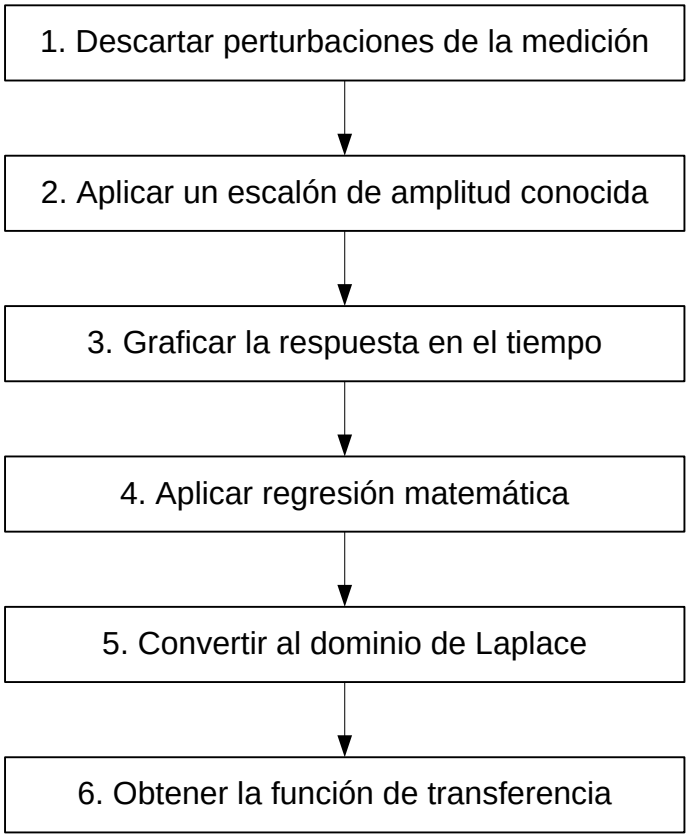


Figura 6-1 Método para hallar el modelo empírico de cada articulación

La explicación de los pasos se tiene a continuación:

1. Las perturbaciones se deben eliminar para evitar que entorpezcan la medición. En el caso del robot, esas serían: aplicar fuerza contra el movimiento del brazo, colgar una masa de él, etc.

2. El escalón se aplica con una magnitud conocida, de modo que en el análisis se pueda observar cuál es la relación entre la entrada aplicada y la salida obtenida. El procedimiento se enseña en la Figura 6-2.

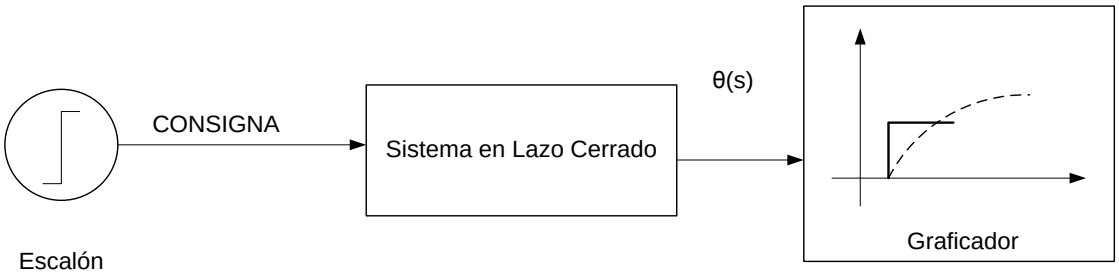


Figura 6-2Medición de la respuesta del sistema

3. El resultado de cada medición, es un conjunto de puntos en el plano Ángulo-Tiempo. Estos representan la respuesta en el tiempo del sistema, ante una entrada escalón de valor conocido.

4. La regresión es el procedimiento de obtener una función que represente un conjunto de datos cuya relación no se tiene clara. El resultado que retorna este procedimiento es una ecuación en el tiempo, la cual representa la salida del sistema. El grado de ajuste de la curva a la realidad se mide con el coeficiente de correlación, el cual es un indicador de grado de confianza que pueda obtener. Por lo tanto, se requiere aplicar la regresión para obtener la respuesta en el tiempo.

5. Transformar el modelo en el tiempo da como resultado la Función de Transferencia del modelo. Este paso se requiere porque analizar el comportamiento transitorio del modelo ante determinadas entradas (escalón, rampa, etc) se facilita utilizando el dominio de Laplace.

6. Finalmente, la Función de Transferencia, expresada como un cociente de salida entre entrada es la representación matemática buscada del modelo empírico.

$$TF(s) = \frac{\theta(s)}{E(s)}$$

En este caso, la salida es un ángulo θ, mientras E es la entrada.

El procedimiento anterior se llevó a cabo con 12 modelos, debido a que el robot posee 6 articulaciones y cada una tiene dos funciones de transferencia; una para cada dirección de rotación.

A continuación se desarrolla el procedimiento para la función Base Horario. Previamente se debió establecer las abreviaturas mostradas en la Tabla 6-1 y Tabla 6-2 para la comprensión de todo el capítulo.

Tabla 6-1Abreviaturas para Lazo Cerrado

Abreviatura	Función
$TF1(s)$	Base Horario
$TF2(s)$	Base Antihorario
$TF3(s)$	Hombro Arriba
$TF4(s)$	Hombro Abajo
$TF5(s)$	Brazo Arriba
$TF6(s)$	Brazo Abajo
$TF7(s)$	Pinza I Arriba
$TF8(s)$	Pinza II Abajo
$TF9(s)$	Pinza II Horario
$TF10(s)$	Pinza II Antihorario
$TF11(s)$	Pinza C Abre
$TF12(s)$	Pinza C Cierra

Tabla 6-2Abreviaturas para Lazo Abierto

Abreviatura	Planta
$P1(s)$	Base Horario
$P2(s)$	Base Antihorario
$P3(s)$	Hombro Arriba
$P4(s)$	Hombro Abajo
$P5(s)$	Brazo Arriba
$P6(s)$	Brazo Abajo
$P7(s)$	Pinza I Arriba
$P8(s)$	Pinza II Abajo
$P9(s)$	Pinza II Horario
$P10(s)$	Pinza II Antihorario
$P11(s)$	Pinza C Abre
$P12(s)$	Pinza C Cierra

6.2 Modelo de Base Horaria

Al aplicar en la articulación Base una entrada tipo escalón en dirección Horario,

$$E(t) = 25u(t) \tag{6.1}$$

se obtiene los datos que se tabularon en Tabla 6-3

Tabla 6-3 Datos experimentales de Base Horario

t(s)	θ(°)
0	0
0.0831	2.8351
0.0832	5.9847
0.2073	7.5595
0.3316	9.1343
0.4972	10.079
0.58	13.228
0.581	16.378
0.6628	17.008
0.6628	17.008
0.7456	18.268
0.9527	20.157
0.9941	21.417
0.9941	21.417
1.698	25.827
1.698	25.827
1.8222	26.142
1.8222	26.142
2.609	25.512
2.609	25.512
3.1473	25.512
3.1473	25.512
3.7648	25.512
∞	25.512

Los datos de la tabla se tomaron, y utilizando el programa NLREG se hizo una regresión no lineal, cuyo resultado se muestra en la Tabla 6-4. En la Figura 6-3se grafica el proceso de las mediciones en este software.

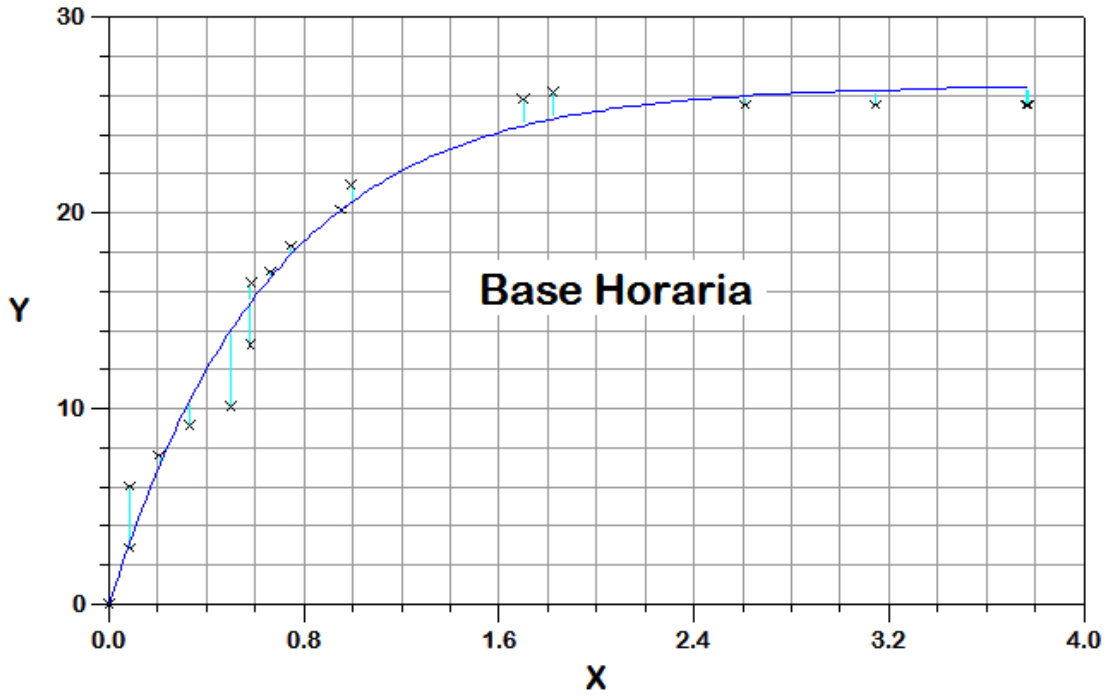


Figura 6-3 Base Horario. Proceso de las mediciones hecho en NLREG. X=tiempo(s). Y=θ(°).

Tabla 6-4 Resultados de la regresión

Función del tiempo	R^2	
$\theta(t) = 26.513\left(1 - e^{-t/0.666}\right)$	0.9729	(6.2)

Con el valor de R^2 obtenido, se concluye que la aproximación es correcta. Ahora se aplica la transformada de Laplace a la función temporal de la Tabla 6-4, y se divide entre la magnitud del escalón aplicado en la ecuación (6.1) para obtener la función de transferencia TF1(s)

$$TF1(s) = \frac{1.592}{s + 1.502} \qquad (6.3)$$

Utilizando la transformación de Lazo Cerrado a Lazo Abierto

$$P(s) = \frac{TF(s)}{1 - TF(s)} \qquad (6.4)$$

Se obtiene la función de la planta P1(s)

$$P1(s) = \frac{1.592}{s - 0.0907} \quad (6.5)$$

En la ecuación (6.5) se tiene el resultado buscado de la planta. A partir de este resultado se puede iniciar el diseño del un controlador, aplicando la teoría del Control Automático.

Todas las plantas de las demás once articulaciones se obtienen a través del mismo procedimiento. Para evitar la repetición innecesaria, el resultado final de todas las plantas se resumirá en la Tabla 6-5.

Tabla 6-5 Resumen las funciones de transferencia empíricas

Articulación	Dirección	Planta
Base	Horario	$P1(s) = \frac{1.592}{s - 0.0907}$
	Antihorario	$P2(s) = \frac{0.914}{s - 0.046}$
Hombro	Arriba	$P3(s) = \frac{0.5072}{s + 0.030}$
	Abajo	$P4(s) = \frac{1}{3.378s + 0.04}$
Brazo	Arriba	$P5(s) = \frac{1}{1.366s + 0.04}$
	Abajo	$P6(s) = \frac{0.537}{s - 0.035}$
Pinza I	Arriba	$P7(s) = \frac{2.821}{s - 1.115}$
	Abajo	$P8(s) = \frac{3.125}{s - 0.139}$
Pinza II	Horario	$P9(s) = \frac{1}{1.223s - 0.177}$
	Antihorario	$P10(s) = \frac{1}{1.35s - 0.157}$
Pinza C	Abre	$P11(s) = \frac{2.717}{s - 0.4545}$
	Cierra	$P12 = \frac{3.251}{s - 0.4814}$

Si el lector desea confirmar los resultados utilizando el procedimiento de la Sección 6.1, puede consultar el Apéndice 12, el cual contiene los datos medidos de todas las articulaciones.

Con los resultados obtenidos en esta sección, se puede proceder al siguiente paso de la solución, que es desarrollar un controlador.

7 El controlador

El controlador es el bloque del sistema que se encarga de mover las articulaciones en forma controlada [6]. Cumple tres funciones:

- Darle una rapidez elegida al sistema
- Minimizar el error de estado estacionario
- Minimizar las oscilaciones

Estas características se explican en la sección siguiente.

7.1 Funciones del controlador

1. **Darle rapidez al sistema**. Se mide la velocidad con que el sistema llega a su punto final a través del tiempo de estabilización (ts) (ver Glosario).A menor tiempo de estabilización, mayor rapidez.

2. **Minimizar el error final**. Eso significa que el error final en la orientación de cada articulación sea lo menor posible, de acuerdo a las posibilidades reales del sistema. El parámetro que mide este requisito es el error de estado estacionario e_{ss} (ver Glosario).

3. **Minimizar las oscilaciones**. Las aceleraciones y desaceleraciones repentinas y repetidas tienen un efecto adverso sobre la vida útil del sistema mecánico, por lo que se tratará minimizar el sobreimpulso Mp (ver Glosario), parámetro que lo determina.

El controlador se insertará en serie con la planta, tal como se muestra en la Figura 7-1.

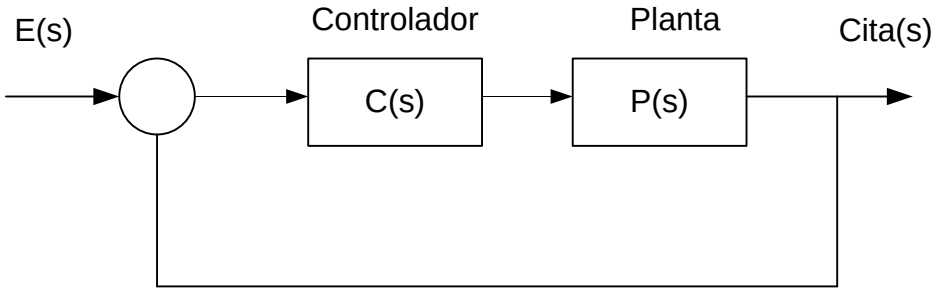


Figura 7-1 Sistema de control

7.2 Procedimiento de diseño

Para llevar a cabo del diseño del controlador, se requiere realizar el procedimiento mostrado en la Figura 7-2.

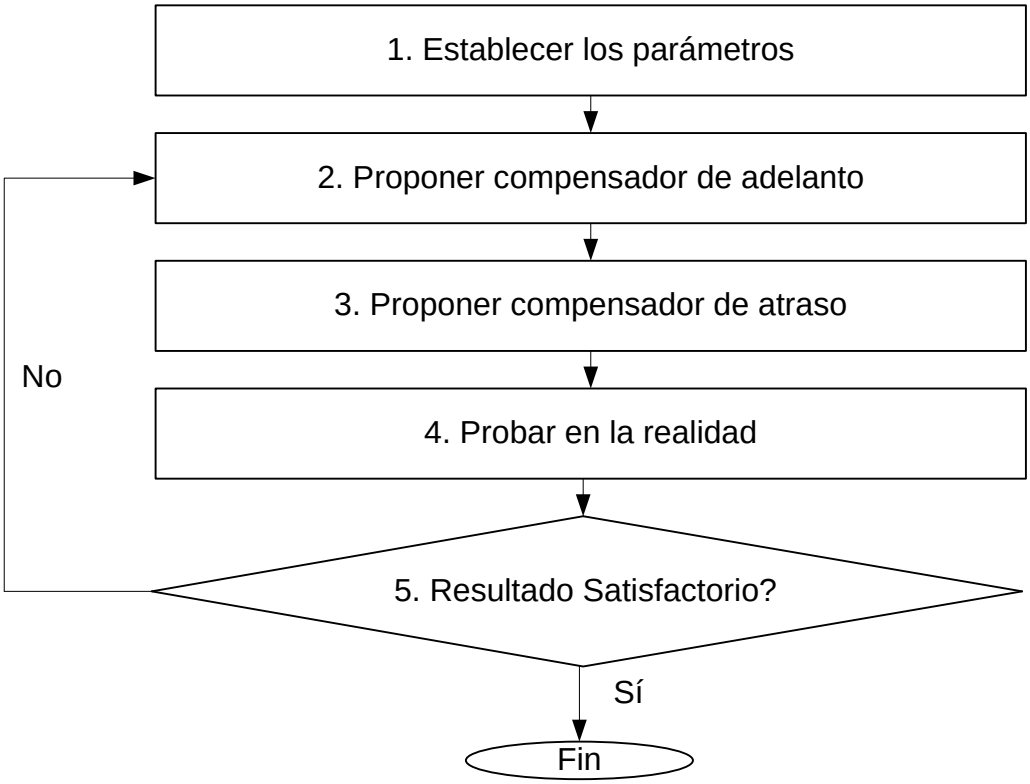


Figura 7-2 Procedimiento de diseño del Controlador

La explicación de los pasos se da a continuación.

1. Se establece los parámetros: tiempo de estabilización, sobreimpulso y error final que se desea obtener. Para esto se requiere conocer de antemano el modelo, y simularlo para conocer sus características.

2. Para corregir las características dinámicas (tiempo de estabilización y sobreimpulso) se aplica un compensador de adelanto en serie con la planta, diseñado mediante la técnica de ubicación de polos y ceros.

3. Para corregir el error de estado estacionario, se requiere un compensador de atraso, diseñado mediante la ubicación de polos y ceros.

4. Se prueba en la realidad para verificar qué tan bien cumple los requisitos el diseño.

5. Si los resultados se aproximan lo suficiente a los deseados, de acuerdo con el criterio del diseñador, se pueda dar por concluida esta etapa. De otro modo, es necesario volver al Paso 3, para volver a ajustar el sistema.

El resultado satisfactorio se considerará el que cumpla con los criterios definidos en el paso 1 del diseño.

7.3 Controlador para el robot

El controlador que se diseñó, está compuesto por dos compensadores: uno de atraso y otro de adelanto. La Figura 7-3 muestra cómo se insertan en el sistema.

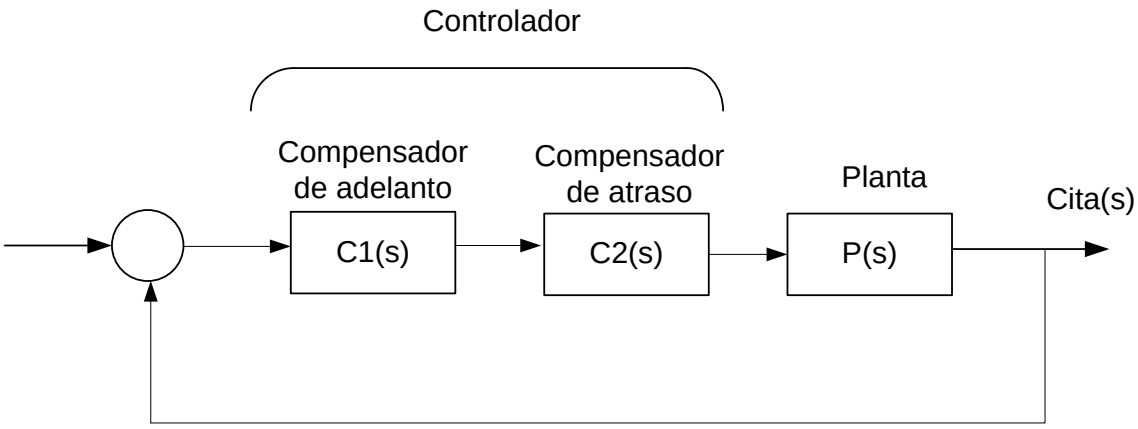


Figura 7-3Controlador basado en compensadores

La función del controlador del tipo compensador de Atraso es corregir las características de tiempo de estabilización y sobreimpulso [6]. El error de estado estacionario se corrige con el compensador de Atraso.

7.4 Consideraciones de diseño

7.4.1 Exactitud

Hay factores que introducen imprevisibilidad en el comportamiento del robot. Esto causa que se imposible diseñar alcanzar los resultados con total exactitud. A continuación se tienen los principales factores y la forma en que influyen en el sistema.

- **Tiempo muerto.** Como se vio en la Sección 5.5**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, el tiempo muerto es variable, dentro de un rango

determinado. Esto causa inexactitud en el periodo de activación de los actuadores, por lo que habrá inexactitud en el ángulo final de cada articulación.

- **Ruido del sensor.** El ruido de entrada a través de este elemento causará que la salida sea distorsionada. Así mismo, agregar un filtro causará lentitud en la respuesta de este filtro.

- **Inexactitud del modelo.** Debido a que el diseño del compensador depende del modelo, las inexactitudes de este último se trasladan al sistema real.

A causa de tales factores, es imposible alcanzar una exactitud ideal en el sistema de control. Esto se debe considerar al elegir los parámetros del controlador, de modo que se garantice que estos sean alcanzables.

7.4.2 Doble función de transferencia

Las funciones de transferencia de la planta están contenidas en la Tabla 7-1.

Tabla 7-1 Funciones de transferencia de Base

Dirección	Función de Transferencia
Base Horario	$P1(s) = \frac{1.592}{s - 0.091}$
Base Antihorario	$P2(s) = \frac{0.914}{s - 0.046}$

Como se observa, ambas funciones de transferencia son diferentes entre sí, por lo que un solo controlador no puede abarcarlas. Por esta razón, la solución que se eligió fue implementar un controlador para cada dirección de movimiento, tal como se muestra en la Figura 7-4.

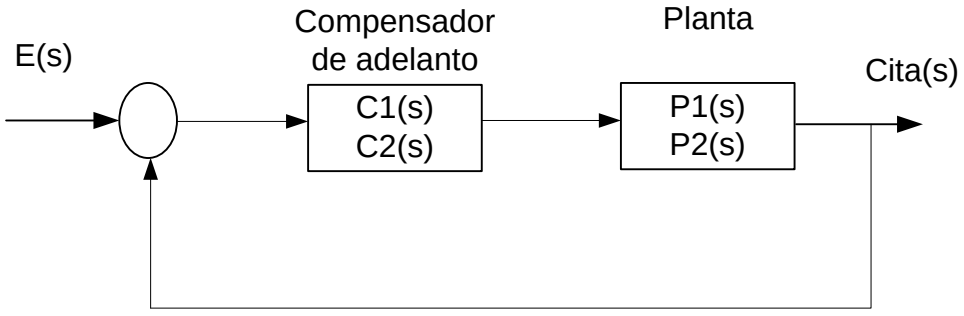


Figura 7-4Base. Compensador de adelanto C1(s)/C2(s)

El programa de control debe decidir cuál compensador activar, dependiendo del signo del error diferencial e(t)

$$Compensador = \begin{cases} C1(s) si\ e(t) < 0 \\ C2(s) si\ e(t) > 0 \\ Ninguno\ si\ e(t) = 0 \end{cases}$$

Cada función de transferencia controlará un solo actuador en la respectiva dirección del movimiento. Por esta razón debió minimizarse el sobreimpulso, pues esta característica obliga a controlar ambos actuadores para una sola dirección de movimiento. Hacer lo contrario puede causar una respuesta errática, pues cada controlador ignora cómo manejar el actuador que no le corresponde.

7.5 Parámetros del controlador

Se plantearon los siguientes parámetros del controlador de Base. Debe tomarse en cuenta, que este controlador se diseñó para que manejara la articulación en ambas direcciones (Horario y Antihorario).

Tabla 7-2 Base. Parámetros esperados de controlador.

Parámetro		Valor esperado
Tiempo de estabilización 2%	ts	4.5s<t_s<6s
Sobreimpulso	Mp	10
Error de estado estacionario	e_{ss}	5

Se esperaba que una vez diseñado y aplicado el controlador, los parámetros del sistema compensado en la vida real se acercaran lo más posible a los de la Tabla 7-2.A continuación se lleva a cabo el proceso de diseño del controlador, utilizando la técnica de bisectriz.

7.6 Diseño del controlador para Base

En esta sección se diseñará el controlador para la articulación Base.

7.6.1 Cálculos

Este compensador de adelanto hará funcionar el sistema con el tiempo de estabilización y el sobreimpulso mostrado en la Tabla 7-2. Su diseño se basa en ubicar los polos del sistema en las posiciones adecuadas del plano s, que permitan llegar a los parámetros buscados.

