

IMPLEMENTACIÓN DE TÉCNICAS DE CONTROL CLÁSICAS BAJO CONTROL-LOGIX

Br. Jorge Isaac Vento Maldonado
Profesor Guía: Prof. Francklin Rivas
Cotutor: Prof. Addison Ríos

www.bdigital.ula.ve

PROYECTO DE GRADO PRESENTADO ANTE LA ILUSTRE UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
COMO REQUISITO FINAL PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO DE SISTEMAS

Mérida, Venezuela
Septiembre 2005



Universidad de Los Andes © Derechos Reservados 2005

*Dedicado a todas aquellas personas
que hicieron posible el terminar este
largo camino*

www.bdigital.ula.ve

Índice

Índice de Figuras	vi
Agradecimientos	ix
Resumen	x
1 Introducción	1
2 Definición del problema	3
2.1 El problema	3
2.2 Objetivos	3
2.2.1 Objetivo general	3
2.2.2 Objetivos específicos	4
2.3 Justificación	4
3 Sistemas de control y técnicas de control clásicas	6
3.1 Definición de un sistema de control	7
3.1.1 Elementos de un sistema de Control	7
3.2 Fases de diseño de sistemas de control	7
3.2.1 Descripción de la planta y objetivos	7
3.2.2 Especificaciones de control	13
3.2.3 Métodos de diseño para sistema de control en lazo cerrado	17
3.2.4 Técnicas de control clásicas	19
3.2.5 Implementación del control	37

4	Controladores Lógicos Programables (Control-Logix)	43
4.1	Definición de un autómata programable	44
4.2	Antecedentes históricos	44
4.3	Campos de aplicación	45
4.4	Ventajas y desventajas de un automáta programable	46
4.5	Estructura de un automáta programable	47
4.5.1	Estructura Externa	47
4.5.2	Estructura Interna	48
4.6	Plataformas Logix5000	51
4.6.1	Descripción general de un sistema Control-Logix	56
4.6.2	Módulos de entrada - salida del Control-Logix	56
4.6.3	Módulos de E/S analógicas Control-Logix	64
4.6.4	Módulos de E/S digitales Control-Logix	68
4.6.5	Módulos de interface de comunicación Control-Logix ethernet	72
4.6.6	Organización de un proyecto en el sistema Control-Logix	73
5	Implementación de técnicas de control clásicas bajo Control-Logix	78
5.1	Parte experimental	78
5.2	Implementación digital de los algoritmos de control	120
5.3	Análisis de resultados	126
6	Conclusiones	128
	Bibliografía	130
A	Programas elaborados en RSLogix 5000	134
B	Interfaz gráfica por RSView-32	138

Índice de Figuras

3.1	bucle de control clásico	8
3.2	Representación de los sistemas	12
3.3	Compensación en serie	19
3.4	Esquema de compensación adelanto atraso	21
3.5	Esquema de un controlador PID clásico	24
3.6	Esquema de un controlador PID clásico	27
3.7	Controlador con windup donde la salida del actuador es estimada por un modelo matemático.	29
3.8	Esquema de compensación por realimentación del estado.	30
3.9	Representación en espacio estado de un sistema por diagrama de bloques	32
3.10	Realimentación del vector de estados para un sistema.	33
3.11	Realimentación de salida con observador.	36
3.12	Esquema básico de control digital.	38
3.13	. Aproximación de la integral por la regla rectacgular.	40
3.14	. Aproximación de la integral por la regla del trapecio.	41
4.1	Estructura Interna general de un automáta.	48
4.2	Sistema Control-Logix.	56
4.3	Comunicación del sistema Control-Logix.	57
4.4	Módulos de E/S Control-Logix.	57
4.5	Características físicas de los módulos de E/S Control-Logix.	61
4.6	Funcionamiento de un módulo de entrada	66
4.7	Cableado en modo diferencial	68
4.8	Ejemplo de cableado de corriente	69

4.9	Ejemplo de cableado de voltaje	70
4.10	Funcionamiento de un módulo de entrada digital	70
4.11	Vista frontal del módulo de interface ethernet	74
4.12	Vista frontal del módulo de interface ethernet	75
4.13	Aplicación del módulo de interface ethernet	75
4.14	Instrucción en el lenguaje escalera	77
5.1	Sistema de tanques Feedback Basic Process 38-100	79
5.2	Sistema Control-Logix	83
5.3	Respuesta del sistema para una entrada escalón	84
5.4	Relación corriente (mA) Vs. altura en (cm)	86
5.5	Respuesta del sistema ante distintas entradas	88
5.6	Respuesta del sistema ante distintas entradas	89
5.7	Variación por encima del punto de operación	90
5.8	Variación por debajo del punto de operación	91
5.9	Validación del modelo (modelo 1 vs datos de bajada)	92
5.10	Validación del modelo (modelo 1 vs datos de subida)	93
5.11	Validación del modelo (modelo 2 vs datos de subida)	94
5.12	Validación del modelo (modelo 2 vs datos de bajada)	95
5.13	Respuesta en el tiempo por medio del espacio estado	96
5.14	Relación entre variables originales y variables perturbadas	96
5.15	Montaje del sistema Control-Logix con la planta	97
5.16	Esquema de comepeación en adelanto-atraso	98
5.17	Diagrama de Bode del sistema sin compensar con la ganancia ajustada	99
5.18	Simulación de la respuesta del sistema con controlador en adelanto atraso	101
5.19	Ley de control aplicada adelanto-atraso	102
5.20	Respuesta del sistema con controlador en adelanto atraso	103
5.21	Ley de control aplicada adelanto atraso	104
5.22	Respuesta del sistema con controlador en adelanto atraso	105
5.23	Ley de control aplicada adelanto atraso	106
5.24	Esquema de compensación de un controlador PI	106
5.25	Simulación de un controlador PI	108

5.26	Ley de control PI simulada	109
5.27	Respuesta del sistema con un controlador PI	110
5.28	Ley de control PI aplicada	111
5.29	Respuesta del sistema con un controlador PI	112
5.30	Ley de control aplicada	113
5.31	Esquema de compensación de un controlador PI Antiwindup	113
5.32	Simulación del controlador PI Antiwindup	114
5.33	Ley de Control PI Antiwindup	115
5.34	Respuesta del sistema con un controlador PI Antiwindup	116
5.35	Ley de control PI Antiwindup aplicada	117
5.36	Respuesta del sistema con un controlador PI ideal	118
5.37	Ley de control PI aplicada	119
5.38	Esquema de compensación por realimentación del vector de estados . .	119
5.39	Simulación del controlador por realimentación del vector de estados . .	120
5.40	Ley de control (por realimentación del vector de estados)	121
5.41	Simulación del controlador por realimentación del vector de estados . .	122
5.42	Ley de control (por ralimentación del vector de estados)	123
5.43	Respuesta del sistema con un controlador por realimentación del vector de estados perturbada	124
5.44	Ley de control (por ralimentación del vector de estados perturbada) . .	125
A.1	Controlador digital adelanto-atraso	134
A.2	Controlador digital adelanto-atraso	135
A.3	Controlador digital adelanto-atraso	135
A.4	Controlador digital adelanto-atraso	136
A.5	Controlador digital por realimentación del vector de estados	136
A.6	Controlador digital por realimentación del vector de estados	137
A.7	Controlador digital PI	137
B.1	Interfaz gráfica diseñada por RSVIEW	138

Agradecimientos

A Dios Todo Poderoso.

Al Dr. Addison Ríos y Dr. Francklin Rivas, por su incondicional apoyo y guía en el desarrollo del trabajo.

A la Ing. Nelly Maldonado por su orientación y apoyo en la culminación del proyecto de grado.

A todas aquellas personas que de alguna manera brindaron su colaboración para el logro del presente trabajo.

www.bdigital.ula.ve

Gracias ...

Resumen

Los sistemas industriales complejos requieren de novedosas técnicas de control a objeto de asegurar una producción confiable. Desde el punto de vista de implantación, esas técnicas de control deben ser estudiadas según el estado del arte en tecnologías de automatización industrial.

Así, en este trabajo se plantea un sistema de control automatizado para controlar el nivel de agua de un sistema de tanques (Feedback Basic Process 38-100 [2]) a partir de una plataforma SCADA comercial constituida por un autómata programable (PLC) denominado Control-Logix [13] y el software de visualización RSVIEW-32 [9], ambas tecnologías de Rockwell Automation. Se aprovechan las funciones matemáticas y herramientas del sistema Control-Logix, para implantar otras técnicas de control distintas al PID, tales como el *compensador adelanto-atraso*, *realimentación del vector de estados* [22] y PID con compensación *anti-windup* [4]. A partir de una identificación del sistema alrededor de un punto de operación [14], con el propósito de regular el nivel de agua en el tanque, y por medio de Matlab realizar las simulaciones de los controladores para comparar los resultados experimentales realizados con el Control-Logix y así validar los diseños obtenidos.

El resultado obtenido es un sistema SCADA que permite recolectar los datos que provienen de los sensores instalados en el sistema de tanques (sensor de nivel de tipo flotador y sensor de flujo), en el cual el operador ejerce acciones de control a distancia como cambios de *set-point*, cierre y apertura de válvulas solenoides. Se trata de una aplicación software especialmente diseñada para funcionar sobre un computador, proporcionando comunicación con los sensores y el actuador (servo-válvula) del sistema

de tanques para controlar el proceso de forma automática desde la pantalla del computador. La información recolectada es utilizada para la toma de decisiones y mejoras en el sistema de control automatizado.

www.bdigital.ula.ve

Capítulo 1

Introducción

El desarrollo de novedosas tecnologías permite implementar sistemas de control automatizado. El control se basa en computadores que permite supervisar y controlar a distancia una instalación de cualquier tipo. Esto es lo que se conoce como un sistema SCADA que es un acrónimo que significa Control Supervisorio y Adquisición de Datos. Hoy en día es fácil hallar un sistema SCADA realizando labores de control automático en cualquiera de sus niveles, aunque su labor principal sea de supervisión y control por parte del operador. El control, actúa en todas las áreas y en todos los niveles de las industrias. Prácticamente todas las actividades de la empresa están bajo alguna forma de control o monitoreo.

La implementación de técnicas de control se basa en el estudio de tecnología de punta como es el caso del Control-Logix, dispositivo que permite controlar procesos en tiempo real de forma secuencial que dispone de herramientas de fácil manejo para programarlos. Estas herramientas son: el software RSLogix 5000, RSLink, RSNetWorx y RSview-32, los paquetes proporcionan funciones para el desarrollo informático, de comunicaciones, para programar redes y diseñar interfaces gráficas respectivamente.

Para mostrar el funcionamiento del Control-Logix se realizan las pruebas sobre el sistema de tanques Feedback Basic Process 38-100 implementando algunas técnicas de control clásicas basadas en el control realimentado, como por ejemplo

realimentación del vector de estados, compensador en adelanto atraso, controlador PI-antiwindup, entre otros, este tipo de control se enfoca sobre el uso de la información de los resultados anteriores, para corregir posibles desviaciones futuras del estándar aceptable.

www.bdigital.ula.ve

Capítulo 2

Definición del problema

2.1 El problema

El Control-Logix tiene diversas aplicaciones y se quiere enfocar su uso principalmente en el área de control de procesos.

Este equipo cuenta con módulos que permite implementar control PID sobre un determinado sistema mediante un ajuste de la constante proporcional, derivativa e integral.

Haciendo uso de las funciones matemáticas que presenta el Control Logix se desea implementar otras técnicas de control (realimentación de vector de estados, compensadores adelanto-atraso, entre otros), y se observará el potencial que presenta el equipo para construir algoritmos de control distinto del PID.

2.2 Objetivos

2.2.1 Objetivo general

Implementar técnicas de control clásicas sobre una planta determinada bajo Control-Logix.

2.2.2 Objetivos específicos

1. Comprender qué es y para qué sirve un autómata programable (PLC), en el caso particular del Control-Logix, tecnología de Rockwell Automation.
2. Manejar y programar el Control-Logix (programación escalera).
3. Seleccionar una planta para aplicar control.
4. Implantar técnicas de control clásicas sobre el proceso seleccionado usando tecnología de punta (Control-Logix).

2.3 Justificación

El autómata programable denominado Control-Logix (tecnología de Rockwell Automation) tiene diversas aplicaciones y se quiere enfocar su uso principalmente en el área de control de procesos para implantar técnicas de control, como son compensación en adelanto atraso, realimentación del vector de estados, PI ideal y una variante del PI que se encarga de compensar los efectos que produce la saturación, el efecto se denomina windup.

Mediante la implementación de las técnicas de control se quiere evaluar el desempeño del autómata programable para labores de control en tiempo real con el sistema de tanques (Feedback Basic Process 38-100) y estudiar los software disponibles como herramientas para programar el Control-Logix. Esto tiene por objetivo estudiar las restricciones impuestas por seguridad o limitaciones de componentes presentes en el sistema a controlar, por ejemplo se puede citar los actuadores que al sobrepasar los límites de funcionamiento produce la saturación y trae como desventaja desmejoramiento de la velocidad de respuesta. Al tomar en cuenta todas las restricciones conduce al diseño de un sistema de control óptimo.

El estudio de tecnologías de punta es una herramienta útil para diseñar un sistema de control en tiempo real, porque permite automatizar el sistema y realizar

el control y supervisión a distancia desde una computadora, una ventaja de recolectar datos es que a través del tratamiento y análisis de los mismos conduce a la toma de decisiones para mejorar el comportamiento del sistema de control.

www.bdigital.ula.ve

Capítulo 3

Sistemas de control y técnicas de control clásicas

Este Capítulo contiene los conceptos básicos y fases de diseño de un sistema de control. La Sección 3.1 presenta una introducción y breve definición de los términos básicos para comprender lo que es un sistema de control y cuales son sus elementos. La Sección 3.2 explica la metodología a seguir en el diseño de un sistema de control y algunas herramientas con las que cuenta el diseñador para implementar el control.

Los sistemas de control se utilizan en cualquier circunstancia porque siempre existen sistemas que se desean controlar. Debido a que la mayoría de los sistemas de control se ajustan al proceso estudiado se requiere de un estudio detallado de la teoría de control moderna. Por ello para diseñar un sistema de control, deben definirse tres términos básicos.

Proceso

Se define como una operación continua, marcado por cambios graduales que suceden uno al otro en forma fija, con el fin de obtener un resultado, y en este caso particular se refiere a cualquier operación sometida a control [22].

Sistema

Consiste en un conjunto de elementos que actúan coordinadamente para lograr un objetivo determinado.

Planta

Es el elemento físico que se desea controlar. La planta puede ser por ejemplo un motor, un horno, una nave, un tanque de combustible, sistema de nivel de líquidos entre otros [22].

3.1 Definición de un sistema de control

Un sistema de control estudia la conducta de un proceso con el fin de regular de manera óptima su funcionamiento. Un sistema de control esta compuesto por los siguientes elementos:

3.1.1 Elementos de un sistema de Control

Los sistemas de control están consituidos por los sensores que son los encargados de medir las variables que intervienen en el proceso, el regulador que tiene como función calcular los algoritmos de control basado en un modelo matemático que depende de las señales transmitidas por los sensores. Los actuadores que reciben la señal calculada por el regulador y por último la planta que es el proceso físico que se desea controlar y que está sujeta a perturbaciones 3.1.

3.2 Fases de diseño de sistemas de control

3.2.1 Descripción de la planta y objetivos

El diseño de un sistema de control considera la concepción del proceso y la de su control, para ello se parte de una información inicial constituida por:

- Un conocimiento del proceso a controlar, expresado mediante un modelo.
- Unos objetivos de control, expresado mediante un índice, una referencia y/o unas especificaciones.
- Vías de acceso al comportamiento actual del proceso (sensores y accionadores).
- Restricciones impuestas por seguridad o limitaciones de componentes.

Un esquema de control básico es el bucle de la Figura 3.1

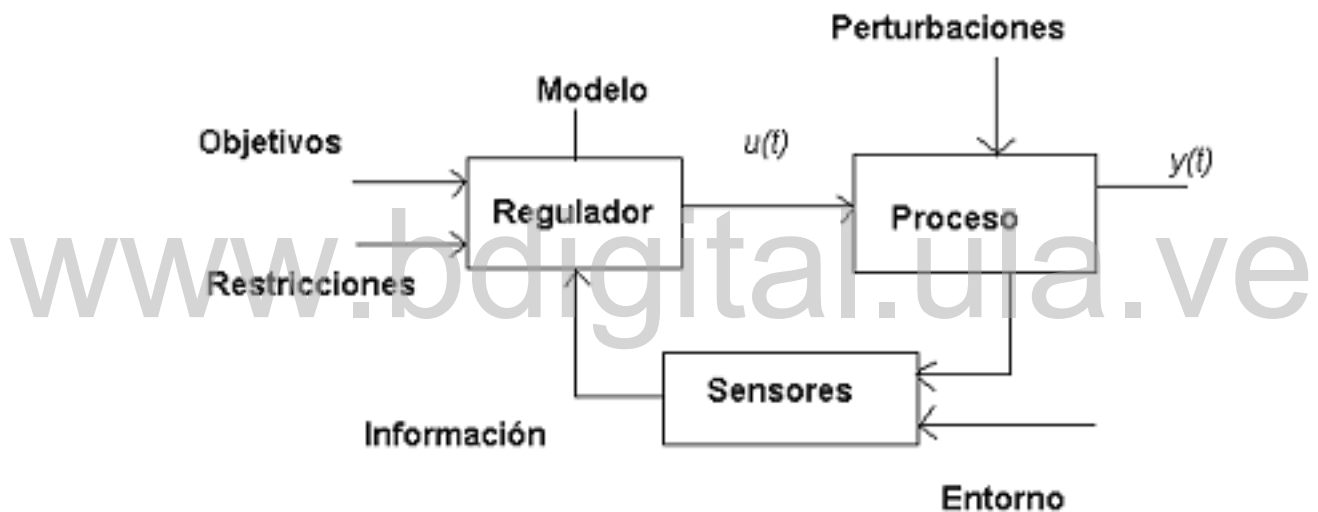


Figura 3.1: bucle de control clásico

En la resolución de un problema de control para una determinada planta o proceso, se puede distinguir las siguientes fases [16]:

1. Descripción de la planta y los objetivos.
2. Modelado de la planta y de las señales.
3. Selección de variables: controladas, medidas y manipuladas.
4. Configuración del control: interacción entre variables.

5. Especificaciones de control.
6. Metodología de diseño de control.
7. Validación del diseño: ajuste de parámetros (prototipo)
8. Implementación del control.
9. Ajuste en planta.
10. Evaluación de prestaciones.

Todas estas etapas deben ejecutarse de forma recurrente, volviendo a etapas previas si no se satisfacen los objetivos previstos. El enfoque que se pretende es aquel en el que todas o algunas decisiones anteriores se toman conjuntamente, o, de forma menos exigente, las opciones actuales se toman teniendo en cuenta el impacto que decisiones posteriores van a tener en ellas. Según el nivel de decisión se pueden agrupar [16]:

www.bdigital.ula.ve

Estrategias de planta (flujo de información)

- Sensores y accionadores más relevantes.
- Estructuras descentralizadas, jerárquicas, centralizadas.
- Orden, retardos, algoritmos.

Estructura del regulador

- Modelo de perturbaciones.
- Orden, retardos, algoritmos.

Ajuste de parámetros

- Requerimientos o especificaciones.
- Optimización local.

El primer bloque supone la existencia de un proceso a controlar sobre el que se decide que se mide y sobre qué y como actúa. En el segundo bloque se diseña el controlador, generalmente sin tener en cuenta las restricciones de implementación, y finalmente, si se decide el tipo de control a emplear, se realiza un ajuste de parámetros en planta, con una estructura rígida e impuesta.

Respecto a la implementación del control también se consideran varias opciones tales como [16]:

- Control manual, mediante el operador.
- Control analógico o en tiempo continuo.
- Control lógico mediante autómatas.
- Control digital mediante computador.
- Control local/jerárquico/distribuido.
- Control Integral.

La planta comprende una serie de subprocesos y se pretende tener un control coordinado. Para esto se intenta suprimir las actuaciones del operador por conexiones vía digital que permite tener accesible toda la información de la planta.

Para el estudio de sistemas de control, el diseñador debe ser capaz de modelar sistemas y analizar las características dinámicas, Ogata [22] define un modelo matemático de un sistema como "un conjunto de ecuaciones que representan la dinámica del sistema con precisión, o, al menos bastante bien".

Para la primera fase del diseño es importante tener conocimientos para el análisis de los sistemas físicos y esto es posible a través de la representación del sistema por un modelo matemático.

Para obtener un modelo matemático de cualquier sistema físico se utilizan las leyes físicas relacionadas con el proceso (ecuaciones diferenciales), o en su defecto resultados experimentales debidamente tratados para aplicar lo que se conoce con el nombre de identificación de sistemas (paramétrica y no paramétrica).

Obtener un modelo matemático razonable es la parte más importante de todo el análisis, porque las fases siguientes dependen del modelo matemático obtenido.

Para obtener el modelo matemático se establecen las variables que intervienen en el proceso, para posteriormente interrelacionarlas entre sí y obtener un modelo que represente el comportamiento de la planta.

Los sistemas se clasifican en función de las características de la planta como sigue [17]:

Sistemas Lineales / No lineales

La mayoría de los sistemas de control son no lineales. Sin embargo, en un punto de operación puede asumirse lineal, en cuyo caso se obtiene un modelo lineal con el cual se puede trabajar.

Sistemas Invariantes / Variantes

Los invariantes son aquellos que tienen parámetros que no varían con el tiempo. Su respuesta no cambia para una entrada dada en función del tiempo.

Sistemas Continuos / Discretos

En un sistema continuo todas las variables son función de un tiempo continuo. Los discretos se caracterizan por tener valores en instantes fijos.

Sistemas SISO / MIMO

Los SISO (Single Input Simple Output) tienen una entrada y una salida. Los MIMO tienen varias entradas y varias salidas.

Sistemas de Parámetros Concentrados / Distribuidos

Los sistemas que pueden describirse mediante ecuaciones diferenciales ordinarias son con parámetros concentrados. Los que deben describirse mediante ecuaciones diferenciales parciales son con parámetros distribuidos.

Sistemas Determinísticos / Estocásticos

Es determinístico si la respuesta a la entrada es predecible y repetible; de no serlo, es estocástico.

Un sistema admite las siguientes representaciones como se ve en la Figura 3.2

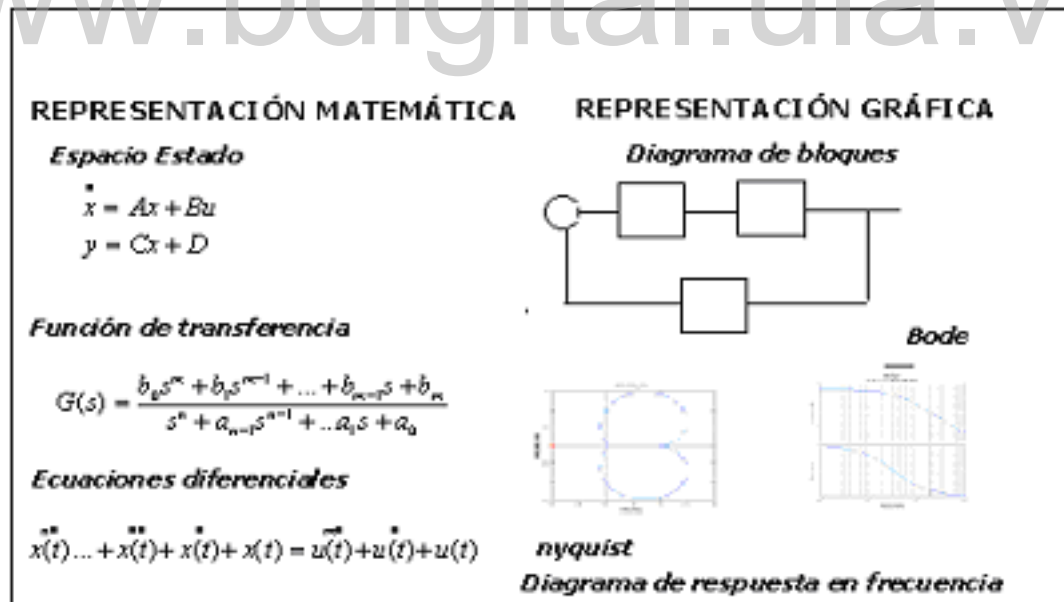


Figura 3.2: Representación de los sistemas

Dependiendo del sistema que se trate y de las circunstancias, un modelo matemático puede ser más convincente que otro. Por ejemplo, en problemas de

control óptimo, es mejor representaciones en espacio estado, para el caso de análisis de la respuesta transitoria o de la respuesta en frecuencia de sistemas lineales con una entrada y una salida invariantes en el tiempo, la representación en función de transferencia puede ser más convincente que cualquiera otra.

En la Figura 3.2 también se muestra que un sistema se puede representar gráficamente por medio de bode y de diagrama bloques y proveen la misma información del sistema que una representación matemática, también es posible de una representación obtener otra y viceversa.

3.2.2 Especificaciones de control

Los sistemas de control se diseñan para realizar tareas específicas, los requerimientos impuestos sobre el sistema de control se detallan como especificaciones de desempeño, y en esto consiste la compensación en la modificación de la dinámica del sistema para satisfacer las especificaciones determinadas.

Las especificaciones de diseño por lo general se refieren a la precisión, la estabilidad relativa y velocidad de respuesta. Las especificaciones se proporcionan en términos de valores numéricos precisos. En otros casos se ofrecen parcialmente en términos de valores numéricos precisos y parcialmente en términos de valores cualitativos.

Durante el curso del diseño, puede ser necesario modificar las especificaciones de desempeño, ya que las proporcionadas nunca se cumplan o conduzcan a un sistema muy costoso. Por lo general, las especificaciones no deben ser más rigurosas de lo necesario para efectuar la tarea definida.

La parte mas importante de un sistema de control es el planteamiento preciso de las especificaciones de desempeño a fin de producir un sistema de control óptimo para el propósito determinado.

Los requerimientos de un sistema de control se dividen de la siguiente forma [27]:

- Especificaciones de desempeño.
 - Precisión estacionaria.
 - Respuesta transitoria.
 - Especificaciones frecuenciales.
- Especificaciones de Robustez.
 - Estabilidad relativa.
 - Sensibilidad de los parámetros.
 - Rechazo de perturbaciones y eliminación del ruido.
 - Esfuerzo de control.
- Índice de desempeño.

Los requerimientos plantean objetivos de acuerdo al proceso a controlar y se definen de la siguiente forma:

Precisión estacionaria

El objetivo principal es eliminar el error en estado estacionario a determinado tipo de entrada (escalón, rampa, parábola, función definida a trozos, entre otros). El error en estado estacionario depende del tipo de sistema y de las perturbaciones.

El error en estado estacionario se disminuye si se agregan polos en el origen o se incrementa la ganancia, tomando en cuenta que existe un compromiso entre errores pequeños y la estabilidad relativa y respuesta transitoria.

Respuesta transitoria

El fin de diseño es obtener ciertas características de la respuesta temporal en lazo cerrado, normalmente ante una entrada escalón, se escoge una señal de prueba de tipo escalón puesto que contiene un espectro suficientemente amplio de frecuencias. Por lo general los requerimientos de la respuesta transitoria se describen en términos de polos y ceros, que se denominan polos dominantes del sistema que se encuentran más cercanos al origen.

Las principales características que modifican los polos dominantes son tiempo de crecimiento, sobredisparo máximo, tiempo de establecimiento, tiempo pico y tiempo de retardo para sistemas de segundo orden, ya que las especificaciones transitorias se expresan en función de estas características.

Especificaciones frecuenciales

El objeto de diseño es obtener ciertas características de la respuesta frecuencial en lazo cerrado.

Las especificaciones frecuenciales son: El pico de resonancia que se relaciona con la estabilidad relativa (por lo general los valores aceptados se encuentran entre 1.1 y 1.5), Ancho de banda que indica la velocidad de respuesta, características de robustez y filtrado de ruido.

Las especificaciones frecuenciales se estipulan dentro de ciertos límites admisibles.

Estabilidad relativa

El propósito del diseño es obtener una determinada velocidad de respuesta del sistema en lazo cerrado.

Los criterios más usados para medir la estabilidad relativa son el margen de fase y el margen de ganancia. Los valores para un buen desempeño son un margen de ganancia mayor a 6db y margen de fase entre 30° y 60° por lo general para sistemas de segundo orden.

Sensibilidad de los parámetros

La finalidad del diseño es lograr que el sistema en lazo cerrado se comporte de forma deseada a pesar de errores (incertidumbres) o cambios en el modelo del proceso.

La sensibilidad es el grado con el cual cambios en los parámetros afectan el desempeño global sistema. Los valores de ganancias de lazo altas contribuyen a la disminución de la sensibilidad en lazo cerrado, debido a cambios en los parámetros. Se debe buscar un compromiso entre estabilidad y sensibilidad.

www.bdigital.ula.ve

Rechazo de perturbaciones

La idea del diseño es lograr que la señal controlada sea igual a la señal de referencia a pesar de la influencia permanente de las perturbaciones. La realimentación reduce el efecto de las perturbaciones y el ruido en el comportamiento del sistema.

Esfuerzo de control

Se busca lograr otros objetivos de control teniendo en cuenta los límites de las señales de control. La mayoría de los actuadores tienen límites en su magnitud y velocidad de cambio, lo cual tiene como efecto restringir el comportamiento y robustez en lazo cerrado. Por ejemplo, la saturación del actuador puede causar inestabilidad y una respuesta transitoria indeseable.

El esfuerzo de control crece con la estabilidad relativa y al inicio del diseño se debe especificar el límite de la magnitud, velocidad de la actuación y la respuesta del

sistema en lazo cerrado a grandes señales de entrada.

Índice de desempeño

El propósito del diseño es minimizar cierto índice de desempeño, el índice de desempeño es una medida cuantitativa (positiva) del desempeño de un sistema y se escoge de manera que se hace énfasis en los requerimientos importantes del sistema.

Los índices más comunes son:

- ISE (error cuadrático integral).
- ITAE (integral del tiempo multiplicado por el valor absoluto del error).

3.2.3 Métodos de diseño para sistema de control en lazo cerrado

La compensación de un sistema se reduce al diseño de un filtro que tiende a compensar las características inconvenientes o inalterables de la planta cumpliendo en cierta forma con los requerimientos de diseño planteados.

Los compensadores se pueden diseñar por dos enfoques principales [15]:

Enfoque saliente

El enfoque saliente diseña un compensador interno y evalúa el rendimiento del sistema global.

Se puede seleccionar cualquiera de los siguientes métodos que se mencionan a continuación:

- Ajuste de ganancia.

- Compensación por atraso de fase.
- Compensación por adelanto de fase.
- Compensadores PI, PD, PID.

A su vez estos compensadores se diseñan por el enfoque:

- De compensación por el lugar geométrico de las raíces.
- De respuesta en frecuencia.
 - Enfoque de la traza polar.
 - Enfoque de las trazas de Bode.
- En el espacio estado.

Enfoque entrante

El enfoque entrante consiste en buscar una función de transferencia global que cumple ciertas especificaciones de diseño, y luego de determina un compensador adecuado para tal fin.

Para este enfoque la función de transferencia global encontrada es implementable si existe una configuración tal que:

- Todos los compensadores utilizados deben tener función de transferencias racionales y propias.
- El sistema resultante debe tener un planteamiento correcto y ser totalmente estable.
- No puede existir ninguna conexión directa de la salida y la entrada sin pasar por la función de transferencia de la planta.

Para efectos de este proyecto se implementan compensadores por el enfoque saliente, para lo cual, se prepara un modelo matemático del sistema de control y se

ajustan los parámetros del compensador.

Una vez obtenido un modelo matemático satisfactorio, se construye un prototipo y se prueba el sistema en lazo abierto. Si se asegura la estabilidad absoluta en lazo abierto se cierra el lazo y se prueba el desempeño del sistema en lazo cerrado resultante.

Mediante el enfoque de prueba y error (enfoque saliente), se debe cambiar el prototipo hasta que el sistema cumpla las especificaciones, debido a que no se toman en cuenta consideraciones en el diseño original tal como efectos de carga entre los componentes, falta de linealidad, parámetros distribuidos, entre otros, por lo que es posible que el desempeño real del sistema prototipo difiera de las predicciones teóricas. También es importante señalar que el resultado final no es único, debido a que tal vez no se defina con precisión la solución óptima cuando se incorporan las especificaciones.

3.2.4 Técnicas de control clásicas

La Figura 3.3 muestra el esquema de compensación a utilizarse para el diseño de un sistema de control realimentado denominado compensación en serie.

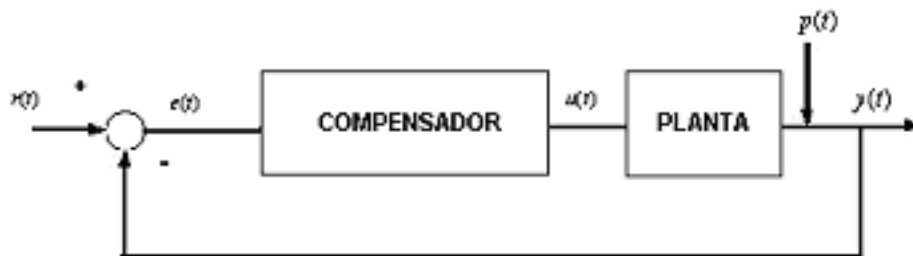


Figura 3.3: Compensación en serie

La Figura 3.3 representa el esquema básico de un sistema de control donde $r(t)$ representa la señal de referencia o "set point", $y(t)$ es la variable de salida que se

desea controlar y $p(t)$ las posibles perturbaciones en el sistema. La planta contiene el modelo matemático del sistema real a controlar y viene representado por una función de transferencia para este caso al igual que el compensador.

El esquema de control trata el problema de seguimiento (o del servomecanismo), porque se pretende que la salida reproduzca asintóticamente a la referencia $r(t)$. Es común que la referencia sea un valor constante $r(t) = a \forall t \geq 0$. En el caso que la referencia sea nula, se trata el problema de regulación y tiene como propósito que el sistema sea asintóticamente estable y que la respuesta a condiciones iniciales producidas por perturbaciones tienda a cero.

Dependiendo de los requerimientos de diseño se escoge una estructura de controlador con sus respectivos parámetros para cumplir las mismas. Las estructuras de controladores más conocidas son las siguientes:

Compensadores en adelanto atraso

El compensador viene representado por una función de transferencia y no es más que agregar polos y ceros a la función de transferencia en lazo abierto para producir un efecto deseado sobre el comportamiento del sistema.

La adición de un polo a la función de transferencia en lazo abierto tiende a halar el lugar geométrico de las raíces a la derecha, lo cual tiende a disminuir la estabilidad relativa del sistema y disminuir el asentamiento de la respuesta.

La adición de un cero a la función de transferencia en lazo abierto tiende a halar el lugar geométrico de las raíces hacia la izquierda, con lo cual el sistema tiende a ser más estable, y aumentar el asentamiento de la respuesta.

La compensación de adelanto produce en esencia, un mejoramiento razonable en la respuesta transitoria y un cambio pequeño en la precisión en estado estable y puede acentuar los efectos de ruido a altas frecuencias. Por su parte, la compensación

en atraso produce un mejoramiento notable en la precisión en estado estable a costa de aumentar el tiempo de respuesta transitoria. Suprime los efectos de las señales de ruido a altas frecuencias. La compensación adelanto-atraso combina las características de la compensación de adelanto con la compensación de atraso. El esquema con compensación adelanto atraso se muestra en la figura 3.4.

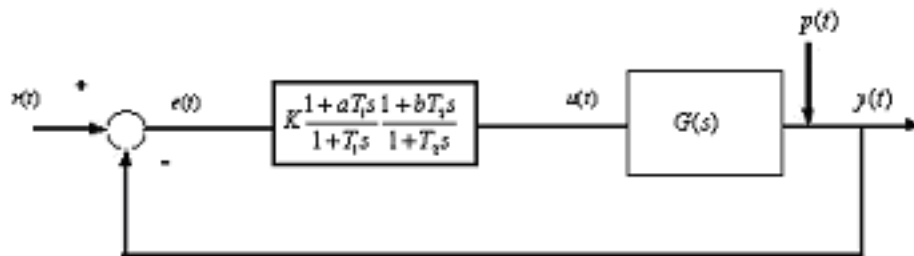


Figura 3.4: Esquema de compensación adelanto atraso

La función de transferencia del controlador es:

$$G(s) = K \frac{1 + aT_1s}{1 + T_1s} * \frac{1 + bT_2s}{1 + T_2s} \quad (3.1)$$

Donde: $b > 1$; $0 < a < 1$

Para ajustar los parámetros se selecciona un enfoque de diseño mencionado anteriormente (queda a criterio del diseñador escoger con cual desea trabajar).

