

UNIVERSIDAD DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA



**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE
CONTROL DISTRIBUIDO PARA PLANTAS
MULTIPROPÓSITO DEL LABORATORIO DE
AUTOMATIZACIÓN DE UTECH**

TESIS

Para optar el título profesional de Ingeniero Electrónico

AUTOR:

Stefano Ayala Cabrera 

ASESOR:

Arturo Rojas Moreno 

Lima - Perú

2022

Dedicatoria:

A mis padres, hermanos y familiares en recompensa por todo lo brindado en este tiempo de desarrollo personal y académico. A mi amigo Cristhian Rojas, que en paz descansa, por su apoyo en los cursos que pudimos compartir.

Agradecimientos:

Eternamente agradecido con mis padres, hermanos y familiares por el apoyo brindado en el transcurso de mis estudios universitarios. También agradecer a mi asesor el Dr. Arturo Rojas por la orientación brindada en todo este tiempo.

Índice general

	Pág.
RESUMEN	1
ABSTRACT	2
CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN	3
1.1 Formulación del Problema	5
1.2 Antecedentes	5
1.3 Alcances y Limitaciones	8
1.4 Objetivos de la Tesis	8
1.5 Organización de la Tesis	10
CAPÍTULO 2 IMPLEMENTACIÓN DE LA ARQUITECTURA DEL SCD	11
2.1 Equipos de Control de Procesos	11
2.2 Diseño de la Topología de Red	12
2.3 Diseño de la Arquitectura de Red por Software	13
2.3.1 La Arquitectura de Red en Studio 5000	14
2.3.2 La Arquitectura de Red en TIA Portal	15
2.4 Configuración de Direcciones IPs de los Equipos	17
2.5 Integración en un sola Red de los Equipos	18
2.5.1 Servidor OPC	18
2.5.2 Configuración del Servidor KEPServer Enterprise	19
2.5.3 Uso del Servidor KEPServer Enterprise	19

2.5.4 Monitoreo de Equipos de las Plantas Industriales	20
------------------------------------------------------------------	----

CAPÍTULO 3 CONFIGURACIÓN DE ESTRATEGIAS DE CONTROL 22

3.1 Estrategias de Control	22
--------------------------------------	----

3.1.1 Control de la Razón de Flujos	22
-----------------------------------------------	----

3.1.2 Control en Cascada	24
------------------------------------	----

3.1.3 Control Descentralizado	27
-----------------------------------------	----

3.2 Desarrollo de Estrategias de Control	28
----------------------------------------------------	----

3.2.1 Instrucción PIDE de Rockwell	28
----------------------------------------------	----

3.2.2 Instrucción PID Compact de Siemens	30
----------------------------------------------------	----

3.2.3 Implementación del Control de la Razón	31
--------------------------------------------------------	----

3.2.3.1 Implementación del Control de la Razón en Rockwell	31
----------------------------------------------------------------------	----

3.2.3.2 Implementación del Control de la razón en Siemens	32
---------------------------------------------------------------------	----

3.2.4 Implementación del Control en Cascada	34
-------------------------------------------------------	----

3.2.4.1 Implementación del Control en Cascada en Rockwell	34
---------------------------------------------------------------------	----

3.2.4.2 Implementación del Control en Cascada en Siemens	36
--------------------------------------------------------------------	----

3.2.5 Implementación del Control Descentralizado	37
------------------------------------------------------------	----

3.2.5.1 Implementación del Control Descentralizado en Rockwell	37
--------------------------------------------------------------------------	----

3.2.5.2 Implementación del Control Descentralizado en Siemens	39
-------------------------------------------------------------------------	----

CAPÍTULO 4 CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA SCADA DEL SCD 41

4.1 Sistema SCADA	41
-----------------------------	----

4.2 Software de Supervisión	41
---------------------------------------	----

4.2.1 FactoryTalk View Studio	42
-----------------------------------------	----

4.3 Representación Gráfica de las Plantas Industriales	42
------------------------------------------------------------------	----

4.4 Interfaz de monitoreo de Estrategias de Control	43
---------------------------------------------------------------	----

CAPÍTULO 5 RESULTADOS DEL SISTEMA DE CONTROL DISTRIBUIDO 45

5.1 Resultados del Control de la Razón	45
--------------------------------------------------	----

5.1.1 Control de la razón en planta industrial Rockwell 1	45
5.1.2 Control de la razón en planta industrial Rockwell 2	46
5.1.3 Control de la razón en planta industrial Siemens 1	47
5.2 Resultados del Control en Cascada	47
5.2.1 Control en cascada en planta industrial Rockwell 1	48
5.2.2 Control en cascada en planta industrial Rockwell 2	49
5.2.3 Control en cascada en planta industrial Siemens 1	50
5.3 Resultados del Control Descentralizado	51
5.3.1 Control descentralizado en planta industrial Rockwell 1	52
5.3.2 Control descentralizado en planta industrial Rockwell 2	53
5.3.3 Control descentralizado en planta industrial Siemens 1	54
5.4 Control Distribuido	54
5.5 Comparación de la Adquisición de Datos de los Equipos de Siemens	57
5.5.1 Control de la Razón en FTV y TIA Portal	58
5.5.2 Control en Cascada en FTV y TIA Portal	59
5.5.3 Control Descentralizado en FTV y TIA Portal	60
CONCLUSIONES	63
RECOMENDACIONES	66
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	67
ANEXO: Configuración de los Equipos y del KEPServer Enterprise	71

Índice de tablas

2.1	Direcciones IPs de los equipos de Rockwell.	17
2.2	Direcciones IPs de los equipos de Siemens.	17
3.1	Términos del algoritmo usado por la instrucción PIDE [17].	28
3.2	Términos del algoritmo usado por la instrucción PID Compact [18].	30
3.3	Parámetros PID para control de la razón (Rockwell).	32
3.4	Parámetros PID para control de la razón (Siemens).	34
3.5	Parámetros PID para control en cascada (lazo primario).	35
3.6	Parámetros PID para control en cascada (lazo secundario).	35
3.7	Parámetros PID para control en cascada (lazo primario).	36
3.8	Parámetros PID para control en cascada (lazo secundario).	37
3.9	Parámetros PID para control descentralizado (Nivel)	38
3.10	Parámetros PID para control descentralizado (Temperatura)	39
3.11	Parámetros PID para control descentralizado (Nivel).	40
3.12	Parámetros PID para control descentralizado (Temperatura).	40
5.1	Desempeño del control de la razón en la planta industrial Rockwell 1.	46
5.2	Desempeño del control de la razón en la planta industrial Rockwell 2.	47
5.3	Desempeño del control de la razón en la planta industrial Siemens 1.	48
5.4	Desempeño del control en cascada en la planta industrial Rockwell 1.	49
5.5	Desempeño del control en cascada en la planta industrial Rockwell 2.	50
5.6	Desempeño del control en cascada en la planta industrial Siemens 1.	51

5.7	Desempeño del control descentralizado (nivel) en la planta industrial Rockwell 1.	52
5.8	Desempeño del control descentralizado (temperatura) en la planta industrial Rockwell 1.	53
5.9	Desempeño del control descentralizado (nivel) en la planta industrial Rockwell 2.	54
5.10	Desempeño del control descentralizado (temperatura) en la planta industrial Rockwell 2.	54
5.11	Desempeño del control descentralizado (nivel) en la planta industrial Siemens 1.	55
5.12	Desempeño del control descentralizado (temperatura) en la planta industrial Siemens 1.	55

Índice de figuras

2.1	Equipo de control de procesos. Planta industrial multipropósito para control e instrumentación (Figura de la izquierda). Módulo industrial multipropósito para control y supervisión (Figura de la derecha).	12
2.2	Topología de red del sistema de control distribuido.	13
2.3	Estructura propuesta de los equipos del laboratorio.	14
2.4	Arquitectura de control de Rockwell.	15
2.5	Arquitectura de control de Siemens.	16
2.6	Secuencia de encendido del variador de frecuencia G-120.	20
2.7	Secuencia de apagado del variador de frecuencia G-120.	20
2.8	Interfaz gráfica de monitoreo de las tres plantas industriales.	21
3.1	Esquema del control de la razón utilizado.	24
3.2	Esquema de control a lazo cerrado (proceso de nivel).	25
3.3	Diagrama de bloques del control de nivel [15].	25
3.4	Esquema del control en cascada utilizado.	26
3.5	Diagrama de bloques del control en cascada utilizado [15].	26
3.6	Diagrama de bloques del control descentralizado.	27
3.7	Bloque de la instrucción PIDE.	29
3.8	Bloque de la instrucción PID Compact.	31
3.9	Instrucción PIDE para control de la razón.	32
3.10	Instrucción PID Compact para control de la razón.	33
3.11	Cálculo de la referencia (<i>Setpoint</i> del caudal que circula por FT11).	33
3.12	Bloques PIDE para control en cascada (Rockwell).	35

3.13	Bloque PID Compact del lazo primario para control en cascada (Siemens).	36
3.14	Bloque PID Compact del lazo secundario para control en cascada (Siemens).	37
3.15	Bloques PIDE para control descentralizado (Rockwell).	38
3.16	Bloque PID Compact del proceso de nivel (Siemens).	39
3.17	Bloque PID Compact del proceso de temperatura (Siemens).	40
4.1	Pantalla de supervisión y monitoreo de las plantas industriales.	43
4.2	Vista de la computadora de monitoreo y supervisión.	44
5.1	Control de la razón de flujos implementado en la planta industrial Rockwell 1.	46
5.2	Control de la razón de flujos implementado en la planta industrial Rockwell 2.	47
5.3	Control de la razón de flujos implementado en la planta industrial Siemens 1.	48
5.4	Control en cascada implementado en la planta industrial Rockwell 1.	49
5.5	Control en cascada implementado en la planta industrial Rockwell 2.	50
5.6	Control en cascada implementado en la planta industrial Siemens 1.	51
5.7	Control descentralizado implementado en la planta industrial Rockwell 1.	52
5.8	Control descentralizado implementado en la planta industrial Rockwell 2.	53
5.9	Control descentralizado implementado en la planta industrial Siemens 1.	55
5.10	Control de la razón implementado en la planta industrial Rockwell 1.	56
5.11	Control en cascada implementado en la planta industrial Rockwell 2.	57
5.12	Control descentralizado implementado en la planta industrial Siemens 1.	57
5.13	Adquisición de datos del control de la razón desde FTV y TIA Portal.	58
5.14	Valor absoluto del error de la adquisición de datos del control de la razón.	59
5.15	Adquisición de datos del control en cascada desde FTV y TIA Portal.	59
5.16	Valor absoluto del error de la adquisición de datos del control en cascada.	60
5.17	Adquisición de datos del control descentralizado (nivel) desde FTV y TIA Portal.	61

5.18	Valor absoluto del error de la adquisición de datos del control descentralizado (nivel).	61
5.19	Adquisición de datos del control descentralizado (temperatura) desde FTV y TIA Portal.	62
5.20	Valor absoluto del error de la adquisición de datos del control descentralizado (temperatura).	62

RESUMEN

La presente tesis realiza el diseño e implementación de un SCD (sistema de control distribuido) que, junto con el uso de un servidor OPC (*OLE for Process Control*), permite la integración de los equipos de las marcas Rockwell y Siemens. El SCD diseñado e implementado permite implementar al mismo tiempo diferentes o iguales estrategias de control en los equipos Rockwell y Siemens mencionados. Para verificar el funcionamiento del SCD, se utilizó las siguientes estrategias de control: control de la razón para flujos, control en cascada y control descentralizado.

La implementación de esas estrategias de control han demostrado que se puede supervisar y monitorear equipos de diferentes marcas a partir de una sola computadora. El monitoreo y supervisión se realizó mediante el uso de un sistema SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*) y el uso de un servidor OPC. Mediante el cual se pudo cambiar los parámetros en tiempo real y ver el desempeño de las estrategias de control implementadas. La comparación entre la adquisición de data de los equipos de Siemens mediante el uso del SCD implementado y su programa de desarrollo, TIA Portal, presentó un mayor error en los procesos de nivel que en el de temperatura, pero ello no generó inconvenientes en la implementación de las estrategias de control. Este trabajo se desarrolló en el Laboratorio de Automatización de UTEC (Universidad de Ingeniería y Tecnología).

Palabras clave:

Sistema de control distribuido; servidor OPC; PLC; estrategias de control

ABSTRACT

**DESIGN AND IMPLEMENTATION OF A
DISTRIBUTED CONTROL SYSTEM FOR
MULTIPURPOSE PLANTS IN THE AUTOMATION
LAB OF UTEC**

This work performs the design and implementation of a DCS (Distributed Control System) that, using an OPC (OLE for Process Control) server, allows the vertical integration between Rockwell and Siemens' equipment. The designed and implemented DCS allows the implementation simultaneously of equal or different control strategies in the equipment of Rockwell and Siemens previously mentioned. To verify the DCS's correct operation, it used the following control strategies: flow ratio control, cascade control, and decentralized control.

The control strategies' implementation has shown that DCS can supervise and monitor different equipment brands using one computer. Using a SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) system and an OPC server, the user can monitor and supervise the equipment processes through the change of control parameters and see the performance of the control strategies implemented. The comparison between the data extracted of Siemens' equipment through the DCS implemented and its development program, TIA Portal, presented a greater error in level processes than temperature processes, but this not generated any problem in the implementation of the control strategies. This work was implemented in the Automation Lab of UTEC.

Keywords:

Distributed control system; OPC server; PLC; control strategies

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

En la industria con el transcurrir del tiempo se utilizan procesos más grandes y complejos que requieren el uso de más de un PLC (*Programmable Logic Controller*). Lo cual al no tener un solo PLC como control central, se empezó a utilizar un sistema de control distribuido (SCD). En [1], se define SCD como una combinación de infraestructura de hardware y software asegurando la automatización de procesos complejos y distribuidos. Estos procesos generalmente no se encuentran en el mismo lugar, lo que ocasiona que estén geográficamente separados, para lo cual se necesita de una comunicación entre los PLCs o equipos. Algunas características de un SCD son mostradas a continuación:

- Capacidad para manejar procesos complejos que requieran el uso de mayor capacidad de procesamiento o de entradas y salidas.
- Sistema redundante: El SCD necesita tener un sistema que ante eventualidades externas, el funcionamiento normal de este no se vea afectado.
- Sistema de seguridad que garantice que la comunicación entre diferentes sistemas no se vea comprometida.
- Escalabilidad: El sistema debe posibilitar el aumento de equipos como PLCs y computadoras dedicadas a extraer información del proceso.
- Supervisible: El operador pueda tener acceso para ver lo que está ocurriendo en cada proceso que se desarrolle.

Anteriormente los equipos utilizados para implementar un SCD tenían que ser equipos robustos, costosos, poseer gran cantidad de entradas y salidas, y como se menciona anteriormente, tener una gran capacidad de procesamiento. Con el avance de la tecnología, el procesamiento de los PLCs ha ido mejorando además de poder aceptar más entradas y salidas por medio de módulos agregados al mismo. Es por ello que en [1] especifica que en un SCD ya no es necesario el uso de controladores sofisticados sino de como este se conecta a una estructura de red diferente.

Algunas marcas de fabricantes de PLCs ofrecen su propio SCD. Entre ellas tenemos a Rockwell Automation que posee PlantPAX; Siemens, SIMATIC PCS 7; Emerson, Delta V, y ABB, System 800xA. Estos sistemas generalmente cuentan con programas de computadora compuestos por librerías para implementar el SCD usando sus equipos de la misma marca, beneficiando al usuario al tener reporte de fallas de equipos y una mejor visualización de las variables que se quieran supervisar.

En UTEC para la enseñanza de cursos de control y automatización se utilizan plantas a pequeña escala conformado por tres *plantas industriales multipropósito para control e instrumentación* y tres *módulos industriales multipropósito para control y supervisión*. El conjunto formado por un módulo de supervisión y una planta industrial es conocido como equipo de control de procesos donde cada equipo es autónomo e independiente de los demás en la arquitectura actual del laboratorio. Dos equipos de control de procesos tienen controladores lógicos programables o PLC de Rockwell Automation y el equipo restante, con controladores Siemens. Los PLCs se emplean para implementar sistemas de control realimentados de variables físicas tales como flujo, temperatura, presión y nivel; y para realizar estrategias de control multilazo tales como cascada y relación de control.

1.1 Formulación del Problema

Cuando se hace uso de las computadoras que se encuentran en el mismo laboratorio, se le da a elegir al usuario entre dos ambientes operacionales: un ambiente operacional que contiene el programa de desarrollo de Rockwell (Studio 5000) y otro con el programa de desarrollo de Siemens (TIA Portal). Es por ello que no es posible acceder a los programas de desarrollo para los PLCs de Rockwell y Siemens simultáneamente, si es que se requiere implementar estrategias de control en las plantas industriales de Rockwell y Siemens en su conjunto. Asimismo, existe una red independiente de las computadoras a los equipos de Rockwell y otra de las mismas computadoras hacia los equipos de Siemens que origina que la implementación para cada marca sea hecha por separado. Cuando se realiza un control en un módulo de Rockwell y al terminar de observar el desempeño del mismo, en caso exista la necesidad de implementarlo en el equipo de control de Siemens, se debe cambiar al ambiente operacional que contiene el programa de desarrollo de Siemens y las conexiones físicas de la red. Esto último retarda el aprendizaje del desempeño del control, el cual es el principal objetivo al momento de implementarlo. Los problemas antes mencionados se resuelven al implementar un SCD, el cual permite supervisar y monitorear equipamiento de diferentes marcas.

1.2 Antecedentes

Existen diversas marcas (Siemens, Rockwell, Emerson, etc.) que proveen el uso de un SCD con PLC de gama alta que, con la capacidad de procesamiento que tienen actualmente, pueden soportar el uso de un SCD. Según [2], en la Universidad de Texas se comprobó que usando un SCD para el control de una columna de destilación resultó ser beneficioso en el ámbito académico debido a que posee una interfaz gráfica *user-friendly* que permite al alumno una fácil comprensión de cómo manejar el sistema y controlar diversos lazos de control. Además, el sistema de control realizado proporcionó al usuario

la visualización de los problemas que pueden ocurrir en el proceso mediante un gestor de alarmas previamente configurado. En [3], el uso del SCD aplicado en la Escuela de Ingeniería S.K.R. (India) se ve reflejado como un sistema dinámico donde los controladores se encuentran distribuidos a lo largo de la planta y que generalmente presentan algoritmos complejos que permiten un control más preciso. Este sistema de control y, como se explica en [4], consta de estaciones destinadas a la supervisión en los niveles superiores conocidas como estaciones de monitoreo que permiten interactuar con el proceso y poder operar la planta. Para realizar un SCD es necesario el uso de un software que distintos fabricantes de PLC proveen con el objetivo de ayudar a mejorar el proceso que se encuentre supervisando. Esto último se evidencia en [5], donde en una planta industrial en China dedicada a trabajar con fibra de Lyocell se utilizó PlantPax, el cual cumple estándares de color, funcionalidad y símbolos [6] como sistema de control distribuido, mostrando un buen desempeño y confiabilidad al poder detectar el mal funcionamiento de los equipos. PlantPax permitió que el desarrollo de un sistema automatizado pueda ser implementado en menor tiempo mediante el uso de las librerías que se agregaron al programa de desarrollo y que controlaron a los equipos de Rockwell.

La disponibilidad de diferentes fabricantes que ofrecen equipos de automatización como PLCs y/o periféricas descentralizadas, involucra que cada uno maneje diversos protocolos de comunicación y presente una arquitectura cerrada, lo que obliga muchas veces a usar productos del mismo fabricante que aseguren la compatibilidad en la comunicación. Esto origina que, como se menciona en [7], se genere un fenómeno llamado “isla de información” producido por los diferentes sistemas de comunicación que tiene cada fabricante. Es así que se necesita de un dispositivo con una comunicación estándar que puede permitir el enlace entre los diferentes equipos. Esto último se puede ver reflejado en el mismo trabajo donde, al tener dos equipos de control de procesos de dos fabricantes diferentes, si se requiere realizar una integración vertical, se necesita de un elemento intermediario entre estos dos dispositivos que permita la comunicación. En este tipo de casos la opción más adecuada es adquirir un dispositivo que estandarice la comunicación

entre los dos PLCs, pero esto implica un costo elevado por lo que una alternativa más económica es utilizando un servidor OPC (*OLE for Process Control*) [8]. Dicho servidor es un programa de computadora que realiza la misma función al permitir el intercambio de información entre los equipos.