El tiempo de estabilización (del 2% por defecto) es dado por:

$$t_S = \frac{4}{\varsigma\omega_n} \quad (7.1)$$

por lo que tienen los límites

$$\varsigma\omega_{n1} = \frac{4}{t_S} = \frac{4}{4.75} = 0.84$$

$$\varsigma\omega_{n2} = \frac{4}{t_S} = \frac{4}{5} = 0.80$$

Para el sobreimpulso Mp, se busca Mp=0.01 (1%)

$$\varsigma = \sqrt{\frac{\left(\frac{lnM}{\pi}\right)^2}{1+\left(\frac{lnM}{\pi}\right)^2}} = 0.83$$

El ángulo máximo θ es

$$cos^{-1}(\varsigma) = \theta = 34°$$

Se elige por tanto situar los polos en el punto

$$\theta = 34°$$

$$\varsigma\omega_n = 0.82$$

Los polos son por tanto

$$s_{1,2} = -0.82 \pm j0.55$$

La Tabla 7-3 resume la información de ubicación de los polos.

Tabla 7-3 Cálculo de la ubicación de los polos s1,s2

ω_n	ς	$cos^{-1}(\varsigma)$	$s_{1,2}$
0.82	0.83	34º	-0.82±j0.55

Primero se realiza para Base Antihorario con el método de la bisectriz [6]

$$\emptyset = 180° - \measuredangle(G_0(s1)) \quad (7.2)$$

$$\theta = 180° - \measuredangle(s1) \quad (7.3)$$

Evaluando respectivamente

$$\emptyset = 180° - (180 + 31)° = -31°$$
$$\theta = 180° - \measuredangle(180° - 34°) = 34°$$

Las ecuaciones para el polo p0 y el cero z0 del compensador son respectivamente

$$z0 = -|s1|\frac{cos\left(\frac{\theta+\emptyset}{2}\right)}{cos\left(\frac{\theta-\emptyset}{2}\right)} \quad (7.4)$$

$$p0 = -|s1|\frac{cos\left(\frac{\theta-\emptyset}{2}\right)}{cos\left(\frac{\theta+\emptyset}{2}\right)} \quad (7.5)$$

La ganancia es

$$K_C = \frac{1}{\left|\widehat{K}_{lead}(s1)G_0(s1)\right|} \quad (7.6)$$

Al evaluar, se obtienen los valores del compensador

$$z0 = -1.17$$
$$p0 = -0.833$$
$$K_C = 0.56$$

Repitiendo el procedimiento para Base Horario

$$\emptyset = 180° - (180 + 49.4)° = -49.4°$$
$$\theta = 180° - \measuredangle(180° - 53°) = 53°$$
$$z0 = -1.608$$
$$p0 = -0.606$$
$$K_C = 0.65$$

Por tanto el compensador de adelanto C1(s) y C(2) quedan de la forma que está en la Tabla 7-4.

Tabla 7-4 Compensador de Adelanto para Base

Base Horario	Base Antihorario
$C1(s) = 0.65\frac{s + 1.608}{s + 0.605}$	$C2(s) = 0.56\frac{s + 1.17}{s + 0.833}$

La Figura 7-5 contiene una simulación de la respuesta esperada para la P2(s) al aplicar C2(s).

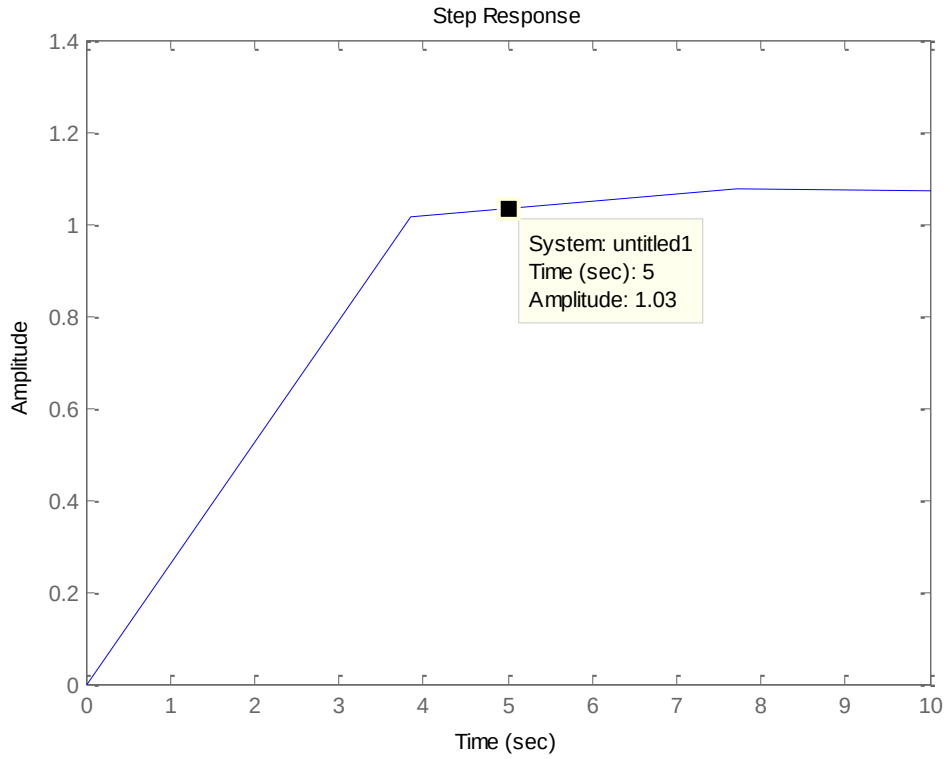


Figura 7-5 Simulación de C2(s)

7.7 Diseño para las articulaciones

Debido que todas las funciones de transferencia de las articulaciones tienen la misma forma (ver Sección 6), es razonable esperar que los otros 10 compensadores adicionales sigan el mismo procedimiento. Con el procedimiento ampliamente explicado para la articulación Base horario, es innecesario desglosar el desarrollo completo del resto de compensadores. Más bien se resumirá en forma de tablas con los resultados importantes, incluyendo los criterios de diseñador utilizados y los resultados intermedios significativos.

En caso de que alguna articulación presente alguna singularidad que la diferencie de Base horario, se explicará la diferencia y se aludirá a cómo afecta el planteamiento.

La

Tabla 7-5 muestra los criterios de diseño elegidos para todas las articulaciones.

Tabla 7-5 Criterios de diseño para los compensadores de Adelanto

Articulación	Mp(%)	ts (2%)	Error(%)
Base Horario	1.0	4.5s<t_S<6s	5
Base Antihorario	1.0	4.5s<t_S<6s	5
Hombro Arriba	1.0	4.5s<t_S<6s	5
Hombro Abajo	1.0	4.5s<t_S<6s	5
Brazo Arriba	1.0	4.5s<t_S<6s	5
Brazo Abajo	1.0	4.5s<t_S<6s	5
Pinza I Arriba	1.0	4.5s<t_S<6s	5
Pinza I Abajo	1.0	4.5s<t_S<6s	5
Pinza II Horario	1.0	4.5s<t_S<6s	5
Pinza II Antihorario	1.0	4.5s<t_S<6s	5
Pinza C Abre	1.0	4.5s<t_S<6s	5
Pinza C Cierra	1.0	4.5s<t_S<6s	5

Los cálculos del diseño al aplicar el procedimiento de la Sección 7.6.1 para todas las articulaciones, se obtiene los resultados mostrados en la Tabla 7-6.

Tabla 7-6 Compensadores de adelanto

Función	Φ(º)	θ(º)	z0	p0	Kc
P1(s)	-31	34	-1.170	-0.833	0.650
P2(s)	-51.3	53	-1.608	-0.606	0.560
P3(s)	-54.1	53	-1.661	-0.586	0.560
P4(s)	-53.4	53	-1.648	-0.591	0.530
P5(s)	-54.1	53	-1.661	-0.586	0.615
P6(s)	-51.73	53	-1.616	-0.603	0.720
P7(s)	-28	53	-1.267	-0.769	0.680
P8(s)	-48	53	-1.550	-0.628	0.650
P9(s)	-48	53	-1.550	-0.628	0.730
P10(s)	-82.85	53	-2.538	-0.384	0.635
P11(s)	213.62	53	4.022	0.242	0.455
P12(s)	-38.93	53	-1.409	-0.691	0.516

7.8 Resultados del diseño del controlador

Para comprobar el funcionamiento de los controladores diseñados, se presentarán a continuación imágenes del sistema operando. A partir de cada imagen se extrae por inspección visual las características de sobreimpulso, tiempo de estabilización y error de estado estacionario. Se compararon estos resultados contra los esperados, para determinar si se cumplió la meta de los diseños.

Para facilitar el análisis de cada imagen, se incluyó un trazado para determinar las características buscadas. Esto permite leer directamente en el gráfico el tiempo de estabilización (color azul). Así mismo, se marca como “d” el error absoluto de estado estacionario. La escala de tiempo de cada gráfico representa 20s.

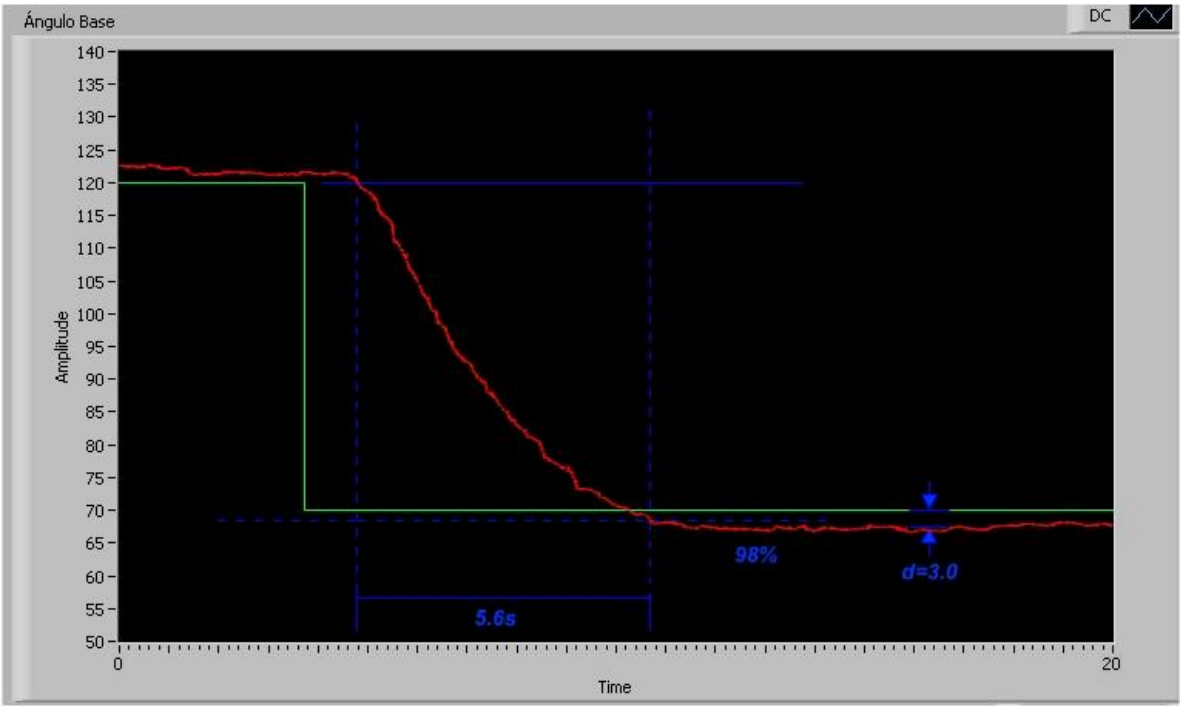


Figura 7-6 C1(s): Respuesta real.

Para evitar la redundancia, los gráficos de la respuesta de las demás articulaciones se colocaron en la Sección Apéndice 6. El lector puede utilizarlos para cotejar los datos de la Tabla 7-7.

En la Tabla 7-7 se resume la información de los parámetros de controlador de cada articulación. La información se obtuvo de las gráficas del comportamiento real de cada compensador, y se compara con los parámetros planteados en el diseño (

Tabla 7-5).

Tabla 7-7 Comprobación de los parámetros del diseño del controlador

Controlador	Parám	Valor(*) Ideal	Valor real	¿Cumple?
C1(s)	ts	4.5s<t_S<6s	5.6s	SI
	Mp	≤5%	0%	SI
	e_{ss}	≤10%	6%	SI
C2(s)	ts	4.5s<t_S<6s	5.3s	SI
	Mp	≤5%	0%	SI
	e_{ss}	≤10%	7%	SI
C3(s)	ts	4.5s<t_S<6s	5.5s	SI
	Mp	≤5%	0%	SI
	e_{ss}	≤10%	5.4%	SI
C4(s)	ts	4.5s<t_S<6s	5.3s	SI
	Mp	≤5%	0	SI
	e_{ss}	≤10%	3%	SI
C5(s)	ts	4.5s<t_S<6s	5s	SI
	Mp	≤5%	0%	SI
	e_{ss}	≤10%	4%	SI
C6(s)	ts	4.5s<t_S<6s	5.2s	SI
	Mp	≤5%	0%	SI
	e_{ss}	≤10%	7%	SI
C7(s)	ts	4.5s<t_S<6s	5.8s	SI
	Mp	≤5%	0%	SI
	e_{ss}	≤10%	8%	SI
C8(s)	ts	4.5s<t_S<6s	4.8s	SI
	Mp	≤5%	0%	SI
	e_{ss}	≤10%	5%	SI
C9(s)	ts	4.5s<t_S<6s	4.75s	SI
	Mp	≤5%	0%	SI
	e_{ss}	≤10%	0%	SI
C10(s)	ts	4.5s<t_S<6s	5.1s	SI
	Mp	≤5%	0%	SI
	e_{ss}	≤10%	0%	SI
C11(s)	ts	4.5s<t_S<6s	5.8s	SI
	Mp	≤5%	0%	SI
	e_{ss}	≤10%	10%	SI
C12(s)	ts	4.5s<t_S<6s	5.5s	SI
	Mp	≤5%	0%	SI
	e_{ss}	≤10%	10%	SI

En la Tabla 7-7 se observa que el error de estado estacionario se cumple al agregar solamente el compensador de Adelanto. Por lo tanto, no se consideró necesario desarrollar el compensador de Atraso.

Los resultados de esta sección se utilizarán para realizar un análisis en la Sección 8y evaluar el éxito de esta fase de la solución.

8 Análisis de resultados

8.1 Resultados de la investigación del sistema

En la Sección 5 (Rehabilitación del Robot) se tienen los resultados de la investigación a fondo del sistema que se debió llevar a cabo para iniciar el trabajo sobre el principal objetivo del proyecto: desarrollar un controlador.

Debido a la antigüedad del robot HRA934 y su falta de documentación técnica, los resultados de la ingeniería inversa llevada a cabo permitieron averiguar información de la que se carecía anteriormente, por lo que estos datos se consideran un aporte importante para futuros proyectos con este robot.

8.2 Resultados del hardware

En esta sección, es importante el determinar si el hardware diseñado e implementado contribuyó con la solución del problema.

Tarjeta de Acople. Como se observó en la Tabla 11-7, todas las respuestas del sistema fueron las esperadas, por lo que se tiene que el circuito realiza todas las funciones para las que fue diseñado.

Tarjeta de Sensores. En la Tabla 11-8 hasta la Tabla 11-13 se tiene el porcentaje de error de las pruebas en cada sensor. Dado el valor obtenido, menor a 5% en todos los casos, se considera que el diseño fue exitoso.

Tarjeta de Amplificación. En la Tabla 11-14 se muestra que el amplificador diseñado logra amplificar la corriente (G=11.3), permitiendo entregar a la carga la corriente de salida necesaria, sin que el oscilador se vea forzado a entregar más de su corriente nominal. Esto demuestra que el diseño del circuito cumple con las especificaciones deseadas.

Observando estos resultados, se concluye que no es necesario rediseñar o realizar cambio alguno en el hardware. Esta etapa de la implementación de la solución se consideró cumplida, por lo que se procedió al paso siguiente de la solución.

8.3 Análisis de resultados del software de Interfaz y de control

Observando los resultados de la Tabla 7-7, se halla que las características de diseño se cumplen en cada caso. Por tanto, se puede dar por concluida exitosamente esta sección.

Como se había explicado en la Sección 7, el funcionamiento del controlador también refleja el éxito del diseño del hardware del proyecto. Por lo tanto, al funcionar los controladores correctamente, se concluye que los circuitos diseñados también están cumpliendo su tarea.

8.4 Análisis de los resultados del proyecto

Como se definió en la Sección 4, la solución estaba dividida en varias etapas secuenciales (recordar Figura 4-1 **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). El hecho de que cada etapa funcionara correctamente, garantizó que la etapa construida en el paso siguiente también estuviera diseñada correctamente. Por lo tanto, al ser exitoso el funcionamiento de cada una de las etapas, se garantiza que todo el proyecto se considere exitoso.

En este punto, se considera que se ha cumplido con los objetivos planteados en la Sección 2. Esto lleva a considerar que el proyecto se ha finalizado correctamente.

9 Conclusiones y recomendaciones

9.1 Conclusiones del Hardware

- Un amplificador de corriente permite aislar la fuente de la carga, al tiempo que entrega la potencia requerida.
- El amplificador de corriente tipo AB presenta una caída de voltaje relacionada con los diodos base-emisor de los transistores.
- El acople óptico aísla las etapas de control de los circuitos de potencia
- Un circuito hidráulico convierte energía eléctrica en cinética
- El acumulador de aire permite que la bomba descanse intermitentemente
- Los transductores inductivos requieren acondicionar y amplificar la señal antes de procesar su salida
- El rectificador de precisión rectifica tensiones AC sin reflejar la caída de voltaje de los diodos.
- En enlace óptico permite aislar las etapas de control de los circuitos de potencia
- Los componentes electrónicos introducen un tiempo de reacción en el sistema
- El periodo de la onda PWM está limitada por el tiempo de retardo del sistema
- El sensor introduce tiempo de retardo en el refrescamiento de la salida

9.2 Conclusiones del Modelo

- Las pruebas empíricas de respuesta al escalón en el tiempo permiten hallar el modelo de la planta

- El modelado es imperfecto debido a la limitación de las mediciones
- La ubicación de los polos y ceros en el plano s decide el comportamiento dinámico de un sistema
- La planta en lazo abierto por si sola es un sistema impredecible
- Las no-linealidades añaden imprevisibilidad al diseño
- Tener un modelo es necesario antes de diseñar el controlador
- La cantidad de pruebas influye en la exactitud del modelo
- La toma de datos experimentales requiere apoyarse en el uso de documentación existente
- Las pruebas experimentales permiten descubrir el funcionamiento de un sistema a partir de la relación matemática entrada-salida.

9.3 Conclusiones del controlador

- No necesariamente es requerido un controlador de Atraso para alcanzar el error de estado estacionario planteado
- Agregar un controlador al sistema permite manipular las características dinámicas de la respuesta en el tiempo
- El ruido del sensor es causante de error en la posición del sistema
- Las funciones de transferencia asimétricas no pueden manejarse con un solo controlador.
- El compensador de Adelanto permite controlar las características dinámicas de la respuesta al escalón.
- Las no linealidades de la planta contribuyen a que no sea posible alcanzar exactamente los resultados planteados en el diseño del control.
- El tiempo muerto contribuye a no al alcanzar las características de diseño del controlador.

- El diseño por ubicación de polos y ceros permite ajustarlas características deseadas del sistema

- La simulación permite prever cual será el comportamiento del sistema una vez implementado

- La realimentación de lazo cerrado permite hacer controlable al sistema

- Los controladores no diseñados correctamente pueden dañar el sistema mecánico

9.4 Conclusiones del software

- La programación modular facilita la modificación del código

- La creación de librerías genéricas ahorra tiempo de programación

- Las rutinas de alto nivel de Labview no dependen del hardware específico utilizado

9.5 Conclusiones de la realización del proyecto

- La Escuela de Ing. Eléctrica ahora posee una nueva herramienta de aprendizaje para los estudiantes

- El país obtendrá beneficios a largo plazo gracias a los resultados de la investigación que el robot HRA934 permita hacer.

9.6 Recomendaciones del Hardware

- Diseñar y construir un circuito de alimentación bipolar, derivado de la fuente de alimentación del robot. Esto permitiría alimentar del robot y las Tarjetas de Amplificación y Sensores, sin depender de fuentes externas

- Diseñar y construir un oscilador senoidal, para generar la onda de 100 Hz y 10 Vpp. Esto evitaría depender de un oscilador externo

- Diseñar y construir una Tarjeta de Control Manual, para poder utilizar el robot sin depender de una computadora y el software de control.

- Instalar entradas adicionales en la Tarjeta de Acople, de modo que permita funciones adicionales: control de herramientas tales como taladros, una cámara, etc.

- Diseñar una instalación eléctrica de pared dedicada al robot y su controlador

- Diseñar y construir un circuito de protección térmica para la bomba

- Incorporar una tarjeta de desarrollo que permita controlar dos o más planos de rotación al mismo tiempo

- Implementar una lógica de prioridad, para evitar que se cortocircuite el sistema hidráulico

- Construir un sistema de seguridad electrónico que evite que el robot pueda moverse cuando hay una persona u obstáculo dentro del espacio de trabajo

- Incorporar un fusible para el motor y los transductores

- Medir la inductancia y resistencia de los transductores

- Utilizar una tarjeta de desarrollo con más salidas digitales, para permitir más funciones

9.7 Recomendaciones del Modelado

- Tomar mediciones de respuesta al escalón utilizando métodos estadísticos

- Medir la capacidad de carga mecánica de los actuadores

- Aplicar un procedimiento de linealización para hacer simétricas las funciones de transferencia complementarias

- Medir la velocidad angular máxima

9.8 Recomendaciones del controlador

- Implementar prevención de saturación del actuador

- Implementar el controlador en forma PID paralelo

9.9 Recomendaciones del software

- Diseñar un programa para utilizar herramientas con la pinza
- Diseñar una rutina para controlar la posición espacial de objetos con la pinza
- Implementar una protección automática contra las vibraciones
- Poner un selector que permita elegir si se utilizará el sistema con o sin el controlador
- Implementar una limitación para evitar que se introduzcan controladores peligrosos para el sistema
- Implementar un software de control "teach-point" para el robot
- Diseñar un programa para controlar el robot a través de una red LAN o TCP/IP

9.10 Recomendaciones de seguridad

- Diseñar e implementar un indicador sonoro para prevenir accidentes
- Diseñar y construir un circuito de parada de emergencia para la etapa de potencia.
- Ubicar el robot en un espacio del laboratorio dedicado
- Cercar el espacio de trabajo del robot

9.11 Recomendaciones de implementación

- Hacer un sitio web dedicado a divulgar el Proyecto
- Diseñar un experimento académico orientado al uso del robot

10 Referencias

10.1 Bibliografía

[1] Bishop,Robert. “Mechatronics Handbook: Mechatronic systems, sensors, and actuators. Fundamentals and modeling”. CRC Press. Estados Unidos de América. 2008.

[2] Coughlin,Robert F., “Amplificadores operacionales y circuitos integrados lineales”. Editorial Prentice Hall. Quinta Edición. México, 1999.

[3] Craig, John, “Robótica”. Editorial Prentice Hall. Tercera Edición. México, 2006.

[4] Genesis/Feedback. Disponible en línea en http://www.anf.nildram.co.uk/beebcontrol/arms/genesis+feedback/index.html Consultado el 14 de Octubre de 2009.

[5] Kuo, Benjamin. “Sistemas Automáticos de Control”. Segunda Edición. Compañía Editorial Continental. México. 1991.

[6] Ogata, Katsuhiko. “Ingeniería de Control Moderna”. Tercera Edición. Editorial Pearson Education. México. 1998.

[7] Referencia en línea de Matlab. Disponible en línea en http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/helpdesk.html.Consultado en línea el 10 de Febrero de 2010.

[8] Wikipedia.Actuador. Disponible en línea en http://en.wikipedia.org/wiki/Actuador. Consultado el 11 de Febrero de 2010.

[9] Wikipedia. Ingeniería inversa. Disponible en línea en http://es.wikipedia.org/wiki/Ingenier%C3%ADa_inversa. Consultado el 24 de Octubre de 2010.

[10] Wikipedia. Robot. Disponible en línea en http://en.wikipedia.org/wiki/Robot. Consultado el 14 de Octubre de 2009.

[11] Zeledón, Peter, ¨Reparación del brazo hidráulico HRA934 y desarrollo de hardware y software para su control y su utilización en conjunto con una banda transportadora¨, Universidad de Costa Rica, San José, 2000.

10.2 Documentos de datos técnicos

[12] 1N4001thru 1N4007. Plasticsiliconrectifier. Disponible en línea en http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/panjit/1N4007.pdf. Consultado el 22 de Junio de 2010.

[13] 2N2222 NPN General purpose amplifier. Fairchild Semiconductor. 2009. Disponible en línea en http://www.fairchildsemi.com. Consultado el 25 de Julio de 2010.