El método que se expone aquí para calcular los parámetros del controlador adelanto-atraso es el enfoque por respuesta en frecuencia expuesto por [15] y comprende los siguientes pasos:

Paso 1:

Calcular la ganancia K para que se cumplan las especificaciones en régimen permanente (error de posición, de velocidad o aceleración dependiendo del tipo de sistema que se

desea controlar).

Por ejemplo si se trata de sistemas de tipo 0 se calcula K para mejorar el error de posición, si es de tipo 1 se busca mejorar el error de velocidad y así sucesivamente.

Paso 2:

Fijar un valor de K y se obtiene el gráfico de Bode de $KG(s)$.

Paso 3:

Evaluar usando el compensador en adelanto lo concerniente a margen de fase, frecuencia de cruce, ancho de banda.

Margen de Fase:

Es el retraso de fase que se puede añadir a la función de transferencia en la frecuencia de cruce de ganancia en lazo abierto, antes de que el sistema se haga inestable manteniendo la ganancia constante. La frecuencia de cruce de ganancia w_{gc} es la frecuencia a la cual la magnitud $|KG(jw_{gc})|$ es unitaria. El margen de fase γ es $\gamma = 180^\circ + \Phi$ donde Φ es la fase de la función de transferencia en lazo abierto en la frecuencia de cruce. [22].

Margen de Ganancia:

Es la cantidad de ganancia que se puede añadir al sistema antes de que se haga inestable. El Margen de ganancia es el recíproco de la magnitud $|KG(jw_{pc})|$ en la frecuencia (w_{pc}) a la cual el ángulo de fase es -180° . En términos de decibeles es $K_g(dB) = 20 * \log |KG(jw_{pc})|$ [22].

Paso 4:

Fijar la frecuencia de cruce de ganancia w'_{gc} en $\Phi = -180^\circ$ a partir del diagrama de bode obtenido en el paso 2 y halle el margen de fase.

Paso 5:

Ubicar el cero del controlador de atraso una década por debajo de w'_{gc} .

$$\frac{1}{aT_1} = \frac{w'_{gc}}{10} \Rightarrow aT_1 = \frac{10}{w'_{gc}} \quad (3.2)$$

Calcule:

$$\begin{aligned} \Phi_m &= \psi + \theta + 6^\circ \\ \psi &= \gamma_{deseado} - \gamma_{w'_{gc}} \\ b &= \frac{1 + \sin(\Phi_m)}{1 - \sin(\Phi_m)} \\ T_2 &= \frac{1}{\sqrt{bw'_{gc}}} \end{aligned} \quad (3.3)$$

Paso 6:

Calcular la compensación del controlador atraso para atenuar la ganancia.

Ganancia debida al compensador de adelanto: $10 * \log(b)$

Ganancia de la planta en w'_{gc} : $20 * \log |KG(j * w'_{gc})|$

Compensación del controlador en atraso: $20 * \log(a) = -(10 * \log(b) + 20 * \log |KG(j * w'_{gc})|)$

De la última ecuación se obtiene el parámetro a y se calcula:

$$T_1 = \frac{10}{a * w'_{gc}} \quad (3.4)$$

nota: Si $a > 1$ el diseño esta malo, no se necesita un compensador en atraso-adelanto, solo adelanto.

Controlador PID clásico

El esquema de representación de un regulador PID clásico [23] continuo viene dado en la Figura 3.5.

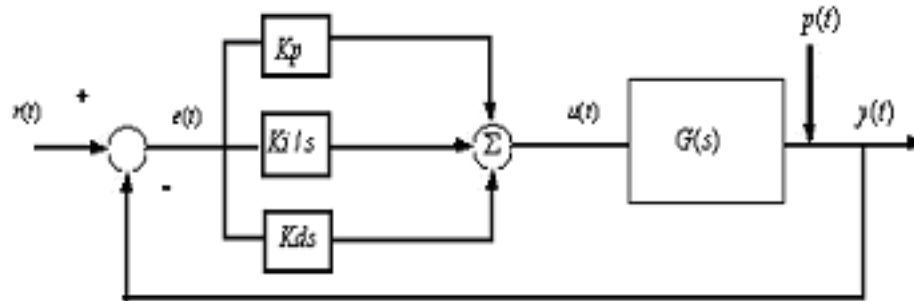


Figura 3.5: Esquema de un controlador PID clásico

La ecuación de un PID clásico está caracterizada por los coeficientes de acción proporcional, derivativa e integral y admite dos versiones de acuerdo a los parámetros de ajuste [23] y son:

$$u(t) = Kp * e(t) + Kd * \frac{de(t)}{dt} + Ki * \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (3.5)$$

Donde:

- Kp es constancia de ganancia proporcional (adimensional)
- Ki es constante de ganancia integral (1/seg.).
- Kd es constante de ganancia derivativa (seg.)

$$u(t) = K * (e(t) + Td * \frac{de(t)}{dt} + \frac{1}{Ti} * \int_0^t e(\tau) d\tau) \quad (3.6)$$

Donde:

- Ti es constante de ganancia reset (min. por repetición)
- Td es constante de ganancia (min.)
- K es ganancia del controlador (adimensional)

La ecuación (3.5) viene expresada en función de las constantes Kp Kd y Ki o ganancias independientes y la ecuación (3.6) viene expresada en función de K T_d y T_i o ganancias dependientes, La diferencia entre ellas está en que la ecuación (3.6), cuando se ajusta la ganancia del controlador también se cambian los términos integral y derivativo mientras que en la otra los términos operan independientemente.

Se puede realizar las respectivas conversiones entre los términos ISA y ganancias independientes como muestran las expresiones siguientes:

$$\begin{aligned} Kp &= K \\ Ki &= \frac{K}{T_i * 60} (seg^{-1}) \\ Kd &= K * T_d * 60 (seg) \end{aligned} \quad (3.7)$$

Hallando la transformada de Laplace de las ecuaciones (3.5) (3.6) obtenemos La función de transferencia del controlador PID en sus dos versiones respectivamente:

$$G(s) = \frac{Kp * s + Kd * s^2 + Ki}{s} \quad (3.8)$$

$$G(s) = \frac{K(1 + T_i * s + T_d * T_i * s^2)}{T_i s} \quad (3.9)$$

Si se anula el valor de Kd ó T_d en las funciones de transferencia (3.8) y (3.9) se convierten en un controlador PI ideal cuyas funciones de transferencia valen:

$$G(s) = \frac{Kp * s + Ki}{s} \quad (3.10)$$

$$G(s) = \frac{K(\frac{1}{T_i} + s)}{s} \quad (3.11)$$

La expresión obtenida puede interpretarse como un compensador por atraso de fase con un polo ubicado en el origen y el cero en $\frac{1}{T_i}$.

Si se hace tender el valor de T_i a infinito ó eliminamos Ki el compensador PID se transforma en un compensador PD ideal cuya función de transferencia vale:

$$G(s) = Kp + Kd * s \quad (3.12)$$

$$G(s) = K(1 + T_d * s) \quad (3.13)$$

Este compensador posee un cero en el semiplano izquierdo a la pulsación angular $\frac{1}{T_d}$ que desplaza hacia la izquierda el lugar de las raíces del sistema en lazo cerrado ejerciendo una acción estabilizadora. Si $T_i \gg T_d$ puede verificarse que el compensador PID resultante posee dos polos y un cero real, y se interpreta como un compensador por adelanto y atraso de fase, en el cual el polo de baja frecuencia se ha desplazado al origen y el de alta frecuencia hacia el infinito.

Para el ajuste de los parámetros del controlador puede procederse de diversas formas dependiendo del proceso a controlar y de la información disponible.

Se dispone de los siguientes métodos y de la combinación entre ellos [23]:

- Métodos iterativos de ajuste y error.
- Métodos directos.
 - Por optimización.
 - Margen de fase.
 - Asignación de polos.

Los métodos de ajuste y error se utilizan en aplicaciones donde el conocimiento a priori del sistema es muy pobre, se ajustan los parámetros del controlador a partir de la observación de la respuesta temporal del sistema realimentado y de la experiencia del operador referente a las tendencias de las variables controladas en función de los parámetros.

El planteamiento general de la optimización de un sistema realimentado de control, da por solución la ley de control óptima, es decir, la estructura y parámetros del controlador en este caso la del PID a partir de la respuesta temporal del sistema. El más conocido es el método de Ziegler y Nichols, que fue deducido bajo el criterio

de optimización.

A diferencia de los métodos mencionados anteriormente el método de asignación de polos y ceros requiere para su aplicación un buen conocimiento previo del sistema a controlar, lo cual limita su rango de aplicación.

El método de asignación de polos y ceros se basa en establecer las zonas del plano s donde se desea ubicar las raíces del sistema de lazo cerrado y elegir los parámetros del compensador de modo tal que las raíces del sistema realimentado se ubiquen dentro de las zonas establecidas. [23]

Para el método de asignación de polos sigue esta metodología:



Figura 3.6: Esquema de un controlador PID clásico

Paso 1:

Del diagrama bloques (Figura 3.6) obtener la función de transferencia en lazo cerrado completar las ecuaciones.

$$M(s) = \frac{G_c(s)G(s)}{1 + G_c(s)G(s)} \quad (3.14)$$

Donde $G_c(s)$ es la función de transferencia del controlador PID. Cualquiera de las dos representaciones.

Paso 2:

Extraer el polinomio de la función de transferencia en lazo cerrado e igualar los coeficientes del polinomio del mismo grado con el polinomio característico deseado cuyos polos definen la dinámica del sistema según las especificaciones planteadas.

Paso 3:

Resolver el sistema de ecuaciones que se forma y despejar los parámetros del controlador para obtener los valores que satisfacen las especificaciones de diseño.

Todo controlador o elemento accionador real presenta una región de saturación que, sumada al efecto de integrador del PID, puede producir un fenómeno denominado windup, este fenómeno puede causar fuertes sobrepicos en la respuesta temporal del sistema y se pone en evidencia ante cambios importantes de la señal de referencia o perturbaciones de gran amplitud.

Para evitar el efecto del windup y considerar otras formas distintas para el control y la regulación un controlador PID pueden darse muchas variantes al mismo y compensar estos efectos negativos para el diseño del sistema de control.

Se han propuesto varios métodos para compensar el windup, haciendo una revisión histórica encontramos [19]:

- 1967, Fertik y Ross, propusieron el método del Seguimiento Integral.
- 1976, Khaderia y Luyben, implementaron el primer algoritmo antieindup.
- 1987, Doyle y Col, postularon que un PID tendrá problemas de si existen restricciones sobre el actuador.
- 1989, Amstrom y Rundqwist, introdujeron un observador en el sistema para estimar las variables internas del controlador.

En el Astrom [4] encontramos un esquema de control para compensar el fenómeno windup 3.7.

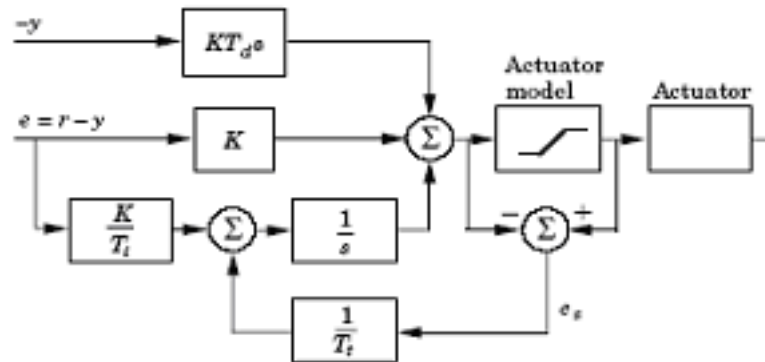


Figura 3.7: Controlador con windup donde la salida del actuador es estimada por un modelo matemático.

Una metodología para el diseño antiwindup podría ser la siguiente:

Paso 1:

Diseñar el PID ideal.

Paso 2:

Definir los límites de los actuadores.

Paso 3:

Añadir al PID ideal los componentes antiwindup cuando se satura el actuador.

- Suspender temporalmente la I.
- Saturar el término I.

La Figura 3.7 muestra una forma de aplicar la metodología, y representa un PID ideal y variante, donde se añade un lazo de realimentación dentro del PID, cuando existe saturación, se modifica el valor del efecto integral para que sea igual a

la salida límite del actuador, si el lazo no presenta saturación el lazo no actúa, T_t es una constante de tiempo que indica la rapidez con la que se hace la corrección y un valor adecuado que se puede seleccionar es $T_t = T_i$ ó $T_t = \sqrt{T_i * T_d}$. En caso que la salida no se pueda medir se toma un modelo matemático del actuador.

Realimentación del vector de estados

Las técnicas para diseñar controladores mencionados hasta ahora utilizan compensación en serie, existen otros esquemas de compensación que se emplean para aplicar otras técnicas de control como es el caso de compensación con realimentación del estado [27]. Figura 3.8.

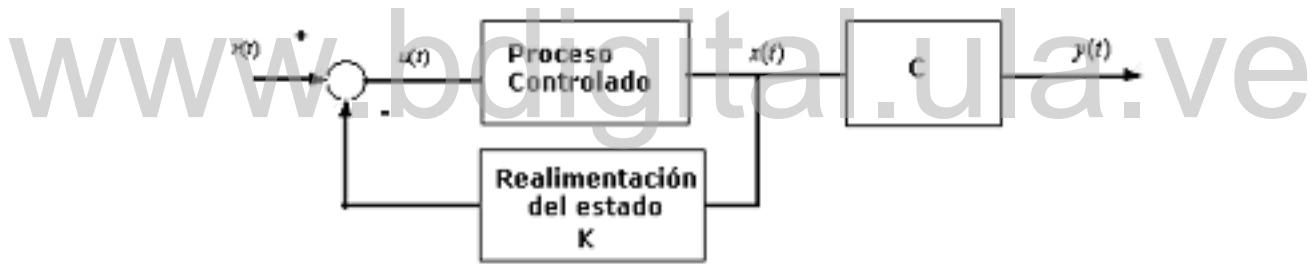


Figura 3.8: Esquema de compensación por realimentación del estado.

Para este tipo de compensación el enfoque más convincente para el diseño es el enfoque de espacio estado [22].

Considere un sistema lineal en modelo de variables de estado:

$$x'(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (3.15)$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t) \quad (3.16)$$

Donde:

- ' denota derivada con respecto al tiempo.
- La función $x(t)$ denota el estado del sistema, el estado describe donde se almacena la energía en el sistema.
- La señal $u(t)$ es la entrada de control.

El modelo de estado viene dado por ecuaciones diferenciales de primer orden. Donde $x(t)$ y $u(t)$ son vectores no escalares, siendo el número de componentes de $x(t)$ igual a n , y el de $u(t)$ igual a r , lo que implica que A es una matriz cuadrada de orden n y B es una matriz de n por r . Se acostumbra llamar a A la matriz del sistema o de la planta y a B la matriz de entrada o de control. Cuando A y B son constantes el sistema es invariante en el tiempo.

Para resolver la ecuación (3.15) es necesario conocer $u(t)$, así como la condición inicial. La ecuación (3.16) describe como la salida $y(t)$ se obtiene del estado $x(t)$ y de las entradas $u(t)$. El número de componentes del vector de salida es m , la matriz C es de orden m por n , es llamada matriz de salida o de medición, y la matriz D , de m filas por r columnas, se llama matriz de transmisión directa. El número de salidas pueden ser elegidas dependiendo de los sensores disponibles para la medición.

Por lo tanto el modelo de espacio estado viene dado por las matrices A , B , C y D lo que produce una representación muy conveniente para un sistema con r entradas y m salidas y su representación en diagrama de bloques se muestra en la Figura 3.9

Para el diseño de la ley de control el sistema debe cumplir con la propiedad de controlabilidad, de lo contrario el sistema no se puede controlar.

Definición 1 *El estado inicial x_0 del sistema descrito por las ecuaciones (3.15) se dice que es controlable sobre el intervalo $[t_0, t_1]$ donde t_1 es un tiempo finito, si existe alguna entrada u sobre $[t_0, t_1]$ el cual transfiere el sistema desde el estado x_0 (al tiempo t_0) al origen del espacio de estado al tiempo t_1 . De otra manera se dice que el estado x_0 es incontrolable sobre $[t_0, t_1]$*

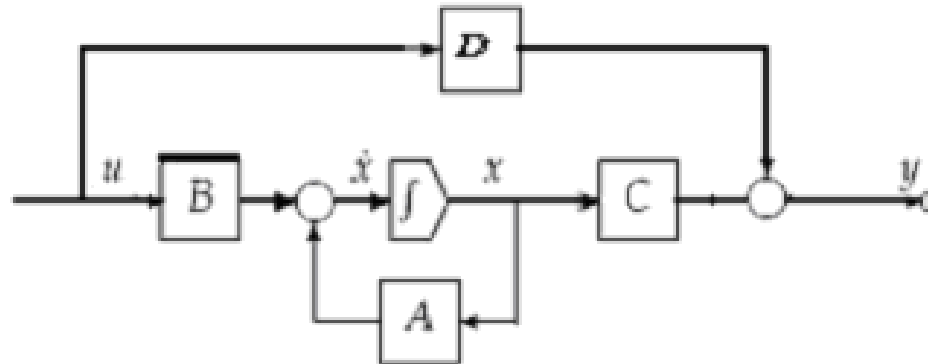


Figura 3.9: Representación en espacio estado de un sistema por diagrama de bloques

[20]

Definición 2 Si todo estado $x(t_0)$ del sistema es controlable sobre $[t_0, t_1]$, el sistema se dice que es completamente controlable sobre $[t_0, t_1]$

[20]

Teorema 1 Sea el sistema descrito por la ecuación (3.15) donde las matrices A y B constantes de dimensiones $n \times n$, y $n \times r$ respectivamente, es completamente controlable, si y solo si, la matriz de controlabilidad de dimensión $n_n(n.r)$:

[20]

$$\begin{pmatrix} B & AB & A^2B & \dots & A^{n-1}B \end{pmatrix} \quad (3.17)$$

Es de rango n . El teorema es válido para sistemas cuya entrada sea un vector de r componentes. El esquema de control por realimentación de estados para un sistema en mas detalle se representa en la Figura 3.10. El control es estático, pues u depende sólo de los valores presentes de los estados x y la referencia r .

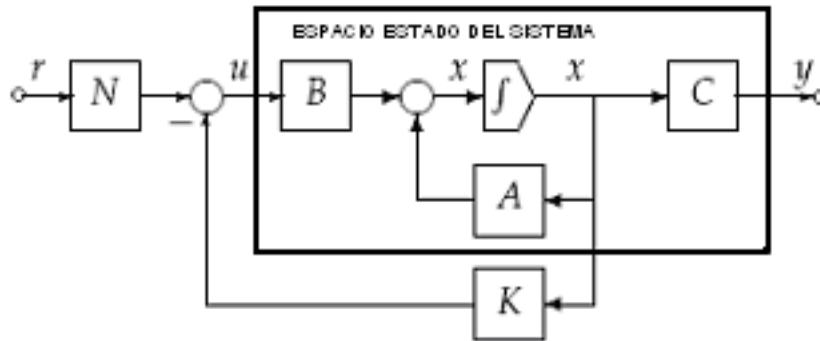


Figura 3.10: Realimentación del vector de estados para un sistema.

La acción de control u se determina por la siguiente ecuación:

$$u(t) = N * r(t) - K * x(t)$$

$$u(t) = N * r(t) - \begin{pmatrix} k_1 & k_2 & k_3 & \cdots & k_n \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} \quad (3.18)$$

$$u(t) = N * r(t) - (k_1 * x_1 + k_2 * x_2 + k_3 * x_3 + \cdots + k_n * x_n)$$

Si sustituimos (3.18) en (3.15) se obtiene la ecuación del sistema en lazo cerrado (ecuación (3.19)).

$$x'(t) = (A - BK)x(t) + B * N * r(t) \quad (3.19)$$

Siempre que el sistema sea completamente controlable es posible ubicar los polos del sistema en lazo cerrado en cualquier posición deseada mediante la realimentación del estado a través de la matriz de ganancias de la realimentación del estado, Sin embargo hay un costo asociado con ubicar todos los polos en lazo cerrado, porque hacerlo requiere de mediciones exitosas de todas las variables de estado, o bien requiere la inclusión de un observador de estado en el sistema [22].

El controlador es diseñado tal que los polos dominantes en lazo cerrado satisfacen unos requerimientos de diseño. Este método es conocido comúnmente como técnica de ubicación, o de asignación de polos.

Una alternativa para determinar los valores de la matriz de ganancias es siguiendo los siguientes pasos [22]:

Paso 1:

verificar la condición de controlabilidad para el sistema.

Paso 2:

Calcular los coeficientes del polinomio característico del sistema por medio de la matriz A .

$$|sI - A| = s^n + a_1s^{n-1} + \dots + a_{n-1}s + a_n \quad (3.20)$$

Paso 3:

Determinar la matriz de transformación T que convierte la ecuación de estado del sistema a la forma canónica controlable (si el sistema ya está en la forma canónica controlable, entonces $T = I$), sino se calcula con la siguiente ecuación:

$$T = M * W \quad (3.21)$$

Donde M es la matriz de controlabilidad y W viene dado por:

$$\begin{pmatrix} a_{n-3} & a_{n-2} & \cdots & a_1 & 1 \\ a_{n-2} & a_{n-1} & & 1 & 0 \\ \vdots & & \ddots & & \\ a_1 & 1 & \cdots & 0 & 0 \\ 1 & & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Paso 4:

Por medio de los valores característicos (polos en lazo cerrado deseados), determinar los coeficientes del polinomio característico deseado:

$$(s - \mu_1)(s - \mu_2) \cdots (s - \mu_n) = s^n + \alpha_1 s^{n-1} + \cdots + \alpha_{n-1} s + \alpha_n \quad (3.22)$$

Paso 5:

La matriz de ganancias de realimentación de estado K requerida se determina por medio de la ecuación:

$$K = \begin{pmatrix} \alpha_n - a_n & \alpha_{n-1} - a_{n-1} & \cdots & \alpha_2 - a_2 & \alpha_1 - a_1 \end{pmatrix} * T^{-1} \quad (3.23)$$

Si el sistema es de orden inferior a 3, la sustitución directa de la matriz K en el polinomio característico deseado puede ser más simple. Supongamos un sistema de orden 3 la matriz K se expresa:

$$K = \begin{pmatrix} k_1 & k_2 & k_3 \end{pmatrix} \quad (3.24)$$

Sustituya la matriz K en el polinomio característico deseado $|sI - A|$ e iguálela con $(s - \mu_1)(s - \mu_2)(s - \mu_3)$. Se igualan los coeficientes de potencias iguales y se obtienen los valores de las ganancias.

Cuando los estados de la planta no pueden medirse para calcular la acción de control, se recurre a estimarlos mediante un observador de estados que reconstruye x a partir de las mediciones de y y u . La combinación de un observador y realimentación de estados es un controlador dinámico por realimentación de la salida y se puede construir siempre que el sistema sea observable.

El sistema con observador se observa en la Figura 3.11

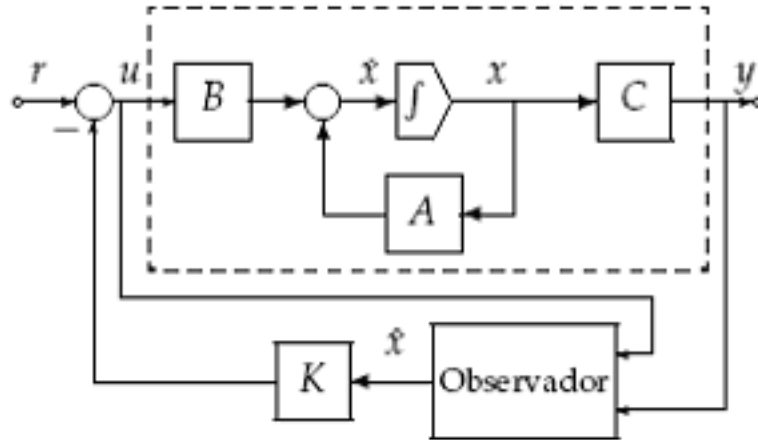


Figura 3.11: Realimentación de salida con observador.

Los observadores de estado son sistemas dinámicos que se construyen teniendo como entrada las variables u e y , y como salida un estimador del estado del sistema.

Sea el sistema descrito por las ecuaciones 3.15 y 3.16 se construye [20]:

$$\widehat{x}'(t) = A\widehat{x}(t) + Bu(t) \quad (3.25)$$

$$\widehat{y}(t) = C\widehat{x}(t) \quad (3.26)$$

Donde \widehat{y} es la salida estimada y \widehat{x} es el vector de estado estimado.

Lo que interesa es la diferencia entre la salida real del sistema y y la salida estimada, \widehat{y} , lo que se denomina error de observador:

$$e(t) \equiv y(t) - \widehat{y}(t) \quad (3.27)$$

Las ecuaciones del observador se escriben como:

$$\widehat{x}'(t) = A\widehat{x}(t) + Bu(t) + K(y - \widehat{y}) \quad (3.28)$$

$$\widehat{y}(t) = C\widehat{x}(t) \quad (3.29)$$

Donde K es la matriz de ganancia del observador.

Reescribiendo lo anterior, tenemos que:

$$\widehat{x}'(t) = A\widehat{x}(t) + Bu(t) + K * C * (x - \widehat{x}) \quad (3.30)$$

La dinámica del error de observación está dada por:

$$e'(t) = x'(t) - \widehat{x}'(t) \quad (3.31)$$

$$\begin{aligned} e'(t) &= Ax + Bu - A\widehat{x}(t) + Bu(t) + K * C * (x - \widehat{x}) \\ e'(t) &= (A - KC)e(t) \end{aligned} \quad (3.32)$$

Si se escoge K de forma que $(A-KC)$ tenga sus polos con parte real negativa el sistema será estable, y cuando el tiempo tiende a infinito el error tiende a cero, así el sistema es observable. K solo puede ser calculada si el sistema es observable.

Proposición 1 *El par (A, C) es observable, si y sólo si el par (A^T, B^T) es controlable*

3.2.5 Implementación del control

En el caso de la investigación se implementa control digital, el control digital nace como una aproximación del control analógico pero con la ventaja evidente de realizar varias operaciones con un solo componente, recordando que el diseño del controlador digital también se puede diseñar empleando las técnicas propias para los sistemas muestreados.

Existen aplicaciones donde los controladores analógicos han demostrado trabajar satisfactoriamente, razón por la cual se prefiere construir los controladores digitales directamente como una aproximación de los controladores analógicos, donde la implementación digital es solo una aproximación numérica de su ecuación integro diferencial.

El esquema básico de un control digital se muestra en la Figura 3.12, bajo el supuesto que tanto el sensor como el actuador son analógicos y el propio regulador

incluye los convertidores A/D, D/A.

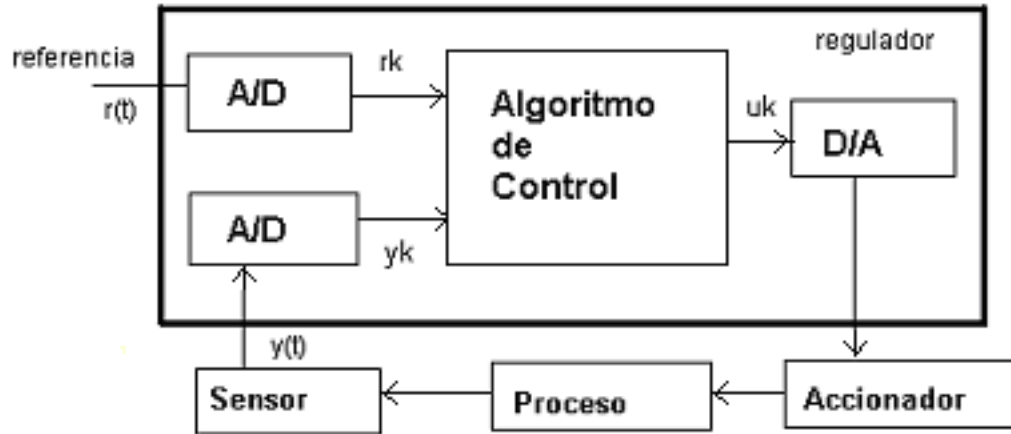


Figura 3.12: Esquema básico de control digital.

El regulador lee periódicamente los sensores, calcula la acción de control y envía los datos al accionador. El controlador digital es básicamente un procesador digital que cada cierto tiempo resuelve un algoritmo recursivo (ecuaciones en diferencias).

Las técnicas de control tratadas en la sección anterior es lo que se conoce como diseño en tiempo continuo, para poder implementar estas técnicas y obtener algoritmos de control es necesario trabajar en tiempo discreto y existen métodos para transformar el sistema continuo a sistema discreto y se denomina discretización.

Alternativamente a esa forma de diseño se puede hacer el diseño del sistema de control trabajando en tiempo discreto y aplicando la teoría de control para los sistemas en tiempo discreto.

Las técnicas de discretización para obtener los algoritmos de control son la discretización aproximada, truncada y exacta, el método que se presenta es la discretización aproximada de una ecuación representada en tiempo continuo.

El modelo matemático dado para aplicar este método es una ecuación en diferencias donde se realiza un muestreo puro (lo que es equivalente a decir discretización aproximada) los términos de la ecuación se transforman dependiendo de la operación matemática a realizar como se muestra en las ecuaciones:

$$\begin{aligned}x(t) &= x(k * to) \\u(t) &= u(k * to)\end{aligned}\tag{3.33}$$

Si presenta términos con derivada de primer orden:

$$x'(t) \rightarrow \frac{x(k * to) - x((k - 1)to)}{to}\tag{3.34}$$

Si se presentan términos con derivada de segundo orden:

$$x''(t) \rightarrow \frac{x(k * to) - 2 * x((k - 1)to) + x((k - 2)to)}{to^2}\tag{3.35}$$

Para el caso de aproximar una integral por ejemplo para calcular la acción integral del error de un controlador PID ideal se usa por ejemplo la regla rectangular hacia atrás [19]:

$$u(k * to) = u((k - 1)to) + Ki * to * e((k)to)\tag{3.36}$$

La Figura 3.13 ilustra el método.

La ecuación (3.36) representa la sumatoria del área de los rectángulos en que está dividida la Figura 3.13.

Es posible dividir la figura en trapecios como se muestra en la Figura 3.14 lo que se denomina la regla trapezoidal y no es más que la sumatoria de todas las áreas

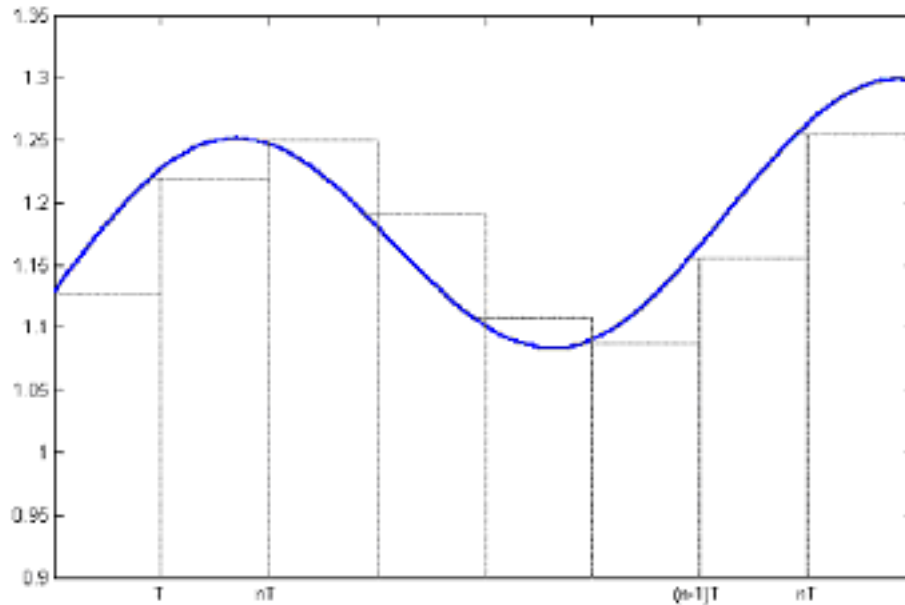


Figura 3.13: Aproximación de la integral por la regla rectangular.

en que está dividida la figura con la diferencia que la fórmula del área cambia donde se obtiene:

$$u(k * to) = u((k - 1)to) + \frac{Ki * to}{2} * (e(k * to) + e((k - 1)to)) \quad (3.37)$$

Donde k pertenece a los números naturales y to es el período con el que se realiza el muestreo para obtener la ecuación discretizada.

Para seleccionar un período de muestreo adecuado, se usa el teorema de Shannon [25] que expresa lo siguiente, a fin de que una señal pueda ser representada de la forma más fiel posible es necesario que la frecuencia de muestreo sea de por lo menos el doble de la de la componente más alta de frecuencia es decir, el ancho de banda.

Entre más pequeño sea el valor de to (frecuencia de muestreo grande) se reconstruye mejor la señal pero si es muy pequeño puede producir coste computacional

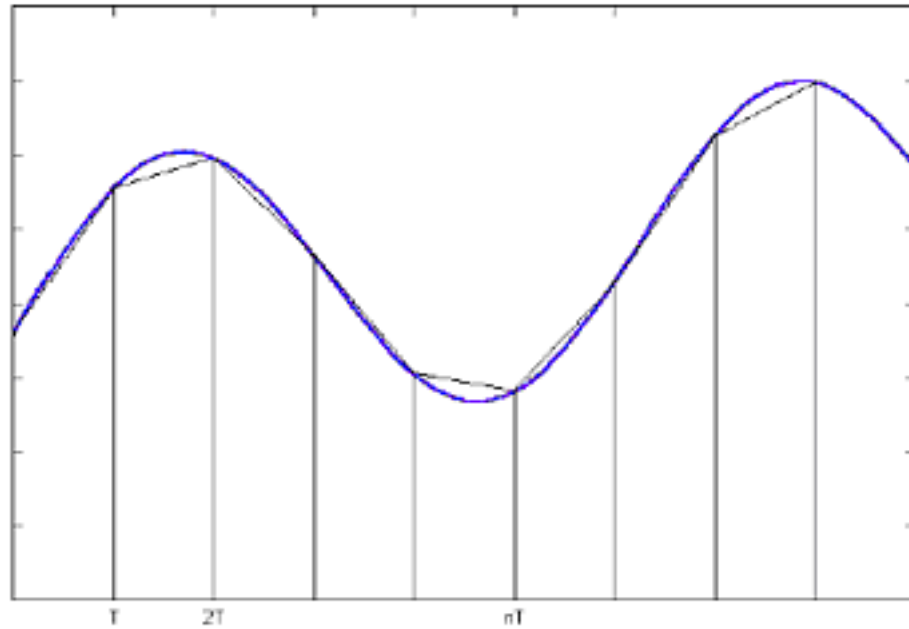


Figura 3.14: . Aproximación de la integral por la regla del trapecio.

debido a la gran cantidad de datos que se tomarían y un valor fuera del rango puede resultar la toma de una muestra errónea incluso en el caso de diseño de controladores producir inestabilidad, a parte del período de muestreo existen otros factores señala [16] que afectan el diseño de control digital a saber:

- Retardos.
 - Planta y accionadores.
 - Sistema de adquisición de datos.
 - Sistemas de comunicaciones.
 - Computación.
- Sincronismo.
- Muestro a distintas frecuencias.

- Aleatorio.
 - Dependiendo de los datos (codificador).
 - Distintas frecuencias según para qué variable.
-
- Pérdidas de datos.
 - Sistema de control distribuido.
 - Uso común de datos.
 - Jerarquía de datos.
 - Razonamientos.

El efecto de estos factores es tanto mayor por cuanto que muchas veces los sistemas de control digitales se diseñan sin tener en cuenta las condiciones de implementación.

Podemos deducir fácilmente que la discretización conduce a algoritmos que se reducen a calcular operaciones matemáticas como sumatorias, productos y dependiendo de la complejidad del algoritmo obtenidas otras operaciones matemáticas con la señal de error, con el fin de minimizar la diferencia entre la variable del proceso y la referencia.

Los algoritmos de control se pueden implementar mediante un bucle infinito en un determinado lenguaje de programación y un software determinado, solo hay que asegurar con qué funciones matemáticas y qué potencial tiene para programar funciones matemáticas para calcular las leyes de control.

