

UNIVERSIDAD DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA



**DISEÑO DE UN CONTROL INALÁMBRICO DEL
NIVEL Y DE LA TEMPERATURA PARA EL
PROCESO TANQUE CON AGUA**


TESIS

Para optar el título profesional de Ingeniero Electrónico

AUTOR:

Jaime Wilson Malpica Aguilar 

ASESOR

Arturo Rojas Moreno 

Lima - Perú

2021

Dedicatoria:

Con mucho aprecio y estima a todo el apoyo y soporte que he recibido de mis padres, familia, amigos, tutores y profesores que siempre confiaron en mí y me dieron de sus consejos y conocimiento. Por ustedes y para todos ustedes es este logro y sueño cumplido.

Agradecimientos:

Le agradezco a Dios por haberme dado las oportunidades y medios, por ponerme en situaciones idóneas y al lado de buenas personas para obtener este logro.

Le agradezco a mis padres, quienes fueron la mayor fuente de apoyo para hacer esto posible, quienes siempre confiaron en mí y me guiaron durante todo mi camino.

Le agradezco a mis demás familiares, amigos, profesores, jefes y todas las personas que sumaron en mi formación en cada paso.

Finalmente, agradezco a mi asesor, el Dr. Arturo Rojas Moreno por su continuo apoyo en mi formación profesional a lo largo de la carrera.

Índice general

	Pág.
RESUMEN	1
ABSTRACT	2
CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN	3
1.1 Formulación de problema	4
1.2 Antecedentes	5
1.3 Alcance y limitaciones	8
1.4 Organización de la tesis	9
CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO	11
2.1 Control cableado	11
2.2 Control inalámbrico	13
2.3 Planta industrial multipropósito para control e instrumentación	19
2.4 Instrumentación requerida	25
CAPÍTULO 3 MODELOS EXPERIMENTALES DE LOS PROCESOS	28
3.1 Proceso de nivel	29
3.2 Proceso de temperatura	32
CAPÍTULO 4 DISEÑO DE LOS SISTEMAS DE CONTROL PID	35
4.1 Control PID del nivel con parámetros de MATLAB	36
4.2 Control PID del nivel con parámetros de TIA PORTAL	38

4.3	Control PI del nivel con parámetros de TIA PORTAL	40
4.4	Control PID del proceso de temperatura	42
CAPÍTULO 5 IMPLEMENTACIÓN DE LOS SISTEMAS DE CONTROL		44
5.1	Control cableado del nivel	45
5.2	Control cableado de la temperatura	47
5.3	Creación de subred para comunicación inalámbrica	48
5.4	Control inalámbrico del nivel	53
5.5	Control inalámbrico de la temperatura	55
CAPÍTULO 6 COMPARACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS		57
6.1	Control en tiempo real del nivel	57
6.2	Control en tiempo real de la Temperatura	62
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		64
ANEXOS		68

Índice de tablas

2.1	Escalamiento de instrumentos analógicos	25
2.2	Escalamiento de instrumentos digitales	25
4.1	Parámetros de controlador PID para el proceso de Nivel (MATLAB) . . .	36
4.2	Parámetros de controlador PID para el proceso de Nivel (TIA PORTAL) .	38
4.3	Parámetros de controlador PID para el proceso de Nivel (TIA PORTAL) .	40
4.4	Parámetros de controlador PID para el proceso de Temperatura	42
5.1	Direcciones IP de los equipos	49
6.1	Resultados del control PID para el nivel (Parámetros de MATLAB)	58
6.2	Resultados del control PID para el nivel (Parámetros de TIA PORTAL) . .	60
6.3	Resultados del control PI para el nivel (Parámetros de TIA PORTAL) . . .	61
6.4	Resultados del control PID para la temperatura (Parámetros de MATLAB)	63

Índice de figuras

1.1	Tecnologías Cisco y Siemens actuales para redes de comunicación inalámbrica (Cisco Catalyst / Punto de acceso Siemens SCALANCE) [10]	7
2.1	Diagrama de bloques general de un sistema de control cableado	12
2.2	Diagrama de bloques general de un sistema de control PID [17]	13
2.3	Diagrama de bloques general de un sistema de control inalámbrico	14
2.4	Diagrama de bloques de un sistema de control con señales de ruido [18] .	16
2.5	Modelo OSI para sistemas de comunicación [22]	17
2.6	Topología de red de comunicación Siemens en el laboratorio de automatización de UTEC [13]	18
2.7	Laboratorio de automatización mostrando el módulo de supervisión Siemens, la planta industrial multipropósito para control e instrumentación y 2 módulos PLC localizados en maletas de entrenamiento [13]	19
2.8	Planta industrial multipropósito para control e instrumentación [23] . . .	20
2.9	Módulo industrial para control y supervisión [23] [24]	22
2.10	Periferia descentralizada ET20SP marca Siemens	23
2.11	Panel frontal del módulo industrial para control y supervisión [24]	23
2.12	Diagrama de instrumentación y proceso de la planta industrial multipropósito para control e instrumentación [23]	24
2.13	Módulos para conexión inalámbrica Siemens SCALANCE W774 y W734	27
3.1	Comando ident de MATLAB para identificación de modelos	28
3.2	Diagrama de flujo del programa usado en TIA PORTAL	29

3.3	Curva de reacción del proceso Nivel	30
3.4	Curva de reacción y función de transferencia de Nivel	31
3.5	Validación de la función de transferencia del proceso nivel	32
3.6	Curva de reacción del proceso Temperatura	33
3.7	Curva de reacción y función de transferencia de Temperatura	34
3.8	Validación de la función de transferencia del proceso temperatura	34
4.1	Simulación del Control PID del proceso Nivel del tanque T-10 (TIA PORTAL)	37
4.2	Simulación del Nivel sin Control y con Control (TIA PORTAL)	37
4.3	Bloque PID_Compact de TIA PORTAL	38
4.4	Simulación del Control PID del proceso Nivel del tanque T-10 (TIA PORTAL)	39
4.5	Simulación del Nivel sin Control y con Control (TIA PORTAL)	39
4.6	Simulación del Control PID del proceso Nivel del tanque T-10 (TIA PORTAL)	41
4.7	Simulación del Nivel sin Control y con Control (TIA PORTAL)	41
4.8	Simulación del Control PID del proceso Temperatura del tanque T-10	43
4.9	Simulación de la temperatura sin Control y con Control	43
5.1	Diagrama de Bloques del Control PID con Bloque PID Compact	44
5.2	Implementación cableada del control PID para nivel (parámetros de MATLAB)	45
5.3	Implementación cableada del control PID para nivel (parametros de TIA PORTAL)	46
5.4	Implementación cableada del control PID para nivel (parámetros de MATLAB)	47
5.5	Implementación cableada del control PID para temperatura	48
5.6	Configuración de dirección IP - Punto de acceso SCALANCE W774	49
5.7	Configuración de dirección IP - Cliente SCALANCE W734	49
5.8	Configuración de frecuencia - Punto de acceso SCALANCE W774	50

5.9	Configuración de frecuencia - Cliente SCALANCE W734	50
5.10	Topología de red en interfaz de TIA PORTAL	51
5.11	Prueba de comunicación con modulo PLC S7-1500L	52
5.12	Prueba de comunicación con periferia descentralizada ET200	52
5.13	Prueba de comunicación con punto de acceso SCALANCE W774	52
5.14	Prueba de comunicación con cliente SCALANCE W734	53
5.15	Implementación inalámbrica del control PID para nivel (parámetros de MATLAB)	54
5.16	Implementación inalámbrica del control PID para nivel (parámetros de TIA PORTAL)	54
5.17	Implementación inalámbrica del control PID para nivel (parámetros de TIA PORTAL)	55
5.18	Implementación inalámbrica del control PID para temperatura	56
6.1	Nivel - Control PID inalámbrico VS. control PID cableado (parámetros de MATLAB)	59
6.2	Nivel - Control PID inalámbrico VS. control PID cableado (parámetros de TIA PORTAL)	60
6.3	Nivel - Control PI inalámbrico VS. control PI cableado (parámetros de TIA PORTAL)	62
6.4	Temperatura - Control PID inalámbrico VS. control PID cableado	63

RESUMEN

En la actualidad, los métodos de control cableados predominan en el mercado de procesos industriales. Estos métodos poseen mayor eficiencia en comparación a las redes inalámbricas. No obstante, las redes inalámbricas también poseen ventajas que sus contrapartes cableadas no poseen. Por ejemplo, la comunicación inalámbrica no presenta conexiones físicas. Por ende, son capaces de agilizar los procesos industriales que involucran cableado excesivo. Las redes inalámbricas ahorran costos en mantenimiento a las empresas. Finalmente, permiten la comunicación remota entre dos o varios puntos que resultan difíciles de conectar físicamente.

Esta tesis se enfoca en el diseño e implementación de sistemas de control inalámbricos para regular la temperatura y el nivel de un tanque de agua ubicado en una planta de estudio multipropósito. El método de control usado es el PID (Proporcional, Integral y Derivativo) y el PI (Proporcional, Integral) debido a su simplicidad y uso común en la industria de automatización. La comunicación inalámbrica se realiza mediante una WLAN (Red de Área local Inalámbrica de 5 GHz). Los módulos inalámbricos SCALANCE fueron utilizados para la topología junto al protocolo de Profinet inalámbrico. Los sistemas de control fueron implementados en el Laboratorio de Automatización Industrial de UTEC (Universidad de Ingeniería y Tecnología), para su uso como material de estudio. Los resultados obtenidos muestran mejor rendimiento por parte de los sistemas de control cableados con respecto a tiempo de estabilización, porcentaje de sobreimpulso y error en estado estable. Los controles inalámbricos pueden presentar un mejor tiempo de estabilización, pero sacrificando otras propiedades como el error y el sobreimpulso. Se observó que el control inalámbrico puede perder comunicación en procesos demasiado largos.

Palabras clave:

Control PID; Redes Cableadas; Redes Inalámbricas; Planta Multipropósito para Control e Instrumentación; Módulo Multipropósito para Control y Supervisión

ABSTRACT

Today, wired control methods reign in the industrial process market. These methods are efficient compared to wireless networks. However, wireless networks have advantages that their wired counterparts do not: Wireless communication does not have physical connections. Hence, they are capable of streamlining industrial processes hampered by excessive cabling. Wireless networks also save companies maintenance costs. And finally, they allow remote communication between 2 or more distant points that are difficult to connect physically.

This thesis focuses on the design and implementation of wireless control systems for regulating the temperature and level of a water tank located in a multipurpose study plant. The control method used is the PID (Proportional Integral and Derivative) and the PI (Proportional Integral) due to its simplicity and common use in the automation industry. Wireless communication is established through the use of a 5GHz WLAN. The SCALANCE W774 and SCALANCE W734 wireless modules were used for topology creation together with their wireless Profinet function. The control systems were implemented in the automation laboratory of UTEC (University of Engineering and Technology), for use as study material in automatic control courses. The results obtained demonstrate a higher performance by the wired control systems. Wireless controls tend to have a better settling time, but always sacrificing other critical properties such as error and overshoot. In addition, it was observed that the wireless control can lose communication in long processes.

Keywords:

PID Control; Wired Networks; Wireless Networks; Multipurpose Plant for Control and Instrumentation; Multipurpose Module for Control and Supervision

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

La ciencia de control automático de procesos se basa en la utilización de sensores que envían una o varias entradas a un sistema de control realimentado. Estos sensores accionan uno o varios actuadores dependiendo de las necesidades de un determinado proceso [1]. Tradicionalmente, los problemas de control automático en los procesos industriales se resuelven en forma cableada. Es decir, existe una conexión y comunicación física entre los controladores, los elementos de medición, los actuadores, y los procesos a controlar. Se suele optar por este tipo de comunicación debido a que los procesos industriales demandan un mayor rendimiento y confiabilidad que los de gestión de datos. Por lo tanto, las ventajas de velocidad, disponibilidad, y seguridad que ofrecen las redes cableadas las convierten en las más adecuadas en este tipo de casos.

Otro tipo de tecnología que está empezando a ganar predominancia en la industria de automatización y control son las redes inalámbricas para el control de procesos. Los sistemas de control y comunicación inalámbricos poseen ciertas ventajas sobre las redes cableadas, como la ausencia de cables y conexiones físicas diversas que pueden causar problemas de desorden y desorganización, así como también menor fluidez en un proceso industrial [2]. Las redes inalámbricas reducen considerablemente la necesidad de mantenimiento para los equipos de automatización, y proveen un menor costo [3]. Además, ofrecen la posibilidad de habilitar comunicación y envío de información entre uno o varios puntos distantes que normalmente resultan difíciles de conectar físicamente [2]. Sin embargo, las tecnologías de redes inalámbricas también poseen ciertas desventajas en lo que respecta al envío de información. La principal desventaja es lo susceptibles que llegan a ser en presencia de ruido externo o interferencia, lo que puede acabar siendo fatal para el control deseado.

1.1 Formulación de problema

Los módulos inalámbricos marca Siemens, SCALANCE, se encuentran disponibles en el Laboratorio de Automatización Industrial de UTEC (Universidad de Ingeniería y Tecnología). No obstante, la mayoría de estudios actuales con estos módulos se enfocan únicamente en el envío y recepción de datos, creación de topologías de comunicación, y también en aplicaciones de monitoreo, gestión de bases de datos y activación manual de actuadores. Solo la minoría se enfoca en el control realimentado de procesos. Además, tampoco tiene como objetivo el control inalámbrico del nivel y de la temperatura de un tanque-depósito de agua usando la planta de estudio multipropósito disponible en el laboratorio de UTEC. Debido a esto, no se tiene conocimiento de si el control realimentado del nivel y de la temperatura a nivel industrial es posible de manera inalámbrica. La falta de este conocimiento también imposibilita la utilización de los módulos inalámbricos SCALANCE en cursos de control automático y control de procesos en UTEC, limitándose su uso a trabajos de investigación.

Este trabajo de tesis propone como solución el diseño e implementación de sistemas de control inalámbrico para la regulación del nivel y de la temperatura del proceso tanque con agua. El proceso en cuestión está ubicado en una planta de estudio multipropósito del laboratorio de automatización de UTEC. El método de control utilizado en ambos casos es el PID (Proporcional Integral y Derivativo) debido a su simplicidad de diseño, alto rendimiento a nivel industrial, y uso común en la industria de control automático de procesos. La comunicación inalámbrica se realiza mediante una IWLAN de 5 GHz, implementada con las tecnologías para comunicación inalámbrica disponibles: Siemens punto de acceso SCALANCE W774 y cliente SCALANCE W734 [4]. De esta forma, el presente trabajo de tesis proporciona una nueva herramienta y opciones con las cuales trabajar en cursos de especialización en instrumentación y automatización en UTEC. También, contribuye con la expansión del conocimiento acerca de métodos de control de

procesos. Finalmente, brinda las bases para la realización de futuros estudios que incluyan el uso de tecnologías inalámbricas y el del módulo de estudio multipropósito.

1.2 Antecedentes

Los sistemas de control inalámbrico por lo general se utilizan en procesos convencionales, y aplicaciones de monitoreo y gestión de datos. Es decir, no participan comúnmente dentro de los procesos de planta industriales debido a la gran demanda de rendimiento que dichos procesos requieren. No obstante, esto no significa que la comunicación inalámbrica no sea adecuada para el control automático de procesos a nivel industrial.

No se ha realizado ningún trabajo anterior en el que se implemente tecnología de comunicación inalámbrica en la planta de estudio disponible en UTEC. Es decir, no existen referencias en la web similares a la implementada en este trabajo. Aun así, si se tienen antecedentes recientes de sistemas de control automático implementados mediante el uso de redes inalámbricas. Tal es el caso del estudio realizado en [5]. En dicho estudio, se desarrolla un algoritmo de control PID para el control de un robot balancín utilizando microcontroladores del modelo STR32 Cortex 4, y comunicación inalámbrica WiFi. A pesar de que los objetivos específicos fueron cambiando progresivamente a lo largo del estudio, el objetivo principal de obtener un buen balance mediante el algoritmo diseñado se logró [5]. También se encuentra el *Diseño y Simulación de un Sistema Scada para el Control y Monitoreo de Reservorios de Agua Potable usando un Algoritmo de Control mediante una Red Inalámbrica* realizado en [6]. El autor utilizó una red industrial inalámbrica de 2.4 GHz, la cual cumplió con los requisitos de fiabilidad necesarios para solucionar la problemática de información y datos dispersos [6] no registrados dentro de procesos de distribución de agua. Otro trabajo reciente es el *Diseño e Implementación de un Sistema de Control y Monitoreo Inalámbrico mediante Radiofrecuencia, Bluetooth y SMS en Aplicaciones Domóticas* realizado en [7]. Se utilizó un microcontrolador ATMEGA328P, y

se desarrolló una APP de monitoreo y control utilizando dispositivos Android [7]. El fin de esto fue regular la intensidad de las luces de una casa, dependiendo de determinados datos de temperatura y humedad recibidos de manera inalámbrica. Al final del estudio, se logró realizar la comunicación, envío y recepción de datos de temperatura, humedad y distancia de manera adecuada. Es decir, se obtuvieron resultados satisfactorios para los tres tipos de tecnologías inalámbricas utilizadas (Radiofrecuencia, Bluetooth y SMS).

En [8], se realizó un estudio acerca del desempeño de las redes inalámbricas para el control de procesos en tiempo real. La conclusión a la que se llegó tras analizar los cuatro parámetros variados es que las comunicaciones inalámbricas sí son factibles para la implementación de sistemas de control con un tolerancia de hasta 50 *ms* de retardo de transmisión [8]. De igual manera, un sistema de control PID inalámbrico se logró implementar exitosamente en [9]. El objetivo de este estudio era regular inalámbricamente la velocidad de un sistema electromecánico, específicamente de un motor de corriente continua con imán permanente. Los resultados obtenidos mediante la tecnología ZigBee para comunicación inalámbrica muestran la correcta implementación del sistema de control, así como su efectividad en regular la variable de velocidad [9].

En la actualidad, existen diversas industrias de automatización que han desarrollado sus propias tecnologías de control automático de procesos. Esta instrumentación incluye módulos de conexión inalámbrica que emplean diversos protocolos de comunicación para la transmisión de datos en el mundo OT (Tecnologías de operación). Un ejemplo de estas tecnologías inalámbricas son los módulos puntos de acceso marca Cisco [10], ver FIGURA 1.1. Estos módulos permiten la conexión de hasta 20 direcciones IP enlazadas a la misma red industrial, facilitando la conexión entre zonas remotas. De la misma forma, se encuentran los puntos de acceso y clientes Siemens SCALANCE [11] (FIGURA 1.1) los cuales ofrecen ventajas y funciones para todo tipo de aplicaciones de redes inalámbricas. Algunas de estas funciones se describen en [11].

- iPCF-MC (del inglés *Industrial Point Coordination Function Management Channel*) para aplicaciones que involucran dispositivos de red que se mueven libremente.
- iPCF (del inglés *Industrial Point Coordination Function*) para aplicaciones lineales.



FIGURA 1.1: Tecnologías Cisco y Siemens actuales para redes de comunicación inalámbrica (Cisco Catalyst / Punto de acceso Siemens SCALANCE) [10]

Existen ejemplos de topologías de redes inalámbricas y evaluaciones que establecen la posibilidad de utilizar sistemas de control inalámbricos en el ámbito industrial. Tal es el caso del estudio de tecnologías de comunicación inalámbrica para áreas domésticas realizado en [12]. En este estudio, se demuestra la efectividad, versatilidad y flexibilidad de la comunicación inalámbrica para el envío y recepción de datos en edificios inteligentes. También se demuestra la adaptabilidad de este tipo de tecnologías y la posibilidad de ser implementadas en otros ámbitos como redes de educación y procesos de nivel industrial [12]. Otra referencia prometedora es el diseño e implementación de subredes en un entorno IWLAN (Red Local Inalámbrica Industrial) desarrollado en [13]. En aquel trabajo se utilizó la comunicación de Profinet inalámbrica disponible en los módulos punto de acceso y clientes SCALANCE instalados en el Laboratorio de Automatización Industrial de UTEC. Se crearon 3 subredes de comunicación inalámbrica ligadas cada una a una computadora y conectadas a una Planta Multipropósito para Control e Instrumentación. Además, se presentaron resultados satisfactorios en el envío de datos y activación de actuadores industriales usando la topología inalámbrica implementada [13].

Los métodos de control automático de procesos han evolucionado de gran manera durante los últimos años. Los dos líderes actuales en procesos industriales son los controladores PID y Predictivo. Esto se debe a su inclusión frecuente dentro de algoritmos de control. Es decir, son presentados como productos adicionales para la optimización del control de un proceso por varias entidades fabricantes conocidas como Rockwell y Siemens [14]. La propiedad de robustez en métodos de control también ha surgido en los últimos años. Esto se debe a la necesidad cada vez más indispensable de transmitir datos de control de manera precisa y sin pérdidas.

De esta manera, se puede afirmar que la mayoría de trabajos previos que involucran el uso de tecnologías inalámbricas, se enfocan en aplicaciones de monitoreo y gestión de datos a nivel de hogar o industrial. Además, los pocos trabajos con enfoque en control automático no manejan el rubro a nivel industrial, ni utilizando los módulos inalámbricos SCALANCE o la planta de estudio multipropósito disponible en el Laboratorio de Automatización Industrial de UTEC.

1.3 Alcance y limitaciones

Las herramientas de programación e instrumentación necesarias para el desarrollo de la metodología se encuentran disponibles en el Laboratorio de Automatización Industrial de UTEC. La implementación del control inalámbrico para nivel y temperatura se limita a los procesos disponibles en la Planta de Estudio Multipropósito para Control e Instrumentación ubicada en el laboratorio de automatización de UTEC. La planta de estudio multipropósito presenta dos tanques-depósitos de agua, cada uno con su respectiva instrumentación. Este trabajo de tesis se enfoca en el control del nivel y la temperatura del tanque superior únicamente. Así mismo, las variables a controlar son el nivel y la temperatura del agua de dicho tanque superior. No se controla otras variables como el caudal del agua en la tubería, o la presión del tanque. La progresión de la tesis está ligada a la disponibilidad del Laboratorio de Automatozaci'ón Industrial de UTEC. Además, los

mismos controladores que son implementados de manera inalámbrica son implementados de manera cableada. Finalmente, se realiza una comparación y análisis de resultados entre los métodos de control inalámbricos y cableados.