[14] 2N3055 and MJ2955 Complementary silicon power transistor. ST Microelectronics. 1999. Disponible en línea en http://www.datasheetcatalog.com. Consultado el 25 de Julio de 2010.

[15] CFG253 Function Generator Datasheet. Tektronix. Disponible en línea en http://www2.tek.com/cmswpt/psdetails.lotr?ct=PS&ci=13302&cs=psu&lc=ENConsultado el 11 de Octubre de 2010.

[16] Device Specification for photocoupler PC817. SHARP. 1996. Disponible en línea en http://www.datasheetcatalog.com. Consultado el 25 de Julio de 2010.

[17] Hydraulic robot arm. Type HRA934 student´s manual. Feedbackinstruments. Disponible en línea en http://www.library.dmacc.cc.ia.us/instructors/baburkhardt/armdraulic/Armdraulic_StudentManual/Student%20Manual%20Intro.pdf. Consultado el 23 de Enero de 2010.

[18] KBU8A thru KBU8M Bridge rectifier. Fairchild semiconductor. Disponible en línea en:http://www.farnell.com/datasheets/12116.pdf. Consultado el 20 de Junio de 2010.

[19] LM324Low power quad operational amplifier. National Semiconductor. 2000. Disponible en línea en http://www.national.com. Consultado el 22 de Junio de 2010.

[20] USB-6008 User guide and specification. National Instruments. 2010. Disponible en línea en http://www.ni.com/suport. Consultado el 15 de Febrero de 2010.

11 Apéndices

Apéndice 1. Glosario

Controlador. De acuerdo a Ogata [6], el compensador es un elemento insertado en el sistema, de modo que sus especificaciones cumplan con los requisitos establecidos en el diseño.

Error de estado estacionario (Ess**).**Es la diferencia entre la salida real de un sistema y el valor deseado, cuando han pasado la respuesta transitoria.

Estabilidad. Es la característica de un sistema, que se refiere a si será capaz de mantener su salida dentro de un rango permitido. De lo contrario crecerá sin límite [6]. El control automático permite estabilizar a un sistema originalmente inestable.

Función de transferencia. En términos poco estrictos, es la ecuación que describe como se comportará un sistema ante cualquier de entrada.

Ingeniería Inversa. De acuerdo con Wikipedia, “el objetivo de la ingeniería inversa es obtener información a partir de un producto accesible al público, con el fin de determinar de qué está hecho, qué lo hace funcionar y cómo fue fabricado”[9].

LVDT (Transformador de voltaje lineal derivativo). Es un transductor del tipo inductivo. Transforma el desplazamiento Δx del émbolo del pistón hidráulico en una señal alterna de voltaje (CA) cuya magnitud es proporcional a Δx. En el robot HRA934, estos transductores están empotrados en los pistones.

Perturbación. Es una señal externa que afecta a la variable controlada, causando que el valor de salida de un sistema se desvíe respecto al valor buscado.

Parámetros de control. Se refiere a las características dinámicas del sistema de control, en particular: tiempo de estabilización, error de estado estacionario y sobreimpulso.

Polos dominantes. Son los polos de la función de transferencia que “exhiben un efecto dominante sobre el comportamiento sobre la respuesta transitoria”. Determinan las características dinámicas del sistema. Para diferenciar un polo dominante, se utiliza una estimación según la cual la magnitud de la parte real es 5 a 10 veces menor que la de los demás polos.

Sensibilidad. Característica de un sistema, que se refiere a la influencia de las variaciones de los parámetros. Por ejemplo, la fricción de los pistones del robot puede variar en el tiempo, al deteriorarse con el uso. Esto afectaría su comportamiento. El sistema de Control en Lazo Cerrado minimiza la influencia de este factor en el diseño.

Sobreimpulso (M_P). Es la máxima desviación de la salida respecto al valor final de esta, durante el estado transitorio.

Tiempo de estabilización (ts**).** Es el tiempo que requiere el sistema para que la desviación de los transitorios respecto a la salida buscada sea menor a 2%[6].

Tiempo muerto (Tm). Según Bishop[1], el tiempo muerto es la región de entrada típicamente cercana a cero, donde su aplicación no produce un cambio en la salida.

Transductor. De acuerdo con Bishop[1], es un dispositivo capaz de transformar una señal de un tipo (mecánico, temperatura) en otra (tensión, corriente, etc). En este proyecto, se refiere a los dispositivos que convierten el desplazamiento de un pistón en una señal de voltaje.

Apéndice 2. Abreviaturas

Abreviatura	Significado
e_{SS}	Error de estado estacionario
M_P	Sobreimpulso
t_S	Tiempo de estabilización
ξ	Coeficiente de amortiguamiento
V_{BE}	Tensión Base-Emisor
β	Ganancia de corriente
LVDT	Transformador de voltaje lineal derivativo
Tm	Tiempo muerto
C1(s)	Compensador de Base Horario
C2(s)	Compensador de Base Antihorario
C3(s)	Compensador de Hombro Arriba
C4(s)	Compensador de Hombro Abajo
C5(s)	Compensador de Brazo Arriba
C6(s)	Compensador de Brazo Abajo
C7(s)	Compensador de Pinza I Arriba
C8(s)	Compensador de Pinza I Abajo
C9(s)	Compensador de Pinza II Horario
C10(s)	Compensador de Pinza IIAntihorario
C11(s)	Compensador de Pinza C Abre
C12(s)	Compensador de Pinza C Cierra

Apéndice 3. Procedimientos de medición

11.1.1 Medición de transductores y señales de activación

El circuito utilizado para investigar el funcionamiento de los sensores y las señales de activación del robot es el de la Figura 11-1.

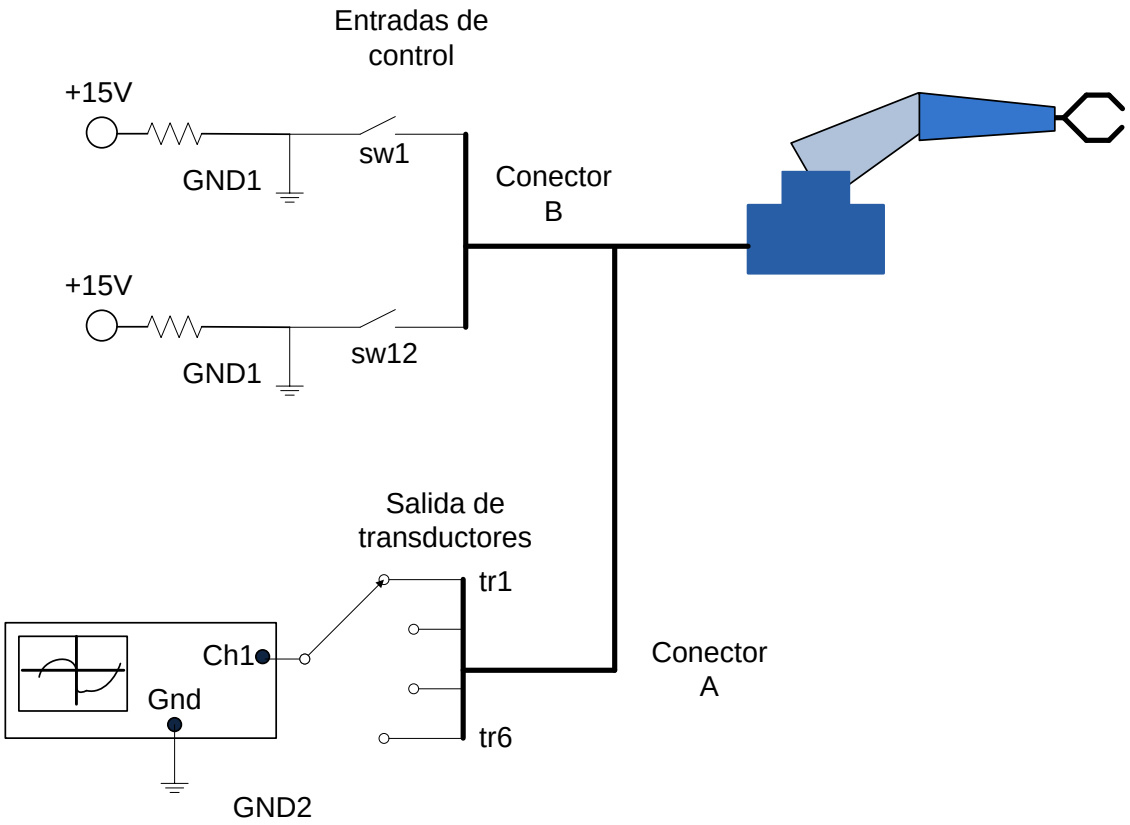


Figura 11-1 Circuito de prueba de las entradas de control y la salida de transductores

Los interruptores del sw1 al sw12 se utilizan para activar las distintas funciones del robot. El osciloscopio sirve para medir la respuesta física del sistema ante los estímulos introducidos a través de los interruptores. Por cada uno de los seis planos de rotación del robot hay un transductor.

El funcionamiento es el siguiente: al activar uno de los interruptores, una de las articulaciones se mueve. Entonces se debe buscar con el osciloscopio cuál de los transductores está variando su voltaje AC de salida. Esto permite relacionar una articulación con un transductor.

Como se puede observar en la Figura 11-1, la tierra de transductores GND2 es diferente a la de interruptores GND1. Esta separación se debe mantener al diseñar el controlador [11].

11.1.2 Calibración de los sensores

El circuito utilizado para calibrar los sensores se muestra en la

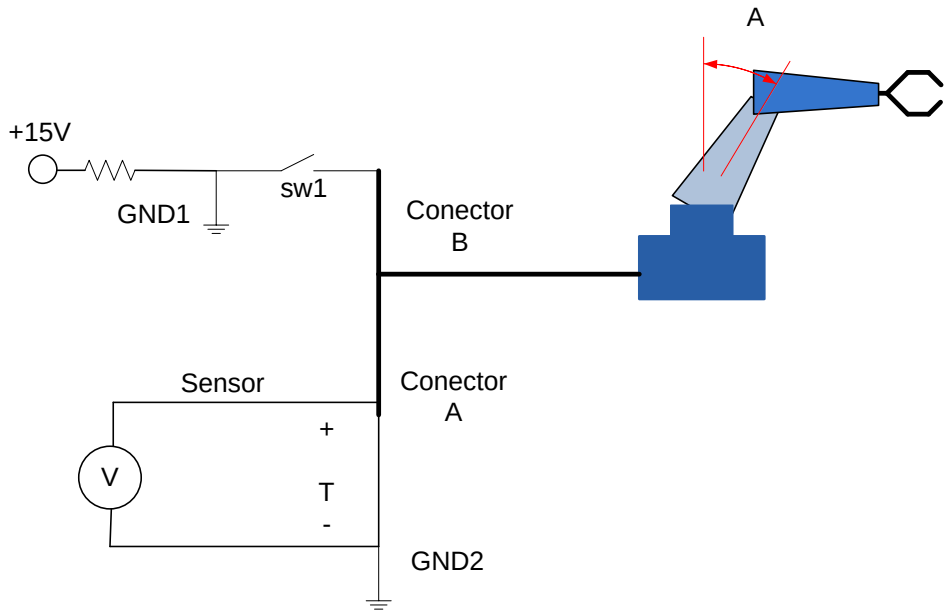


Figura 11-2 Circuito simplificado de medición de sensores

La operación de este circuito es la siguiente: el interruptor sw1 al cerrarse hace moverse la articulación respectiva. Esto causa una variación de la tensión de salida T del sensor, la cual se mide con el voltímetro CD que se muestra en la parte inferior. Ha de recordarse que el voltaje de salida de los sensores es una tensión CD, resultado de rectificar la salida CA de los transductores. Utilizando un transportador, se mide el ángulo respectivo y se tabula una tabla de ángulo contra tensión.

11.1.3 Medición del tiempo muerto

El procedimiento se explica a continuación. Utilizando el mismo circuito de la Figura 11-2, se introduce una consigna en el sistema. Esto causará una reacción en la salida, según se muestra en la.

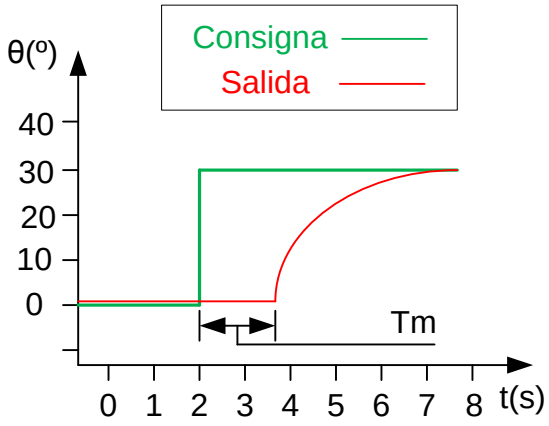


Figura 11-3 Medición del tiempo muerto

Como se observa en dicha figura, hay una diferencia temporal entre el instante en el que se aplica la entrada al sistema y reacciona el sistema. Dicha diferencia corresponde al tiempo muerto Tm. Para cada articulación se repitió el procedimiento.

Apéndice 4. Hoja de datos del robot HRA934

11.1 Introducción

Este documento presenta la información técnica relevante que se requiere conocer del robot HRA934 antes de diseñar un control electrónico. Se asume que el lector ha revisado previamente el documento Reparación del brazo hidráulico HRA934 y desarrollo de hardware y software para su control y su utilización en conjunto con una banda transportadora [11] para entender mejor el contexto de la información aquí presentada.

Este documento se concibió como un complemento de [11], por lo que aquellos temas que se consideraron importantes y faltantes en aquel documento, se desarrollaron aquí. Por lo tanto, aquí tampoco se desarrollan ciertos temas que el lector debe buscar en **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**.

Así mismo, se recomienda fuertemente leer el documento “Manual de usuario” para comprender las normas de seguridad al utilizar este equipo.

El robot HRA934 es un robot de 6 planos de rotación, del tipo esférico. Sus actuadores son pistones hidráulicos activados por un circuito hidráulico. En la Figura 11-4 se muestra el diagrama de bloques del robot.

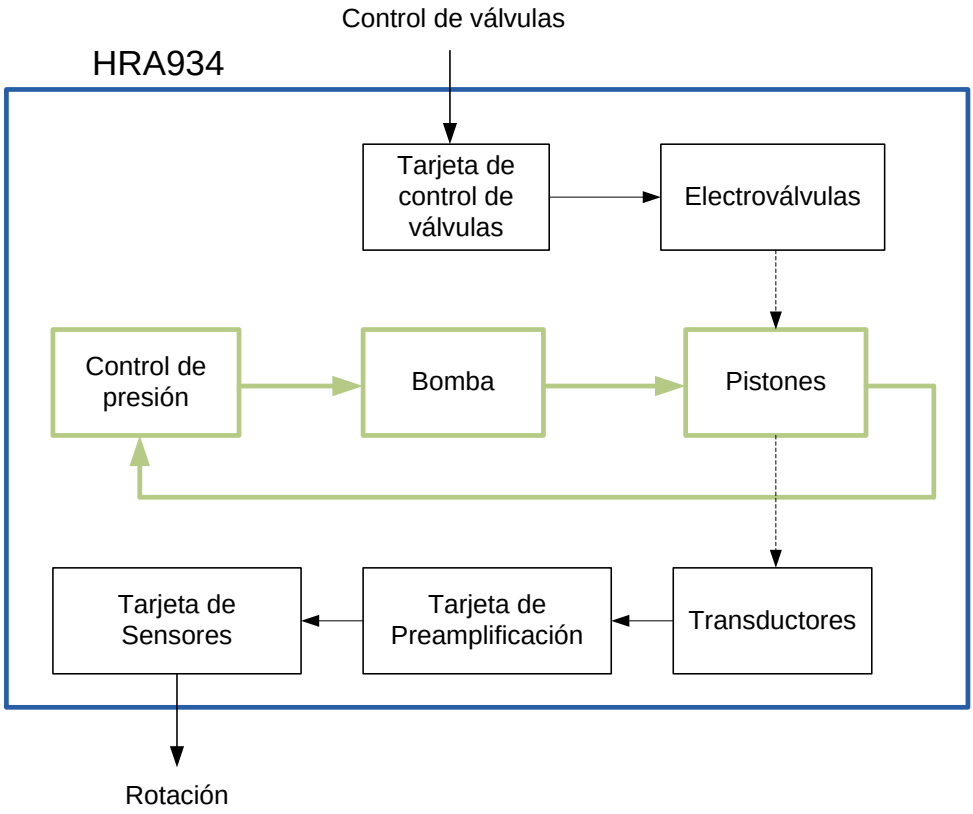


Figura 11-4Diagrama de bloques del robot HRA934. En verde se destaca el circuito hidráulico.

En el diagrama se observa que el robot se compone principalmente de tres subsistemas: control de electroválvulas, circuito hidráulico y transductores. La relación entre los tres se destaca utilizando una línea punteada.

La función de cada bloque se explica a continuación.

11.1.1 Control de electroválvulas

- **Tarjeta de control de válvulas.** Sirve para controlar las electroválvulas. Al aplicar una tension de 15V entre cada entrada de la tarjeta y tierra, se abre la electroválvulas respectiva [11]. Es el único componente del robot diseñado para ser controlador por el usuario.

- **Electroválvulas**. Son válvulas que se abren cuando circula una corriente por un electroimán incorporado. Hay 3 de ellas por cada articulación: una para retroceder el pistón, otra para avanzar y otra para controlar la velocidad [11].

- **Tarjeta de sensores.** Es el circuito que se encarga de transformar la salida alterna de los transductores en un voltaje CD.

11.1.2 Circuito hidráulico

- **Control de presión**. Es un subsistema que se encarga de controlar la presión del circuito hidráulico. En base a la variación de presión, apaga o enciende la bomba para disminuir o aumentar el flujo de aceite hacia dentro o desde los pistones [11].

- **Bomba**. Es el elemento del circuito hidráulico que se encarga de impulsar el aceite en la dirección requerida. Es controlada por el control de presión a través de un circuito de seguridad, el cual le proporciona la potencia necesaria de100W [11].

- **Pistones.** Son los actuadores del sistema. Al desplazarse generan la rotación del sistema [11].

Algunas partes del sistema se ilustran en Figura 11-5.

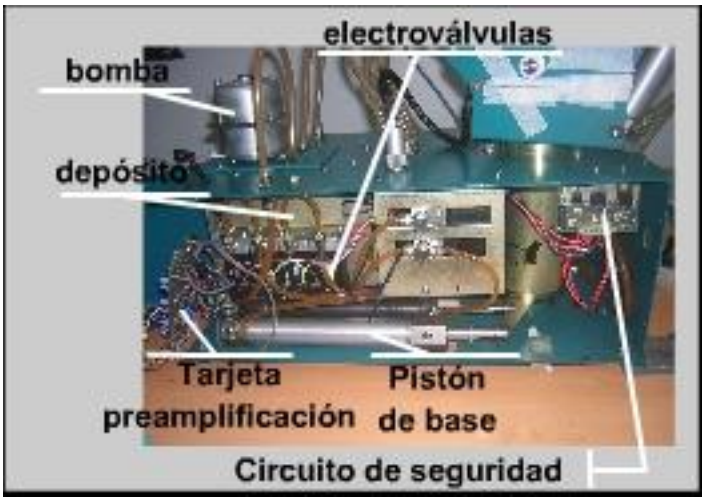


Figura 11-5 Vista del circuito hidráulico

11.1.3 Transductores

- **Transductores.** Son los dispositivos que generan una señal de voltaje que representa la rotación de cada articulación. En este robot son del tipo LVDT (Transformador de Voltaje Lineal Derivativo)**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**. Se encuentran empotrados dentro de los

actuadores, y su salida es del tipo AC. Un ejemplo se tiene en la Figura 11-6.

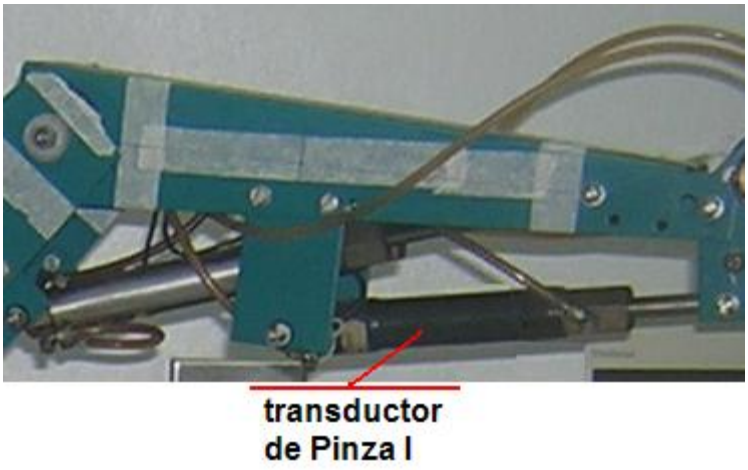


Figura 11-6 Vista de un transductor

- **Tarjeta de Preamplificación.** Es un circuito que se encarga de amplificar la corriente de salida de los transductores, para permitir que posteriormente se utilicen estas salidas como medición de la rotación de las articulaciones [11]. Su apariencia se muestra en la Figura 11-7.

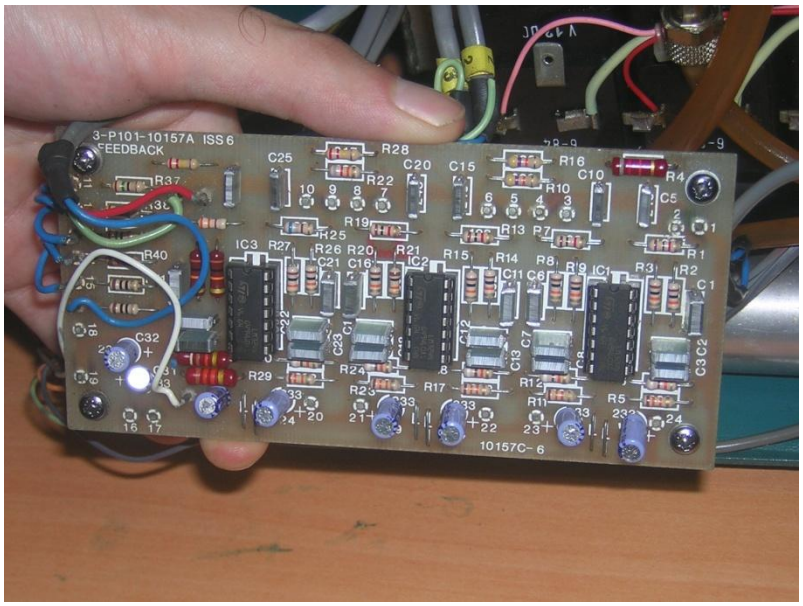


Figura 11-7 Tarjeta de preamplificación

11.2 Cinemática

Los seis planos de rotación del robot se muestran en la Figura 11-8. Debido a que la Pinza contiene tres de esos planos, se muestra más detalladamente en la Figura 11-9.

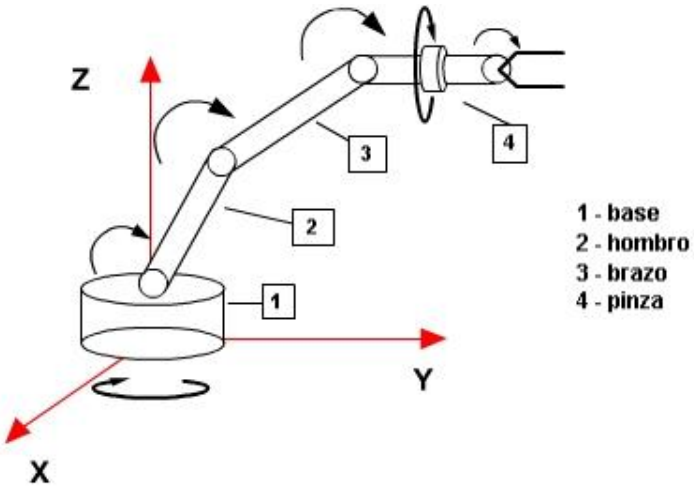


Figura 11-8Planos de rotación

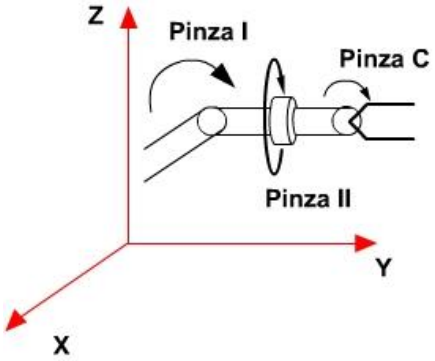


Figura 11-9 Detalle de los planos de la Pinza

El espacio de trabajo se tiene en la Tabla 11-1.