Capítulo 4

Controladores Lógicos

Programables (Control-Logix)

En este capítulo se presenta la teoría de los autómatas programables. La sección 4.3 define lo que es un autómata, la secciones 4.2, 4.4, 4.5 describe los antecedentes históricos, los campos de aplicación, las ventajas e inconvenientes que presentan los autómatas programables. La sección 4.6 estudia la estructura interna y externa de los automátas programables y por último, la sección 4.6.1 trata las tecnologías de punta existentes en el mercado como es el Control-Logix y se explica en forma general las características y condiciones a tener en cuenta para la puesta en funcionamiento y programación del mismo.

Los controladores lógicos programables son equipos electrónicos diseñados para hacer control en tiempo real, procesos secuenciales de cualquier tipo y volumen en la industria en general. Las amplias ventajas de todo tipo que ofrece respecto a la lógica cableada lo convierte en el elemento imprescindible en el campo de la automatización industrial. Seguridad, fácil manejo, economía y tiempo son los factores fundamentales que se han determinado para su aceptación. Esta es la herramienta que permite implementar las técnicas de control y automatizar el sistema en estudio por lo que es necesario conocer el funcionamiento y manejo de un autómata programable, así como una breve reseña histórica de su desarrollo.

4.1 Definición de un autómata programable

Es un dispositivo electrónico, utilizado para control automático de máquinas en tiempo real a través de secuencias lógicas, utilizando técnicas digitales basados en micro-controlador [24].

4.2 Antecedentes históricos

Debido a que ciertas etapas en los procesos de fabricación se realizan en ambientes nocivos para la salud, con gases tóxicos, ruidos, temperaturas muy altas o muy bajas y uniendo esta situación a consideraciones de productividad, siempre se pensó en la posibilidad de dejar ciertas tareas tediosas, repetitivas y peligrosas a un ente que no fuera afectado por las condiciones ambientales adversas. Nace, así, la máquina y, con ella, la automatización.

Motivado a que las máquinas son diferentes y distintas las maniobras a realizar, es necesario crear elementos estándares que, mediante su combinación, permitan al usuario realizar la secuencia de movimientos deseada para solucionar su problema de aplicación particular.

Los Relés, los temporizadores y los contadores, fueron y siguen siendo en muchos casos los elementos con que se cuenta para realizar el control de cualquier máquina.

Los problemas se originaron a medida que el control se hacía más complejo y requería de un número considerable de relés, temporizadores y contadores por lo que existía la probabilidad de avería elevada. Por otro lado, considerando el desarrollo tecnológico que traen, inicialmente, los semiconductores y, después, los circuitos integrados, los cuales intentan resolver el problema, sustituyendo las funciones realizadas mediante relés por funciones realizadas con compuertas lógicas, ayudó a reducir el problema del espacio pero no de detección de averías.

Los controladores lógicos programables, limitados originalmente a los tratamientos de lógica secuencial, se desarrollan rápidamente y, en la actualidad, extienden sus aplicaciones al conjunto de sistemas de control de procesos y de máquinas.

4.3 Campos de aplicación

Los controladores lógicos programables (PLC) tienen una amplia gama de aplicaciones fundamentalmente en aquellas instalaciones donde es necesario realizar procesos de maniobra, control y señalización entre otros. Su aplicación abarca desde cualquier proceso de fabricación industrial, hasta control de instalaciones.

Las características especiales [24] tales como, dimensiones reducidas, facilidad en su montaje, posibilidad de almacenar programas para su posterior y rápida utilización, modificación o alteración de los mismos, entre otras, permite observar su eficacia en:

- Procesos con espacio reducido.
- Procesos de producción periódicamente cambiantes.
- Procesos secuenciales.
- Maquinarias de procesos variables.
- Instalaciones de procesos complejos y amplios.
- Chequeos de programación centralizada de las partes del proceso.

Como ejemplos de maniobras se citan: Maniobra de máquinas (maquinaria de ensamblaje, máquinas transfer, maquinaria de procesos textiles y de confección, maquinaria en procesos de grava, arena y cemento), maniobras de instalaciones (Instalaciones: de aire acondicionado, calefacción, de seguridad, frío industrial, de

plantas embotelladoras, de tratamientos térmicos de cerámica, de plantas depuradoras de residuos) y señalización y control (Chequeo de programas, Señalización del estado de procesos).

4.4 Ventajas y desventajas de un automáta programable

Existe una gran cantidad de ventajas que presentan los PLC que varían entre uno y otro, puesto que existe una diversidad de PLC en el mercado.

La condición favorable básica que presenta un PLC es el menor tiempo empleado en la elaboración de proyectos debido a que [24]:

- No es necesario dibujar el esquema de contactos.
- No es necesario simplificar las ecuaciones lógicas ya que, por lo general, la capacidad de almacenamiento del módulo de memoria es lo suficientemente grande.
- La lista de materiales queda reducida y, al elaborar el presupuesto correspondiente, se elimina parte del problema que supone el contar con diferentes proveedores, distintos plazos de entrega, etc.
- Existe posibilidad de introducir modificaciones sin cambiar el cableado ni añadir aparatos.
- Cuenta con mínimo espacio de ocupación.
- Presenta menor costo de mano de obra de la instalación.
- Tiene economía de mantenimiento; además de aumentar la fiabilidad del sistema, al eliminar contactos móviles, los mismos PLC pueden detectar e indicar averías.

- Presenta la posibilidad de gobernar varias máquinas con un mismo PLC.
- Exige menor tiempo para la puesta en funcionamiento del proceso, al quedar reducido el tiempo de cableado.

El único inconveniente que presenta un PLC es contar con un programador, esto obliga a capacitar a personas en el área y esto tiene un costo.

4.5 Estructura de un automáta programable

Los autómatas programables pueden describirse según estructura externa e interna [24].

4.5.1 Estructura Externa

La estructura externa de un PLC se refiere al aspecto físico exterior del mismo, bloques y elementos que lo constituyen. Existen dos estructuras de PLC que se describen a continuación:

Estructura compacta

Este tipo de autómatas presenta en un solo bloque todos sus elementos, tiene tres versiones de unidades para programación las cuales son: unidad fija, unidad enchufable mediante cable y conector, o la posibilidad de ambas conexiones.

Estructura modular

Esta estructura se compone de varios módulos que cumplen con tareas específicas. Existe una división en este tipo de estructura según la procedencia:

- Estructura Americana: Esta separa las entradas y salidas del resto del autómata, de tal forma que las otras unidades se encuentran en un bloque compacto.
- Estructura Europea: La estructura se diferencia en que presenta un módulo para cada función, para la fuente de alimentación, CPU, entrada y salida.

4.5.2 Estructura Interna

A nivel de hardware el autómeta está constituido por un conjunto de bloques funcionales organizado de forma modular y conectados a un bus interno de comunicaciones. Cada bloque está formado por un módulo específico diseñado para desarrollar tareas específicas, en la figura 4.1 se muestra el esquema.

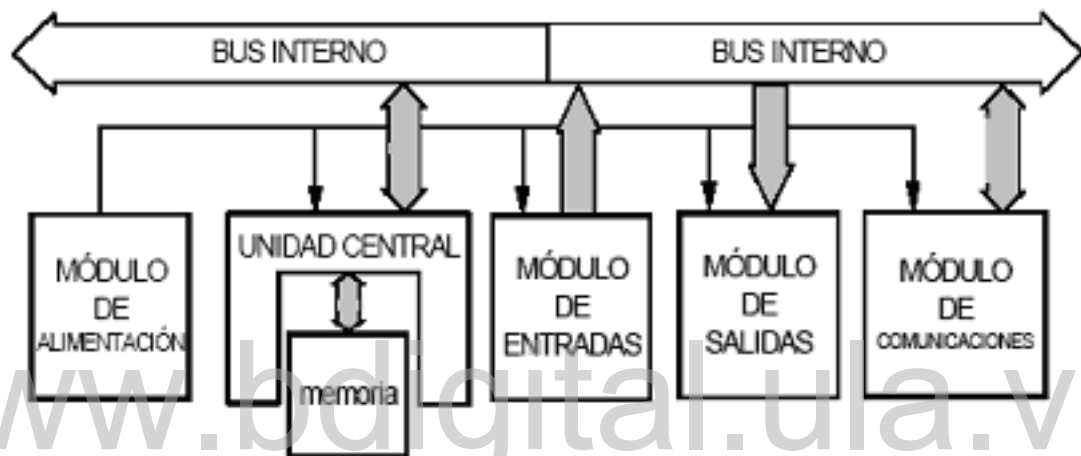


Figura 4.1: Estructura Interna general de un autómeta.

Los módulos que componen la estructura delegan las siguientes funciones: El módulo de alimentación se encarga de suministrar la energía al sistema para poner a funcionar el equipo, por lo general es el valor de voltaje utilizado en la industria (220V ac, 380 V trifásicos).

Los módulos de entradas son las encargadas de recibir la información proveniente de los dispositivos de entrada, los dispositivos de entrada son los sensores. Un sensor permite medir lo que está sucediendo en un sistema de control. Y reciben señales analógicas y digitales.

Los módulos de salidas envían la información a los dispositivos de salida. Los dispositivos de salida son los actuadores. Los actuadores determinan la forma de

actuar sobre el sistema de control para llevarlo del estado actual al estado deseado. Las salidas pueden ser analógicas y digitales.

La función principal de las unidades de entradas y salidas es realizar una separación eléctrica entre los circuitos lógicos de potencia generalmente a través de los optoacopladores, y proporcionar el medio de identificación de los sensores y actuadores ante el procesador, protegiendo así los circuitos electrónicos internos del autómata.

La unidad central de procesamiento (CPU), representa la inteligencia del sistema, se encarga de interpretar las instrucciones de los programas elaborados por el usuario mediante un software en función de las entradas del sistema para activar las salidas.

El autómata cuenta con dos tipos de memorias. La memoria RAM o memoria de acceso aleatorio, donde eventualmente se guardan los datos y programas en ejecución. A causa de su mínimo consumo puede alimentarse con baterías de seguridad. También se encuentra la memoria ROM que es la memoria de sólo lectura en cualquiera de sus modalidades, en la que se almacenan los programas supervisores y datos de inicialización, como si se tratase de un sistema operativo.

Existen módulos para software almacenados en la memoria ROM, que junto con el programa supervisor se encargan de realizar tareas comunes en aplicaciones típicas de automatización. Con estos módulos se pretende evitar la tarea de programarlos de forma repetitiva por su excesiva utilización.

Los módulos de comunicación permiten al PLC establecer conexión con otros dispositivos como son los equipos de programación, computadores personales o con otros autómatas, con el propósito de realizar controles más complejos.

El software de cualquier PLC consta de funciones básicas que realiza en determinados tiempos de cada ciclo: en el inicio o conexión, durante el ciclo o

ejecución del programa y la desconexión.

En general este software contiene las siguientes funciones:

- Supervisión y control de tiempo de ciclo (watchdog), tabla de datos, alimentación, batería, entre otros.
- Autotest en la conexión y durante la ejecución del programa.
- Inicio del ciclo de exploración de programa y de la configuración del conjunto.
- Generación del ciclo base de tiempo.
- Comunicación con periféricos y unidad de programación.

Aunque no todos los PLC utilizan microprocesador como elemento base del CPU, algunos fabricantes emplean otros dispositivos tal como dispositivos lógicos programables (DPL), o red de puertas lógicas (gate array), también llamados circuitos integrados de aplicación específica.

Dependiendo de la complejidad del equipo puede ejecutar múltiples y variadas funciones entre las cuales podemos destacar las principales:

- Programación
 - Introducción de instrucciones.
 - Búsqueda de instrucciones o posiciones de memoria.
 - Modificación del programa.
 - * Borrado de instrucciones.
 - * Inserción de instrucciones.
 - * Modificación de instrucciones.
 - * Detección de errores de sintaxis o formato.

- * Visualización del programa de usuario o parte del mismo, contenido en la memoria del usuario.
- * Forzamiento del estado de marcas, registros, contadores, temporizadores, y otros.
- Grabación de programas.
- Visualización y verificación dinámica del programa.
 - Del programa o parte de él.
 - De entradas y salidas.
- Modos de servicio.
 - STOP (off-line), o salidas en reposo.
 - RUN (on-line), o ejecutando el programa.
 - Otros modos dependiendo del autómata.

4.6 Plataformas Logix5000

Las plataformas Logix de Allen-Bradley proporcionan una única arquitectura de control integrada para el control discreto de procesos, movimiento y variadores.

Las plataformas Logix proporcionan una máquina de control, un entorno de software de programación y compatibilidad para comunicaciones comunes a través de varias plataformas de hardware. Todos los controladores Logix funcionan con un sistema operativo de multitarea y multiprocesamiento y aceptan el mismo conjunto de instrucciones en varios lenguajes de programación. El paquete de software de programación RSLogix™ 5000 sirve para programar todos los controladores Logix. Además, todos los controladores Logix incorporan la arquitectura de redes abiertas NetLinx para comunicarse a través de redes EtherNet/IP, ControlNet y DeviceNet [12].

Las plataformas logix5000 son:

- FlexLogix. (512 I/O, Rackless, Riel DIN, Modular).
- CompactLogix. (128 I/O, Rackless, Riel).
- SoftLogix. (Basado en control por PC).
- DriveLogix. (Control de Motores).
- ControlLogix. (128000 digital I/O, 4000 analog I/O, 7.5MB).

Los controladores logix5000 comparten el mismo sistema operativo con las siguientes características comunes:

- Alta velocidad de ejecución.
- Opera con datos de 32 bits.
- Combina lógica, datos, y direcciones basadas en texto en la memoria del controlador; donde tradicionalmente la mayoría de los controladores almacenan símbolos en el computador solamente.
- Aplicaciones secuenciales, motores, procesos, movimiento.

Los controladores Logix5000 presenta un modo de comunicación homogéneo denominado productor/consumidor que permite el multicasting, (1 envía, varios escuchan), y sincroniza los nodos para que reciban la información simultáneamente, lo que trae como ventaja que mejora el ancho de banda.

Los controladores utilizan la tecnología de backplane (ControlBus) que tiene las siguientes características:

- Utiliza el modelo Productor/Consumidor.
- Trata cada módulo como un nodo en una red.
- Provee un medio de comunicación de alta velocidad entre los módulos.

- Transfiere datos entre módulos sin intervención del controlador.
- Elimina al controlador como centro de toda actividad.

Los controladores realizan la comunicación mediante:

- Comunicación Serial.
- Redes NetLinx
 - DeviceNet.
 - ControlNet.
 - EtherNet/IP.
- Red DH+.
- Red Universal de I/O Remotos.

Los controladores disponen de software diseñados para programarlos y establecer comunicaciones respectivas, y son:

- Software RSLogix 5000.
- Software RSLinx.
- RSNetWorx
 - Para DeviceNet
 - Para ControlNet
- Software RView32.

El software RSLogix 5000 Enterprise Series está diseñado para funcionar con las plataformas Logix de Rockwell Automation. El software RSLogix 5000 Enterprise Series es un paquete de software que ofrece editores de lógica de escalera de relés, texto estructurado, diagramas de bloques de funciones y diagramas de funciones

secuenciales para el desarrollo de aplicaciones informáticas. El software RSLogix 5000 Enterprise Series también admite configuración y programación de ejes para el control de movimiento.

El software RSLogix desarrolla las siguientes actividades:

- Crear y Modificar el código ejecutable.
- Supervisar datos en línea.
- Configurar las comunicaciones.
- Configurar módulos I/O y dispositivos.

El software RSLinx (serie 9355) es un paquete de servidor de comunicación que proporciona conectividad de dispositivos a nivel de la planta para una amplia variedad de aplicaciones. RSLinx permite que múltiples aplicaciones de software se comuniquen simultáneamente con una serie de dispositivos en muchas redes diferentes.

RSLinx proporciona una interface gráfica fácil de usar para navegar por la red y realizar operaciones de monitoreo a los dispositivos. También proporciona un conjunto completo de drivers de comunicación para la conexión en red, inclusive redes.

El software RSNetWorx es la herramienta de configuración para la red de control. El software RSNetWorx le permite crear una representación gráfica de la configuración de la red y configurar los parámetros que la definen.

Utilice RSNetWorx para:

- ControlNet para programar componentes de red. El software calcula automáticamente el ancho de banda de toda la red, además del ancho de banda usado por cada componente de la red. Debe disponer de software RSNetWorx para configurar y programar las redes ControlNet.

Tabla 4.1: Requisitos para un buen funcionamiento de los software

DESCRIPCIÓN	VALOR
Computadora personal	Pentium II 450 MHz mínimo. Se recomienda Pentium III a 733 MHz (o superior)
Requisitos de software	sistemas operativos compatibles - Microsoft Windows XP Professional versión 2002 (con Service Pack 1) o XP Home versión 2002 Microsoft Windows 2000 Professional con Service Pack 1, 2 ó 3 Microsoft Windows NT versión 4.0 con Service Pack 5 ó 6A
RAM	128 Mbytes de RAM como mínimo Se recomienda 256 Mbytes de RAM
Espacio de disco duro	100 Mbytes de espacio libre de disco duro (o más, según los requisitos de la aplicación)
Requisitos de video	Adaptador de gráficos VGA de 256 colores. Resolución mínima: 800 x 600 (se recomienda True Color 1024 x 768)

- DeviceNet para configurar dispositivos de E/S DeviceNet y crear una lista de barrido. El escáner DeviceNet almacena la información de configuración y la lista de barrido.
- EtherNet/IP para configurar dispositivos EtherNet/IP mediante direcciones IP o nombres de computadora principal.

Los requisitos para el buen desempeño del software se muestran en la tabla 4.1.

4.6.1 Descripción general de un sistema Control-Logix

El sistema Control-Logix proporciona control secuencial, de proceso, de movimiento y de variador además de comunicaciones y E/S avanzadas en un pequeño y económico paquete. El sistema es modular, lo que permite el diseño, la construcción y la modificación eficaz para ahorrar los gastos necesarios para la capacitación e ingeniería. Un sistema Control-Logix sencillo consiste en un controlador autónomo y módulos de E/S en un solo chasis tal como se muestra en la figura 4.2.

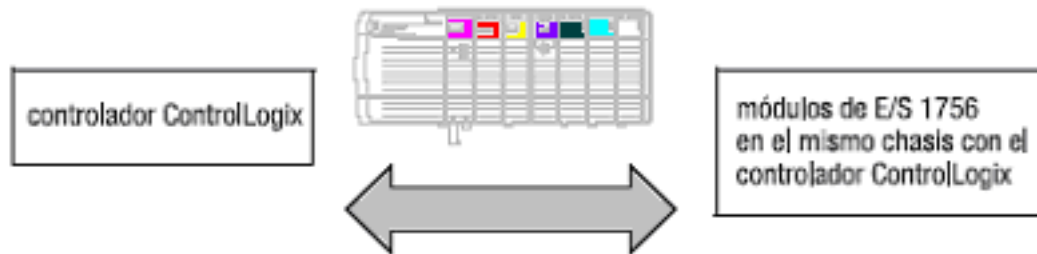


Figura 4.2: Sistema Control-Logix.

También se puede usar el sistema Control-Logix como gateway. Incluye los módulos de comunicación necesarios para la conectividad a las otras redes, esto no requiere un controlador. El gateway Control-Logix se integra en los sistemas existentes basados en PLC para que los usuarios con redes existentes puedan enviar o recibir mensajes hacia/desde otras redes. [10]

La figura 4.3 ilustra el modo de comunicación que usa el sistema Control-Logix.

4.6.2 Módulos de entrada - salida del Control-Logix

La arquitectura Control-Logix proporciona una amplia gama de módulos de entrada y salida (figura 4.4) que abarca muchas aplicaciones desde las E/S discretas hasta el control de procesos. La arquitectura Control-Logix usa la tecnología de

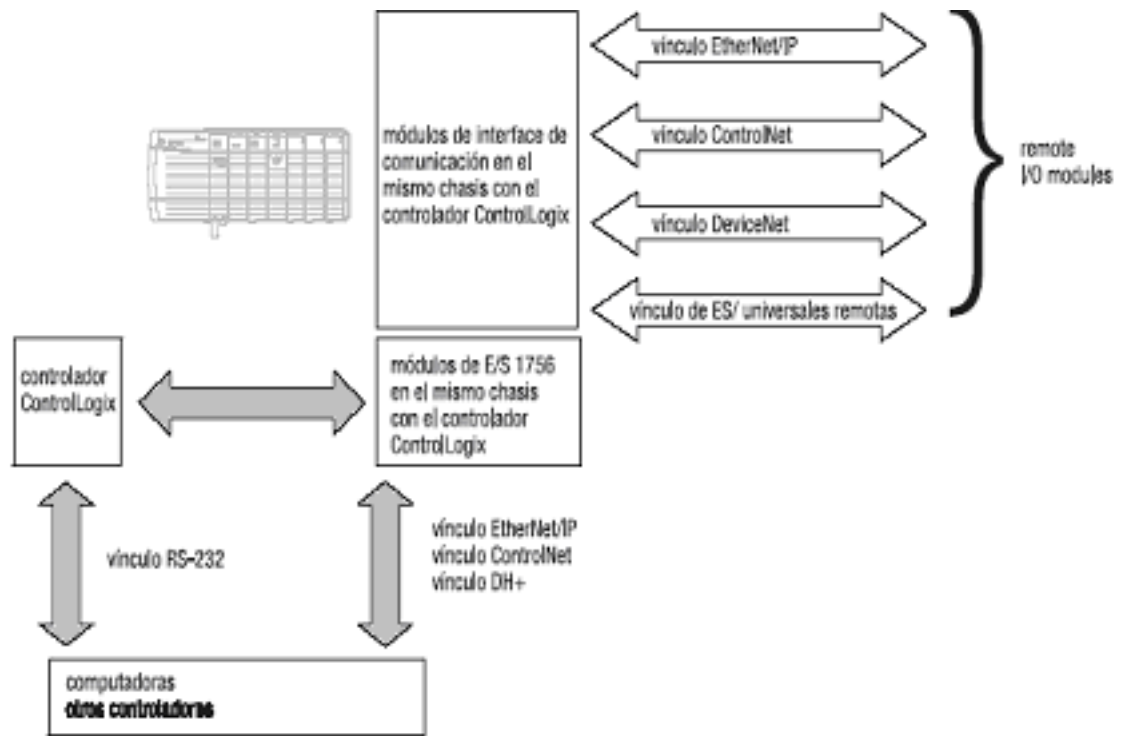


Figura 4.3: Comunicación del sistema Control-Logix.

productor/consumidor, la cual permite que la información de entrada y el estado de salida se compartan entre varios controladores Control-Logix.

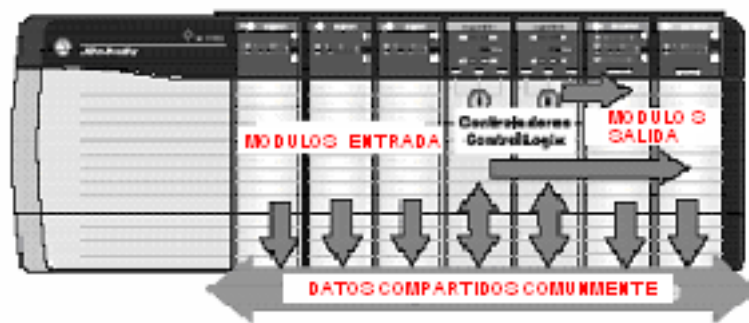


Figura 4.4: Módulos de E/S Control-Logix.

Cada módulo de E/S Control-Logix se monta en un chasis Control-Logix y

requiere un bloque de terminales extraíble (RTB) o un módulo de interface 1492 (IFM) para conectar todos los cables de lado de campo. Los RTB y los IFM no se incluyen en los módulos de E/S. Estos componentes se piden por separado.

Los módulos de E/S digitales 1756 aceptan:

- Gran variedad de capacidades de interface de voltaje.
- Tipos de módulo aislados y no aislados.
- Estados de fallo de salida de nivel de punto.
- Posibilidad de seleccionar comunicaciones de rack optimizadas o de conexión directa.
- Diagnósticos de lado de campo en determinados módulos.

Cada módulo de E/S Control-Logix contiene información de identificación específica que lo distingue de todos los demás módulos. Esta información permite hacer un seguimiento de los componentes del sistema. Ver tabla 4.2.

Características generales de los módulos E/S controllogix

Los módulos de E/S presentan una serie de funciones disponibles, cuyo uso abarca muchas aplicaciones y son comunes a todos los módulos de E/S Control-Logix y se citan a continuación [6]:

Desinstalación e instalación con la alimentación eléctrica conectada (RIUP)

Característica que le permite instalar o desinstalar un módulo cuando se le aplica una corriente al chasis y trae como ventaja que no se interrumpe el resto del proceso controlado.

Tabla 4.2: Datos de identificación de los módulos

INDETIFICACIÓN DEL MÓDULO	DESCRIPCIÓN
Tipo de producto	Tipo de módulo como E/S digital ó E/S analógica
Código de catalogo	Número de catálogo del módulo
Revisión mayor	Número de revisión mayor del módulo
Revisión menor	Número de revisión menor del módulo
Estado	Estado del módulo devuelve la siguiente información: Propiedad del controlador (si la hubiera), si el módulo ha sido configurado, fallo mayor y menor y estado específico del dispositivo.
Identificación del suministrador	Suministrador del módulo como por ejemplo, Allen-Bradley
Número de serie	Número de serie del módulo
Longitud de la cadena del texto ASCII	Número de caracteres en la cadena del texto del módulo
Cadena del texto ASCII	Número de caracteres en la cadena del texto del módulo

Modelo productor/consumidor

Permite el intercambio inteligente de datos entre módulos y otros dispositivos del sistema sin que se haya realizado ninguna encuesta. Por ejemplo, un módulo de entrada produce datos y varios procesadores pueden consumir datos al mismo tiempo, esto elimina la necesidad de que un procesador envíe los datos a otro procesador.

Registro de hora continuo de datos

Es un temporizador de 15 bits con resolución en milisegundos que indica en que momento se han muestreado ó aplicado los datos.

Siempre que un módulo realiza un barrido en sus canales, el registra el valor del sello de hora continuo en ese momento y permite utilizar los dos últimos valores del sello de hora continuo para calcular el intervalo entre recepción de los datos o el momento en que se han recibido los datos.

Para el caso de los módulos el valor del sello de hora continuo sólo se actualiza cuando se aplican nuevos valores al convertidor digital.

Registro de hora de los datos del sistema

Los controladores existentes dentro del chasis de Control-Logix disponen de un reloj del sistema de 64 bits que inserta un sello de hora en la transferencia de datos entre el módulo y su controlador propietario dentro del chasis local.

Esta característica permite realizar cálculos precisos entre eventos para identificar la secuencia de eventos, tanto en condiciones de fallo como en condiciones normales de operación.

Características físicas

Los módulos E/S Control-Logix se montan en un chasis Control-Logix y utiliza un bloque de terminales extraíbles (RTB) o un módulo de interfaz (IFM) para conectar todos los cables del lado de campo como se muestra en la figura 4.5

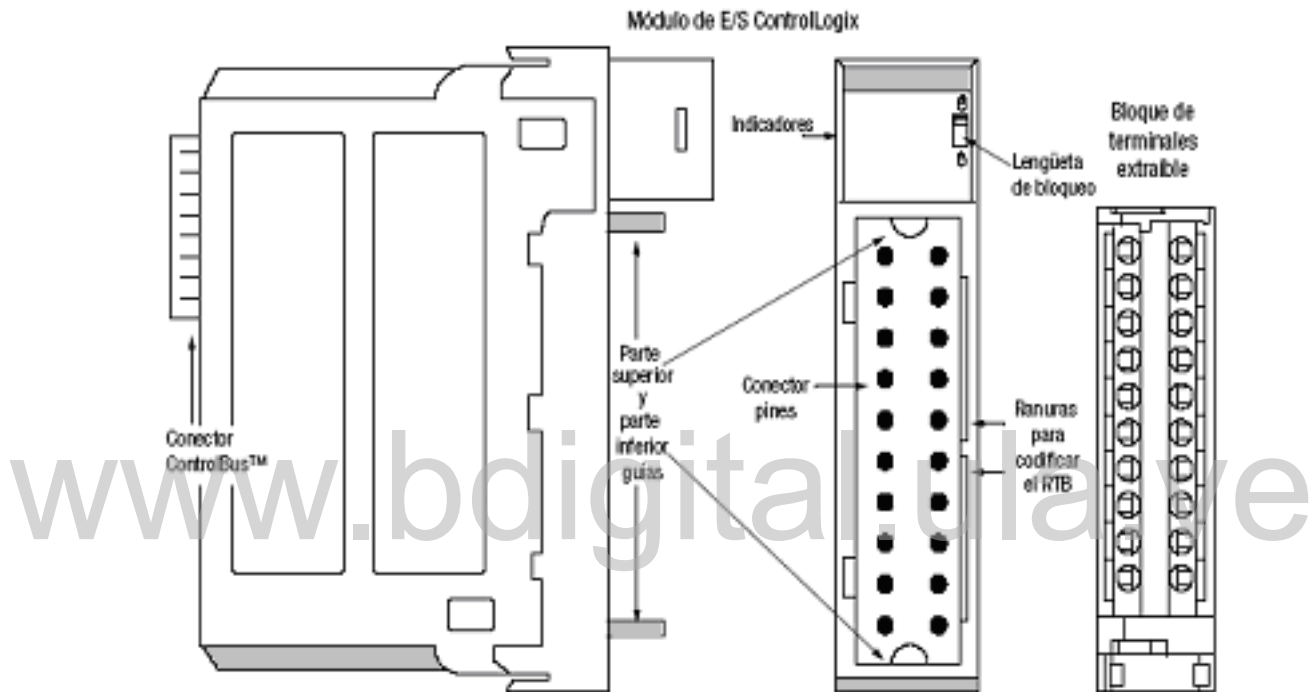


Figura 4.5: Características físicas de los módulos de E/S Control-Logix.

Los módulos están constituidos por:

Conector de ControlBus

Por medio de este la interface del backplane del sistema Control-Logix conecta al módulo.

Pines de Conectores

Estos pines son usados para realizar las conexiones de entrada/salida, alimentación y toma a tierra en el módulo mediante el uso de un RTB.

Lengüeta de Bloqueo

Sujeta el RTB al módulo, manteniendo las conexiones del cableado.

Ranuras de codificación

Codifican mecánicamente el RTB para evitar malas conexiones accidentales al módulo.

Indicador de estado

Muestran el estado de comunicación, el indicador de diagnóstico del módulo y la presencia de dispositivos de entrada/salida. Utilice estos indicadores para la resolución de problemas.

Guías superior e inferior

Las guías sirven de ayuda para encajar el RTB en el módulo.

Propiedades y conexiones

Todos los módulos de E/S del sistema Control-Logix deben ser propiedad de un controlador Logix5550 para que sean de utilidad. Este controlador propietario almacena datos de configuración de todos los módulos que posee y puede ser local o remoto en cuanto a la posición del módulo de E/S. El propietario envía los datos de configuración del módulo de E/S para definir el comportamiento del módulo y comenzar a funcionar dentro del sistema de control. Cada módulo de E/S Control-Logix debe mantener la comunicación continuamente con su propietario para su normal funcionamiento.

En la mayoría de los casos, cada módulo del sistema tendrá sólo un propietario. Los módulos de entrada pueden tener más de un propietario. Sin embargo, los módulos

de salida están limitados a un solo propietario.

La configuración de los E/S se realiza mediante el software RSLogix 5000, que genera los datos de configuración para cada módulo de E/S del sistema de control, independiente de si esta conectado en un chasis local o remoto, un chasis remoto también es equivalente a decir conectado a la red y solo contiene al módulo mas no al controlador propietario del módulo.

Los Datos de configuración se transfieren al controlador durante la descarga del programa y posteriormente se transfiere a los módulos E/S apropiados. Los módulos que se ubican en el mismo chasis están listos para funcionar en cuanto se descargue el programa pero los que están conectados a la red debe ejecutarse haciendo uso del software RSNetwork.

Una conexión directa es un enlace de transferencia de datos en tiempo real entre el controlador y el dispositivo que ocupa la ranura a la que hacen referencia los datos de configuración.

Si un controlador dispone de datos de configuración que hacen referencia a una ranura del sistema de control, el controlador comprueba periódicamente si existe un dispositivo. Cuando se detecta la presencia de un dispositivo el controlador envía automáticamente los datos de configuración.

Si los datos son apropiados para el módulo encontrado en la ranura, se efectúa una conexión y comienza el funcionamiento, sino son apropiados ocurre un rechazo y se produce un mensaje de error en el software.

El controlador mantiene y monitorea su conexión con un módulo, cualquier interrupción ocurrida en la conexión el controlador activará los bits de estados de fallo en el área de datos asociado al módulo. El software RSLogix 5000 puede monitorear esta área de datos para anunciar fallos del módulo.

4.6.3 Módulos de E/S analógicas Control-Logix

Los módulos de E/S analógica Control-Logix son módulos de interface que convierten las señales analógicas en valores digitales en el caso de las entradas y los valores digitales en señales analógicas para las salidas [6].

Los módulos de entrada analógica del sistema Control-Logix no son encuestados por un controlador una vez establecida la conexión, los módulos difunden sus datos periódicamente. La frecuencia de difusión múltiple depende de las opciones elegidas durante la configuración y del lugar en que reside físicamente el módulo de entrada en el sistema de control.

El comportamiento de una comunicación o de una difusión múltiple del módulo de entrada, varía dependiendo de si está en un chasis local o en un chasis remoto.

Cuando un módulo reside en el mismo chasis que el controlador propietario, existen dos parámetros de configuración que afecta el funcionamiento del módulo para difundir los datos (ver la figura)

Muestreo en tiempo real (RTS)

El parámetro RTS ordena el módulo a que realice las siguientes operaciones:

- Realizar un barrido de todos los canales de entrada y almacenar los datos en la memoria de la tarjeta.
- Difundir los datos del canal actualizados así como otros datos de estado al backplane del chasis local.

Este valor se configura mediante RSLogix 5000 y su valor se puede modificar en cualquier instante.

Intervalo entre paquetes solicitados (RPI)

Este parámetro configurable ordena al módulo que difunda sus datos de canal y de estado al backplane del chasis local.

El RPI ordena al módulo a que difunda el contenido actual de su memoria de la tarjeta cuando expira el RPI (es decir, el módulo no actualiza sus canales antes de la difusión múltiple).

El valor de RPI se establece durante la configuración inicial del módulo con RSLogix 5000 y puede ser ajustado cuando el controlador está en modo de programación.

El módulo restablecerá el temporizador del RPI cada vez que se lleve a cabo un RTS. Esta operación indica el momento y el modo en que el controlador propietario del chasis local va a recibir los datos de canal actualizados, dependiendo de los valores especificados para estos parámetros.

Cuando el valor de RTS es menor que el RPI, cada difusión múltiple de datos desde el módulo tendrá información de canal actualizada, en efecto el módulo sólo realiza la difusión múltiple en régimen RTS.

Si el valor de RTS es mayor que el RPI, el módulo realiza la difusión múltiple al régimen RTS y RPI. Los valores fijados indican la frecuencia de recepción de datos del controlador propietario y cuántas difusiones múltiples provenientes del módulo contienen datos del canal actualizados.

Esto se puede ilustrar con un ejemplo mostrado en la figura 4.6, si tenemos un valor de RTS de 100 ms y un RPI de 25 ms, solo una de cada cuatro difusiones múltiples desde el módulo contiene datos de canal actualizados.

En el caso de los módulos de salidas analógicos el parámetro RPI controla

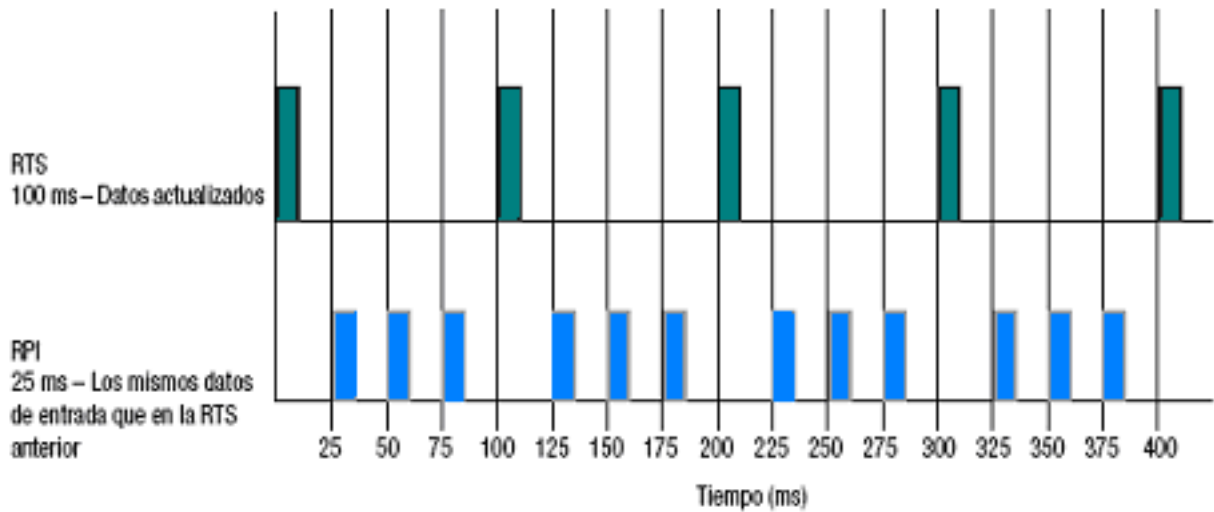


Figura 4.6: Funcionamiento de un módulo de entrada

exactamente el momento en que se reciben datos del controlador propietario y en qué momento repite los datos dicho módulo.

