

Instalación y Puesta en Marcha de un Sensor de Flujo Industrial SIEMENS en el Laboratorio de  
Control e Instrumentación de la E3T-UIS

Daniel Camacho Pineda

Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero Electrónico

Director

Ricardo Alzate Castaño

Doctorado en Ingeniería Informática y Automática

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Bucaramanga

2019

### **Dedicatoria**

A mi compañera de vida, por estar a mi lado a pesar de todas las adversidades, por mostrarme siempre la otra cara de la moneda, por ser la luz entre tanta oscuridad.

A mi madre que, con su sabiduría, amor y sobre todo paciencia, siempre supo guiarme y mantenerme en el camino correcto.

A mi padre que siempre me apoyó incondicionalmente en todo y siempre creyó en mí. Esto es para ellos.

Esto es para ellos.

### **Agradecimientos**

Quiero agradecer en primera instancia a mi director, el profesor Ricardo Alzate, por su orientación, su esfuerzo y su incondicional apoyo durante este proceso, pues fueron claves para culminar este proyecto de manera exitosa. Gracias por todo lo que aprendí.

A mi familia por su amor, su acompañamiento y su guía, esto es parte de su legado.

A mi compañera de vida porque esta travesía no hubiera sido posible sin ella y esto es un logro compartido. ¡Lo logramos!

De igual manera a toda la comunidad UIS, a los profesores de la E3T y a quienes de una u otra manera influyeron para la realización de este proyecto.

Gracias.

## **Tabla de Contenido**

|                                                          |           |
|----------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Introducción</b>                                      | <b>14</b> |
| <b>1. Objetivos</b>                                      | <b>21</b> |
| <b>2. Adecuación de prototipo para medición de flujo</b> | <b>22</b> |
| 2.1. Variador de velocidad para electrobomba             | 25        |
| 2.2. Elementos de instrumentación adicionales            | 27        |
| 2.3. Prototipo final para pruebas                        | 28        |
| <b>3. Operación en lazo abierto</b>                      | <b>31</b> |
| 3.1. Configuración del sensor de flujo                   | 31        |
| 3.2. Determinación del rango de actuación                | 32        |
| 3.2.1. Punto nominal de operación                        | 33        |
| 3.3. Protocolo de inicio del sistema                     | 35        |
| 3.4. Selección parámetro de perturbación                 | 36        |
| <b>4. Operación en lazo cerrado</b>                      | <b>38</b> |
| 4.1. Medición de nivel                                   | 38        |
| 4.2. Control de nivel en cascada                         | 42        |
| 4.3. Control de nivel simple                             | 43        |

|                                                               |           |
|---------------------------------------------------------------|-----------|
| INSTALACIÓN DE SENSOR INDUSTRIAL EN LABORATORIO DE LA E3T     | 7         |
| 4.4. Operación automatizada del sistema                       | 45        |
| 4.5. Sistema automatizado para recirculación de aguas lluvias | 48        |
| <b>5. Recomendaciones</b>                                     | <b>52</b> |
| <b>6. Trabajo futuro</b>                                      | <b>52</b> |
| <b>7. Conclusiones</b>                                        | <b>53</b> |
| <b>Referencias Bibliográficas</b>                             | <b>55</b> |
| <b>Apéndices</b>                                              | <b>60</b> |

### Lista de Figuras

|            |                                                                                 |    |
|------------|---------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1.  | Diagrama de sistema de recolección de Agua Lluvia en la E3T                     | 18 |
| Figura 2.  | Unidad de Entrenamiento en Automatización UEA                                   | 19 |
| Figura 5.  | Diagrama de bloques para circuito variador de velocidad                         | 25 |
| Figura 6.  | Diagrama esquemático del circuito variador de velocidad                         | 27 |
| Figura 8.  | Diagrama <i>P&amp;ID</i> del prototipo acondicionado para control de flujo      | 29 |
| Figura 9.  | Disposición real de elementos para prototipo final                              | 30 |
| Figura 10. | Interfaz de usuario del transmisor SITRANS M F MAG5000                          | 32 |
| Figura 12. | Lazo de control para mantener un flujo constante                                | 35 |
| Figura 13. | Diagrama <i>GRAFCET</i> del protocolo de inicio del sistema                     | 37 |
| Figura 14. | Respuesta en lazo abierto perturbado para: (a) $\phi$ y (b) $A1$                | 39 |
| Figura 15. | Relación entre flujo y altura: (a) $\phi(t)$ ; (b) $h_2(t)$                     | 41 |
| Figura 16. | Control de nivel en cascada a partir de medidas de flujo                        | 43 |
| Figura 17. | Respuesta de lazo en cascada perturbado para: (a) $h_2$ , (b) $\phi$ y (c) $A1$ | 44 |
| Figura 18. | Control de nivel a partir de medidas de nivel                                   | 44 |
| Figura 19. | Respuesta de lazo simple perturbado para: (a) $h_2$ , (b) $\phi$ y (c) $A1$     | 46 |
| Figura 20. | Interfaz HMI para operación del sistema                                         | 47 |
| Figura 21. | <i>GRAFCET</i> ampliado para operación del sistema de tanques                   | 49 |