Uno de los servidores OPC más utilizados en la actualidad es KEPServer Enterprise usado para resolver problemas de conectividad manteniendo la comunicación segura y accesible en tiempo real. Como se evidencia en [9], KEPServer es el elemento principal para la integración vertical entre PLCs de diferentes fabricantes como Ormon, Siemens y Rockwell, en una estación de almacenamiento de gas natural en China. Es ahí donde se disponen de programas como RSLinx que proporciona conectividad de dispositivos de una misma planta; y RSView32, el cual es un software de interfaz hombre-máquina (HMI: *Human Machine Interface*). Estos dos programas, al ser de propiedad de Rockwell, están restringidos al uso de los equipos de la misma marca. KEPServer, que permite un intercambio de información en tiempo real usando diferentes protocolos de comunicación como Profibus, Modbus, Devicenet y Ethernet IP, logra eliminar la brecha de comunicación que aísla a los equipos. El uso de este servidor OPC, que como se mencionó anteriormente permite la integración entre diferentes equipos de distintos fabricantes, permitió que los datos obtenidos de los equipos se puedan ingresar en un sistema SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*), el cual realizará la función de supervisar y monitorear el proceso que se desarrolle mediante el uso de un HMI que es el elemento que realiza la comunicación entre el operador de la planta y el proceso. En un trabajo realizado en la India [10], se muestra el uso de un servidor OPC para la comunicación entre MATLAB y un PLC. Este trabajo además menciona que una de las formas más eficientes y fáciles para el intercambio de información es mediante el uso del servidor OPC, específicamente el OPC con el que se trabajó fue KEPServer. Este último permitió la integración entre una aplicación HMI/SCADA de CitectSCADA, de propiedad de Schenider Electric, con un PLC de la marca Mitsubishi, con lo que se logró un intercambio bidireccional de información en tiempo real, el cual podría ser visto desde un cliente SCADA que se encuentre

supervisando el proceso.

Mediante los trabajos realizados en [9] y [10], queda demostrado que el uso de KEPServer no solo permite la integración de datos entre redes heterogéneas de PLCs, sino también entre diferentes programas de cómputo como MATLAB. Pero el servidor OPC no solo está limitado a la conexión con un solo programa cliente, como está demostrado en [11], donde en la Universidad de Pitesti (Rumanía) se conectaron múltiples aplicaciones de clientes para obtener información de los dispositivos usados en el campo (sensores y actuadores).

1.3 Alcances y Limitaciones

Este trabajo de tesis se limita a implementar un sistema de control distribuido empleando el equipamiento del Laboratorio de Automatización de UTEC. Por ello se implementaron estrategias de control como control en cascada para el control de nivel con la asistencia del control de flujo, control de la razón de flujos, y control descentralizado para controlar las variables físicas como temperatura y nivel de forma simultánea. El SCD permite que se puedan supervisar simultáneamente estrategias de control en las plantas industriales. Por ejemplo, si en un equipo de control es usado el control de la razón, en otro podría ser aplicado una estrategia de control distinta, como control en cascada. No necesariamente tiene que ser aplicada la misma estrategia, aunque lo ideal es que sea la misma porque permite la posibilidad de supervisar la misma estrategia de control en dos plantas industriales de diferentes marcas al mismo tiempo.

1.4 Objetivos de la Tesis

El objetivo principal de la tesis es diseñar e implementar un SCD usando los equipos de control heterogéneos del Laboratorio de Automatización de UTEC y, para lograrlo

se cumplieron los siguientes objetivos específicos:

1. Esquema del SCD conformado por tres equipos de control de diferentes fabricantes (Rockwell, Siemens).
2. Creación de la arquitectura de red por software de cada equipo de control usando los programas de desarrollo de Rockwell y Siemens.
3. Integración de las arquitecturas de Rockwell y Siemens mediante el uso de un servidor OPC.
4. Configuración de las estrategias de control de la razón, control en cascada y control descentralizado para las tres plantas industriales por separado.
5. Diseño de una interfaz gráfica de monitoreo (SCADA) para el control y supervisión de las tres estrategias de control implementadas en los equipos de control.
6. Pruebas de funcionamiento de las estrategias de control implementadas mediante el uso de un sistema SCADA.

La implementación del SCD permitirá un aprendizaje más significativo de la aplicación de estrategias de control en un entorno industrial al poder cambiar la configuración y los valores de los distintos parámetros de los controladores desde una misma interfaz gráfica de monitoreo. Esto se logra mediante la incorporación de un sistema SCADA, el cual es la interfaz entre el usuario y el proceso, y que es diseñado específicamente para este propósito. La comunicación de un controlador de Siemens con el programa de supervisión de Rockwell (FactoryTalk View Studio) se logra por medio del uso de un servidor OPC, el cual permite el intercambio de información entre equipos sin importar la marca o proveedor del equipo. Como resultado, se obtiene el control de diversos procesos ocurridos en cualquier módulo o planta multipropósito del laboratorio.

Por lo que mediante el uso de una planta industrial física, el usuario puede implementar en un ambiente real algunas estrategias de control como control de la razón,

control en cascada o control descentralizado. La implementación simultánea de varias estrategias de control requiere el uso de más de un lazo de control, para lo cual es necesario emplear diversos equipos que puedan comunicarse entre sí. La aplicación de un SCD surge como una opción eficaz para la comunicación de distintos PLCs.

1.5 Organización de la Tesis

El presente trabajo de tesis posee la siguiente organización: En el Capítulo 2 se presentan los equipos de control de procesos; además, se explica cómo se diseñó la topología de red para el SCD que se utiliza con los equipos de Rockwell Automation y Siemens, los cuales se conectan a una sola red con la computadora de monitoreo. En dicha computadora se diseñaron las arquitecturas de red usando sus respectivos programas de desarrollo. La implementación de la arquitectura del SCD se realizó mediante el uso de un servidor OPC. En el Capítulo 3 se explican las tres estrategias de control y su configuración para su implementación en las tres plantas industriales. Posteriormente, en el Capítulo 4 se presenta la interfaz gráfica que servirá para monitorear los procesos que se desarrollen en las plantas industriales. Es en esta interfaz, creada mediante el uso del programa de desarrollo SCADA FactoryTalk View *Site Edition*, donde se realiza el traslado de las variables del PLC de Siemens que se usaron para el desarrollo de las estrategias desarrolladas en el Capítulo 3 por medio del servidor OPC implementado en el Capítulo 2. Finalmente, en el Capítulo 5 se muestra el resultado de las estrategias de control implementadas y se compara la data obtenida de los equipos de Siemens usando el SCD implementado y el programa de desarrollo de Siemens, TIA Portal. En el Capítulo de Conclusiones se analiza el desempeño de muestreo de data del SCD usando los programas y equipos de Rockwell con los equipos de Siemens mediante el uso del servidor OPC. En la sección de Anexo se explica cómo se configuran los equipos por medio de sus programas de desarrollo y la configuración realizada al servidor OPC utilizado.

Capítulo 2

IMPLEMENTACIÓN DE LA ARQUITECTURA DEL SCD

Para realizar la arquitectura del SCD se debe identificar los equipos a utilizar de Rockwell y Siemens que se encuentran en el laboratorio de Automatización, conocidos como equipos de control de procesos. Estos equipos se conectan físicamente a una sola red. Es a partir de esa red que se integran los equipos de Rockwell y Siemens mediante el uso de un servidor OPC. Las configuraciones se realizan por medio de su programa de desarrollo, en Rockwell se utiliza Studio 5000 y en Siemens, TIA Portal.

2.1 Equipos de Control de Procesos

Los equipos del Laboratorio de Automatización de UTEC, que se emplean en diversos cursos, han sido patentados [12], [13]. Estos equipos se utilizan para la enseñanza de tópicos relacionados a la automatización y el control de procesos industriales. Cada equipo de control de procesos está conformado por una *Planta industrial multipropósito para control e instrumentación* y un *módulo industrial multipropósito para control y supervisión*. En el laboratorio existen dos equipos como el mostrado en la Figura 2.1, el cual posee tres PLCs de Rockwell Automation los cuales se encuentran en el módulo industrial. Estos controladores corresponden a tres gamas de Rockwell: Alta (ControlLogix), media (CompactLogix) y baja (MicroLogix). Además, existe un equipo de control de procesos usando PLCs de Siemens donde también existen tres gamas de PLC: Alta (S7-1500), media (S7-300) y baja (S7-1200). La descripción y funcionamiento de los equipos se explica en [14].



Figura 2.1: Equipo de control de procesos. Planta industrial multipropósito para control e instrumentación (Figura de la izquierda). Módulo industrial multipropósito para control y supervisión (Figura de la derecha).

2.2 Diseño de la Topología de Red

El diseño de la topología de red se realiza tomando en consideración el objetivo de esta tesis, el cual es la implementación simultánea de estrategias de control, por lo que la aplicación de una topología con redundancia o tolerante a fallos no es un requisito en este caso.

En la Figura 2.2, se puede observar la topología de red a utilizar, en donde a simple

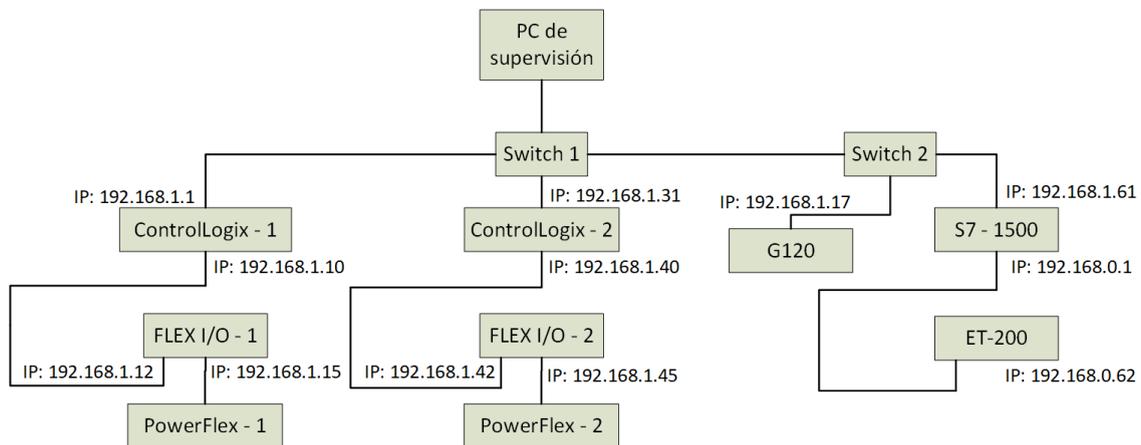


Figura 2.2: Topología de red del sistema de control distribuido.

vista se puede notar que es del tipo estrella, por los PLCs y la computadora conectados a un solo switch. Bajo cada PLC, se observa a su respectiva periferia descentralizada y conectados a este último el variador de frecuencia para controlar a la bomba de su planta industrial. Además, se puede notar las IPs que son configuradas a las interfaces de los equipos.

Con la topología diseñada, se puede conectar todos los equipos a una sola computadora, que también monitoreará y supervisará los procesos que se desarrollen en las plantas industriales. Esto se ve reflejado en la Figura 2.3, donde además se utiliza un sistema SCADA (FactoryTalk View Studio) y un servidor OPC (KEPServer), que son tratados más adelante.

2.3 Diseño de la Arquitectura de Red por Software

El siguiente paso al tener diseñada la topología de red a utilizar, es la configuración de estos equipos mediante el uso del programa de desarrollo de cada fabricante. Mediante el cual se pueden definir las conexiones que existen entre cada equipo y sus respectivas direcciones IPs. En el caso de Rockwell se tiene al programa de desarrollo Studio 5000 y en Siemens, a TIA Portal.

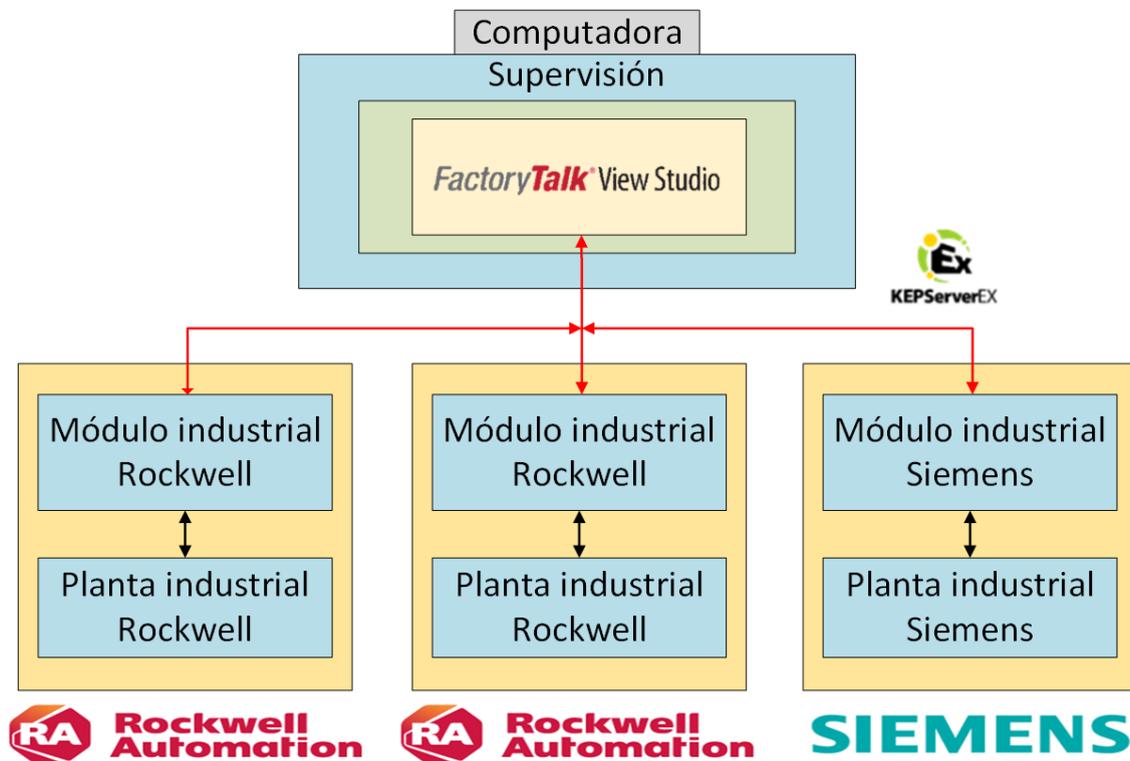


Figura 2.3: Estructura propuesta de los equipos del laboratorio.

2.3.1 La Arquitectura de Red en Studio 5000

Usando el programa Studio 5000, se puede añadir los equipos que se están utilizando de la misma marca de Rockwell como los PLCs, la periferia descentralizada y el variador de frecuencia. Adicionalmente, se puede añadir módulos de entradas y salidas al mismo PLC que amplían el número de señales que se pueden conectar a los equipos.

En la Figura 2.4 se muestra la arquitectura de control que se quiere implementar con los equipos de Rockwell. El protocolo de comunicación usado es Ethernet/IP transmitido por medio de cable UTP a puertos RJ45 de los equipos. En los dos módulos industriales solo se utilizan el PLC de gama alta (ControlLogix), la periferia descentralizada (FLEX I/O), y finalmente el variador de frecuencia (PowerFlex 525), el cual se configura para ser manejado por el mismo protocolo que usan los demás equipos.

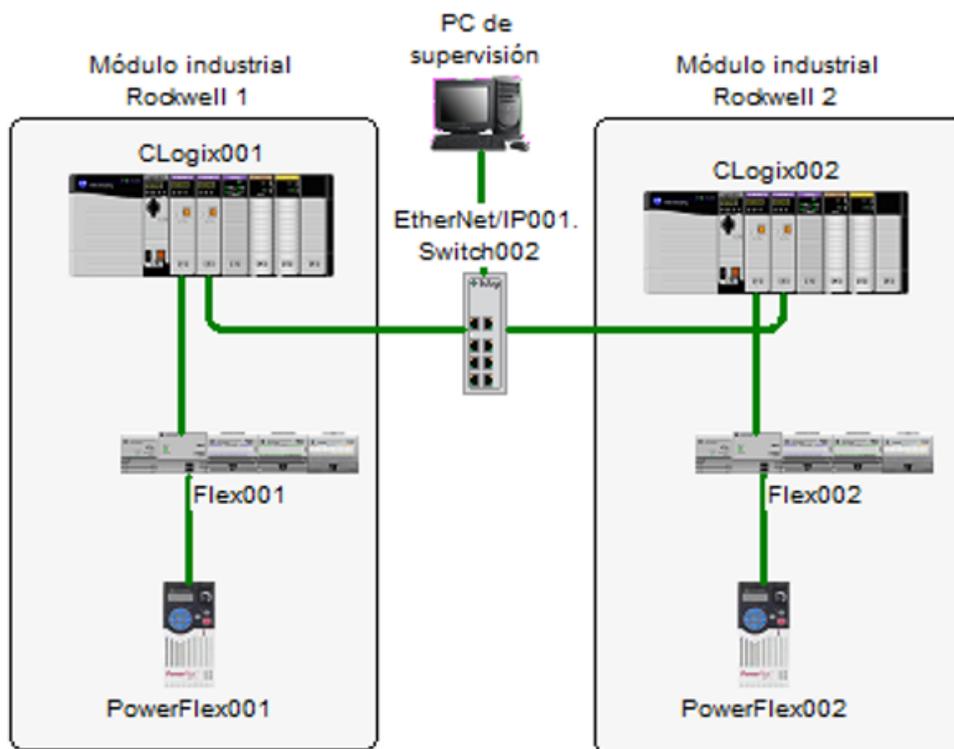


Figura 2.4: Arquitectura de control de Rockwell.

En Studio 5000, la creación de la red conformada por los equipos de Rockwell sigue una estructura de tipo lista. Esto se observa en la sección de Anexo donde se muestra el procedimiento seguido para realizar las configuraciones de los equipos utilizados y gestionar las comunicaciones entre ellos. Teniendo en cuenta que estas configuraciones tienen que ser realizadas dos veces, una para cada módulo industrial de Rockwell.

2.3.2 La Arquitectura de Red en TIA Portal

En el caso de Siemens, para la configuración de equipos se utiliza TIA Portal, el cual es una plataforma donde además es posible realizar sistemas SCADA, lo que en el ámbito de automatización ofrece una integración en las tareas de diseño y monitoreo en un solo programa.

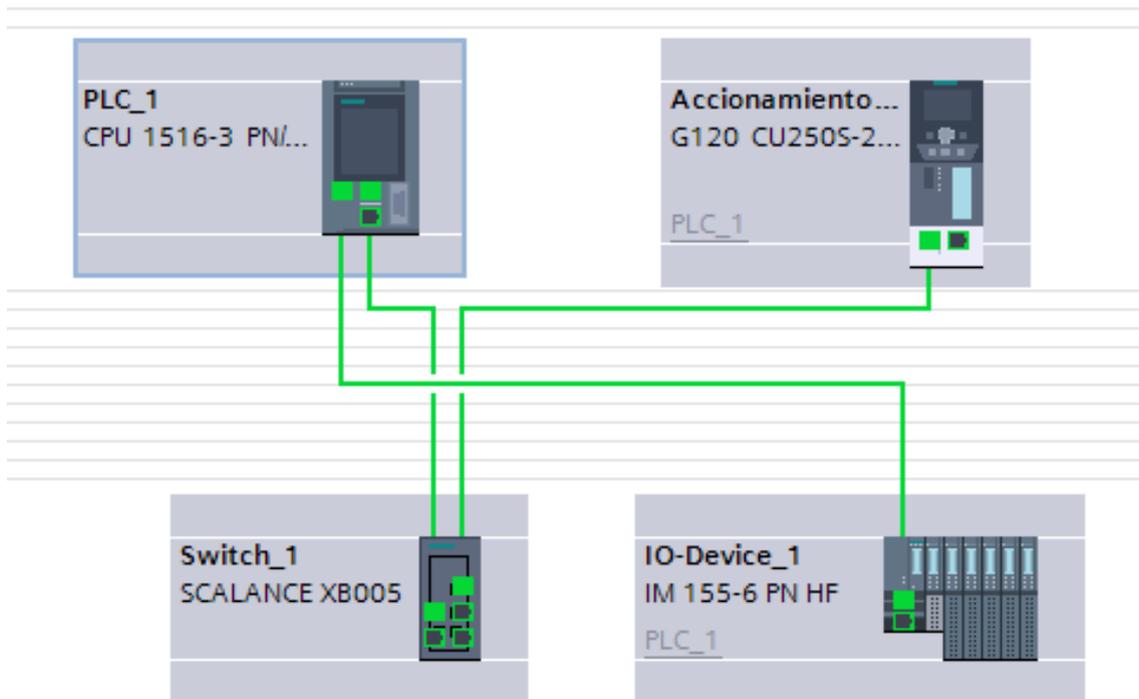


Figura 2.5: Arquitectura de control de Siemens.