Un controlador propietario envía los datos a un módulo sólo en el período especificado en el RPI, y no al final del escán del programa del controlador.

Cuando un módulo de salida analógico recibe nuevos datos de un controlador propietario, el módulo difunde automáticamente o repite un valor de datos que corresponde a la señal analógica presente en los terminales de salida al resto del sistema de control, esta función de repetición de datos se produce si el módulo de salida es local o está conectado a un chasis en la red con respecto al controlador.

Dependiendo del valor del RPI, con respecto a la longitud de barrido del programa controlador, el módulo de salida puede recibir y repetir datos muchas veces durante un escán del programa.

El controlador permite efectivamente que los canales de salida del módulo cambien de valor varias veces durante un escán del programa, cuando la longitud del

escán del programa es mayor que el RPI.

Los módulos de E/S difunden los datos con dos posibles formatos:

- Entero de 16 bits con signo y permite velocidades de muestreo más rápidas, utiliza menos memoria en el controlador pero limita la disponibilidad de características en el módulo.
- Punto Flotante de 32 bits IEEE.

Durante la configuración inicial se debe elegir un formato de comunicaciones, ya que esta selección determina el tipo de datos que se recibe del módulo.

Tiene funciones en tarjeta, tales como escala a unidades de ingeniería alarmas y detección de bajo ó sobrerango.

Los módulos analógicos permiten la calibración canal por canal o por módulos.

El módulo de entrada recibe una señal eléctrica de corriente o voltaje, y acepta tres métodos de cableado.

El método de cableado que se utiliza para efectos del experimento se denomina Modo diferencial ya que resulta ventajoso cuando es necesario disponer de pares de señales separadas o en el caso que no exista una conexión a tierra común. El cableado diferencial se recomienda para ambientes en que es necesario inmunidad al ruido. Este método sólo permite utilizar la mitad de los canales de un módulo, por ejemplo para el módulo de entrada analógico de 8 canales solo tendría disponible 4 canales.

Un ejemplo que ilustra la forma de realizar el cableado se muestra en la Figura 4.7.

La tabla se utiliza para realizar las conexiones entre los respectivos terminales dependiendo del canal a utilizar. Todos los terminales marcados con RTN se conectan internamente, Si se unen múltiples terminales positivos o múltiples terminales

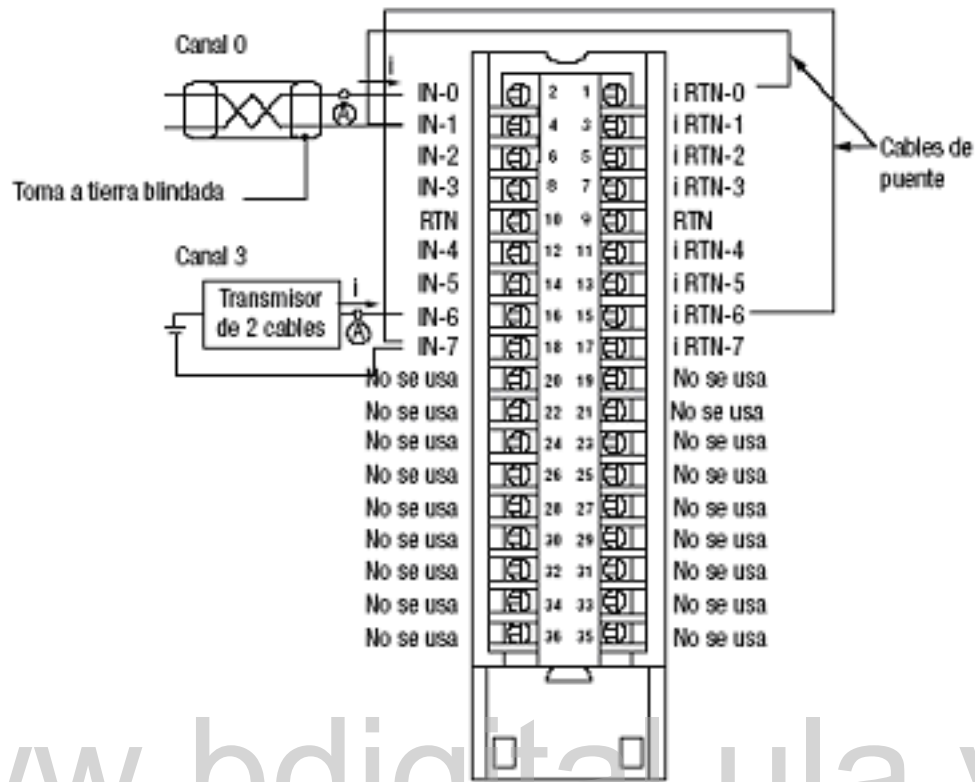


Figura 4.7: Cableado en modo diferencial

negativos, conecte el punto de unión a un terminal RTN para mantener la precisión del módulo, y todos los terminales marcados RTN o iRTN no se utilizan para cableado de voltaje diferencial.

Para el caso del módulo de salida las Figuras 4.8 y 4.9 muestran un ejemplo del cableado para utilizar los canales de salida para el caso que sea corriente y para el caso que sea voltaje respectivamente.

4.6.4 Módulos de E/S digitales Control-Logix

Los módulos de E/S digitales Control-Logix son módulos de entrada/salida que incorporan funciones de detección de activación, desactivación y de accionamiento [7].

Tabla 4.3: Conexiones a realizar según el canal en uso

Canal	Terminales a utilizar
canal 0	IN-0 e IN-1
canal 1	IN-2 e IN-3
canal 2	IN-4 e IN-5
canal 3	IN-5 e IN-6

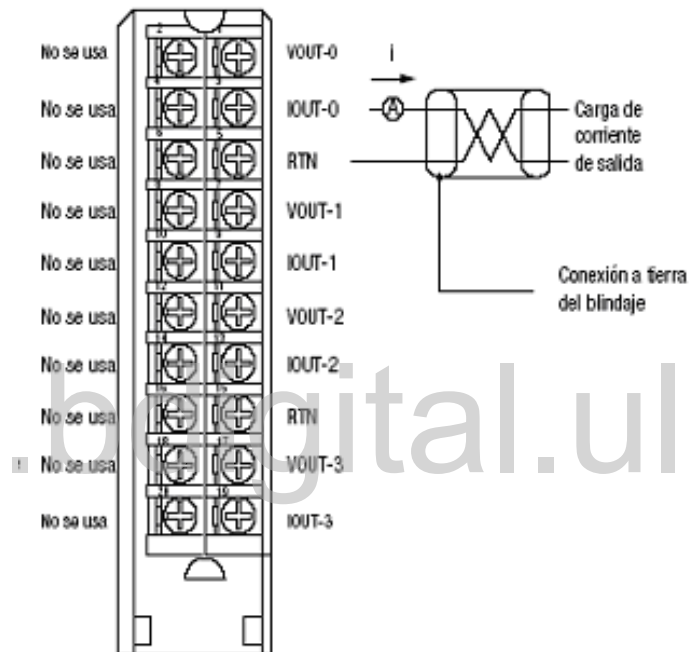


Figura 4.8: Ejemplo de cableado de corriente

Para el caso de un módulo de entrada digital al igual que en los analógicos el RPI especifica la frecuencia con el que el módulo difunde sus datos y el tiempo varía entre 200 microsegundos y 700 milisegundos, cuando transcurre el período especificado, el módulo realizará una difusión múltiple de los datos. El parámetro COS (cambio de estado) ordena al módulo que transfiera los datos en caso de que en un punto de entrada se produzca una transición de ON a OFF o de OFF a ON. La selección del COS se efectúa por punto, si bien todos los datos del módulo se difunden cuando se produce un cambio de estado en cualquier punto habilitado para cambiar de

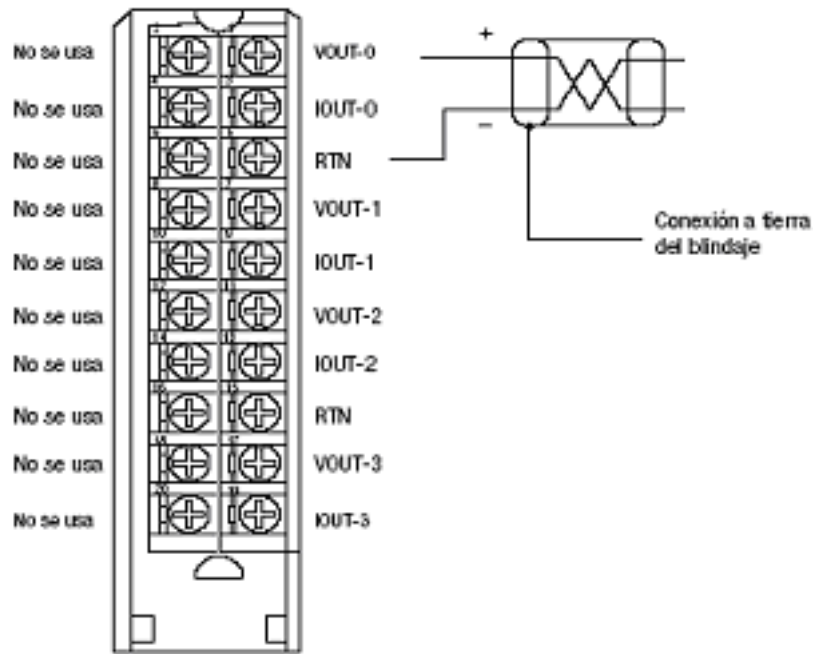


Figura 4.9: Ejemplo de cableado de voltaje

estado. El Cambio de estado es más eficaz que el intervalo entre paquetes solicitados (RPI) porque solamente difunde los datos cuando se produce un cambio.

Un ejemplo que ilustra el funcionamiento para un módulo de entrada digital se observa en Figura 4.10.

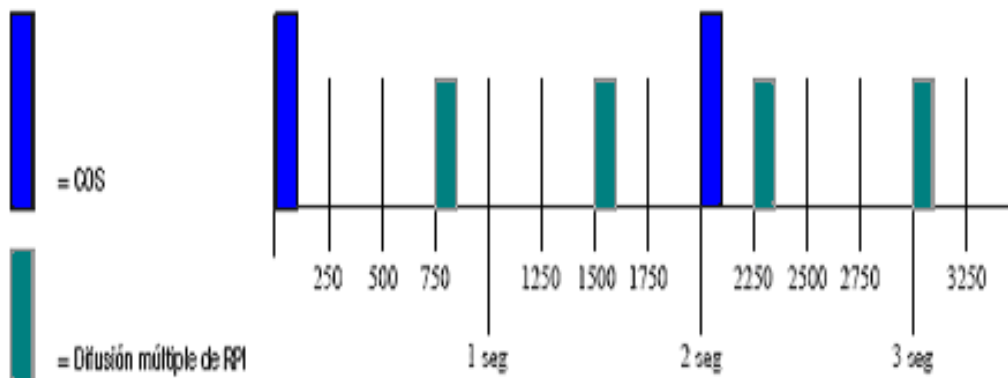


Figura 4.10: Funcionamiento de un módulo de entrada digital

Si una entrada cambia de estado de forma regular cada 2 segundos y el RPI está establecido en 750 mseg., la transferencia de datos será algo parecido a lo que se aprecia en la figura, es importante notar que se debe fijar un valor de RPI independiente de si hay cambio de estado, puesto que el módulo sigue difundiendo sus datos a una frecuencia RPI así no ocurran cambio de estado.

Los módulos de entradas digitales Control-Logix se interconectan con dispositivos sensores y detectan si están activados (ON) o desactivados (OFF).

Los módulos de entrada Control-Logix convierten señales ON/OFF de CA o CC procedentes de dispositivos de usuario a un lenguaje lógico que pueda entender el procesador. Los dispositivos de entrada más comunes son:

- interruptores de proximidad
- interruptores de final de carrera
- interruptores selectores
- interruptores de flotación
- interruptores de botones pulsadores

Al diseñar un sistema que utilice módulos de entrada Control-Logix debe tener en cuenta:

- el voltaje necesario para su aplicación
- si necesita un dispositivo de semiconductores
- la fuga de voltaje
- si su aplicación debe utilizar cableado drenador o surtidor.

Para el caso de los módulos de salidas digitales un controlador propietario envía los datos de salida cuando se da una de estas dos situaciones:

- Al final de cada uno de sus barridos de programa (solamente chasis local)
- Con la frecuencia especificada en el RPI del módulo.

Los módulos de salida Control-Logix pueden utilizarse para dirigir varios dispositivos de salida. Los dispositivos de salida más habituales compatibles con las salidas Control-Logix son:

- Arrancadores o motores.
- Solenoides.
- Indicadores.

En el momento de diseñar un sistema, asegúrese de que las salidas Control-Logix puedan suministrar la sobretensión y la corriente necesarias para un funcionamiento adecuado. Asegúrese de que no se superen los valores de sobretensión y de corriente continua. De lo contrario, podrían causarse daños al módulo.

Si se trata de un chasis remoto el RTS cumple la misma función que la mencionada anteriormente la diferencia esta en que el RPI determina la frecuencia con el controlador propietario envía los datos a través de la red y también "reserva" un punto en el torrente de datos que fluye a través de la red ControlNet (sin importar el tipo de módulo con el que se este trabajando entre los mencionados).

La temporización de este punto "reservado" puede o no coincidir con el valor exacto del RPI, pero el sistema de control garantizará que el controlador propietario reciba los datos con la misma frecuencia como mínimo que el RPI especificado.

4.6.5 Módulos de interface de comunicación Control-Logix ethernet

El módulo Ethernet acepta comunicación gateway de datos de control e información a través de Ethernet a otras redes tales como ControlNet y Data Highway Plus [5].

Las características del módulo son: Otras características del módulo son:

1. Compatibilidad con medios físicos AUI y 10 Base-T
2. Utiliza el protocolo TCP/IP estándar
3. Acepta comunicación de gateway hacia y desde otros módulos en el mismo chasis
4. No hay un límite en el número de módulos por chasis
5. Se desinstala e instala con la alimentación eléctrica conectada
6. Servicio de soporte del software RSLinx
7. Este módulo no acepta conexión en puente de Ethernet a Ethernet.

Las características se pueden apreciar en las Figuras 4.11 y 4.12:

Un ejemplo que ilustra la aplicación que se puede hacer con el módulo ethernet se muestra en la Figura 4.13:

4.6.6 Organización de un proyecto en el sistema Control-Logix

Para la creación de un proyecto en el sistema Control-Logix se debe organizar la información según el siguiente esquema [11]:

- Tareas

Es el tipo de agendamiento para la ejecución

- Programas

Contiene el conjunto de rutinas y tags seleccionados.

- * Rutinas

Código ejecutable (lenguaje escalera, diagrama de bloques, y texto estructurado)

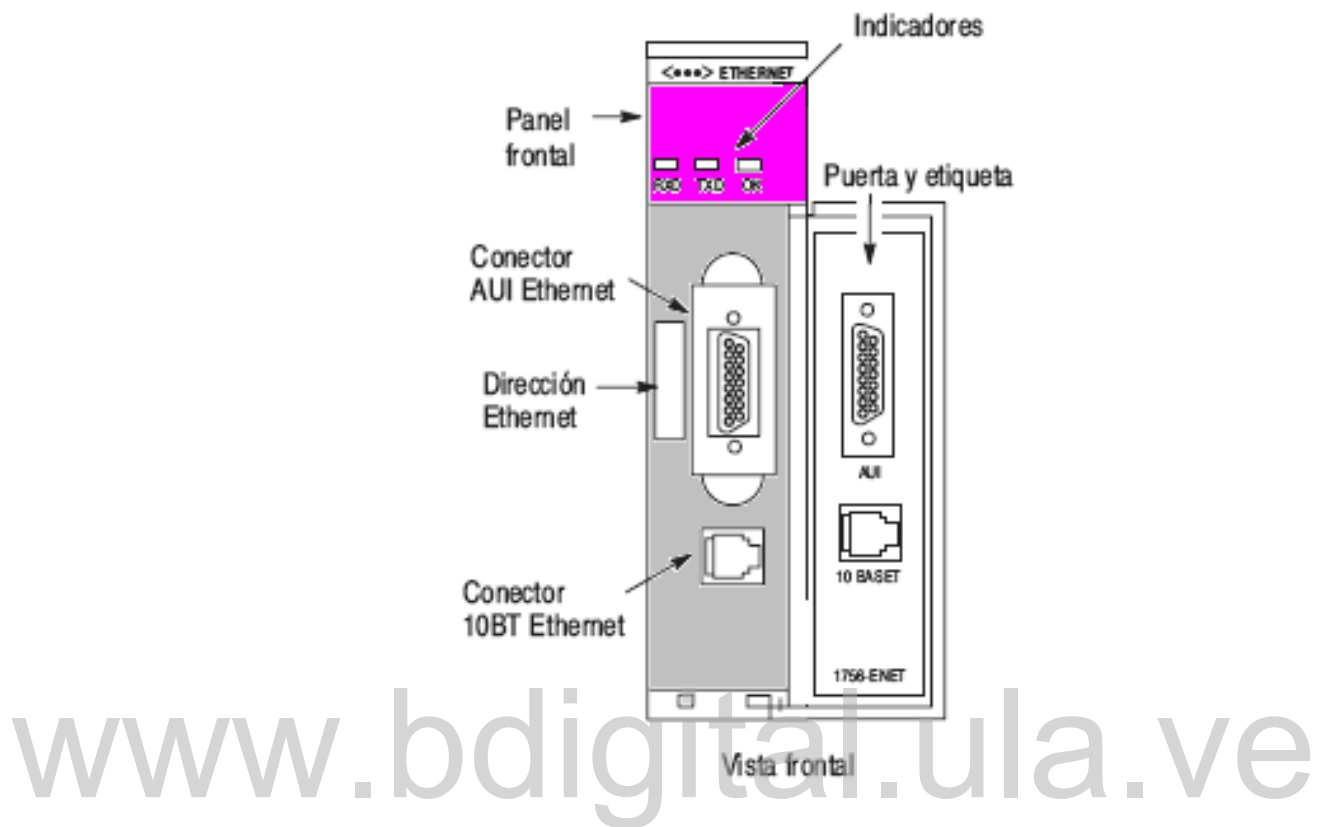


Figura 4.11: Vista frontal del módulo de interface ethernet

La tarea puede ser continua o periódica. El proyecto nuevo creado contiene una tarea predeterminada para la ejecución de la lógica. La tarea predeterminada es continua.

El número máximo de tareas en un proyecto es 32 tareas. Se pueden agrupar en 32 tareas periódicas ó 1 tarea continua y 31 tareas periódicas. El rango permitido para definir el período de las tareas periódicas es $1mseg.$ a $2000seg.$

Las tareas periódicas tienen un parámetro denominado WATCHDOG TIMERS que es el encargado de supervisar la ejecución de las mismas.

El temporizador se inicia cuando se inicia una tarea y se detiene cuando todos los programas dentro de la tarea se han ejecutado. Si el watchdog timer alcanza el valor configurado como máximo, ocurrirá una falla mayor.

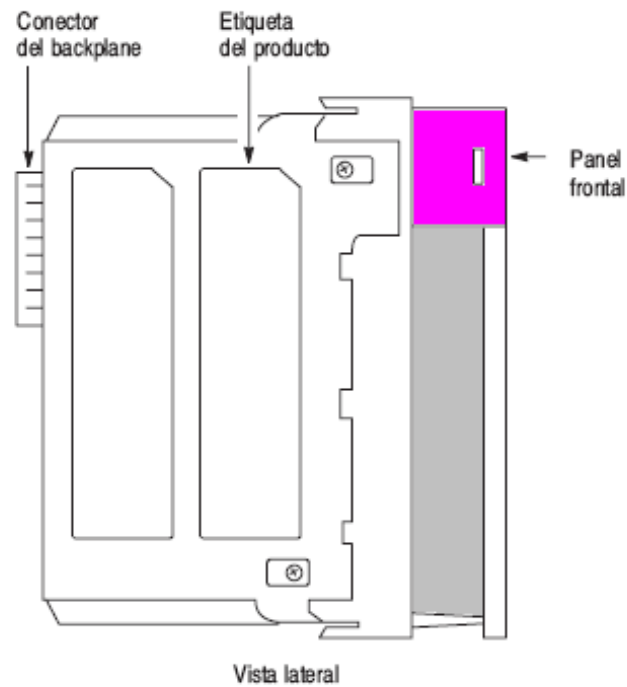


Figura 4.12: Vista frontal del módulo de interface ethernet

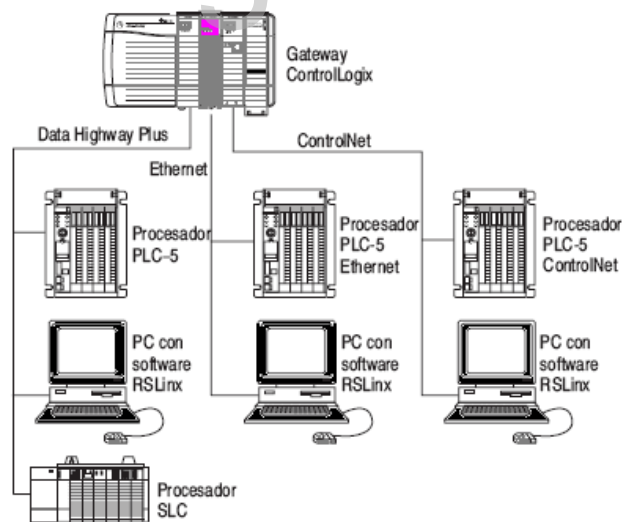


Figura 4.13: Aplicación del módulo de interface ethernet

Cada tarea puede agendar hasta 32 programas, cuando la tarea se inicia, sus programas se ejecutan en secuencia desde el primero hasta el último. Las rutinas se

dividen en: Principal: LE o BF. Marcada con el numeral 1. Subrutina: Llamada JSR. Rutina de Falla: Se ejecuta ante una falla asociada al programa. Marcada con triángulo amarillo.

El controlador define la memoria por medio de la creación de tags. Tag es un nombre basado en texto para un área de memoria en un controlador Logix5000; además cuenta con una memoria de 7.5MB.

El tipo de dato determina los bits, bytes o palabras de datos a utilizar por el tag. Los tipos de datos existentes son [3]:

1. Tipos de datos Predefinidos:

BOOL (1 bit), SINT (8 bits), INT (16 bits), DINT (32 bits), REAL (32 bits), COUNTER, TIMERS.

2. Tipo de datos Definido de los módulos:

Cuando se configura un módulo de comunicaciones o módulo I/O se configura automáticamente.

3. Tipo de datos Definido por el usuario:

Es una estructura creada por un usuario para agrupar datos en una aplicación. Este tipo de datos se compone de miembros que son los tipos de datos que conforman la estructura.

La mínima cantidad de memoria para un tag de cualquier tipo es un DINT (entero doble de 32 bits). Cuando se asignan datos por el usuario, el controlador asigna el próximo DINT(s) disponible en la memoria a cualquier tipo de datos.

Cuando los tipos de datos bool, sint, int son asignados a un tag, el controlador consume un DINT completo, pero solo utiliza parte de este. Se recomienda utilizar arreglos de datos de bool, sint, int para hacer eficiente uso de la memoria.

Se pueden crear tags disponibles para todas las tareas y programas del proyecto, módulos I/O en más de un programa para producir o consumir datos, en instrucciones de mensajes este tipo de tag se denominan globales (Controller Scope), o el caso

contrario crear tags solamente disponibles para el programa asociado, es decir, locales (Program Scope).

Un tag puede ser creado como un tag alias; no es más que un tag que se refiere a otro tag (o un segundo nombre para una sola área de memoria). Ambos tags apuntan a la misma área de memoria, y reflejan los mismos valores y cambios. El tag siendo referenciado por el tag alias se denomina tag base.

Como todos los lenguajes de programación se pueden definir arreglos. Un arreglo es una secuencia de tags indexada numéricamente, de el mismo tipo de datos agrupadas juntas en la memoria del controlador; comienza por el elemento 0.

Las instrucciones se componen como se muestra en la Figura 4.14 [8].:



Figura 4.14: Instrucción en el lenguaje escalera

El controlador evalúa las instrucciones de lógica de escalera según la condición de renglón que precede la instrucción (condición de entrada del renglón). Según la condición de la entrada de renglón que sigue la instrucción (condición de salida del renglón), lo cual a su vez, afecta cualquier instrucción subsiguiente.

Si la condición de entrada de renglón de una instrucción de entrada es verdadera, el controlador evalúa la instrucción y establece la condición de renglón de entrada según los resultados de la instrucción. Si la instrucción evaluada es verdadera, la condición de renglón de salida es falsa.

Capítulo 5

Implementación de técnicas de control clásicas bajo Control-Logix

El capítulo 5 muestra los resultados obtenidos de controlar el sistema de tanques Feedback Basic Process 38-100 [2] a partir de una plataforma SCADA comercial constituida por un autómata programable (PLC) denominado Control-Logix [13] y el software de visualización RSVIEW-32 [9], ambas tecnologías de Rockwell Automation.

5.1 Parte experimental

La implementación de los algoritmos de control en el estudio se llevó a cabo en el sistema de tanques Feedback Basic Process 38-100 presente en el laboratorio de sistema de control de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de los Andes.

El sistema de tanques Feedback Basic Process 38-100, mostrado en la Figura 5.1 es un sistema de lazo simple que utiliza agua como el fluido del proceso, el cual permite el estudio de los procesos de control utilizando las medidas de nivel y flujo como las variables del proceso a ser controladas. El sistema consiste en un circuito de flujo de agua completamente contenido en si mismo, el cual consta de de los siguientes elementos [2] [18]:

1. Dos tanques.

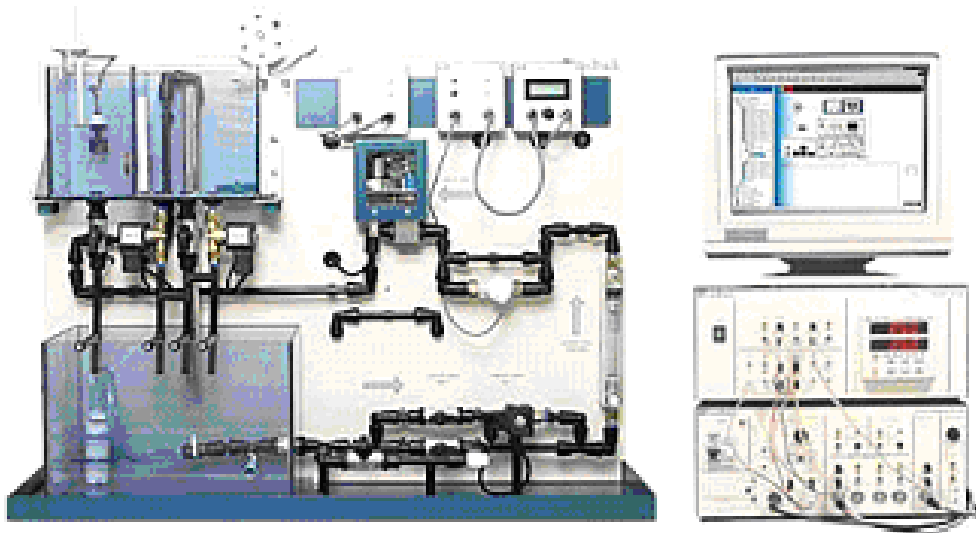


Figura 5.1: Sistema de tanques Feedback Basic Process 38-100

2. La bomba o surtidor centrífugo.
3. Válvulas manuales.
4. La Servoválvula.
5. Válvulas solenoides.
6. Sensor de nivel de tipo flotador.
7. Sensor de Flujo.
8. Dispositivo manejador de señales.

El sistema de tanques Feedback Basic Process 38-100 se compone de dos tanques: el tanque superior y el tanque inferior, en el tanque inferior (el tanque de mayor tamaño) está colocada la bomba o surtidor centrífugo, cuya tarea es mover el agua desde el tanque inferior al tanque superior por medio de una red de tuberías. Un motor eléctrico corriente continua (DC) enciende o apaga la bomba, y no puede ser manejado ningún valor intermedio. El motor es alimentado por la interfaz del proceso (PI), desde el supridor de corriente alterna (AC) en el panel trasero del PI. La bomba

funciona con 12V.

El sistema de tanques Feedback Basic Process 38-100 cuenta con válvulas manuales, que está completamente abierta cuando su perilla se encuentra paralela a la tubería que lo sostiene y completamente cerrada si ésta está perpendicular a la tubería, esto hace posible controlar la cantidad o volumen de agua que pasa a través de la válvula en un tiempo dado. Esta válvula sirve para demostrar el funcionamiento de un sistema de control manual.

La servoválvula presente en el sistema utiliza una puerta para bloquear el paso del líquido a través de la válvula, ya que la compuerta se abre o cierra según se desea, y puede tomar cualquier posición entre 100 % abierta (20 mA) y 100 % cerrada (4 mA). El movimiento vertical de la puerta y tronco de la válvula cambia el área abierta. La tasa de flujo del fluido que pasa a través del puerto es por tanto proporcionada o estrangulada posicionando el tronco de la válvula. El tronco es posicionado por un actuador. La posición de la compuerta es controlada por una señal de 4 a 20 mA, en 4mA la puerta está completamente cerrada y en 20mA está completamente abierta. La potencia requerida para operar la servoválvula es proporcional a la capacidad de flujo de la válvula y a la diferencia de presión contra la cual debe trabajar.

La servoválvula se caracteriza por una constante de tiempo, lo que implica que exhibe una respuesta transitoria, un cambio repentino en el lazo de corriente tomará un tiempo finito para establecer una nueva tasa de flujo. Un punto importante a considerar es que cuando se apague la servoválvula la posición de la puerta permanecerá en el mismo lugar cuando se vuelva a encender.

Otro tipo de válvulas que se encuentran en el sistema de tanques son las válvulas solenoides que a diferencia de las válvulas manuales y la servoválvula, puede estar solamente abierta o cerrada, el estado normal de la solenoide es cerrado y es abre al pasar una corriente a través de la bobina eléctrica de la válvula que es su principal elemento.

Hay tres válvulas solenoides etiquetadas como SV1, SV2, SV3 las cuales tienen diámetros de 6 mm., 6 mm. y 3 mm. respectivamente. Las conexiones eléctricas a esas válvulas están al lado derecho del equipo, y para ser encendidas es necesario aplicar un voltaje de 24Vdc que es suplido por la interfaz del proceso. Puesto que no hay posiciones intermedias, no pueden ser logrados controles rigurosos, como con la servoválvula, solamente esquemas de control on-off.

El sistema de tanques cuenta con dos dispositivos el transmisor de nivel, y el transmisor de pulsos de flujo y una regla de flujo visual para obtener la información del estado del sistema.

La regla de flujo visual provee una indicación de la tasa de flujo que pasa a través de las tuberías y comprende un rango de medida entre 0.4 y 4.4 litros/minuto, y es utilizable solo para agua. El instrumento está formado por un tubo de vidrio estrecho que contiene un flotador el cual toma una posición estable cuando el peso sumergido es balanceado por la subida de agua. La posición del flotante es una medida de la tasa de flujo. Su precisión varía entre ± 3 a ± 0.2 por ciento.

El transmisor de flujo (FLT) es un dispositivo que lleva la información del nivel, desde el sensor de nivel de tipo flotador en el tanque y lo transmite a la interface del proceso (PI). El sensor es un potenciómetro conectado a través de una fuente de bajo voltaje, el cual es girado por un disco flotante, debido a que el nivel de agua en el tanque cambia, el disco hace girar al potenciómetro el cual cambia el voltaje a través de él (el voltaje en sus terminales) y este voltaje es pasado al transmisor.

El sensor de tipo flotador es el primer dispositivo en producir la información sobre el estado del proceso, el cual puede ser usado para determinar la operación futura del proceso; este y dispositivos similares como el transmisor de flujo activan el control feedback para su uso. El FLT convertirá esto entonces a una señal de corriente de formato 4-20mA.

El transmisor de pulsos de flujo es un dispositivo que toma información del sensor de pulsos de flujo en la red de tuberías y lo transmite a la interfaz del proceso (PI). El sensor es una pequeña rueda dentro de la tubería la cual es movida o girada por el flujo a través de la tubería. La velocidad de la rueda es proporcional a la tasa de fluido a través de esta. Hay un sensor infrarrojo que detecta el movimiento de la rueda, cuando la rueda gira, sus aspas frenan la emisión reduciendo la salida. Con la rueda girando se produce un pulso con forma de onda, cuya frecuencia es proporcional a la tasa de rotación (y por tanto a la tasa de flujo). Este tren de pulsos pasará al transmisor donde es convertido a una señal de corriente de 4-20 mA, cuya magnitud depende de la frecuencia de onda y esta señal se envía a la interfaz del proceso (PI).

El diseño del sistema de control se realiza siguiendo el esquema de control básico mostrado en la Figura 3.1 (capítulo 3), el cual consta de un regulador, en este caso se refiere al controllogix mostrado en la Figura 5.2, que permite implementar los algoritmo de control que envían la señal de control al actuador, que es la servoválvula. La señal de control se calcula de acuerdo a la información que reciben de los sensores, que son los encargados de informar el estado actual del sistema, en este caso es el transmisor de nivel de tipo flotador, el cual mide del nivel de agua en el tanque superior y el transmisor de pulsos de flujo, encargado de medir el caudal de agua por la red de tuberías.

Se plantea un sistema de control en el cual el nivel de agua en el tanque superior es regulado por la acción de la compuerta presente en la servoválvula, Las acciones de control son calculadas por el Control-Logix y son programadas en este procesador mediante un editor con lenguaje en lógica escalera u otro lenguaje incorporado en RSLogix5000 .

Cualquier tentativa de diseño de un sistema se inicia a partir de una predicción de su funcionamiento antes que el sistema pueda diseñarse, La predicción se basa en una descripción matemática de las características dinámicas de la planta. La primera

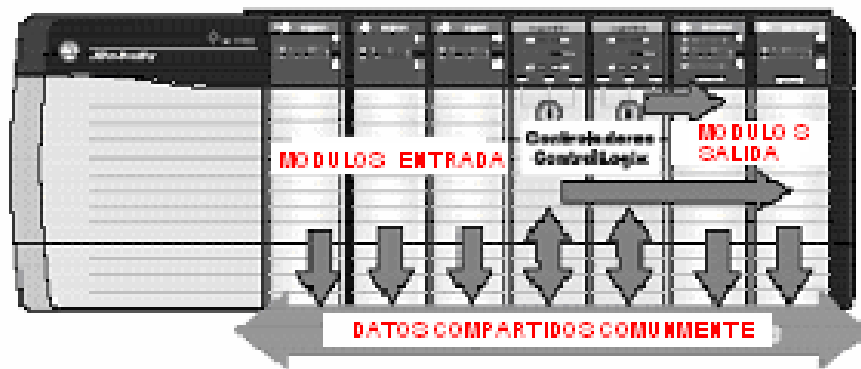


Figura 5.2: Sistema Control-Logix

fase del diseño consiste en obtener un modelo matemático que represente la dinámica de la planta a controlar en lazo abierto. Para realizar con facilidad el análisis matemático y experimental se somete el sistema con una señal de entrada de prueba de tipo escalón.

El resultado obtenido se muestra en la gráfica de la Figura 5.3, en la entrada escalón aplicada tiene una magnitud de $9.2mA$, la magnitud de la entrada escalón que se puede aplicar a la planta varía en el rango de 7.178 a $10mA$, si está fuera de ese rango el sistema es inestable. En este caso el nivel de agua en el tanque superior estabiliza en un valor de $10.5332mA$.

Los datos se tomaron con un período de muestreo de 1 segundo. No fue necesario realizar filtrado en los datos puesto que los módulos analógicos traen filtros incorporados tanto digital como analógico para los datos.