|            |                                                                      |    |
|------------|----------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 22. | <i>P&amp;ID</i> modificado para recirculación de aguas lluvias       | 51 |
| Figura 23. | Diagrama de conexiones entre PLC y dispositivos                      | 61 |
| Figura 24. | Creación de proyecto en TIA Portal                                   | 62 |
| Figura 25. | Agregar dispositivo                                                  | 63 |
| Figura 26. | Propiedades de dispositivo                                           | 64 |
| Figura 27. | Ventana de comunicación entre dispositivos                           | 65 |
| Figura 28. | Iniciar programación                                                 | 66 |
| Figura 29. | Lectura de señal analógica                                           | 68 |
| Figura 30. | Ventana de carga de programa                                         | 69 |
| Figura 31. | Configuración de imagen para HMI                                     | 70 |
| Figura 32. | Creación de fichero para toma de datos por medio de USB              | 71 |
| Figura 33. | Generación de bloque de control PID                                  | 72 |
| Figura 34. | Generación de bloque organizacional tipo <i>interrupción cíclica</i> | 73 |
| Figura 35. | Bloque de control PID en rutina de programa                          | 74 |
| Figura 36. | Ventana para sintonización automática de bloque PID                  | 75 |
| Figura 37. | Parada de emergencia del sistema                                     | 75 |
| Figura 38. | Lógica de sensor capacitivo situado en tanque principal              | 76 |
| Figura 39. | Manejo y control de relés vinculados a elementos eléctricos          | 76 |
| Figura 40. | Lectura y calibración de señal del transmisor de nivel ultrasónico   | 77 |
| Figura 41. | Lógica para accionar alarma de niveles críticos en $h_2$             | 77 |

|            |                                                                      |    |
|------------|----------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 42. | Condiciones que accionan alarma del prototipo                        | 78 |
| Figura 43. | Lectura y calibración de señal del transmisor de flujo               | 79 |
| Figura 44. | Lógica generada para desplegar en HMI valores de flujo mínimo        | 79 |
| Figura 45. | Tratamiento de señal PID para control en cascada y sencillo de nivel | 80 |
| Figura 46. | Tratamiento de señal PID para control en cascada de nivel            | 80 |
| Figura 47. | Tratamiento de señal PID para control sencillo de flujo              | 80 |
| Figura 48. | Lógica para bomba a máxima potencia sin control                      | 81 |
| Figura 49. | Lógica para selección exclusiva de controlador                       | 81 |
| Figura 50. | Automatización protocolo de inicio                                   | 82 |

### **Lista de Apéndices**

|                                               | <b>pág.</b> |
|-----------------------------------------------|-------------|
| Apéndice A. Configuración PLC Siemens S7-1500 | 60          |
| Apéndice B. Rutinas de programación LADDER    | 74          |

## RESUMEN

**Título:** Instalación y Puesta en Marcha de un Sensor de Flujo Industrial SIEMENS en el Laboratorio de Instrumentación y Control de la E3T-UIS.<sup>1</sup>