■ **Objetivos de la tesis**

El objetivo final de este trabajo de tesis es diseñar un sistema de control inalámbrico que logre regular adecuadamente el nivel y la temperatura de un tanque-depósito de agua ubicado en la Planta de Estudio Multipropósito para Control e Instrumentación ubicada en el laboratorio de automatización de UTEC. Para lograr esto, es necesario cumplir con los siguientes objetivos específicos:

- Estudiar el funcionamiento de la planta multipropósito, y el de los equipos Siemens obtenidos recientemente para comunicación inalámbrica industrial.
- Diseñar los sistemas de control PID para el nivel y la temperatura del tanque-depósito de agua.
- Implementar los sistemas de control PID para el nivel y la temperatura del tanque-depósito de agua de manera cableada e inalámbrica.
- Comparar ambos métodos de control implementados mediante parámetros de desempeño como el error en estado estable, tiempo de estabilización, etc.

1.4 Organización de la tesis

Este trabajo de tesis está organizado de la siguiente manera. En el capítulo 2, se explican los conceptos y definiciones necesarias antes de empezar la lectura de la tesis. En el capítulo 3, se empieza con la metodología seguida para el desarrollo del trabajo. Se presenta la obtención de los modelos matemáticos del nivel y de la temperatura del

tanque-depósito de agua de la Planta de Estudio Multipropósito. Para esto, se utiliza el método de la curva de reacción, y herramientas virtuales de control y simulación disponibles en el laboratorio de automatización de la Universidad de Ingeniería y Tecnología. El capítulo 4 muestra el diseño de los sistemas de control PID, así como su posterior simulación y validación. Cabe mencionar que se prueban diferentes conjuntos de parámetros de sintonización, los cuales fueron obtenidos de diferentes fuentes. En caso sea necesario, se realiza un proceso de post-sintonización con el fin de alcanzar un control adecuado para las variables de nivel y temperatura. El capítulo 5 presenta la implementación de los sistemas de control PID de manera cableada e inalámbrica. Al igual que las curvas del comportamiento de las variables a controlar. En el capítulo 6, se presenta la comparación y análisis de resultados realizado entre ambos métodos de control (cableado e inalámbrico). Y finalmente, se presentan las conclusiones del trabajo realizado, así como las fuentes de bibliografía y anexos utilizados.

Capítulo 2

MARCO TEÓRICO

En este capítulo se da una breve explicación de los conceptos básicos necesarios para el entendimiento de este trabajo de tesis. También, se da un explicación de los equipos industriales necesarios y ubicados en el Laboratorio de Automatización Industrial de UTEC. Para esta tesis, es importante un correcto entendimiento de la Planta de Estudio Multipropósito para Control e Instrumentación ubicada en UTEC. Además, es importante conocer el conexionado del módulo PLC (Controlador Lógico Programable) S7-1500 y de su periferia descentralizada ET-200 marca Siemens con el resto de la instrumentación disponible. Este conocimiento es necesario para realizar la topología de la red y programar adecuadamente el controlador a través del software TIA PORTAL desde una computadora. De igual manera, es necesario indicar el método empleado para la estimación de los modelos dinámicos de los procesos industriales a controlar.

2.1 Control cableado

Típicamente, un sistema de control automático con realimentación presenta una estructura general cableada, ver FIGURA 2.1. Los controladores cableados son los que presentan mayor uso a nivel industrial en la actualidad. Este hecho se debe a que los métodos de control cableados presentan mayor eficiencia y ninguna pérdida en la transmisión de datos de las señales de control. De igual forma, un sistema de control cableado presenta mayor velocidad y menos retardo en la transmisión de las señales de control.

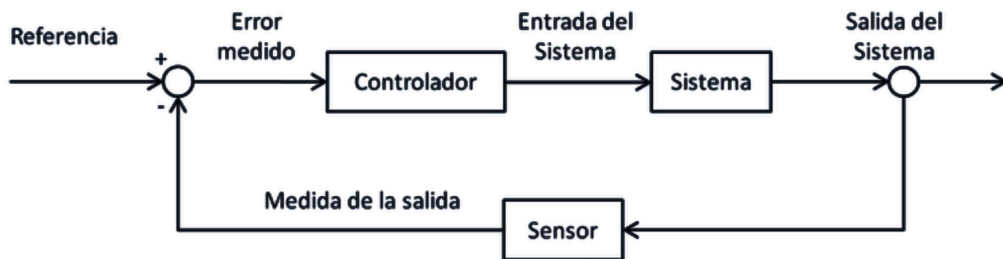


FIGURA 2.1: Diagrama de bloques general de un sistema de control cableado

Control automático de procesos

El principio detrás del control automático de procesos es el uso de sensores y actuadores para regular variables dependiendo de las necesidades de un proceso determinado [15]. Dentro del ámbito industrial, los procesos que se pueden realizar gracias a la aplicación de instrumentación especializada son de diversa complejidad. En algunos casos, el proceso puede ser tan sencillo como realizar una variación en la temperatura de un fluido usando intercambiadores de calor. Sin embargo, existen casos en que los procesos involucran mucha más instrumentación y equipos que otorgan complejidad al mismo. Los procesos industriales pueden incluir muchas más variables que requieren de un adecuado control [15]. Muchas veces, estas variables deben ser controladas de manera simultánea. Además, la correcta regulación de estas variables suele ser imposible de realizar de manera manual. En otras palabras, se debe realizarse de manera automática mediante otro tipo de instrumentación. [15].

Control PID

El llamado control PID (Proporcional, Integral y Derivativo) es, sin lugar a dudas, el método de control automático de procesos más utilizado en la actualidad. Este representa cerca del 90 % de las aplicaciones de control existentes en la industria durante los últimos 15 años [16]. La principal razón de que presente tal grado de preferencia frente

a otros métodos más complejos es justamente su simplicidad y mejor entendimiento a la hora de ser diseñados. Además, este método de control proporciona excelentes resultados en la mayoría de casos de implementación.

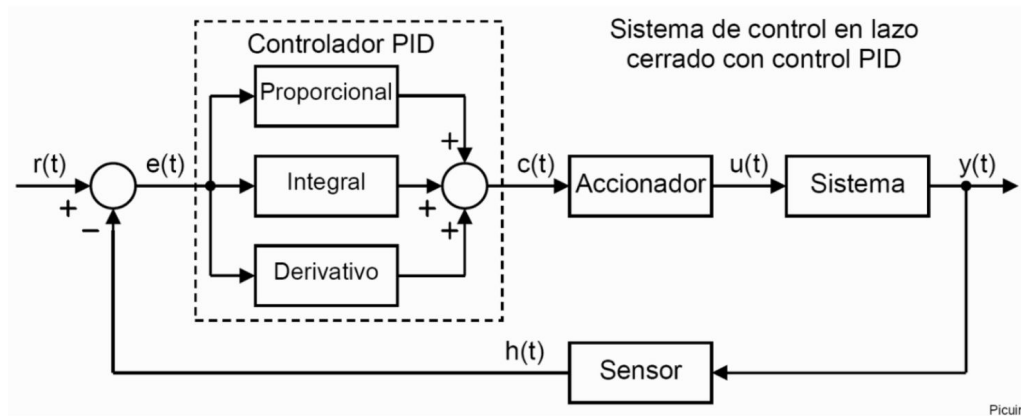


FIGURA 2.2: Diagrama de bloques general de un sistema de control PID [17]

Constituido por 3 bloques de control principales (ver FIGURA 2.2), el principio detrás del control PID consta de la selección de 3 parámetros de sintonización (K_p , K_i , K_d) [17]. Dependiendo de cuales de estos parámetros sean variados, y también de como sean variados, se logra mejorar y/o adecuar ciertas propiedades de una señal de salida (Tiempo de estabilización, porcentaje de sobreimpulso, error en estado estable, etc). Esta función es conveniente para adaptarse a las necesidades que dicta un determinado proceso.

2.2 Control inalámbrico

Un sistema de control inalámbrico junta los conceptos de control automático de procesos y redes inalámbricas. Un sistema de control con comunicación inalámbrica presenta una estructura similar a uno cableado. La diferencia radica en el envío de las señales de control, el cual se realiza inalámbricamente mediante módulos especializados, ver FIGURA 2.3. Las señales de control viajan a través del aire y llegan a los equipos correspondientes.

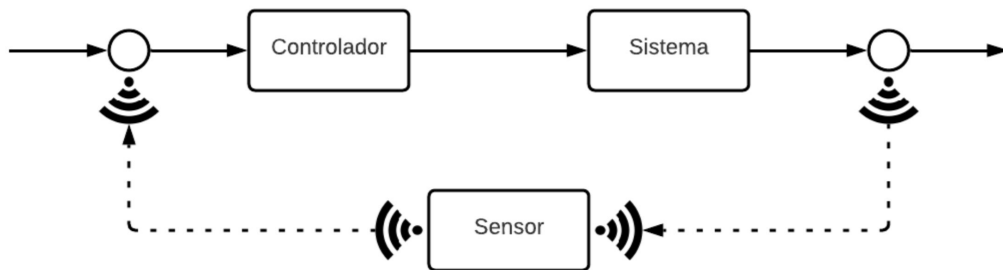


FIGURA 2.3: Diagrama de bloques general de un sistema de control inalámbrico

Las redes inalámbricas pueden traer beneficios tanto a nivel de planta como a nivel de empresa. En [2] y [3] se mencionan algunas de estas ventajas.

- Ausencia de cables y conexiones físicas que pueden causar problemas de desorden y desorganización.
- Reducción considerable de la necesidad de mantenimiento para los equipos de automatización.
- Reducción de los costos ejercidos por una empresa en procesos de mantenimiento, y adquisición de partes y repuestos.
- Habilitar comunicación entre uno o varios puntos distantes que resultan difíciles de conectar físicamente.
- Fácil accesibilidad. La mayoría de equipos actuales poseen tarjetas de red inalámbrica. Estas tarjetas permiten el acceso a la red desde cualquier ubicación
- Mayor movilidad. Las señales inalámbricas pueden atravesar objetos. Esta ventaja permite a los operarios desplazarse con mayor libertad.
- Aumento de productividad. Esta ventaja se debe gracias a la mejor accesibilidad y movilidad de las redes inalámbricas.

Sin embargo, las tecnologías de redes inalámbricas también poseen ciertas desventajas en lo que respecta al envío de información. La principal desventaja es lo susceptibles que son en presencia de ruido externo o interferencia, el cual puede acabar siendo fatal para el control deseado. Algunas desventajas de las redes inalámbricas se aprecian en [3].

- Mayor inseguridad que las redes cableadas, dada la alta accesibilidad que poseen.
- Menor ancho de banda que las redes cableadas. En otra palabras, la velocidad que se alcanza con las redes cableadas es mayor.
- Mayor inestabilidad que las redes cableadas. Pueden verse afectadas por otras ondas electromagnéticas o interferencia generada por aparatos electrónicos cercanos.
- Pueden verse afectadas por objetos sólidos como árboles, paredes, edificios, etc.

Susceptibilidad a perturbaciones

La principal diferencia entre un método de control inalámbrico y uno cableado radica en la tolerancia al ruido e interferencia que poseen. Este ruido hace posible que sufran alguna desestabilización en su implementación. Tal como se aprecia en la FIGURA 2.4, la estructura de un sistema de control con ruido incluye un bloque extra al cual se le puede considerar una señal de perturbación. Esta señal interfiere con el envío y recepción de datos, haciendo más difícil el correcto control de las variables de un proceso [18]. Cabe resaltar que la presencia de ruido en un proceso de la vida real depende de las condiciones y del ambiente en el que se dé el proceso en cuestión.

Dada la susceptibilidad al ruido que poseen las redes inalámbricas, la tolerancia a interferencias resulta un factor muy importante en la estimación de la eficiencia al transmitir datos. Teniendo todo esto en cuenta, se puede afirmar que los sistemas de control inalámbricos deben presentar una alta tolerancia a las perturbaciones para que funcionen

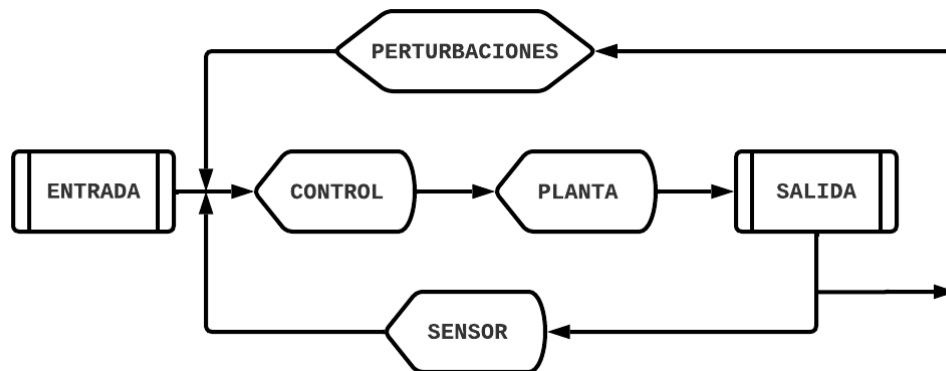


FIGURA 2.4: Diagrama de bloques de un sistema de control con señales de ruido [18]

de manera correcta. Solo así podrán alcanzar su objetivo y regular adecuadamente la señal de salida correspondiente [19].

Redes de comunicación

Las redes de comunicación en las industrias se caracterizan por el gran desarrollo tecnológico que han pasado durante los últimos años. Este desarrollo se propulsó de gran manera con el nacimiento del Internet, el cual se convirtió en el medio de comunicación de datos por excelencia [20]. Por otro lado, junto al Internet también se dieron los nacimientos de diversos protocolos de comunicación. Uno de los más conocidos es el protocolo de comunicación Ethernet. Este protocolo y otro más disponibles en los equipos del Laboratorio de Automatización Industrial de UTEC se describen a continuación.

- Comunicación Ethernet:** Protocolo de comunicación que surge del enlace que se hizo de diversos protocolos TCP/IP. Este se caracteriza por su velocidad de operación, la cual puede variar entre un rango de 1 Mb/s hasta 400 Gb/s [20]. Es debido a esto que su industrialización a nivel de planta no tardó en llegar, dando nacimiento al protocolo de comunicación Profinet [21].

- **Comunicación Profinet:** Protocolo de comunicación que surge de la industrialización realizada sobre el protocolo de comunicación Ethernet. Está directamente relacionado con el mismo, pero conserva un enfoque propio ligado al intercambio de información entre controladores e instrumentación [22].

Se ubica en la capa número 7 (ver FIGURA 2.5) del modelo OSI (Modelo que describe la estructura general y jerarquía de los sistemas de comunicación). También se caracteriza por su capacidad de otorgar transmisión de datos por diversos canales de comunicación: protocolos TCP/IP (Protocolo de Control de Transmisión/Protocolo de Internet), Profinet en tiempo real, etc [22]. La comunicación Profinet debe asegurar que el envío y recepción de datos entre maestro y esclavo se haga con la velocidad adecuada y en el momento adecuado.

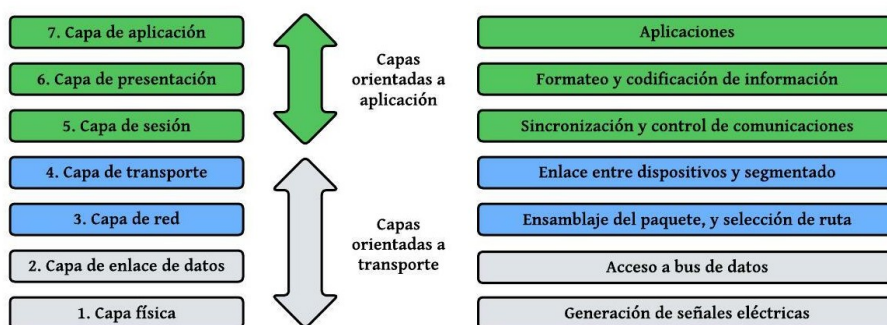


FIGURA 2.5: Modelo OSI para sistemas de comunicación [22]

Topología de red de comunicación

La red de comunicación inalámbrica disponible en el laboratorio de automatización funciona haciendo uso de instrumentación marca Siemens: 1 punto de acceso SCALANCE W774 conectado a un módulo PLC SIMATIC S7-1500, y 2 clientes SCALANCE W734 conectados cada uno a un módulo PLC SIMATIC S7-1200 [13]. La topología de la red en cuestión se aprecia en la FIGURA 2.6. Y la ubicación física de los equipos se aprecia en la FIGURA 2.7.

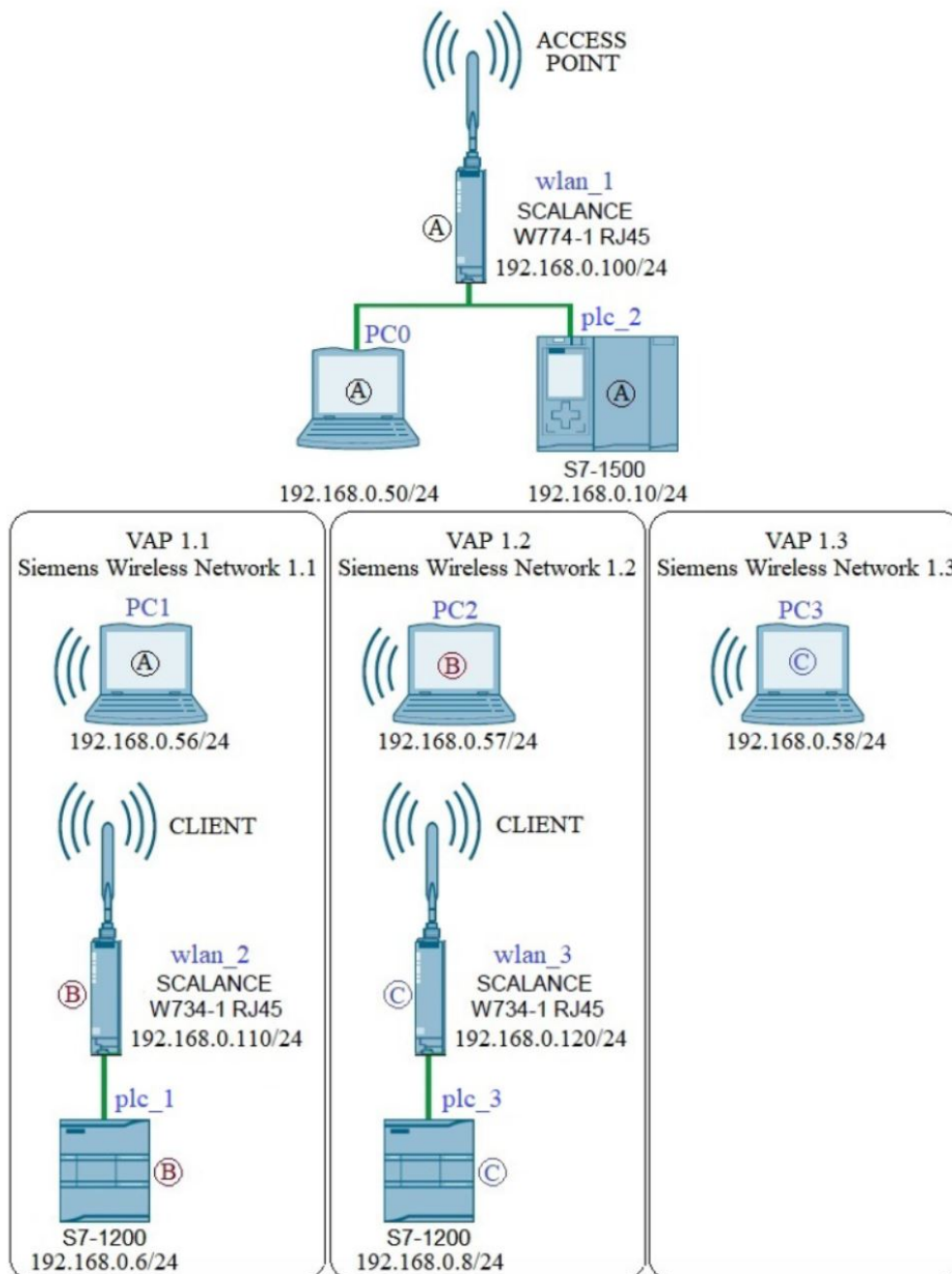


FIGURA 2.6: Topología de red de comunicación Siemens en el laboratorio de automatización de UTEC [13]

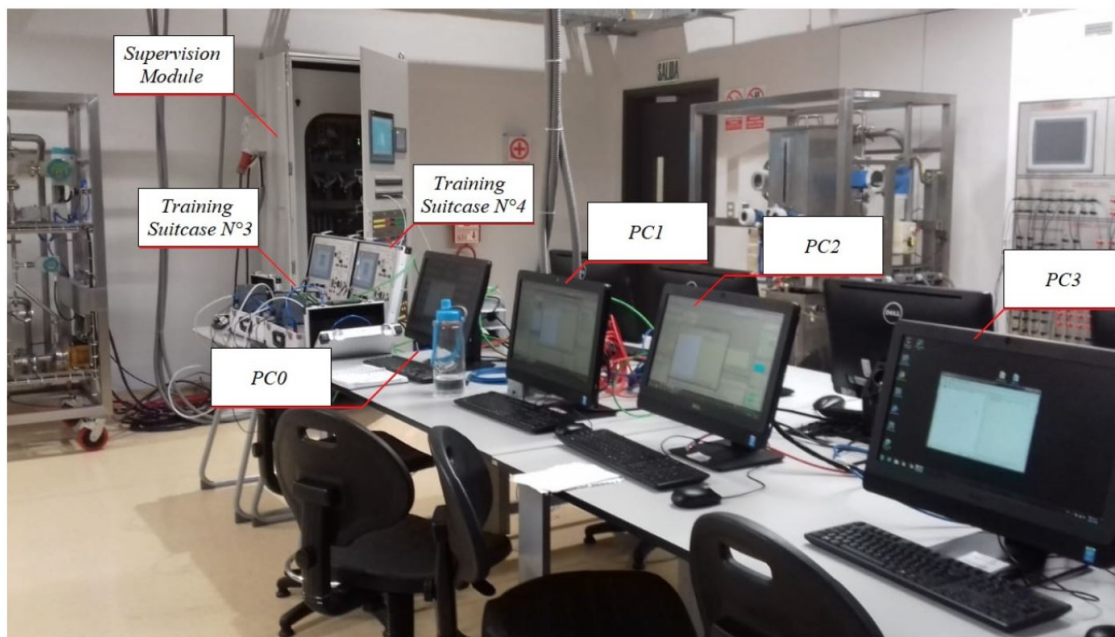


FIGURA 2.7: Laboratorio de automatización mostrando el módulo de supervisión Siemens, la planta industrial multipropósito para control e instrumentación y 2 módulos PLC localizados en maletas de entrenamiento [13]

2.3 Planta industrial multipropósito para control e instrumentación

La Planta de Estudio Multipropósito para Control e Instrumentación con la cual se trabaja en esta tesis es una patente de UTEC aprobada por Indecopi [23]. Es una planta de estudio que incluye los procesos industriales de diversas variables de control: control de temperatura, control de nivel en tanques-depósitos, control de caudal en tuberías, control de presión en tuberías y tanques-depósitos, etc. Viene incluido junto a un Módulo Industrial Multipropósito para Control y Supervisión (Tablero de control). En este módulo se encuentra la instrumentación relacionada con la comunicación y control como el módulo controlador PLC (Controlador Lógico Programable) y otros componentes como switches, contactores, relés, fuentes de alimentación, variadores de frecuencia, etc. En la FIGURA 2.8 se puede apreciar la Planta Industrial Multipropósito para Control e Instrumentación junto con todos los equipos que posee.