Se observa que es una dinámica lenta, tarda aproximadamente 28 minutos para estabilizar. La gráfica de la Figura 5.3 muestra un comportamiento posiblemente de un sistema de primer orden con retardo o de segundo orden con polos reales.

Para observar los resultados en unidades de longitud se tomaron los datos mostrados en la tabla 5.1.

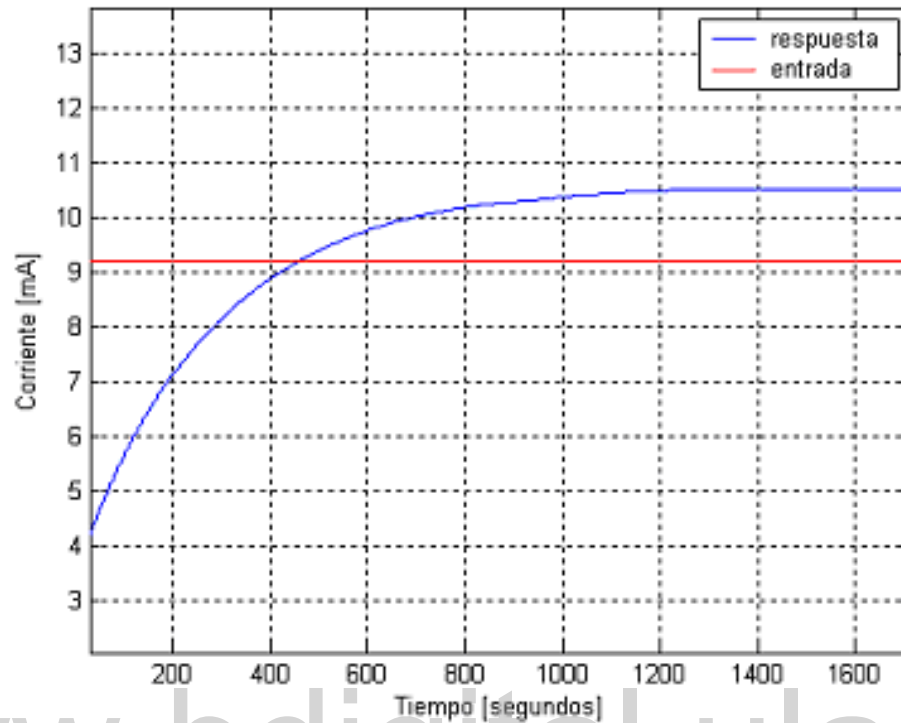


Figura 5.3: Respuesta del sistema para una entrada escalón

Graficando los valores mostrados (Figura 5.4) en la tabla 5.1 mediante excell y realizando una regresión lineal se obtuvo la ecuación 5.1 que relaciona la corriente (mA) emitida por el transmisor de nivel y la altura en cm del tanque superior.

$$Nivel(cm) = 1.3909 * Nivel(mA) - 4.72 \quad (5.1)$$

La ecuación 5.1 es útil cuando se desea conocer el nivel de agua en unidades de cm en el que estabiliza el sistema al aplicar cualquier control o cuando se somete a una entrada cualquiera. Por ejemplo para la Figura 5.3 el nivel de agua estabiliza según la ecuación 5.1 en $\simeq 9.93cm$ que es equivalente a decir en 10.5332

Al analizar sistemas que implican el flujo de líquidos, resulta necesario dividir los regímenes de flujo en laminar y turbulento de acuerdo con la magnitud del número

Tabla 5.1: Relación corriente (mA) y altura en (cm)

Altura (cm)	Corriente (mA) del sensor de nivel
0.2	3.8991
2	4.926123
2.5	5.3102
3.5	6.0529
4.7	6.8737
5.3	7.2945
6.3	7.9998
7.4	8.7523
8.1	9.2762
9.1	9.8861
10	10.5592
11.4	11.6738
12.5	12.4966
13.7	13.3939
14.1	13.9429
15.2	14.0038

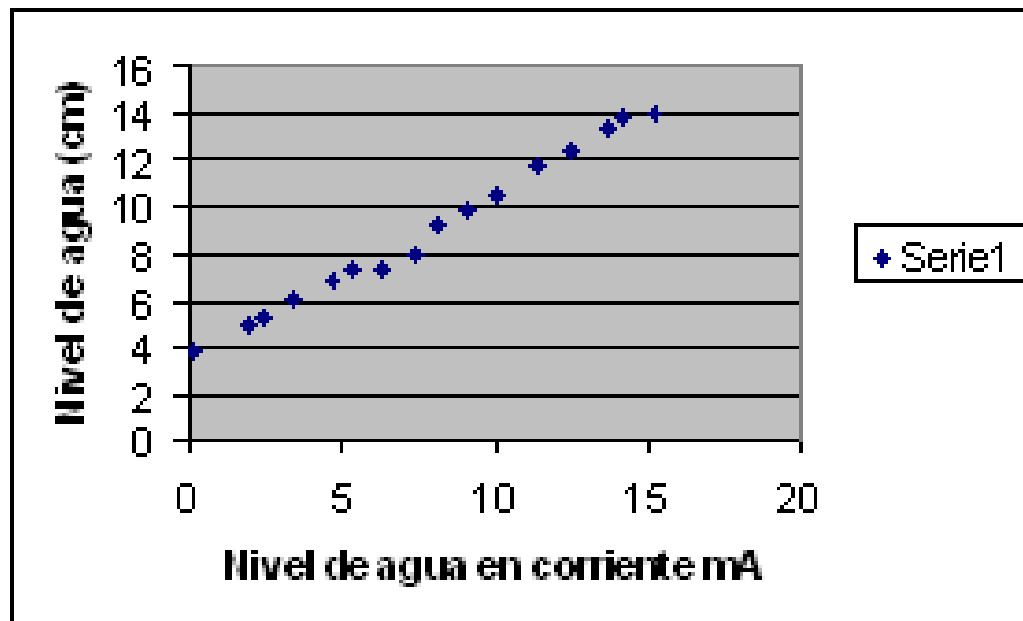


Figura 5.4: Relación corriente (mA) Vs. altura en (cm)

de Reynolds. [22] Si el número de Reynolds es menor a 2300 el flujo es laminar, si está entre 2300 y 4000 el flujo es impredecible y a veces cambia de laminar a turbulento y viceversa. Este tipo de flujos se denomina flujo de transición. Si el número de Reynolds es mayor a 4000, generalmente es turbulento.

Los sistemas que contienen un flujo turbulento a menudo deben representarse mediante ecuaciones diferenciales no lineales, en tanto que los sistemas con un flujo laminar pueden representarse mediante ecuaciones diferenciales lineales.

Estudios realizados sobre el sistema de tanques [18], muestran que el comportamiento del flujo es impredecible, puede tener los dos comportamientos, para la obtención del modelo suponemos un flujo turbulento lo que indica que el sistema se representa por ecuaciones diferenciales no lineales, implica que el sistema es no lineal, y se debe a las características de funcionamiento de la válvula solenoide.

Como el sistema es no lineal, conduce a trabajar preferentemente en torno a un determinado punto de trabajo (o de operación). Para realizar la identificación del sistema por ser un sistema no lineal, se somete el sistema con una entrada de tipo escalón variando su magnitud (hasta un 10 % del valor de la entrada) para observar

Tabla 5.2: Punto de operación y variaciones realizadas en la entrada para la identificación

Entrada (mA)	Salida (mA)	Salida (cm)	Entrada (lts/min)
9.2	10.5332	10	1.6
9.66	13.287	13.6	1.7
8.626	7.178	7.5	1.5

el comportamiento ante distintas entradas de tipo escalón en una región determinada. Se escoge una señal de prueba de tipo escalón por que las señales escalonadas (con cambios bruscos) son muy utilizadas, puesto que contienen un espectro suficientemente amplio de frecuencias.

La tabla 5.2 muestra el punto de operación seleccionado para realizar la identificación del sistema y las respectivas variaciones realizadas en la entrada para observar el comportamiento.

Los datos adquiridos para realizar la identificación se muestra en la Figura 5.5

Anteriormente se había mencionado una posible estructura a la que se podría aproximar el comportamiento del sistema, por tanto, se utilizó el método experimental para realizar la identificación y se aproximó a un modelo de primer orden con retardo de transporte debido al comportamiento observado en la gráfica de la figura 5.3 El método [14] se describe en la Figura 5.6

Donde:

1. Se debe medir:
 - u_0 : nivel inicial de entrada.
 - u_f : nivel final de entrada.
 - y_0 : nivel inicial de salida.
 - y_f : nivel final de salida.
 - T_0 : Tiempo de cambio de la entrada.

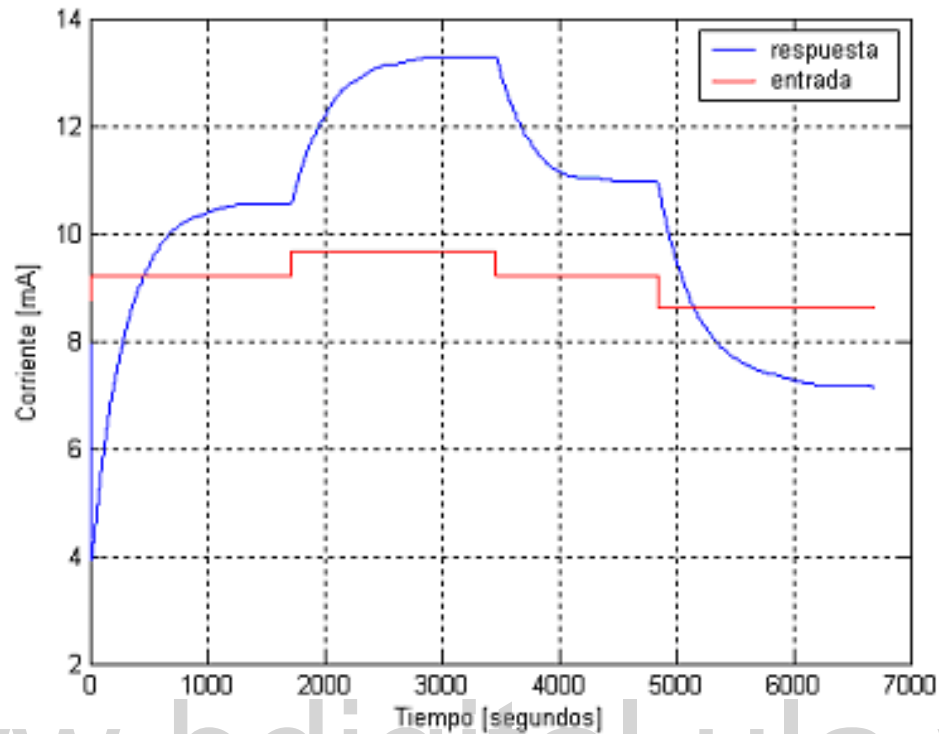


Figura 5.5: Respuesta del sistema ante distintas entradas

- T_δ : Tiempo en que la salida comienza a responder.
- T_{63} : Tiempo en que la salida alcanza el 63.2 porcentaje de $y_f - y_0$.

2. Calcular:

$$\begin{aligned}\widehat{K} &= \frac{y_f - y_0}{u_f - u_0} \\ \widehat{\tau} &= T_{63} - T_\delta \\ \widehat{T}_r &= T_\delta - T_0\end{aligned}\quad (5.2)$$

3. Para obtener la transferencia estimada:

$$\widehat{G}(s) = \frac{\widehat{K} * \exp(-s\widehat{T}_r)}{\widehat{\tau}s + 1}\quad (5.3)$$

Para variaciones en la entrada por encima del punto de operación se muestra en la Figura 5.7

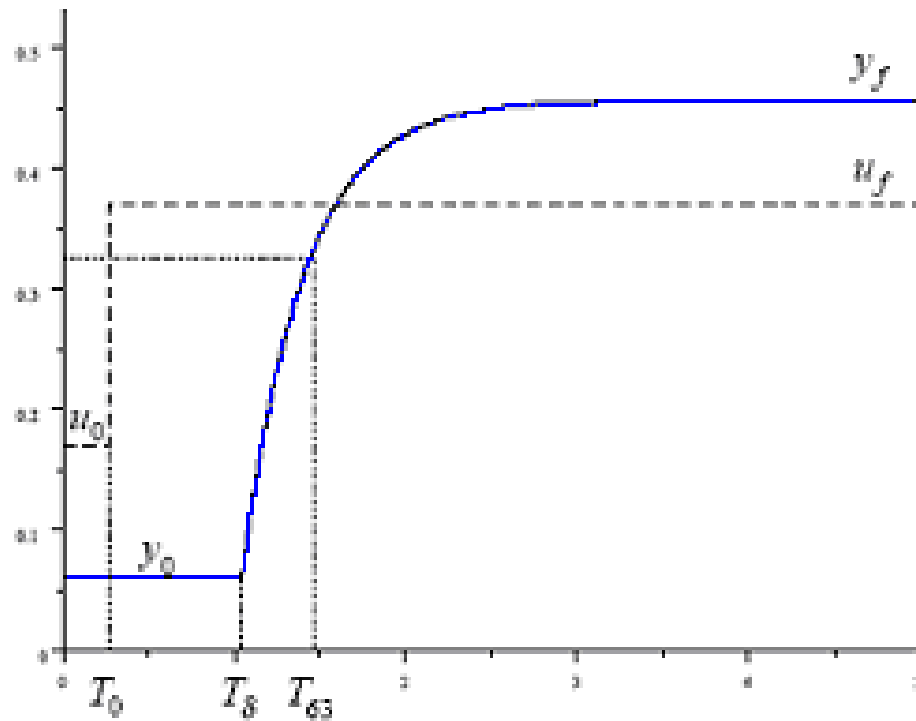


Figura 5.6: Respuesta del sistema ante distintas entradas

De donde se obtienen las mediciones siguientes: $T_0 = 1710$

$$T_\delta = 1721$$

$$y_0 = 10.5332$$

$$y_f = 13.287$$

$$T_{63.2} = 2024.9/y = 12.273$$

$$u_0 = 9.2$$

$$u_f = 9.66$$

Realizando los cálculos de las ecuaciones descritas en (5.2) el modelo matemático obtenido es:

$$\widehat{G}(s) = \frac{5.8965 * \exp(-11s)}{303.9s + 1} \quad (5.4)$$

Para variaciones en la entrada por debajo del punto de operación se muestra en la Figura 5.8

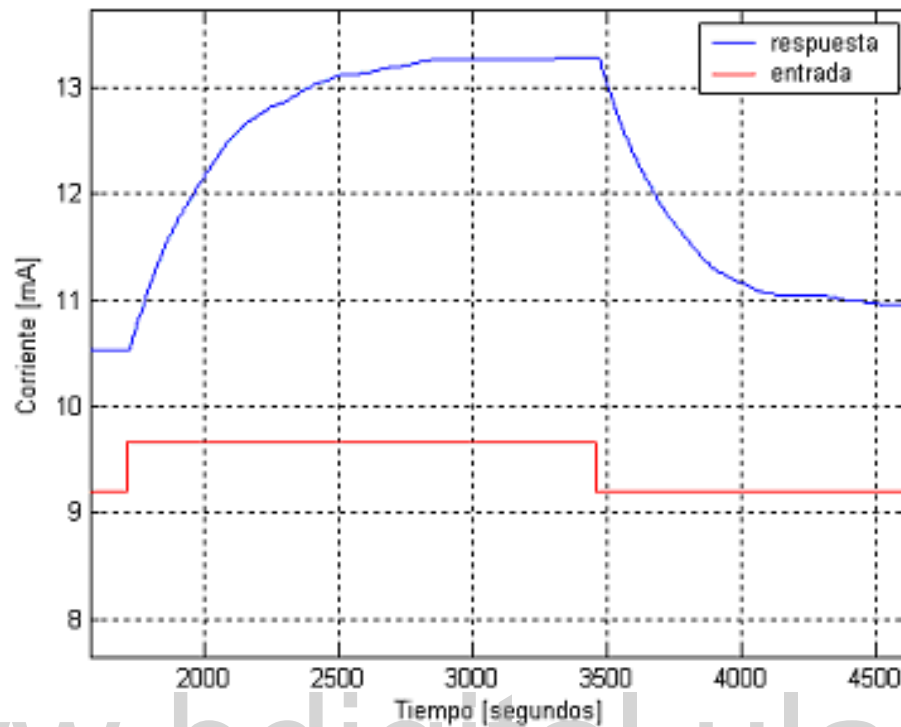


Figura 5.7: Variación por encima del punto de operación

De donde se obtienen las mediciones siguientes: $T_0 = 4839$

$$T_\delta = 4850$$

$$y_0 = 10.9534$$

$$y_f = 7.178$$

$$T_{63.2} = 5168/y = 8.567$$

$$u_0 = 9.2$$

$$u_f = 9.66$$

Realizando los cálculos de las ecuaciones descritas en (5.2) el modelo matemático obtenido es:

$$\widehat{G}(s) = \frac{6.5774 * \exp(-11s)}{318.5s + 1} \quad (5.5)$$

Las Figuras 5.9, 5.10, 5.11, y 5.12 muestran la validación de los modelos obtenidos con los datos experimentales.

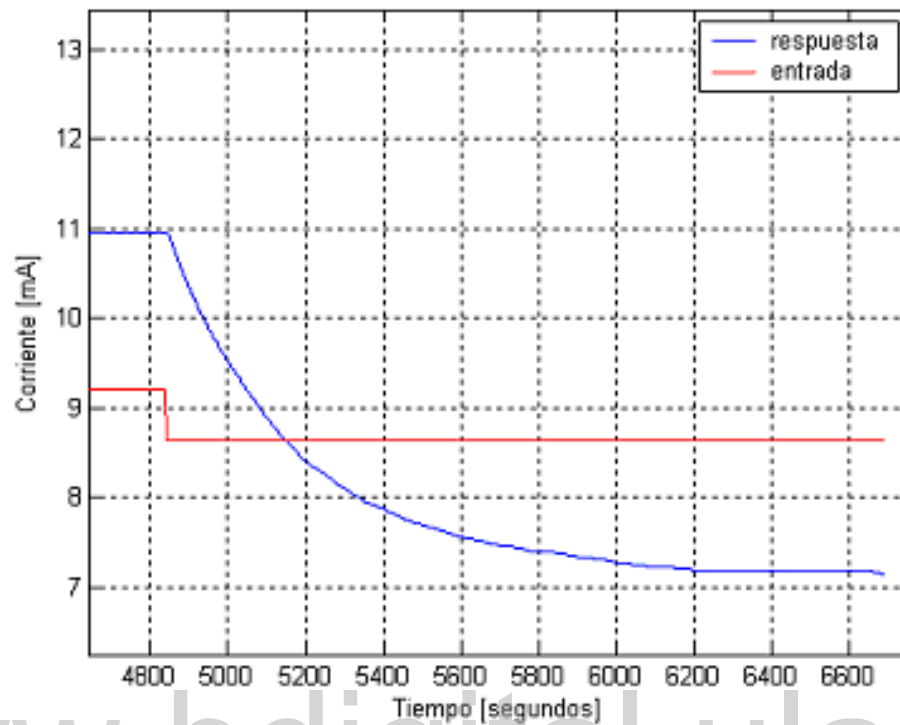


Figura 5.8: Variación por debajo del punto de operación

El modelo matemático a utilizar para el diseño del sistema de control es el modelo de la ecuación (5.4) ya que se ajusta mejor los datos reales y representa una mejor aproximación de la dinámica del sistema como se observa en las Figuras 5.9 y 5.10. La función de transferencia estimada es:

$$\widehat{G}(s) = \frac{5.8965 * \exp(-11s)}{303.9s + 1}$$

Se debe tomar en cuenta que el modelo obtenido es un modelo incremental, lo que implica que se predice sólo el comportamiento local, no sirve para estudiar el comportamiento lejos del punto de operación.

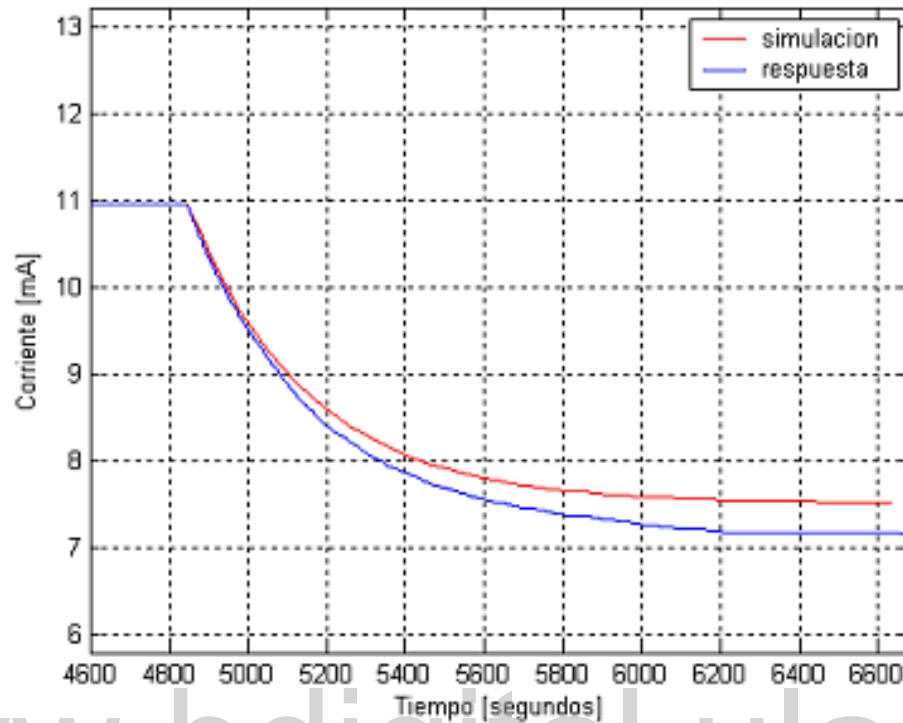


Figura 5.9: Validación del modelo (modelo 1 vs datos de bajada)

El retardo de tiempo se puede despreciar porque es un valor muy pequeño comparado con la constante de tiempo del sistema [21], al despreciar el retardo la función de transferencia toma la siguiente forma:

$$\widehat{G}(s) = \frac{5.8965}{303.9s + 1} \quad (5.6)$$

La función de transferencia sin retardo es el modelo matemático definitivo a utilizar para el diseño del sistema de control que relaciona la entrada y salida del sistema. Para llegar a este resultado se tomaron varias muestras para realizar el análisis seleccionándose la mejor.

A partir de la función de transferencia obtenida se puede obtener su representación en variables de estado incremental (variables perturbadas) dando como

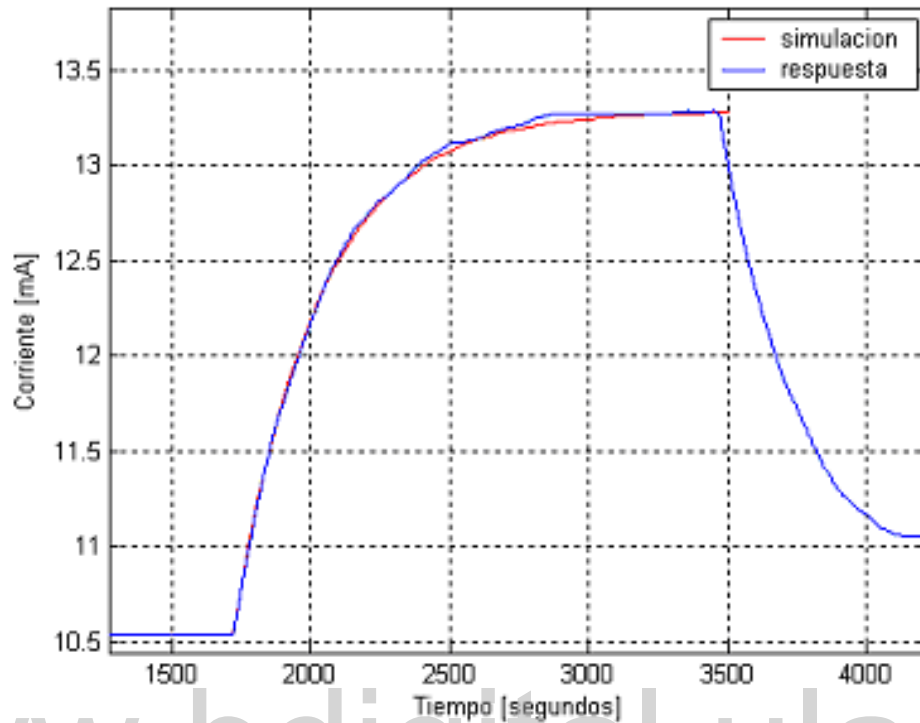


Figura 5.10: Validación del modelo (modelo 1 vs datos de subida)

resultado:

$$x_{\delta}(t)' = Ax_{\delta}(t) + Bu_{\delta}(t) \quad (5.7)$$

$$y(t) = Cx_{\delta}(t) \quad (5.8)$$

Donde:

$$A = \left[\frac{-1}{\tau} \right]; B = \left[\frac{K}{\tau} \right]; C = [1]; \tau = 303.9; K = 5.9865;$$

La Figura 5.13 muestra la simulación (realizada mediante software Matlab) del sistema por representación por variables de estado.

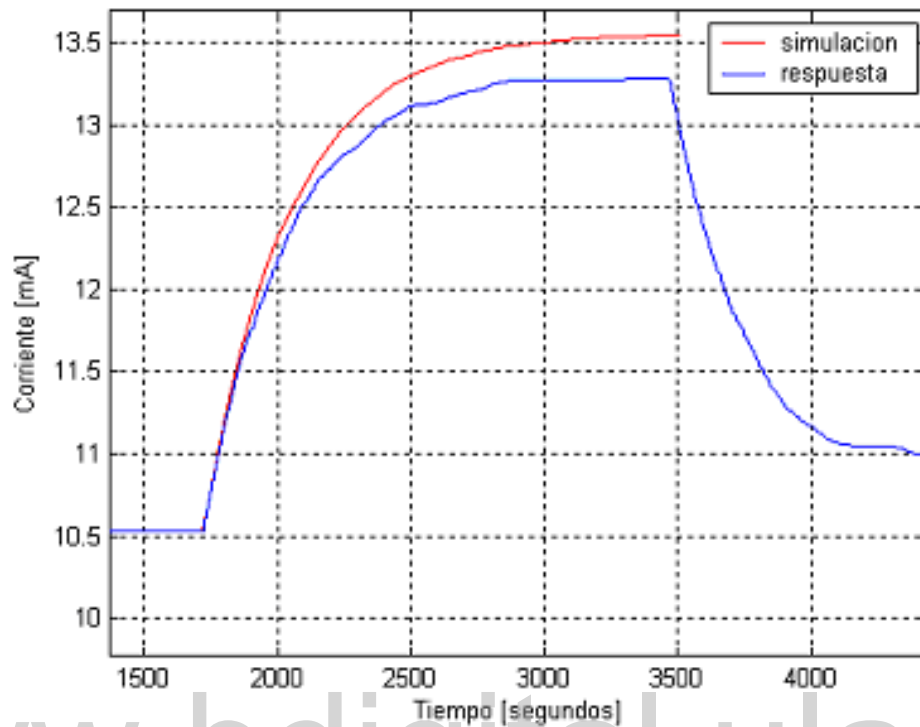


Figura 5.11: Validación del modelo (modelo 2 vs datos de subida)

La interpretación de los valores perturbados en términos de los valores originales admite una representación gráfica [26] como se muestra en la Figura 5.14

Se requiere conocer esta relación para realizar las simulaciones respectivas mediante Matlab y conocer la diferencia de metodología de diseño que existe entre los sistemas lineales y la aproximación de un sistema no lineal a un sistema lineal (variables perturbadas) alrededor de un punto de operación.

Para continuar con el diseño se seleccionan las variables que intervienen en el sistema de control, estas variables se escogen de acuerdo a las características de la planta y permite definir las especificaciones de control para obtener una mejor dinámica de la misma. Estas variables se definen para el sistema de tanques como:

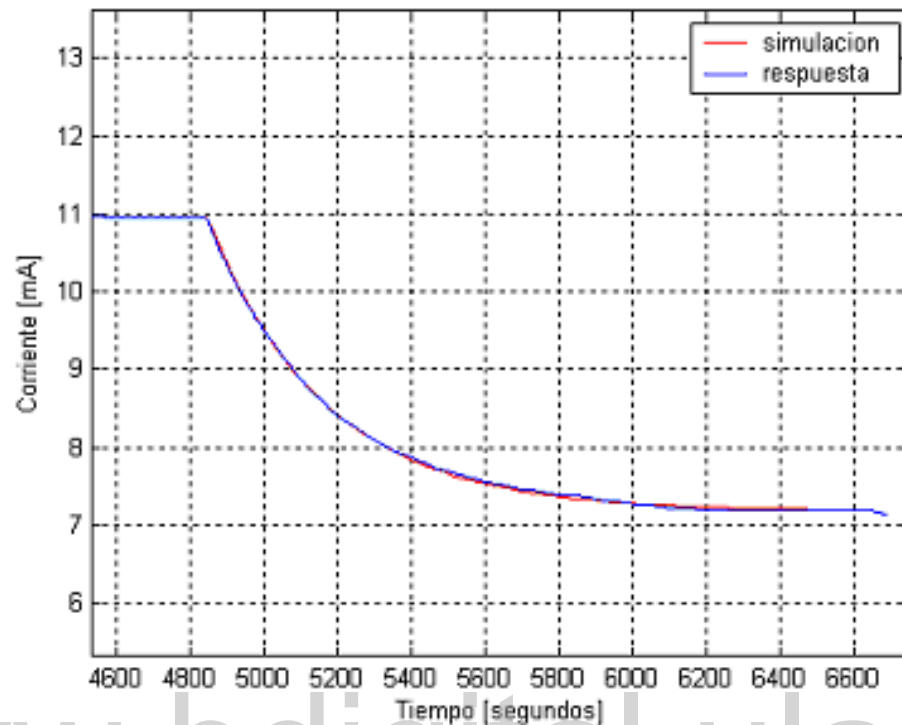


Figura 5.12: Validación del modelo (modelo 2 vs datos de bajada)

- Variable controlada: el nivel de agua en el tanque superior.
- Variable medida: el nivel de agua en el tanque superior a través de un sensor de nivel de tipo flotador y el flujo a través de la red de tuberías por el transmisor de pulsos de flujo.
- Variable manipulada: La corriente en la servoválvula.

El montaje del sistema Control-Logix y el sistema de tanques para realizar control se muestra en la Figura 5.15.

Se quiere mejorar el desempeño del sistema de tanques, para eso el controlador se encarga de mejorar la respuesta total del sistema (respuesta transitoria y respuesta permanente) mediante la ubicación de los polos en un lugar deseado por los métodos descritos en el capítulo 3. (sección 3.2.4).

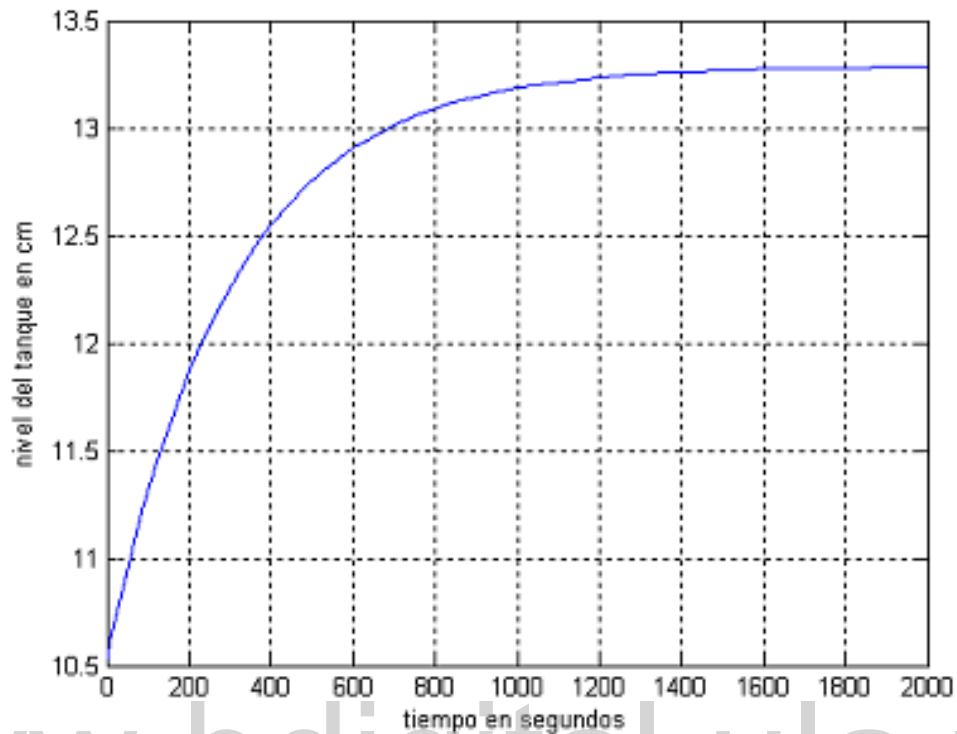


Figura 5.13: Respuesta en el tiempo por medio del espacio estado

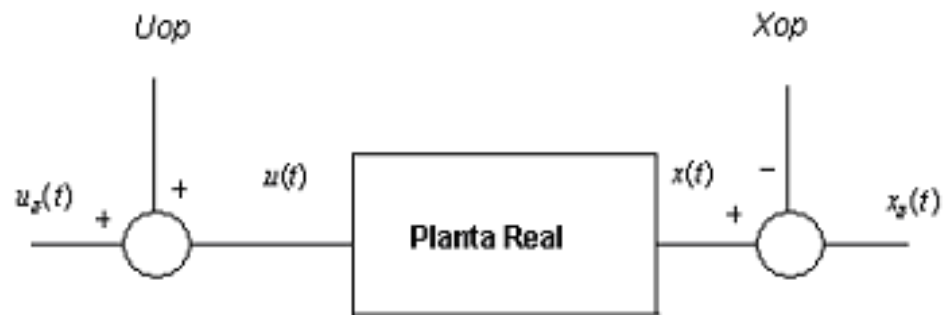


Figura 5.14: Relación entre variables originales y variables perturbadas

Los controladores implementados para solucionar el problema planteado de forma general son: controlador adelanto-atraso, controlador PID clásico, controlador PID clásico con antiwindup y realimentación del vector de estados.

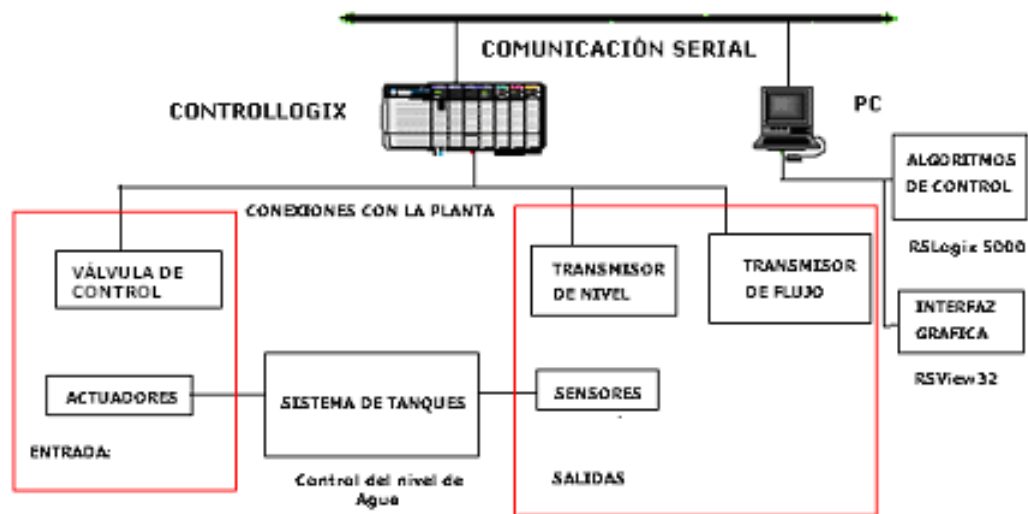


Figura 5.15: Montaje del sistema Control-Logix con la planta

El diseño de estos controladores se realiza en tiempo continuo con base a la teoría de sistema lineales, en vista de que el sistema que se está tratando es un sistema no lineal, el problema se reduce a trabajar en una región de operación, donde fue realizada la identificación del sistema para poder aplicar la teoría y técnicas de control lineales; a excepción del PID clásico con antiwindup que esta diseñado para trabajar en cualquier punto de operación por que compensa los efectos que produce la saturación del actuador.

A continuación siguiendo la metodología descrita en el capítulo 3, sección 3.2.4 para cada controlador implementado se muestran los cálculos obtenidos de los parámetros del controlador para cada caso y al mismo tiempo la validación del diseño.