**Autor:** Daniel Camacho Pineda <sup>2</sup>

**Palabras clave:** Automatización de procesos, medición de flujo, sistema de tanques, variador de velocidad monofásico.

### Descripción:

El presente trabajo aborda la instalación, adecuación y configuración para un sensor de flujo industrial SIEMENS en un sistema de tanques acoplados cilíndricos del *Laboratorio de Control e Instrumentación* de la E3T-UIS. Se realizaron las adecuaciones necesarias para incorporar en la estructura de un prototipo existente las medidas del flujo de líquido recirculante entregadas por un sensor industrial. De ellas, la más importante correspondió con el diseño e implementación de un circuito electrónico de potencia para regular la velocidad de operación de una electrobomba monofásica, encargada de realizar la recirculación del líquido. A partir de ello, fue posible constituir un lazo de control en cascada para el control indirecto de nivel a partir de medidas de flujo. Resultados experimentales muestran que la topología de control en cascada otorga mayor robustez al sistema para regular el nivel ante perturbaciones en las resistencias hidráulicas. Sin embargo, un control simple con medida directa de nivel representa una alternativa de menor costo para realizar dicha tarea. Actividades complementarias a los desarrollos presentados incluyen la inclusión de la servoválvula proporcional para manipulación del caudal de entrada al *tanque 1* y el correspondiente análisis de esquemas de control multilazo, experimentales, a través de rutinas de programación desarrolladas en el TIA PORTAL.

---

<sup>1</sup> Trabajo de grado

<sup>2</sup> Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y telecomunicaciones. Director: Ricardo Alzate Castaño, Doctorado en Ingeniería Informática y Automática.

## ABSTRACT

**Title:** Installation and Setting-up of an Industrial Flow-metter at the Control and Instrumentation Laboratory of the E3T-UIS<sup>3</sup>

**Author:** Daniel Camacho Pineda<sup>4</sup>

**Keywords:** PROCESS AUTOMATION, FLOW METERING, COUPLED-TANK SYSTEM, SINGLE-PHASE SPEED VARIATOR.

**Description:**

In this work the installation and setting-up of an industrial flow-meter on a system of cylindrical coupled-tanks located at the *Control and Instrumentation Laboratory* of the E3T-UIS, is addressed. In particular, some work has been performed to adequate the existing structure into the new requirements of getting accurate flow measurements, being the most representative the design and implementation of a power electronics circuit to handle the velocity of a single-phase pump, recirculating the water flow across the system. Then, a control loop was configured to perform indirect level regulation by means of flow measurements, in a cascaded scheme. This has been further compared with a single loop composed of direct level measurements, unveiling high robustness under changes on nominal parameter values (i.e. hydraulic resistances) for the cascaded configuration. Nevertheless, the later (single loop) constitutes a cheap and efficient alternative to accomplish (also) the required task. Ongoing work includes the use of servovalves to handle input flows at the feeding tanks, allowing to analyze, in practice, the effect of multivariable loops, programmed in PLC via the SIEMENS TIA PORTAL resources.

---

<sup>3</sup> Bachelor Thesis

<sup>4</sup> Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y telecomunicaciones. Director: Ricardo Alzate Castaño, Doctorado en Ingeniería Informática y Automática.

## **Introducción**

Cada vez más, se ratifica la necesidad de automatizar y controlar procesos que van desde tareas simples y poco tecnificadas, hasta procedimientos elaborados que demandan soluciones con gran cantidad de recursos técnicos y tecnológicos. La creciente demanda de productividad y calidad, así como la gran cantidad de avances en las áreas de tecnologías de la información, las comunicaciones móviles y el comercio electrónico (Crespi and Pianta, 2008), han impulsado una carrera contra factores decisivos como el aumento en los costos laborales, que incluyen el crecimiento en salarios, costos de seguridad social y el envejecimiento de la mano de obra. Según la IFR (International Federation of Robotics), se estima que, a partir del 2018 se presente un aumento anual del 14 % en la demanda de robots e instalaciones automatizadas a nivel mundial (Federation of Robotics , IFR).

Este comportamiento no es ajeno al panorama nacional. En Colombia, la producción real de la industria presentó en 2016 un crecimiento del 3.5 % frente al 1.8 % registrado en el 2015 (DANE, 2017b). Tradicionalmente, la economía colombiana se ve altamente influenciada por la industria petrolera, que aporta un 20 % de las exportaciones del país, seguida por el sector de alimentos y bebidas, aportando un 12 % de las exportaciones (DANE, 2017a). En todos estos procesos, la medición del flujo o caudal de un fluido ya sea líquido o gas, es un parámetro crítico; su importancia radica en la posibilidad que le da al interesado de saber que “el insumo correcto está en el lugar correcto y en el momento adecuado”. De la misma manera, es posible vincular esta medición a tareas sencillas como mantener un fluido en movimiento o simplemente un balanceo de tanques. Sin

embargo, algunas otras aplicaciones requieren la habilidad de conducir flúidos con una precisión tal que de esto depende la calidad del producto, la seguridad y la salud en el ambiente de operación y, en últimas, la diferencia entre obtener una ganancia en el proceso o hacer de él una completa pérdida.