Tabla 11-1 Espacio de trabajo

Articulación	Rango
Base	$65^{o} \leq \theta_{Base} \leq 135^{o}$
Hombro	$-68^{o} \leq \theta_{Hombro} \leq 1^{o}$
Brazo	$-70^{o} \leq \theta_{Brazo} \leq -6^{o}$
Pinza I	$-56^{o} \leq \theta_{pI} \leq 50^{o}$
Pinza II	$3^{o} \leq \theta_{pII} \leq 235^{o}$

PinzaC	$4.5cm \leq H \leq 6.75cm$

Estos datos representan los límites mecánicos de cada articulación, por lo que el software del control debe evitar alcanzar y exceder este rango. Gráficamente, el espacio de trabajo se representa en la Figura 11-10.

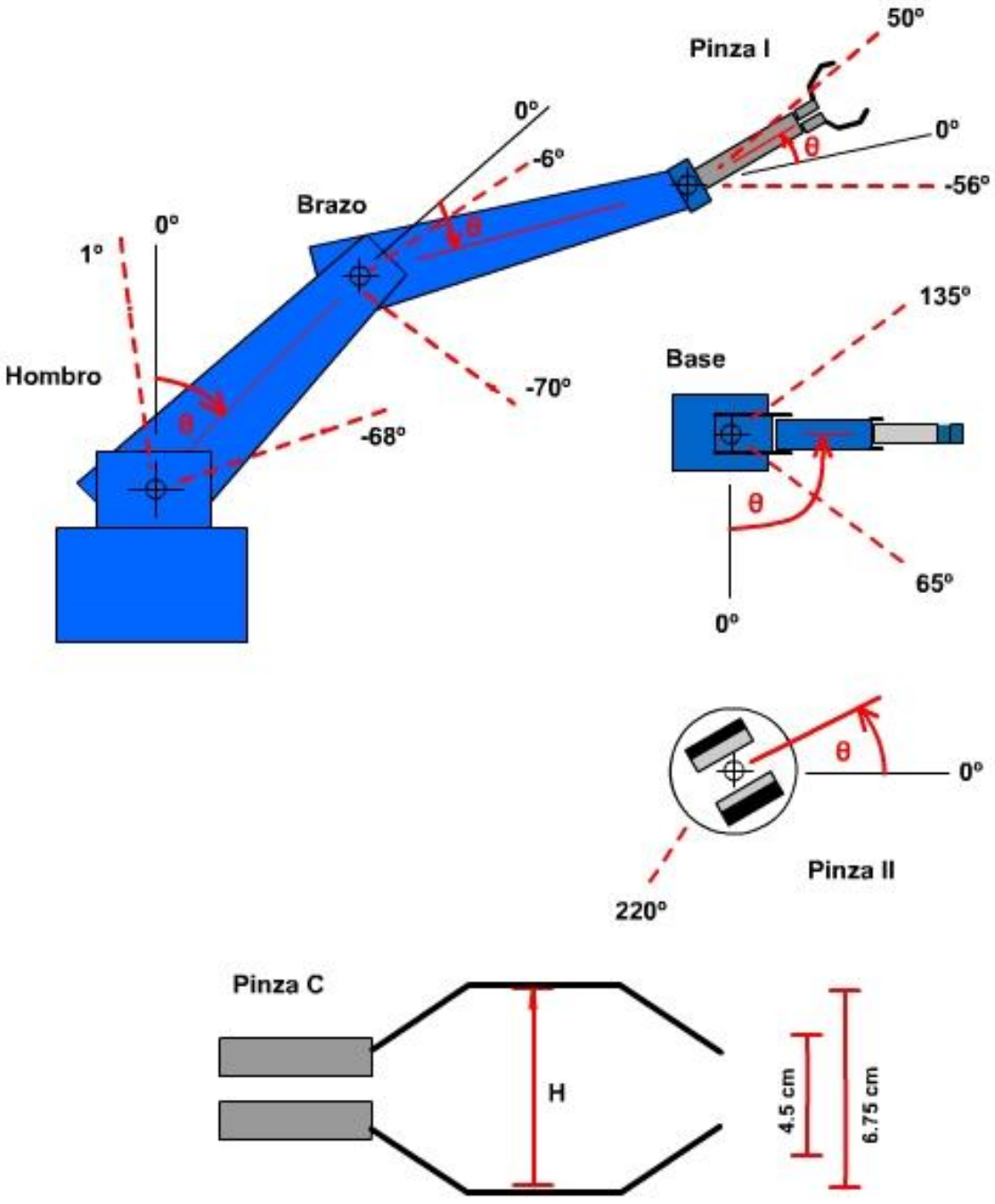


Figura 11-10 Espacio de trabajo

Como se muestra en la Figura 11-10, el ángulo de cada articulación se mide respecto a la proyección de la articulación anterior (línea negra), la cual representa 0º. Las líneas punteadas son los límites mecánicos de la rotación.

11.3 Características mecánicas

El tiempo muerto se define como el tiempo que tarda una articulación en reaccionar en reaccionar, medido desde el instante en que aplica la señal de entrada. La Tabla 11-2 muestra las mediciones para cada articulación.

Tabla 11-2 Tiempo muerto Tm

Articulación	Tm mínimo (s)	Tm máximo (s)
Base	0.2	0.6
Hombro	0.2	0.8
Brazo	0.2	0.8
Pinza I	0.2	0.6
Pinza II	0.2	0.8
Pinza cierre	0.2	0.5

Los factores que influyen en esta característica son:

- Tiempo de reacción del control de presión
- Longitud de las mangueras
- Tiempo de reacción del sistema electrónico
- Tiempo de conmutación de las válvulas

11.4 Control de válvulas

La Tarjeta de control de electroválvulas permite controlar cada electroválvula con una tensión de entrada de 0 y 15 V. Con 0 V aplicado en la entrada, se abre la respectiva electroválvula, mientras que con 15 V la electroválvula se mantiene cerrada. El objetivo de este circuito es aislar la alimentación de potencia de las electroválvulas del control digital. Debido a que las electroválvulas son una carga eléctrica del tipo inductiva, al desactivarse dan descargas que pueden dañar los dispositivos digitales que las controlan, si no se previeran el sistema de protección requerida. El circuito se muestra en Figura 11-11.

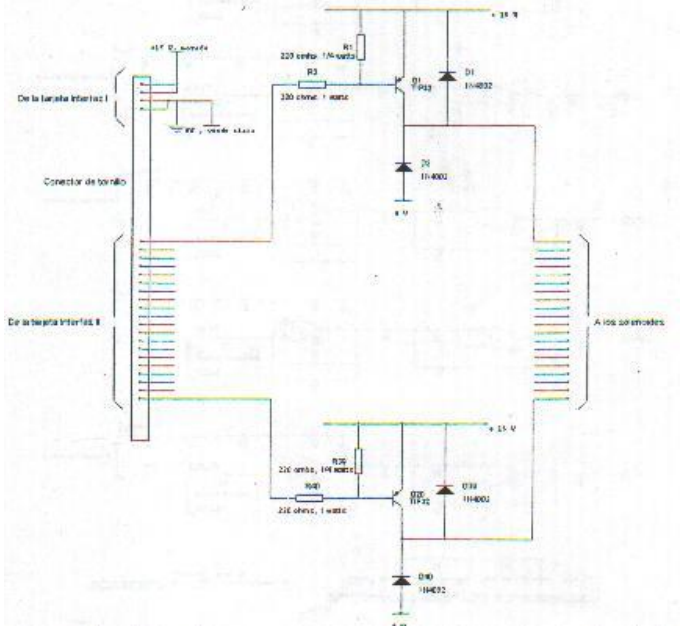


Figura 11-11 Tarjeta manejadora de válvulas. Fuente: [1]

La tabla de verdad de esta tarjeta se muestra en Tabla 11-3.

Tabla 11-3 Tabla de verdad de la Tarjeta manejadora de electroválvulas

Entrada (Voltaje)	Comportamiento de la válvula
0V	Abre
15V	Cierra

Para más detalles del análisis de este circuito, se recomienda consultar [11].

11.5 Sensores

En esta sección se detalla el funcionamiento de la Tarjeta de Sensores. Para cada articulación, existe una ecuación que representa el ángulo actual, en función del voltaje de salida V del respectivo sensor. La Tabla 11-4 contiene las ecuaciones de todas las articulaciones.

Tabla 11-4 Sensores

Articulación	Ecuación
Base	$Angulo(°) = -177.38V + 204.95$
Hombro	$Angulo(°) = 83.541V^2 - 200.74V + 50.269$
Brazo	$Angulo(°) = -485.58V^3 + 815.27V^2 - 541.73V + 79.749$
Pinza I	$Angulo(°) = -151.95V + 98.5$
Pinza II	$Angulo(°) = 1361.5V^3 - 2144.9V^2 + 1394.8V - 162.49$
Pinza C	$H(cm) = -2.2801V^2 + 8.8957V - 0.8375$

11.6 Funciones de transferencia

Cada articulación tiene dos direcciones de operación, y por tanto, dos funciones de transferencia. La Tabla 11-5 contiene las funciones de transferencia requeridas para el diseño de un controlador. Se considerará que la función de la Planta contiene al Actuador.

Tabla 11-5Funciones de transferencia

Articulación	Dirección	Función de transferencia
Base	**Horario**	$P1(s) = \frac{1.592}{s - 0.0907}$
	Antihorario	$P2(s) = \frac{0.914}{s - 0.046}$
Hombro	**Arriba**	$P3(s) = \frac{0.5072}{s + 0.030}$
	Abajo	$P4(s) = \frac{1}{3.378s + 0.04}$
Brazo	**Arriba**	$P5(s) = \frac{1}{1.366s + 0.04}$
	Abajo	$P6(s) = \frac{0.537}{s - 0.035}$

Pinza I	**Arriba**	$P7(s) = \frac{2.821}{s - 1.115}$
	Abajo	$P8(s) = \frac{3.125}{s - 0.139}$
Pinza II	**Horario**	$P9(s) = \frac{1}{1.223s - 0.177}$
	Antihorario	$P10(s) = \frac{1}{1.35s - 0.157}$
Pinza C	**Abre**	$P11(s) = \frac{2.717}{s - 0.4545}$
	Cierra	$P12 = \frac{3.251}{s - 0.4814}$

11.7 Alimentación

Desde el punto de vista de la alimentación eléctrica, el robot consta de cuatro bloques principales:

- La bomba. Requiere una alimentación DC de 12V y 9A [11].
- Sensores. Requieren una fuente DC bipolar de $+12V$ y $-9V$, con una corriente máxima de 1A.
- Transductores. Se deben alimentar con una señal seno de 10Vpp y 100Hz. Consumen 4A.
- Tarjeta Manejadora de válvulas. Se alimenta con una fuente DC de 15V, 1.5A.

La alimentación de las distintas partes del robot se presenta en la Figura 11-12.

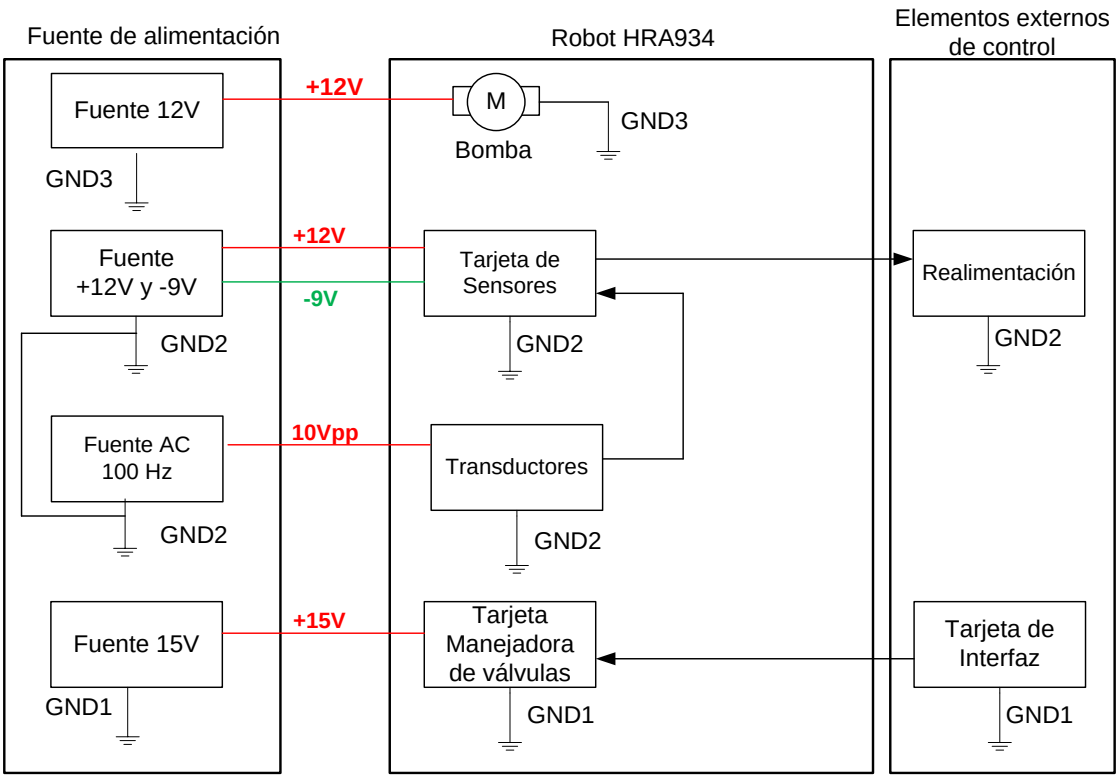


Figura 11-12 Alimentación del robot

En la figura se puede ver la separación de las distintas tierras. Al diseñar un sistema de control externo que se conecta al robot, es necesario considerar y respetar esta característica. Información más detallada de la fuente se halla en [11].

El robot recibe su alimentación y retorna la salida de los sensores a través del conector B, ubicado en el chasis del robot. Su ubicación se ilustra en la Figura 5-1.

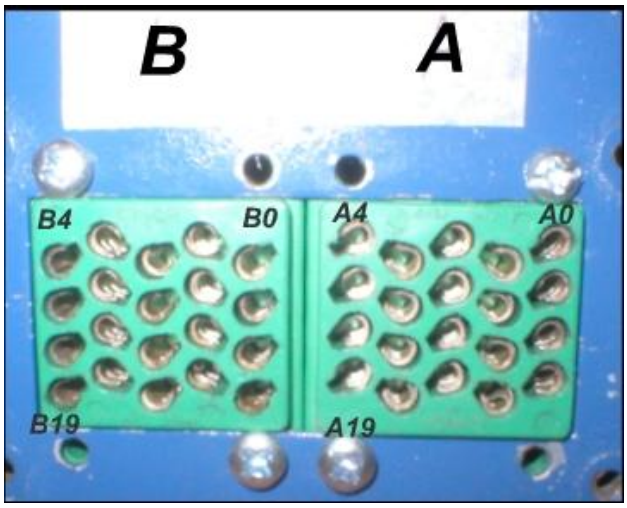


Figura 11-13 Conectores A y B

La ubicación de cada función en las patillas del conector se enumera en la Tabla 11-6.

Tabla 11-6 Patillas del Conector B

Función	Patilla
+15V Tarjeta Manejadora de Válvulas	B18
GND1 Tarjeta Manejadora de Válvulas	B13
+12V Tarjeta de Sensores	B11
-9V Tarjeta de Sensores	B16
Salida de Sensor Base	B2
Salida de Sensor Hombro	B7
Salida de Sensor Brazo	B6
Salida de Sensor Pinza I	B17
Salida de Sensor Pinza II	B1
Salida de Sensor Pinza C	B12
GND2 Tarjeta de Sensores	B0
+12V para la bomba	B8
GND3 para la bomba	B3,B4
+10Vpp de la señal seno de 100Hz	B5
GND2 señal seno	B0
NC	B9, B10, B14, B15,B19

Apéndice 5. Verificación de los circuitos

11.8 Verificación de Tarjeta de Acople.

El comportamiento esperado para cada salida se ve en la Tabla de Verdad (Tabla 5-4). Para comprobar se estimuló cada entrada con los dos valores apropiados, estando la Tarjeta conecta al circuito real del robot, según el circuito de la Figura 11-14. Se observó y anotó la reacción real en la Tabla 11-7.

Tabla 11-7 Verificación de Tarjeta de Acople

Entrada/Salida	Tensión de entrada (V)	Movimiento de la articulación
Base Horario	0	Estática
	5	Horario
Base Antihorario	0	Estática
	5	Antihorario
Hombro Arriba	0	Estática
	5	Arriba
Hombro Abajo	0	Estática
	5	Abajo
Brazo Arriba	0	Estática
	5	Arriba
Brazo Abajo	0	Estática
	5	Abajo
Pinza I Arriba	0	Estática
	5	Arriba
Pinza I Abajo	0	Estática
	5	Abajo
Pinza II Horario	0	Estática
	5	Horario
Pinza II Antihorario	0	Estática
	5	Antihorario
Pinza C Abre	0	Estática
	5	Abre
Pinza C Cierra	0	Estática
	5	Cierra

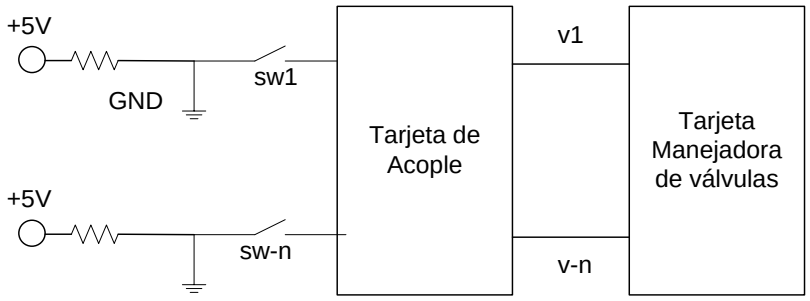


Figura 11-14 Circuito de comprobación de la Tarjeta de Acople

11.8.1 Comprobación de la Tarjeta de Sensores

Para comprobar, se introducirán diferentes valores de entrada, y se medirá la salida para verificar que se cumple la relación dada por (5.10). Dado que son seis sensores, debe realizarse las pruebas para cada uno por separado. El circuito utilizado está en la Figura 11-15.

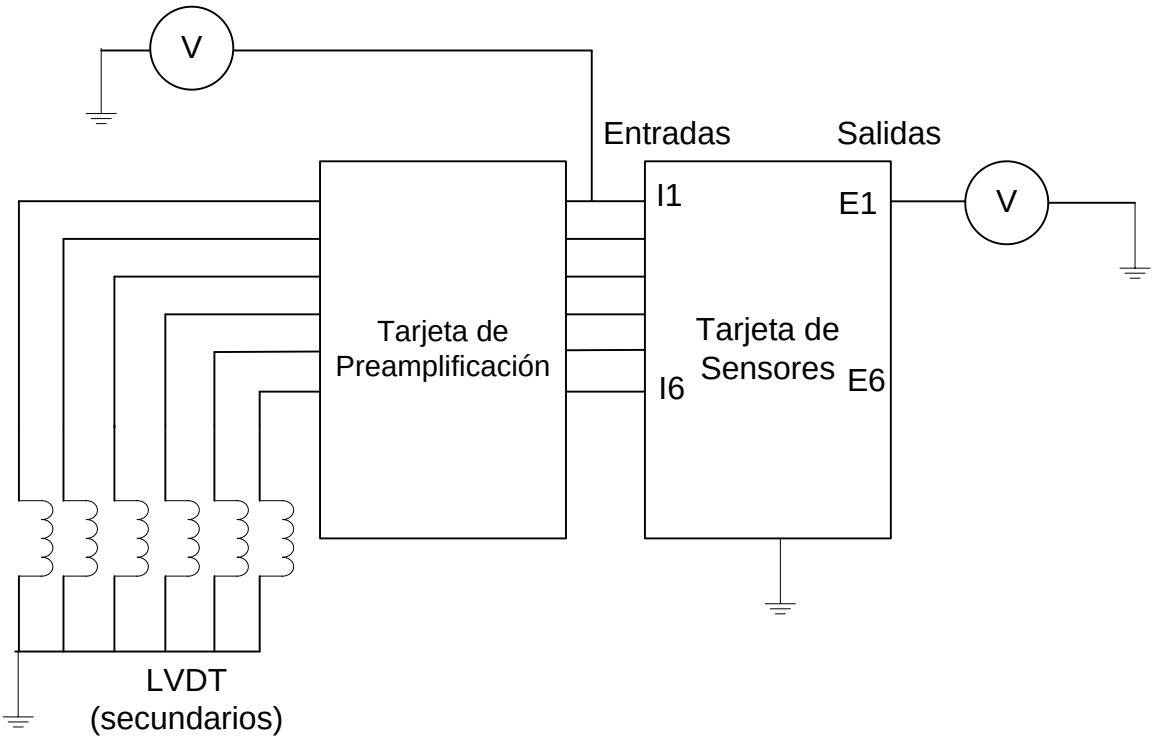


Figura 11-15 Circuito de comprobación de la Tarjeta de Sensores

En este circuito de comprobación, se ilustra el procedimiento de comprobación para la entrada y salida del sensor 1. La entrada es la salida del transductor 1 preamplificada. Con el voltímetro acoplado a I1, se lee la entrada. El voltímetro conectado a la salida O6 permite leer la salida real. La salida teórica se calcula con la ecuación teórica del rectificador (5.10).

Las pruebas para todos los sensores se presentan en la Tabla 11-8 hasta la Tabla 11-13.

Tabla 11-8 Comprobación de la Tarjeta de Sensores (Base)

Entrada (Vp)	Salida Teórica (mV)	Salida real (mV)	%Error
1.0	636.6	641.0	0.7
1.5	954.9	960.1	0.5
1.6	1018.6	1025.0	0.6
1.7	1082.3	1100.2	1.7
2.0	1273.2	1280.1	0.5

Tabla 11-9 Comprobación de la Tarjeta de Sensores (Hombro)

Entrada (Vp)	Salida Teórica (mV)	Salida real (mV)	%Error
1.0	636.6	645.0	1.3
1.5	954.9	950.0	0.5
1.6	1018.6	1000.0	1.8
1.7	1082.3	1070.2	1.1
2.0	1273.2	1250.5	1.8

Tabla 11-10 Comprobación de la Tarjeta de Sensores (Brazo)

Entrada (Vp)	Salida Teórica (mV)	Salida real (mV)	%Error
1.0	636.6	625.0	1.8
1.5	954.9	955.0	0.1
1.6	1018.6	1025.0	0.7
1.7	1082.3	1100.1	1.7
2.0	1273.2	1265.0	0.7

Tabla 11-11 Comprobación de la Tarjeta de Sensores (Pinza I)

Entrada (Vp)	Salida Teórica (mV)	Salida real (mV)	%Error
1.0	636.6	630.5	1.0
1.5	954.9	970.2	1.6
1.6	1018.6	1000.0	1.8
1.7	1082.3	1090.5	0.8
2.0	1273.2	1280.0	0.5

Tabla 11-12 Comprobación de la Tarjeta de Sensores (Pinza II)

Entrada (Vp)	Salida Teórica (mV)	Salida real (mV)	%Error
1.0	636.6	650.2	2.1
1.5	954.9	975.0	2.1

1.6	1018.6	1005.1	1.3
1.7	1082.3	1070.2	1.1
2.0	1273.2	1250.2	1.8

Tabla 11-13 Comprobación de la Tarjeta de Sensores (Pinza C)

Entrada (Vp)	Salida Teórica (mV)	Salida real (mV)	%Error
1.0	636.6	650.2	2.1
1.5	954.9	965.0	1.0
1.6	1018.6	1000.0	1.8
1.7	1082.3	1070.2	1.1
2.0	1273.2	1280.2	0.5

11.8.2 Comprobación Tarjeta de Amplificación

Para comprobar que el funcionamiento del circuito montado sea acorde al diseño, se conectó un generador de ondas, en función senoidal, frecuencia 100 Hz y se puso inicialmente la amplitud en cero. Se conectó la salida del circuito a los transductores del robot, que son la carga con que opera el circuito. El circuito de prueba se muestra en Figura 11-16. Es el mismo circuito con que operará permanentemente la Tarjeta.