Compensador adelanto-atraso

El esquema de control se muestra en la Figura 5.16. La función de transferencia del controlador es de la forma:

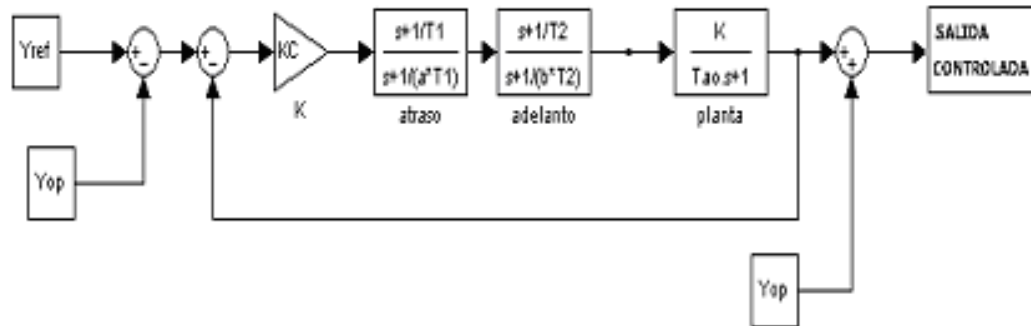


Figura 5.16: Esquema de compensación en adelanto-atraso

$$G(s) = K \frac{1 + aT_1s}{1 + T_1s} * \frac{1 + bT_2s}{1 + T_2s} \quad (5.9)$$

Con: $b > 1; 0 < a < 1$

Se requiere mejorar la constante de error de posición para tener una respuesta más rápida y que sea estable en estado estacionario. La metodología para calcular los parámetros del controlador es:

Paso 1:

A partir del requerimiento en la constante de error estático de posición se obtiene:

$$e_p \leq 10 \Rightarrow Kp \geq 10$$

$$Kp = \lim_{s \rightarrow 0} C(s)G(s)$$

$$= \lim_{s \rightarrow 0} \frac{K * 5.9865}{303.9 * s + 1}$$

$$K_p = K * 5.9865$$

Fijando $K_p = 30 \Rightarrow K = 5.01127$.

Paso 2:

Se dibuja las trazas del sistema no compensado con la ganancia obtenida en el paso anterior:

donde se obtiene la Figura 5.17

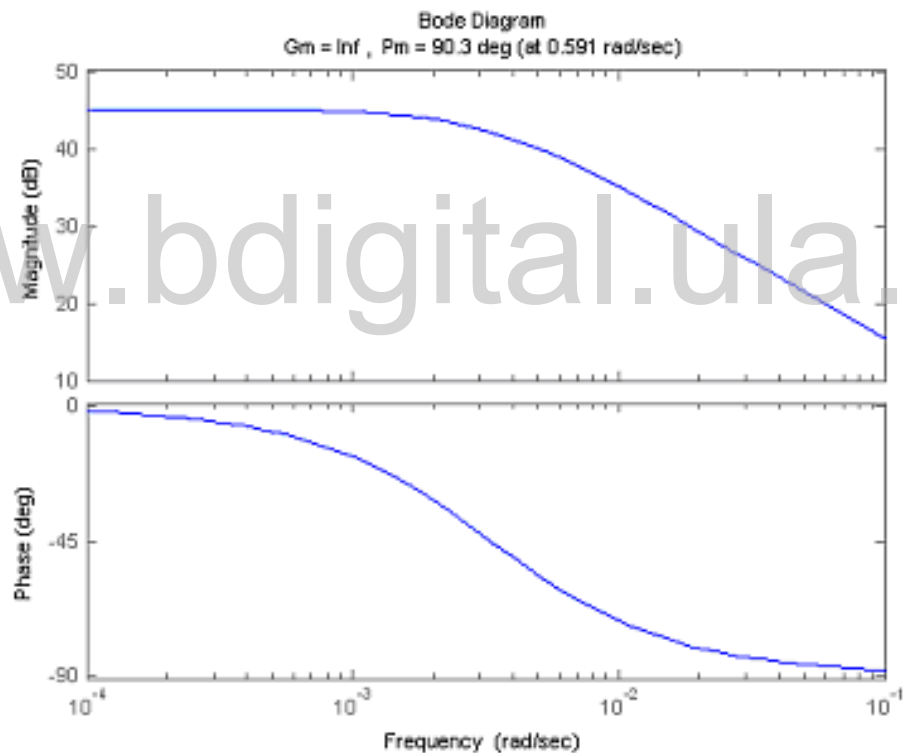


Figura 5.17: Diagrama de Bode del sistema sin compensar con la ganancia ajustada

Paso 3:

De la Figura 5.17 se observa que el valor del margen de fase es 90.3° y el margen de ganancia infinito

Paso 4:

se fija una frecuencia de cruce adecuada para el sistema $Wg = 0.05\text{rad/seg}$.

Paso 5:

Cálculo de los parámetros del compensador.

$$\frac{1}{aT_1} = \frac{w'_{gc}}{10} \Rightarrow aT_1 = 200$$

$$\Phi_m = 15^\circ$$

$$b = \frac{1 + \sin(\Phi_m)}{1 - \sin(\Phi_m)} \Rightarrow b = 1.6984$$

$$T_2 = \frac{1}{\sqrt{bw'_{gc}}} \Rightarrow T_2 = 15.3465$$

Paso 6:

Ganancia debida al compensador de adelanto: $10 * \log(b) = 2.94$

Ganancia de la planta en w'_{gc} : $20 * \log |KG(j * w'_{gc})| = 5.88$

Compensación del controlador en atraso: $20 * \log(a) = -(2.94 + 5.889)$

$$a = 0.3894$$

$$T_1 = 513.6107$$

El compensador de adelanto-atraso determinado es, entonces:

$$G(s) = 5.011 \frac{1 + 200s}{1 + 513.12s} * \frac{1 + 26.06s}{1 + 15.3465s} \quad (5.10)$$

El sistema compensado tiene la siguiente función de transferencia en lazo abierto:

$$G(s) = \frac{1 * \exp(4)(4.7186s^2 + 0.3167s + 0.0006)}{1 * \exp(6)(1.5842s^3 + 0.07389s^2 + 0.0005s)} \quad (5.11)$$

Simulaciones del controlador

Las simulaciones del controlador se observan en las Figuras 5.18 y 5.19

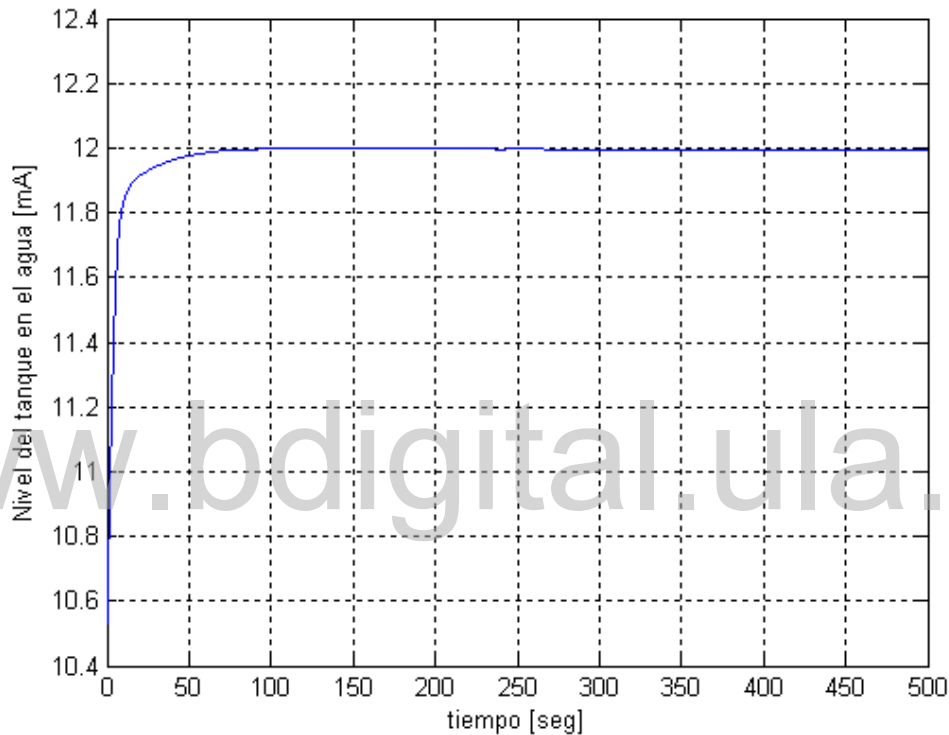


Figura 5.18: Simulación de la respuesta del sistema con controlador en adelanto atraso

Validación del diseño

La validación del diseño del controlador se observan en la Figuras 5.20 y 5.21

En las gráficas de las Figuras 5.20 y 5.21 se observa que la dinámica es más rápida, no hay mucha discrepancia, el sistema es estable y no presenta error en estado estacionario.

el controlador trabaja en una región de operación y comienza a operar cuando el sistema se encuentra en dicha región de lo contrario el sistema es llevado al punto

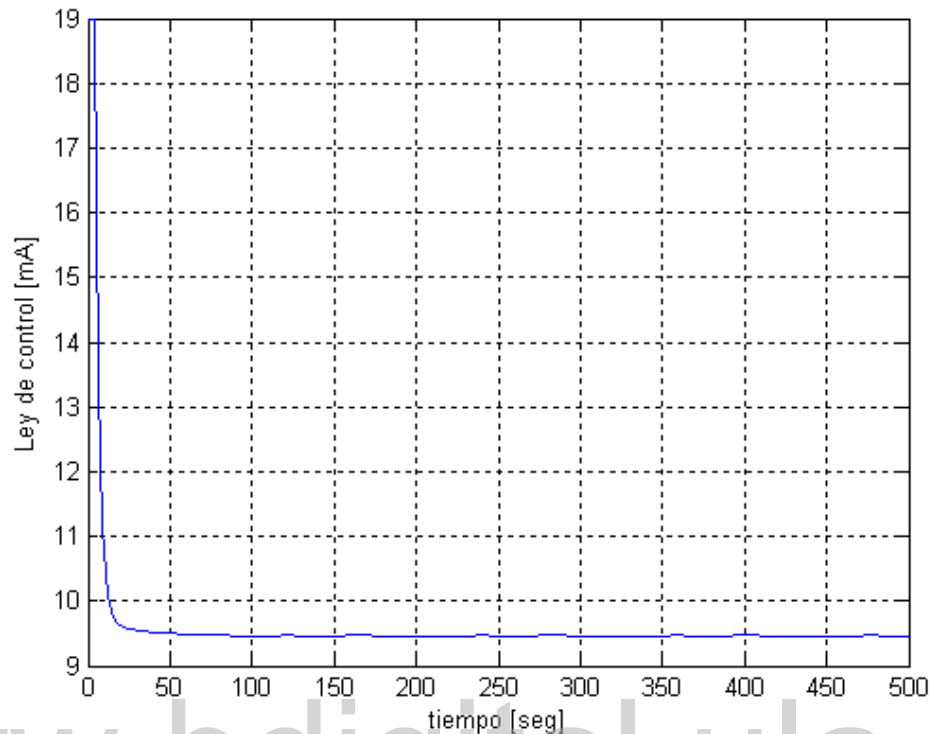


Figura 5.19: Ley de control aplicada adelanto-atraso

de operación mediante un swing, esto significa que si el nivel de agua en el tanque superior esta por debajo del límite inferior de la región de operación se envía la acción de control máxima permisible por el actuador ($19mA$).

Es posible que el sistema presente problemas en algunos de sus componentes y esto puede afectar la respuesta del sistema, a veces se presentan fallas con el arranque del motor y no funciona correctamente, lo que afecta el flujo de agua que envía por las tuberías.

Cuando se diseña una ley de control en general se debe tomar en cuenta los límites del actuador, si el actuador se satura la respuesta transitoria del sistema se ve afectada y no se obtienen los resultados esperados o existe una discrepancia. Se trata de fijar los parámetros de tal forma de no exigir más de lo que puede dar la planta. Las figuras 5.22 y 5.23 comprueban que la respuesta si es afectada por causa de la saturación en el actuador. En un instante de tiempo determinado la acción de control

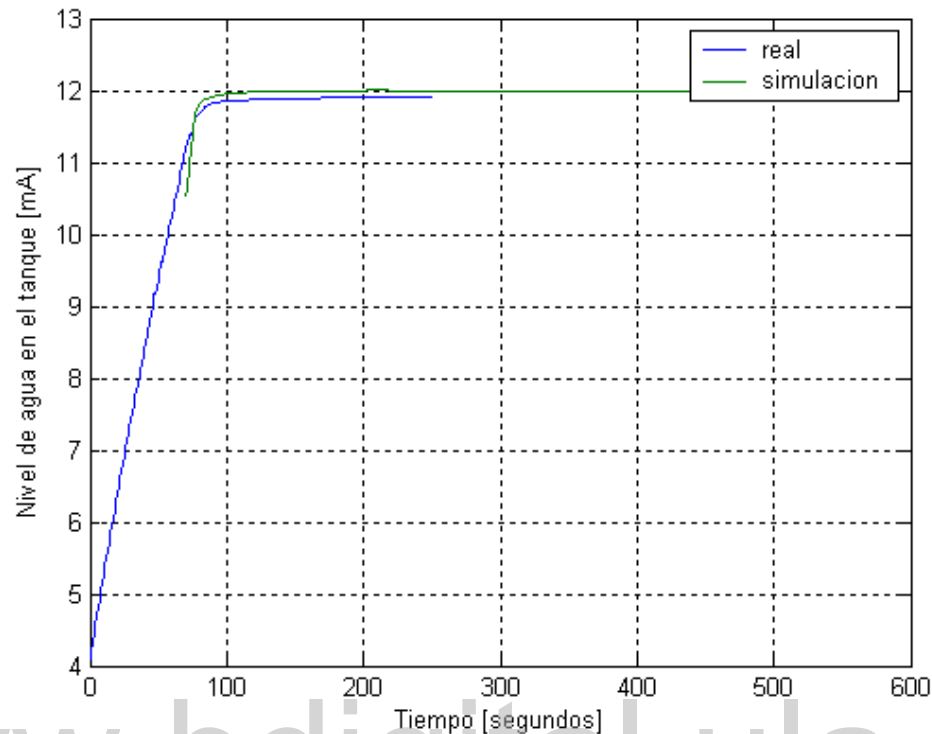


Figura 5.20: Respuesta del sistema con controlador en adelanto atraso

se saturó y produjo efectos no deseados en el sistema, y alcanzó un valor de 35mA.

El controlador adelanto-atraso incrementó el orden del sistema en dos, por lo que el sistema es más complejo, ahora el sistema es de orden tres.

Controlador PI clásico

Se implementa un controlador proporcional integral clásico para que el sistema cumpla con las siguientes especificaciones de diseño:

- $T_s = 100$ tiempo de establecimiento
- $\zeta = 1.2$ coeficiente de amortiguamiento

La metodología para obtener los parámetros del Controlador PI es por el método de asignación de polos. Se calcula la función de transferencia del sistema en lazo

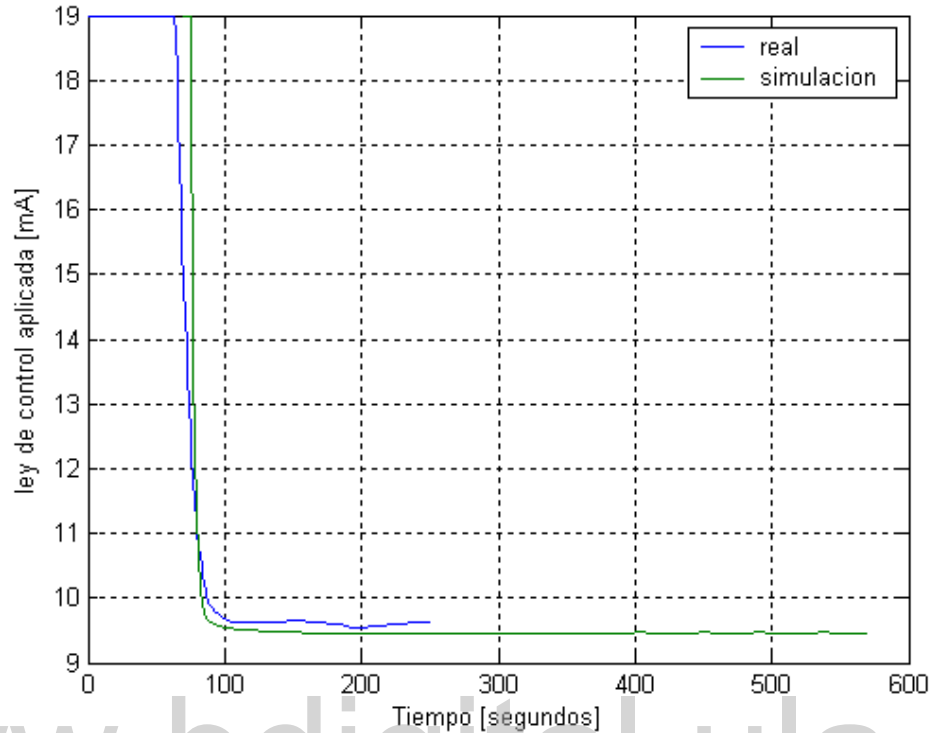


Figura 5.21: Ley de control aplicada adelanto atraso

cerrado, se extrae el denominador y se iguala los coeficientes de potencias de igual grado con los coeficientes del polinomio característico deseado y se resuelve el sistema de ecuaciones para obtener los parámetros.

La función de transferencia se calcula por la ecuación (3.14) descrita en el capítulo 3:

$$M(s) = \frac{G_c(s)G(s)}{1 + G_c(s)G(s)}$$

$$G_c(s) = \frac{Kp * s + Ki}{s}$$

El polinomio característico del sistema es:

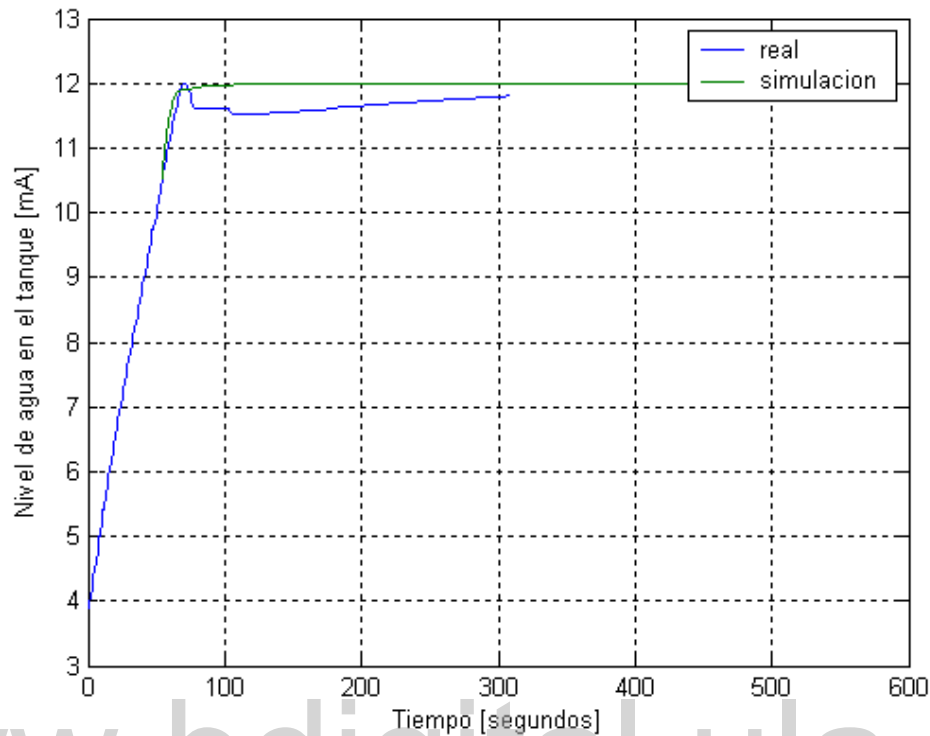


Figura 5.22: Respuesta del sistema con controlador en adelanto atraso

$$P(s) = s^2 + \frac{1+K*Kp}{\tau} s + \frac{K*Ki}{\tau}$$

El polinomio característico deseado que cumple con las especificaciones es:

$$P(s) = s^2 + 2 * \zeta * wn * s + wn^2$$

$$P(s) = s^2 + 0.0800s + 0.0011$$

el valor de wn se calcula por el criterio del 2 % [22]:

$$wn = \frac{4}{T_s * \zeta}$$

Igualando coeficientes de igual potencia y resolviendo el sistema de ecuaciones donde las incógnitas son los parámetros del controlador Ki y Kp se obtiene:

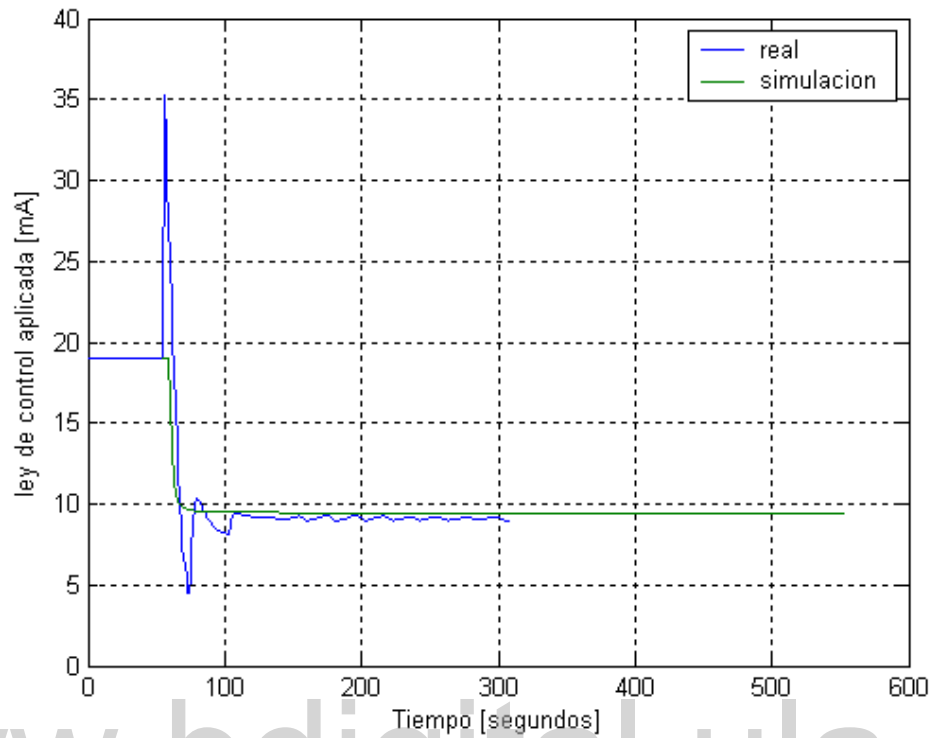


Figura 5.23: Ley de control aplicada adelanto atraso

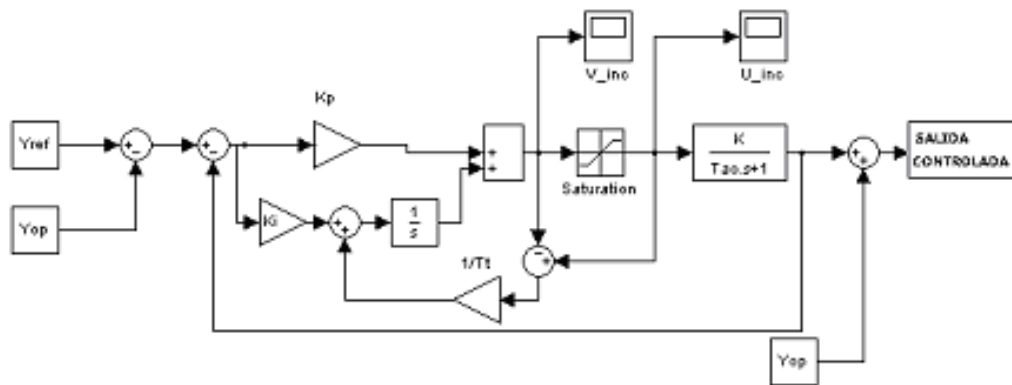


Figura 5.24: Esquema de compensación de un controlador PI

$$\begin{aligned}
 K_i &= \frac{\omega n^2 \tau}{K} \\
 K_p &= \frac{2 * \zeta * \omega n - 1}{K}
 \end{aligned}
 \tag{5.12}$$

Sustituyendo los valores de ω_n y ζ de acuerdo a las especificaciones de diseño da como resultado el valor numérico de los parámetros del controlador:

$$K_p = 3.8941 \quad K_i = 0.0564$$

La función de transferencia del controlador PI aplicado es:

$$G_c(s) = \frac{3.8941 * s + 0.056}{s}$$

La función de transferencia del sistema compensando es:

$$G(s)G_c(s) = \frac{3.6045 * s + 0.337}{s(s^2 + 0.08s + 0.0011)}$$

Simulaciones del controlador

Las simulaciones del controlador PI se muestran en la Figuras 5.25 y 5.26

Validación del diseño

La validación del diseño del controlador se observan en la Figuras 5.27 y 5.28.

El controlador PI cumple las especificaciones de diseño y se puede verificar calculando los polos que rigen la dinámica del sistema a partir de la ecuación característica en lazo cerrado de la función de transferencia del sistema compensado:

$$P(s) = s(s^2 + 0.08s + 0.0011)$$

Los polos dominantes son: $s_1 = -0.0621$ $s_2 = -0.0179$ $s_3 = 0$

El polo en el origen lo convierte en un sistema de tipo 1, implica que el error de posición es cero, en consecuencia agregar un polo en el origen elimina el error, y se observa claramente en la gráfica de la Figura 5.27 que después de transcurrido un tiempo T_s el sistema se mantiene cercano a la referencia impuesta.

El cero de la función de transferencia del sistema en lazo cerrado tiene influencia en la dinámica del sistema y es por eso que la respuesta presenta un sobrepico y se

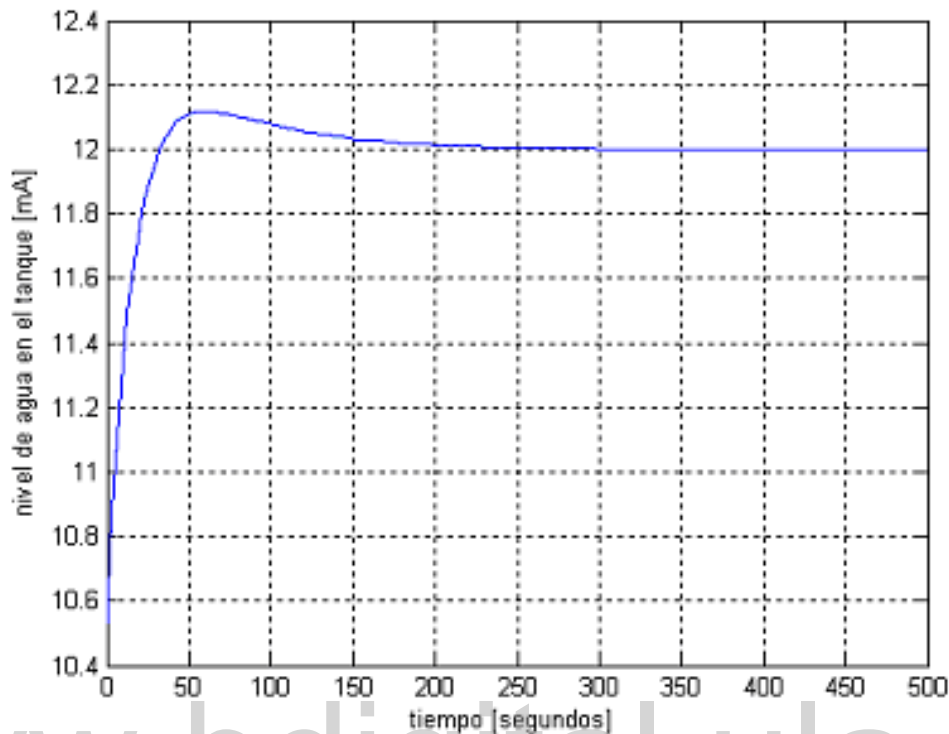


Figura 5.25: Simulación de un controlador PI

ubica muy cercano al origen para evitar efectos desestabilizadores causados por el polo ubicado en el origen, por tal razón la constante k_i tiene un valor pequeño.

La respuesta del sistema sometido a perturbaciones se observan en la Figuras 5.29 y 5.30 respectivamente:

A pesar de las perturbaciones, el sistema sigue a la referencia en forma deseada. Al igual que el controlador adelanto-atraso, el controlador PI opera en una región de operación de forma similar al compensador adelanto-atraso por tratarse de un sistema no lineal y el método de diseño es en base a la teoría de sistemas lineales.

Controlador PID anti-wihdup (anti-rebote)

El esquema de control implementado se muestra en la Figura 5.31.

Simplemente agregamos un lazo al controlador PI clásico para que compense

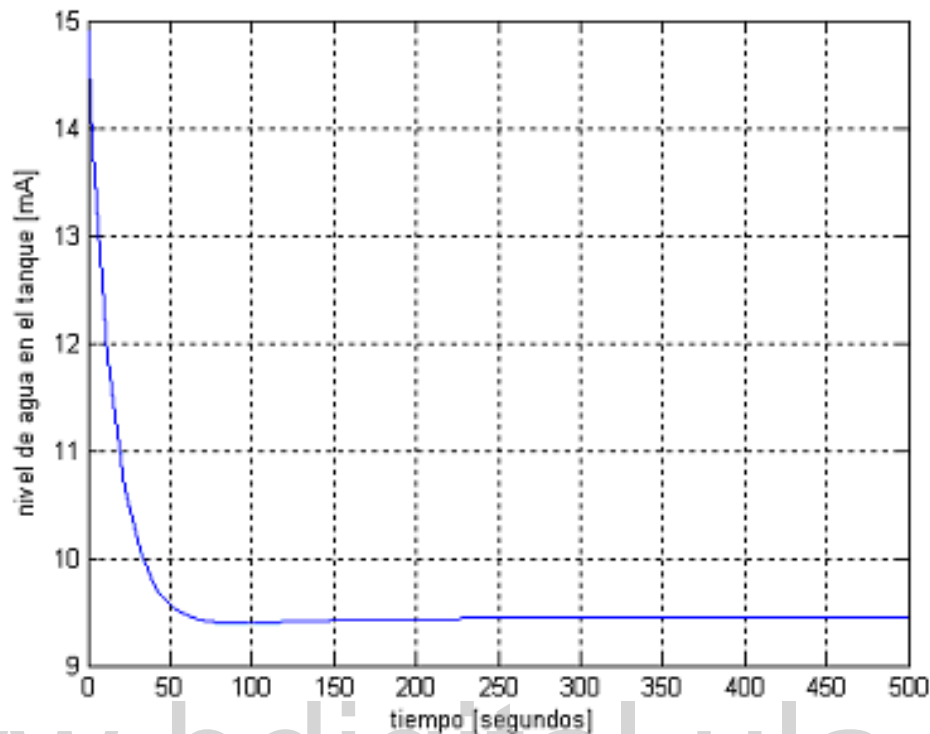


Figura 5.26: Ley de control PI simulada

la saturación, el valor del parámetro T_t se selecciona igual al valor T_i del controlador PI.

Simulaciones del controlador

Las Figuras 5.32 y 5.33 muestran los resultados obtenidos:

Validación del diseño

Las Figuras 5.34 y 5.35 muestran los resultados obtenidos del controlador PI con compensación antiwindup y las simulaciones del PI ideal y la simulación del PI antiwindup, donde se observa que se mejora notablemente la respuesta transitoria. En la simulación del PI ideal no se toma en cuenta la saturación. En las Figuras 5.36 Y refPIE2 se muestra la respuesta del sistema con un controlador PI ideal sin compensar la saturación y las simulaciones del PI ideal y el PI antiwindup, donde la

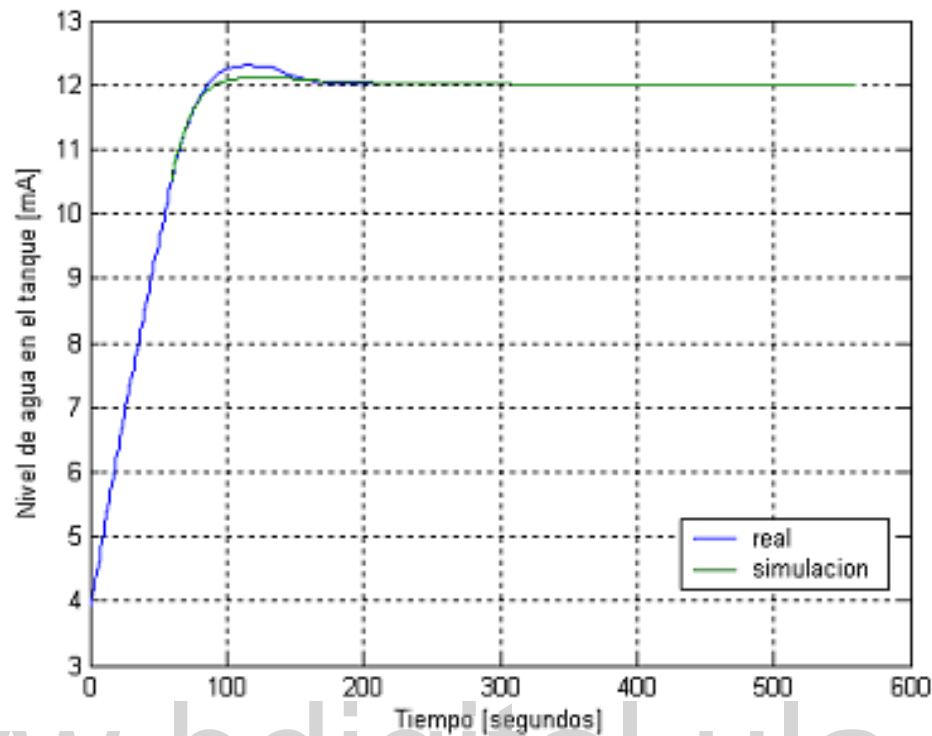


Figura 5.27: Respuesta del sistema con un controlador PI

respuesta transitoria se satura, implica que el tanque se desborda por presentar un sobrepico elevado a causa de las limitaciones en el actuador.

Los controladores en este caso trabajan en cualquier región de operación, la compensación de la saturación es viable para mejorar la respuesta transitoria, a diferencia de los otros controladores que primero son llevados cerca del punto de operación porque de lo contrario los límites en el actuador producen efectos no deseados sobre la respuesta del sistema.

Realimentación del vector de estados

El esquema de compensación por realimentación del vector de estados se muestra en la Figura 5.38.

Como es un sistema de primer orden solo tenemos un estado y es el nivel de

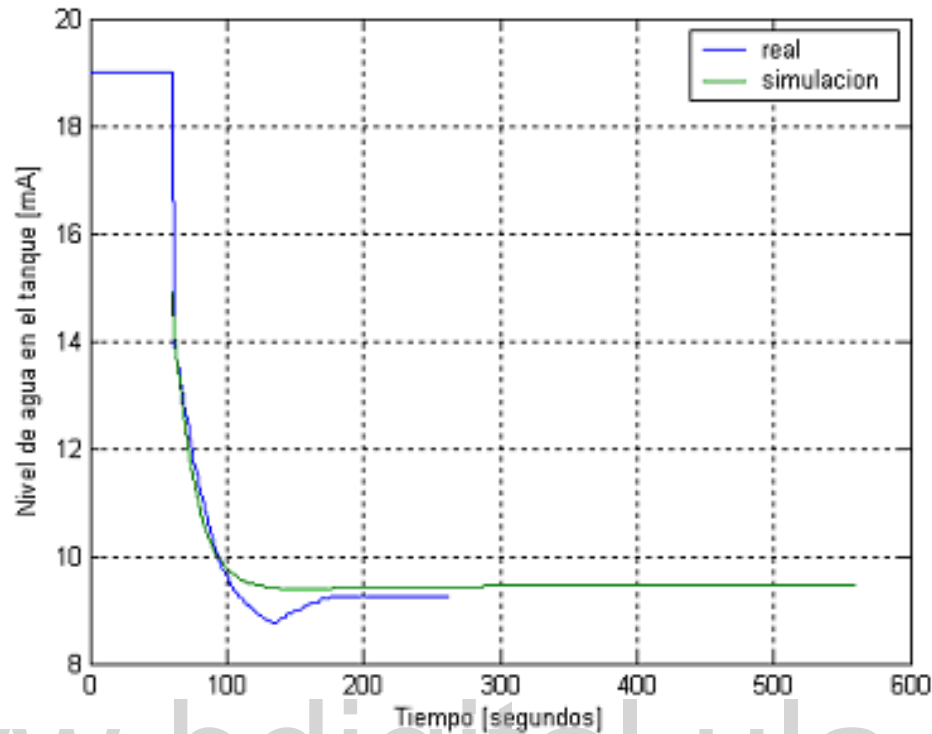


Figura 5.28: Ley de control PI aplicada

agua en el tanque superior que es equivalente a la salida del sistema por tal razón la matriz C del espacio estado es unitaria.