FIGURA 2.8: Planta industrial multipropósito para control e instrumentación [23]

Módulo industrial multipropósito para control y supervisión

El Módulo Industrial Multipropósito para Control y Supervisión (FIGURA 2.9) posee tres PLCs de la marca Siemens. Estos PLCs pertenecen a distintas gamas y son utilizados para múltiples funciones dentro de la planta de estudio multipropósito. Para el propósito de este trabajo de tesis, se emplea el PLC modelo SIMATIC S7-1500. El módulo PLC SIMATIC s7-1500 Siemens ubicado en el Módulo Industrial Multipropósito para Control y Supervisión solo cuenta con entradas y salidas digitales. Debido a esto, es necesario integrar una periferia descentralizada I/O ET-200 SP. Esta periferia permite la transmisión de señales digitales y analógicas, ver FIGURA 2.10. En el panel frontal del módulo industrial multipropósito para control y supervisión se realiza el conexionado respectivo para la comunicación entre controlador, sensores y actuadores, ver FIGURA 2.11.

Diagrama de instrumentación y tuberías - P&ID

El diagrama P&ID (Diagrama de tuberías e instrumentación) de la Planta de Estudio Multipropósito para Control e Instrumentación se muestra en la FIGURA 2.12. Este diagrama muestra la estructura que presenta la planta ubicada en el laboratorio de UTEC. Se aprecia la localización de cada componente de control necesario: válvulas manuales y digitales, válvulas moduladoras de flujo, flujómetros, motores, sensores, medidores y/o transmisores de presión, sensores de nivel alto y bajo, y variadores de frecuencia. Además, están disponibles las respectivas simbologías y tags de identificación de los componentes. En las tablas 2.1 y 2.2 se muestran los tags y rangos de operación de los equipos disponibles.

La planta multipropósito cuenta con 2 tanques-depósitos de agua. Cada uno posee sus propios equipos de medición, actuadores y lazos de control para temperatura, flujo,

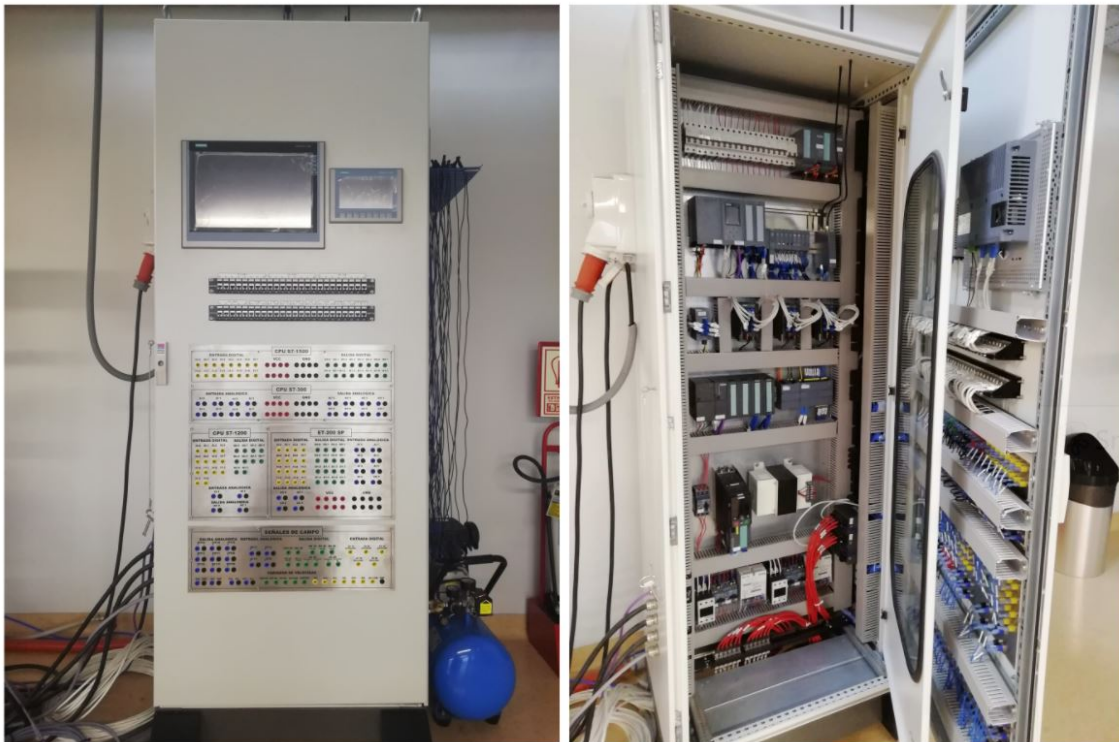


FIGURA 2.9: Módulo industrial para control y supervisión [23] [24]

nivel y presión. Ambos tanques también poseen una línea de salida de drenaje para el agua con una válvula manual HV10 y HV20 respectivamente. A su vez, la planta posee una válvula digital DV30 que permite el acceso del flujo de agua del tanque T-10 al tanque T-20. Es decir, que existen 3 modos de operación para la planta: trabajando únicamente con el tanque T-10, únicamente con el tanque T-20, o con ambos simultáneamente. Para el presente trabajo de tesis, se realizan los sistemas de control inalámbricos para el modo de operación que incluye únicamente el tanque-depósito T-10. La bomba de agua controlada por el variador de frecuencia VFD20 permite la recirculación del agua del tanque T-20 al tanque T-10. También, cada tanque-depósito cuenta con un medidor/transmisor de presión para el monitoreo de dicha variable y del nivel.

Los flujómetros FT10 y FT11 realizan las mediciones de los valores de flujo del agua en sus respectivas líneas de tuberías. Ambos poseen sus propios lazos de control de



FIGURA 2.10: Periferia descentralizada ET20SP marca Siemens

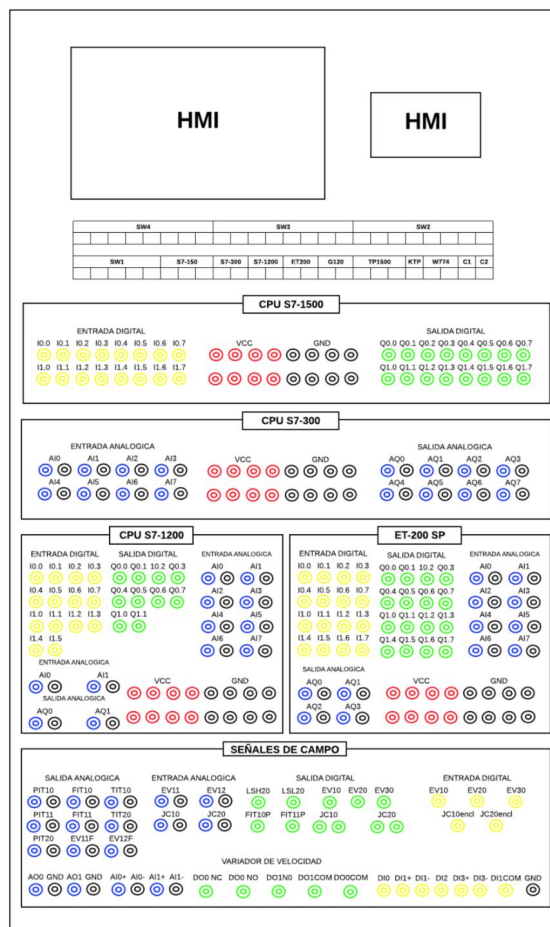


FIGURA 2.11: Panel frontal del módulo industrial para control y supervisión [24]

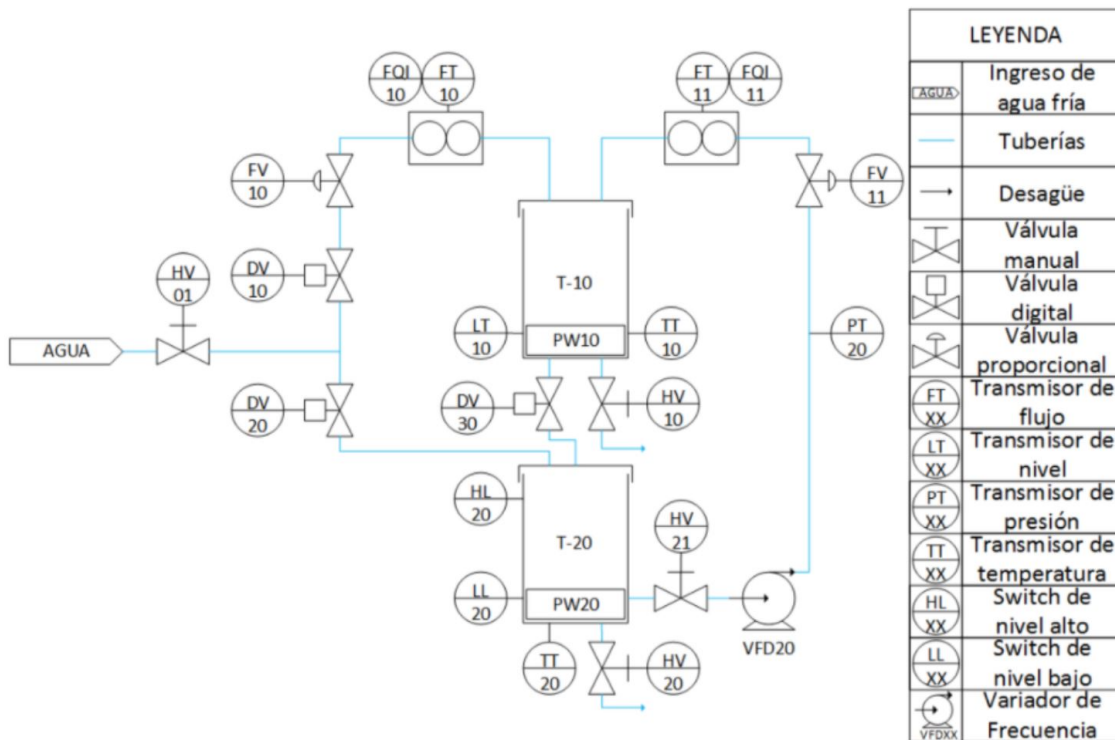


FIGURA 2.12: Diagrama de instrumentación y proceso de la planta industrial multi-propósito para control e instrumentación [23]

flujo, así como un actuador correspondiente. Estos actuadores son las válvulas modificadoras de flujo FV10 y FV11. Por otro lado, las válvulas digitales DV10 y DV20 sirven para permitir o restringir el flujo del agua hacia los respectivos tanques-depósitos. También se cuenta con un transmisor de presión PT20, el cual toma medidas de la presión en la línea de tubería de la válvula FV11. Los tanques T-10 y T-20 tienen incorporados una resistencia calefactora PW10 y PW20 respectivamente. Estas resistencias regulan la temperatura del agua de dichos tanques. El tanque-depósito T-20 también posee 2 sensores de nivel, LL20 y HL20. Estos sensores establecen los límites de nivel mínimo y máximo respectivamente.

TABLA 2.1: Escalamiento de instrumentos analógicos

Tag	Instrumento	Comunicación	Rango de operación
FIT10	Transmisor indicador de flujo	4-20mA	0 - 80 l/min
FIT11	Transmisor indicador de flujo	4-20mA	0 - 80 l/min
LIT10	Transmisor indicador de nivel	4-20mA	0 - 255 cmH ₂ O
PIT11	Transmisor indicador de presión	4-20mA	0 - 16 bar
PIT20	Transmisor indicador de presión	4-20mA	0 - 255 mbar
TIT10	Transmisor indicador de temperatura	4-20mA	0 - 100 C
EV11	Válvula electroneumática	4-20mA	0 - 100 %
EV12	Válvula electroneumática	4-20mA	0 - 100 %
VFD20	Variador de frecuencia	Ethernet	0 - 100 %
JC10	Resistencia calefactora	4-20mA	0 - 100 %

TABLA 2.2: Escalamiento de instrumentos digitales

Tag	Instrumento	Rango de operación
EV10	Transmisor indicador de flujo	ON - OFF
EV20	Válvula electroneumática	ON - OFF
EV30	Válvula electroneumática	ON - OFF
HL20	Switch de nivel alto	ON - OFF
LL20	Switch de nivel bajo	ON - OFF

2.4 Instrumentación requerida

Hay componentes que son indispensables dentro de la instrumentación que posee la planta de estudio multipropósito. Estos forman parte de la red de comunicación, y de la parte de control de procesos. Dichos equipos de automatización se describen a continuación.

- **Controladores PLC (Controlador Lógico programable):** Módulos que reciben mediciones realizadas por componentes sensores o transmisores. Estos módulos ejecutan los algoritmos de control previamente cargados, y siguen una lógica establecida para enviar señales de control. De esta forma, regulan las variables respectivas. De los 3 módulos PLC disponibles en el Módulo Industrial Multipropósito

para Control y Supervisión, uno es del modelo SIMATIC S7-1500, uno del modelo SIMATIC S7-1200 y otro del modelo SIMATIC S7-300. Estos modelos se diferencian por algunas funcionalidades, y cantidad de entradas y salidas que poseen. Para la realización de esta tesis, se utiliza el PLC de modelo SIMATIC S7-1500.

- **Punto de Acceso SCALANCE W774:** Módulo primordial en la topología de la red inalámbrica, ver FIGURA 2.13. Puede operar tanto como punto de acceso como cliente. Posee dos puertos LAN y dos antenas omnidireccionales ANT795-4MA IWLAN capaces de ampliar la cobertura de la red. Estas antenas también permiten el acceso a la red de dispositivos ajenos a la misma. De igual manera, el punto de acceso SCALANCE W774 permite la creación de hasta cuatro VAPs (Puntos de Acceso Virtuales). De estos 4, solo será necesario 1 para la correcta implementación del control a diseñar.
- **Cliente SCALANCE W734:** Módulo que únicamente opera como cliente. Posee todas las demás ventajas presentes en el SCALANCE W774. En el laboratorio de automatización de UTEC se tienen dos de estos módulos disponibles. Aun así, solo se requiere uno para la creación de la subred a la que se enlaza la computadora a trabajar.
- **Sensores:** Dispositivos que detectan ciertos cambios físicos en el entorno y convierten dichos cambios en señales de voltaje o corriente medibles (analógicas o digitales). Estas señales accionan un actuador o son enviadas a un controlador con el fin de regular una variable determinada.
- **Actuadores:** Dispositivos que convierten energía eléctrica, u otros tipos de energía. Funcionan en respuesta a señales de control que los accionan para cumplir ciertas aplicaciones dentro de un proceso industrial.



FIGURA 2.13: Módulos para conexión inalámbrica Siemens SCALANCE W774 y W734

Capítulo 3

MODELOS EXPERIMENTALES DE LOS PROCESOS

Los modelos experimentales son herramientas necesarias para la estimación de los parámetros de sintonización, los cuales se adquieren mediante el software de MATLAB. La obtención de los modelos experimentales de los procesos del nivel y de la temperatura se utiliza el método de la curva de reacción. Este método se basa en realizar la respuesta en lazo abierto del sistema estable del tanque de manera experimental. Una señal de entrada escalón es aplicada a la señal del proceso y se obtiene la respuesta graficada en la interfaz de TIA PORTAL. Los datos del comportamiento del nivel y la temperatura son almacenados e ingresados a software de MATLAB. Luego, se obtienen los modelos matemáticos gracias al comando `ident` para identificación de modelos, ver FIGURA 3.1. Además, la lógica del programa usado para la obtención de las curvas de reacción, y los interlocks usados para la implementación, se aprecian en la FIGURA 3.2.

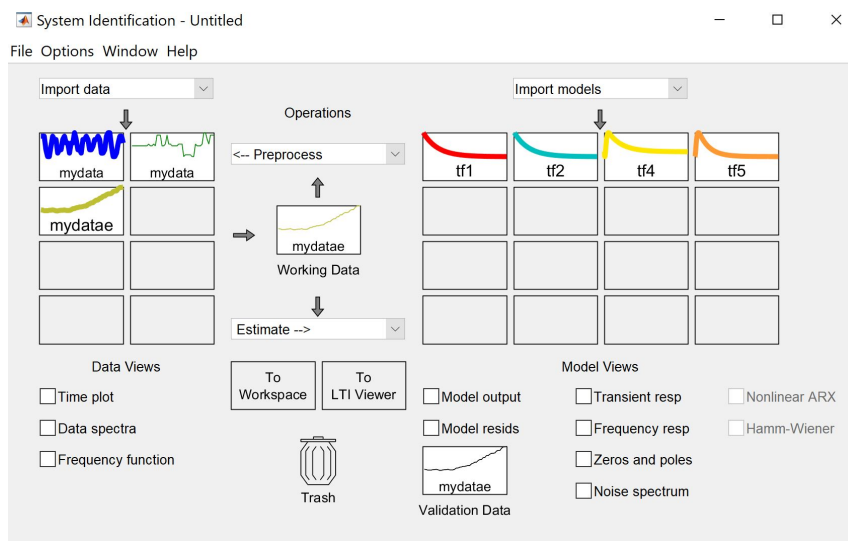


FIGURA 3.1: Comando `ident` de MATLAB para identificación de modelos

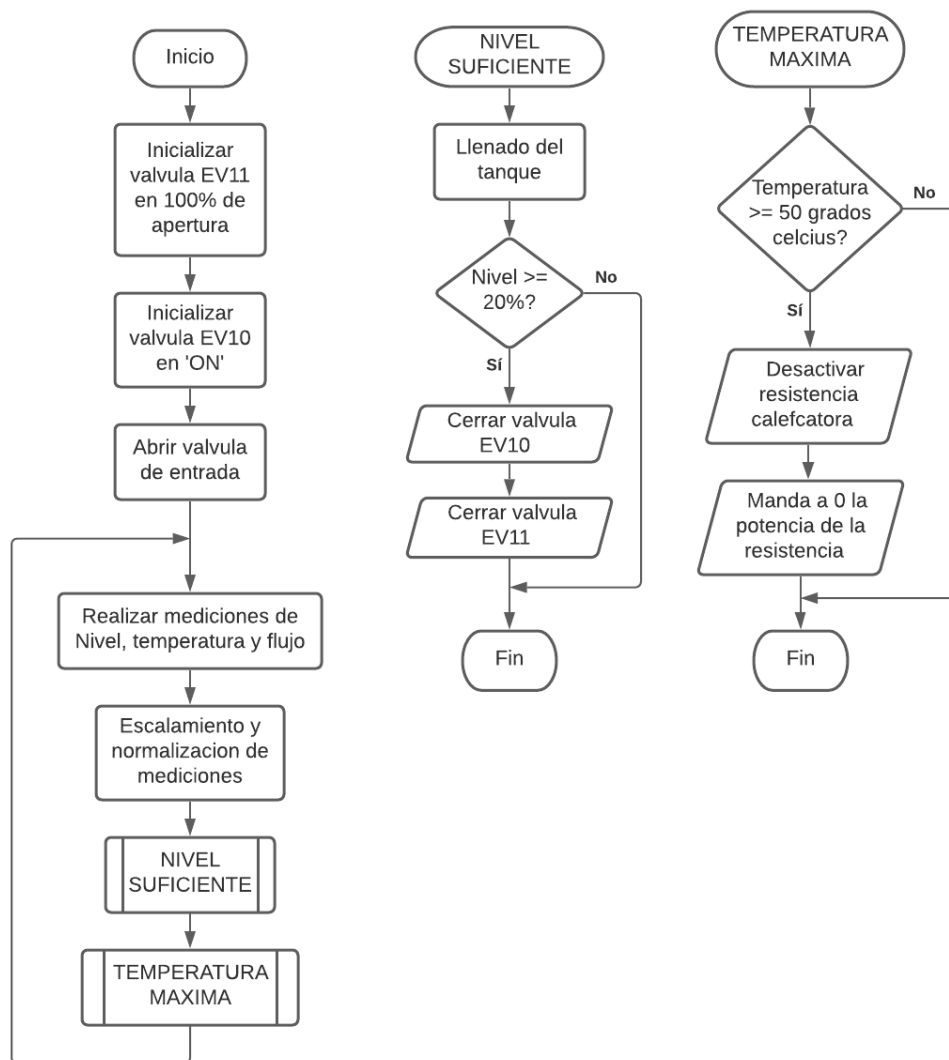


FIGURA 3.2: Diagrama de flujo del programa usado en TIA PORTAL

3.1 Proceso de nivel

De acuerdo al diagrama P&ID de la FIGURA 2.9, se mantiene abierta la válvula manual HV01 para permitir el ingreso de agua al tanque-depósito T-10. También se acciona la válvula digital DV10. Debido a que el diámetro de la tubería de drenaje es de un diámetro mayor que la de ingreso, se realiza la salida del agua por la válvula DV30 para

mantener una salida y entrada lo más igualadas posibles. Luego, se mantiene un porcentaje de apertura de 50 % en la válvula moduladora FV10 para permitir el flujo de ingreso al tanque T-10. La razón de no abrir la válvula FV10 a su máxima capacidad es evitar riesgos de ocasionar algún derrame de agua. Es necesario mantener un nivel constante en el tanque de agua, lo cual se consigue mediante la regulación manual de la válvula DV30 y la válvula de entrada del agua. Se utiliza el transmisor de nivel LT10 para la medición del nivel en una lógica del TIA PORTAL. De esta forma, la curva de reacción del proceso Nivel se aprecia en la FIGURA 3.3.