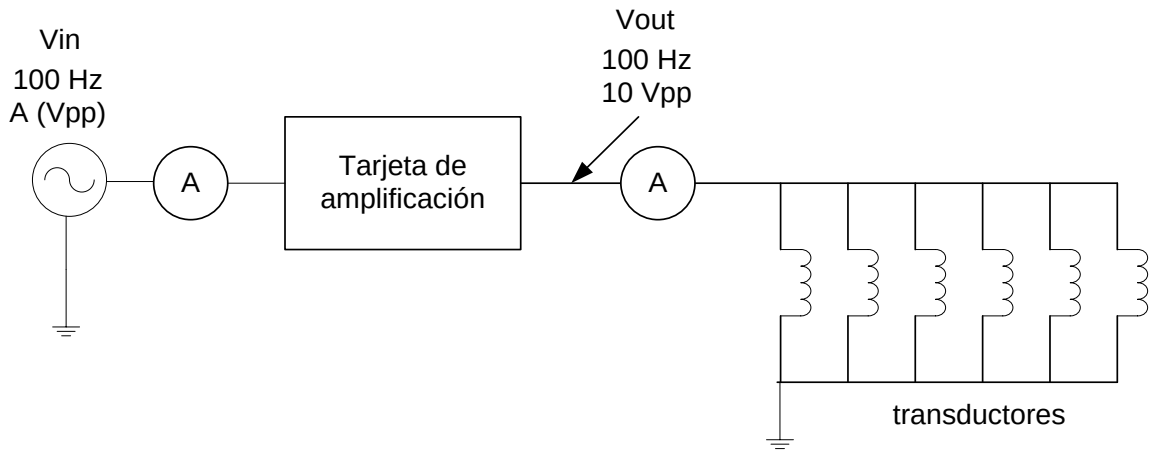


Figura 11-16 Comprobación de la Tarjeta de Amplificación

Se aumentó gradualmente la amplitud A de la onda de entrada, hasta que la salida del amplificador alcanzó 10Vpp en la carga (transductores LVDT). Los datos obtenidos son los tabulados en la Tabla 11-14.

Tabla 11-14 Comprobación de funcionamiento de la Tarjeta de Amplificación

Entrada		Salida		Ganancia de corriente G
Tensión Vin (Vpp)	Corriente Iin (mA)	Tensión Vo (Vpp)	Corriente Io (A)	
11.2	350	10	4.0	11.43

La deducción de la amplificación de corriente se explica. Considerando que el oscilador que se utilizó está entregando una corriente Iin de 350 mA, y que la corriente consumida por los transductores es Io=4A, se tiene una ganancia G de corriente de

$$G = \frac{Io}{Iin} \quad (11.1)$$

$$G = 11.43$$

La corriente de salida máxima del oscilador está indicada como 500mA, por lo que es amplificador está protegiéndolo, al entregar los 4A que requiere la carga. La caída de tensión ΔV se calcula a partir de los datos de la Tabla 11-14:

$$\Delta V = Vin - Vout \quad (11.2)$$

$$\Delta V = 1.2\text{V}$$

La aparición de ΔV se puede atribuir a varios factores como impedancia de salida del Oscilador, pérdidas del cableado, etc.

A partir de los resultados de esta sección, se realizó un análisis para evaluar el éxito de este paso de la solución, el cual puede encontrarse en la Sección 8

Apéndice 6. Verificación del controlador

Los gráficos de la actual sección representan la respuesta de las articulaciones para cada compensador diseñado. Las abreviaturas utilizadas se muestran el Apéndice 2.

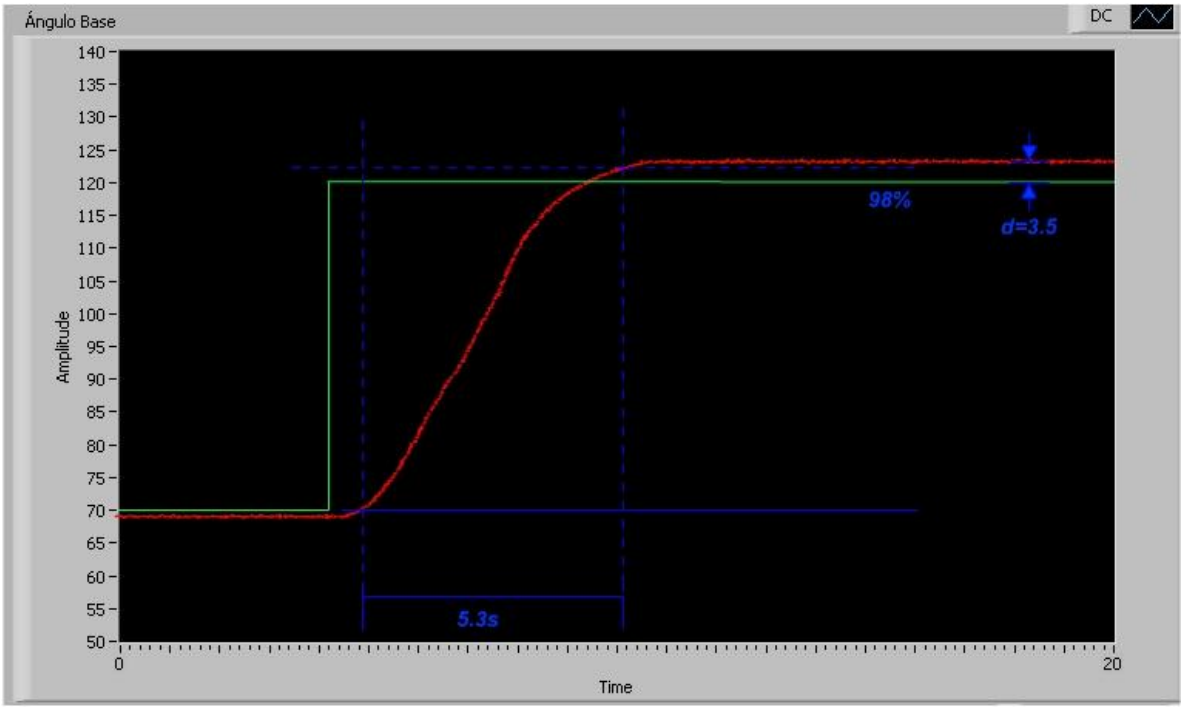


Figura 11-17 C2(s). Respuesta real.

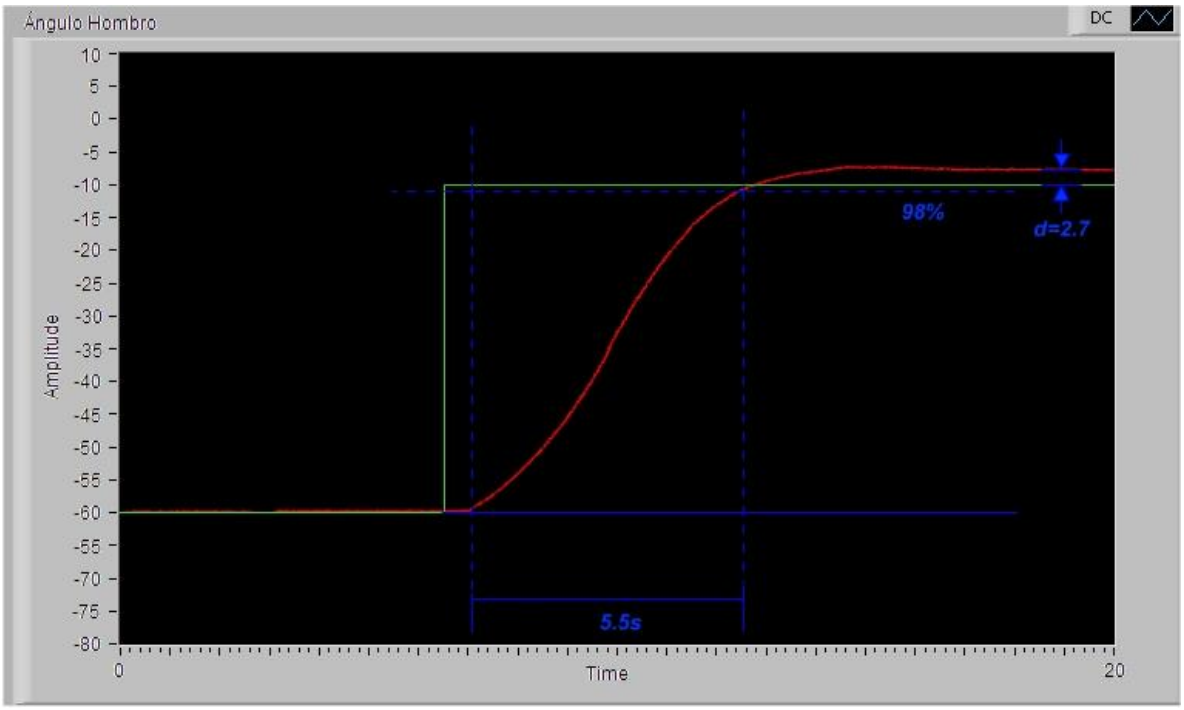


Figura 11-18 C3(s)

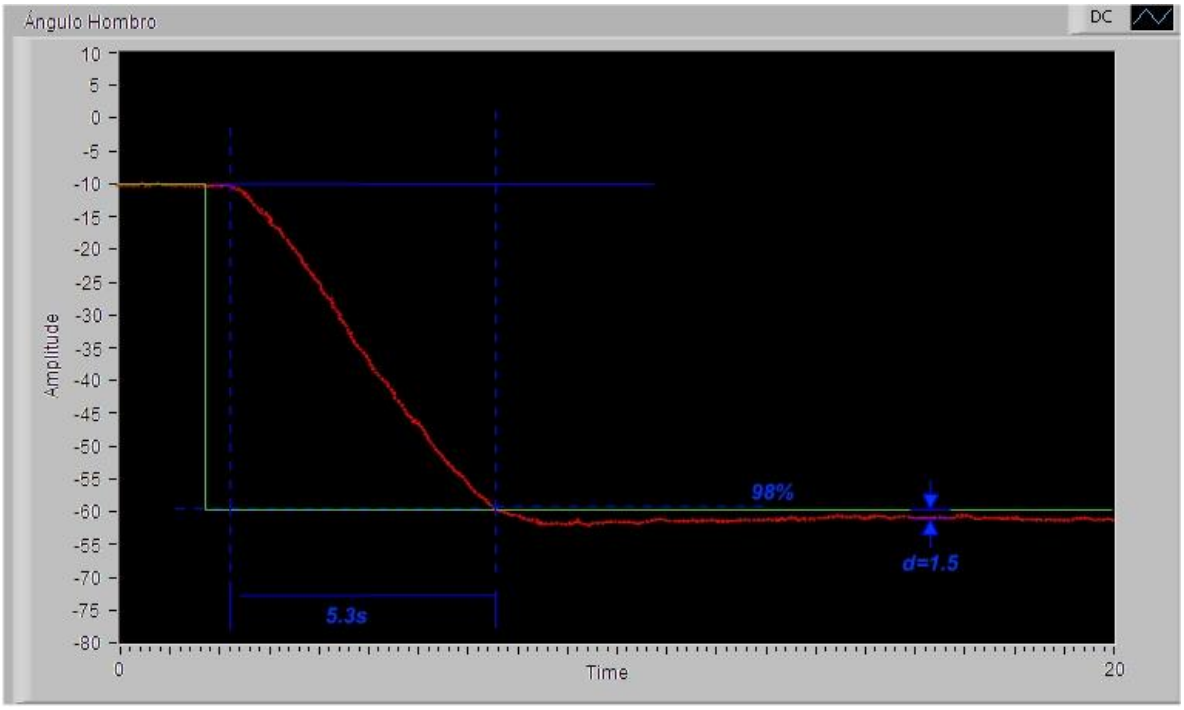


Figura 11-19 C4(s)

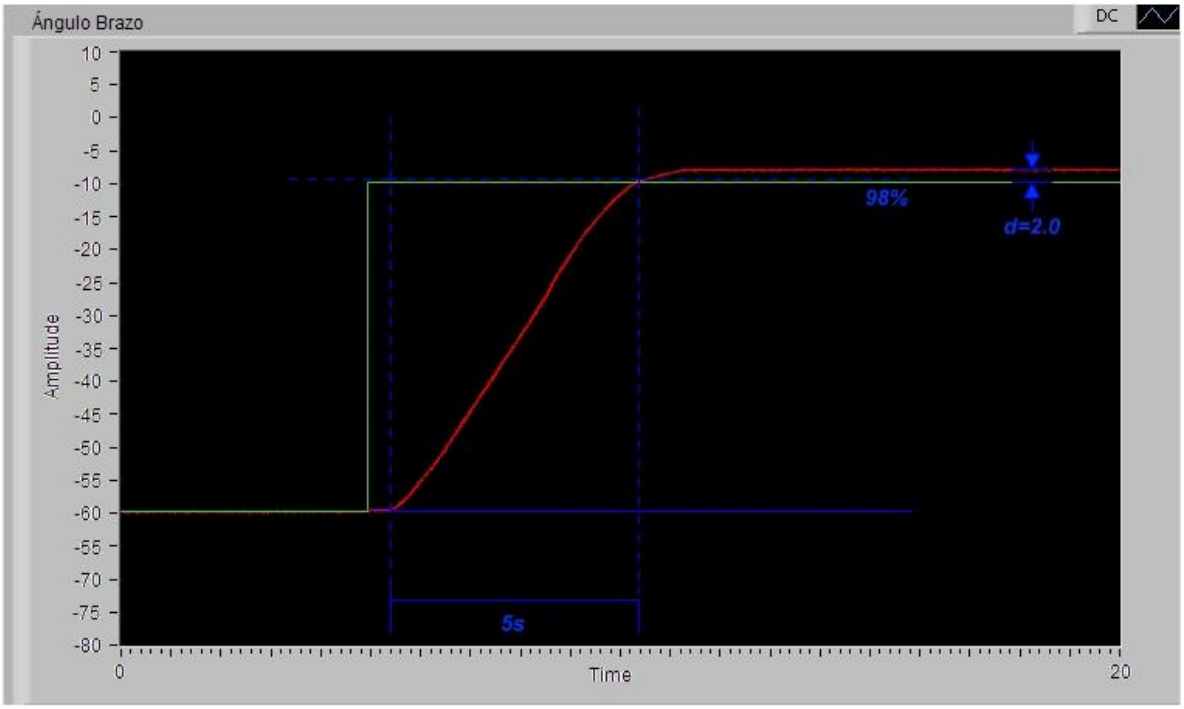


Figura 11-20 C5(s)

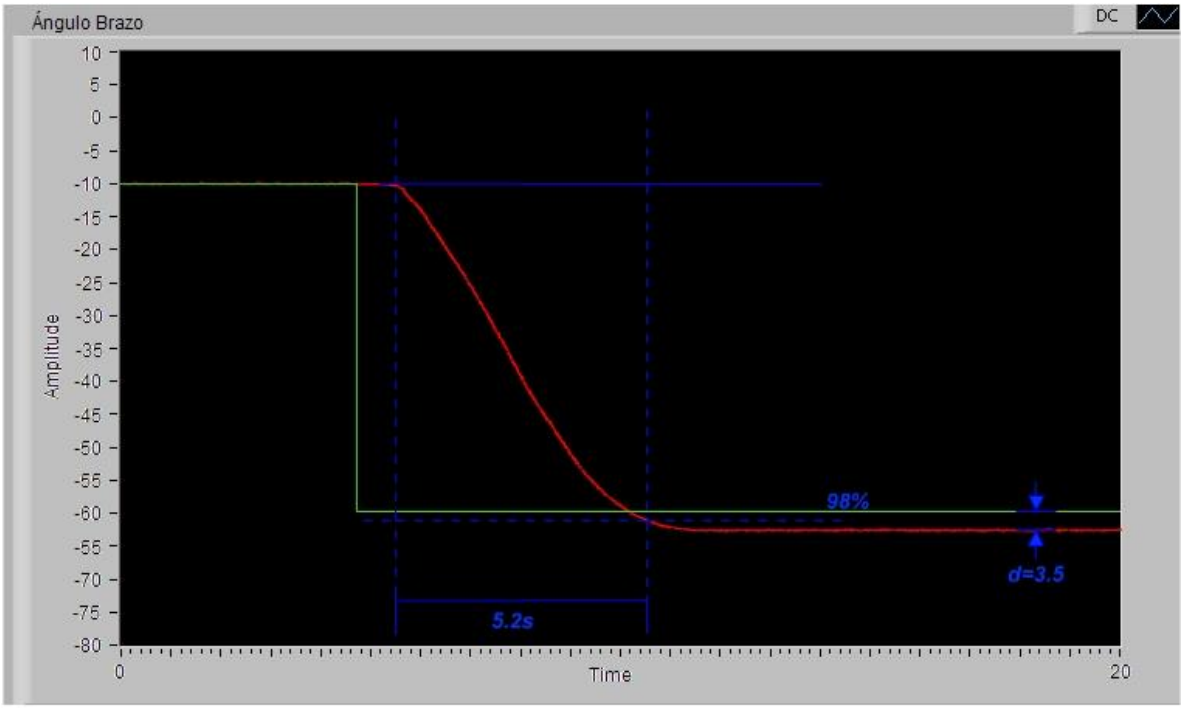


Figura 11-21 C6(s)

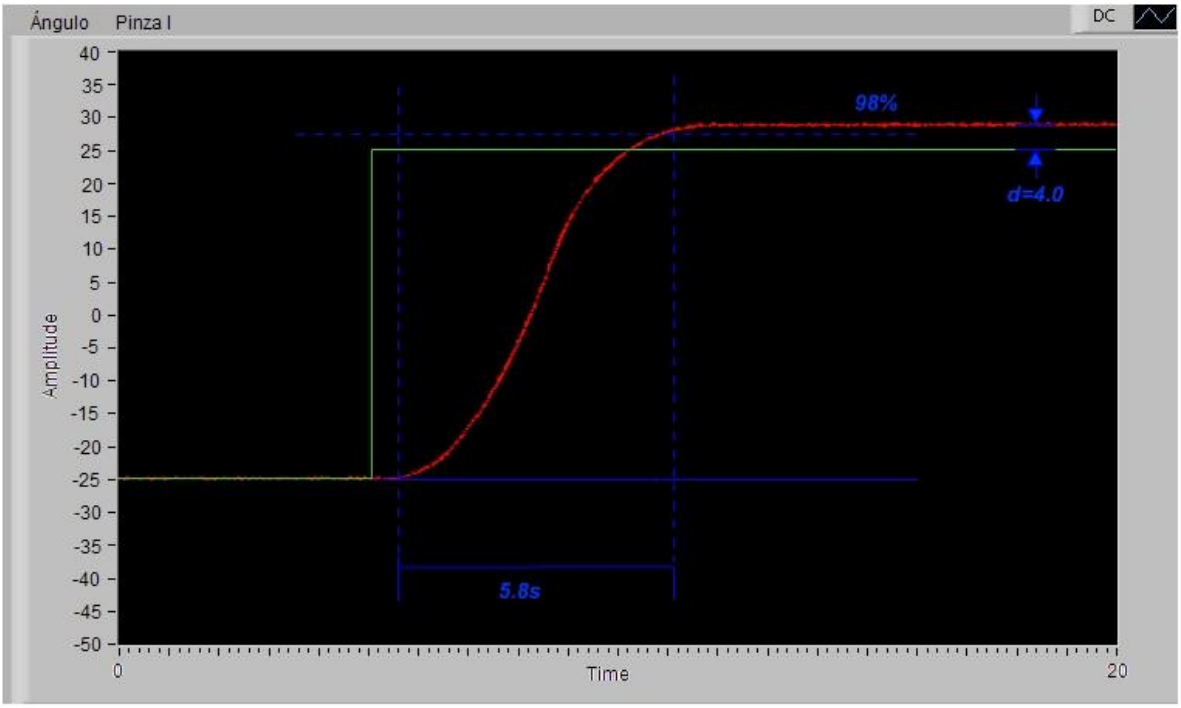


Figura 11-22 C7(s)

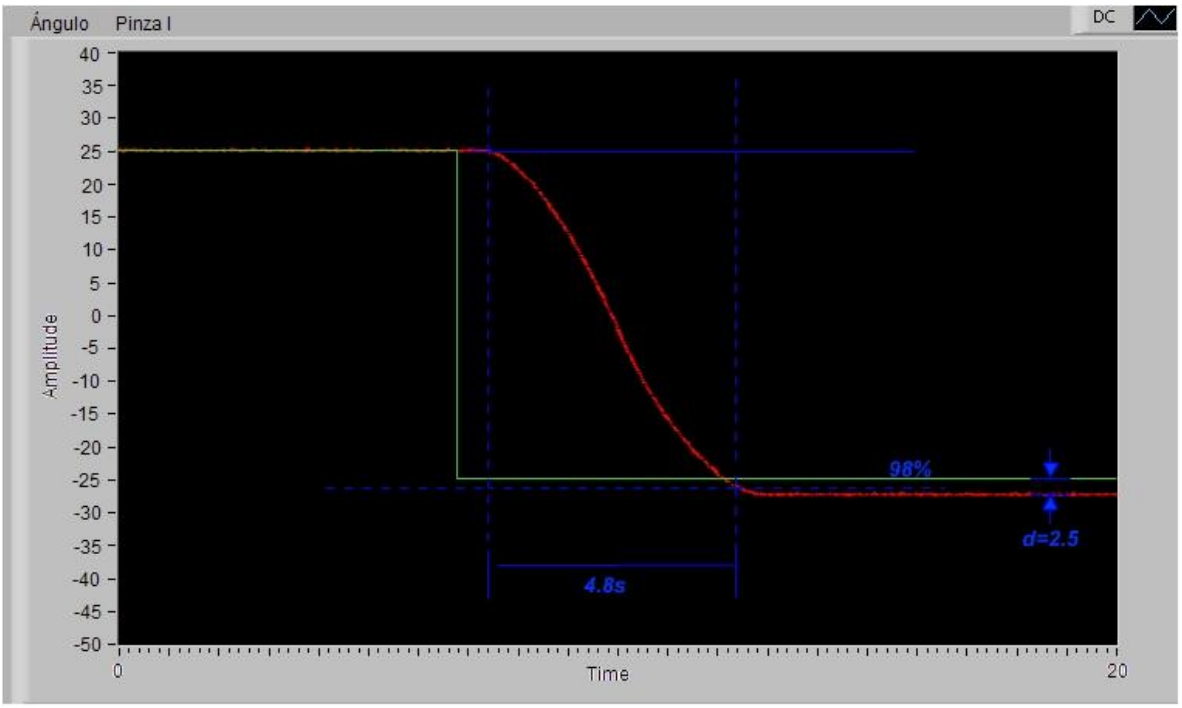


Figura 11-23 C8(s)

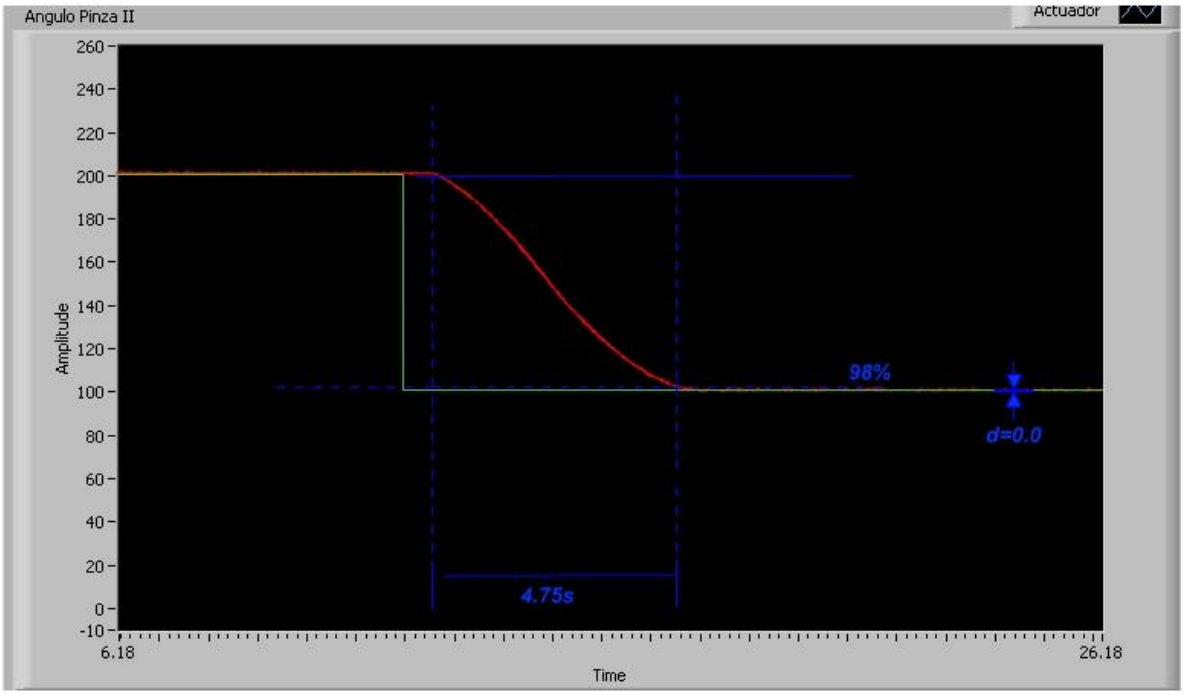


Figura 11-24 C9(s)