En la Figura 2.5 se puede observar la vista topológica de la arquitectura de control del módulo industrial de Siemens donde al igual que en cada módulo de Rockwell, solo contiene tres elementos: S7-1500 (PLC), ET-200 (periferia descentralizada) y G-120 (variador de frecuencia). El protocolo de comunicación entre los equipos es Profinet, utilizando el mismo cable UTP usado para la arquitectura de control de Rockwell. El switch usado corresponde al Switch 2 de la Figura 2.2 que está conectado al Switch 1 que va conectado a la computadora de supervisión.

El procedimiento seguido para la creación de este programa se muestra en el Anexo. Este procedimiento es más gráfico que el realizado en Rockwell. Al solo haber un módulo de Siemens, se carga el programa al PLC principal que se utiliza.

2.4 Configuración de Direcciones IPs de los Equipos

Al tener las arquitecturas de cada módulo configuradas, es necesario una dirección que identifique a cada equipo en la red que se esté utilizando; es por ello que se utilizan las direcciones IPs. Por lo que al diseñar un SCD, las direcciones IPs de los equipos deben pertenecer a una sola red y en este caso, se ha optado por configurar las direcciones IPs de los equipos conectados al switch del nodo central en el siguiente rango: 192.168.1.x

Tabla 2.1: Direcciones IPs de los equipos de Rockwell.

Equipo	Marca	Ubicación	Dirección IP	
ControlLogix - 1	Rockwell Automation	Módulo Rockwell 1	1.º interfaz	192.168.1.1
			2.º interfaz	192.168.1.10
FLEX I/O - 1	Rockwell Automation	Módulo Rockwell 1	192.168.1.12	
PowerFlex - 1	Rockwell Automation	Módulo Rockwell 1	192.168.1.15	
ControlLogix - 2	Rockwell Automation	Módulo Rockwell 2	1.º interfaz	192.168.1.31
			2.º interfaz	192.168.1.40
FLEX I/O - 2	Rockwell Automation	Módulo Rockwell 2	192.168.1.42	
PowerFlex - 2	Rockwell Automation	Módulo Rockwell 2	192.168.1.45	

Tabla 2.2: Direcciones IPs de los equipos de Siemens.

Equipo	Marca	Ubicación	Dirección IP	
S7-1500	Siemens	Módulo Siemens	1.º interfaz	192.168.1.61
			2.º interfaz	192.168.0.1
ET-200	Siemens	Módulo Siemens	192.168.0.62	
G-120	Siemens	Módulo Siemens	192.168.1.17	

En las Tablas 2.1 y 2.2 se muestran las direcciones IPs de los equipos de Rockwell y Siemens, respectivamente. Nótese que los únicos equipos que disponen de dos direcciones IPs diferentes son los PLCs, que en el caso de Siemens posee dos interfaces incorporadas en el mismo equipo, y en Rockwell posee dos módulos de comunicación para Ethernet/IP. La dirección de una interfaz del PLC de Siemens debe pertenecer a una subred diferente de la otra interfaz, esto por especificaciones del mismo PLC.

2.5 Integración en un sola Red de los Equipos

Luego de haber realizado las configuraciones a los equipos de cada módulo industrial, con lo cual la programación de cada PLC y la posterior visualización de las variables creadas se hacen bajo el programa de desarrollo de cada fabricante, es necesario permitir la integración de las dos marcas de PLC. En el laboratorio, desde una sola computadora no se puede acceder a ambos programas de desarrollo (Studio 5000 y TIA Portal), por lo que una solución para poder visualizar simultáneamente las variables de Rockwell y Siemens es mediante un servidor de datos (RSLinx Classic), para la comunicación entre Studio 5000 y los PLCs de Rockwell, y el uso de un servidor OPC.

2.5.1 Servidor OPC

Un servidor OPC es una programa de cómputo que permite el intercambio de información entre un cliente OPC (generalmente SCADAs, HMIs, etc.) y un dispositivo generador de datos (PLCs, DCSs, etc.). La arquitectura que maneja este programa es de cliente y servidor, por un lado el servidor se encarga de transmitir los datos y el cliente de leerlos y/o modificarlos. Por lo que las comunicaciones son bidireccionales.

La OPC Foundation, la cual es un consorcio que regula los estándares de conectividad abierta de dispositivos y sistemas de automatización industrial, ha definido cuatro diferentes tipos de servidores OPC: Servidor OPC DA (*Data Access*), HDA (*Historical Data Access*), A&E (*Alarms & Events*) y UA (*Unified Architecture*). Este último es el servidor OPC más reciente que permite trabajar con cualquier tipo de dato que provenga de un proceso industrial, sin importar el protocolo industrial que se este utilizando en los equipos. Uno de los servidores OPC UA disponibles en la industria es de la empresa Kepware cuyo nombre es: KEPServer Enterprise.

2.5.2 Configuración del Servidor KEPServer Enterprise

La aplicación de software KEPServer dispone de una gran variedad de drivers para el trabajo con múltiples equipos industriales como Rockwell, Siemens, Honeywell, etc. Este programa se encuentra en las computadoras del laboratorio en el mismo ambiente operacional donde se encuentran los programas de desarrollo de Rockwell, por lo que será necesario utilizar el servidor OPC para un equipo de Siemens. Antes de configurar el programa, es necesario que se active la opción de utilizar un servidor OPC en el PLC de Siemens mediante el uso de su programa de desarrollo, esto con la finalidad de acceder a la memoria del PLC donde se encuentran almacenadas las variables que se utilizan en la programación.

La configuración del programa se basa en identificar el PLC de Siemens con el que se trabajará y su respectiva dirección IP, para posteriormente ingresar las variables del PLC con su respectiva dirección en memoria. Es necesario que el PLC se encuentre conectado a la misma red de la computadora, para lo cual es necesario el uso de un switch que permita conectarse con los tres módulos industriales. El procedimiento detallado se muestra en la sección de Anexo.

2.5.3 Uso del Servidor KEPServer Enterprise

La modificación de las variables del PLC de Siemens puede realizarse mediante el uso de la interfaz del KEPServer. No es necesario que todas las variables que se desarrollen en el PLC deban ser trasladadas a KEPServer, muchas de estas variables pueden ser la activación de una secuencia o la salida de una.

En las Figuras 2.6 y 2.7 se pueden ver la secuencia de encendido y apagado elaboradas en programación Ladder para el manejo del variador de frecuencia de la planta industrial de Siemens, donde solo las variables correspondientes al contacto de encendido

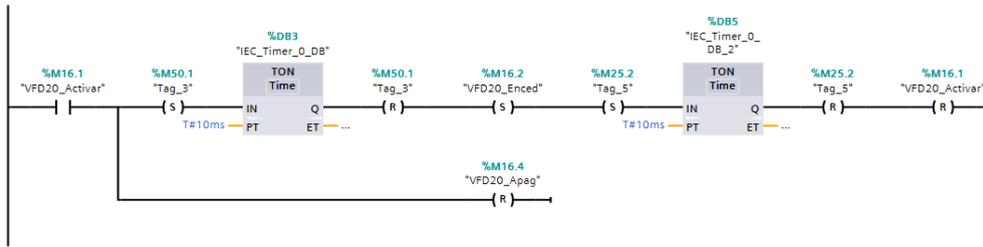


Figura 2.6: Secuencia de encendido del variador de frecuencia G-120.

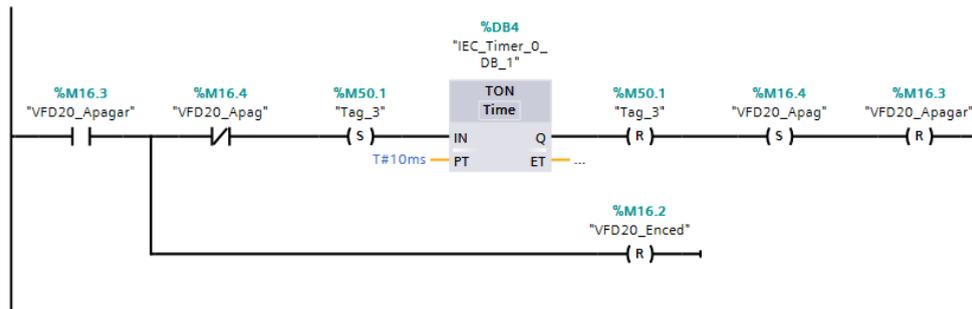


Figura 2.7: Secuencia de apagado del variador de frecuencia G-120.

(VFD20_Activar) y apagado (VFD20_Apagar) son trasladadas al Kepserver. Si se requiere activar o desactivar los contactos por medio del servidor OPC, se debe ingresar a la configuración de la variable y conmutar el valor que presenta en ese momento. Por lo que cualquier secuencia que se desarrolle en el PLC de Siemens puede ser manejada desde el mismo servidor OPC.

2.5.4 Monitoreo de Equipos de las Plantas Industriales

Con la realización de la configuración del servidor OPC para trabajar con los equipos de Siemens, es posible acceder a cualquier data que se encuentre alojada en el PLC de Siemens y leerla o modificarla mediante el servidor OPC, pero debido a que el monitoreo de la planta industrial de Siemens solo es posible por medio de la interfaz del KEPServer desde el ambiente operacional de Rockwell. Esto deja de lado el monitoreo de la instrumentación de las plantas industriales de Rockwell, el cual solo se podrá realizar mediante

el uso de Studio 5000. Para ello es necesario el uso de una interfaz gráfica que permita el control y monitoreo de todas las plantas industriales.

La interfaz gráfica a utilizar se desarrolla en el programa de desarrollo de sistemas SCADA de Rockwell, FactoryTalk View Studio. Este último, además de permitir agregar las rutas de los PLCs de Rockwell de donde se extraerá las variables a utilizar en el monitoreo, permite agregar servidores OPC como el desarrollado en KEPServer. Como resultado de ello se puede observar la interfaz gráfica mostrada en la Figura 2.8, en la cual se realiza el manejo de las válvulas digitales de las plantas industriales, así como de la válvula de control FV10, en el caso de Rockwell; y EV11, en el caso de Siemens. Otro monitoreo que se realiza es la lectura de la temperatura del tanque superior (T-10). Finalmente en la parte inferior de la interfaz gráfica se puede modificar el encendido, apagado y la frecuencia a la que se encuentran trabajando las bombas de las plantas industriales.

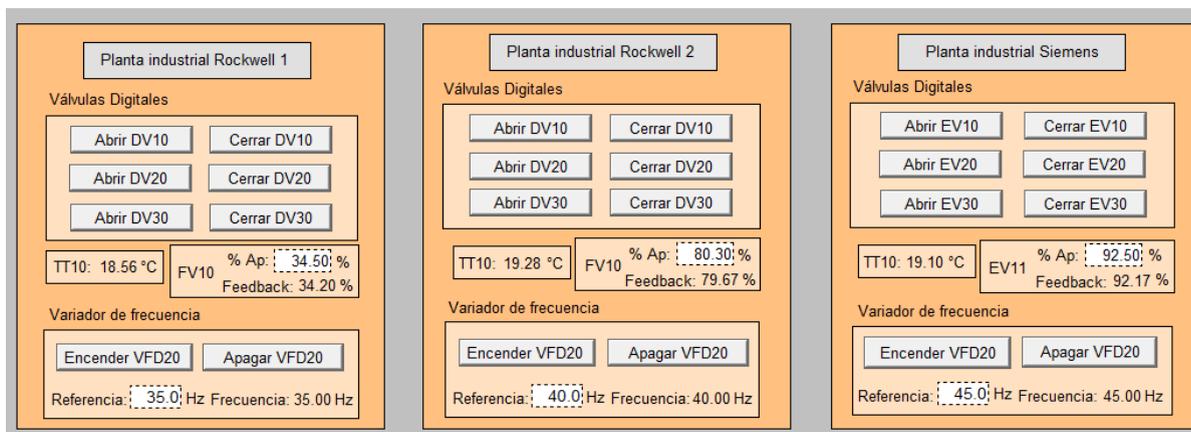


Figura 2.8: Interfaz gráfica de monitoreo de las tres plantas industriales.

Con ello se demuestra la integración de los equipos de las dos marcas en una sola red y el posterior monitoreo de los equipos que cada uno se encuentra manejando. Además de que el monitoreo de las variables de los PLCs es una introducción a lo que se realizará cuando se implementen las estrategias de control en el Capítulo 3.

Capítulo 3

CONFIGURACIÓN DE ESTRATEGIAS DE CONTROL

En los equipos de control de procesos se pueden aplicar estrategias de control, las cuáles según los instrumentos de los P&ID de las plantas industriales [14] pueden estar conformadas por las siguientes estrategias de control: control de la razón de flujos, control en cascada y control descentralizado. Para definir qué variables físicas serán controladas y los instrumentos a utilizar, será necesario entender un poco más de las estrategias de control a implementar.

3.1 Estrategias de Control

Los procesos que se desarrollen en cada planta industrial están limitados por los instrumentos que cada una posee, el tamaño de las tuberías y la cantidad de agua que cada tanque puede poseer. Por lo que estas consideraciones influyeron también en la identificación de los procesos que se utilizaron.

3.1.1 Control de la Razón de Flujos

El control de la razón consiste en mantener una determinada relación entre dos fluidos. Existe muchas representaciones de cómo realizar dicho control, pero el más utilizado es el que se presenta en la Figura 3.1, en el cual se utilizó la misma nomenclatura que tienen los instrumentos de la planta industrial [14]. El flujo que circula por FT10 es el flujo no controlado que desemboca en el tanque superior. El flujo a controlar es el que circula por FT11, el cuál es regulado por la válvula de control FV11 (EV12 en el caso

de Siemens). Esta agua proviene del tanque inferior impulsado por la bomba, la cual es controlada por medio del variador de frecuencia VFD20.

Debido a que el caudal de agua que ingresa en el tanque superior es el mismo que pasa al tanque inferior, el cual también es utilizado por la bomba, la válvula de control FV10 (EV11 en Siemens) debe permanecer abierta. Además, para evitar que la bomba sufra daños, se considera que la válvula FV11 (EV12 en el caso de Siemens) debe tener un porcentaje mínimo de apertura.

Las ecuaciones de relación son extraídas de [15] y presentadas a continuación:

$$r_2 = Vy_1, \quad (3.1)$$

$$e_2 = r_2 - y_2 = Vy_1 - y_2, \quad (3.2)$$

donde el flujo a controlar se mantiene constante cuando el error en (3.2) tiende a cero. Es decir

$$e_2 = Vy_1 - y_2 = 0, \quad (3.3)$$

de donde se obtiene la siguiente relación:

$$V = \frac{y_2}{y_1}, \quad (3.4)$$

donde la razón a mantener será calculada como la división entre el caudal leído por FT11 y FT10 ($V = FT11/FT10$). Esta relación también se verá afectada por la velocidad a la que funcione la bomba. La duración de la implementación también se ve afectada por la cantidad de agua que el tanque inferior posea, si se usa una velocidad muy alta en la bomba el tiempo de implementación es menor a cuando la velocidad es baja.

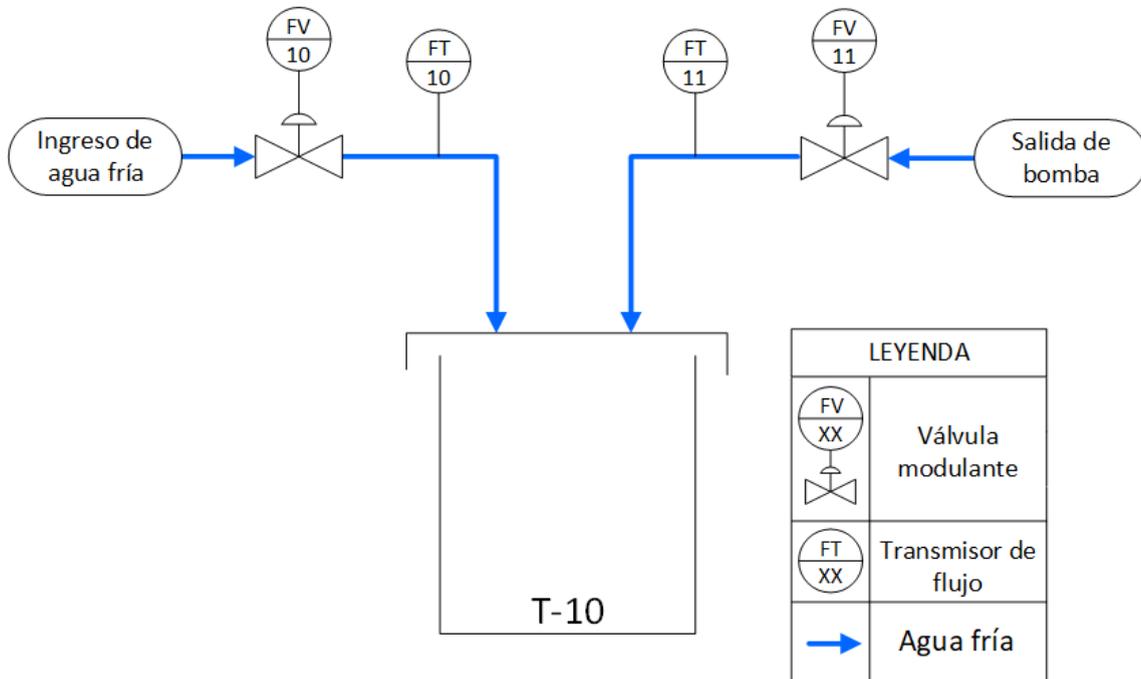


Figura 3.1: Esquema del control de la razón utilizado.

3.1.2 Control en Cascada

El esquema que se muestra en la Figura 3.2 corresponde a un diagrama de bloques usado para controlar el nivel de agua en el tanque superior de la planta industrial. En la entrada al controlador se encuentra la señal de referencia y la medición del nivel captada por el transmisor LT10. La salida del controlador (u) es la que manejará el porcentaje de apertura de la válvula de control FV10 (EV11 en el caso de Siemens) para el ingreso de agua en el tanque superior. El diagrama simplificado del lazo de control de nivel es mostrado en la Figura 3.3.

Para mejorar el rendimiento del lazo de control se usa el control en cascada, el cuál consiste en agregar otro lazo de control al sistema, como es mostrado en la Figura 3.4. El primer lazo conocido como lazo primario es usado para controlar el nivel del agua en el tanque (y_1) para que siga una señal de referencia (r_1), esto por medio del uso del

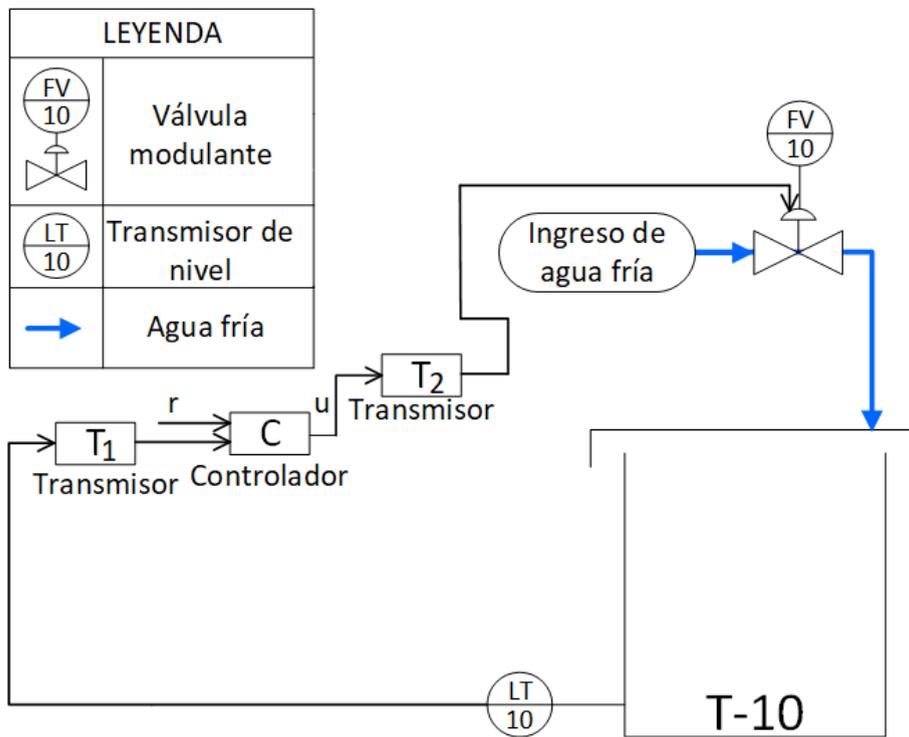


Figura 3.2: Esquema de control a lazo cerrado (proceso de nivel).