Ante esta situación, las entidades de educación superior se ven abocadas a una demanda de profesionales debidamente calificados para ejercer cargos y roles dentro de esta dinámica. Sin embargo, debido a que la industria de la instrumentación maneja costos que son consistentes con el sector productivo en el cual se emplean, resulta generalmente oneroso para estas entidades actualizar equipos ya dispuestos o adquirir nuevas tecnologías aplicables a la industria que sirvan y estén a disposición de los estudiantes para su adecuada formación. Debido a esto, a nivel mundial se han desarrollado diversas iniciativas que buscan la creación de laboratorios de bajo costo para universidades. Por ejemplo, se destaca el trabajo de la profesora Yu QinQin y su iniciativa *Kepler Tech Lab* (Yu and Dahl, 2017) que busca desarrollar laboratorios de bajo costo de nivel universitario en Rwanda, Africa. Asimismo, se destacan los trabajos del profesor Kevin Passino (, iSTEM) en la Universidad Estatal de Ohio, del profesor Mahbub Ahmed (Ahmed et al., 2015) en la Southern Arkansas University, de la profesora Rebecca Reck (Reck, 2015) en la Universidad de Illinois y del profesor Juan Albino (Mendez et al., 2006) en la Universidad de la Laguna, entre otros.

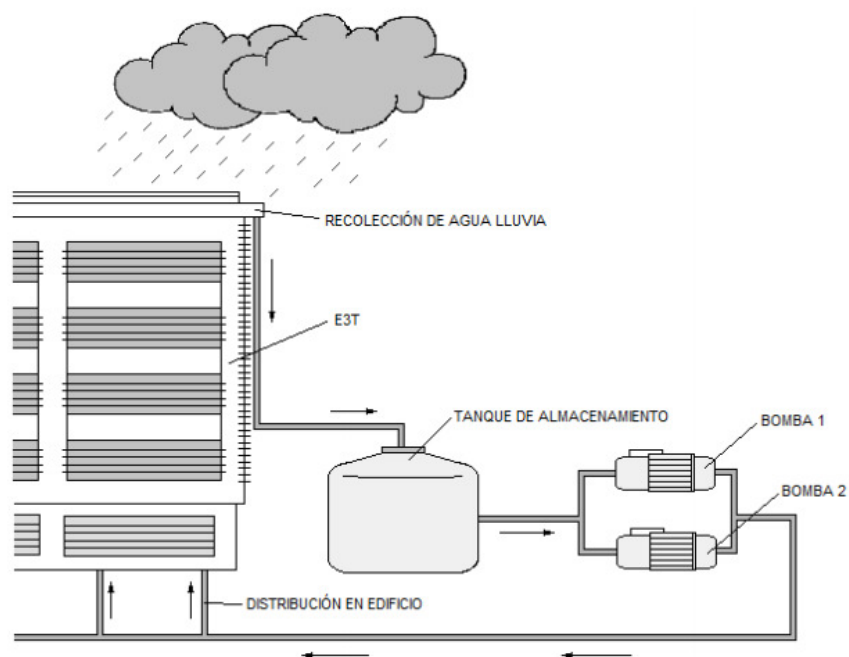
Particularmente, la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones E3T cuenta con un espacio (aula 209 - Edificio 27: Laboratorio de Alta Tensión) destinado para actividades prácticas en el área del Control y la Instrumentación. Actualmente el laboratorio cuenta con dos plantas adecuadas para realizar tareas de análisis y control en un sistema de tanques en

casacada (Peñaranda et al., 2014) y un motor de corriente alterna (Muñoz Suárez et al., 2013) y se están construyendo cuatro módulos más. Otros trabajos relacionados en afinidad con el laboratorio incluyen: “Planeación, diseño y realización del laboratorio de instrumentación electrónica para la E3T” (Novoa Díaz and Prada Mejía, 2001), “Sistema de gestión para un prototipo de sistema SCADA en el laboratorio de instrumentación electrónica de la E3T” (Ramires Vega and Torres Sánchez, 2007), “Diseño del proyecto para implementación de una sala TIA y adaptación de un proceso industrial para desarrollo de prácticas de entrenamiento en las áreas de instrumentación, automatización y control” (Neira Duarte and Prada Medina, 2008), “Instrumentación y puesta en marcha de un control de nivel de líquidos empleando un PLC ALLEN-BRADLEY” (Atuesta Robledo and Velandia Suárez, 2015) y “Control de nivel para un sistema de tanques en cascada empleando un PLC SIEMENS S7-1200” (Acelas and Mendoza Díaz, 2016).