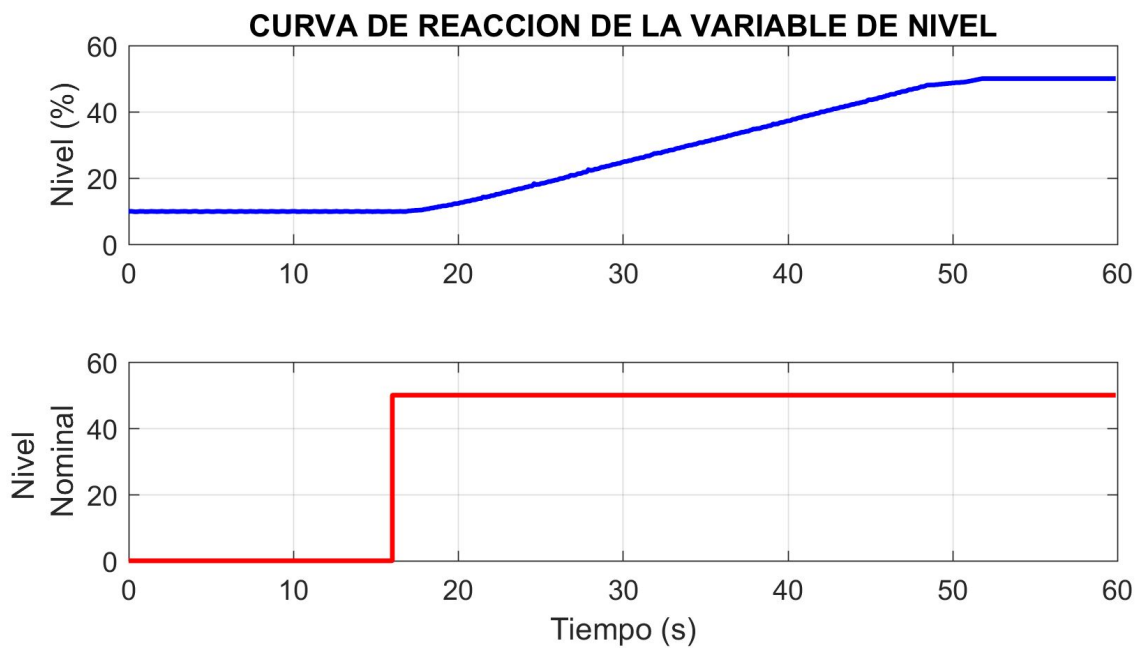


FIGURA 3.3: Curva de reacción del proceso Nivel

Para el proceso de nivel, se introdujeron los valores de muestras realizadas durante la curva de reacción en MATLAB. Se utilizó el comando `ident` para la estimación del modelo experimental del nivel para el tanque superior T-10. De esta forma, la función de transferencia para el nivel se aprecia en la ecuación 3.1.

$$G_{\text{nivel}}(s) = \frac{0.0300}{s + 0.01345} \quad (3.1)$$

La ecuación 3.1 presenta 1 polo y ningún cero. Hubo otras aproximaciones con diferentes cantidades de polos y ceros. Sin embargo, se optó por este modelo debido a que esta función del proceso nivel obtuvo una confiabilidad del 90.45 %, ver FIGURA 3.4.

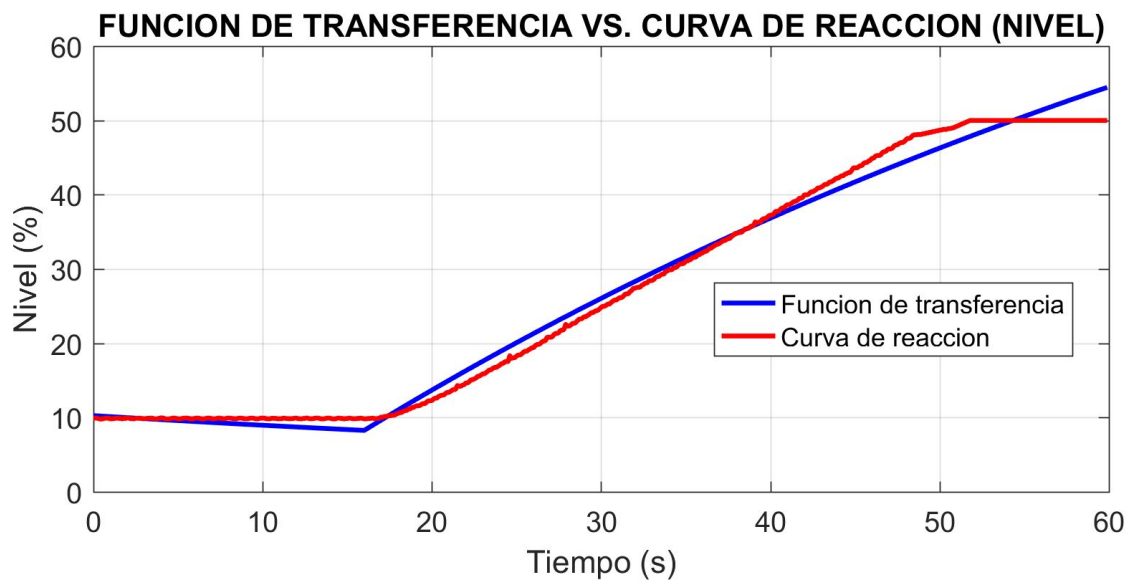


FIGURA 3.4: Curva de reacción y función de transferencia de Nivel

Adicionalmente, se ingresó una señal escalón a la función de transferencia para validar una correcta estimación, ver FIGURA 3.5.

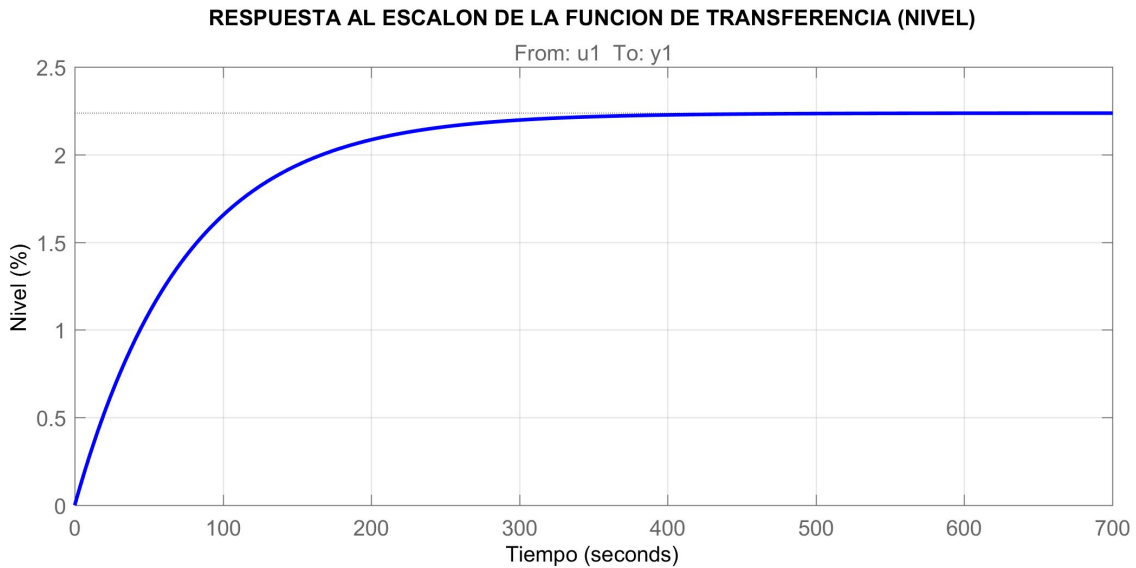


FIGURA 3.5: Validación de la función de transferencia del proceso nivel

3.2 Proceso de temperatura

De igual manera, se requiere mantener la temperatura lo más constante posible para la obtención de su curva de reacción. Esta estabilidad se consigue mediante la regulación de un controlador de potencia que otorga corriente a una resistencia calefactora PW10 (FIGURA 2.9) que posee el tanque-depósito de agua. De acuerdo al diagrama P&ID de la FIGURA 2.9, se calienta el agua almacenada en el tanque T-10 con la resistencia calefactora. La señal escalón se aplicó del 20 a 25 % de la señal eléctrica de 4 a 20mA que proporciona un controlador de potencia. Los valores de temperatura fueron obtenidos con el transmisor de temperatura TT10 incorporado al tanque-depósito de agua. Es importante no darle corriente de más a la resistencia. También se tiene cuidado con el nivel del agua para evitar que la resistencia siga funcionando aún sin haber fluido en el interior. Este evento puede terminar dañando el equipo. De esta forma, la curva de reacción del proceso Temperatura se aprecia en la FIGURA 3.6.

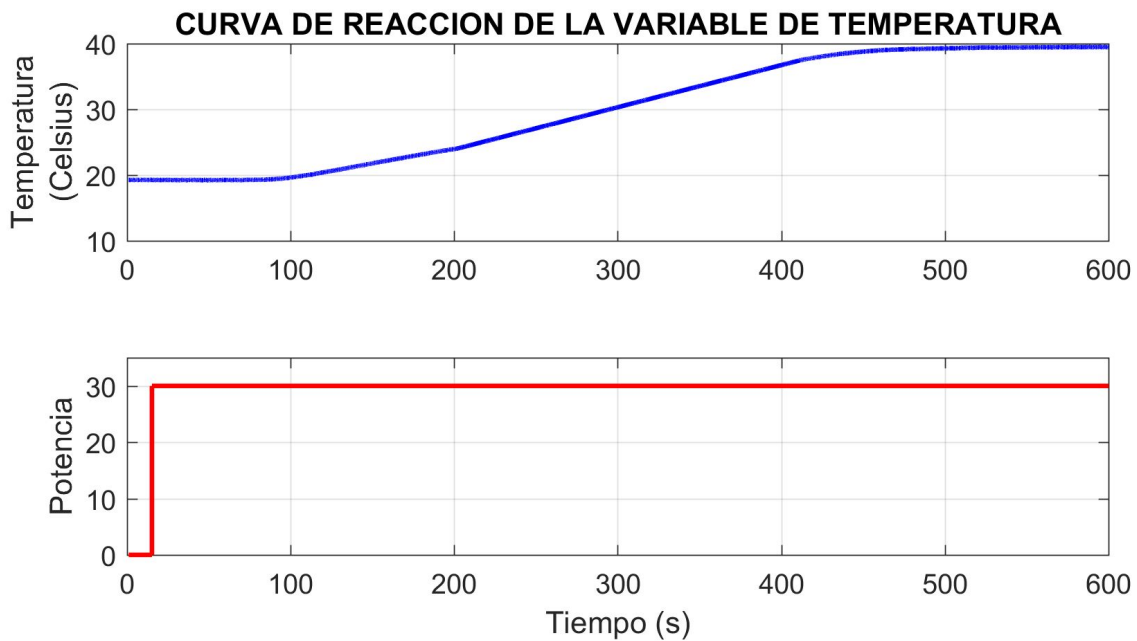


FIGURA 3.6: Curva de reacción del proceso Temperatura

Para el proceso de temperatura, se introdujeron las muestras realizadas durante la curva de reacción en MATLAB. Se utilizó el comando `ident` de MATLAB para la estimación del modelo experimental de la temperatura en el tanque superior T-10 con un nivel constante del 20 % de capacidad. De esta forma, la función de transferencia para la variable de temperatura se aprecia en la ecuación 3.2.

$$G_{\text{temp}} = \frac{0.002153}{s + 0.0006579} \quad (3.2)$$

La ecuación 3.2 contiene 1 polo y ningún ceros. De igual manera, se obtuvieron otras aproximaciones para la función de transferencia de la temperatura. Sin embargo, se optó por el modelo mostrado en la ecuación 3.2 debido a que se obtuvo una confiabilidad del 80.72 %, ver FIGURA 3.7.

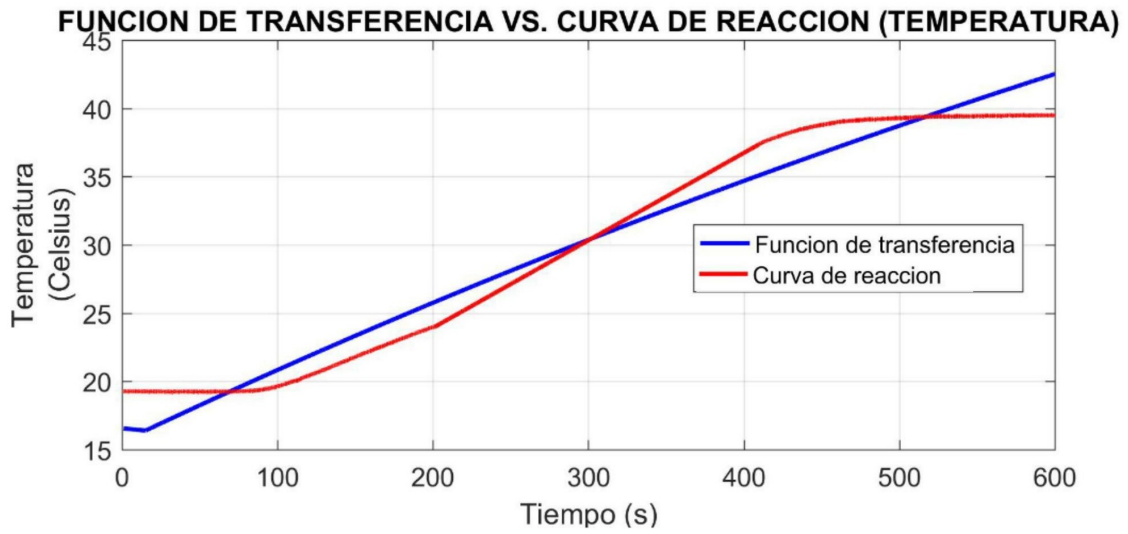


FIGURA 3.7: Curva de reacción y función de transferencia de Temperatura

Adicionalmente, se ingresó una señal escalón a la función de transferencia de la ecuación 3.2, obteniendo un error elevado que se solucionó una vez realizado el control PID, ver FIGURA 3.8.

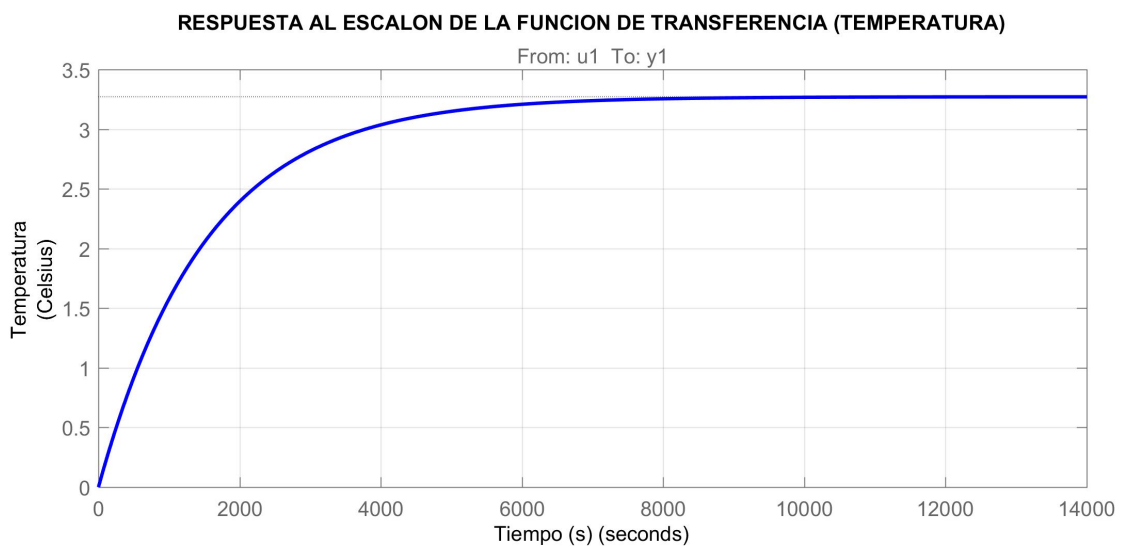


FIGURA 3.8: Validación de la función de transferencia del proceso temperatura

Capítulo 4

DISEÑO DE LOS SISTEMAS DE CONTROL PID

La siguiente etapa del trabajo es el diseño de los controladores tanto para los controles inalámbricos como los cableados. Esta etapa se realiza mediante el uso de los comandos de autosintonización de las herramientas de MATLAB y TIA PORTAL. Fueron extraídos 3 conjuntos de parámetros de control: 2 del software de MATLAB y del software de TIA PORTAL para un control PID, y 1 del software de TIA PORTAL para un control PI. La finalidad de tener 3 conjuntos de parámetros es comparar varios sistemas de control PID con sus contrapartes cableadas. Los parámetros de sintonización forman parte de la forma general de un controlador PID apreciada en la ecuación 4.1 y mostrados en la FIGURA 2.3. Estos parámetros dependen de las características de la planta que se desea controlar. Es decir, dependen de los procesos para la variable de nivel y para la variable de temperatura.

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int_0^t e(t) \cdot dt + K_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \quad (4.1)$$

Donde:

- K_p : parámetro de sintonización proporcional
- K_i : parámetro de sintonización integral
- K_d : parámetro de sintonización derivativo
- t : tiempo
- $e(t)$: sistema de la planta

- $u(t)$: sistema de control PID

4.1 Control PID del nivel con parámetros de MATLAB

De acuerdo al diagrama P&ID de la planta industrial multipropósito de la FIGURA 2.9, existen 2 tanques/depósitos para medir el nivel de agua. Este trabajo se enfoca en la medición del nivel del tanque superior T-10. Por lo tanto, solo se requiere un controlador PID. Se tiene a la válvula moduladora de flujo FV10 y al medidor de nivel PT10 incorporado al tanque-depósito como actuador y transmisor respectivamente. Al insertar la función de transferencia obtenida para el Nivel en el comando pidtune de MATLAB, se obtienen los siguientes parámetros de sintonización, ver Tabla 4.1.

TABLA 4.1: Parámetros de controlador PID para el proceso de Nivel (MATLAB)

Parámetros de sintonización	
K_p	1.43
K_i	0.02
K_d	0.1

La simulación del sistema de control PID del nivel del tanque-depósito T-10 con parámetros extraídos de MATLAB se aprecia en la FIGURA 4.1. Se introdujo como referencia una entrada escalón. Adicionalmente, se graficó la señal del nivel sin control en contraste a la señal controlada, ver FIGURA 4.2.

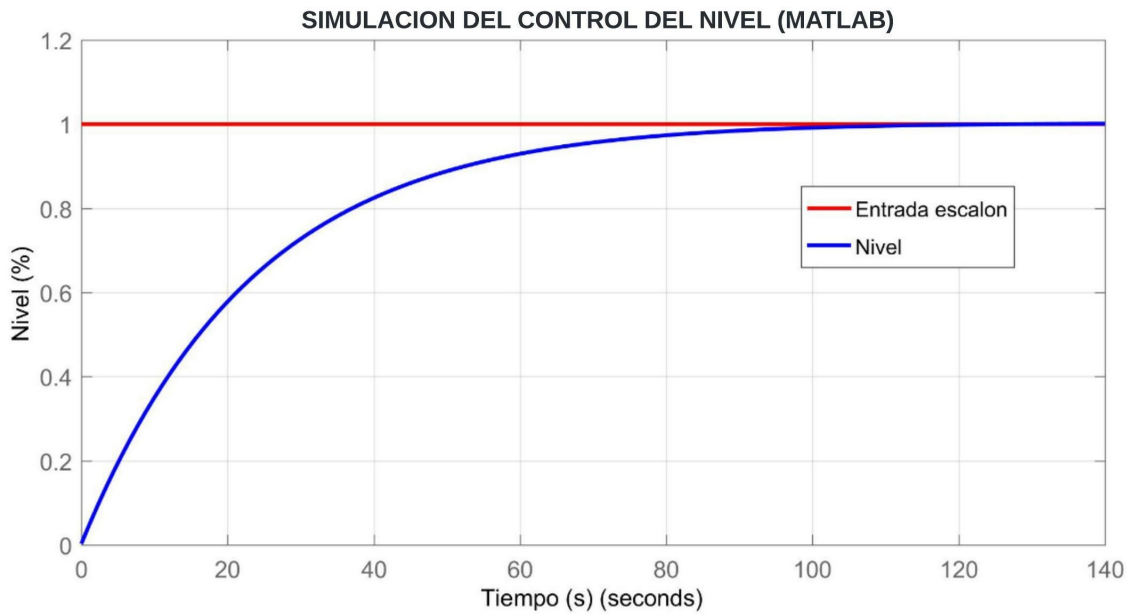


FIGURA 4.1: Simulación del Control PID del proceso Nivel del tanque T-10 (TIA PORTAL)

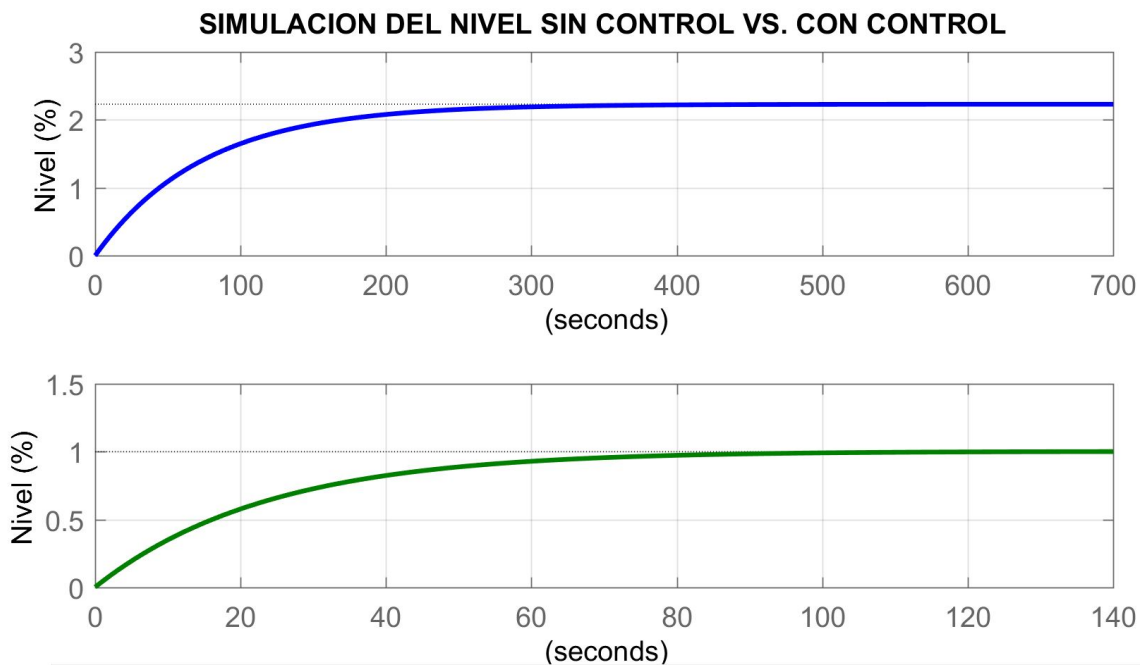


FIGURA 4.2: Simulación del Nivel sin Control y con Control (TIA PORTAL)

4.2 Control PID del nivel con parámetros de TIA PORTAL

La obtención de los parámetros de sintonización en el software de TIA PORTAL se realiza mediante el bloque PID_Compact, ver FIGURA 4.3. El bloque PID_Compact realiza un proceso de sintonización inicial y sintonización fina para la estimación de los parámetros PID. De esta manera, los parámetros para el control PID estimado por TIA PORTAL se aprecian en la tabla 4.2.