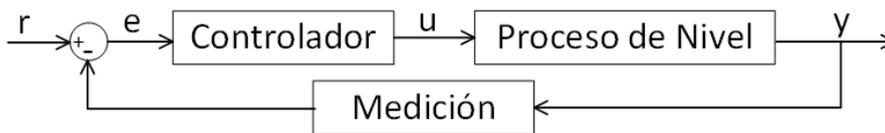


Figura 3.3: Diagrama de bloques del control de nivel [15].

controlador C_1 . El nuevo lazo de control o lazo secundario es usado para que el caudal medido por FT10 (y_2) siga a la referencia (r_2) por medio del uso del controlador C_2 .

En la Figura 3.5, se muestra el diagrama de bloques utilizado para el control en cascada donde los lazos de control se encargan de calcular un error, el cual queda expresado en (3.5).

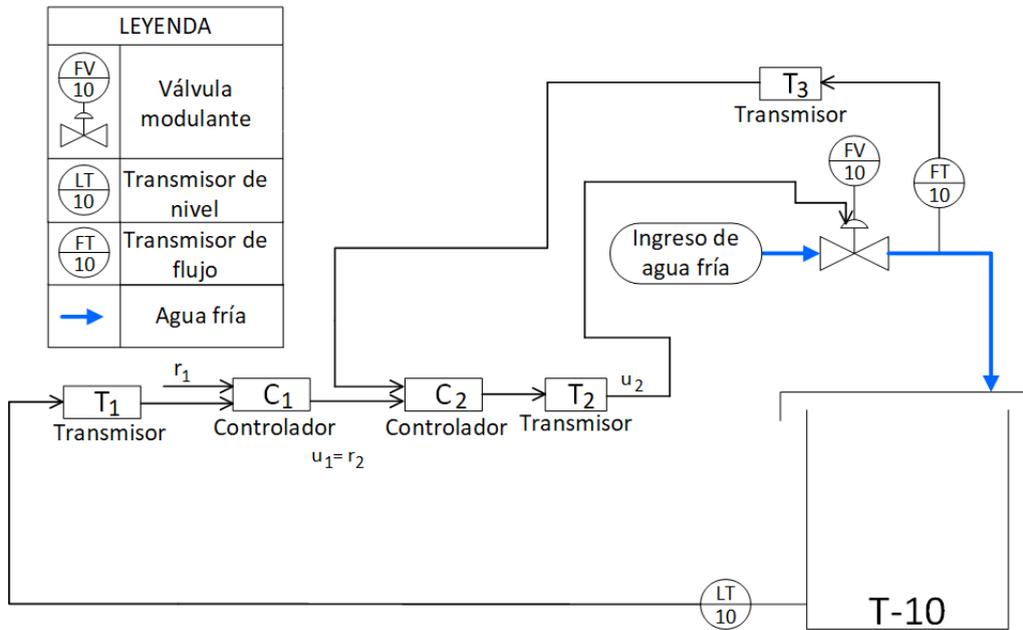


Figura 3.4: Esquema del control en cascada utilizado.

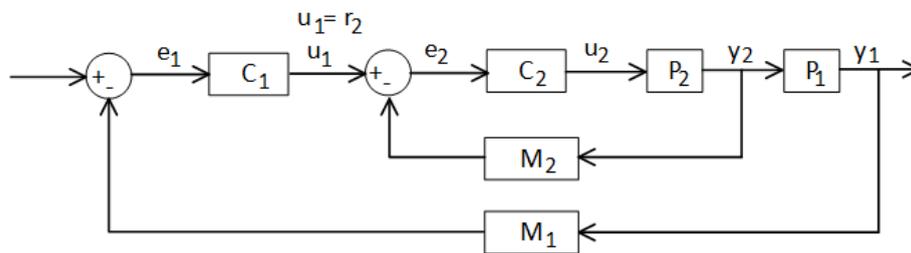


Figura 3.5: Diagrama de bloques del control en cascada utilizado [15].

$$\begin{aligned}
 e_1 &= r_1 - y_1, \\
 e_2 &= r_2 - y_2.
 \end{aligned}
 \tag{3.5}$$

El requisito del control en cascada es que el lazo secundario sea más rápido que el lazo principal, debido a que si el lazo secundario fuera más lento no sería capaz de atenuar los cambios en el lazo principal.

Por lo que si existe una disminución en el nivel de agua (lazo principal) del tanque superior, un aumento en el porcentaje de apertura de la válvula FV10 causará un mayor flujo de agua (lazo secundario) que ayudará a restablecer el nivel que tenía anteriormente.

3.1.3 Control Descentralizado

A diferencia de los sistemas monovariantes o sistemas SISO donde solo se controla una variable física por medio de la manipulación de otra variable, existen sistemas con muchas variables de entrada y de salida. Estos últimos son conocidos como sistemas multivariable o MIMO. Uno de los controladores usados para manejar sistemas MIMO es el control descentralizado [16], cuyo diagrama de bloques se presenta en la Figura 3.6.

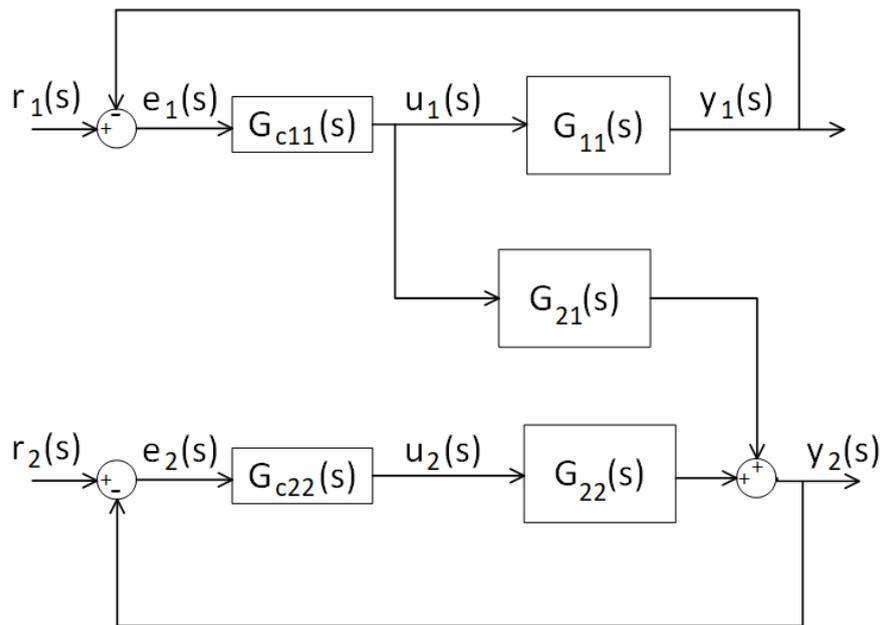


Figura 3.6: Diagrama de bloques del control descentralizado.

El control descentralizado mostrado presenta dos entradas (r_1 y r_2) y dos salidas (y_1 y y_2). G_{c11} y G_{c22} son los controladores de las dos variables manipuladas. Al tratar de manipular una variable puede tener efecto en la otra variable. Esto último se ve reflejado al establecer el control descentralizado para los procesos de nivel y temperatura en el tanque

superior de la planta industrial, donde el nivel de agua que se establezca como referencia y la cantidad de agua que entra y sale influye en el proceso de temperatura.

3.2 Desarrollo de Estrategias de Control

Para el diseño de las tres estrategias de control se hace uso de controladores PID que los PLCs de Rockwell y Siemens poseen. Se usa este tipo de controlador debido a la facilidad de sintonización que permite a los programas de desarrollo sintonizar los parámetros de un determinado proceso en corto tiempo. En el caso de Rockwell se usa la instrucción PIDE y en Siemens, la instrucción PID Compact.

3.2.1 Instrucción PIDE de Rockwell

Los PLCs de Rockwell (ControlLogix y CompactLogix) poseen un tipo de controlador PID basado en la forma de velocidad del algoritmo de PID [17]. Cuyas ganancias en formato independiente está expresado como:

$$CV_n = CV_{n-1} + K_P \Delta E + \frac{K_I}{60} E \Delta t + 60 K_D \frac{E_n - 2E_{n-1} + E_{n-2}}{\Delta t}. \quad (3.6)$$

Tabla 3.1: Términos del algoritmo usado por la instrucción PIDE [17].

Término	Descripción
CV	Variable controlada
E	Error en porcentaje
Δt	Tiempo usado en la iteración
K_P	Ganancia proporcional
K_I	Ganancia integral en 1/min
K_D	Ganancia derivativa en min

El uso del formato independiente permite que si se cambian las ganancias (K_P , K_I y K_D), estas sola afecten a ese término y no a otro. Por lo que otorga flexibilidad si el usuario necesita sintonizar manualmente el controlador.

La instrucción PIDE (Figura 3.7) se realiza en el lenguaje de diagrama de bloques de funciones (FBD por sus siglas en inglés). Las conexiones de la izquierda son las entradas del bloque, donde principalmente se puede identificar a la variable a controlar (PV). Las conexiones de la derecha son las salidas del bloque en donde muestra la variable controlada (CV).

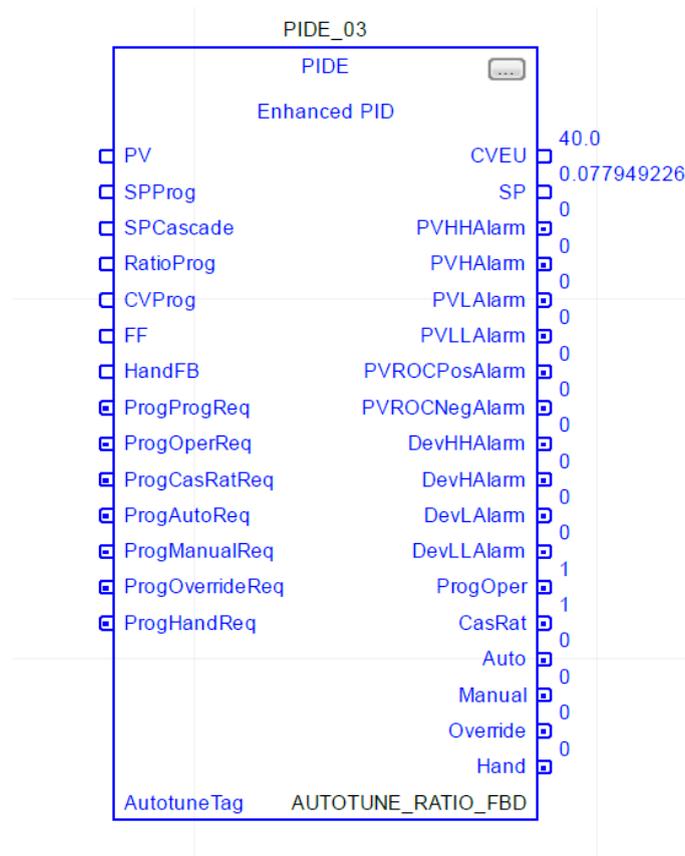


Figura 3.7: Bloque de la instrucción PIDE.

3.2.2 Instrucción PID Compact de Siemens

De forma similar que en Rockwell, Siemens dispone de un controlador PID, cuyo nombre es PID Compact. Este objeto tecnológico es regulado por la siguiente fórmula:

$$y = K_P \left[(b \cdot w - x) + \frac{1}{T_I \cdot s} (w - x) + \frac{T_D \cdot s}{a \cdot T_D \cdot s + 1} (c \cdot w - x) \right]. \quad (3.7)$$

Tabla 3.2: Términos del algoritmo usado por la instrucción PID Compact [18].

Término	Descripción
y	Valor de salida del algoritmo PID
K_P	Ganancia proporcional
s	Operador laplaciano
b	Ponderación de la acción P
W	Consigna
x	Valor real
T_I	Tiempo de integración
a	Coefficiente para el retardo de la acción derivada
T_D	Tiempo derivativo
c	Ponderación de la acción D

PID Compact se encarga de registrar de forma continua el valor real y la compara con la consigna definida, es ahí que a partir del error calculado, la instrucción calcula un valor de salida para igualar el valor real con la consigna. El desempeño de la regulación se establece por medio de los parámetros P, D e I, los cuáles son calculados por PID Compact por medio de dos optimizaciones: Optimización inicial y fina.

El bloque PID Compact se usa en el lenguaje de programación Ladder (Figura 3.8). La entrada escalada de la variable a controlar se conecta a *Input*. La consigna se conecta a *Setpoint* y la variable a controlar se conecta a la salida del bloque *Output*, la cual se configura para estar dentro de los límites propios de manejo.

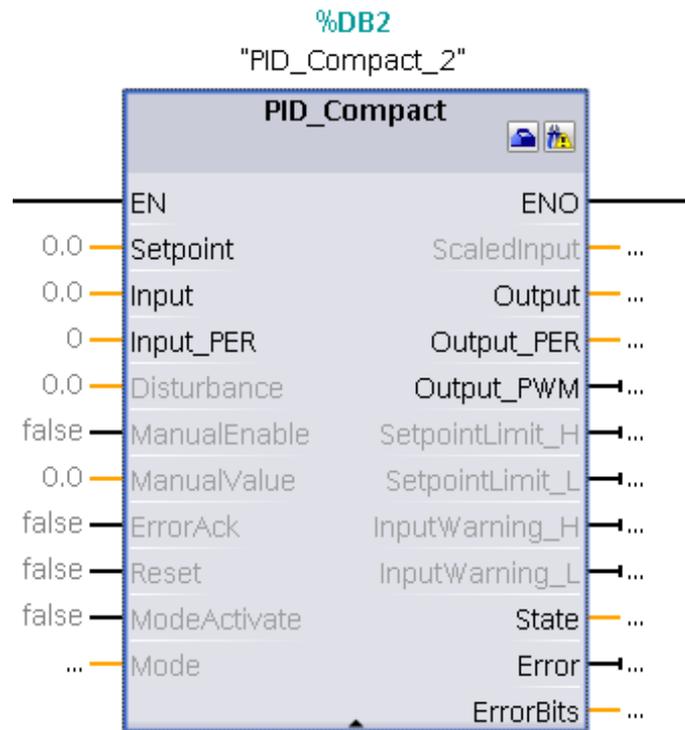


Figura 3.8: Bloque de la instrucción PID Compact.

3.2.3 Implementación del Control de la Razón

Para el desarrollo del control de la razón de flujos se utiliza el diagrama de la Figura 3.1, cuya relación está expresada por la ecuación (3.4) como la división entre el caudal leído por FT11 y FT10. A partir de ahí se usan los controladores PID por medio del uso del programa de desarrollo de Rockwell y Siemens.

3.2.3.1. Implementación del Control de la Razón en Rockwell

La instrucción PIDE mostrada en la Figura 3.9 se configuró para estar en modo de control de la razón, que permitió que el flujo controlado siga a la multiplicación de las entradas *SPCascade* y *RatioProg*, la cual es la relación que entre los dos flujos de agua que entran al tanque superior.

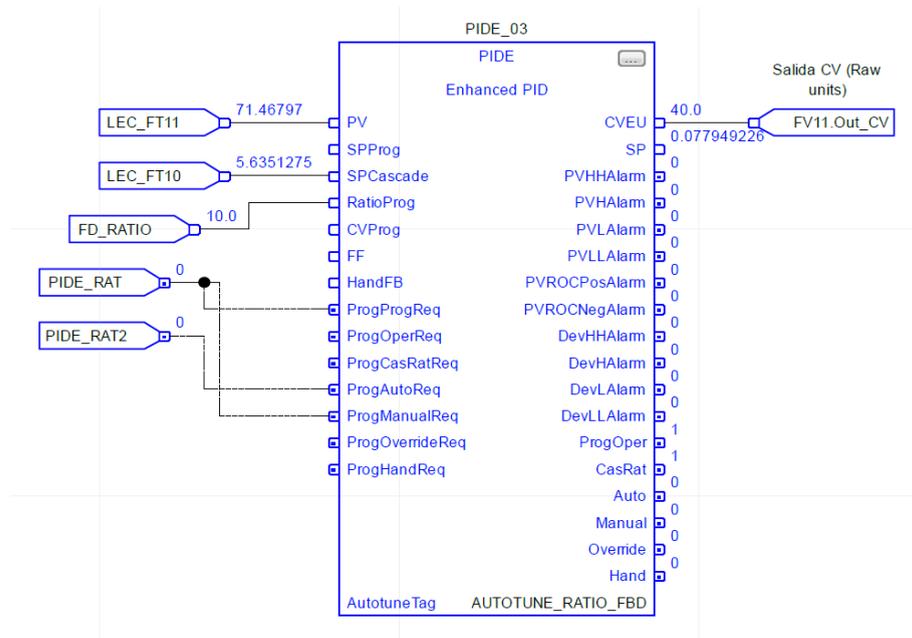


Figura 3.9: Instrucción PIDE para control de la razón.

Para hallar los parámetros del controlador PID se realizó la sintonización que dispone la misma instrucción PIDE, los cuales son presentados a continuación:

Tabla 3.3: Parámetros PID para control de la razón (Rockwell).

Módulo	Ganancia proporcional K_P	Ganancia integral K_I (1/min)	Ganancia derivativa K_D (min)
Rockwell 1	12.48	167.30	0.15
Rockwell 2	12.32	166.67	0.11

3.2.3.2. Implementación del Control de la razón en Siemens

En la programación en Siemens, se hace uso de la instrucción PID Compact (Figura 3.10). La instrucción no dispone de un modo para realizar un control de la razón, por lo que la referencia que debe seguir el caudal que circula por el flujómetro FT11 es calculada en (3.8).

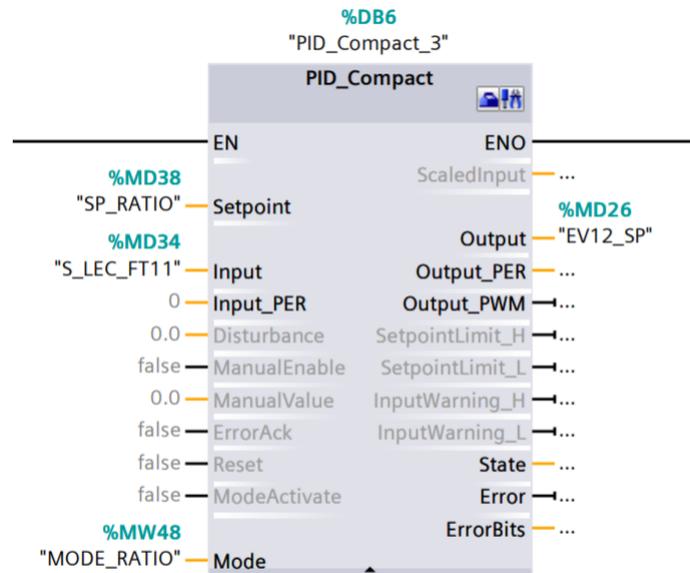


Figura 3.10: Instrucción PID Compact para control de la razón.

$$FT11 = Ratio \times FT10. \quad (3.8)$$

La ecuación (3.8) es justamente la operación que se realiza en la Figura 3.11. Donde la variable *SP_RATIO* es la entrada del *Setpoint* de la Figura 3.10.

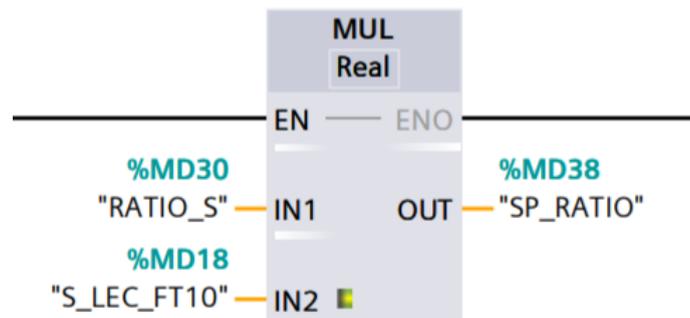


Figura 3.11: Cálculo de la referencia (*Setpoint* del caudal que circula por FT11).