De otro lado, la creciente población en zonas urbanas hace necesaria la adaptación de nuevas metodologías para uso de recursos, no sólo desde el punto de vista energético sino también medio ambiental. Al respecto se puede considerar al agua como uno de los bienes más preciados y por tanto, en la medida que sea posible, deberá aplicarse la tecnología para preservar este bien común de la humanidad. Dichos conceptos de sostenibilidad han sido adoptados recientemente en la Universidad Industrial de Santander a través de la línea de investigación en Edificaciones Sostenibles desarrollada en el seno del grupo de investigación GISEL de la E3T (Flórez Reyes, 2014; Osma Pinto, 2016). Como resultado, el nuevo edificio de ingeniería eléctrica posee un sistema de automatización en términos de iluminación y ventilación (natural y acondicionada), que reduce ostensiblemente su huella de carbono, adicional a la incorporación reciente de fuentes de energía

renovable principalmente de tipo solar fotovoltaica. Asimismo, el proyecto del *edificio verde* contiene un sistema de recolección y bombeo de agua lluvia para uso en sanitarios y lavado en cuartos de aseo. En su condición actual, el sistema posee dos motobombas que funcionan alternadamente para impulsar el agua colectada hacia la red de tuberías del edificio, todo esto mediante un control simple del tipo encendido-apagado (ver Fig. 1). Motivados en el caso anterior, en (Atuesta Robledo and Velandia Suárez, 2015) y (Acelas and Mendoza Díaz, 2016) se desarrollaron trabajos de grado al interior de la E3T-UIS en el contexto de sistemas automatizados para el control de nivel de líquido en tanques, empleando instrumentación industrial. Dichos trabajos, partieron de una infraestructura existente que se ha modificado para permitir actualmente un lazo simple de recirculación de líquidos. A pesar de ello, existen algunos inconvenientes para asegurar niveles de presión constante en las tuberías del circuito. El presente trabajo de grado busca complementar los anteriores, abordando el problema de mantener constante los niveles de flujo en el sistema de recirculación, como preámbulo a una potencial automatización del sistema de recolección de aguas lluvias del edificio verde de la E3T.