TABLA 4.2: Parámetros de controlador PID para el proceso de Nivel (TIA PORTAL)

Parámetros de sintonización	
K_p	10.14102
K_i	0.5664
K_d	31.7771

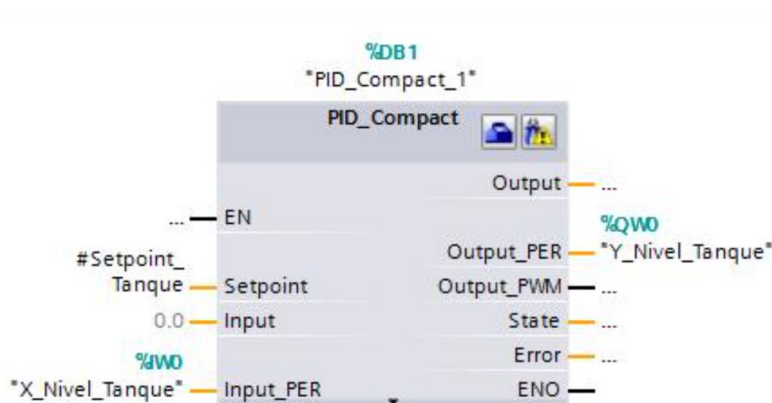


FIGURA 4.3: Bloque PID_Compact de TIA PORTAL

La simulación del sistema de control PID del nivel del tanque-depósito T-10 con parámetros extraídos de TIA PORTAL se aprecia en la FIGURA 4.4. Se introdujo como referencia una entrada escalón. Adicionalmente, se graficó la señal del nivel sin control en contraste a la señal controlada, ver FIGURA 4.5.

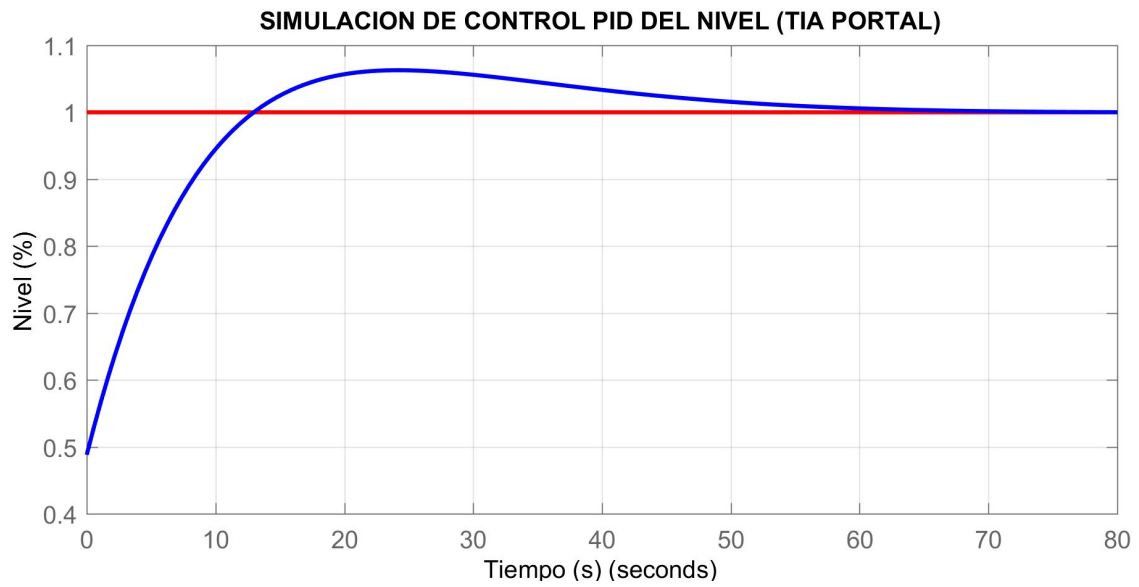


FIGURA 4.4: Simulación del Control PID del proceso Nivel del tanque T-10 (TIA PORTAL)

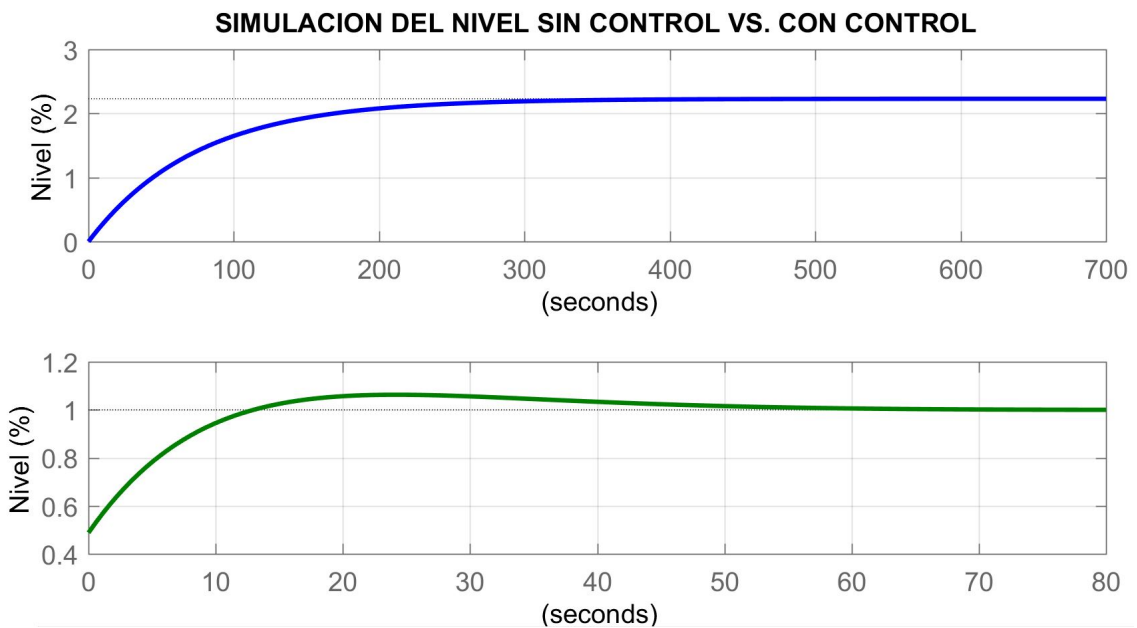


FIGURA 4.5: Simulación del Nivel sin Control y con Control (TIA PORTAL)

4.3 Control PI del nivel con parámetros de TIA PORTAL

La obtención de los parámetros de sintonización en el software de TIA PORTAL se realiza mediante el bloque PID_Compact. El bloque PID_Compact realiza un proceso de sintonización inicial y sintonización fina para la estimación de los parámetros PI. En este caso, se utiliza la función del bloque para controlador PI. De esta manera, los parámetros para el control PI estimado por TIA PORTAL se aprecian en la tabla 4.3.

TABLA 4.3: Parámetros de controlador PID para el proceso de Nivel (TIA PORTAL)

Parámetros de sintonización	
K_p	6.880597
K_i	0.24548

La simulación del sistema de control PID del nivel del tanque-depósito T-10 con parámetros extraídos de TIA PORTAL se aprecia en la FIGURA 4.6. Se introdujo como referencia una entrada escalón. Adicionalmente, se graficó la señal del nivel sin control en contraste a la señal controlada, ver FIGURA 4.7.

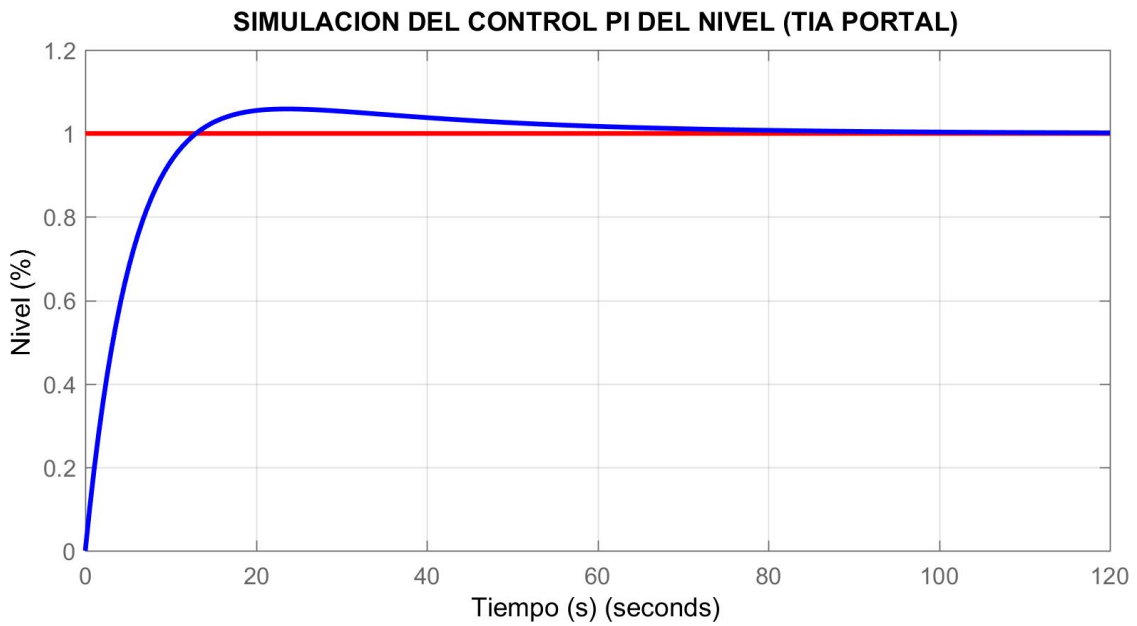


FIGURA 4.6: Simulación del Control PID del proceso Nivel del tanque T-10 (TIA PORTAL)

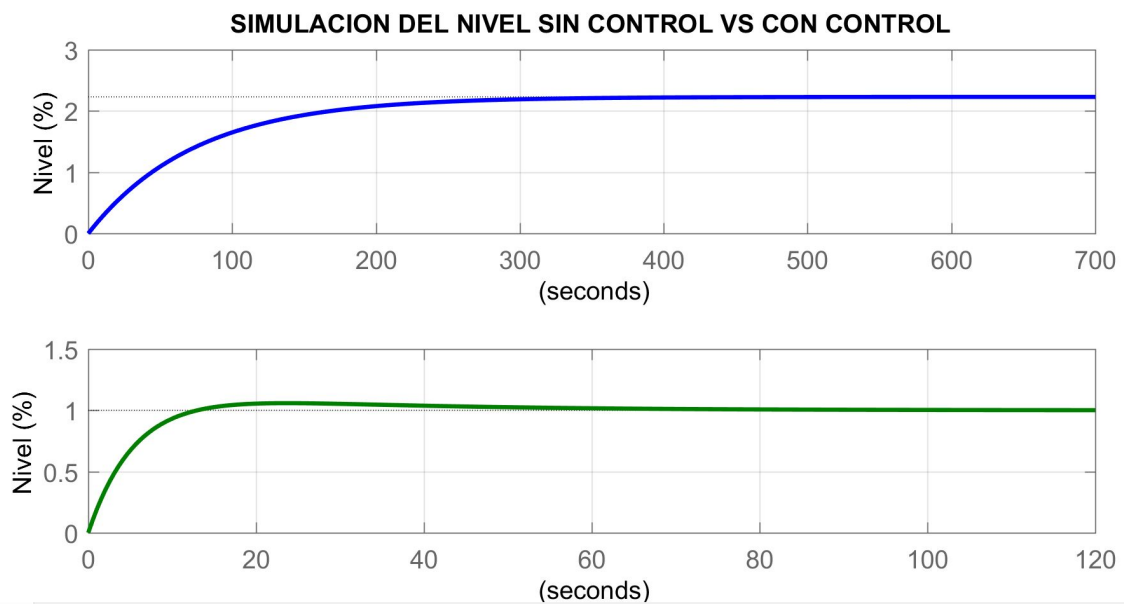


FIGURA 4.7: Simulación del Nivel sin Control y con Control (TIA PORTAL)

4.4 Control PID del proceso de temperatura

A diferencia del control del nivel, el control de la temperatura se realiza con un único conjunto de parámetros de sintonización extraídos de MATLAB. Dado que existen 2 tanques/depósitos a los cuales se les puede medir el valor de temperatura del agua. Este trabajo se enfoca en la medición de la Temperatura del tanque-deposito superior T-10. Por lo tanto, solo se requiere un controlador PID para la temperatura. Se tiene a la resistencia calefactora PW10 y al medidor de temperatura TT10 como actuador y transmisor respectivamente. Al insertar la función de transferencia obtenida para la temperatura en el comando pidtune de MATLAB, se obtienen los siguientes parámetros de sintonización, ver Tabla 4.4.

TABLA 4.4: Parámetros de controlador PID para el proceso de Temperatura

Parámetros de sintonización	
K_p	0.45
K_i	0.0003
K_d	0.005

Con los parámetros de sintonización ya estimados, se simuló el sistema de control PID para el proceso Temperatura. De esta forma, la simulación del sistema de control PID con una Temperatura objetivo de 30 grados celsius se aprecia en la FIGURA 4.8. Adicionalmente se graficó la señal del temperatura sin control en contraste a la señal controlada, ver FIGURA 4.9.

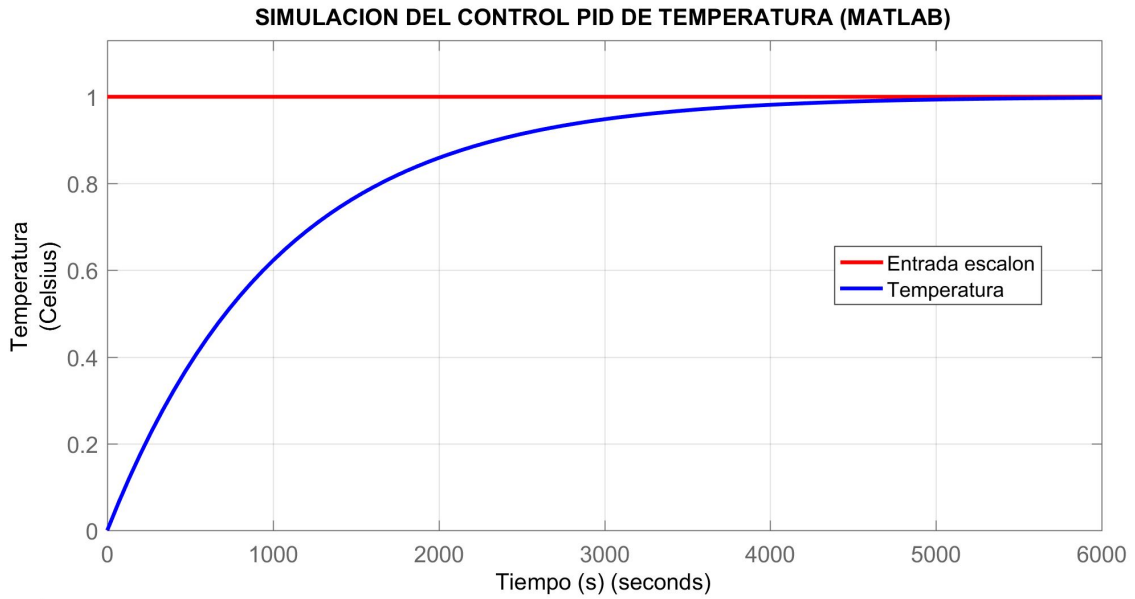


FIGURA 4.8: Simulación del Control PID del proceso Temperatura del tanque T-10

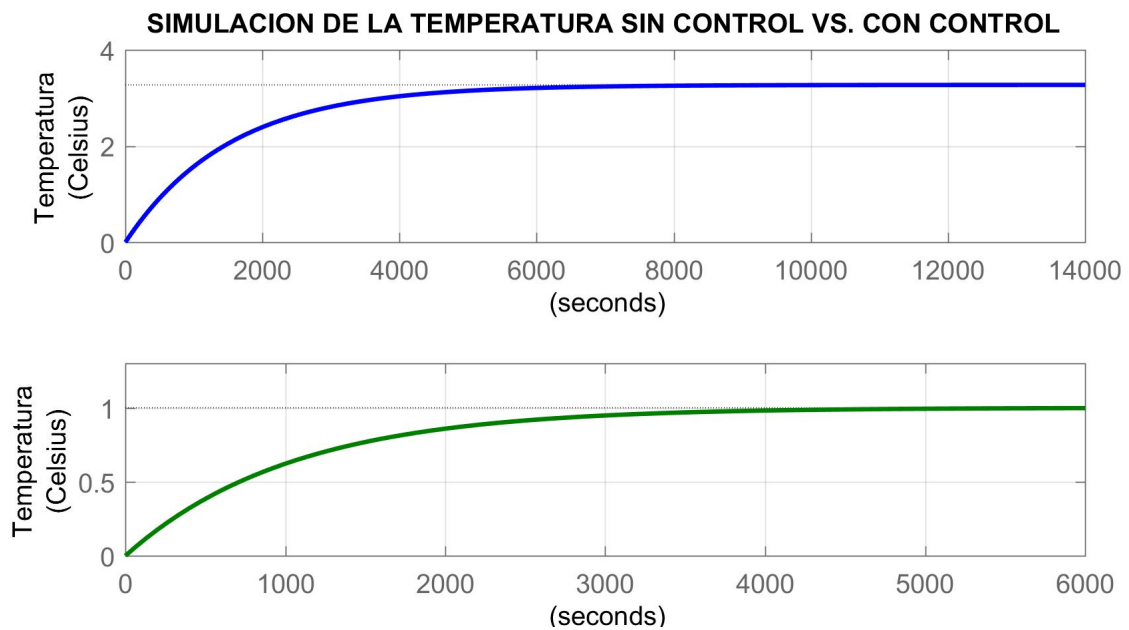


FIGURA 4.9: Simulación de la temperatura sin Control y con Control

Capítulo 5

IMPLEMENTACIÓN DE LOS SISTEMAS DE CONTROL

En este capítulo, se presenta la implementación de los sistemas de control PID simulados previamente. En primer lugar, se presenta la implementación de manera cableada para las variables de nivel y temperatura. Seguido de esto, se presenta la implementación de los sistemas de control de manera inalámbrica. Para ambos métodos de control se utiliza el bloque PID_Compact de Siemens disponibles en el software de TIA PORTAL (FIGURA 4.3). La estructura de los sistemas de control incluye el bloque PID_Compact, ver FIGURA 5.1. Se utiliza la función de sintonización fina que brinda el bloque PID_Compact. Se realiza esta función para conseguir la mejor respuesta posible en tiempo real, así como una mejor aproximación de los parámetros PID en caso se necesite una post-sintonización.

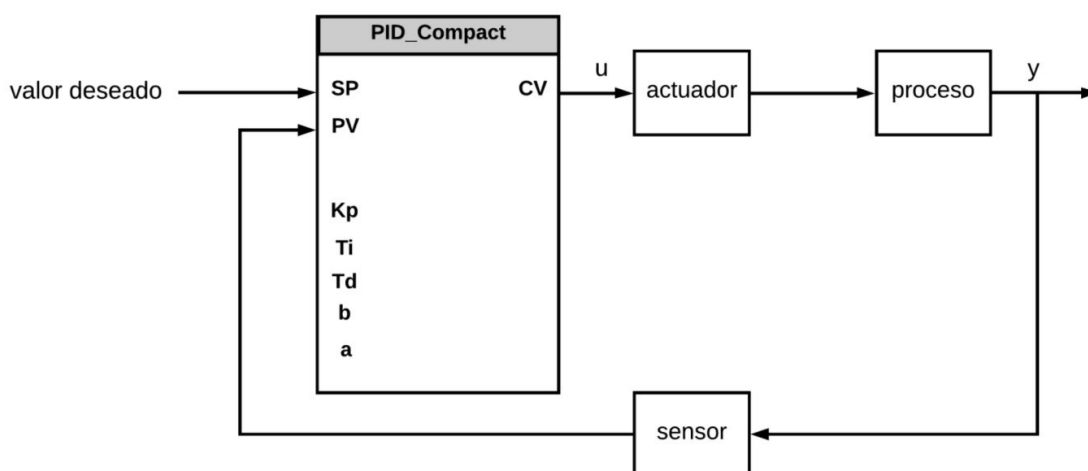


FIGURA 5.1: Diagrama de Bloques del Control PID con Bloque PID Compact

5.1 Control cableado del nivel

Se implementan los sistemas de control cableados para la variable de nivel. En el caso del proceso de nivel, se implementa el sistema de control en 3 casos distintos: con un control PID con parámetros extraídos del software MATLAB, con un control PID parámetros extraídos del software TIA PORTAL, y con un control PI con parámetros extraídos del software MATLAB.

Control PID cableado

En primer lugar, se implementa el sistema de control PID cableado con parámetros de MATLAB para la variable de nivel. El comportamiento del nivel del tanque T-10 con este sistema de control se muestra en la FIGURA 5.2. Con el fin de saber el comportamiento del nivel para distintos valores, se realiza una variación del valor nominal de referencia del 20 % al sistema de control.