Para hallar los valores de los parámetros del controlador PID se utilizó la optimización fina, la cual consiste en oscilar el valor de la variable controlada alrededor de la referencia. A partir de ello se usa la amplitud y frecuencia de oscilación para calcular los parámetros más óptimos, los cuales son mostrados en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4: Parámetros PID para control de la razón (Siemens).

Módulo	K_P	T_I (s)	K_D (s)	a	b	c
Siemens	30.64	2.07	0.52	0.1	0.27	0

3.2.4 Implementación del Control en Cascada

De la Figura 3.5 se evidencia el control sobre dos variables físicas (control de nivel con la asistencia del control de flujo) para lo cual se hace uso de un controlador para cada variable. Estos controladores, al igual que el control de la razón, son controladores PID. El tipo de controlador PID varía si es usado para la planta industrial de Siemens y Rockwell.

3.2.4.1. Implementación del Control en Cascada en Rockwell

La instrucción PIDE dispone de un modo de operación para realizar control en cascada. Este esquema es presentado en la Figura 3.12, la cual fue desarrollada en lenguaje de programación FBD.

El bloque PIDE de la izquierda y derecha corresponden al lazo primario y secundario del control en cascada, respectivamente. Al igual que en el esquema mostrado en la Figura 3.5, la variable controlada (CV) del lazo primario es el caudal de referencia conectada a la entrada $SPCacade$ del PIDE usado como lazo secundario. Los límites de CV del lazo primario deben ser coherentes al caudal máximo que puede circular por la tubería. La salida del lazo de control secundario (CV) controla el porcentaje de apertura de la válvula de control FV10.

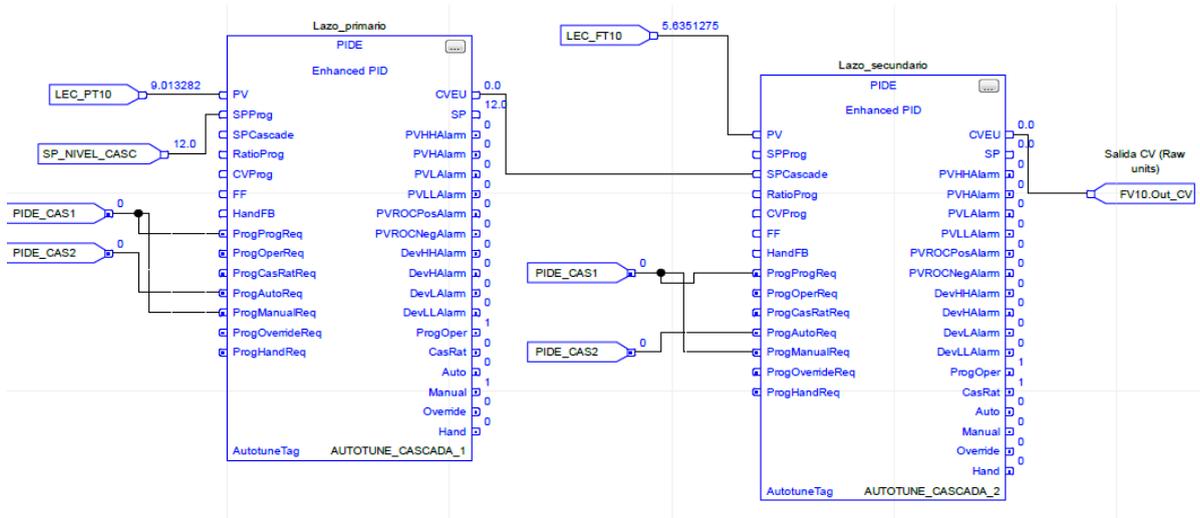


Figura 3.12: Bloques PIDE para control en cascada (Rockwell).

Para determinar los parámetros de los controladores, se utilizó la sintonización que las instrucciones PIDE contienen. Primero se inició la sintonización en el lazo secundario para posteriormente realizarla en el lazo primario. Los parámetros de los controladores PID del lazo primario y secundario son mostrados en las Tablas 3.5 y 3.6, respectivamente.

Tabla 3.5: Parámetros PID para control en cascada (lazo primario).

Módulo	Ganancia proporcional K_P	Ganancia integral K_I (1/min)	Ganancia derivativa K_D (min)
Rockwell 1	11.05	5.83	1.75
Rockwell 2	11.63	5.28	2.25

Tabla 3.6: Parámetros PID para control en cascada (lazo secundario).

Módulo	Ganancia proporcional K_P	Ganancia integral K_I (1/min)	Ganancia derivativa K_D (min)
Rockwell 1	3.65	66.28	0.02
Rockwell 2	3.51	58.14	0.02

3.2.4.2. Implementación del Control en Cascada en Siemens

En el caso del control en cascada en Siemens, al no tener un modo de operación que trabaje para ese tipo de control, se utilizó dos instrucciones PID Compact independientes. La Figura 3.13 muestra el controlador PID para el lazo primario y la Figura 3.14 presenta el controlador del lazo secundario.

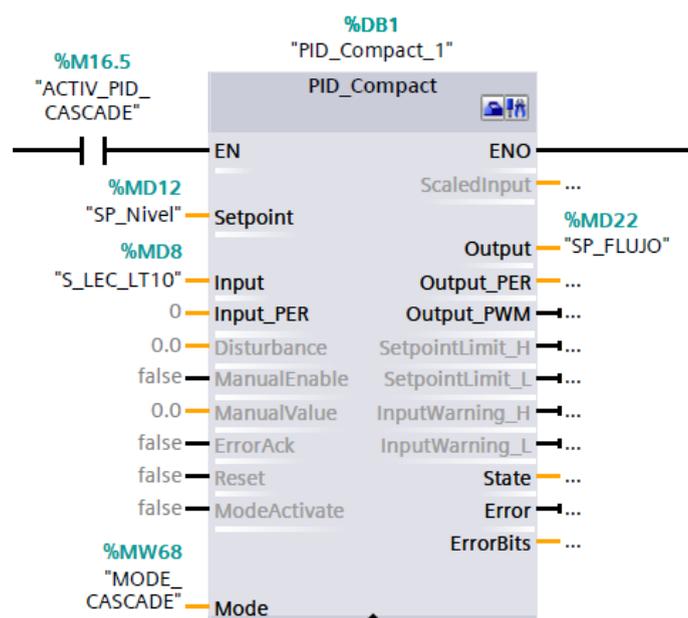


Figura 3.13: Bloque PID Compact del lazo primario para control en cascada (Siemens).

La sintonización se realizó primero con el lazo secundario, el cual maneja la válvula de control EV11 para después sintonizar el lazo primario. Los parámetros del controlador PID para el lazo primario y secundario son mostrados en las Tablas 3.7 y 3.8, respectivamente.

Tabla 3.7: Parámetros PID para control en cascada (lazo primario).

Módulo	K_P	T_I (s)	K_D (s)	a	b	c
Siemens	15.83	11.39	2.55	0.1	0.58	0

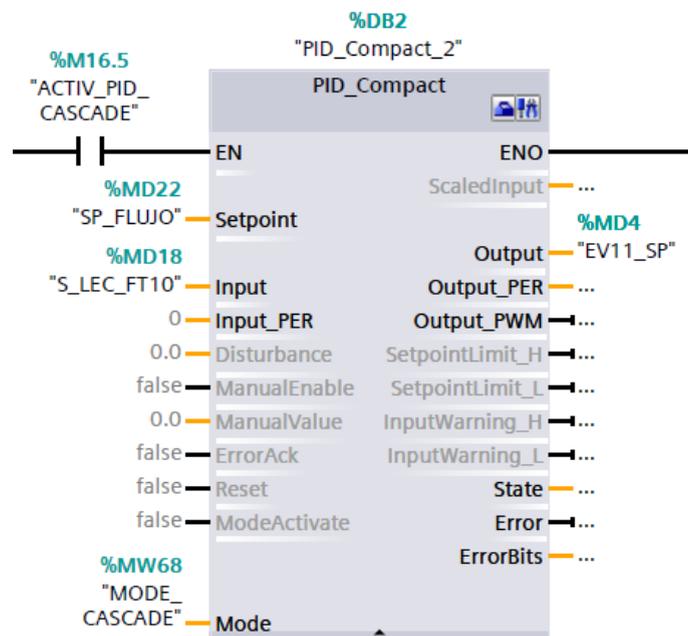


Figura 3.14: Bloque PID Compact del lazo secundario para control en cascada (Siemens).

Tabla 3.8: Parámetros PID para control en cascada (lazo secundario).

Módulo	K_P	T_I (s)	K_D (s)	a	b	c
Siemens	3.83	2.06	0.52	0.1	0.05	0

3.2.5 Implementación del Control Descentralizado

Para el control descentralizado de nivel y temperatura mostrado en la Figura 3.6, se utilizaron controladores PID. Un controlador para el proceso de nivel y otro para el proceso de temperatura, La condición del sistema es que el nivel controlado sea superior a 6 cm para cubrir totalmente las resistencias calefactoras situadas en el tanque superior.

3.2.5.1. Implementación del Control Descentralizado en Rockwell

La elaboración del control descentralizado se desarrolló usando programación en FBD, como se muestra en la Figura 3.15. La instrucción PIDE de la izquierda corresponde

al controlador de nivel y el de la derecha, al control de temperatura. El controlador de nivel manipula la válvula de control FV10 de ingreso de agua al tanque. Así mismo, el controlador de temperatura manipula el porcentaje de corriente (4-20 mA) que circularán por las resistencias calefactoras (PW10).

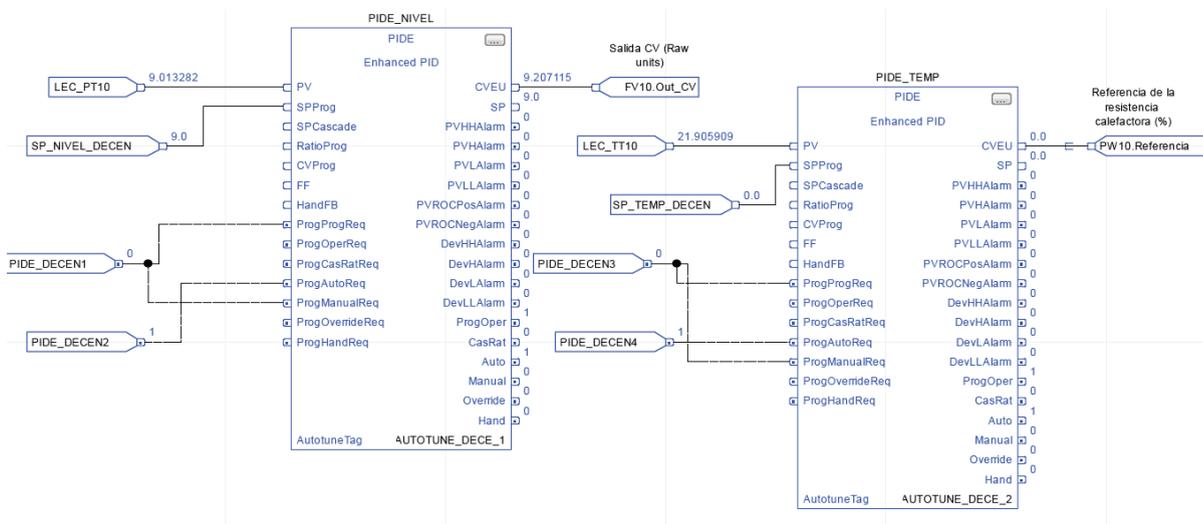


Figura 3.15: Bloques PIDE para control descentralizado (Rockwell).

Los parámetros de sintonización, al igual que las estrategias de control antes mencionadas, fueron hallados con el mismo procedimiento. Primero se sintonizó los parámetros del controlador de nivel. Luego, con el control de nivel en funcionamiento, se procedió a sintonizar los parámetros del controlador de temperatura. Justamente los parámetros para el proceso de nivel y temperatura son mostrados en las Tablas 3.9 y 3.10.

Tabla 3.9: Parámetros PID para control descentralizado (Nivel)

Módulo	Ganancia proporcional K_P	Ganancia integral K_I (1/min)	Ganancia derivativa K_D (min)
Rockwell 1	11.06	5.83	1.75
Rockwell 2	7.12	3.32	1.40

Tabla 3.10: Parámetros PID para control descentralizado (Temperatura)

Módulo	Ganancia proporcional K_P	Ganancia integral K_I (1/min)	Ganancia derivativa K_D (min)
Rockwell 1	1.40	1.077	0.336
Rockwell 2	1.45	1.208	0.348

3.2.5.2. Implementación del Control Descentralizado en Siemens

Al igual que con Rockwell, el control descentralizado en el caso de Siemens se realizó utilizando dos controladores PID. Estos controladores son instrucciones en Ladder: PID Compact. En las Figuras 3.16 y 3.17, se muestran los controladores para el proceso de nivel y temperatura, respectivamente.

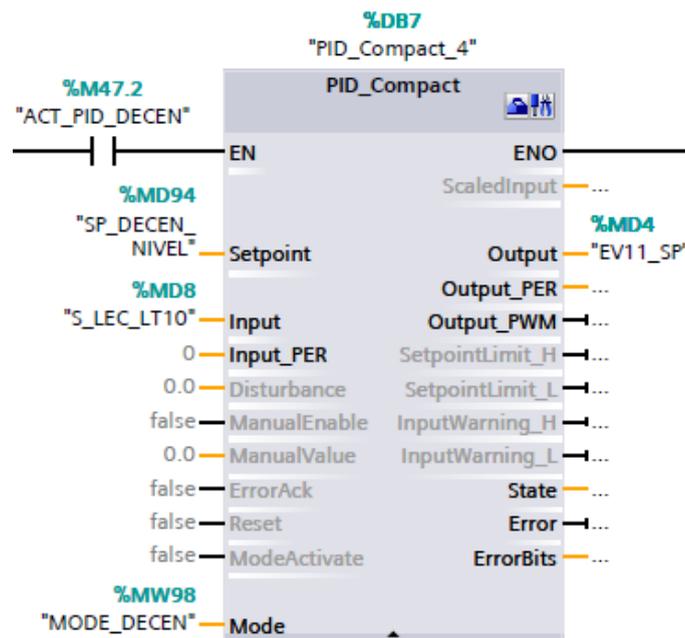


Figura 3.16: Bloque PID Compact del proceso de nivel (Siemens).

La sintonización se realizó primero con el proceso de nivel, para posteriormente utilizando el control de nivel, sintonizar los parámetros del proceso de temperatura.

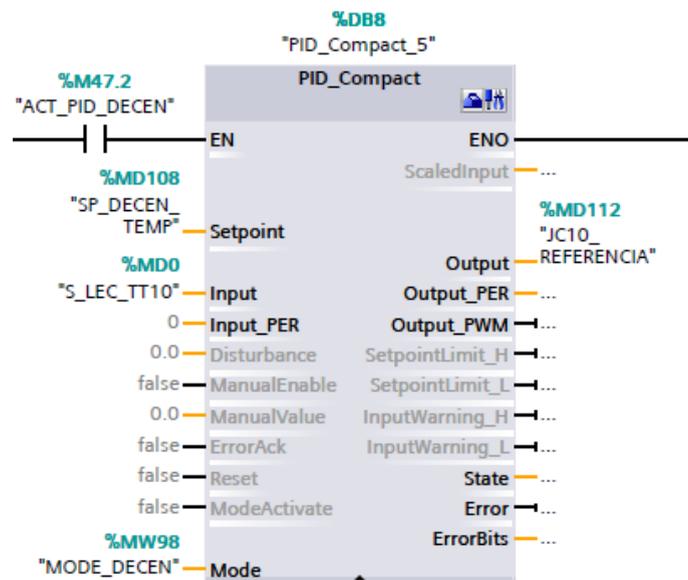


Figura 3.17: Bloque PID Compact del proceso de temperatura (Siemens).

Los parámetros de los controladores PID para los procesos de nivel y temperatura son mostrados en las Tablas 3.11 y 3.12, respectivamente.

Tabla 3.11: Parámetros PID para control descentralizado (Nivel).

Módulo	K_P	T_I (s)	K_D (s)	a	b	c
Siemens	15.83	11.39	2.55	0.1	0.58	0

Tabla 3.12: Parámetros PID para control descentralizado (Temperatura).

Módulo	K_P	T_I (s)	K_D (s)	a	b	c
Siemens	3.83	2.06	0.52	0.1	0.05	0

Capítulo 4

CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA SCADA DEL SCD

Para el monitoreo y supervisión de las estrategias de control explicadas en el Capítulo 3 es necesario el desarrollo de una interfaz gráfica. El desarrollo de la interfaz se realiza mediante el uso de un programa de desarrollo de sistemas SCADA FactoryTalk View Studio. La interfaz debe ser capaz de mostrar las tres plantas industriales del laboratorio. El monitoreo de los equipos de Siemens es posible mediante el uso del servidor OPC, que se desarrolló en el Capítulo 2, el cual posibilita tener las variables del PLC de Siemens en el mismo entorno de desarrollo que los programas de Rockwell.

4.1 Sistema SCADA

Un sistema SCADA, como lo indica sus siglas en inglés (*Supervisory Control And Data Acquisition*), es un sistema que se encarga del monitoreo y supervisión remota de algún proceso que se desarrolle. Este sistema se representa en una aplicación de computadora, la cual recoge información en tiempo de real de los PLCs o servidores que estén configurados al sistema.

4.2 Software de Supervisión

El uso de un software de supervisión es determinante al realizar el SCD donde se utilizan diferentes marcas de PLCs y se implementan diferentes estrategias de control. Esto permite que el usuario pueda ver el desempeño al mismo tiempo de las estrategias de control implementadas en las tres plantas industriales. En el Laboratorio de Automatización de UTEC al tener en el mismo ambiente de desarrollo los programas de Rockwell

con el servidor OPC, se opta por usar el programa de desarrollo de sistemas SCADA de Rockwell: FactoryTalk View Studio.

4.2.1 FactoryTalk View Studio

La plataforma FactoryTalk View Studio además de ser el medio por el cual se desarrollan sistemas SCADA, es capaz de ofrecer distintos servicios al usuario como seguridad mediante la autenticación de usuarios, alarmas y eventos, y diagnóstico de equipos que originan los mensajes de advertencia y errores que puedan ocurrir. La plataforma presenta dos tipos de aplicaciones de sistemas SCADA: FactoryTalk View *Machine edition* (ME) y *Site Edition* (SE). FactoryTalk View ME es la aplicación destinada a realizar un sistema SCADA en paneles de operador o HMI, las cuales están diseñadas para trabajar en entornos industriales. FactoryTalk View SE es la aplicación destinada a ser usada en una computadora y que puede estar conformada por múltiples usuarios en diferentes computadoras y servidores distribuidos en una red.

4.3 Representación Gráfica de las Plantas Industriales

El monitoreo y supervisión de estrategias de control en el SCD se desarrolla al mismo tiempo, para lo cual es necesario representar las tres plantas industriales con su instrumentación en una sola pantalla. La representación de la planta se basa en el P&ID de la planta industrial [14]. Los valores captados por la instrumentación de Siemens será recibida y transportada por el servidor OPC.

En la Figura 4.1 se muestra la interfaz de monitoreo y supervisión de las plantas industriales. En cada planta se estará realizando una estrategia de control. Además, cada uno de ellas disponen de un botón que muestra la tendencia de la variable representativa de la estrategia de control implementada.