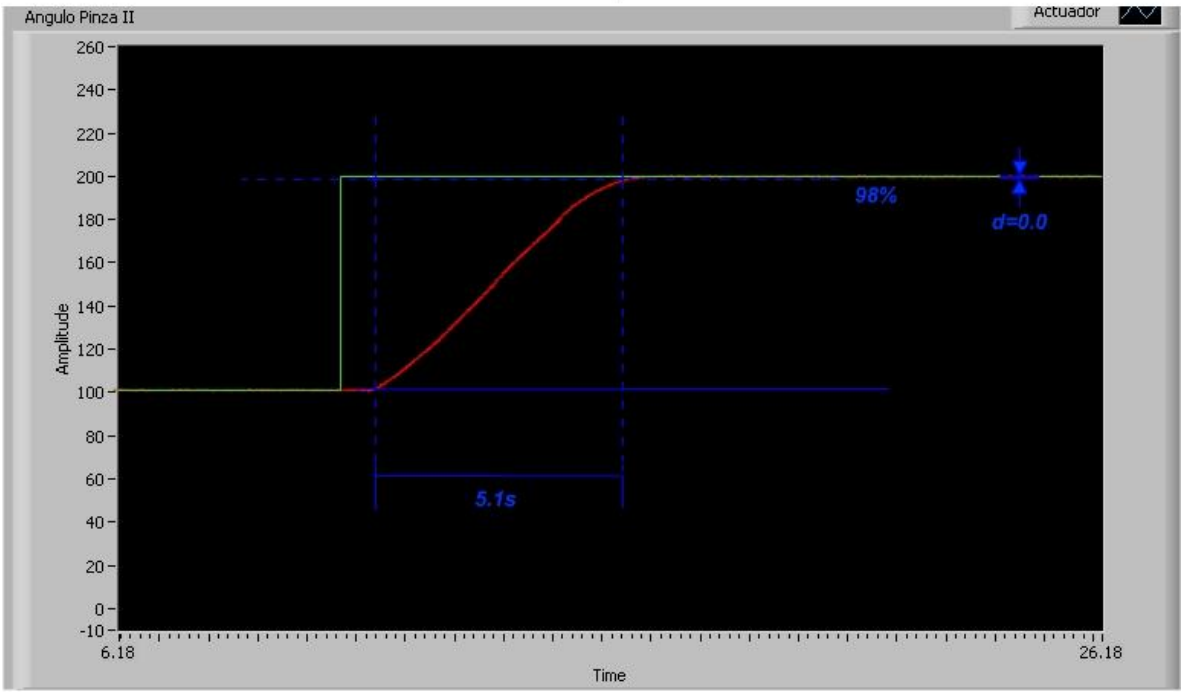


Figura 11-25 C10(s)

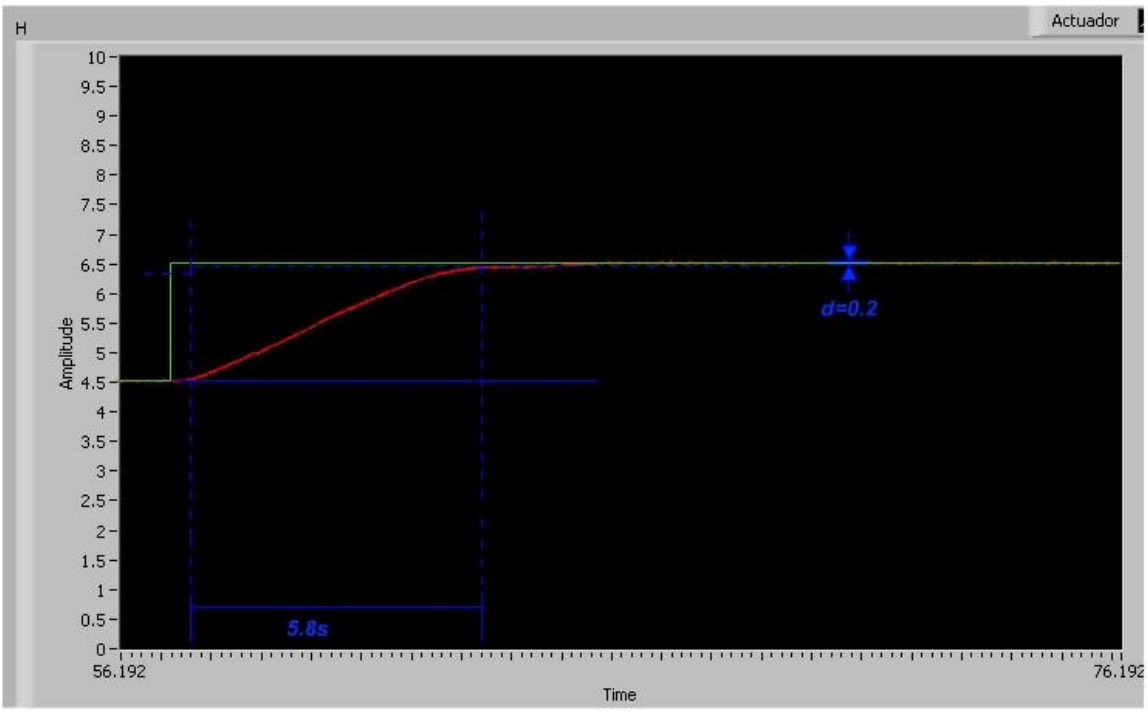


Figura 11-26 C11(s)

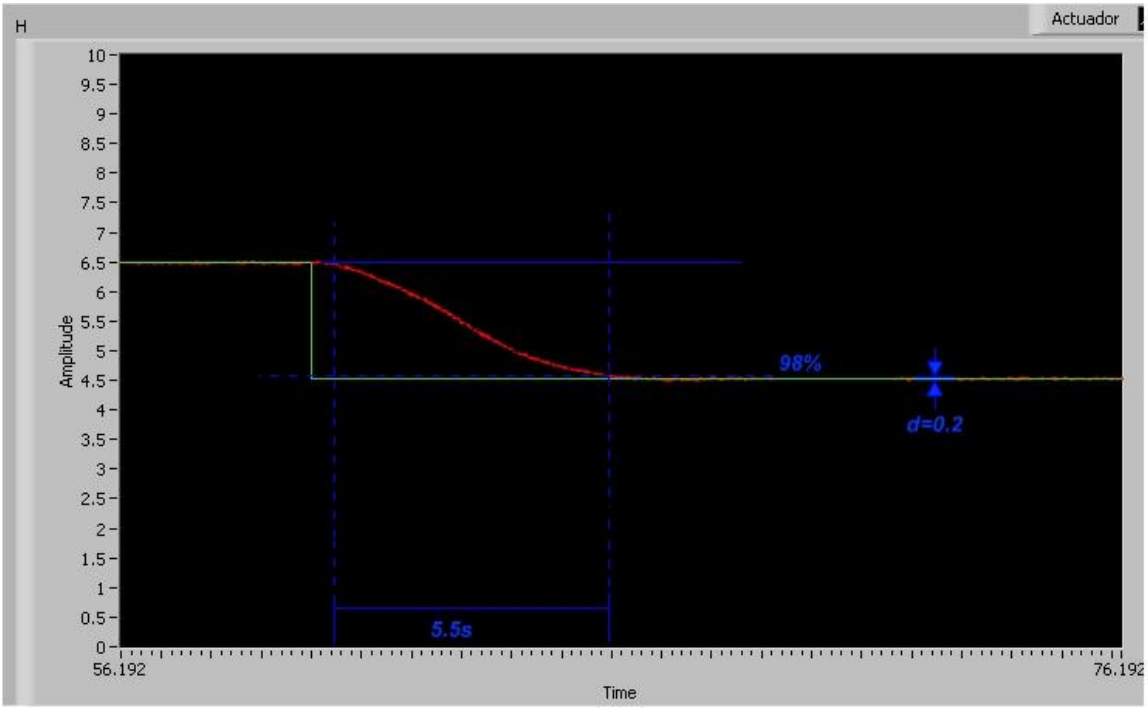


Figura 11-27 C12(s)

Apéndice 7. Manual de usuario

11.8.3 Introducción

El sistema completo se compone de los siguientes bloques

- Robot HRA934
- Interfaz gráfica
- Sistema de control

En la Figura 11-28 se muestra el árbol jerárquico con todos los componentes del sistema.

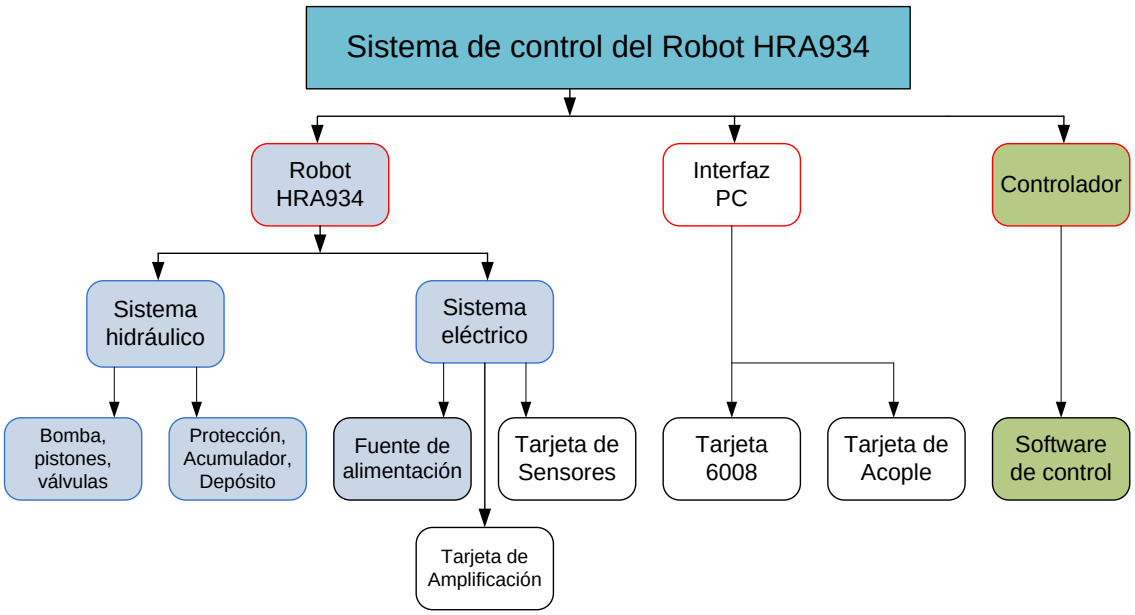


Figura 11-28 Árbol jerárquico del sistema

A continuación se explica cada una de las partes anteriores

Robot HRA934. Es la parte móvil del sistema, compuesta por el sistema hidráulico y el sistema eléctrico. En la Figura 11-29 se tiene una vista del robot.

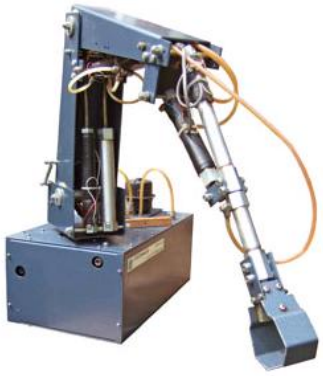


Figura 11-29 Robot HRA934

Los componentes de este subsistema se encuentran alojados en el chasis del robot, el cual se muestra en la Figura 11-29.

Interfaz. Es el software alojado en la computadora, que permite manipular el sistema.

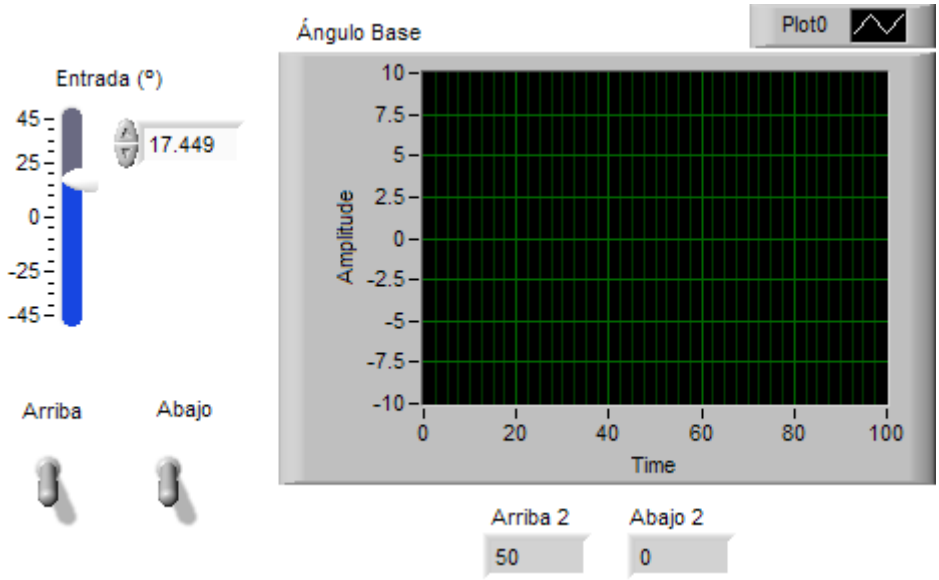


Figura 11-30 Interfaz

Controlador. Es el software que permite controlar las articulaciones de acuerdo con la entrada que se introduzca por la interfaz.

11.8.4 Precauciones

11.8.4.1 Riesgos para la vida

Estimado usuario, el sistema que usted va a controlar presenta serios riesgos para la salud y la vida en caso de incorrecta operación, por lo que debe darle tomar las precauciones necesarias. Por favor:

- Mantenga el área de movimiento del robot libre de obstáculos

- NO opere el sistema si hay personas atravesadas en la trayectoria del robot
- NUNCA introduzca los dedos en el mecanismo del robot si éste está encendido o siendo operado por otra persona
- APAGUE totalmente el sistema cuando vaya a darle mantenimiento
- NO ACERQUE cigarrillos, fósforos encendidos o cualquier fuente de fuego al depósito de aceite
- APAGUE INMEDIATAMENTE la fuente de alimentación del sistema si ocurre uno de los siguientes eventos:
    - un miembro de una persona es atrapado por el mecanismo
    - la instalación eléctrica sufre una sobrecarga
    - sale fuego o humo del sistema
    - se traba el mecanismo o se escuchen excesivas vibraciones
    - hay un fallo de comunicación con la Interfaz

11.8.4.2 Condiciones de funcionamiento

Debe proveer cinco tomas de pared de 120V para los instrumentos que necesita conectar para operar el sistema. Conecte un componente/instrumento del sistema por cada toma; evite el uso de regletas.

11.8.4.3 Protección del mecanismo

Para evitar el desgaste del sistema, por favor siga las siguientes recomendaciones

- Arme el sistema en el orden que se indica en este manual
- Minimice las vibraciones del software de control en lo posible
- Evite llevar la rotación de las articulaciones hasta los límites mecánicas. Revise la hoja de datos del robot para asegurarse.
- Vigile la amplitud de la onda seno para evitar cortocircuitos del Generador de Onda.
- Evite activar simultáneamente una válvula de salida y otra de entrada de una misma articulación.

11.9

11.9.1 Antes de iniciar

Antes de iniciar la operación del sistema, por favor asegúrese que están presentes los componentes que se muestran en la Tabla 11-15 y Tabla 11-16.

Tabla 11-15 Componentes necesarios

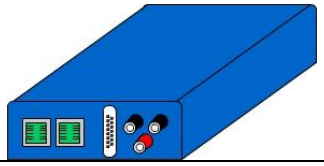
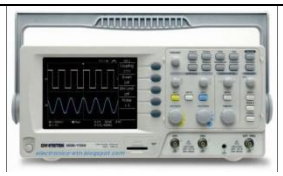
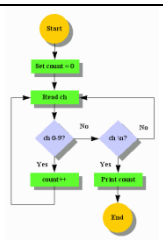
Componente	Imagen	¿Dónde va?	¿Qué pasa si no está presente?
Robot HRA934		En la mesa	No podrá hacer uso del sistema
Fuente de alimentación		Se conecta con los conectores A y B	El robot no podrá moverse
Tarjeta 6008 (Tarjeta de Ejecución)		Se conecta entre la computadora (USB)y el robot (DB-25)	No podrá transmitir órdenes al robot ni leer la posición de las articulaciones
Sistema de Control		En la caja de control. Se conecta con el robot	No podrá controlar al robot
Generador de Ondas		Se conecta al sistema de control (conector coaxial)	No podrá generar la onda seno. Los sensores del robot no responderán

Tabla 11-16 Componentes necesarios, continuación

Componente	Imagen	¿Dónde va?	¿Qué pasa si no está presente?
Osciloscopio		Se conecta al sistema de control, por la Tarjeta de Amplificación, con un conector coaxial	No podrá calibrar la señal seno correctamente. Riesgo de dañar el Generador de Ondas
Fuente CD dual de alimentación externa		Se conecta con tres conectores banana al sistema de control (+12V, -9V, GND)	La Tarjeta de Sensores no podrá energizarse.
Software de control		Está instalado en la computadora	Deberá programar su propio controlador
Computadora con puerto USB		Frente a usted	No podrá hacer uso del sistema

11.9.2 Manipulando el robot con la Interfaz

Con este programa, el usuario tiene la capacidad de:

- Programar un controlador
- Modificar la entrada (consigna)
- Observar el resultado de la acción del sistema

A continuación se explica cada paso.

11.9.2.1 Introduciendo un controlador

El controlador está en el formato

$$C(s) = K\frac{s-z1}{s-p1}\frac{s-z2}{s-p2}$$

Hay que destacar que antes de utilizar esta rutina, primero debe diseñarse un controlador propicio; de lo contrario el sistema no funcionará adecuadamente. Para ello debe tomarse en cuenta la función de transferencia de la articulación y los parámetros de diseño usuales de un controlador.

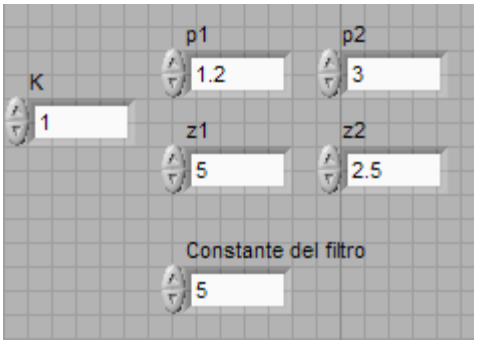


Figura 11-31 Introduciendo un controlador en la Interfaz

Un aspecto importante, es la configuración del filtro de entrada. Por defecto la configuración está en 5. Entre mayor sea el grado, más se filtra pero al mismo tiempo reduce la velocidad de respuesta del sistema.

11.9.2.2 Introduciendo una consigna

Después de configurar el controlador deseado, se puede empezar a mover la articulación. El selector de posición tiene forma de barra deslizante, tal como se muestra a continuación

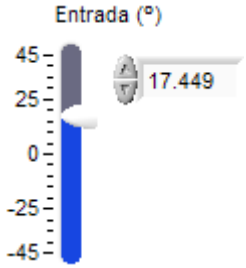


Figura 11-32 Entrada del sistema

Este control de entrada permite tomar cualquier valor dentro del límite mecánico de cada articulación.
Una opción que trae el programa es la de **Forzar**. Permite mover libremente los actuadores del sistema sin importar la entrada que se esté aplicando al sistema ni el controlador que se esté utilizando. Es útil en caso de que el controlador configurado haya causado malfuncionamiento de la articulación. Se recomienda precaución al utilizarlo, debido a que puede llevarse la articulación fuera del rango y dañarla.

Figura 11-33 Controles para forzar los actuadores

11.9.2.3 Gráficos de salida

Para observar la acción del sistema, se utiliza un gráfico similar al de la Figura 11-34.

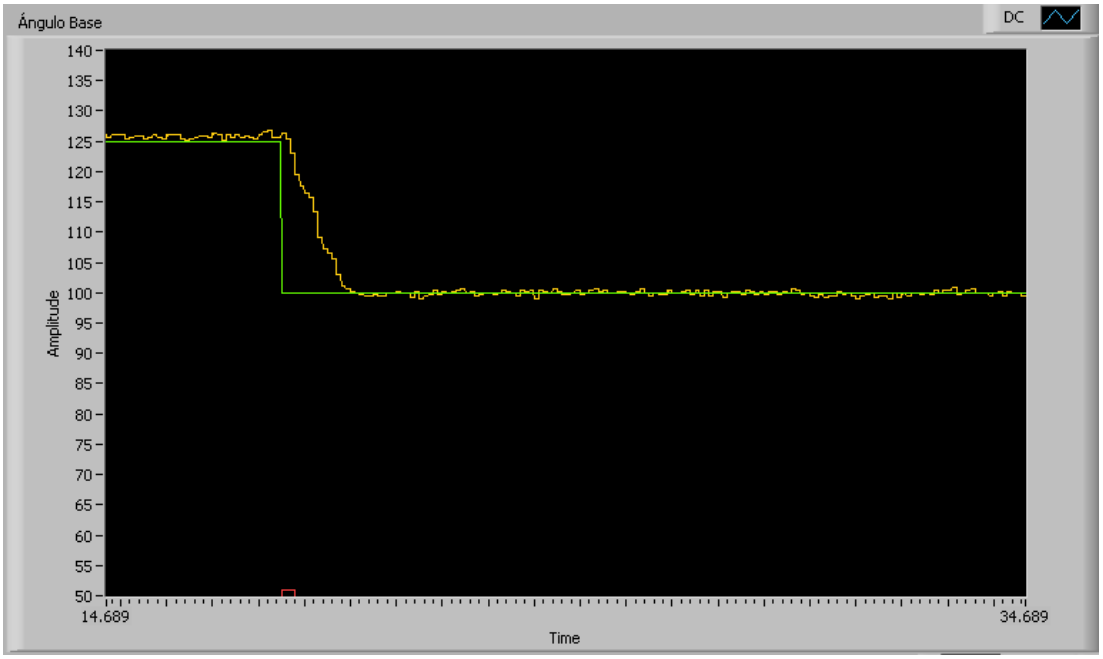


Figura 11-34 Sistema operando.

La escala horizontal representa el tiempo en segundos, mientras que la vertical representa el ángulo en grados. Debe recordarse que la referencia de medición de cada articulación se dan respecto a la proyección de la articulación anterior. Revise la Hoja de datos del robot para más detalles.

En color verde se tiene la entrada, y en amarillo la respuesta del sistema. Otra información que está disponible es la respuesta de los actuadores. En caso de utilizar PWM (modulación por ancho de pulso), se indica ciclo de trabajo en porcentaje. La Figura 11-35 ejemplifica cuando uno de los actuadores opera a 50% de ciclo de trabajo.

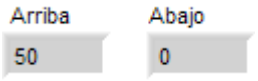


Figura 11-35 Uso de los actuadores

11.9.3 Problemas de funcionamiento

Para solucionar los problemas más comunes, se recomienda utilizar la Tabla 11-17 y Tabla 11-18. En ellas se muestra la causa, la pista para determinar el origen y la solución de las fallas que comúnmente aparecieron durante el desarrollo del proyecto.