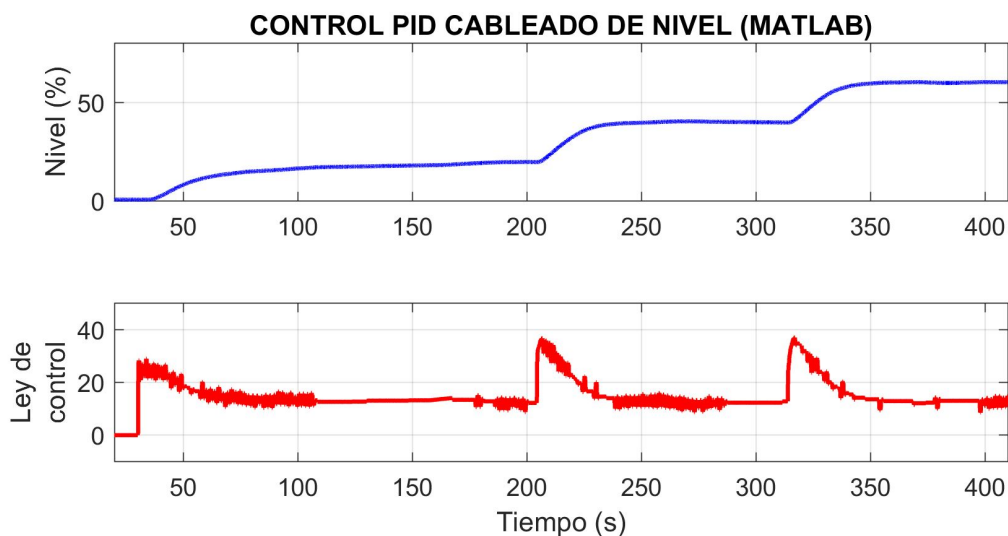


FIGURA 5.2: Implementación cableada del control PID para nivel (parámetros de MATLAB)

En segundo lugar, se implementa el sistema de control PID cableado con parámetros de TIA PORTAL para la variable de nivel. El comportamiento del nivel del tanque T-10 con este sistema de control se muestra en la FIGURA 5.3. Con el fin de saber el comportamiento del nivel para distintos valores, se realiza una variación del valor nominal de referencia del 20 % al sistema de control.

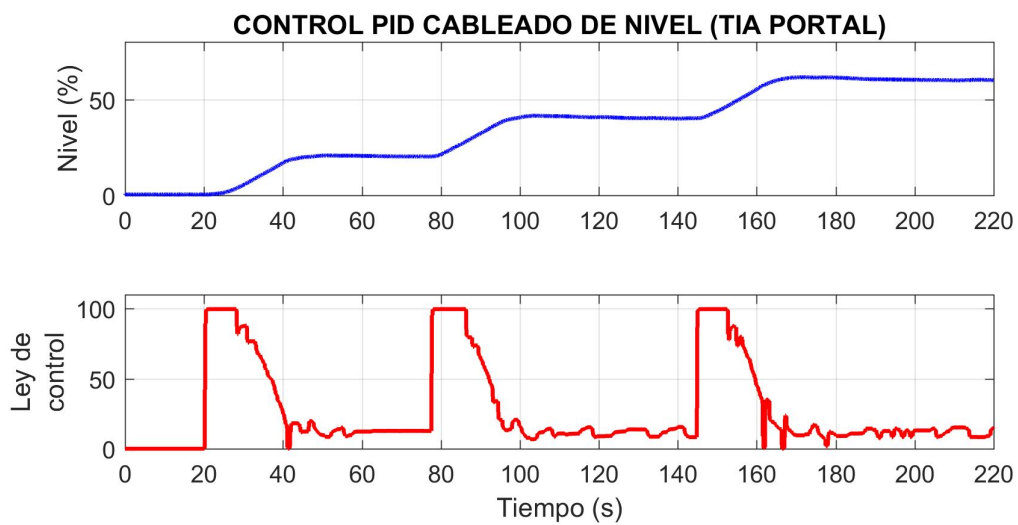


FIGURA 5.3: Implementación cableada del control PID para nivel (parámetros de TIA PORTAL)

Control PI cableado

Se implementa el sistema de control PI cableado con parámetros de TIA PORTAL para la variable de nivel. El comportamiento del nivel del tanque T-10 con este sistema de control se muestra en la FIGURA 5.4. Con el fin de saber el comportamiento del nivel para distintos valores, se realiza una variación del valor nominal de referencia del 20 % al sistema de control.

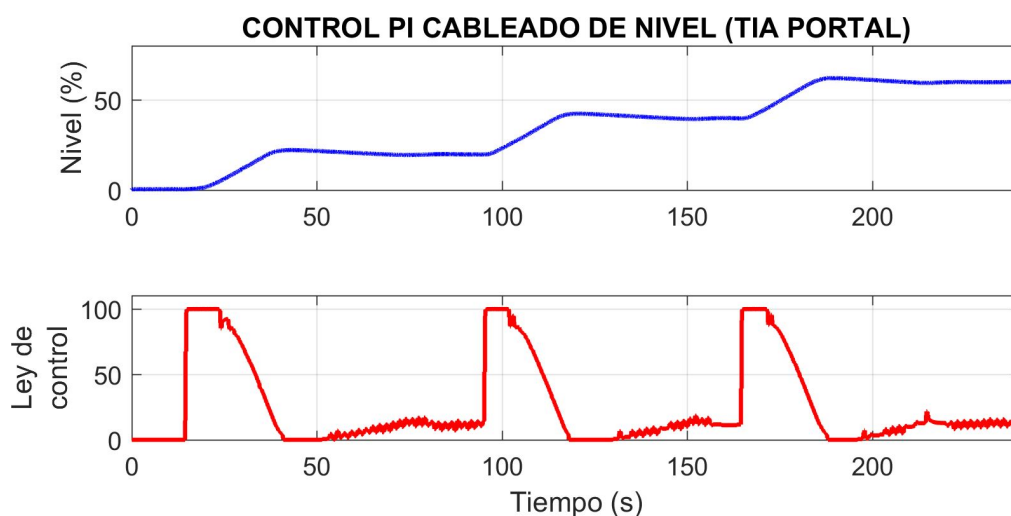


FIGURA 5.4: Implementación cableada del control PID para nivel (parámetros de MATLAB)

5.2 Control cableado de la temperatura

Se implementa el sistema de control PID cableado para la variable de temperatura. El comportamiento de la temperatura del agua dentro del tanque con este sistema de control se muestra en la FIGURA 5.5. Dado el tiempo de estabilización y al límite de muestras de TIA PORTAL, se establece el valor nominal de referencia como un único valor. El tiempo de estabilización es siempre mayor para el control de la temperatura.

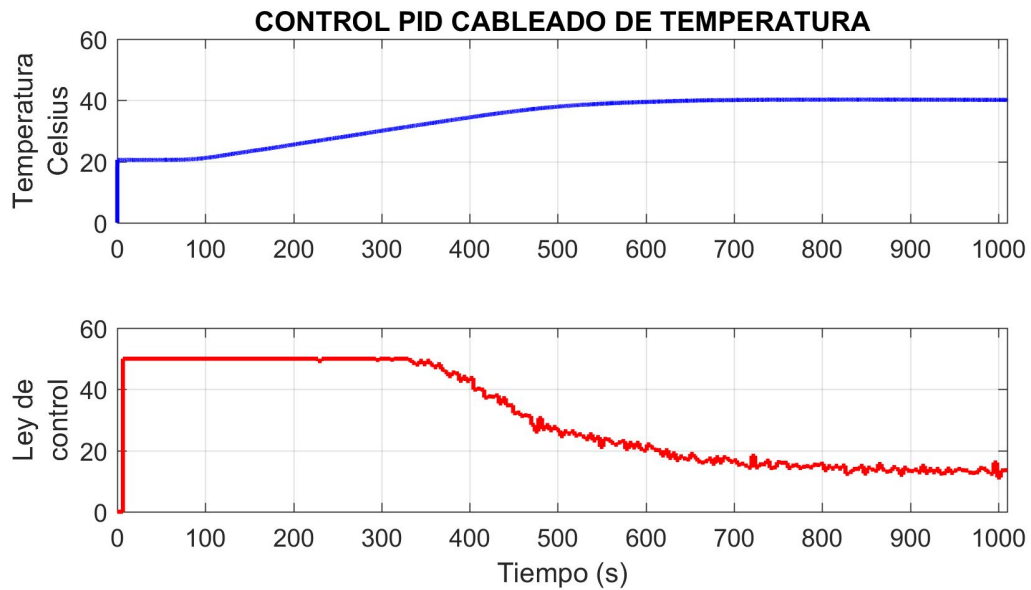


FIGURA 5.5: Implementación cableada del control PID para temperatura

5.3 Creación de subred para comunicación inalámbrica

Para la creación de la subred inalámbrica, es necesario conocer el funcionamiento de los módulos inalámbricos disponibles en el laboratorio de automatización de UTEC. Los módulos son el punto de accesos SCALANCE W774 y el cliente W734, ver FIGURA 2.11. La configuración de los módulos se realiza mediante las herramientas de TIA PORTAL y el navegador. Es necesario que los módulos inalámbricos se encuentren en la misma red que los módulos PLC y ET200. Para esto se realiza la configuración de sus direcciones IP mediante la herramienta de TIA PORTAL, ver FIGURA 5.6 y 5.7.

Dirección MAC: 00 - 1B - 1B - CE - 53 - 64 Dispositivos accesibles

Utilizar parámetros IP

Dirección IP: 192 . 168 . 0 . 100

Máscara de subred: 255 . 255 . 255 . 0

Utilizar router

Dirección del router: 192 . 168 . 0 . 100

FIGURA 5.6: Configuración de dirección IP - Punto de acceso SCALANCE W774

Dirección MAC: 00 - 1B - 1B - CE - 7A - 48 Dispositivos accesibles

Utilizar parámetros IP

Dirección IP: 192 . 168 . 0 . 110

Máscara de subred: 255 . 255 . 255 . 0

Utilizar router

Dirección del router: 192 . 168 . 0 . 110

FIGURA 5.7: Configuración de dirección IP - Cliente SCALANCE W734

De esta forma, las direcciones escogidas para cada equipo incluido en la topología inalámbrica se aprecian en la tabla 5.1.

TABLA 5.1: Direcciones IP de los equipos

EQUIPO	DIRECCIÓN IP
Computador del laboratorio	192.168.0.120
Módulo PLC S7-1500	192.168.0.10
Periferia descentralizada ET200	192.168.0.12
Módulo SCALANCE W774	192.168.0.100
Módulo SCALANCE W734	192.168.0.110

Una vez establecidas las direcciones IP, se realiza la configuración de los módulos SCALANCE a través del navegador. En este caso, se escogió una frecuencia de envío de 5GHz, ver FIGURA 5.8 y 5.9. Esta selección se debe a que la universidad UTEC utiliza una banda de 2.4 GHz para su transmisión de información. Si se utiliza la misma frecuencia para el control del nivel y temperatura, pueden ocasionarse colisiones de información, retrasos en la recepción y pérdidas de datos.

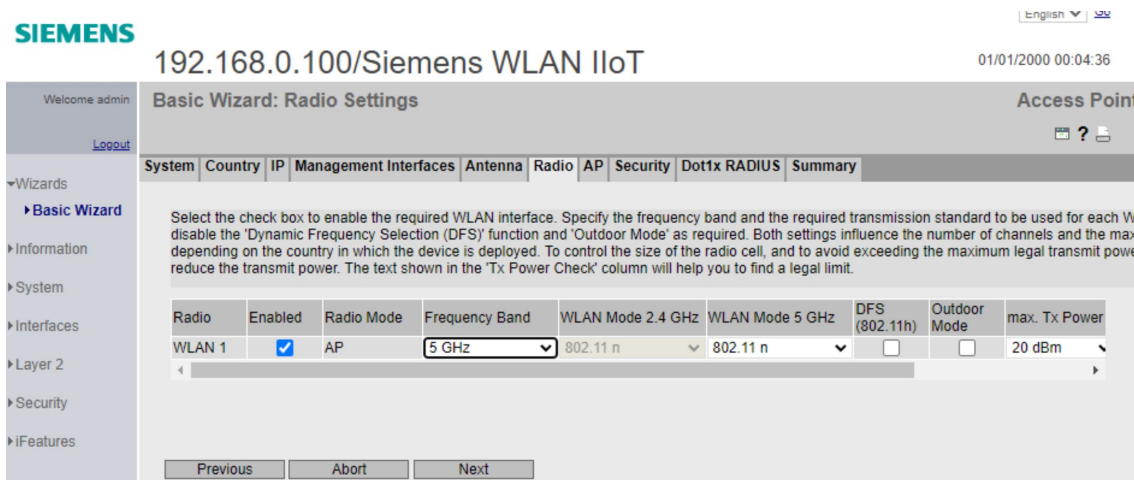


FIGURA 5.8: Configuración de frecuencia - Punto de acceso SCALANCE W774

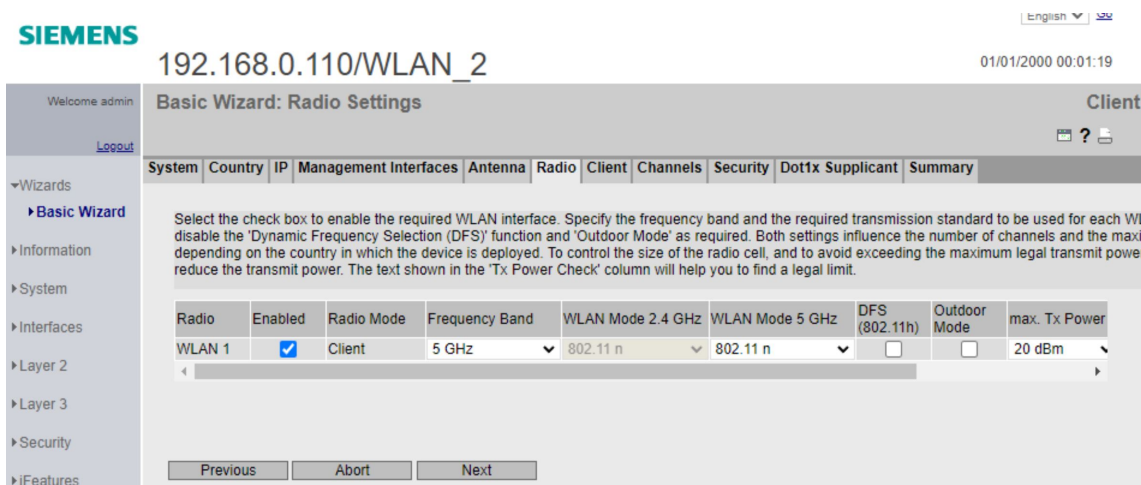


FIGURA 5.9: Configuración de frecuencia - Cliente SCALANCE W734

Una vez configurados los módulos inalámbricos, se agregan los equipos en la topología de la interfaz de TIA PORTAL. La topología inalámbrica completa se aprecia en la FIGURA 5.10. En esta topología, la comunicación se basa en la conexión inalámbrica entre el módulo controlador PLC S7-1500 y su periferia descentralizada ET-200. La razón de entablar comunicación entre estos 2 nodos es realizar la transmisión de datos de los sensores y actuadores al PLC de manera inalámbrica, siguiendo la estructura de un control inalámbrico, ver FIGURA 2.2. Además, se realizan pruebas de conexión usando el panel de comando de la computadora, para probar una correcta comunicación entre los nodos de la topología inalámbrica y la PC, ver FIGURA 5.11, 5.12, 5.13 y 5.14

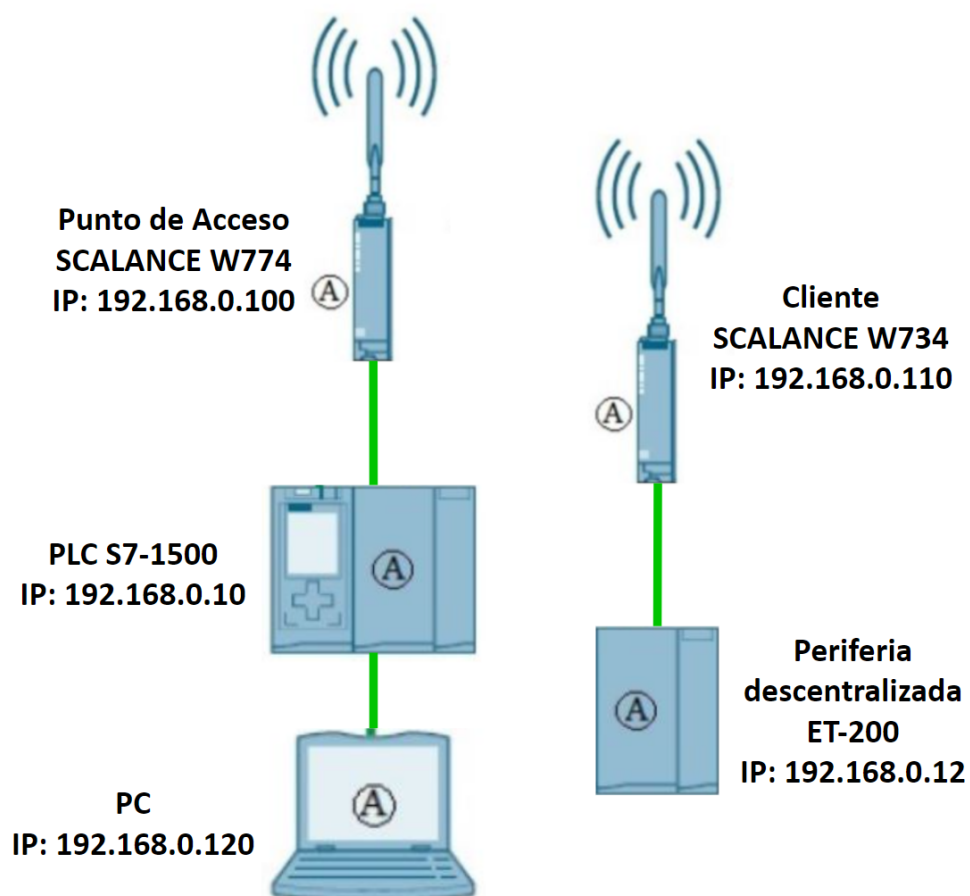


FIGURA 5.10: Topología de red en interfaz de TIA PORTAL

```

C:\Users\Alumno04>ping 192.168.0.10

Haciendo ping a 192.168.0.10 con 32 bytes de datos:
Respuesta desde 192.168.0.10: bytes=32 tiempo<1m TTL=255
Respuesta desde 192.168.0.10: bytes=32 tiempo<1m TTL=255
Respuesta desde 192.168.0.10: bytes=32 tiempo<1m TTL=255
Respuesta desde 192.168.0.10: bytes=32 tiempo<1m TTL=255

Estadísticas de ping para 192.168.0.10:
    Paquetes: enviados = 4, recibidos = 4, perdidos = 0
    (0% perdidos),
    Tiempos aproximados de ida y vuelta en milisegundos:
        Mínimo = 0ms, Máximo = 0ms, Media = 0ms

```

FIGURA 5.11: Prueba de comunicación con modulo PLC S7-1500L

```

C:\Users\Alumno04>ping 192.168.0.12

Haciendo ping a 192.168.0.12 con 32 bytes de datos:
Respuesta desde 192.168.0.12: bytes=32 tiempo=5ms TTL=30
Respuesta desde 192.168.0.12: bytes=32 tiempo=1ms TTL=30
Respuesta desde 192.168.0.12: bytes=32 tiempo=2ms TTL=30
Respuesta desde 192.168.0.12: bytes=32 tiempo=2ms TTL=30

Estadísticas de ping para 192.168.0.12:
    Paquetes: enviados = 4, recibidos = 4, perdidos = 0
    (0% perdidos),
    Tiempos aproximados de ida y vuelta en milisegundos:
        Mínimo = 1ms, Máximo = 5ms, Media = 2ms

```

FIGURA 5.12: Prueba de comunicación con periferia descentralizada ET200

```

C:\Users\Alumno04>ping 192.168.0.100

Haciendo ping a 192.168.0.100 con 32 bytes de datos:
Respuesta desde 192.168.0.100: bytes=32 tiempo=4ms TTL=64
Respuesta desde 192.168.0.100: bytes=32 tiempo=2ms TTL=64
Respuesta desde 192.168.0.100: bytes=32 tiempo=2ms TTL=64
Respuesta desde 192.168.0.100: bytes=32 tiempo=4ms TTL=64

Estadísticas de ping para 192.168.0.100:
    Paquetes: enviados = 4, recibidos = 4, perdidos = 0
    (0% perdidos),
    Tiempos aproximados de ida y vuelta en milisegundos:
        Mínimo = 2ms, Máximo = 4ms, Media = 3ms

```

FIGURA 5.13: Prueba de comunicación con punto de acceso SCALANCE W774

```
C:\Users\Alumno04>ping 192.168.0.110

Haciendo ping a 192.168.0.110 con 32 bytes de datos:
Respuesta desde 192.168.0.110: bytes=32 tiempo=6ms TTL=64
Respuesta desde 192.168.0.110: bytes=32 tiempo=3ms TTL=64
Respuesta desde 192.168.0.110: bytes=32 tiempo=3ms TTL=64
Respuesta desde 192.168.0.110: bytes=32 tiempo=4ms TTL=64

Estadísticas de ping para 192.168.0.110:
    Paquetes: enviados = 4, recibidos = 4, perdidos = 0
    (0% perdidos),
    Tiempos aproximados de ida y vuelta en milisegundos:
        Mínimo = 3ms, Máximo = 6ms, Media = 4ms
```

FIGURA 5.14: Prueba de comunicación con cliente SCALANCE W734

5.4 Control inalámbrico del nivel

Se implementan los sistemas de control inalámbricos para la variable de nivel. En el caso del proceso de nivel, se implementa el sistema de control en 3 casos distintos: con un control PID con parámetros extraídos del software MATLAB, con un control PID parámetros extraídos del software TIA PORTAL, y con un control PI con parámetros extraídos del software MATLAB.

Control PID inalámbrico

En primer lugar, se implementa el sistema de control PID inalámbrico con parámetros de MATLAB para la variable de nivel. El comportamiento del nivel del tanque T-10 con este sistema de control se muestra en la FIGURA 5.15. Con el fin de saber el comportamiento del nivel para distintos valores, se realiza una variación del valor nominal de referencia del 20 % al sistema de control.