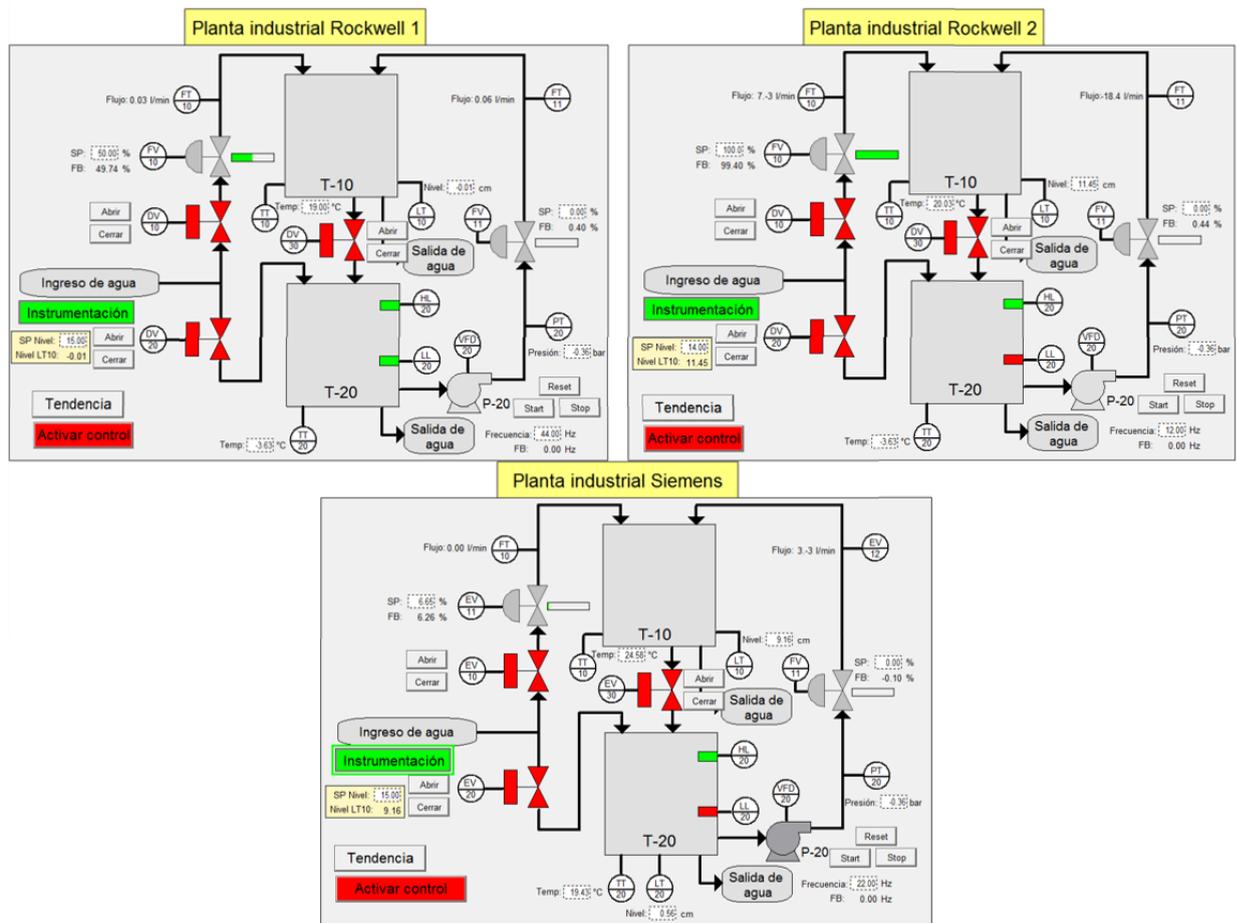


Figura 4.1: Pantalla de supervisión y monitoreo de las plantas industriales.

4.4 Interfaz de monitoreo de Estrategias de Control

El desarrollo de las estrategias de control realizado en el Capítulo 3 y la interfaz desarrollado en FactoryTalk View SE se utilizaron para la implementación en tiempo real en las plantas industriales. La interfaz dispone de entradas numéricas para cambiar las señales de referencia de cada estrategia de control. En la Figura 4.2 se muestra la interfaz de monitoreo que podrá ver el usuario en la computadora al implementar las estrategias de control, desde donde también se puede cambiar la configuración de los gráficos como el tamaño de los ejes, color de las líneas de las señales, etc.



Figura 4.2: Vista de la computadora de monitoreo y supervisión.

Capítulo 5

RESULTADOS DEL SISTEMA DE CONTROL DISTRIBUIDO

Con las interfaces de monitoreo realizadas para las tres estrategias de control, se procede a implementar al mismo tiempo cada estrategia de control en las plantas industriales. Para ello se utilizan los parámetros hallados en el Capítulo 3 para los controladores PID y el procedimiento descrito en el Capítulo 4 antes de activar los controladores. Luego de cada implementación se verá el desempeño que tuvo cada estrategia de control.

5.1 Resultados del Control de la Razón

Para el control de la razón de flujos se utilizó el mismo tiempo de implementación debido a que los gráficos de tendencias registran los datos de las tres plantas industriales. Además, mediante la interfaz gráfica de monitoreo se pudo extraer la información de las variables para posteriormente graficarlas.

5.1.1 Control de la razón en planta industrial Rockwell 1

En la Figura 5.1 se observa el desempeño del control de la razón realizado en la planta industrial Rockwell 1. Esta relación se encuentra en el rango de 0.5 y 0.9. En la Tabla 5.1 se muestra el desempeño del control de la razón donde se miden el porcentaje de sobreimpulso, tiempo de establecimiento y porcentaje de error en estado estable.

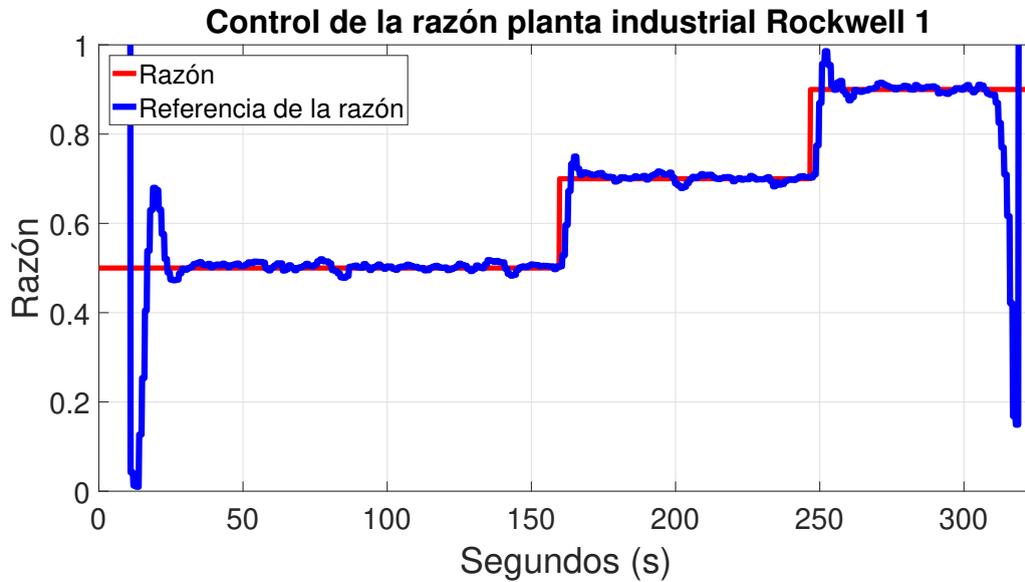


Figura 5.1: Control de la razón de flujos implementado en la planta industrial Rockwell 1.

Tabla 5.1: Desempeño del control de la razón en la planta industrial Rockwell 1.

Referencia (razón)	% sobreimpulso	Tiempo de establecimiento	% error en estado estable
0-0.5	35.9 %	33 s	1.32 %
0.5-0.7	24.85 %	16.8 s	0.36 %
0.7-0.9	42.9 %	18.8 s	0.64 %

5.1.2 Control de la razón en planta industrial Rockwell 2

En la Figura 5.2 se observa el control de la razón implementado en la planta industrial Rockwell 2. El rango de la razón es de 1.9 a 1.7, por lo que el caudal del flujómetro FT11 es mayor. En la Tabla 5.2 se muestra los parámetros del control de la razón. Se aprecia un sobreimpulso cuando la razón disminuye, pero menor a cuando la razón incrementa.

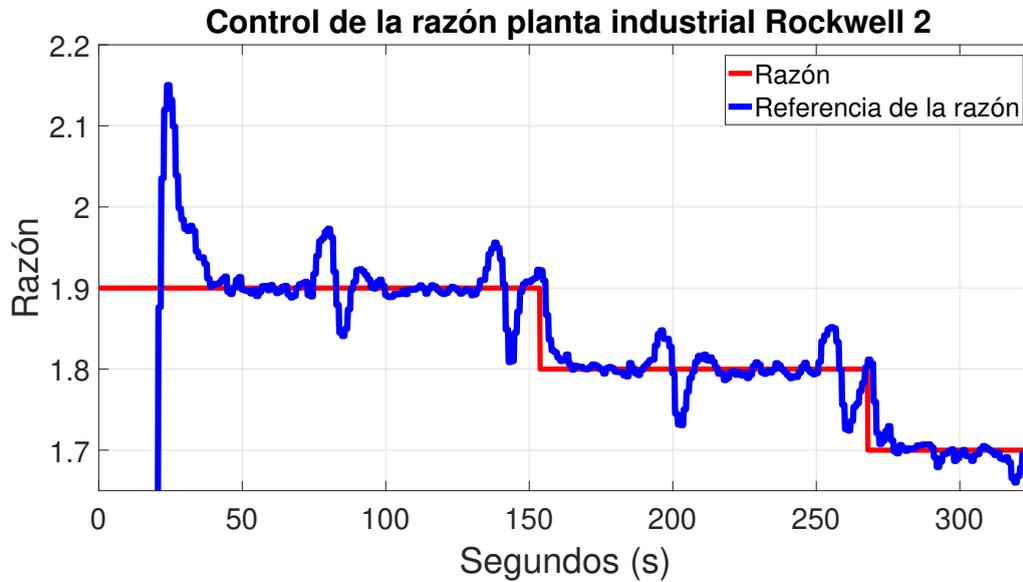


Figura 5.2: Control de la razón de flujos implementado en la planta industrial Rockwell 2.

Tabla 5.2: Desempeño del control de la razón en la planta industrial Rockwell 2.

Referencia (razón)	% sobreimpulso	Tiempo de establecimiento	% error en estado estable
0-1.9	13.16 %	50.2 s	0.16 %
1.9-1.8	9 %	15 s	0.39 %
1.8-1.7	4 %	11 s	0.76 %

5.1.3 Control de la razón en planta industrial Siemens 1

El control de la razón implementado en la planta industrial Siemens 1 se configura con una razón que inicia en 0.5 y termina en 0.7. En la Figura 5.3 se muestra la implementación. El desempeño del control es mostrado en la Tabla 5.3 que presenta un menor porcentaje de sobreimpulso que en las plantas industriales de Rockwell.

5.2 Resultados del Control en Cascada

El monitoreo y supervisión del control en cascada se realizó en cada planta industrial utilizando la interfaz gráfica desarrollada en el Capítulo 4. Para la toma de datos se

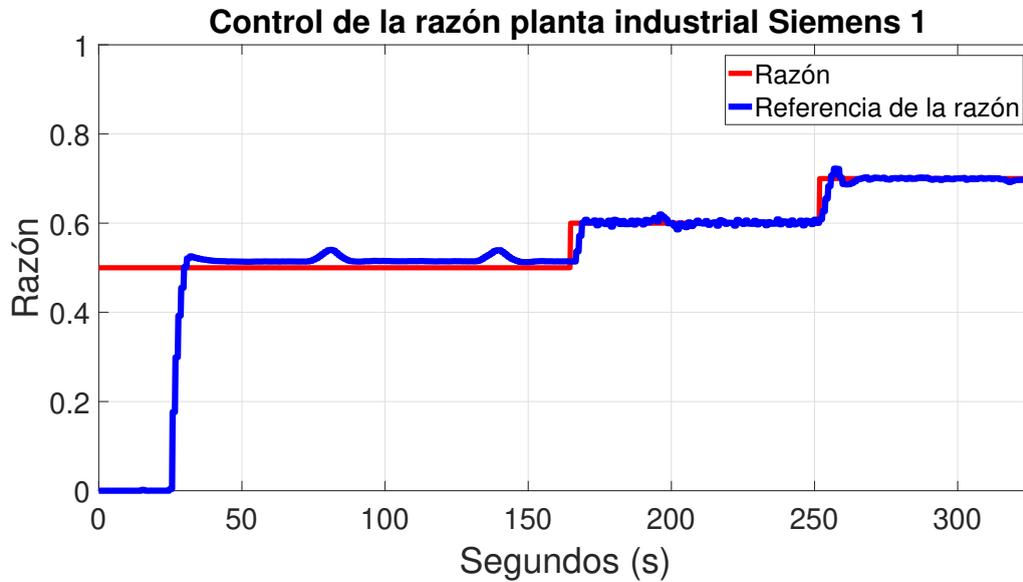


Figura 5.3: Control de la razón de flujos implementado en la planta industrial Siemens 1.

Tabla 5.3: Desempeño del control de la razón en la planta industrial Siemens 1.

Referencia (razón)	% sobreimpulso	Tiempo de establecimiento	% error en estado estable
0-0.5	5.1 %	45 s	2.86 %
0.5-0.6	7.6 %	10.2 s	1 %
0.6-0.7	22.3 %	17.2 s	0.07 %

utilizó un tiempo de 200 ms. Los parámetros del control varían a lo largo de la toma de datos de acuerdo a lo que sea configurado por el usuario.

5.2.1 Control en cascada en planta industrial Rockwell 1

En la Figura 5.4 se muestra el control en cascada realizado en la planta industrial Rockwell 1. El cambio de la referencia de nivel es en orden ascendente, empezando desde 7 hasta 15 cm. En la Tabla 5.4 se muestra el desempeño del controlador en cascada a diferentes incrementos de nivel. El porcentaje de sobreimpulso se mantiene constante. Además, se obtiene un tiempo establecimiento considerable, pero con un error en estado estable casi despreciable.

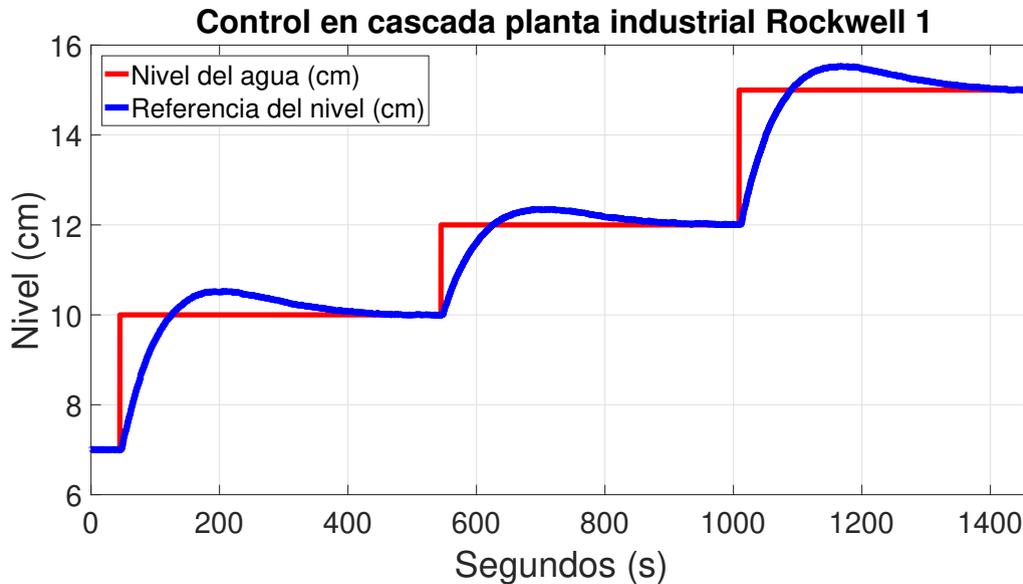


Figura 5.4: Control en cascada implementado en la planta industrial Rockwell 1.

Tabla 5.4: Desempeño del control en cascada en la planta industrial Rockwell 1.

Referencia nivel (cm)	% sobreimpulso	Tiempo de establecimiento	% error en estado estable
7-10	17.3 %	370 s	0.1 %
10-12	17.5 %	324.8 s	0.16 %
12-15	17.6 %	341 s	0.07 %

5.2.2 Control en cascada en planta industrial Rockwell 2

En la planta industrial Rockwell 2 al implementar el control en cascada se obtuvo el resultado de la Figura 5.5. El rango del cambio de referencia de nivel fue de 7 a 15 cm. En la Tabla 5.5 se muestra el desempeño del controlador donde el porcentaje de sobreimpulso se mantuvo constante para un aumento de 2 o 3 cm, el error en estado estable se mantuvo, pero el tiempo de establecimiento logró disminuir.

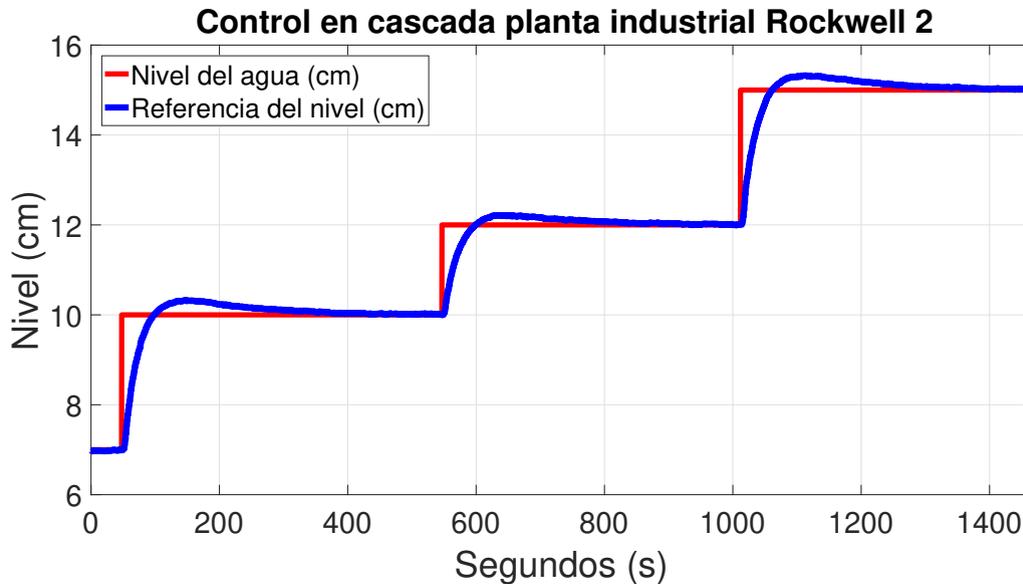


Figura 5.5: Control en cascada implementado en la planta industrial Rockwell 2.

Tabla 5.5: Desempeño del control en cascada en la planta industrial Rockwell 2.

Referencia nivel (cm)	% sobreimpulso	Tiempo de establecimiento	% error en estado estable
7-10	11 %	292.4 s	0.1 %
10-12	11 %	265 s	0.17 %
12-15	11 %	290 s	0.07 %

5.2.3 Control en cascada en planta industrial Siemens 1

En la planta industrial de Siemens 1 se implementó el control en cascada, el cual puede ser visualizado en la Figura 5.6. En el control se utilizó el siguiente rango en la referencia del nivel: 7-15 cm. En la Tabla 5.6, que muestra el desempeño del controlador, se puede apreciar que el porcentaje de sobreimpulso y el tiempo de establecimiento han disminuido en comparación con las implementaciones realizadas en las plantas industriales de Rockwell.



Figura 5.6: Control en cascada implementado en la planta industrial Siemens 1.

Tabla 5.6: Desempeño del control en cascada en la planta industrial Siemens 1.

Referencia nivel (cm)	% sobreimpulso	Tiempo de establecimiento	% error en estado estable
7-10	10.7 %	64.2 s	0.1 %
10-12	11.5 %	52.6 s	0.08 %
12-15	10 %	55.4 s	0.13 %

5.3 Resultados del Control Descentralizado

En el control descentralizado se manipulan las variables de nivel y temperatura. Para lo cual es necesario que primero se controle el nivel y luego poder controlar la temperatura del agua al interior del tanque superior de las plantas industriales. El tiempo para cada toma de datos de los gráficos de tendencias se mantuvo en 200 ms y se utilizaron los mismos cambios de referencia en nivel y temperatura para las tres plantas industriales.

5.3.1 Control descentralizado en planta industrial Rockwell 1

En la Figura 5.7 se muestra el desempeño del control de nivel y temperatura en la planta industrial Rockwell 1. El rango de referencia de nivel utilizado fue desde 7 hasta 14 cm. En el caso de la temperatura, el rango utilizado fue de 21 hasta 28 °C. En las Tablas 5.7 y 5.8 se muestra el desempeño del control de nivel y temperatura, respectivamente. El control de nivel presenta un error casi despreciable al igual que el control en cascada de nivel realizado. En el caso de la temperatura se puede observar que el error es casi despreciable, pero presenta un tiempo de establecimiento muy alto.