Para hallar la matriz de ganancias por tratarse de un sistema de orden inferior a 3 se sigue la siguiente metodología.

Paso 1:

Verificación de la condición de controlabilidad.

$$M = [B] \Rightarrow M = \begin{bmatrix} K \\ \tau \end{bmatrix}$$

$$\det M = \frac{K}{\tau} \neq 0$$

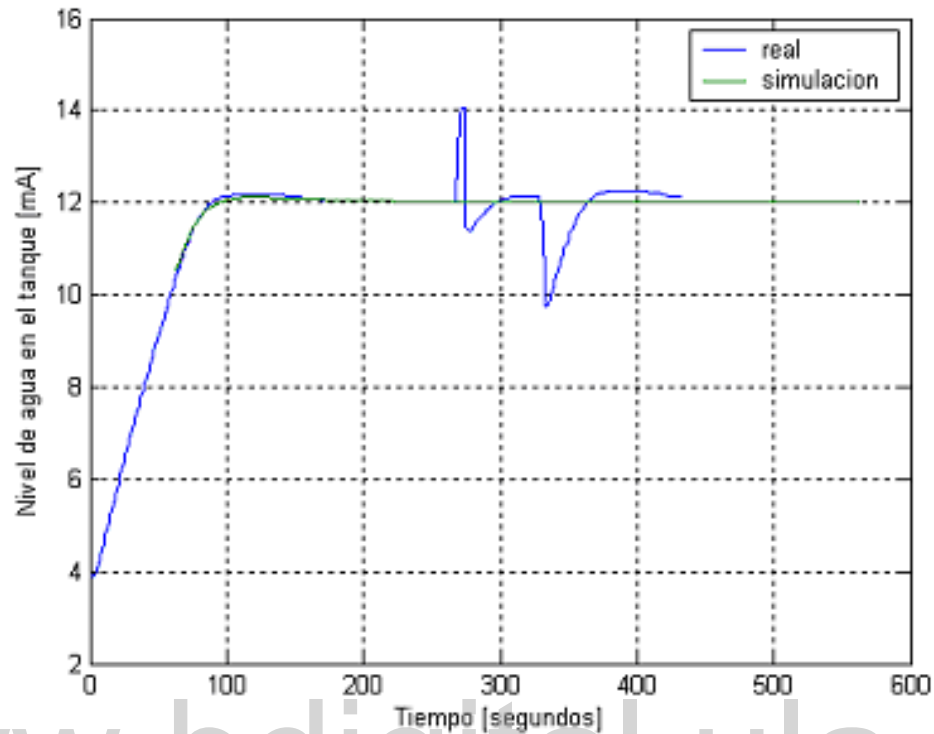


Figura 5.29: Respuesta del sistema con un controlador PI

Por lo tanto el sistema es completamente controlable. Es posible ubicar el polo en cualquier posición deseada tomando en cuenta las limitaciones del sistema el polo fue ubicado de tal forma que se mejoró la velocidad de respuesta.

Se quiere que el tiempo de estabilización del sistema sea de 6 minutos (360seg.).

$$5\tau = 360$$

$$\tau = \frac{360}{5}$$

$$\tau = 72$$

El polo deseado se ubica en: $\frac{1}{\tau} = \alpha = -0.01388$

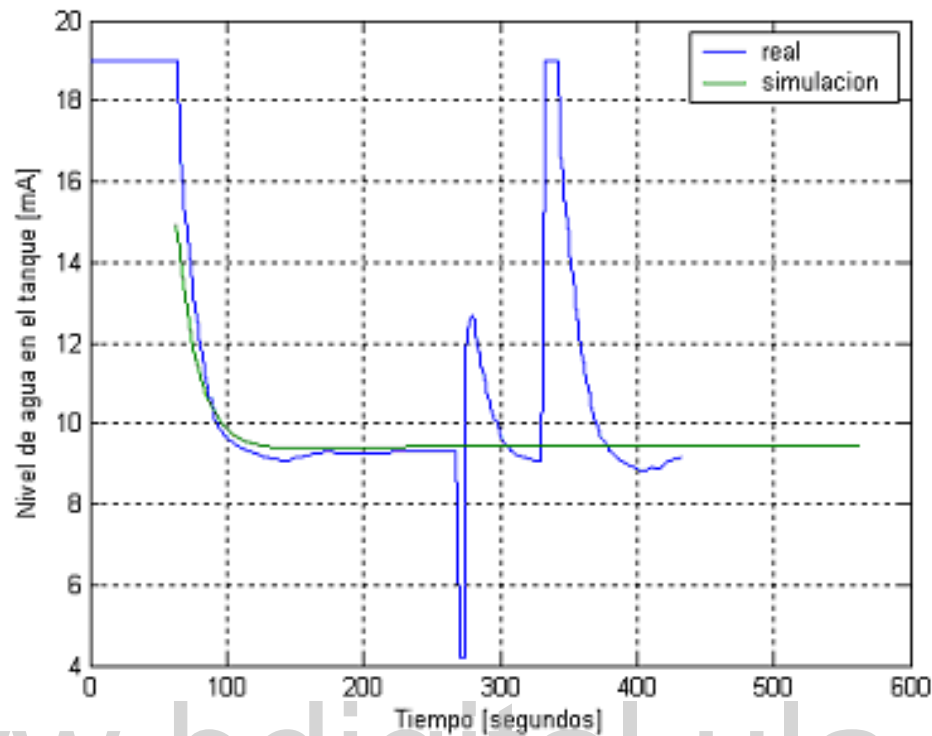


Figura 5.30: Ley de control aplicada

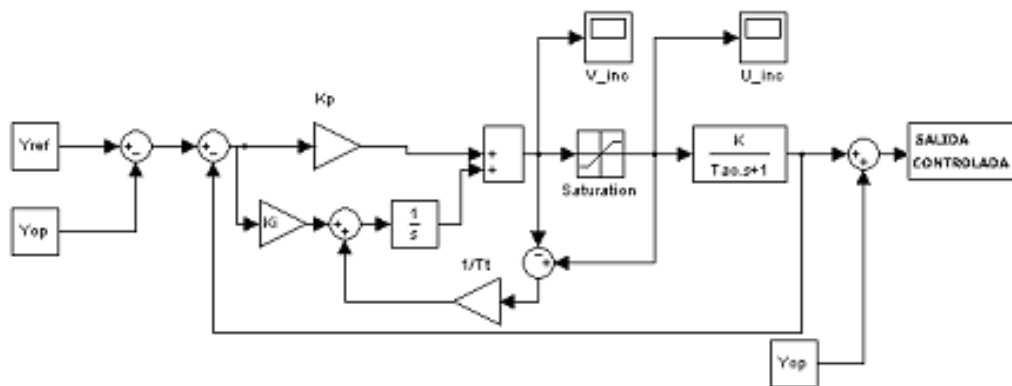


Figura 5.31: Esquema de compensación de un controlador PI Antiwindup

Paso 2:

Por tener un solo estado que se desea controlar en la planta se define la matriz de ganancias como $K = [k_1]$.

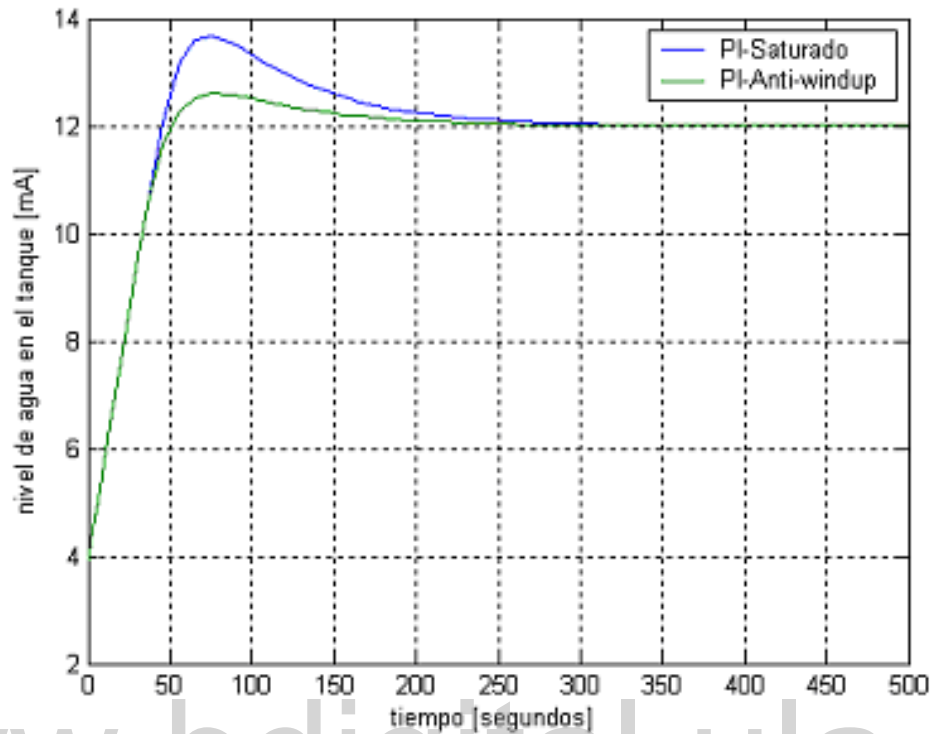


Figura 5.32: Simulación del controlador PI Antiwindup

Sustituyendo el valor de la matriz de ganancia para calcular la función de transferencia en lazo cerrado:

$$|sI - A + BK|$$

$$\left| sI - \left[\frac{1}{\tau} \right] + \left[\frac{K}{\tau} \right] [k_1] \right|$$

$$s + \frac{1 + K * k_1}{\tau}$$

Igualando con coeficientes de potencias iguales del polinomio característico deseado tenemos.

$$\frac{1 + K * k_1}{\tau} = \alpha$$

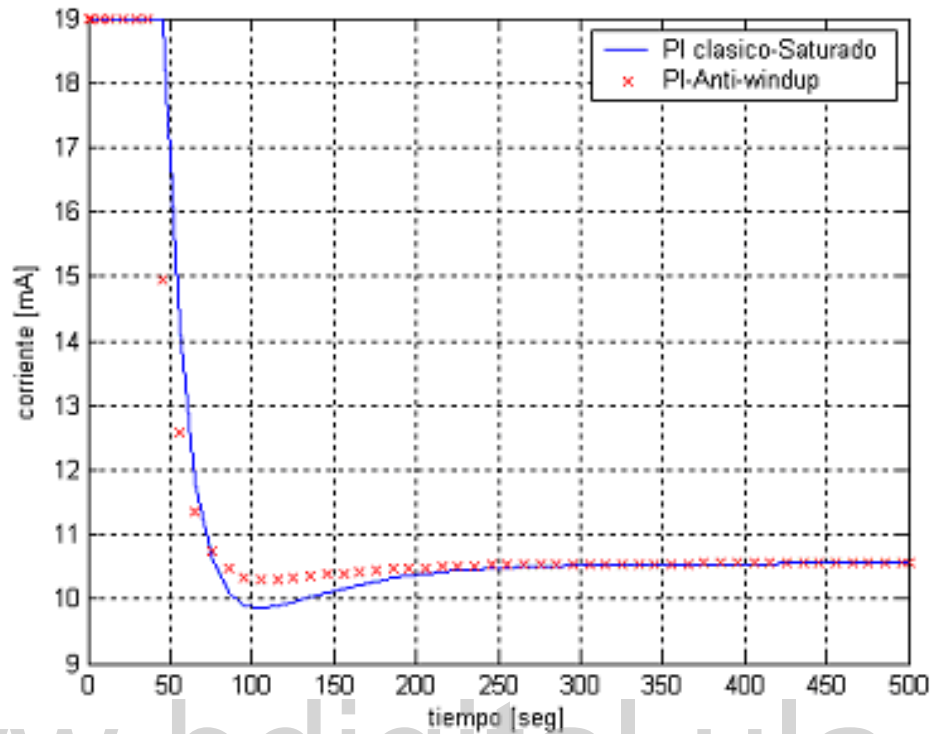


Figura 5.33: Ley de Control PI Antiwindup

$$k_1 = \frac{\alpha * \tau - \frac{1}{\tau}}{K}$$

$$k_1 = \frac{0.01388 - \frac{1}{303.9}}{5.9865} \Rightarrow k_1 = 0.53756$$

El valor de N se ajusta para eliminar el error en estado estacionario:

$$N = ((Y_{ref} - Y_{op}) * (1 + k_1 * K))/K \Rightarrow N = 0.793378$$

Simulaciones del controlador

Las simulaciones del controlador por realimentación del vector de estados se muestran en las Figuras 5.39 y 5.40.

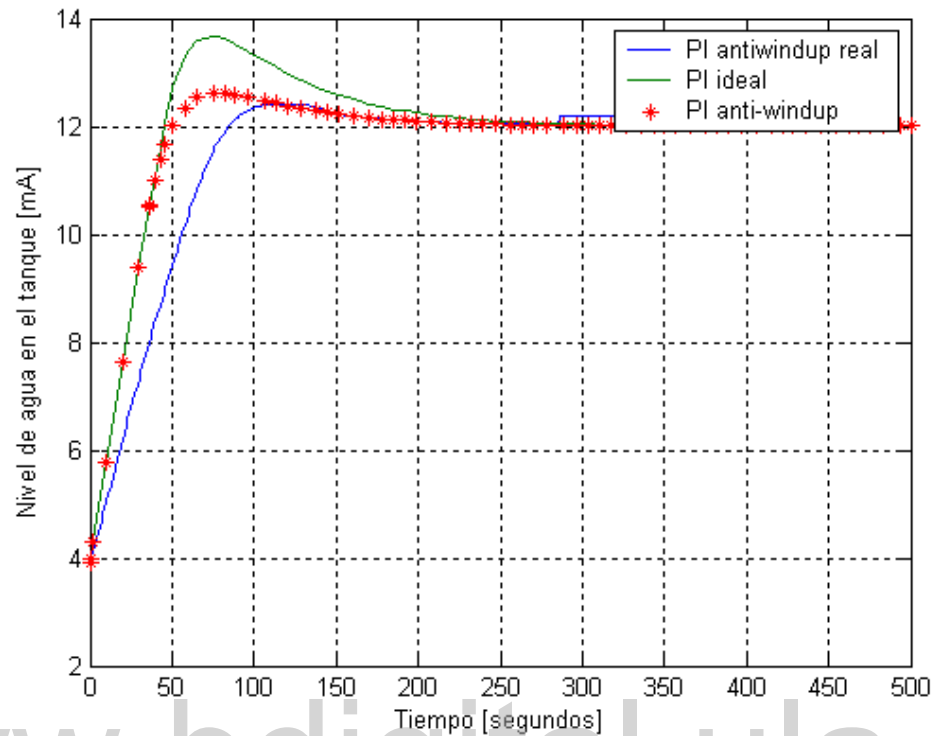


Figura 5.34: Respuesta del sistema con un controlador PI Antiwindup

Validación del diseño

La respuesta del sistema ante el controlador se observa en las figuras 5.41 y 5.42

Para el caso de realimentación del vector de estados es importante señalar que la matriz de ganancia K no es única y depende de la ubicación del polo en lazo cerrado deseado, el cual determina la velocidad de respuesta deseada. La selección del polo en lazo cerrado, es un compromiso entre la rapidez de la respuesta del vector de error y la sensibilidad ante perturbaciones y ruido en la medición, es decir si se incrementa la velocidad de respuesta de error, por lo general se incrementan los efectos adversos de las perturbaciones y el ruido.

La respuesta del sistema ante perturbaciones se muestran en las Figuras 5.43 y

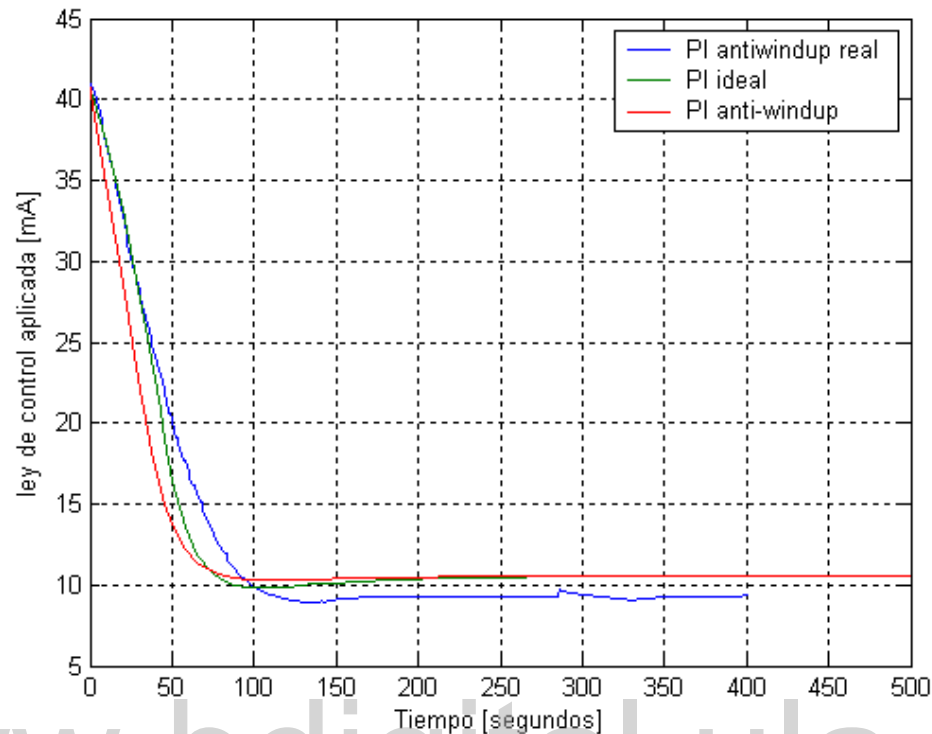


Figura 5.35: Ley de control PI Antiwindup aplicada

5.44

Efectivamente los controladores mejoraron el desempeño del sistema modificando de forma favorable la respuesta total del sistema, ahora el sistema es más rápido y tiene una respuesta transitoria como se planteó, el sistema es estable en lazo cerrado para todo los casos y no presenta error en estado estacionario considerable. El sistema sigue a la referencia impuesta y además los controladores son robustos, son capaces de seguir a la referencia a pesar de la influencia permanente de perturbaciones.

Al llevar a cabo una función de control, el controlador utiliza la diferencia entre el valor de referencia y la señal de medición (nivel de agua en el tanque) para obtener la señal de salida hacia la válvula. La precisión y capacidad de respuesta de estas señales es la limitación básica en la habilidad del controlador para controlar

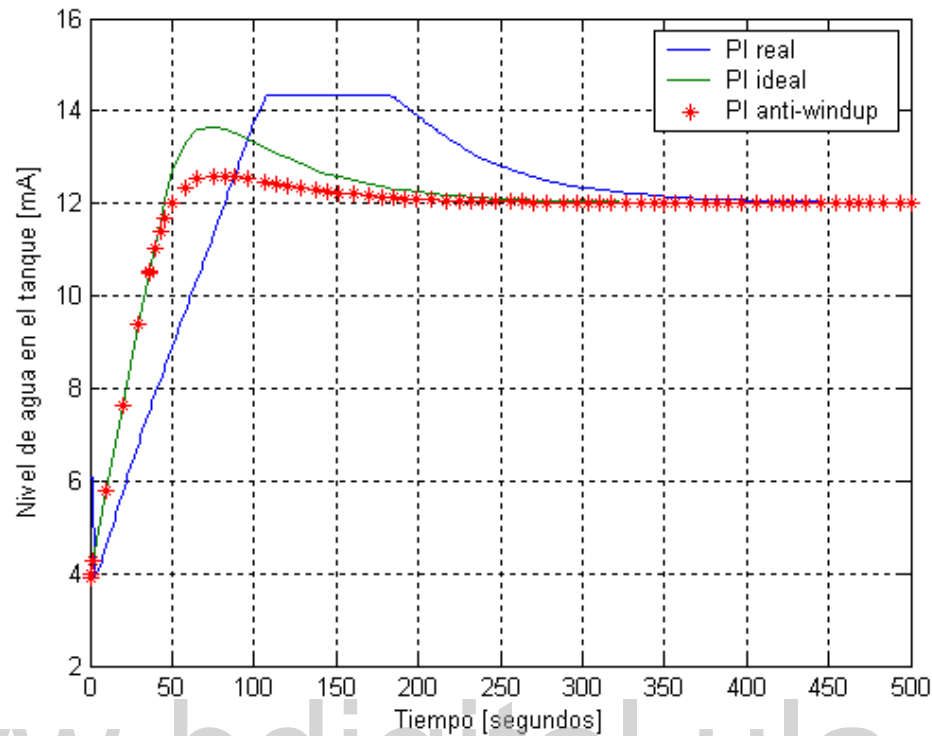


Figura 5.36: Respuesta del sistema con un controlador PI ideal

correctamente la medición. Todos los controladores pueden ser conmutados entre acción directa o inversa [1]. La acción directa significa que cuando el controlador ve un incremento de señal desde el transmisor, su salida se incrementa. La acción inversa significa que un incremento en las señales de medición hacen que la señal de salida disminuya.

Para mantener el nivel de agua en el tanque superior constante, el controlador debe manipular el ingreso de caudal igual a la salida, según se demande. El controlador lleva a cabo su trabajo manteniendo este balance en un estado permanente, y actuando para restaurar este balance entre el suministro y la demanda cuando el mismo es modificado por alguna variación.

Si ocurre un incremento en el nivel se debe cerrar la compuerta presente en la

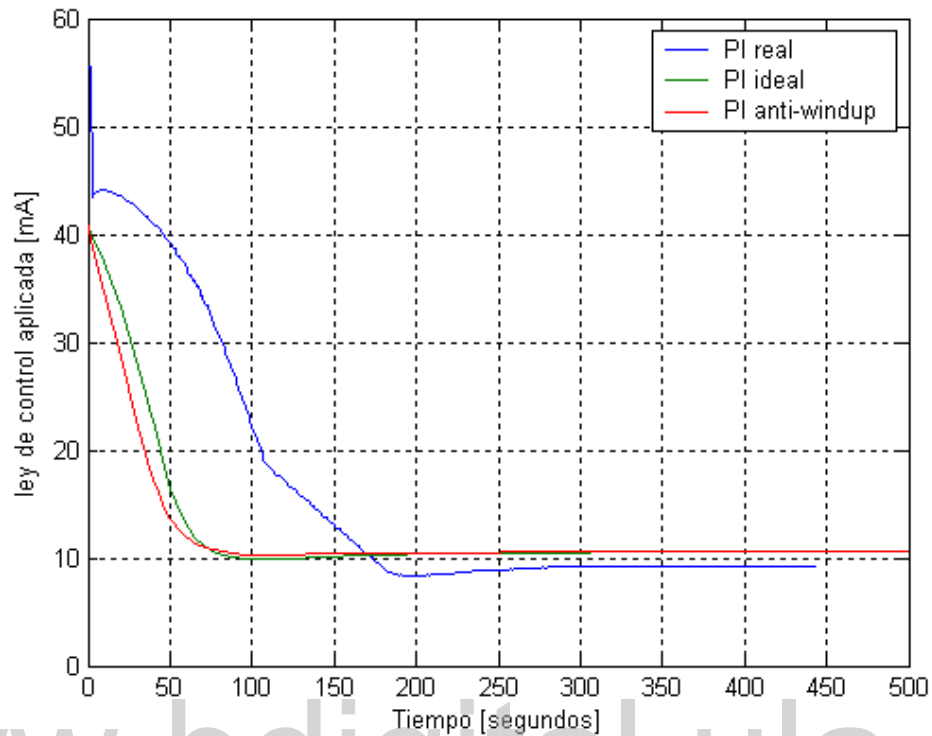


Figura 5.37: Ley de control PI aplicada

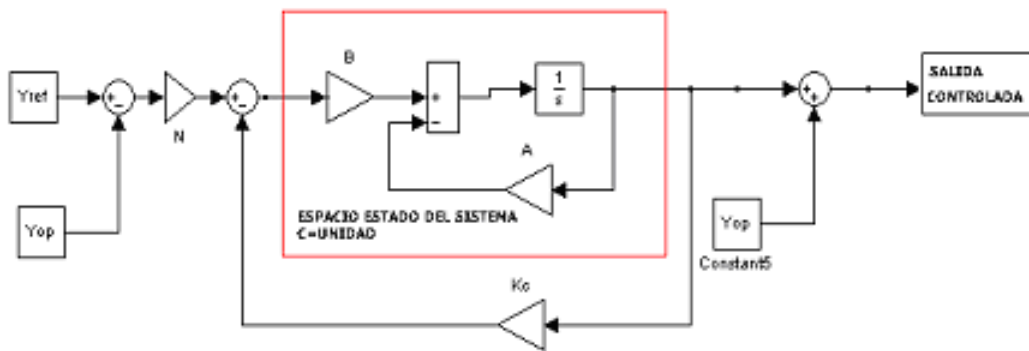


Figura 5.38: Esquema de compensación por realimentación del vector de estados

servoválvula para evitar que pase más flujo, es decir disminuir la señal de salida, o el caso contrario, si ocurre un decremento en el nivel de agua, la compuerta debe ser accionada de tal forma que permita que entre más flujo (aumentar la señal de salida)

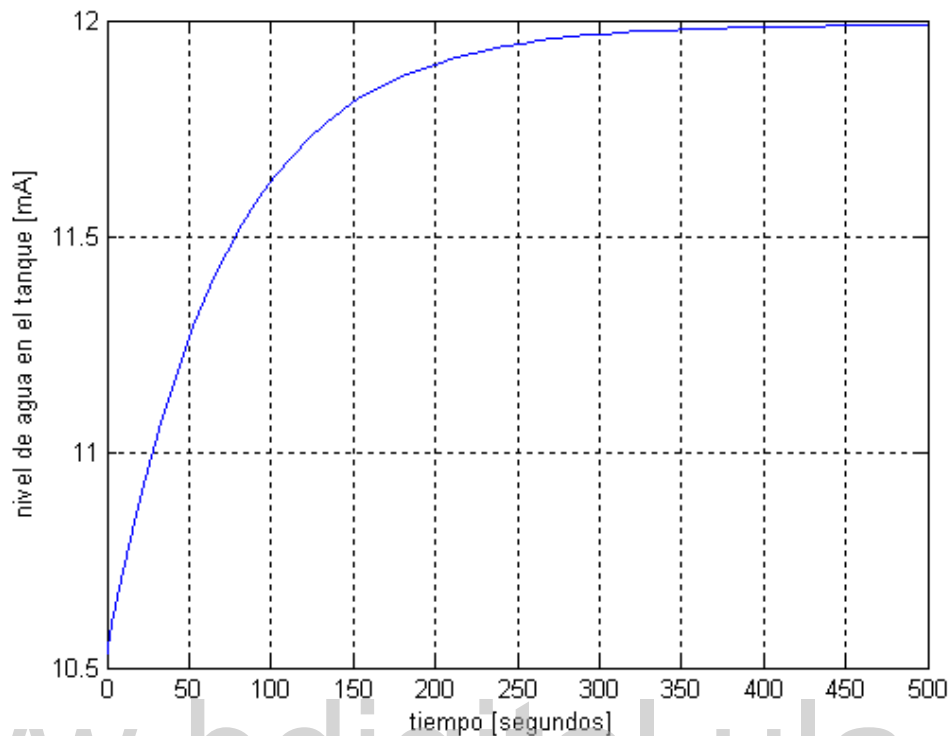


Figura 5.39: Simulación del controlador por realimentación del vector de estados

al sistema para mantener el equilibrio del flujo que entra y el flujo que sale, debido a esto la acción de control adecuada es la acción inversa, por eso los controladores trabajan con la señal de error $\text{error} = \text{referencia} - \text{medición de la variable del proceso}$. Si se selecciona la acción de control directa los controladores no funcionarán y es fácil de verificar, ya que si aumenta el nivel aumenta la señal de salida entonces el sistema se hará inestable, el nivel de agua en el tanque superior se desbordará.

5.2 Implementación digital de los algoritmos de control

Todos los resultados obtenidos fueron posible gracias a las herramientas con que cuenta el sistema Control-Logix mencionados en el capítulo 3. Como se observa en

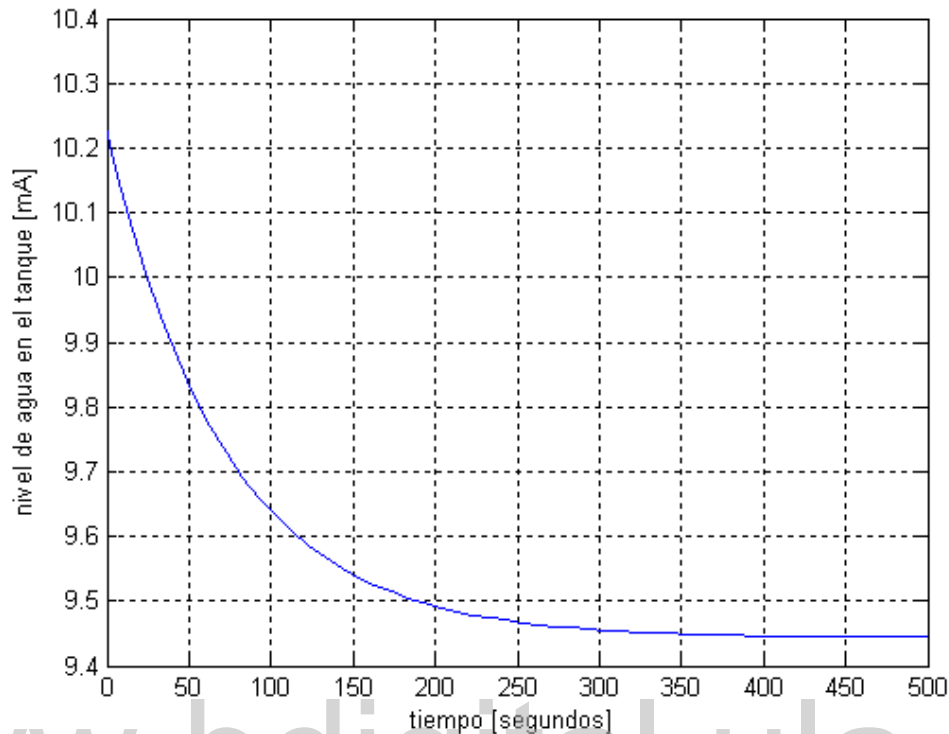


Figura 5.40: Ley de control (por realimentación del vector de estados)

la Figura 5.15 el Control-Logix presenta un entorno de programación y compatibilidad para comunicaciones comunes a través de varias plataformas de hardware. El software RSlogix 5000 es el paquete que permite programar el controlador logix5000.

El software permite organizar y configurar toda la información necesaria para controlar el proceso en tiempo real mediante la creación de un proyecto. El proyecto creado tiene por nombre leyes control.ACD con los siguientes datos de configuración para la puesta en marcha del controlador. La tabla 5.3 muestra datos de configuración introducidos en el controlador.

el controlador digital implementado consta de una tarea periódica con un sólo programa. el programa agendado en la tarea se compone de la rutina principal y las subrutinas. las subrutinas contienen los algoritmos de control clásicos implantados para aplicar al sistema de tanques editados en lenguaje escalera. La técnica se activa dependiendo de la que se requiera aplicar al sistema de tanques y se puede escoger

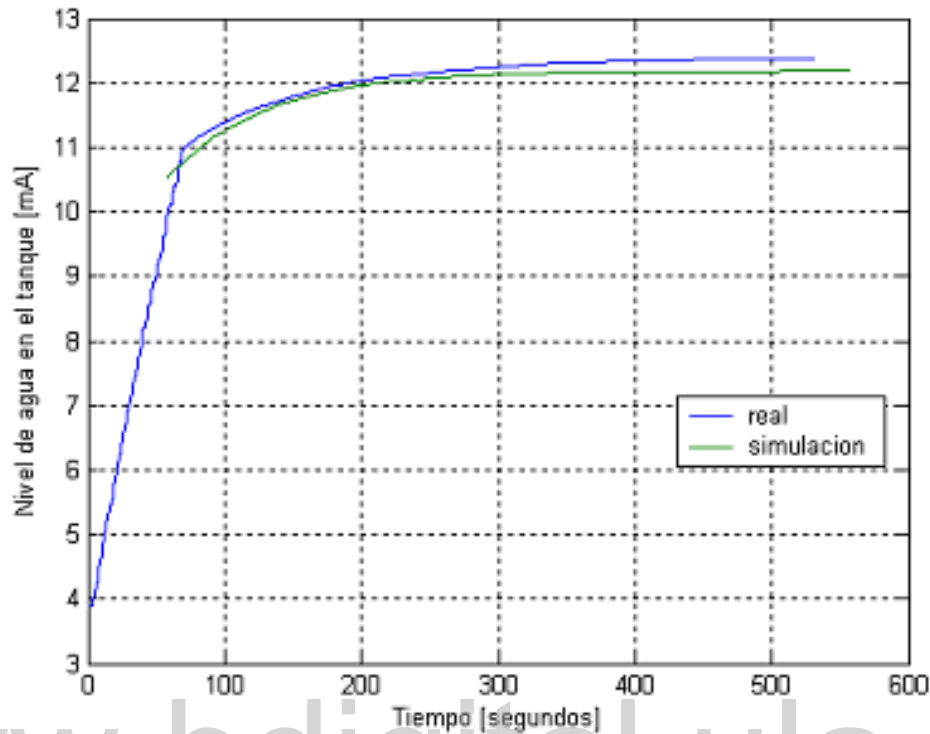


Figura 5.41: Simulación del controlador por realimentación del vector de estados

entre las cuatro diseñadas.

La tarea se ejecuta cada 1 segundo, que es el período de muestreo utilizado para controlar el sistema.

Para editar los algoritmos de control en lenguaje escalera es necesario discretizar los controladores obtenidos lo que da como resultado la acción de control a enviar a la servoválvula como una función matemática que depende de las entradas y salidas del sistemas cada segundo.