Tabla 11-17 Problemas de movilidad

Problema	Posible causa	Pista	Solución
El robot se ha quedado inmóvil o presenta problemas de movilidad	El conector CON_CONTROL está suelto	La lectura de sensores también está fallando	Revisar la conexión
	La Tarjeta de Acople está desconectada	Los sensores sí pueden ser leídos	Revise el conector CON_TA1 y CON_TA2
	La articulación está en su límite	La bomba aún está activa, y las válvulas pueden manipularse	Revise si el ángulo de la articulación está dentro del rango posible
	La alimentación del robot está desconectada	Los sensores sí pueden leerse. La bomba se ha detenido, aunque el robot aún se mueve por acción del acumulador y la gravedad	Revise que esté encendida la fuente del robot. Revise los fusibles en su interior
	La protección hidráulica se ha disparado	Los sensores sí pueden leerse. La bomba se ha detenido, aunque el robot aún se mueve por acción del acumulador y la gravedad	Apague la fuente de voltaje del robot.
	El software está fallando	Se pierde la comunicación con la Tarjeta de Ejecución (USB 6008)	Reinícielo
	La Tarjeta de Ejecución (USB 6008) está fallando	No se puede leer los sensores. No hay control de las articulaciones. Mensaje de error en pantalla.	Chequee la conexión USB. Reinicie la Tarjeta 6008.
	Fallo de una válvula	No se escucha el chasquido de la válvula. La articulación solo se mueve en una dirección.	
	Válvula de entrada y salida operadas al mismo tiempo	La bomba se acelera y se escuchan fuertes vibraciones.	APAGUE de inmediato la alimentación del

			sistema

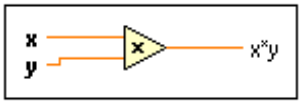
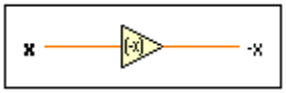
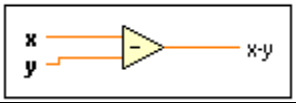
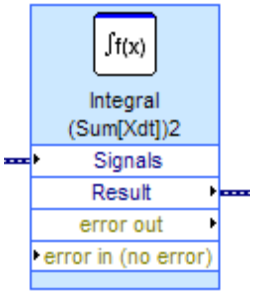
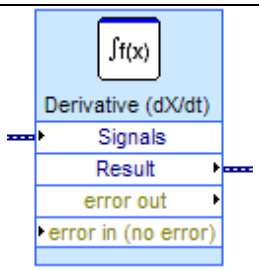
Tabla 11-18 Problemas de sensores

Problema	Posible causa	Pista	Solución
La lectura de sensores está fallando	La Tarjeta de Sensores está desconectada	Todas las lecturas de sensores falla	Verifique la conexión
	La onda seno de 10Vpp no está conectada	El osciloscopio la ha perdido	Chequee el generador de ondas.
	El software de control está leyendo valores fuera de rango	Se tiene un valor erróneo pero constante en uno de los sensores	Chequee la tabla de conversión de voltajes a ángulos, en la hoja de datos del robot
	Hay demasiado ruido en los sensores	Demasiadas oscilaciones en el valor del sensor	Revise los filtros del software
	Fallo de la Tarjeta de Ejecución (USB-6008)	No se ha configurado la Tarjeta correctamente	Revise la frecuencia de muestreo, el rango de voltaje, los canales, etc.
	Fusibles de la Tarjeta de Amplificación	El Generador en vacío da la señal de 10Vpp, pero cuando se conecta al sistema su amplitud se cae	Asegúrese del estado de los fusibles de la Tarjeta de Amplificación

Apéndice 8. Funciones básicas de Labview

Para entender la programación en Labview, se requiere entender el funcionamiento de los operadores básicos que se utilizaron en la elaboración de los programas. Estos se muestran en la Tabla 11-19.

Tabla 11-19 Operadores básicos de Labview

Operador	Nombre	Función
	Constante	Introducir un valor b
	Multiplicación	Retorna el producto de las entradas x, y
	Negación	Retorna el valor opuesto a la entrada x
	Resta	Retorna la diferencia de x, y
	Realimentación	Permite establecer una realimentación
	Integrador	Retorna la integral de la función de entrada X $R = \int \mathrm{Xdt}$
	Derivador	Retorna la derivada de la función de entrada X $R = \frac{dX}{dt}$

Apéndice 9. Librerías de Labview

Primeramente se explicará cómo se implementa las funciones de transferencia en Labview, para entender el paradigma de programación gráfica de este software.

11.9.4 Creando un polo y un cero

Esta función se usó como base para crear otras funciones de transferencia en Labview. El diagrama de programación es el mostrado en la Figura 11-36.

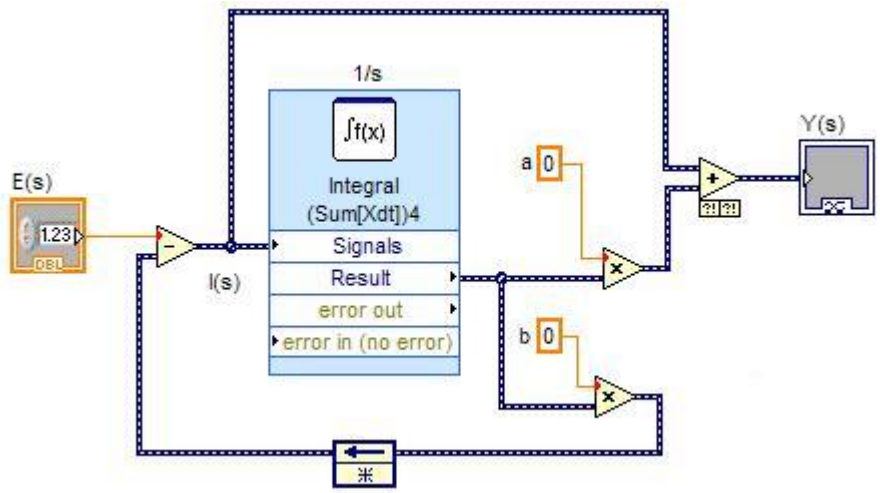


Figura 11-36 Polo y cero en Labview

Analizando, se tiene en la entrada del sistema

$$E(s) - \frac{bI(s)}{s} = I(s)$$

Reordenando,

$$I(s) = \frac{E(s)}{\left[\frac{b}{s} + 1\right]} \qquad (11.3)$$

Además, en la salida se tiene

$$Y(s) = I(s)\left[\frac{a}{s} + 1\right] \qquad (11.4)$$

Sustituyendo (11.3) en (11.4)

$$Y(s) = E(s)\frac{\left[\frac{a}{s} + 1\right]}{\left[\frac{b}{s} + 1\right]}$$

La función de transferencia es

$$T(s) = \frac{Y(s)}{E(s)} = \frac{a+s}{b+s}$$

$$\frac{Y(s)}{E(s)} = \frac{a+s}{b+s} \qquad (11.5)$$

11.9.5 Planta.vi

Este bloque representa la función de transferencia

$$P(s) = \frac{S}{E} = \frac{K}{s+a} \qquad (11.6)$$

Tabla 11-20 Patillas de Planta.vi

Patilla	Función
Entrada	Entrada del estimulo
Salida	Respuesta en el tiempo
K	Ganancia K
a	Factor a

Su deducción se hace analizando el diagrama de la Figura 11-37.

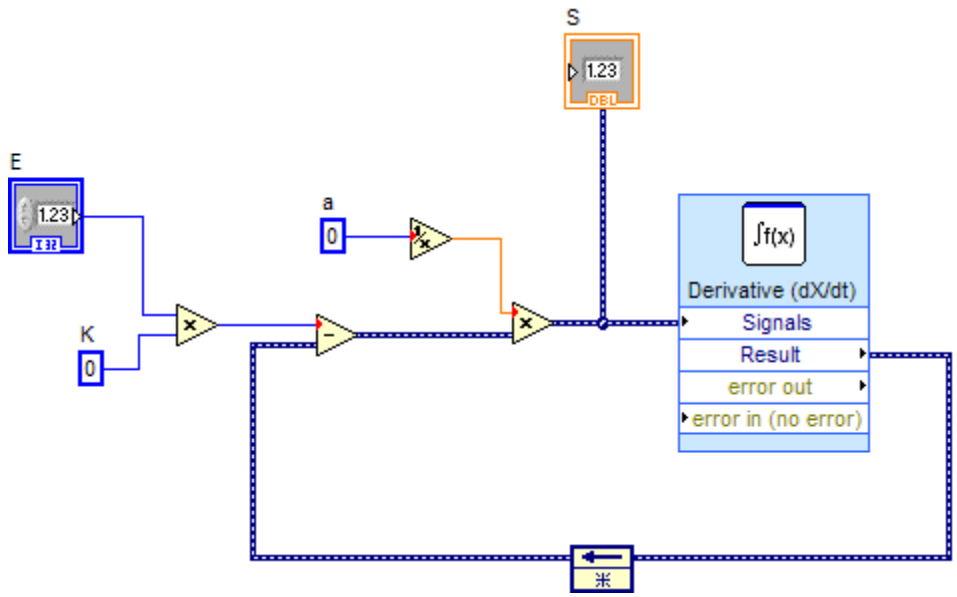


Figura 11-37 Código Labview para Planta.vi

Por la realimentación negativa,

$$T(s) = K\frac{1/a}{s/a + 1}$$

Sacando el factor 1/a del denominador y numerador

$$T(s) = K\frac{1/a}{1/a(s + a)}$$

$$T(s) = \frac{S}{E} = \frac{K}{s + a} \qquad (11.7)$$

11.9.6 Controlador.vi

Representa la función (11.8) con la distribución de patillas de la Tabla 11-21.

$$C(s) = K\frac{s - z1}{s - p1}\frac{s - z2}{s - p2} \qquad (11.8)$$

Tabla 11-21 Patillas de Controlador.vi

Patilla	Función
Entrada	Entrada del estimulo
Salida	Respuesta en el tiempo
a	Cero atraso
b	Polo atraso
y	Polo adelanto
x	Cero adelanto
K	Ganancia del Adelanto

Para deducir la ecuación (11.8), se coloca en cascada dos bloques con la función (11.5), en serie con una constante K. El código se muestra en la Figura 11-38.

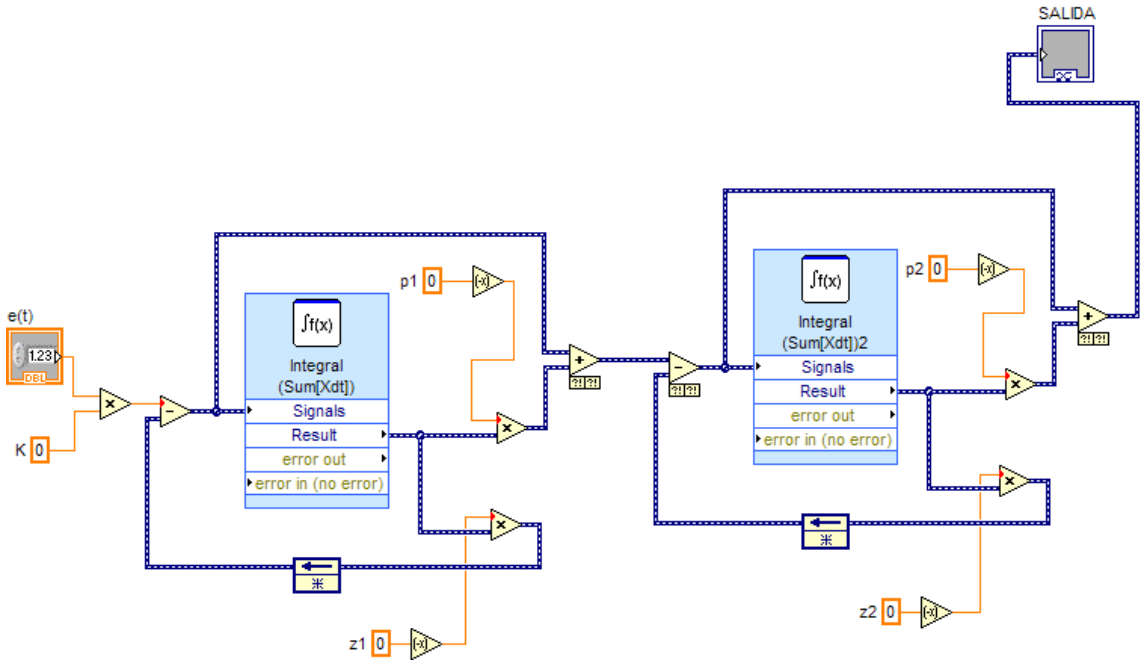


Figura 11-38 Código de Controlador.vi

Apéndice 10. Programas

En la Figura 11-30 se enseña la vista de la rutina Interfaz por parte del usuario.

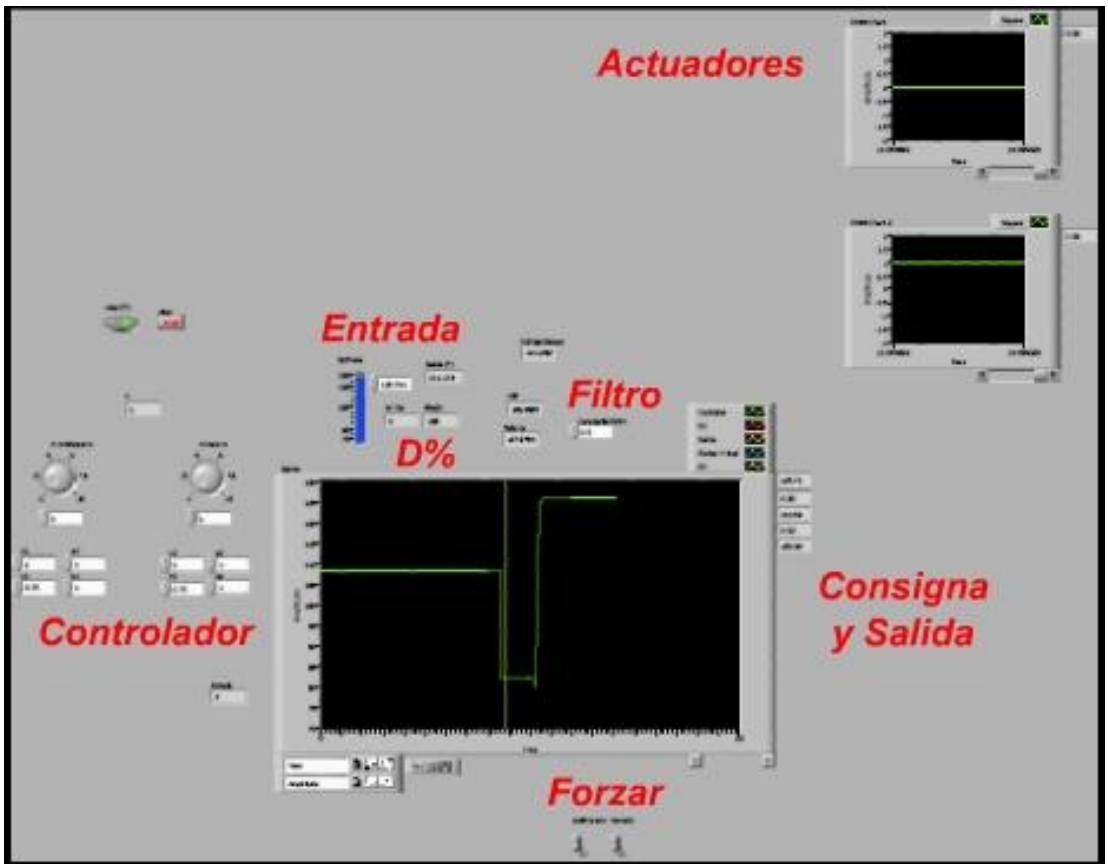


Figura 11-39 Interfaz completa

El código completo en Labview está en la Figura 11-40.

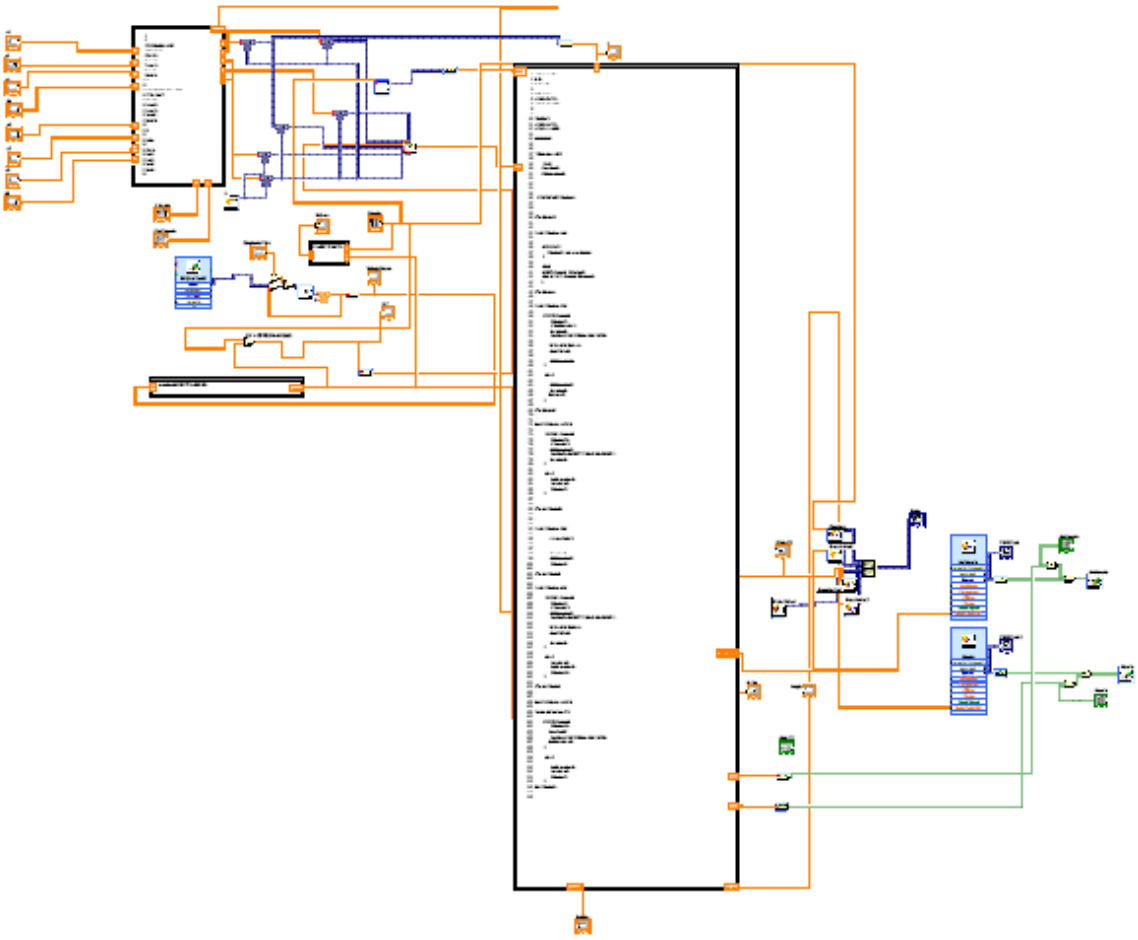


Figura 11-40Código completo para el control de Base

Apéndice 11. Calibración de los sensores

11.9.7 Sensor de Hombro

Tabla 11-22 Medición del sensor de Hombro

Tensión (V)	Angulo (º)
0.29	1
0.38	-15
0.41	-19
0.46	-27
0.5	-29
0.55	-34
0.63	-41
0.68	-47
0.76	-54
0.79	-56
0.83	-60
0.92	-68

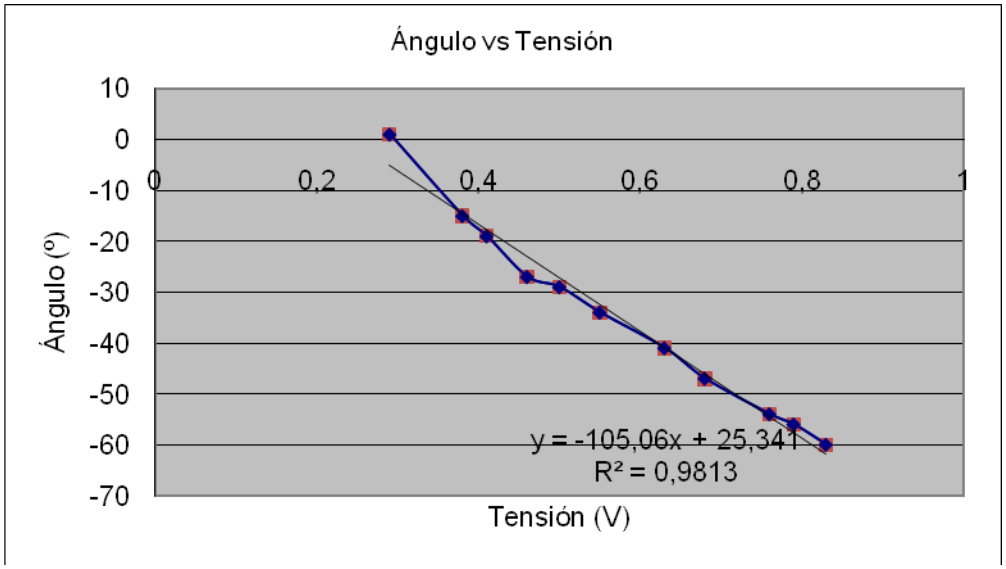


Figura 11-41 Mediciones del sensor de Hombro

Tabla 11-23 Ecuación final A=f(T)

Ecuación	Coeficiente de correlación (%)
A = -105.06T + 25.34	98.1

11.9.8 Sensor de Brazo

Tabla 11-24 Mediciones para el sensor de Brazo

Voltaje Sensor (V)	Ángulo(º)
0.73	-70
0.59	-56
0.55	-53
0.52	-50
0.5	-47
0.45	-45
0.42	-38
0.37	-33
0.35	-30
0.28	-22
0.23	-6

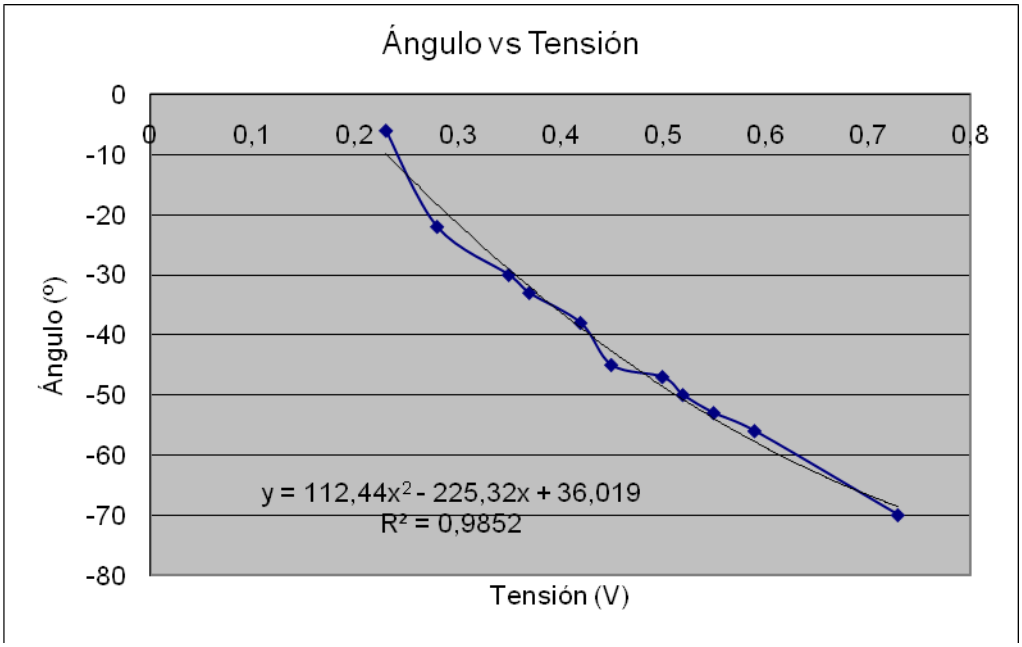


Figura 11-42 Mediciones del sensor de Brazo

Tabla 11-25 Ecuación final para Brazo

Ecuación	Coeficiente de correlación (%)
$A = 112.44T^2 - 225.32T + 36.019$	99.3

11.9.9 Sensor de Pinza I

Tabla 11-26 Mediciones del sensor de Pinza I

Tensión(V)	Ángulo(º)
0.93	-45
0.85	-30
0.8	-20
0.75	-15
0.65	0
0.6	10
0.55	20
0.45	30
0.4	40
0.33	45

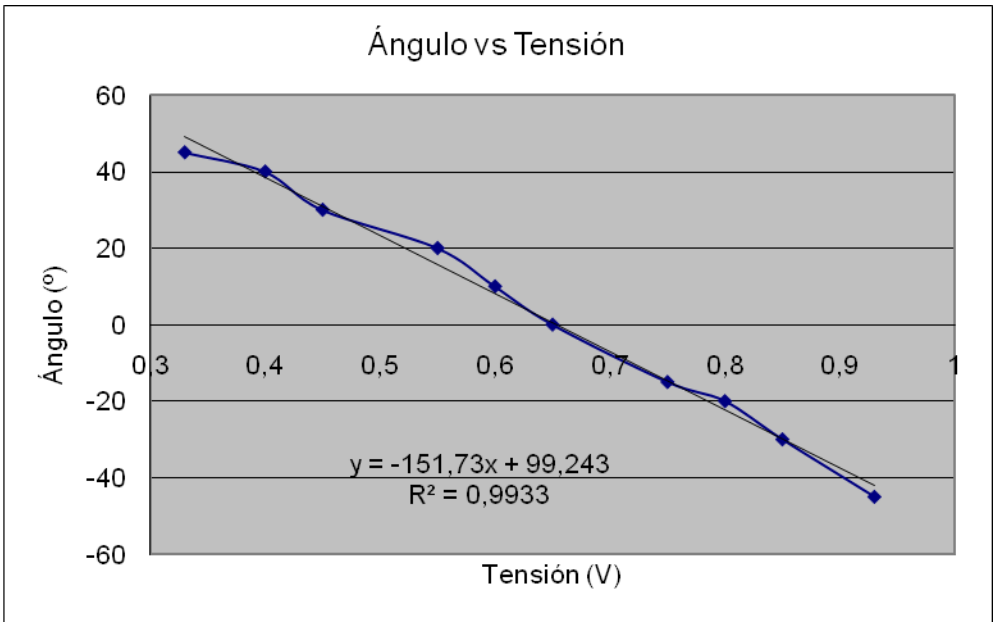


Figura 11-43 Mediciones del sensor de Pinza I

Tabla 11-27 Ecuación final para Brazo

Ecuación	Coeficiente de correlación (%)
A= -151.73T+ 99.243	99.3

11.9.10 Sensor de Pinza II

Tabla 11-28 Mediciones para sensor de Pinza II

Tensión (V)	Ángulo (º)
0.160	3
0.203	54
0.233	68
0.325	106
0.36	120
0.515	177
0.700	230
0.715	235