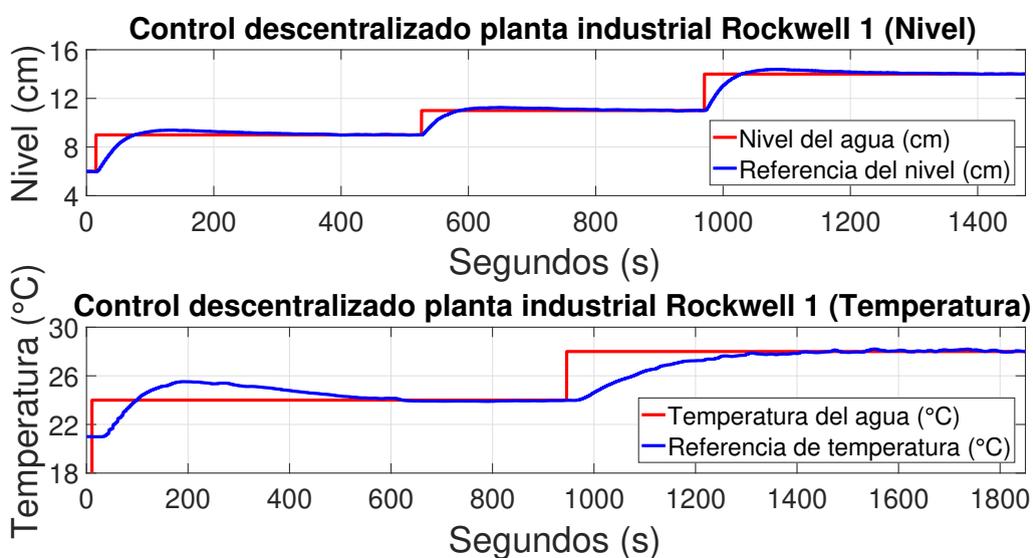


Figura 5.7: Control descentralizado implementado en la planta industrial Rockwell 1.

Tabla 5.7: Desempeño del control descentralizado (nivel) en la planta industrial Rockwell 1.

Referencia nivel (cm)	% sobreimpulso	Tiempo de establecimiento	% error en estado estable
6-9	13 %	228.4 s	0.04 %
9-11	12.5 %	201.8 s	0.09 %
11-14	13.3 %	211 s	0.07 %

Tabla 5.8: Desempeño del control descentralizado (temperatura) en la planta industrial Rockwell 1.

Referencia temperatura (°C)	% sobreimpulso	Tiempo de establecimiento	% error en estado estable
21-24	50.67 %	605.4 s	0.21 %
24-28	5.25 %	460.8 s	0.11 %

5.3.2 Control descentralizado en planta industrial Rockwell 2

En la planta industrial Rockwell 2 al implementar el control descentralizado se obtuvo la gráfica mostrada en la Figura 5.8. Conservando las referencias de nivel (6-14 cm) y temperatura (21-28 °C) utilizadas en la primera planta industrial de Rockwell. En la Tabla 5.9 se muestra el desempeño del control de nivel, obteniéndose un error casi nulo. En el caso de la temperatura se mantiene el porcentaje de error en estado estable casi despreciable con el tiempo de establecimiento demasiado alto.

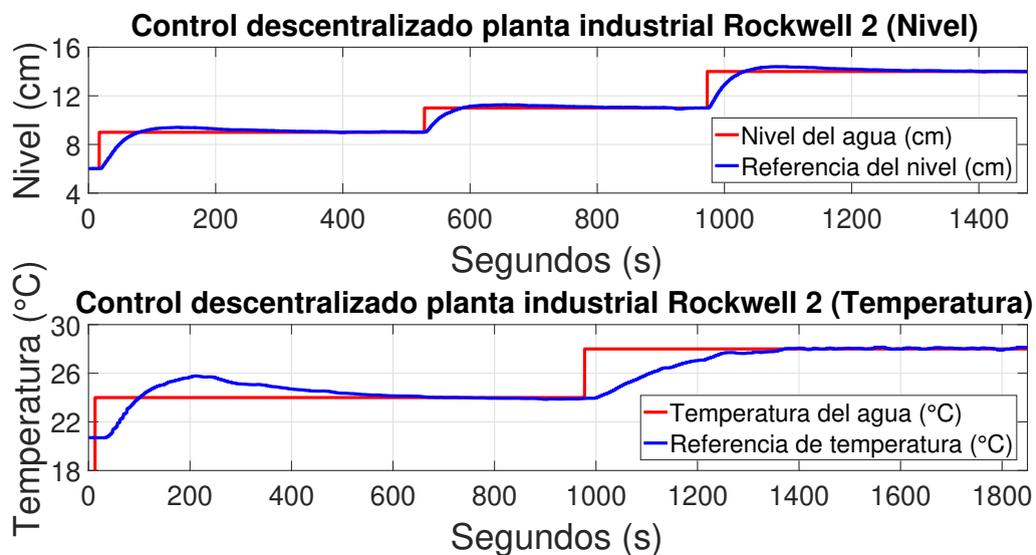


Figura 5.8: Control descentralizado implementado en la planta industrial Rockwell 2.

Tabla 5.9: Desempeño del control descentralizado (nivel) en la planta industrial Rockwell 2.

Referencia nivel (cm)	% sobreimpulso	Tiempo de establecimiento	% error en estado estable
6-9	13.4 %	206.8 s	0.04 %
9-11	14 %	186.6 s	0.09 %
11-14	13.3 %	228 s	0.07 %

Tabla 5.10: Desempeño del control descentralizado (temperatura) en la planta industrial Rockwell 2.

Referencia temperatura (°C)	% sobreimpulso	Tiempo de establecimiento	% error en estado estable
21-24	59.33 %	654.2 s	0.46 %
24-28	3.75 %	389.4 s	0.46 %

5.3.3 Control descentralizado en planta industrial Siemens 1

El control de nivel y temperatura implementado en la planta industrial Siemens 1 se muestra en la Figura 5.9. El cambio de referencia de nivel y temperatura es el mismo que se utilizó en las plantas industriales de Rockwell. En la Tabla 5.11 se muestra el desempeño del control de nivel donde se muestra un mayor porcentaje de sobreimpulso y un menor tiempo de establecimiento que en los controladores implementados en las plantas de Rockwell. En el caso del desempeño del control de temperatura mostrado en la Tabla 5.12 se puede observar que la respuesta es más rápida que en las plantas industriales de Rockwell con un error similar.

5.4 Control Distribuido

Al haber implementado las tres estrategias de control en las plantas industriales, es posible implementar cualquier estrategia en cada una de ellas. Esto puede ser supervisado

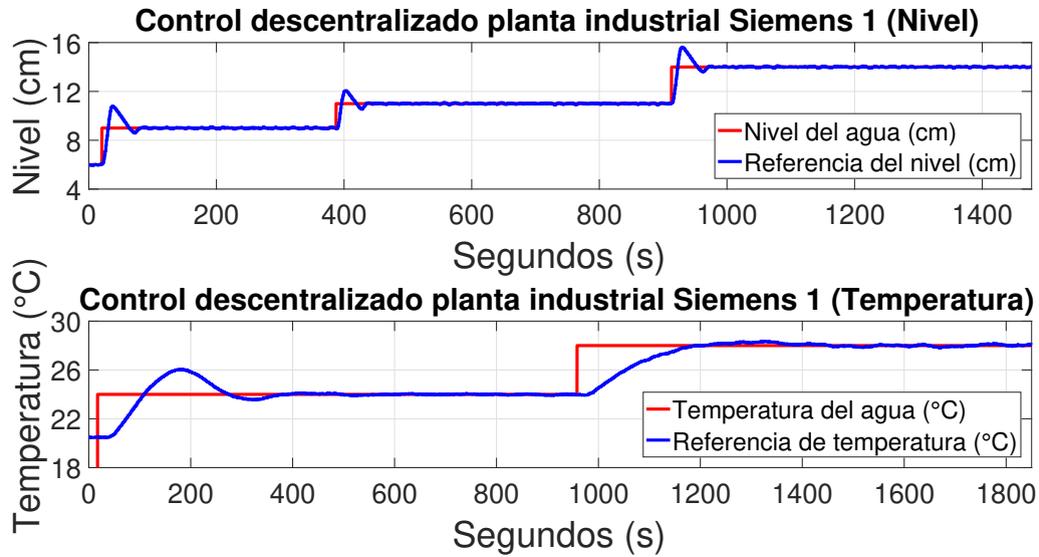


Figura 5.9: Control descentralizado implementado en la planta industrial Siemens 1.

Tabla 5.11: Desempeño del control descentralizado (nivel) en la planta industrial Siemens 1.

Referencia nivel (cm)	% sobreimpulso	Tiempo de establecimiento	% error en estado estable
6-9	58.3 %	55.8 s	0.02 %
9-11	53 %	44.6 s	0.09 %
11-14	54 %	54.4 s	0.07 %

Tabla 5.12: Desempeño del control descentralizado (temperatura) en la planta industrial Siemens 1.

Referencia temperatura (°C)	% sobreimpulso	Tiempo de establecimiento	% error en estado estable
21-24	68.67 %	356.6 s	0.04 %
24-28	8 %	399.8 s	0.07 %

también mediante el uso de la interfaz gráfica desarrollada y que pueda ser visualizada al mismo tiempo.

Por lo que se opta por utilizar una estrategia de control diferente a cada planta. En la planta industrial de Rockwell 1 se implementó control de la razón; en la planta

industrial Rockwell 2, control en cascada, y en la planta industrial Siemens 1, control descentralizado.

En la Figura 5.10 se realizó el control de la razón utilizando diferentes valores para la relación entre los caudales de FT11 y FT10. La realimentación del agua del tanque superior al tanque inferior permitió que el control pueda realizarse por más tiempo.



Figura 5.10: Control de la razón implementado en la planta industrial Rockwell 1.

En la planta industrial de Rockwell 2 se implementó el control en cascada (Figura 5.11) donde de igual manera se utiliza una referencia de nivel en orden ascendente. El tiempo de implementación es el mismo que el utilizado en el control de la razón en la planta industrial Rockwell 1.

El control descentralizado se implementa en la planta industrial de Siemens al tener un controlador con un mejor desempeño en el control de la temperatura del agua en el tanque superior. Para ello primero se realizó el control de nivel y recién cuando se dispone de un nivel de 9 cm, se activa el control de temperatura, el cual tuvo un rango de 20 hasta 25 °C.

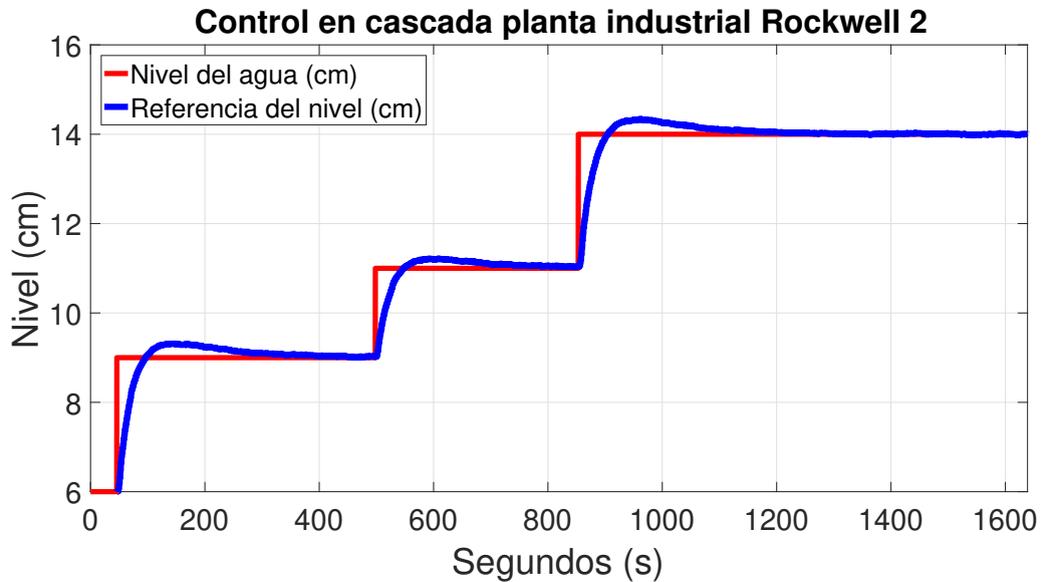


Figura 5.11: Control en cascada implementado en la planta industrial Rockwell 2.

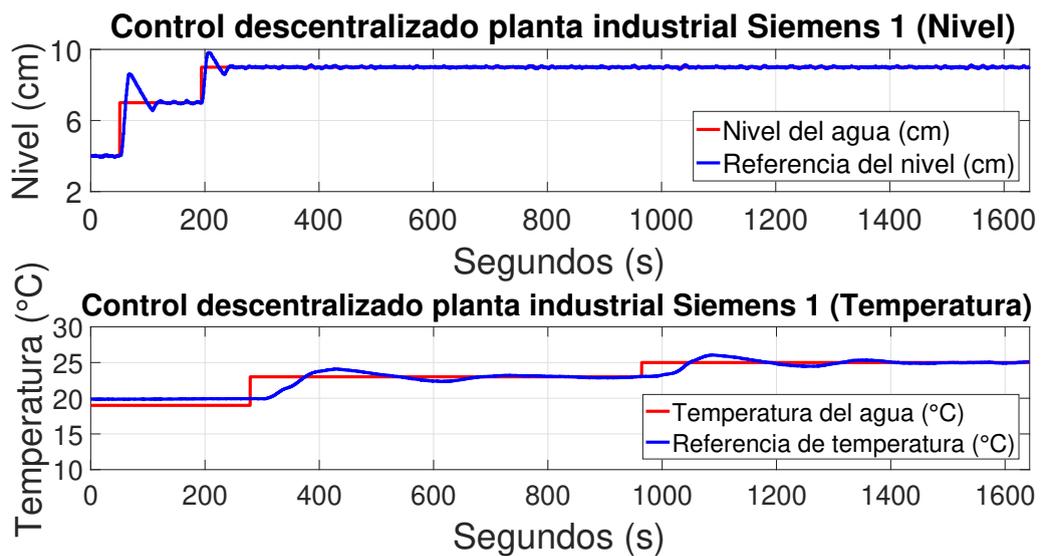


Figura 5.12: Control descentralizado implementado en la planta industrial Siemens 1.

5.5 Comparación de la Adquisición de Datos de los Equipos de Siemens

En el SCD implementado se utiliza el programa FactoryTalk View Studio (FTV) para poder capturar la data de la señal que se este supervisando. Esto también se aplica a las variables que provienen de los equipos de Siemens. Otra forma de adquirir los datos

de las señales de Siemens es usando su programa de desarrollo, TIA Portal. Por lo que se verifica el funcionamiento del SCD midiendo el error entre las variables supervisadas de cada estrategia de control, haciendo uso de la interfaz gráfica del SCD y una tendencia realizada en un programa de TIA Portal. Se realiza una secuencia para que pueda iniciar la toma de datos al mismo tiempo y se utiliza el mismo tiempo de muestreo: 200 ms.

5.5.1 Control de la Razón en FTV y TIA Portal

Para el control de la razón implementado en la planta industrial de Siemens, se utiliza el mismo incremento de la razón de flujos que en el monitoreo del mismo control en las tres plantas industriales. En la Figura 5.13 se muestra la implementación del control de la razón captada desde FactoryTalk View Studio, usando la interfaz gráfica del SCD, y desde TIA Portal.

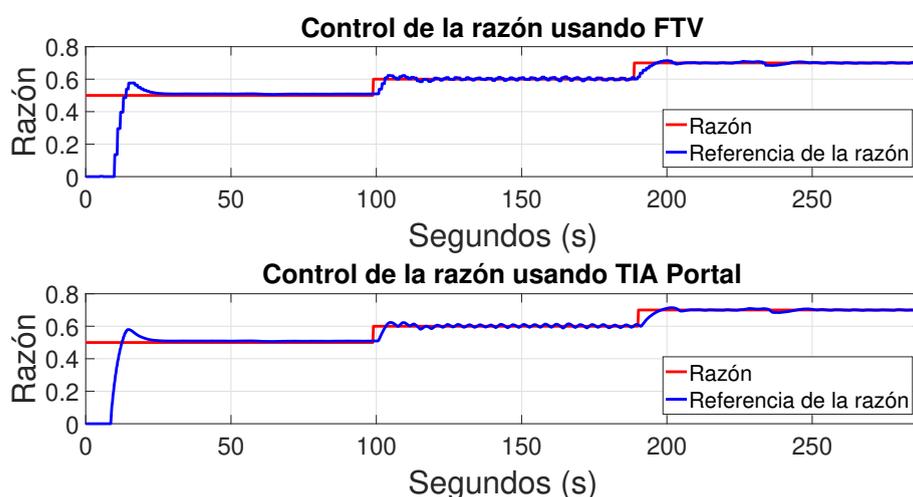


Figura 5.13: Adquisición de datos del control de la razón desde FTV y TIA Portal.

A simple vista parece que las dos gráficas son iguales, pero si se calcula el valor absoluto del error, se obtiene la gráfica de la Figura 5.14. El error máximo que se observa no sobrepasa 0.25 y posee un error promedio de 0.01.

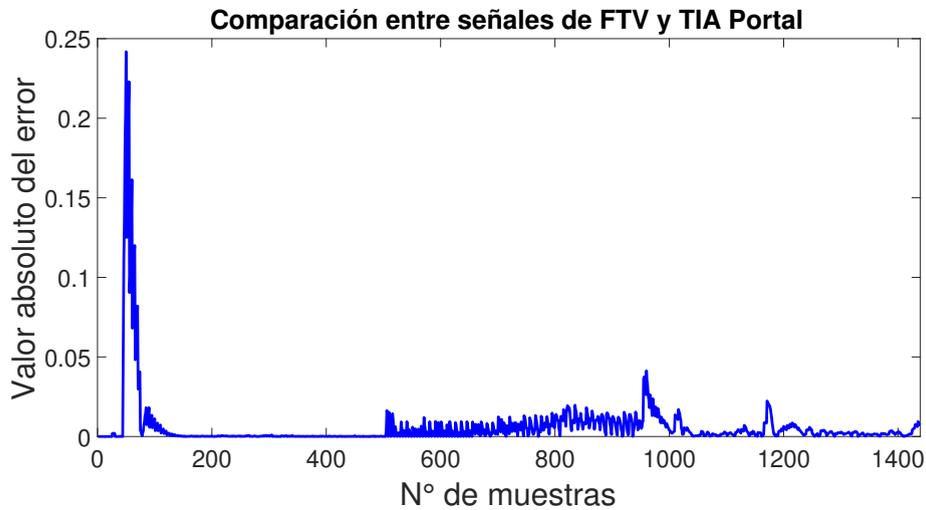


Figura 5.14: Valor absoluto del error de la adquisición de datos del control de la razón.

5.5.2 Control en Cascada en FTV y TIA Portal

En el control en cascada también se utilizó la misma referencia ascendente de nivel utilizada en el monitoreo del control en cascada de las tres plantas industriales. En la Figura 5.15 se muestra la captura de datos del control en cascada utilizando la interfaz gráfica, que utiliza FactoryTalk, y el programa de desarrollo, TIA Portal.

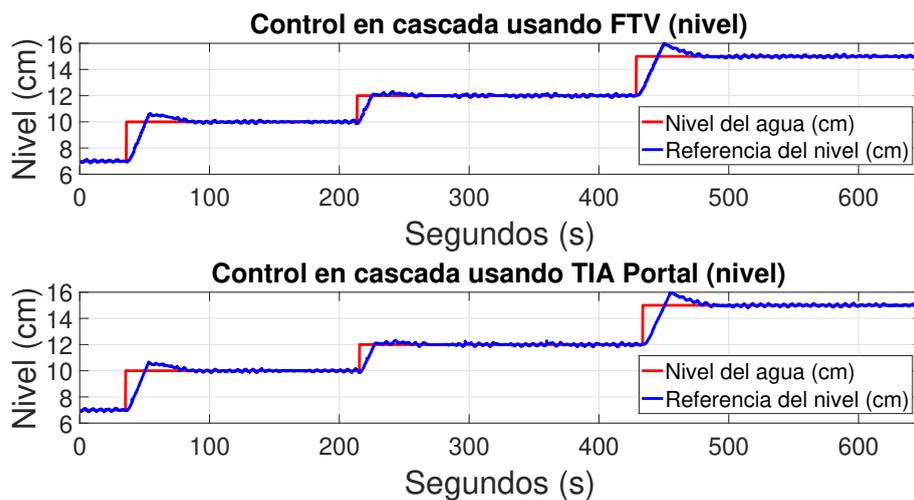


Figura 5.15: Adquisición de datos del control en cascada desde FTV y TIA Portal.