Aplicando las técnicas de discretización aproximada se obtuvieron las leyes de control discretas para cada controlador. Los resultados de los cálculos fueron:

Compensador adelanto-atraso

$$u_1 = q_1 * u((k - 1)to) - \alpha_2 * u((k - 2)to)$$

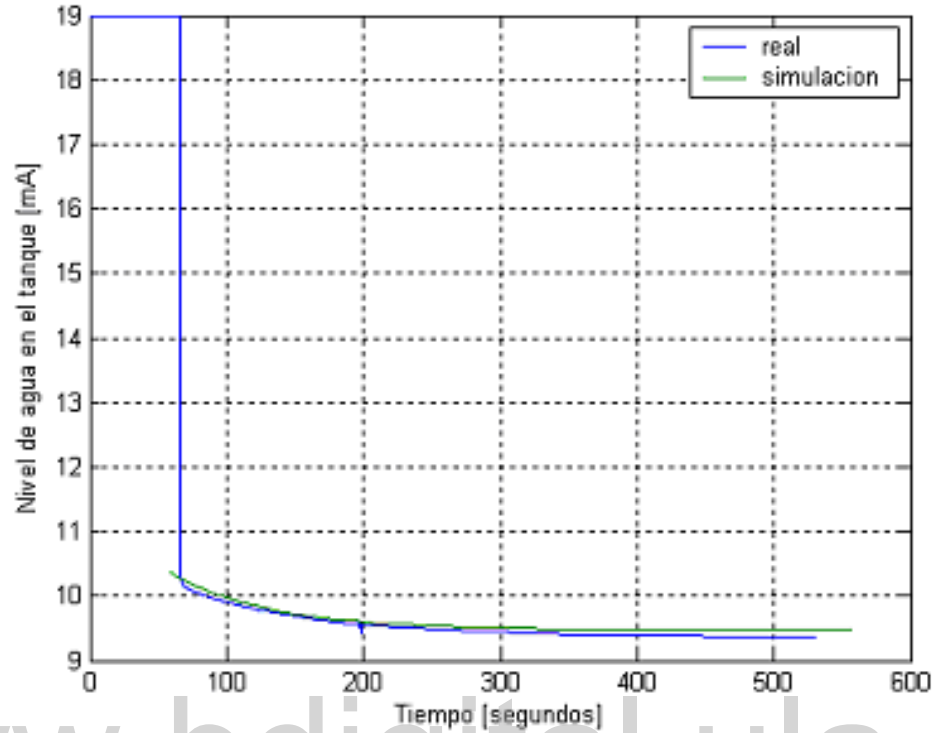


Figura 5.42: Ley de control (por ralimentación del vector de estados)

$$e_1 = q_2 * e(k * to) - q_3 * e((k - 1) * to) + \alpha_4 * K * e((k - 2) * to)$$

$$u(k * to) = \frac{u_1 + e_1}{q_0} \quad (5.13)$$

Donde:

$$q_0 = 1 + \frac{T_1 + T_2}{to} + \frac{T_1 * T_2}{to^2} \quad (5.14)$$

$$q_1 = \frac{T_1 + T_2}{to} + 2 \frac{T_1 * T_2}{to^2} \quad (5.15)$$

$$q_2 = K \left(1 + \frac{a * T_1 + b * T_2}{to} + \frac{a * b * T_1 * T_2}{to^2} \right) \quad (5.16)$$

$$q_3 = K \left(\frac{a * T_1 + b * T_2}{to} + 2 \frac{a * b * T_1 * T_2}{to^2} \right) \quad (5.17)$$

$$\alpha_2 = \frac{T_1 * T_2}{to^2} \quad (5.18)$$

$$\alpha_4 = K \frac{a * b * T_1 * T_2}{to^2} \quad (5.19)$$

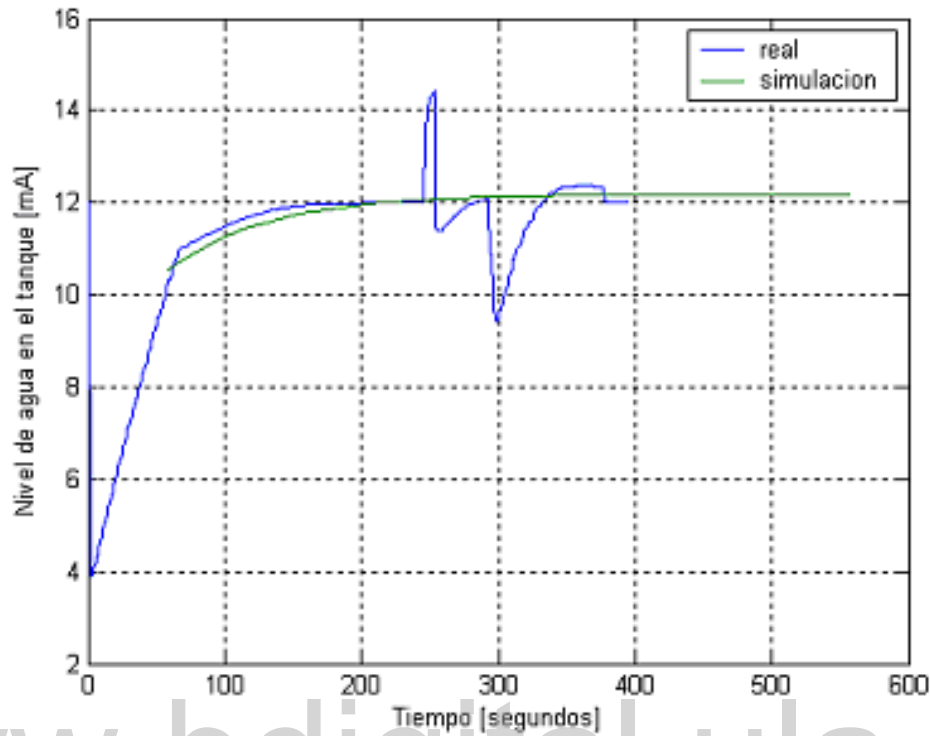


Figura 5.43: Respuesta del sistema con un controlador por realimentación del vector de estados perturbada

Controlador PID clásico

La discretización con la aproximación de la derivada en función de las ganancias independientes da como resultado la ley de control discreta:

$$u(k * to) = u((k - 1)to) + q_0 * e(k * to) - q_1 * e((k - 1) * to) + q_2 * e((k - 2) * to) \quad (5.20)$$

Donde:

$$q_0 = Kp + Ki * to + \frac{Kd}{to} \quad (5.21)$$

$$q_1 = Kp + 2 * \frac{Kd}{to} \quad (5.22)$$

$$q_2 = \frac{Kd}{to} \quad (5.23)$$

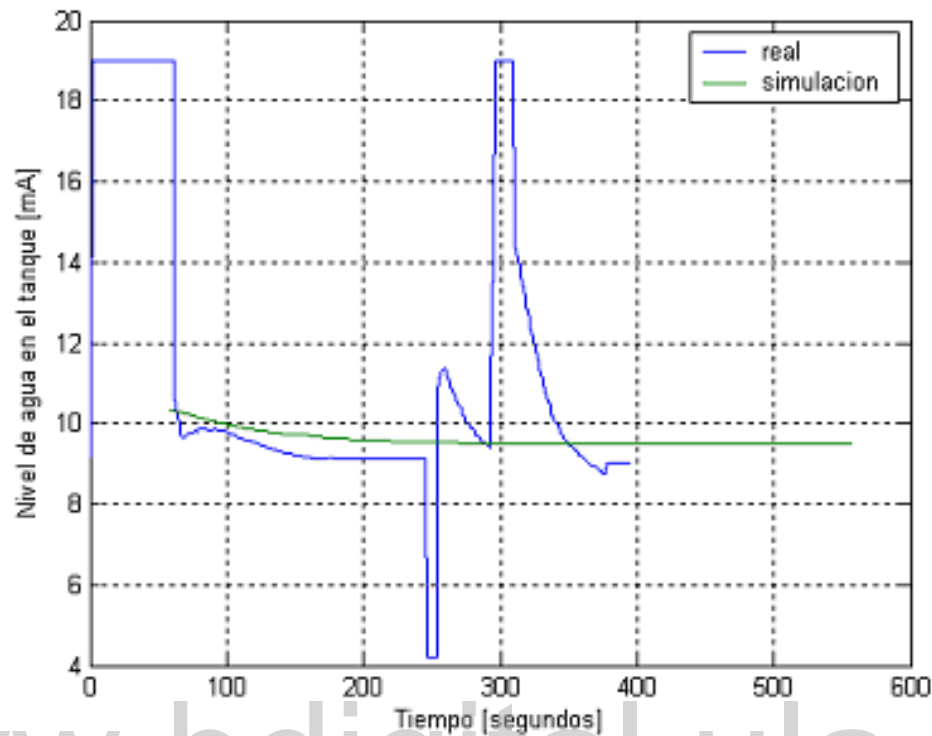


Figura 5.44: Ley de control (por realimentación del vector de estados perturbada)

Para el caso del PI el controlador aplicado a la planta la acción de control da como resultado:

$$u(k * to) = u((k - 1)to) + (Kp + Ki * to) * e(k * to) - Kp * e((k - 1) * to). \quad (5.24)$$

Controlador por realimentación del vector de estados

$$u(k * to) = N * r(t) - k_1 * x(k * to) \quad (5.25)$$

La fase del diseño culmina con la puesta en marcha del controlador cuando los algoritmos de control están programados y almacenados en el disco duro de la computadora. Todas las etapas realizadas conllevan al diseño de un sistema de Control que cuenta con una interfaz gráfica creada por medio del software RSView [9] (Figura 5.15) donde se puede controlar y monitorear todo el proceso a través de

Tabla 5.3: propiedades del proyecto

Tipo del controlador	Logix 5000
Tipo del Chasis	1756 10 Slot Control-Logix Chasis
Número de Slot del controlador	5
Descripción	opcional
Nombre del controlador	leyes control
Revisión	11

una computadora personal, donde se monitorea el estado en el que se encuentra el sistema por medio de gráficos que muestran la dinámica en tiempo real del sistema de tanques, además crea un registro de datos sobre las variables en el sistema, los datos quedan almacenados en archivo que pueden ser vistos por medio de excell para su posterior tratamiento. Por medio de la interfaz se controla las válvulas solenoides, se permiten cambios de consigas cuando el controlador está en marcha para observar la respuesta del sistema ante perturbaciones.

5.3 Análisis de resultados

La teoría de sistemas de control se ocupa del análisis y diseño de componentes interactuantes de un sistema en una configuración que brinda un comportamiento deseado, la configuración básica utilizada en teoría de sistema de control se basa en el concepto fundamental de la realimentación, que consiste en el proceso de medir las variables de interés en el sistema y por medio de ésta controlar el comportamiento del mismo de una forma deseada.

La metodología de diseño para los controladores se fundamenta en la teoría de sistemas lineales, el sistema de tanques es un sistema con un comportamiento no lineal, por esta razón fue necesario acercar el sistema hasta el punto de operación para que los controladores tuvieran un mejor desempeño y poder satisfacer los objetivos planteados; debido a esta razón los controladores se encuentran limitados ya que operan en una región de operación, a excepción del controlador PI antinwindup que opera para cualquier región.

Los resultados de los controladores aplicados muestran que las especificaciones planteadas no son tan rigurosas, los resultados experimentales de los controladores no difieren mucho de las predicciones teóricas, lo cual implica que los modelos lineales son fáciles de manejar y pueden representar en forma precisa el comportamiento de sistemas reales alrededor de una región de operación.

Una ventaja que se aprecia en el sistema Control-Logix es que permite obtener una descripción del proceso y dividirlo en partes funcionales:

- Secuencias de acciones realizadas por el operador.
- Grupo de eventos relacionados.
- Secciones de equipos o maquinarias.

También utiliza los nombres de los equipos y procesos en las tareas, programas y rutinas.

El controlador dispone de todas las funciones necesarias para implementar los algoritmos y muchas otras funciones para realizar cálculos más complejos por medio del software RSLogix 5000, además que se puede diseñar una interfaz gráfica amigable con el usuario para monitorear el proceso mediante el uso de una computadora personal con el software RSview-32. El monitoreo del proceso es posible a distancia ya que el Control-Logix permite una separación física entre la planta y los controladores implementados.

El código implantado puede ser reutilizado para otras aplicaciones, ya que los controladores están programados en función de sus parámetros. Sobre todo si se trata de sistemas de primer orden y hasta segundo orden porque el principio es el mismo. Para el sistema de control diseñado se pueden programar rutinas de fallas o implantar otras técnicas de control más complejas a partir del proyecto elaborado.

Estudiar tecnologías de punta es una ventaja ya que mediante el conocimiento se pueden lograr muchos aportes en el desempeño de los sistemas de control, y mejorar los sistemas automatizados.

Capítulo 6

Conclusiones

El uso de novedosas tecnologías de Rockwell Automation empleadas para automatizar un sistema de control en tiempo real es un herramienta muy útil porque cuenta con paquetes de software que permiten programar cualquier técnica de control que dependa de operaciones matemáticas como sumas, restas, productos, divisiones, integraciones, derivaciones, incluso mas complejas, a través de editores de lenguaje escalera, texto estructurado, diagrama de bloques funcionales. Las instrucciones matemáticas se ejecutan en el orden de los microsegundos, la velocidad de procesamiento es muy rápida. Además posee un ambiente de programación de fácil uso debido a que permite organizar una operación de control en tareas y a su vez dividirse en programas que contienen las rutinas que son los algoritmos de control.

El sistema Control-Logix utiliza la tecnología del backplane, que se caracteriza porque utiliza el modelo Productor/Consumidor para la comunicación, trata cada módulo como si fuera un nodo de la red y provee un medio de comunicación de alta velocidad, la comunicación se realiza a través del software RSLink y permite que múltiples aplicaciones de software se comuniquen simultáneamente con una serie de dispositivos en diferentes redes diferentes.

El resultado obtenido es un sistema SCADA que permite recolectar los datos que provienen de los sensores instalados en el sistema de tanques (sensor de nivel

de tipo flotador y sensor de flujo), en el cual el operador ejerce acciones de control a distancia como cambios de set-point, cierre y apertura de válvulas solenoides. Se trata de una aplicación software especialmente diseñada para funcionar sobre un computador, proporcionando la comunicación con los sensores y el actuador (válvula de control) del sistema de tanques para controlar el proceso de forma automática desde la pantalla del computador. Los controladores diseñados mejoran el desempeño del sistema de tanques, la dinámica es más rápida y no presenta error en estado estacionario, el sistema es capaz de soportar las posibles perturbaciones; y cada controlador está diseñado con especificaciones de diseño diferente por lo que no existe un punto de comparación entre cuál controlador es mejor, pero todos cumplen las especificaciones de diseños planteadas. Es recomendable realizar una calibración de los instrumentos de la planta, a los sensores y a la válvula de control porque las pruebas realizadas sobre el sistema trajeron como consecuencia desgaste y descalibración de la servoválvula. Los resultados pueden verse afectados producto de la descalibración en la válvula de control. Limpiar la red de tuberías con el propósito de realizar el mantenimiento. En el sistema implementado se pueden agregar rutinas de fallos y alarmas para mejorar el desempeño del sistema de control automatizado. También es posible conectar la bomba centrífuga para que se active el sistema y sea completamente automatizado, ya que solo funciona con 12V, y los módulos digitales envían hasta 120V.

Se pueden implementar otras esquemas de control sobre el sistema de tanques, ya que se cuenta con un modelo identificado de la planta y este representa la dinámica de la planta de forma aceptable lo que facilita el trabajo para el diseño de otro control, si se parte de un modelo matemático de la planta para implantar dichas técnicas.

Con el sistema Control-Logix es posible proponer otras estrategias de automatización por ejemplo sistemas descentralizados, el está configurado para comunicarse por medio de la red y así poder estudiar aplicaciones de redes locales de comunicación y controlar varios procesos al mismo tiempo.

Bibliografía

- [1] Fundamentos del control automático industrial. Eléctronico. http://www.sapiensman.com/control_automatico/.
- [2] Process control trainer level/flow workbook. manual y cuaderno de trabajo 38-001WB, Feedback Instruments Ltd, Inglaterra. <http://www.fbk.com/>.
- [3] E. Aceros. Taller introducción al control-logix. 2005.
- [4] K. Astrom. Control system digital [diseño de control digital]. versión electrónica, 2002. <http://www.cds.caltech.edu/~murray/courses/cds101/fa02/caltech/astrom.html>.
- [5] Rockwell Automation. Módulos de interface de comunicación controllogix ethernet. manual de usuario 1756-6.5.1ES, Rockwell Automation, USA, Agosto 1997. <http://www.rockwellautomation.com/>.
- [6] Rockwell Automation. Módulos de e/s analógicos controllogix. manual de usuario 1756-6.5.8ES, Rockwell Automation, USA, Julio 1998. <http://www.rockwellautomation.com/>.
- [7] Rockwell Automation. Módulos de e/s analógicos controllogix. manual de usuario 1756-6.5.9ES, Rockwell Automation, USA, Noviembre 1998. <http://www.rockwellautomation.com/>.
- [8] Rockwell Automation. Controladores logix5000. Manual de referencia del conjunto de instrucciones generales 1756-RM003-ES-P.9ES, Rockwell Automation, USA, Marzo 2000. <http://www.rockwellautomation.com/>.

- [9] Rockwell Automation. Product training for rsview32. training guide, USA, Mayo 2000. <http://www.software.rockwell.com>.
- [10] Rockwell Automation. Sistemas controllogix. Manual de referencia de usuario 1756-UM001E-ES-P, Rockwell Automation, USA, Agosto 2003. <http://www.rockwellautomation.com/>.
- [11] Rockwell Automation. Guía de inicio rápido para controladores logix5000. Manual de referencia de usuario 1756-QS001B-ES-P, Rockwell Automation, USA, Marzo 2004. <http://www.rockwellautomation.com/>.
- [12] Rockwell Automation. Guía de selección de controllogix. Technical Report 1756-SG0016-ES-P, Rockwell Automation, USA, Marzo 2004. <http://www.rockwellautomation.com/>.
- [13] Rockwell Automation. Plataformas logix, 2005. <http://www.ab.com/controllogix.htm>.
- [14] J Braslavsky. Curso de control automático. In *Parte III Modelos, señales y sistemas*, page 3, Argentina, 2002. Universidad Nacional de Quilmes. http://csd.newcastle.edu.au/SpanishPages/clase_slides_download/C04.pdf.
- [15] Chen. *Analog and Digital Control System Design*. Oxford University Press, 1993.
- [16] A. Crespo. Curso internacional sistemas de control en tiempo real. In F. García, editor, *Sistema de control en tiempo real, avances en el diseño y realización*, pages 5–25,46–64, Venezuela, Puerto la Cruz, Mayo 2000. Universidad de Oriente y Universidad Politécnica de Valencia España.
- [17] Grupo de Automatización Industrial y Control (GAICO). Conceptos fundamentales. Guía de control automático, Universidad Tecnológico de Bolívar, Colombia, 2005. http://gaico.unitecnologica.edu.co/libro_control/capitulo_2_conceptos_preliminares.pdf.

- [18] E. Pabón & R. García. Modelado y simulación de una planta de variables de nivel y caudal. Trabajo de pasantías de investigación, Universidad de los Andes. Facultad de Ingeniería, Venezuela, Mérida, Julio 2001.
- [19] A. Herrero. Digitalización de reguladores analógicos, Enero. 2002. http://138.100.48.190/docencia/plan_92/scii/descarga_ScII/pdf/antiwindup.pdf.
- [20] Seron M. Sistemas no lineales. Notas de clases, Universidad Nacional Rosario, Argentina, Rosario, 2000. <http://www.eie.fceia.unr.edu.ar/~marimar/snl/Apunte.pdf>.
- [21] J Martinez. Iv congreso de automatización y control. In *Comparación de Diferentes Estrategias de Control para Sistemas con Retardo*, page 62, Venezuela, Mérida, Noviembre 2003. Universidad de los Andes & Asociación Venezolana de Automatización y Control.
- [22] K. Ogata. *Ingeniería de control moderna*, chapter 3 4 6 y 12, pages 57,92,154,545, 786–794. Prentice-Hall, México, 3ra. edition, 1998.
- [23] Tacconi E. & Mantz R. & Salsona J. & Puleston P. Controladores basados en estrategias pid. Technical report, Universidad Nacional de la Plata, Facultad de Ingeniería, Argentina,, 2005. <http://www.ing.unlp.edu.ar/cys/pdf/Apunte%20PID.pdf>.
- [24] A. P. Porras, A. & Montanero. *Auromátas programables*. McGRAWw-HILL, España, Madrid, julio 1990.
- [25] Isermann R. *Digital control system*, volume 1 of *Fundamental, deterministic control*. Springer-Verlang Berlin Heidelberg, 2 edition, 1989.
- [26] H Sira. Control de sistemas no lineales. Notas de clases, Universidad de los Andes. Facultad de Ingeniería Escuela de Sistemas, Venezuela Mérida, Abril 1997.
- [27] C. M. Vélez. Control en tiempo real. Notas de clases, Universidad EAFIT Escuela de Ciencias y Humanidades. Departamento de ciencias básicas. Maestría.

Matemáticas aplicadas, Colombia, Medellín, Septiembre 2003. http://www.control-systems.net/cursos/real_time_control/.

www.bdigital.ula.ve

Apéndice A

Programas elaborados en RSLogix 5000

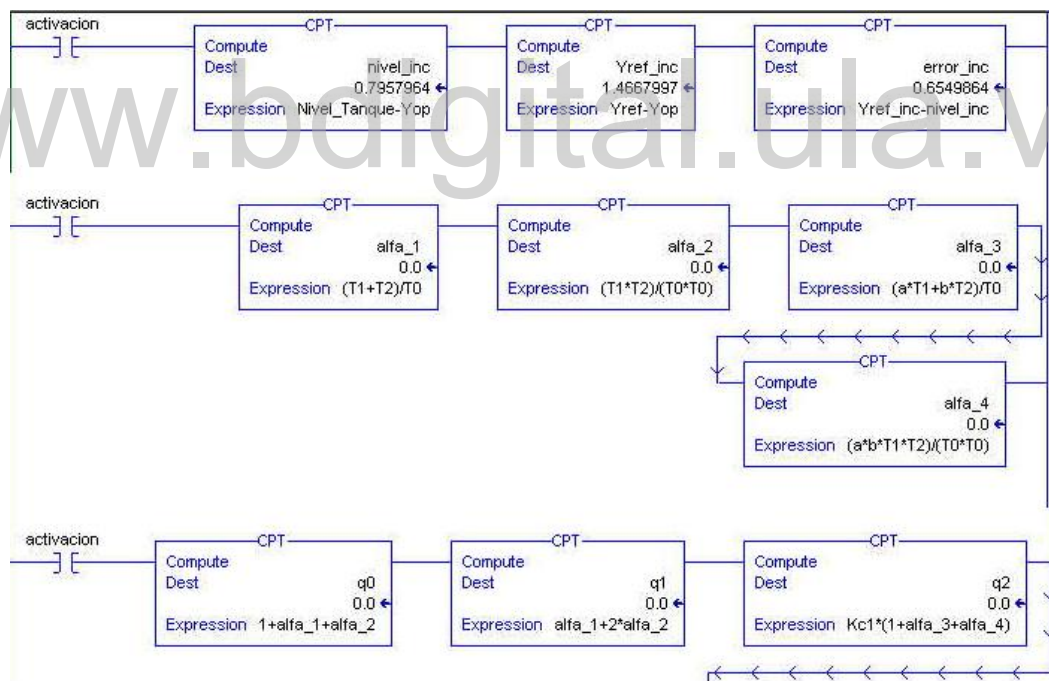


Figura A.1: Controlador digital adelanto-atraso

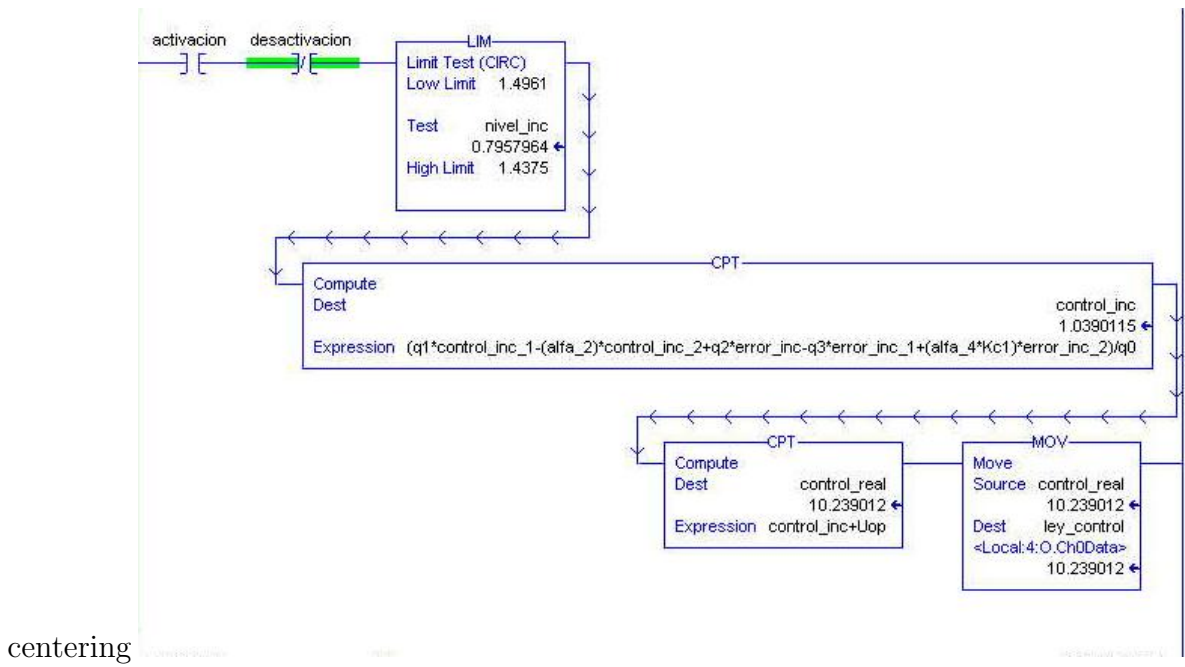


Figura A.2: Controlador digital adelanto-atraso

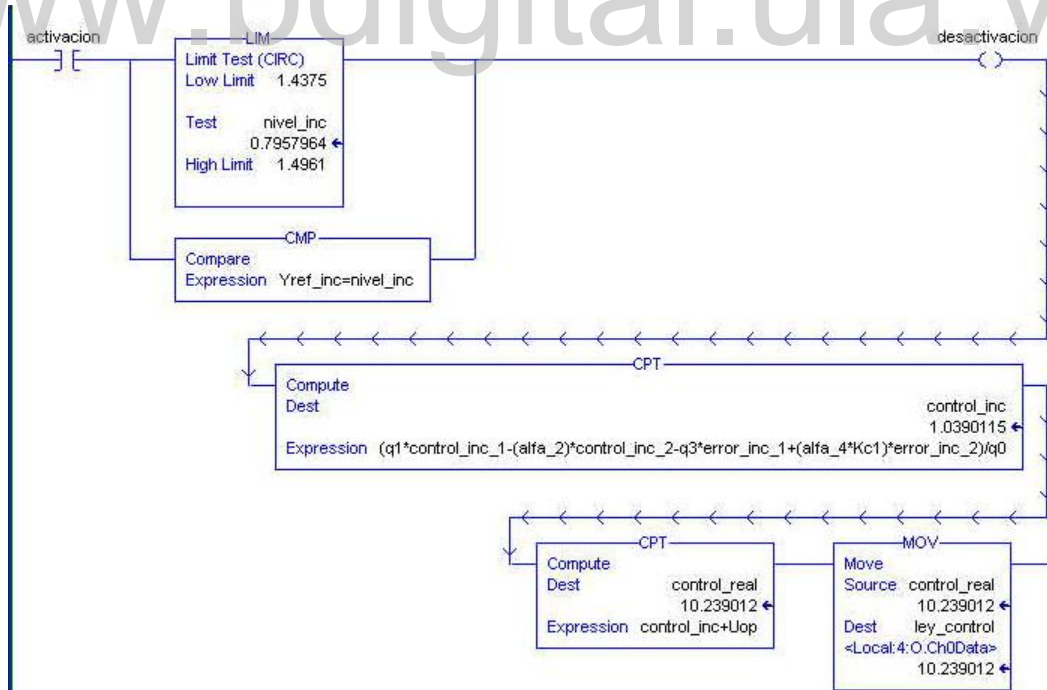


Figura A.3: Controlador digital adelanto-atraso

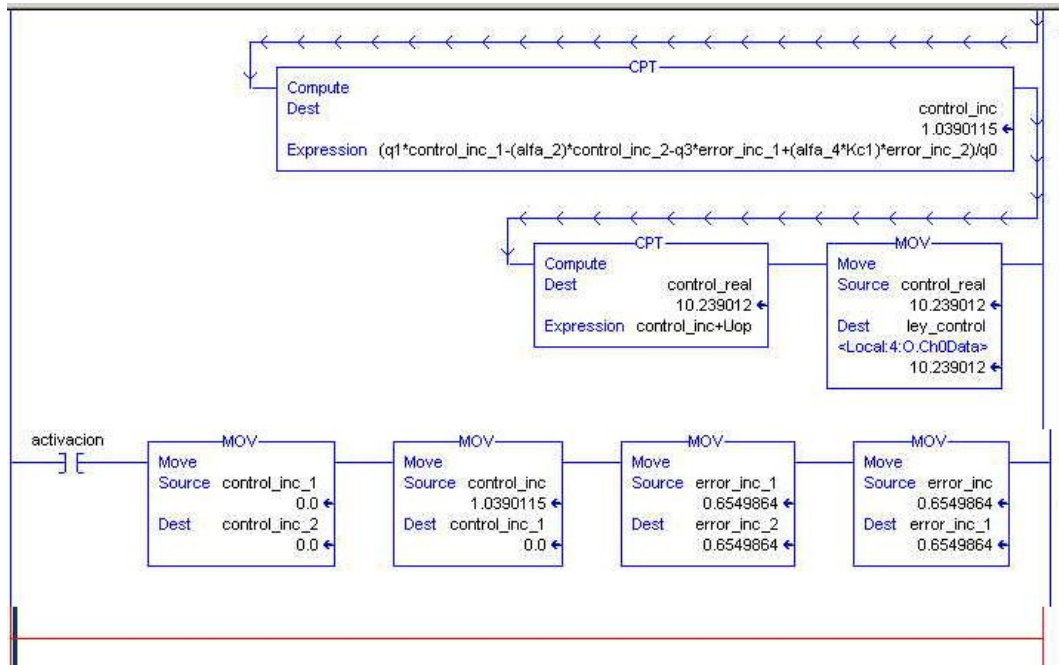


Figura A.4: Controlador digital adelanto-atraso

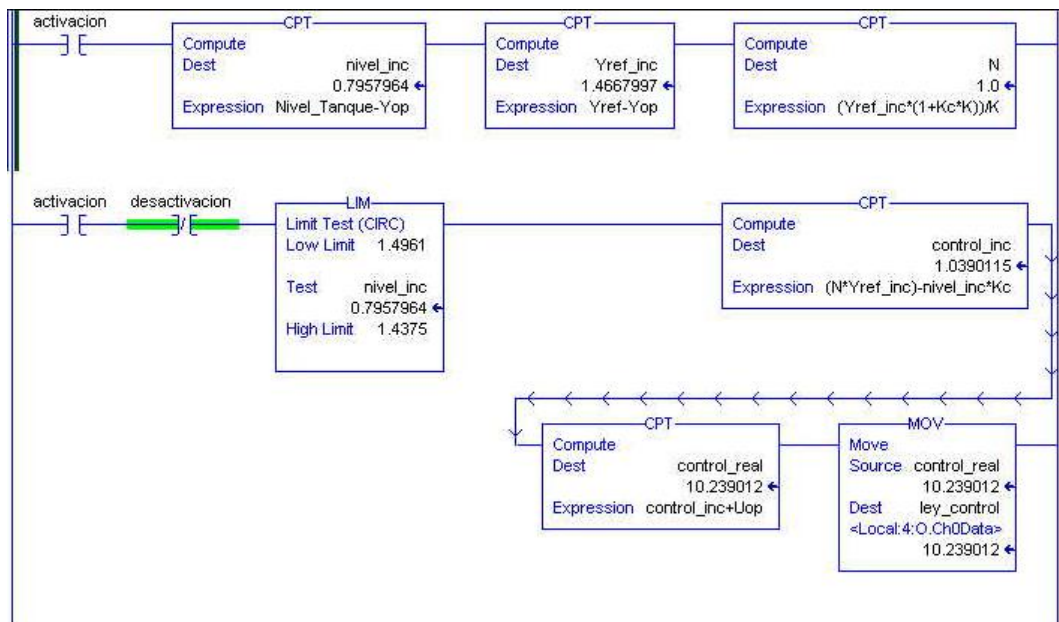


Figura A.5: Controlador digital por realimentación del vector de estados

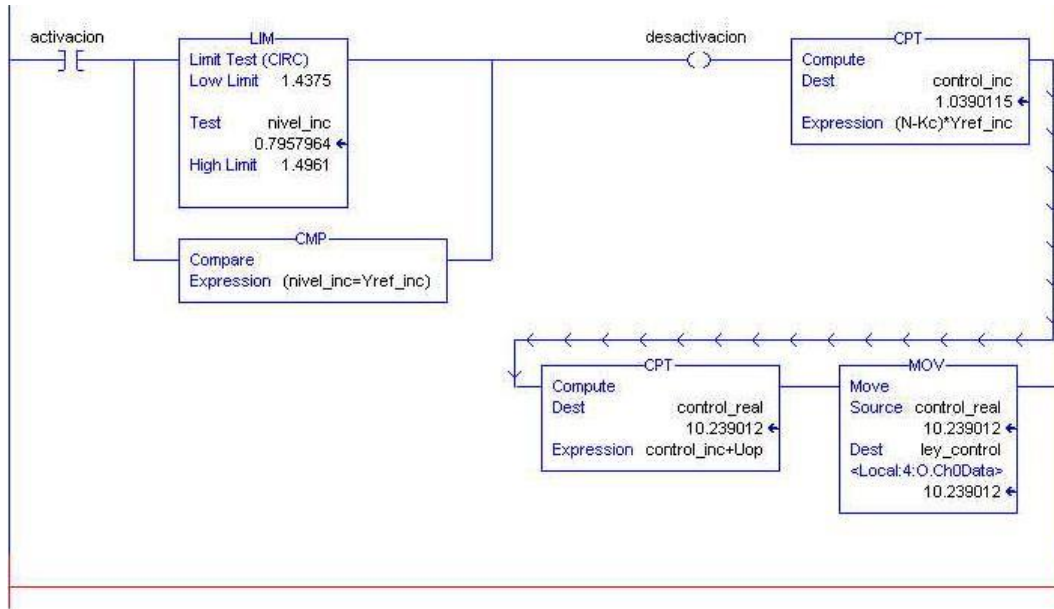


Figura A.6: Controlador digital por realimentación del vector de estados

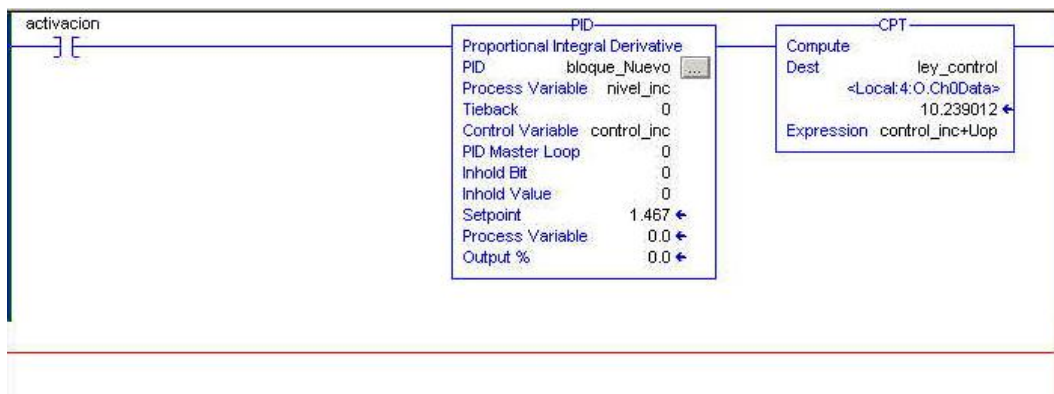


Figura A.7: Controlador digital PI

Apéndice B

Interfaz gráfica por RSView-32

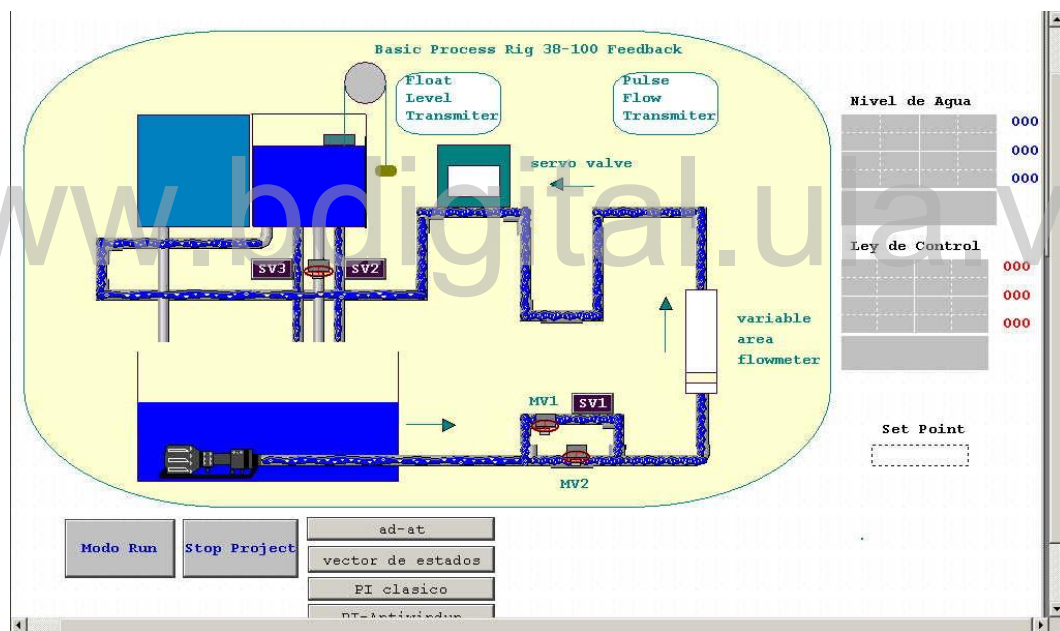


Figura B.1: Interfaz gráfica diseñada por RSView