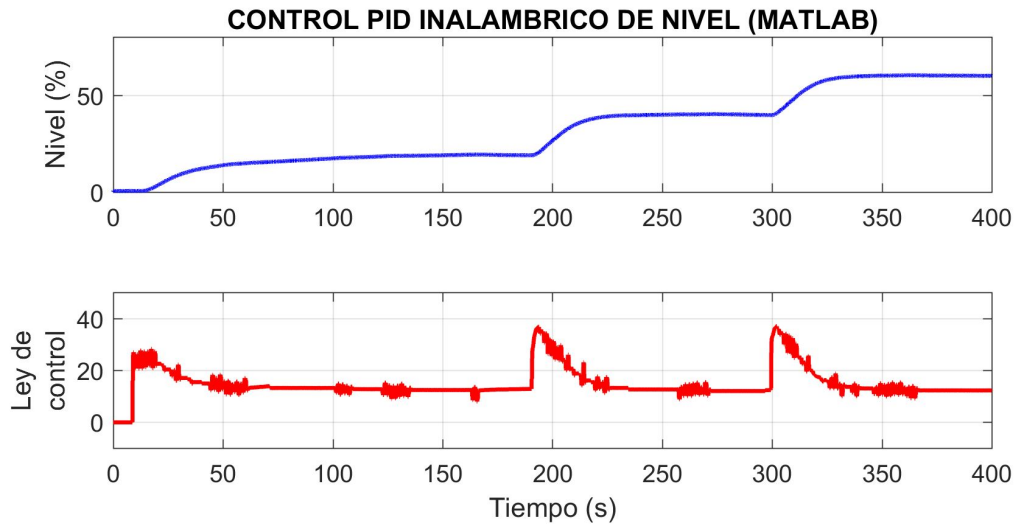


FIGURA 5.15: Implementación inalámbrica del control PID para nivel (parámetros de MATLAB)

En segundo lugar, se implementa el sistema de control PID inalámbrico con parámetros de TIA PORTAL para la variable de nivel. El comportamiento del nivel con este control se muestra en la FIGURA 5.16. Con el fin de saber el comportamiento del nivel para distintos valores, se realiza una variación del valor de referencia del 20 % al sistema de control.

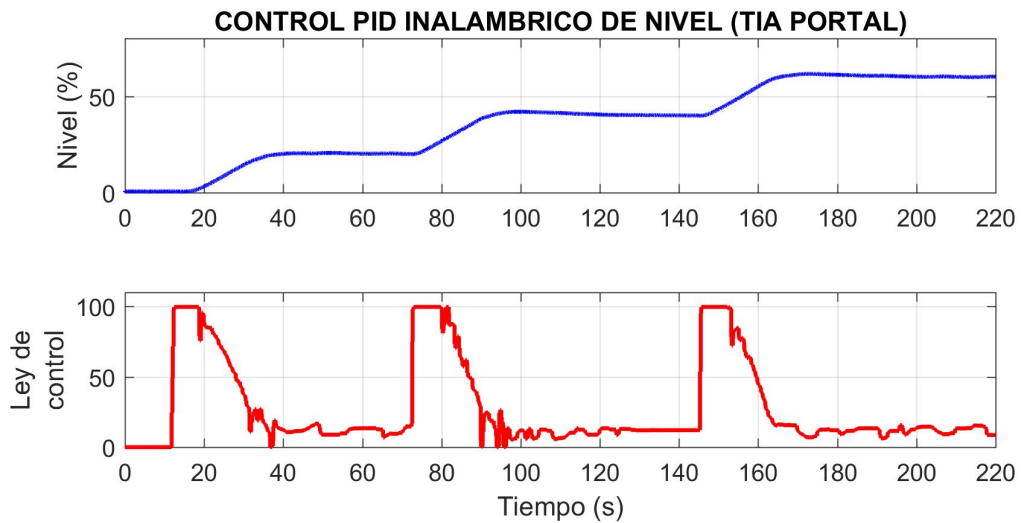


FIGURA 5.16: Implementación inalámbrica del control PID para nivel (parámetros de TIA PORTAL)

Control PI inalámbrico

Se implementa el sistema de control PI inalámbrico con parámetros de MATLAB para la variable de nivel. El comportamiento del nivel del tanque T-10 con este sistema de control se muestra en la FIGURA 5.17. Con el fin de saber el comportamiento del nivel para distintos valores, se realiza una variación del valor nominal de referencia del 20 % al sistema de control.

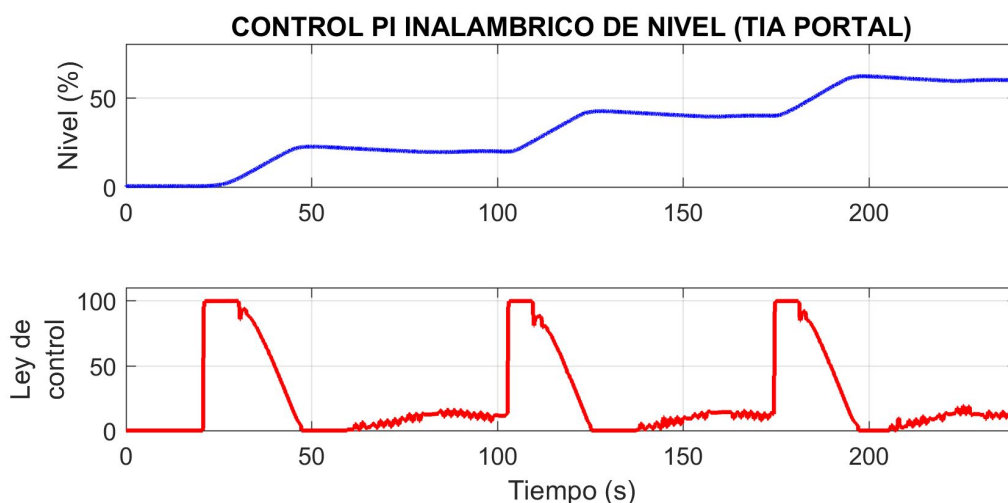


FIGURA 5.17: Implementación inalámbrica del control PID para nivel (parámetros de TIA PORTAL)

5.5 Control inalámbrico de la temperatura

Se implementa el sistema de control PID inalámbrico para la variable de temperatura. El comportamiento de la temperatura del agua con este sistema de control se muestra en la FIGURA 5.18. Dado el tiempo de estabilización y la limitación de la toma de muestras en TIA PORTAL, se establece el valor referencia como un valor sin variaciones. Cabe

mencionar que el tiempo de estabilización es siempre mayor para el control de la temperatura.

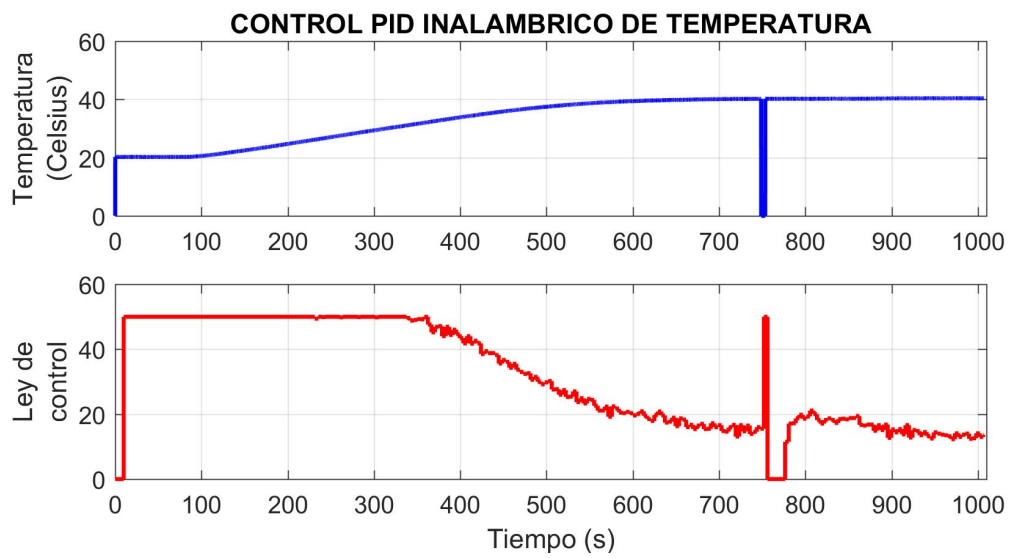


FIGURA 5.18: Implementación inalámbrica del control PID para temperatura

Capítulo 6

COMPARACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Este capítulo muestra los resultados obtenidos tras culminado el trabajo de tesis. Se presenta la comparación entre los métodos de control cableados e inalámbricos diseñados en el capítulo 4 e implementados en el capítulo 5. El análisis se realiza evaluando las propiedades de los sistemas de control para nivel y temperatura: tiempo de estabilización (T_s), porcentaje de sobreimpulso ($\%OS$) y error en estado estable (e_{ss}), tal como se acostumbra realizar en la industria con el fin de evaluar el rendimiento de un sistema de control.

6.1 Control en tiempo real del nivel

Se dividieron los resultados del control en tiempo real del nivel en los 3 casos de control que se implementaron: control PID con parámetros de MATLAB, control PID con parámetros de TIA PORTAL y control PI con parámetros de TIA PORTAL. Se presenta una gráfica mostrando la comparación entre las señales de control cableada e inalámbricas, así como una tabla en cada caso mostrando los resultados obtenidos.

Control PID del nivel con parámetros de MATLAB

Los resultados obtenidos con parámetros extraídos de MATLAB (ver tabla 6.1) muestran los valores respectivos de tiempo de estabilización (T_s), porcentaje de sobreimpulso ($\%OS$) y error en estado estable (e_{ss}) para 3 niveles de referencia establecidos. La FIGURA 6.1 muestra el comportamiento de los controladores PID con una referencia del 20 % al 40 % del nivel. El control PID cableado presenta un tiempo de estabilización de

43.1s, un error en estado estable de 0.07 % y un porcentaje de sobreimpulso de 0.25 %. En cambio, el control PID inalámbrico muestra un tiempo de estabilización de 63.6s, un error en estado estable de 0.993 % y un porcentaje de sobreimpulso de 0.47 %. Cabe destacar que el tiempo de estabilización resulta mas largo al inicio del proceso de control con una referencia del 20 % del nivel. Gracias a la inercia del agua al elevar el nivel, los posteriores escalones con 40 % y 60 % del nivel tienen un tiempo de estabilización mas reducido.

Los resultados muestran que el control inalámbrico del nivel tarda mas tiempo en estabilizarse, posiblemente debido al retardo del envío de datos de manera inalámbrica. Por otro lado, el control inalámbrico tiende a tener porcentaje de sobreimpulso de 0 %. Esta carencia de sobreimpulso se debe a que el control inalámbrico no llega a superar el nivel de referencia, sino solo a permanecer muy cercano al mismo. La excepción a este hecho se da en el escalón de 60 % de nivel, en donde el porcentaje de sobreimpulso es de 0.47 %, es decir, mayor al del control cableado.

TABLA 6.1: Resultados del control PID para el nivel (Parámetros de MATLAB)

Controlador	Referencia	T_s	e_{ss}	%OS
PID Cableado	0 - 20 %	144.3s	2.3 %	0 %
PID Cableado	20 - 40 %	54.9s	0.405 %	0.725 %
PID Cableado	40 - 60 %	43.1s	0.07 %	0.25 %
PID Inalámbrico	0 - 20 %	147.8s	2.892 %	0 %
PID Inalámbrico	20 - 40 %	63.6s	0.993 %	0 %
PID Inalámbrico	40 - 60 %	42.4s	0.159 %	0.47 %

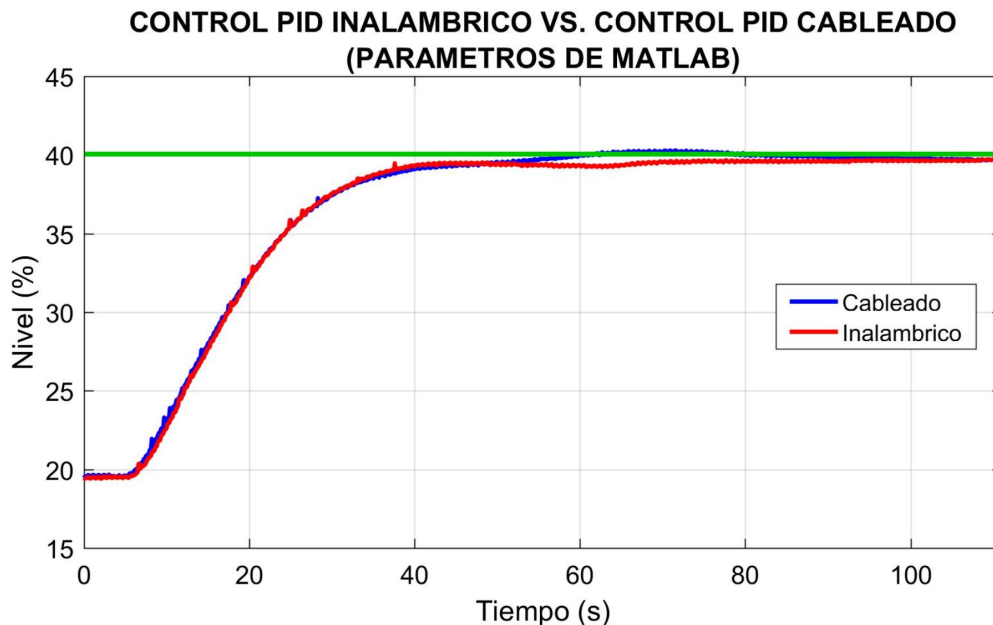


FIGURA 6.1: Nivel - Control PID inalámbrico VS. control PID cableado (parámetros de MATLAB)

Control PID del nivel con parámetros de TIA PORTAL

Los resultados obtenidos con parámetros extraídos de TIA PORTAL (ver tabla 6.2) muestran los valores respectivos de tiempo de estabilización (T_s), porcentaje de sobreimpulso ($\%OS$) y error en estado estable (e_{ss}) para 3 niveles de referencia establecidos. La FIGURA 6.2 muestra el comportamiento de los controladores PID con una referencia del 20 % al 40 % del nivel. El control PID cableado presenta un tiempo de estabilización de 23.7s, un error en estado estable de 0.86 % y un porcentaje de sobreimpulso de 3.775 %. En cambio, el control PID inalámbrico muestra un tiempo de estabilización de 20.5s, un error en estado estable de 2.36 % y un porcentaje de sobreimpulso de 4.65 %.

Los resultados indican que el control inalámbrico tiende a presentar un menor rendimiento que el control cableado. De las 3 propiedades que son analizadas (T_s , e_{ss} y $\%OS$) 2 siempre presentan mejores resultados en el control cableado, mientras que solo 1 favorece al control inalámbrico. Por ejemplo: el control inalámbrico muestra un menor

tiempo de estabilización de $20.5s$ para un valor de referencia del 40% del tanque, pero con valores menores en cuanto al error en estado estable y porcentaje de sobreimpulso (2.36% y 4.65% respectivamente). De igual manera, el control inalámbrico muestra un menor valor de error en estado estable con una referencia del 60% del nivel del tanque, pero con valores menos eficientes para las otras 2 propiedades.

TABLA 6.2: Resultados del control PID para el nivel (Parámetros de TIA PORTAL)

Controlador	Referencia	T_s	e_{ss}	$\%OS$
PID Cableado	0 - 20 %	$25.1s$	1.78%	4.15%
PID Cableado	20 - 40 %	$23.7s$	0.86%	3.775%
PID Cableado	40 - 60 %	$19.7s$	1.3%	2.73%
PID Inalámbrico	0 - 20 %	$27.1s$	2.13%	3.75%
PID Inalámbrico	20 - 40 %	$20.5s$	2.36%	4.65%
PID Inalámbrico	40 - 60 %	$21.7s$	1.008%	2.95%

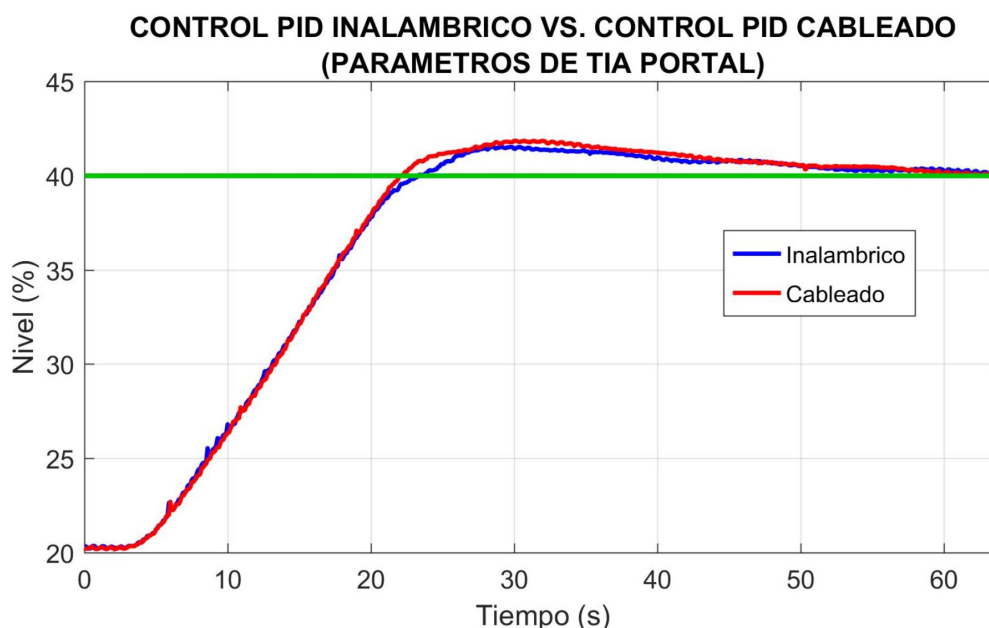


FIGURA 6.2: Nivel - Control PID inalámbrico VS. control PID cableado (parámetros de TIA PORTAL)

Control PI del nivel con parámetros de MATLAB

Los resultados obtenidos para el control PI del nivel (ver tabla 6.3) muestran los valores respectivos de tiempo de estabilización (T_s), porcentaje de sobreimpulso ($\%OS$) y error en estado estable (e_{ss}) para 3 niveles de referencia establecidos. La FIGURA 6.3 muestra el comportamiento de los controladores PI con una referencia del 20 % al 40 % del nivel. El control PI cableado presenta un tiempo de estabilización de 23.7s, un error en estado estable de 0.86 % y un porcentaje de sobreimpulso de 3.775 %. En cambio, el control PI inalámbrico muestra un tiempo de estabilización de 22.4s, un error en estado estable de 0.965 % y un porcentaje de sobreimpulso de 5.125 %.

Los resultados del control PI indican valores valores mas favorables de manera cableada que inalámbricamente. EL control cableado presenta un mayor tiempo de estabilización que el control inalámbrico para un valor de referencia del 20 % del nivel del tanque. Sin embargo, el control inalámbrico tiene un error de 2.469 % y un porcentaje de sobreimpulso de 4.15 %. Es decir, valores mayores que el control cableado. En el caso con referencia del 60 % del nivel, 2 de las 3 propiedades analizadas favorecen al control cableado. El control inalámbrico tiene un error en estado estable de 0.35 %, el cual es menor al del control cableado. No obstante, el método inalámbrico también muestra tiempo de estabilización y porcentaje de sobreimpulso mayores de 21.3s y 3.17 % respectivamente.

TABLA 6.3: Resultados del control PI para el nivel (Parámetros de TIA PORTAL)

Controlador	Referencia	T_s	e_{ss}	$\%OS$
PI Cableado	0 - 20 %	25.1s	1.78 %	4.15 %
PI Cableado	20 - 40 %	23.7s	0.86 %	3.775 %
PI Cableado	40 - 60 %	19.7s	1.3 %	2.73 %
PI Inalámbrico	0 - 20 %	22.8s	2.469 %	11.35 %
PI Inalámbrico	20 - 40 %	22.4s	0.965 %	5.125 %
PI Inalámbrico	40 - 60 %	21.3s	0.35 %	3.17 %

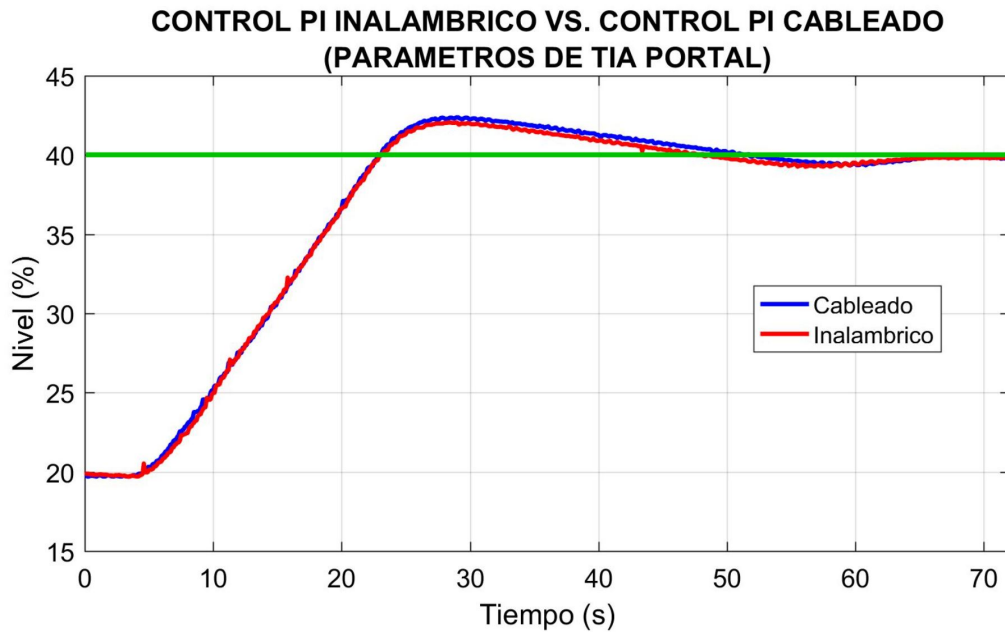


FIGURA 6.3: Nivel - Control PI inalámbrico VS. control PI cableado (parámetros de TIA PORTAL)

6.2 Control en tiempo real de la Temperatura

Los resultados obtenidos para la variable de temperatura (ver tabla 6.4) muestran los valores respectivos de tiempo de estabilización (T_s), porcentaje de sobreimpulso ($\%OS$) y error en estado estable (e_{ss}) para la temperatura de referencia establecida. La FIGURA 6.4 muestra el comportamiento de los controladores PID con una referencia de 20 °C a 40 °C de temperatura. El control PID cableado presenta un tiempo de estabilización de 633.4s, un error en estado estable de 0.413% y un porcentaje de sobreimpulso de 0.675%. En cambio, el control PI inalámbrico muestra un tiempo de estabilización de 637.3s, un error en estado estable de 0.7995% y un porcentaje de sobreimpulso de 1.025%.