La diferencia entre las dos gráficas se puede apreciar en la Figura 5.16. En esa Figura se presenta el valor absoluto del error entre las dos gráficas presentadas en la Figura 5.15. El error máximo que presenta es de 1.2 cm y el error promedio de 0.11 cm.

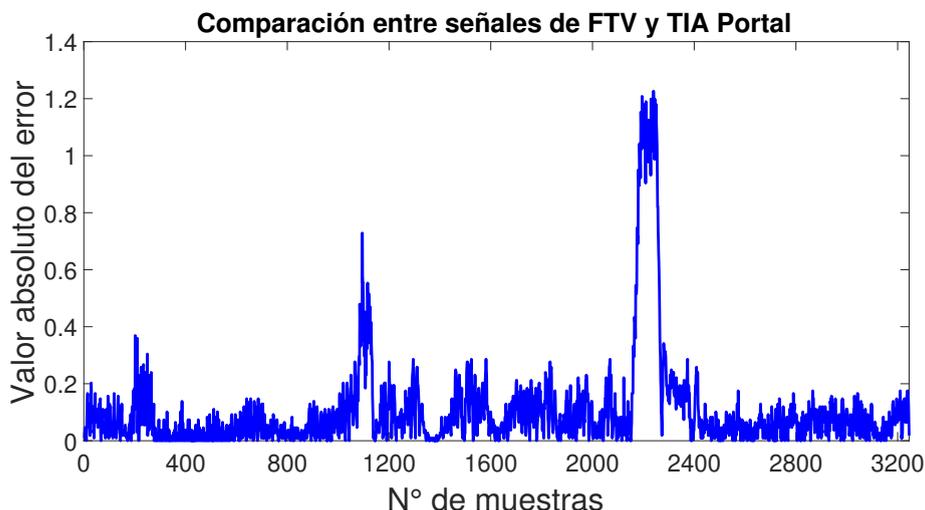


Figura 5.16: Valor absoluto del error de la adquisición de datos del control en cascada.

5.5.3 Control Descentralizado en FTV y TIA Portal

En el control descentralizado se hace uso de dos controladores, uno para controlar el nivel y otro para la temperatura del agua en el tanque superior. Ambos controles utilizan el mismo cambio de referencia que en el monitoreo realizado en las plantas industriales.

En la Figura 5.17 se muestra el control de nivel captado desde FTV y TIA Portal. Ambos configurados a 200 ms como tiempo de muestreo. La señal de referencia y de nivel parecen similares, pero esto no es así.

En la Figura 5.18 se observa el error calculado del nivel de las gráficas de la Figura 5.17. El error máximo que presenta es de 1.5 cm y posee un error promedio de 0.10 cm. Este valor máximo solo se presenta en un rango determinado de valores, por lo que no afecta el promedio general.

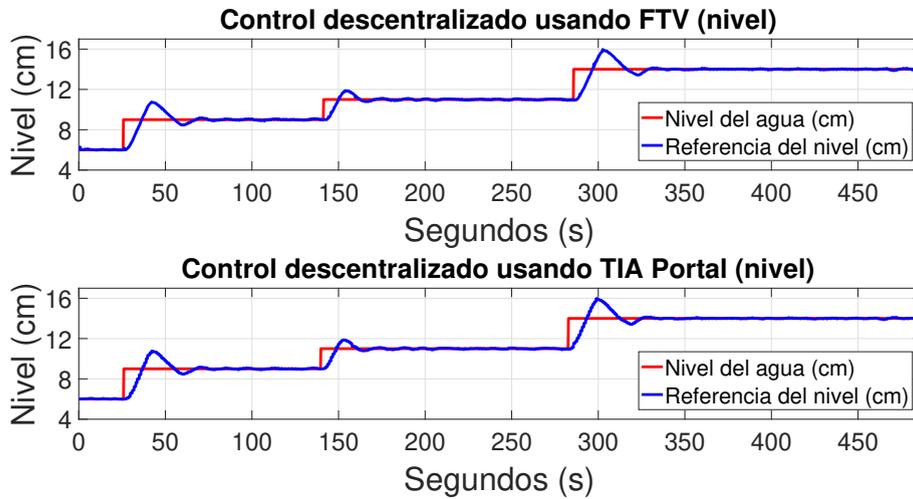


Figura 5.17: Adquisición de datos del control descentralizado (nivel) desde FTV y TIA Portal.

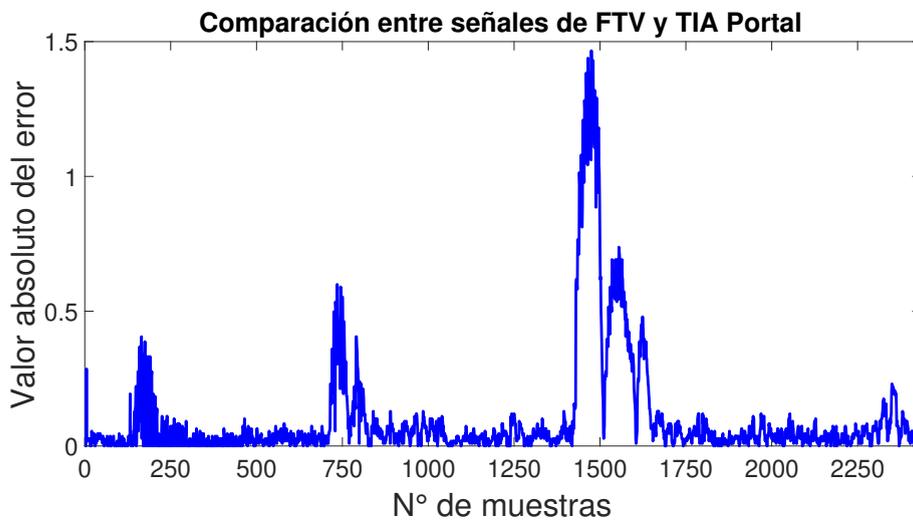


Figura 5.18: Valor absoluto del error de la adquisición de datos del control descentralizado (nivel).

En el caso del control de temperatura se obtiene las gráficas de la Figura 5.19. En este caso se utiliza un incremento de la referencia de temperatura de 21 a 27 °C. El rango del cambio de temperatura se realizó para verificar la captura de data desde FTV y TIA Portal.

Para notar la diferencia de las gráficas captadas desde los dos programas, se calcula el error entre las señales de temperatura. Esto justamente se observa en la Figura 5.20 donde presenta un error con valor máximo de 0.3 °C y un error promedio de 0.05 °C.

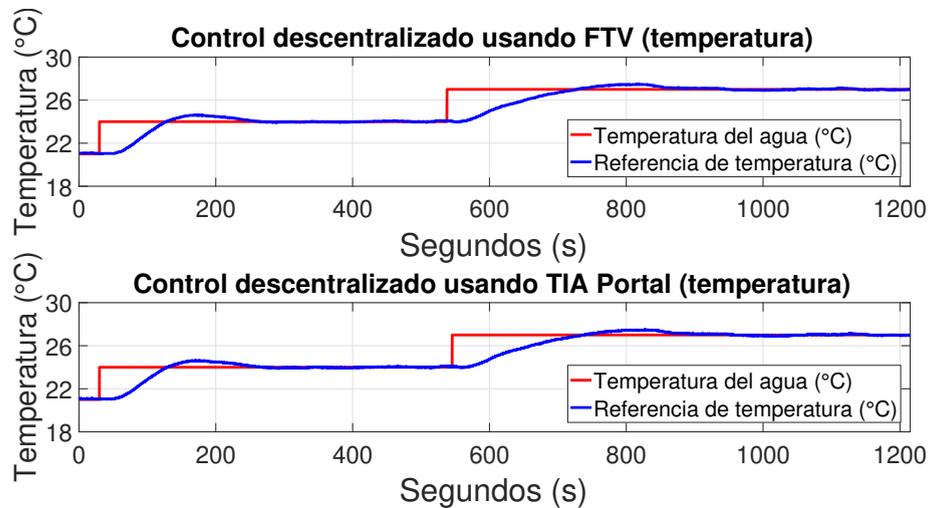


Figura 5.19: Adquisición de datos del control descentralizado (temperatura) desde FTV y TIA Portal.

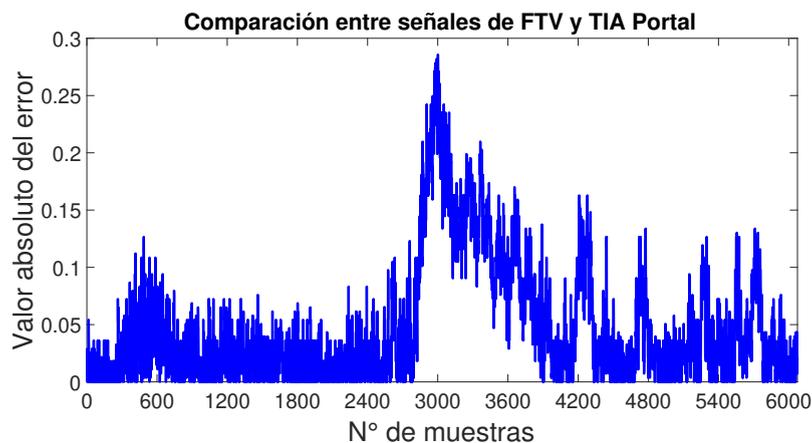


Figura 5.20: Valor absoluto del error de la adquisición de datos del control descentralizado (temperatura).

En todas las estrategias de control implementadas en las plantas industriales no se presenta un error considerable al utilizar FactoryTalk View Studio como interfaz gráfica del SCD, al utilizar las variables almacenadas en los PLC de Siemens. En la adquisición de datos del nivel en el control descentralizado se observó el error máximo, pero que solo se presenta en un rango de captura de datos que no afecta a la totalidad de la muestra. Estos errores se presentan por el retraso de la captura de datos por parte de FactoryTalk al tener que esperar el envío de datos desde el servidor OPC.

CONCLUSIONES

El presente trabajo de tesis realiza la implementación de un SCD utilizando los equipos de control de procesos del laboratorio de automatización de UTEC, mediante el cual se pudo implementar diversas estrategias de control como control de la razón, control en cascada y control descentralizado. El SCD permitió el monitoreo y supervisión de equipamiento de las marcas de Rockwell y Siemens. Esto último utilizando la infraestructura actual del laboratorio y con una sola computadora de supervisión.

El diseño del SCD se realizó tomando en consideración los equipos de diferentes fabricantes del laboratorio. Los dispositivos que se usan del módulo de supervisión de cada equipo de control de procesos se eligieron en base a la instrumentación de la planta y que posteriormente se utilizaron para el desarrollo de las estrategias de control. La topología física utilizada fue del tipo estrella y el protocolo de comunicación utilizado para los equipos de Rockwell fue Ethernet/IP y para los equipos de Siemens se utilizó Profinet.

Se realizó la arquitectura de red por software de cada equipo de control de procesos, el cual es la base del SCD implementado ya que permite la interacción de los equipos con la instrumentación de la planta industrial. Es mediante los programas Studio 5000 y TIA Portal que se desarrollaron las configuraciones de los equipos, los escalamientos de las entradas y salidas analógicas, configuración de IPs, etc. Posteriormente, se crearon las variables correspondientes a los instrumentos que se encuentran conectados a los PLCs y periferia descentralizada, además de variables temporales que ayudaron al monitoreo del proceso que se desarrolle en la planta industrial.

La integración vertical entre estos equipos se realizó por medio del uso del servidor OPC, KEPServer Enterprise. Este último permitió acceder a la memoria del PLC de Siemens para lo cual se activaron los permisos en la configuración del PLC. Por lo que mediante el servidor OPC se pudo leer y modificar las variables alojadas en el PLC de Siemens en el mismo ambiente operacional donde se encuentran los programas de Rockwell.

La configuración de las estrategias de control se realizó mediante los programas de desarrollo propio de cada fabricante. Para ello se utilizaron los bloques de controladores PID que estos programan disponen en diferentes lenguajes de programación. Es mediante el uso de ellos y un proceso de sintonización que se halló los parámetros de cada controlador PID. En el caso del control de la razón se halló los parámetros que permitían que la razón de los dos flujos de agua de entrada al tanque superior permaneciera constante. Para el control en cascada se halló los parámetros para los procesos de nivel y flujo de agua en el mismo tanque, y en el caso del control descentralizado se halló los parámetros que permiten controlar el nivel y la temperatura del agua en el tanque superior.

La interfaz gráfica se realizó mediante el uso del programa de desarrollo de sistemas SCADA de Rockwell, FactoryTalk View Studio. En este último, utilizando la versión *Site Edition* permitió utilizar una computadora como operador central de supervisión. La instrumentación que se encuentra en las plantas industriales se controló mediante el uso de la interfaz gráfica. La representación gráfica que se muestra en la interfaz está basada en los diagramas P&ID de las plantas industriales. Además, es mediante esta interfaz que se realiza el cambio de la señal de referencia de las estrategias implementadas en las plantas industriales.

Mediante el uso del SCD se realizó la implementación simultánea de las tres estrategias de control. Logrando controlar todas las variables físicas de las estrategias con un error casi despreciable inclusive en la temperatura del control descentralizado.

El uso de FactoryTalk View Studio como interfaz gráfica del SCD no afectó a la adquisición de datos de las variables del PLC de Siemens. Estas variables que son captadas y trasladadas por el servidor OPC, a la hora de implementar las estrategias de control, tuvieron un error máximo de 1.5 cm, en el caso del control de nivel, pero con un error promedio que no sobrepasó de 0.11 cm. Lo mismo ocurrió en el proceso de temperatura del control descentralizado donde el error máximo fue de 0.3 °C y un error promedio de 0.05 °C. Esto último se explica debido a que el proceso de nivel es un proceso más rápido que el de temperatura en la planta industrial del laboratorio. El error que se presenta es debido al retraso que aporta el uso del servidor OPC en la adquisición de datos, pero que no afecta en el desarrollo de la implementación de la estrategia de control. La comparación se realizó entre FTV y el programa de desarrollo de Siemens, TIA Portal.

RECOMENDACIONES

Para la implementación del SCD se utilizó los PLCs de Rockwell y Siemens disponibles en el Laboratorio de UTEC. Sin embargo, el uso del servidor OPC permite poder trabajar con otras marcas de PLC, no solo empleando topologías tipo estrella sino otras. Además los switches permitan la adición de más equipos de campo.

La interfaz gráfica desarrollada permite modificar la señal de referencia de la variable física que se quiere implementar. Una manera de tener un mejor control sobre el proceso sería la capacidad de poder modificar los parámetros de los controladores PID con el fin de ver el desempeño de estos si se modifican. Además, las implementaciones que se desarrollan en las plantas industriales son procesos que involucra el uso del agua. Esto puede expandirse a procesos donde se controle la posición o velocidad de motores, etc.

En las estrategias de control se utilizó controladores PID, los cuales son módulos disponibles en los programas de desarrollo de Rockwell y Siemens. Sin embargo, los equipos de Rockwell y Siemens poseen otras estrategias de control u otros algoritmos de control tales como control difuso, control predictivo que también pueden emplearse. Además, se pueden emplear los bloques de control de orden fraccionario y control predictivo desarrollados en las tesis [19] y [14], respectivamente.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A. Hulewicz, Z. Krawiecki, and K. Dziarski, “Distributed control system dcs using a plc controller,” *ITM Web of Conferences*, vol. 28, p. 01041, 01 2019.
- [2] I. Castillo and T. Edgar, “Using a distributed control system (dcs) for distillation column control in an undergraduate unit operations laboratory,” in *2009 American Control Conference*, 07 2009, pp. 2744 – 2748.
- [3] M. Prabhavathy, B. Ramesh, and T. Kalpalatha Reddy, “An alternative distributed control using labview,” in *2014 International Conference on Computation of Power, Energy, Information and Communication (ICCPEIC)*, 2014, pp. 174–180.
- [4] G. Kolmare, P. Bhase, and A. Deshpande, “Development of control system for an acid solution formation plant using dcs,” in *2016 International Conference on Computing, Communication and Automation (ICCCA)*, 2016, pp. 977–981.
- [5] Y. Li, K. Yu, B. Zhu, R. Han, Y. Li, and J. Wang, “Process automation system development of lyocell staple fiber plant based on plantpax,” in *5th International Conference on Advanced Design and Manufacturing Engineering (ICADME 2015)*, 01 2015.
- [6] R. Automation, Ed., *Rockwell Automation Library of Process Objects*. Rockwell Automation, 2019.

- [7] Tundong Liu, Gangquan Cai, and X. Peng, “Opc server software design in dcs,” in *2009 4th International Conference on Computer Science Education*, 2009, pp. 456–458.
- [8] P. Somkane, V. Kongratana, S. Gulpanich, V. Tipsuwanporn, and N. Wongvanich, “A study of flow-level cascade control with wirelessharttm transmitter using labview,” in *2017 17th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS)*, 2017, pp. 856–861.
- [9] Yixin Zhao, Feng Liu, Wei Huang, Qian Qi, Qiaoli Huang, Qiang He, and Anke Qi, “City natural gas storage station control system based on opc server,” in *2008 2nd International Symposium on Systems and Control in Aerospace and Astronautics*, 2008, pp. 1–6.
- [10] K. N. Bagal, C. B. Kadu, B. J. Parvat, and P. S. Vikhe, “Plc based real time process control using scada and matlab,” in *2018 Fourth International Conference on Computing Communication Control and Automation (ICCUBEA)*, 2018, pp. 1–5.
- [11] E. Diaconescu and C. Spirleanu, “Communication solution for industrial control applications with multi-agents using opc servers,” in *2012 International Conference on Applied and Theoretical Electricity, ICATE 2012 - Proceedings*, 10 2012.
- [12] A. Rojas, L. Castillo, and V. Murray, “Módulo industrial multipropósito para control y supervisión,” Peru Patent 522-2017 DIN, Mar. 28, 2017.
- [13] ———, “Planta industrial multipropósito para control e instrumentación,” Peru Patent 523-2017 DIN, Mar. 28, 2017.
- [14] G. Pérez, “Diseño e implementación de bloques de control predictivo basado en modelos para procesos industriales de la planta multipropósito,” trabajo de fin de grado, UTEC, 2020.
- [15] A. Rojas, *Control de Procesos Práctico y avanzado*, 1st ed. EDUNI, 2012.

- [16] J. Jiménez-Builes, A. Cano, and J.-A. Hernández-Riveros, "Tuning multivariable optimal pid controller for a continuous stirred tank reactor using an evolutionary algorithm," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 16, 03 2018.
- [17] R. Automation, Ed., *Logix 5000 Advanced Process Control and Drives Instructions*. Rockwell Automation, 2020.
- [18] Siemens, Ed., *Regulación PID*. Siemens, 2019.
- [19] C. Cuevas, "Diseño e implementación de bloques de control de orden fraccionario para una planta multipropósito industrial," trabajo de fin de grado, UTEC, 2020.

Anexo

ANEXO: Configuración de los Equipos y del KEPServer Enterprise

Para saber más de los programas de desarrollo de Rockwell como RSLinx Classic y Studio 5000, es necesario revisar la guía, que explica cómo crear un proyecto en Studio 5000 y cómo los equipos del módulo industrial de Rockwell son configurados, la cual se encuentra como Anexo A en el siguiente enlace: https://github.com/steayca/Tesis_Ayala.git.

El entorno de desarrollo, el procedimiento para crear un programa en TIA Portal y cómo están estructurados los equipos del módulo industrial de Siemens, se pueden encontrar en la guía (Anexo B) cuyo enlace es: https://github.com/steayca/Tesis_Ayala.git.

La configuración del servidor OPC (KEPServerEnterprise) y el procedimiento detallado para leer o cambiar una variable del PLC S7-1500 desde el mismo servidor OPC, se encuentran como Anexo C en el siguiente enlace: https://github.com/steayca/Tesis_Ayala.git.