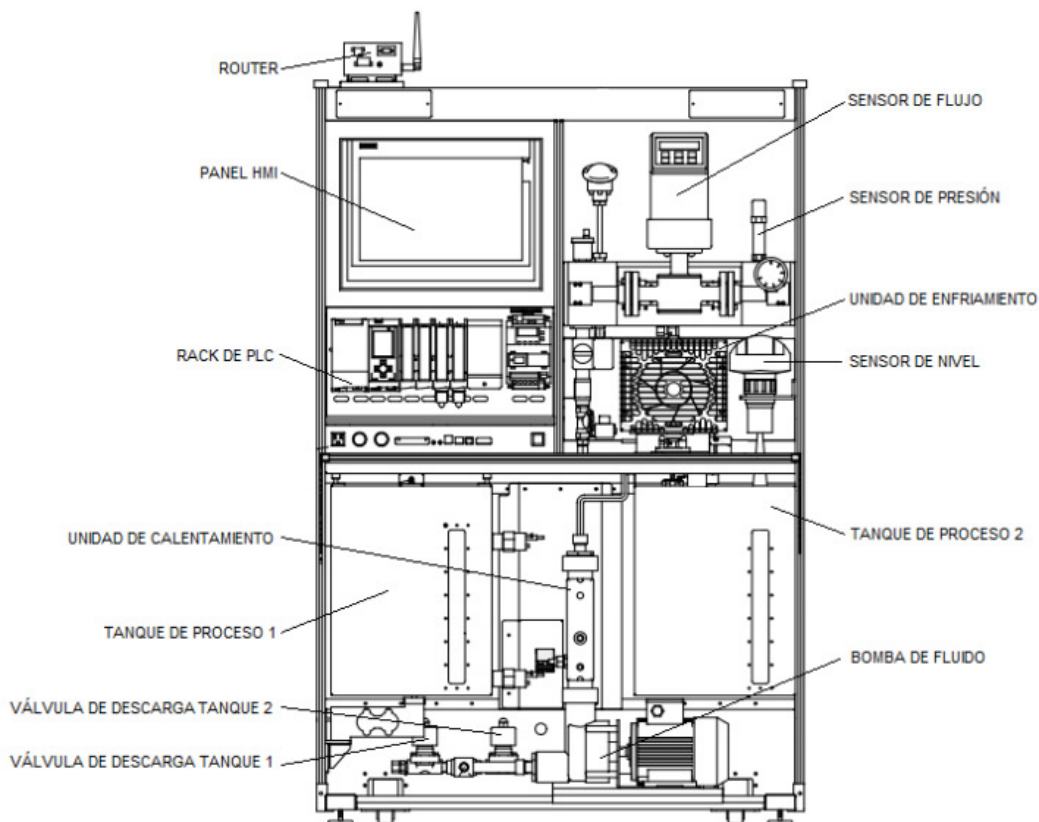
En particular, se tomará como modelo de referencia un banco de laboratorio desarrollado en La Universidad de la Salle de la ciudad de Bogotá, quienes constituyeron un sistema de entrenamiento para la asignatura *Automatización de Procesos*, incorporando un proceso industrial a escala con un par de tanques, basado en bombeo hidráulico en circuito cerrado que permite control de caudal, calentamiento y enfriamiento del fluido y pesaje por adición y por baches, además de instrumentación para mediciones de nivel puntual, nivel continuo, flujo hidráulico, presión, temperatura y pesajes (ver Fig. 2 (LTDA., 2016)). La idea es, por tanto, replicar parcialmente este



*Figura 1.* Diagrama de sistema de recolección de Agua Lluvia en la E3T

prototipo para uso de la E3T a un precio más reducido y con la posibilidad de incorporarlo posteriormente a un sistema de recirculación de aguas en alguno de los edificios de la E3T-UIS a manera de laboratorio escuela.

En resumen, el control de procesos industriales es, y seguirá siendo, una temática relevante en el proceso formativo y la carrera laboral de profesionales de ingeniería y particularmente para ingenieros electrónicos, y por tanto, el contacto que pueda tener un aprendiz con elementos empleados a escala industrial es crucial para facilitar su entendimiento de problemas prácticos en el ejercicio de su profesión. Sin embargo, los altos costos implicados en la construcción y mantenimiento de un laboratorio ampliamente dotado en tales áreas de formación alejan la posibilidad de acceder a este tipo de entrenamiento en instituciones con presupuestos limitados como lo son



*Figura 2.* Unidad de Entrenamiento en Automatización UEA

las universidades públicas colombianas. Algunos esfuerzos se han realizado para desarrollar prototipos de laboratorio que acerquen el estudiante a problemas del mundo real. Particularmente, la E3T-UIS dispone de un sistema de tanques sobre el cual se ha realizado el control de nivel de líquidos a través de PLC y controladores industriales. Recientemente se han adquirido instrumentos para adicionar a dicho esquema un lazo de control que incorpore la medición de flujo de líquidos en el sistema. De otro lado, desde un punto de vista ambiental la aplicación de tecnologías de automatización a sistemas para el tratamiento de aguas constituye un aporte fundamental para facilitar la preservación y el buen uso de este recurso esencial de la humanidad, en una sociedad amenazada

por los efectos adversos del cambio climático.

A partir de lo anterior, se plantean inquietudes como las siguientes: ¿Cómo adecuar el prototipo existente de sistema de tanques en la E3T-UIS para mejorar condiciones de flujo en el lazo de recirculación de líquidos? ¿Cómo configurar e instalar un sensor industrial para medición de flujo de líquidos en el sistema? ¿Cómo emplear estas medidas de flujo para realizar tareas de control de nivel? ¿Qué situación práctica del mundo real permite recrear, a escala, dicho prototipo de laboratorio? ¿Es posible emplear el sistema de tanques para recircular aguas lluvias como estrategia para reducir consumos en el edificio de laboratorios?

El presente proyecto de grado busca realizar aportes direccionados a la formación de recurso humano en el uso de tecnologías aplicadas a la automatización de procesos industriales, constituyendo una base para posteriores desarrollos en el contexto del control y la instrumentación electrónica.