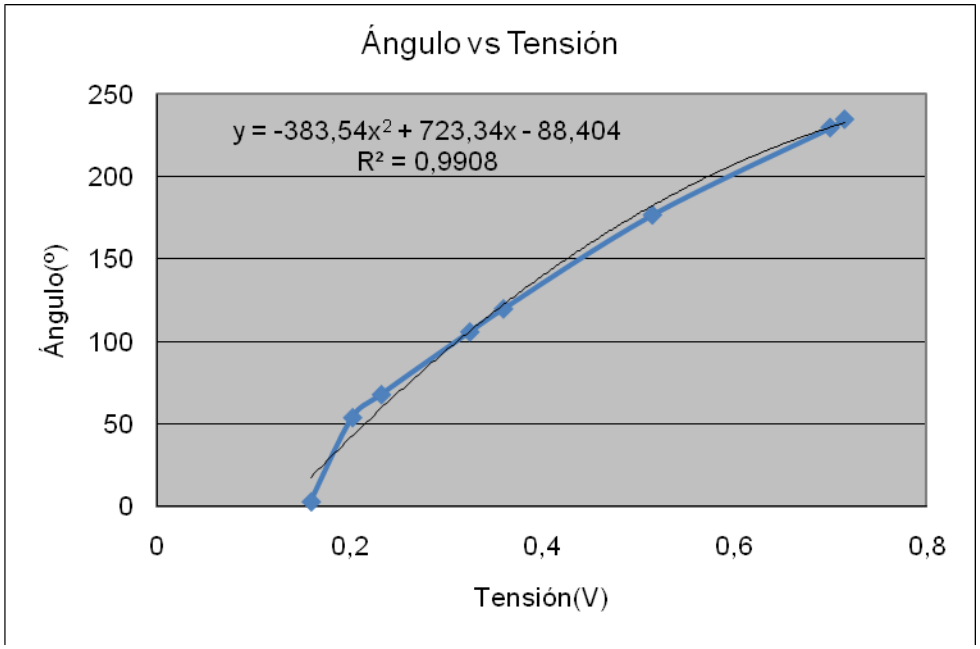


Figura 11-44 Mediciones para el sensor de Pinza II

Tabla 11-29 Ecuación final A=f(T) de Pinza II

Ecuación	Coeficiente de correlación (%)
$A = -383.54T^2 + 723.34T - 88.404$	99.3

11.9.11 Sensor de Pinza C

Tabla 11-30 Mediciones del sensor de Pinza C

Tensión (V)	H (cm)
0.740	4.50
0.834	5.00
0.920	5.40
0.970	5.60
1.000	5.85
1.100	6.15
1.150	6.40
1.240	6.70
1.280	6.80
1.320	6.75

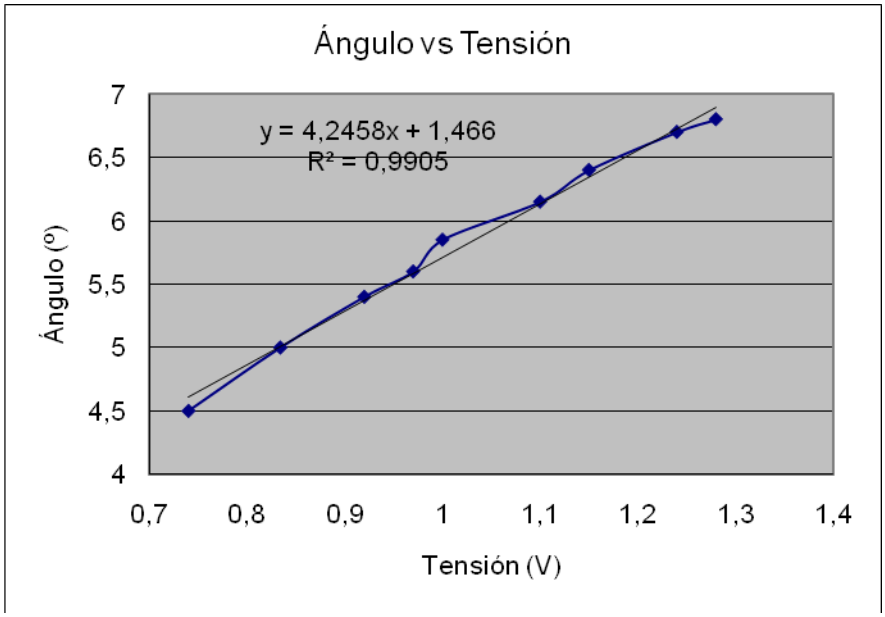


Figura 11-45 Mediciones del sensor de Pinza C

Tabla 11-31Ecuación final A=f(T) de Pinza C

Ecuación	Coeficiente de correlación (%)
A= 4.2458T + 1.466	99.0

Apéndice 12. Mediciones para el modelado de las articulaciones

Estos datos se obtuvieron a través del procedimiento de la Sección 6.1.

Tabla 11-32 Datos experimentales de Base Horario

t(s)	θ(°)
0.0831	2.8351
0.0832	5.9847
0.2073	7.5595
0.3316	9.1343
0.4972	10.079
0.5800	13.228
0.5810	16.378
0.6628	17.008
0.6628	17.008
0.7456	18.268
0.9527	20.157
0.9941	21.417
0.9941	21.417
1.6980	25.827
1.698	25.827
1.8222	26.142
1.8222	26.142
2.609	25.512
2.609	25.512
3.1473	25.512
3.1473	25.512
3.7648	25.512
3.7684	25.512

Tabla 11-33 Datos experimentales de Base Antihorario

t(s)	θ(°)
0	0
0.0056	1.231
0.0877	2.769
0.08778	4.615
0.1698	5.846
0.2109	8.615
0.293	9.2307
0.3341	11.076
0.4573	12.000
0.5394	13.538
0.5805	16.000
1.0733	25.538
1.1965	28.307
1.4429	28.615
1.5251	31.384
1.6483	32.923
2.0179	36.46
2.3054	36.615
2.5518	36.307
2.8803	36.923
3.0446	39.384
3.0856	40.307
3.3731	40.923
3.7017	40.923
3.907	41.236
4.3587	40.615
4.9337	40.615
7.0000	40.615

Tabla 11-34 Datos experimentales de Pinza I Arriba

t(s)	θ(°)
0	0
0.0416	2.806
0.0833	8.42
0.1666	16.84
0.2083	25.262
0.2916	25.262
0.2917	29.472
0.375	30.174
0.4583	34.384
0.4583	37.194
0.5000	47.718
0.5416	47.718
0.5833	50.525
0.5834	55.437
0.625	64.56
0.6666	72.279
0.9166	78.595
2	78.595
3	78.595

Tabla 11-35 Datos experimentales de Pinza I Abajo

t(s)	θ(°)
0	0
0.0863	9.7912
0.1705	11.896
0.2126	23.826
0.2968	33.65
0.381	37.861
0.5494	42.773
0.5495	45.58
0.8442	49.791
1.2652	50.492
1.0547	50.492
1.6442	50.492
3	50.492

Tabla 11-36 Datos experimentales de Pinza C Abre

t(s)	H (cm)
0	0
0.0414	0.1397
0.0830	0.2800
0.1245	0.5958
0.1661	1.0169
0.2493	1.2274
0.3740	1.4379
0.5819	1.7186
0.6651	2.1748
0.7898	2.4555
0.8314	2.4200
1.0000	2.4555
1.5000	2.4555

Tabla 11-37 Datos experimentales para Pinza C Cierra

t(s)	H (cm)
0	0
0.083	0.6657
0.1245	1.0517
0.2493	1.2970
0.3324	1.5078
0.4988	1.8230
0.5819	1.7885
0.6235	2.1745
0.7067	2.2447
0.7067	2.3150
0.7482	2.420
0.8314	2.5254
0.873	2.5600
2.000	2.5600

12 Anexos

Anexo B. 1. Documentos de datos técnicos

12.1.1 Manual de usuario del brazo robótico HRA934 [12]

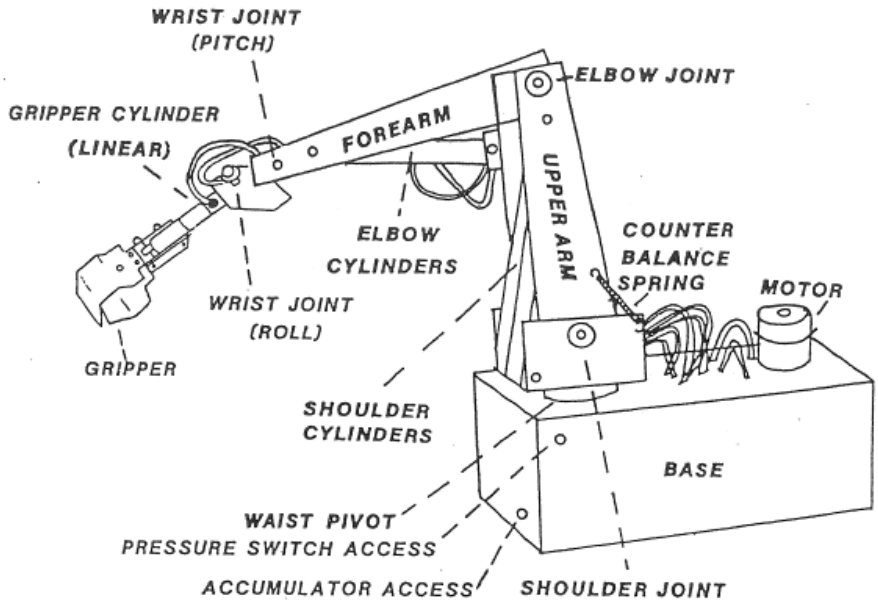
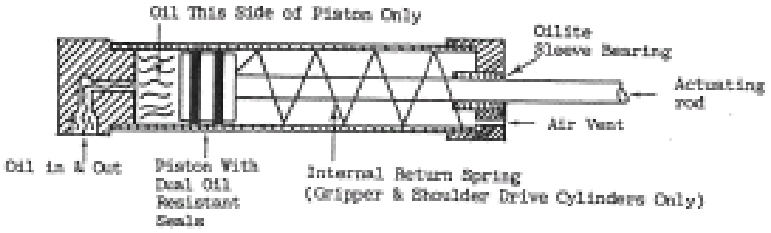
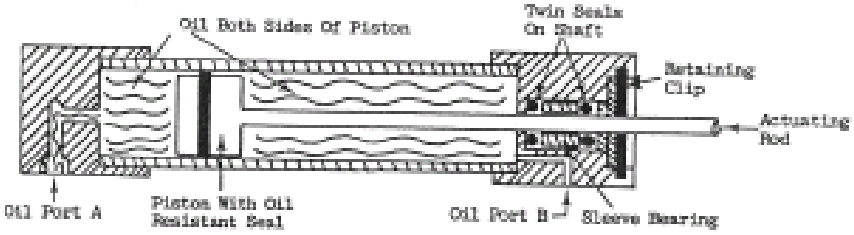


Figura 12-1 Articulaciones

TYPICAL SINGLE ACTING PNEUMATIC CYLINDER



SINGLE ACTING HYDRAULIC CYLINDER



DUAL ACTING HYDRAULIC CYLINDER

Figura 12-2 Pistones

12.1.2 Amplificador Operacional LM324 [19]

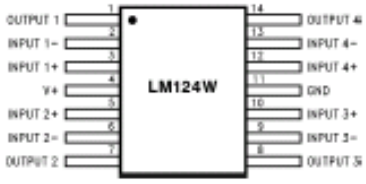
Electrical Characteristics

V⁺ = +5.0V, (Note 7), unless otherwise stated

Parameter	Conditions	LM124A			LM224A			LM324A			Units
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
Input Offset Voltage	(Note 8) T_A = 25°C		1	2		1	3		2	3	mV
Input Bias Current (Note 9)	$I_{IN(+)}$ or $I_{IN(-)}$, V_{CM} = 0V, T_A = 25°C		20	50		40	80		45	100	nA
Input Offset Current	$I_{IN(+)}$ or $I_{IN(-)}$, V_{CM} = 0V, T_A = 25°C		2	10		2	15		5	30	nA
Input Common-Mode Voltage Range (Note 10)	V⁺ = 30V, (LM2902, V⁺ = 26V), T_A = 25°C	0		V⁺–1.5	0		V⁺–1.5	0		V⁺–1.5	V
Supply Current	Over Full Temperature Range R_L = ∞ On All Op Amps										mA
	V⁺ = 30V (LM2902 V⁺ = 26V)		1.5	3		1.5	3		1.5	3	
	V⁺ = 5V		0.7	1.2		0.7	1.2		0.7	1.2	
Large Signal Voltage Gain	V⁺ = 15V, $R_L \geq 2k\Omega$, (V_O = 1V to 11V), T_A = 25°C	50	100		50	100		25	100		V/mV
Common-Mode	DC, V_{CM} = 0V to V⁺ – 1.5V,	70	85		70	85		65	85		dB

Figura 12-3 Características eléctricas

Connection Diagrams (Continued)



Order Number LM124AW/883, LM124AWG/883, LM124W/883 or LM124WG/883
LM124AWRQML and LM124AWRQMLV(Note 3)
See NS Package Number W14B
LM124AWGRQML and LM124AWGRQMLV(Note 3)
See NS Package Number WG14A

Note 1: LM124A available per JM38510/11005
Note 2: LM124 available per JM38510/11005
Note 3: See STD Mil DWG 5962R92504 for Radiation Tolerant Device

Schematic Diagram (Each Amplifier)

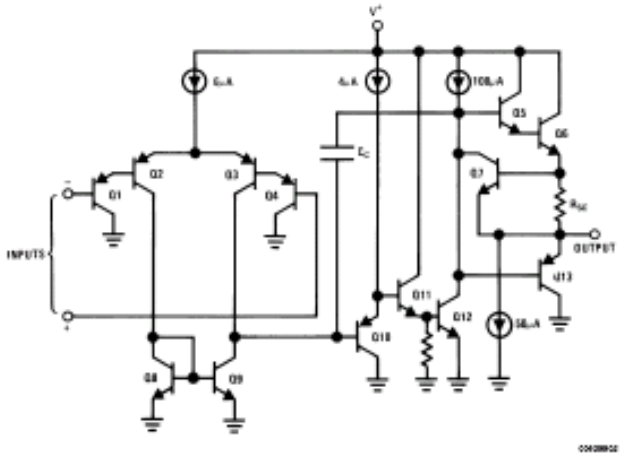


Figura 12-4Patillas

12.1.3 Transistores complementarios 2N3955 y MJ2955 [14]

COMPLEMENTARY SILICON POWER TRANSISTORS

...designed for use in general-purpose amplifier and switching applications

Boca Semiconductor Corp. (BSC)

FEATURES:

* Power Dissipation - P_D = 115W @ T_C = 25°C
* DC Current Gain hFE = 20 ~ 70 @ I_C = 4.0 A
* $V_{CE(sat)}$ = 1.1 V (Max.) @ I_C = 4.0 A, I_B = 400 mA

NPN	PNP
2N3055	MJ2955

15 AMPERE
COMPLEMENTARY SILICON
POWER TRANSISTORS
60 VOLTS
115 WATTS

TO-3

MAXIMUM RATINGS

Characteristic	Symbol	Rating	Unit
Collector-Emitter Voltage	V_{CEO}	60	V
Collector-Emitter Voltage	V_{CER}	70	V
Collector-Base Voltage	V_{CBO}	100	V
Emitter-Base Voltage	V_{EBO}	7.0	V
Collector Current-Continuous	I_C	15	A
Base Current	I_B	7.0	A
Total Power Dissipation @T_C=25°C Derate above 25°C	P_D	115 0.657	W W/°C
Operating and Storage Junction Temperature Range	T_J,T_{STG}	- 65 to +200	°C

THERMAL CHARACTERISTICS

Characteristic	Symbol	Max	Unit
Thermal Resistance Junction to Case	Rejc	1.52	°C/W

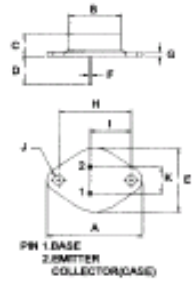


Figura 12-5 Características fundamentales

12.1.4 Tarjeta de desarrollo NI-6008 [20]

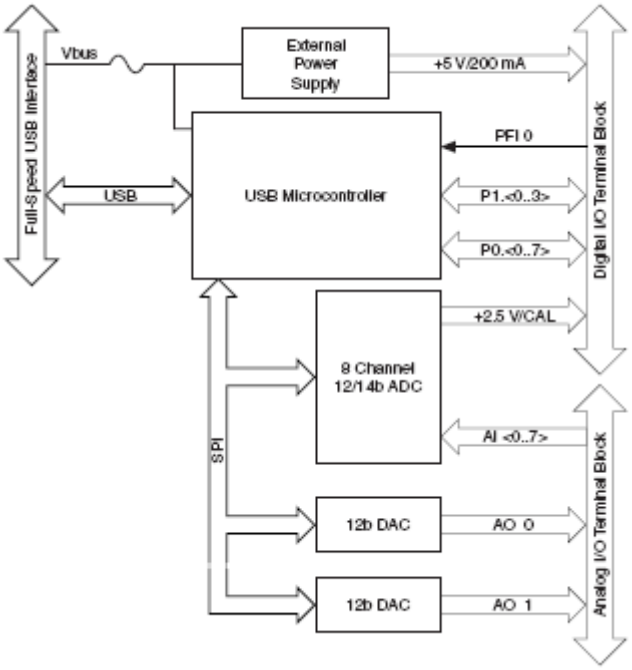


Figura 12-6 Diagrama de bloques

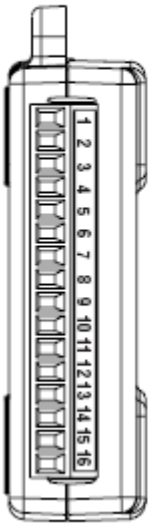
Module	Terminal	Signal, Single-Ended Mode	Signal, Differential Mode
	1	GND	GND
	2	AI 0	AI 0+
	3	AI 4	AI 0–
	4	GND	GND
	5	AI 1	AI 1+
	6	AI 5	AI 1–
	7	GND	GND
	8	AI 2	AI 2+
	9	AI 6	AI 2–
	10	GND	GND
	11	AI 3	AI 3+
	12	AI 7	AI 3–
	13	GND	GND
	14	AO 0	AO 0
	15	AO 1	AO 1
	16	GND	GND

Figura 12-7 Puerto analógico

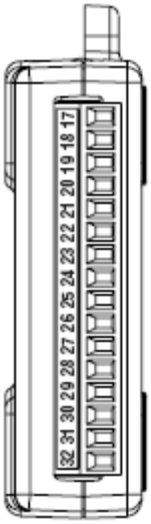
Module	Terminal	Signal
	17	P0.0
	18	P0.1
	19	P0.2
	20	P0.3
	21	P0.4
	22	P0.5
	23	P0 6
	24	P0.7
	25	P1.0
	26	P1.1
	27	P1.2
	28	P1.3
	29	PFI 0
	30	+2.5 V
	31	+5 V
	32	GND

Figura 12-8 Puerto digital

12.1.5 Diodo 1N4004 [12]

MAXIMUM RATINGS AND ELECTRICAL CHARACTERISTICS

Ratings at 25 •• ambient temperature unless otherwise specified.

Single phase, half wave, 60 Hz, resistive or inductive load.

For capacitive load, derate current by 20%.

	1N4001	1N4002	1N4003	1N4004	1N4005	1N4006	1N4007	UNITS
Maximum Recurrent Peak Reverse Voltage	50	100	200	400	600	800	1000	V
Maximum RMS Voltage	35	75	140	280	420	560	700	V
Maximum DC Blocking Voltage	50	100	200	400	600	800	1000	V
Maximum Average Forward Rectified Current .375"(9.5mm) Lead Length at T_A=75 ••	1.0							A
Peak Forward Surge Current 8.3ms single half sine-wave superimposed on rated load (JEDEC method)	30							A
Maximum Forward Voltage at 1.0A DC and 25 ••	1.1							V
Maximum Full Load Reverse Current Full Cycle Average at 75 •• Ambient	30							•• A
Maximum Reverse Current at T_A=25 ••	5.0							•• A
At Rated DC Blocking Voltage T_A=100 ••	500							•• A
Typical Junction capacitance (Note 1)	15							pF
Typical Thermal Resistance (Note 2) R •• JA	50							••/W
Typical Thermal resistance (NOTE 2) R •• JL	25							••/W
Operating and Storage Temperature Range T_J,T_{STG}	-55 to +150							••

Figura 12-9 Diodo 1N4004

12.1.6 Puente de diodos KBU8M8D [18]

Absolute Maximum Ratings* T_A = 25°C unless otherwise noted

Symbol	Parameter	Value							Units
		8A	8B	8D	8G	8J	8K	8M	
V_{RRM}	Maximum Repetitive Reverse Voltage	50	100	200	400	600	800	1000	V
V_{RMS}	Maximum RMS Bridge Input Voltage	35	70	140	280	420	560	700	V
V_R	DC Reverse Voltage (Rated V_R)	50	100	200	400	600	800	1000	V
$I_{F(AV)}$	Average Rectified Forward Current, @ T_A = 50°C	8.0							A
I_{FSM}	Non-repetitive Peak Forward Surge Current	300							A
T_{stg}	Storage Temperature Range	-55 to +150							°C
T_J	Operating Junction Temperature	-55 to +150							°C

*These ratings are limiting values above which the serviceability of any semiconductor device may be impaired.

Thermal Characteristics

Symbol	Parameter	Value	Units
P_D	Power Dissipation	6.9	W
$R_{\theta JA}$	Thermal Resistance, Junction to Ambient,* per leg	18	°C/W
$R_{\theta JL}$	Thermal Resistance, Junction to Lead,* per leg	3.0	°C/W

*Device mounted on PCB with 0.375 " (9.5 mm) lead length and 0.5 x 0.5" (13 x 13 mm) copper pads.

Figura 12-10 Familia de rectificadores KBU8

Anexo B. 2. Hoja de información

Información del estudiante:

Nombre: Ramiro Vargas Quirós

Cédula: 1-1161-0819 **Carné ITCR:** 200202501

Dirección de su residencia en época lectiva: Residencial Los Tules (100 m Este de la Basílica de los Ángeles), casa 9B, Cartago.

Dirección de su residencia en época no lectiva: Residencial Los Tules (100 m Este de la Basílica de los Ángeles), casa 9B, Cartago.

Teléfono en época lectiva: 8917-3644 / 2551-9848

Teléfono época no lectiva: 8917-3644 / 2551-9848

Email: ramirovq@gmail.com

Información del proyecto:

Nombre del Proyecto: Diseño e implementación de control automático para el robot HRA934

Área del Proyecto: Robótica, Mecatrónica, Hidráulica, Control Automático

Información de la empresa:

Nombre: Escuela de Ingeniería Eléctrica, UCR

Zona: San Pedro de Montes de Oca, San Pedro

Dirección: Laboratorio de Control, Edificio de Ingeniería Eléctrica, Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, San Pedro, San José.

Teléfono: 2511-3850 **Fax:** 2511-3920

Apartado: 11501-2060 UCR, San José, Costa Rica

Actividad Principal: Enseñanza de Ingeniería Eléctrica

Información del encargado en la empresa:

Nombre: Peter Zeledón Méndez

Puesto que ocupa: Profesor

Departamento: Docencia

Profesión: Ingeniero Eléctrico **Grado académico:** Licenciatura

Teléfono: 8346-9324
Email: PZeledon@ice.go.cr

Información del asesor en la empresa:
Nombre: Peter Zeledón Méndez
Puesto que ocupa: Profesor
Departamento: Docencia
Profesión: Ingeniero Eléctrico **Grado académico:** Licenciatura
Teléfono: 8346-9324
Email: PZeledon@ice.go.cr