El comportamiento de la señal de control inalámbrica también muestra un lapso de tiempo donde la temperatura se reduce a 0 de manera abrupta. Este bajón de temperatura

no se debe la ley de control implementada, sino a una pérdida de comunicación repentina ocurrida entre los módulos inalámbricos marca Siemens SCALANCE W774 y W734. La transmisión de datos puede verse interrumpida debido a que el proceso de temperatura es un proceso largo y duradero, por lo que mantener la comunicación inalámbrica de manera continua puede demandar al esfuerzo por parte de los equipos. Esta interrupción ocurrió en 3 de 5 pruebas realizadas, y en las 3 últimas pruebas realizadas.

TABLA 6.4: Resultados del control PID para la temperatura (Parámetros de MATLAB)

Controlador	Referencia	T_s	e_{ss}	%OS
PID Cableado	20 °C - 40 °C	633.4s	0.413 %	0.675 %
PID Inalámbrico	20 °C - 40 °C	637.3s	0.7995 %	1.025 %

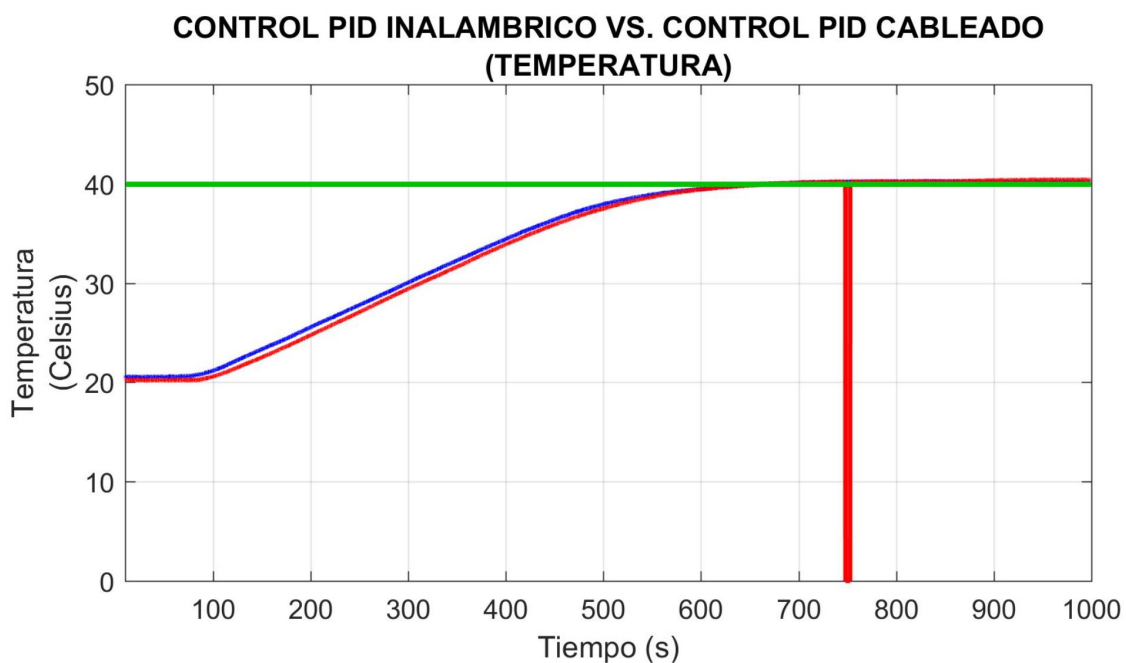


FIGURA 6.4: Temperatura - Control PID inalámbrico VS. control PID cableado

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El desarrollo de este trabajo de tesis se enfoca en el diseño e implementación de controladores inalámbricos para el nivel y temperatura del tanque superior de la planta multipropósito. Esta implementación se realiza con los módulos recientemente adquiridos para comunicación inalámbrica marca Siemens: punto de acceso SCALANCE W774 y cliente SCALANCE W734. Se plantearon 3 controladores inalámbricos para la variable nivel: un control PID con parámetros extraídos de MATLAB, un control PID con parámetros de TIA PORTAL, y un control PI con parámetros de MATLAB. Y también 1 control PID con parámetros de MATLAB para la variable de temperatura.

Lo primero que se realizó es estimar los modelos dinámicos de los procesos de manera experimental. El modelo estimado para el nivel se ajusta en un 90 % a su curva de reacción, mientras que el modelo estimado para la temperatura se ajusta en un 80 % a su curva de reacción. Es decir, las estimaciones son aproximaciones fieles a los procesos de la planta real.

Haciendo uso de los modelos de los procesos previamente determinados, se procedió a simular los sistemas de control PID y PI que serían posteriormente implementados. Se hallaron los parámetros de sintonización proporcional, integral y derivativo usando las funciones de autosintonización de MATLAB y TIA PORTAL. La simulación de los sistemas de control PID y PI corroboró el diseño del controlador.

Empleando las ganancias determinadas en la etapa de simulación de los sistemas de control, se implementó el bloque "PID_Compact" de TIA PORTAL en el PLC S7-1500. Las salidas de los procesos inalámbricos del nivel y de la temperatura se establecieron correctamente en sus respectivos valores de referencia. Para conseguir la transmisión de datos de sensores y actuadores a PLC se estableció como maestro de la topología al PLC S7-1500 y como cliente a su periferia descentralizada ET-200. Este módulo es al que va conectada la instrumentación y cumple con la estructura de un sistema de control inalámbrico.

En un inicio, se dificultó la comunicación entre los módulos inalámbricos debido a su configuración predeterminada. Se utilizaron las herramientas de TIA PORTAL y PST para la configuración de los módulos inalámbricos. De esta forma, se estableció una frecuencia de 5 GHz con el fin de evitar colisiones con la banda de 2.4 GHz utilizada por UTEC. Además, se colocaron las direcciones IP respectivas para incluir a los módulos dentro de la red de los equipos del laboratorio.

Al comparar los resultados experimentales obtenidos con las topologías de comunicación establecidas, se puede concluir lo siguiente: En el caso del nivel, los sistemas de control inalámbricos presentan una eficiencia generalmente inferior a sus contrapartes cableadas, tanto para los parámetros extraídos de MATLAB como los de TIA PORTAL. Aun así, el control inalámbrico para el nivel llega a alcanzar mejores valores de tiempo de estabilización y porcentaje de sobreimpulso en la minoría de los casos. Sin embargo, esta mejora en sus propiedades se debe a que siempre sacrifican otra propiedad en el camino, siendo en su mayoría el error en estado estable y el porcentaje de sobreimpulso.

En el caso de la temperatura, el control cableado presenta una mejor eficiencia en cuanto a tiempo de estabilización, porcentaje de sobreimpulso y error en estado estable que el control inalámbrico. Además, los resultados de temperatura muestran un lapso de tiempo en que la transmisión de datos entre PLC, sensores y actuadores se perdió. Debido a esto, el control inalámbrico con los módulos Siemens presenta el riesgo de

pérdidas de datos, sobretodo para procesos de gran duración. Aun así, se debe rescatar que la comunicación inalámbrica es capaz de restablecerse. Por lo que las pérdidas en las señales de control no son necesariamente permanentes.

Posibles razones de esta falla de comunicación pueden ser las condiciones ambientales donde se implementa el sistema de control, o la distancia de separación entre punto de acceso y cliente. También es posible la existencia de interferencia generada por otros equipos dentro de la banda de frecuencia de 5GHz. Diversa instrumentación ubicada dentro de UTEC es capaz de producir ruido si es que sus señales se cruzan con las señales de los sistemas de control. Una solución es revisar los canales de la banda de frecuencia utilizada, y escoger el menos congestionado. De la misma forma, se pueden integrar otros equipos o modelos de antenas compatibles con los módulos inalámbricos para aumentar la cobertura de red, o crear mas puntos de acceso a la misma. Con mas puntos de acceso, la información tendría mas canales por donde viajar, y por lo tanto, se reduce el riesgo de fallas de comunicación y retardos.

Otro caso que cabe mencionar es el de tiempos muertos. Se comprobó mediante la toma de muestras que los tiempos muertos al inicio no afectan al control inalámbrico, pues este inicia una vez accionada la planta de estudio. Por otro lado, un tiempo muerto largo entre escalones de nivel si puede ocasionar impedimentos en la emisión y recepción de datos. Un tiempo muerto mayor significa un control mas prolongado. En otras palabras, incrementa el riesgo de perdida de conexión entre emisor y receptor tal y como se muestra en el comportamiento del control PID inalámbrico para la temperatura, ver FIGURA 6.4.

Como trabajo a futuro, se puede analizar el comportamiento del control inalámbrico frente a distintas condiciones. Se puede analizar el comportamiento de las variables a controlar frente a cambios en el retardo en el envío de datos, o a una distancia de separación mayor entre punto de acceso y cliente. También se puede analizar el rendimiento del sistema de control frente a diferentes topologías de red. Es recomendable tomar valores de los actuadores en conexión inalámbrica con el fin de analizar su desempeño y obtener

un mejor análisis. Finalmente, es conveniente agregar el análisis de más variables como el caudal del agua, y la presión en tuberías y tanques-depósitos.

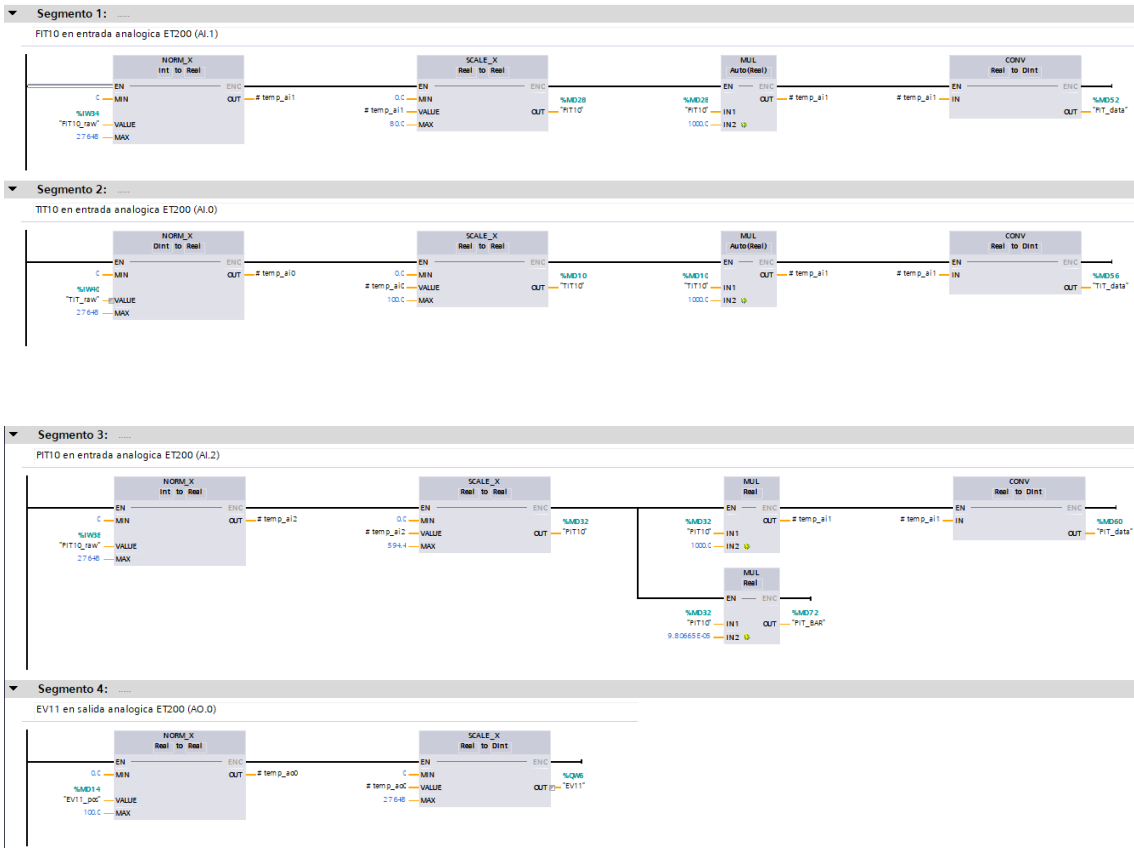
Este trabajo es de plataforma abierta, por lo que cualquier tecnología de terceros que sea compatible puede ser utilizada para la implementación. Los módulos inalámbricos SCALANCE marca Siemens utilizan el protocolo de comunicación Profinet para el intercambio de información. A diferencia de otros protocolos de comunicación como Profibus, Profinet se basa en el estándar Ethernet, lo cual lo hace compatible con equipos de otras marcas. Para poder implementar los sistemas de control usando equipos de marcas externas, se tendría que configurar dichos equipos para que pertenezcan a la misma red que los equipos SCALANCE. Habría que asegurarse que el protocolo de comunicación a utilizar es Profinet. Además, si es que se usa la misma topología que en este trabajo, se necesitaría una periferia descentralizada similar al ET-200 a donde vayan conectados todos los actuadores y sensores.

También se recomienda explorar el tema de ciberseguridad. En la actualidad, los sistemas de control suelen ser el enfoque de muchos ataques de terceros ajenos a la red de comunicación. Algunas de las medidas más conocidas para prevenir invasiones a redes inalámbricas suelen ser la codificación y decodificación de información, el cifrado de la red, o incluso el filtrado de direcciones MAC. Con este último, equipos que sean desconocidos por la empresa, o por la propia red de comunicación, tienen restringido el acceso a la misma. Otra medida de ciberseguridad es la restricción del acceso a internet durante ciertas horas del día. Específicamente, cuando los sistemas de control y equipos no estén en operación.

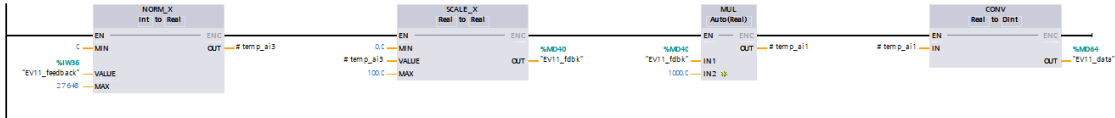
Este trabajo tiene como objetivo servir de base para otros estudios futuros utilizando otros medios inalámbricos, y/o algoritmos de mayor complejidad para las variables de la Planta de Estudio Multipropósito. Además, este trabajo también puede cumplir la función de guía para sesiones de laboratorio en cursos de control automático de la Universidad de Ingeniería y Tecnología (UTEC).

ANEXOS

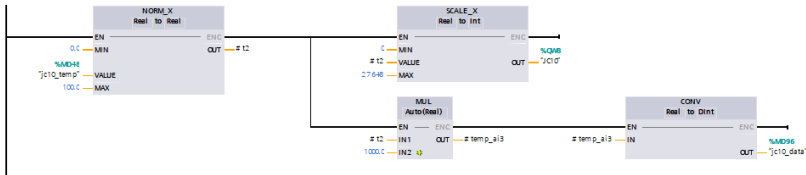
Anexo 1 - Programa en TIA PORTAL



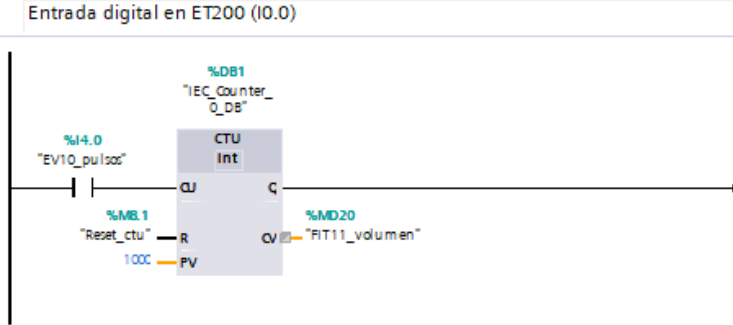
Segmento 5: EV11 feedback en entrada analogica ET200 (AI.4)



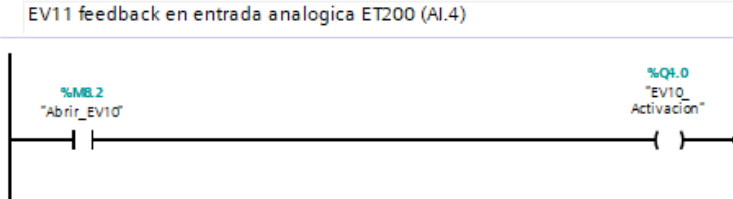
Segmento 6: EV11 feedback en entrada analogica ET200 (AI.4)



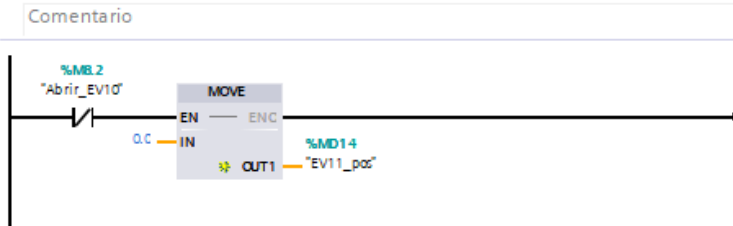
Segmento 7: Entrada digital en ET200 (IO.0)



Segmento 8: EV11 feedback en entrada analogica ET200 (AI.4)

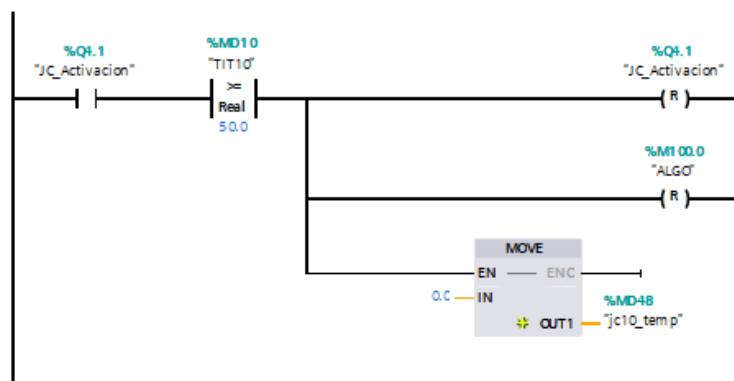


Segmento 9: Comentario



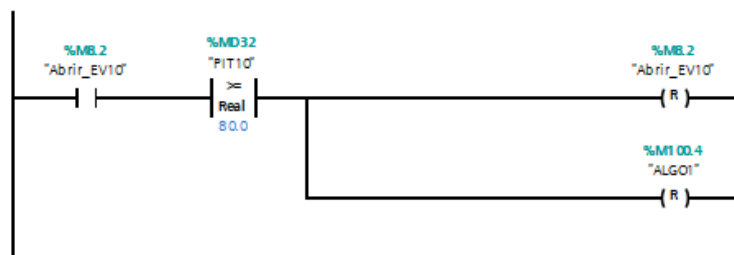
▼ Segmento 10:

Comentario



▼ Segmento 11:

Comentario



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Sapiensman, “Conceptos del Control Automático Industrial.”
- [2] J. Monsalve and A. Londoño, “Redes Inalámbricas para el Control de Procesos Industriales en Tiempo Real,” *Revista Politécnica ISSN*, vol. 7, 2013.
- [3] E. Guzman, “Redes Inalámbricas,” *Univeridad Nacional de Educacion*, 2018.
- [4] Siemens, “Industrial Wireless LAN Scalance W774-1 / W734-1 Operation Manual,” 2017.
- [5] R. Serrano, “Desarrollo de un algoritmo de control pid utilizando microcontroladores stm32 cortex 4 para robot balancín mediante comunicación inalámbrica wifi,” *Facultad de Educación Técnica para el Desarrollo - Universidad Católica de Santiago de Guayaquil*, 2019.
- [6] P. Rodriguez, “Diseño y simulación de un sistema scada para el control y monitoreo de reservorios de agua potable usando un algoritmo de control mediante una red inalámbrica en arequipa,” *Facultad de Ciencias e Ingenierías Físicas y Formales - Universidad Católica de Santa María*, 2019.
- [7] J. Vasconez, “Diseño e implementación de un sistema de control y monitoreo inalámbrico mediante radiofrecuencia, bluetooth y sms en aplicaciones domóticas,” *Sistema de Posgrado Maestría en Telecomunicaciones - Universidad Católica de Santiago de Guayaquil*, 2019.

- [8] Monsalve, J and Arias, A and Mejía, J, “Desempeño de Redes Inalámbricas y Redes Industriales Inalámbricas en Procesos de Control en Tiempo Real Bajo Ambientes Industriales,” 2015.
- [9] Srdanovic, V and Boter, O and Ruiz, S, “Modelado e identificación de un sistema electromecánico y diseño del control pid para gobernar inalámbricamente el desplazamiento de un objeto móvil,” 2017.
- [10] Cisco, “Cisco products.”
- [11] Siemens, “iFeatures – special industrial functions for wireless applications,” 2019.
- [12] C. Valencia, “Evaluación de tecnologías inalámbricas en redes de Área doméstica para obtener la curva característica de carga en edificios inteligentes,” *Universidad Politécnica Salesiana*, 2019.
- [13] S. Aranda and A. Rojas, “Implementation of Logical Subnets using VLAN ID in an IWLAN through VAP in Wireless PROFINET,” *Departamento de Ingeniería Electrónica - Universidad de Ingeniería y Tecnología (UTEC)*, 2020.
- [14] G. C. Perez, “Diseño e implementación de bloques de control predictivo basado en modelos para procesos industriales de una planta multipropósito,” *Universidad de Ingeniería y Tecnología (UTEC)*, 2019.
- [15] C. Smith and A. Corripio, “Control automático de procesos,” *Universdiad Santo Tomás*, 1991.
- [16] C. Kadu and C. Patil, “Design and Implementation of Stable PID Controller for Interacting Level Control System,” *International Conference on Communication, Computing and Virtualization*, 2016.
- [17] Picuino, “Control PID,” 2021.
- [18] M. Toledano, “Control robusto,” 2017.

- [19] C. Bolivar, R. Keriam, and G. Baez, "Control robusto del sistema de bola y viga," *Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology*, 2014.
- [20] I. Rueda and C. Sandoval, "Comunicación inalámbrica profinet mediante el uso de equipos scalance," *Universdiad Santo Tomás*, 2019.
- [21] J. Technologies, "Network protocols handbook," 2005.
- [22] N. Ayllon, "What is PROFINET? - PROFINET Explained," 2021.
- [23] L. Castillo, A. Rojas, and V. Murray, "Planta Industrial Multipropósito para Control e Instrumentación," 2017, Perú patent 523-2017 DIN.
- [24] J. Pampamallco, "Diseño e implementación de controladores basados en lógica difusa para el control de procesos de la planta multipropósito," *Universidad de Ingeniería y Tecnología (UTEC)*, 2019.