## **1. Objetivos**

### **Objetivo general**

1. Adecuar un proceso de tanques acoplados cilíndricos para la operación de un sensor de flujo industrial SIEMENS en un lazo de control.

### **Objetivos específicos**

1. Instalar y configurar un sensor de flujo industrial SIEMENS en el sistema de tanques del laboratorio de Control e Instrumentación de la E3T-UIS;
2. Determinar la configuración para un lazo de control de nivel en el sistema a partir de medidas de flujo de líquido mediante un sensor industrial SIEMENS;
3. Implementar el lazo de control y verificar su desempeño a través de pruebas experimentales;
4. Analizar la viabilidad del sistema para ser empleado en la recirculación de aguas lluvias del edificio del laboratorio de Alta Tensión de la E3T-UIS.

## 2. Adecuación de prototipo para medición de flujo

Tomando como base el prototipo para control de nivel en un sistema de tanques en cascada, diseñado en (Peñaranda et al., 2014) y posteriormente modificado en (Acelas and Mendoza Díaz, 2016), el presente *Capítulo* aborda las adecuaciones realizadas con el fin de incorporar un sensor de flujo de tipo industrial para manipular la cantidad de líquido circulante, por unidad de tiempo, en las tuberías del sistema.

En 2014, se constituyó en el *Laboratorio de Instrumentación y Control* de la E3T-UIS, un prototipo de sistema para realizar el control de nivel de dos tanques cilíndricos en cascada (con capacidad de 113.2 [L] y 166 [L], respectivamente) empleando un transmisor de presión diferencial como elemento de medida, una electroválvula industrial como elemento de actuación y un PID industrial como dispositivo de control (Peñaranda et al., 2014). Sin embargo, se encontraron inconvenientes prácticos en la calidad de los datos de sensado y la necesidad de incorporar un lazo de recirculación de líquido para evitar desperdicios.

De esta manera, en 2016 se realizó una mejora al prototipo existente que reemplazó la medida de nivel (empleando presión diferencial) por una de sensor ultrasónico industrial. Asimismo, se incluyó un circuito para recirculación de agua por medio de un tercer tanque (de 250 [L], para objetivos de abastecimiento) y una electrobomba de impulsión. A pesar de ello, el método de llenado del tanque principal (caída por gravedad) no permitió realizar manipulaciones de líquido en rangos muy amplios de caudal, aumentando ostensiblemente las constantes de tiempo del sistema. Los elementos principales para dicha configuración fueron (Acelas and Mendoza Díaz, 2016):

- *Dispositivo de sensado.* Transmisor de nivel ultrasónico SIEMENS *The Probe* de referencia 7ML1201EF00. Genera una señal de 4 a 20 [mA] para un rango de medida de 0.30 a 5 [m];
- *Dispositivo actuador.* Electroválvula proporcional DANFOSS de referencia EV206B. Recibe una señal de 4 a 20 [mA] para variar linealmente su apertura del 0 % al 100 %;
- *Dispositivo de control.* PLC SIEMENS *SIMATIC S7 1200* adecuado con un módulo de entradas y salidas analógicas *SM1234*, una interfaz HMI *KTP 400* y un módulo Ethernet *CSM 1277*;
- *Elemento para impulsión del fluido.* Electrobomba PEDROLLO de 0.5 [HP]. Garantiza el llenado del tanque de abastecimiento y cierra el circuito de recirculación de agua en el prototipo;
- *Elementos para interrupción del flujo del líquido.* Distintas válvulas manuales complementarias que permiten interrumpir la red del acueducto y modificar las resistencias hidráulicas entre los tanques y a la salida del circuito. Adicionalmente, una electroválvula de dos posiciones habilita la salida del drenaje.

A partir de lo anterior, se evidenció la necesidad de adicionar una nueva bomba de impulsión entre el tanque de abastecimiento (tercer tanque) y el tanque principal, para asegurar un rango mínimo de valores de caudal de entrada para el sistema.

En el año 2015, a través del programa institucional UIS denominado: “*Escuela Básica*”,



(a) PLC S7-1512C



(b) HMI KTP700 Basic

*Figura 3.* Controlador Lógico Programable e interfaz HMI SIEMENS

fue posible adquirir equipos PLC SIEMENS de la línea s7-1500 (SIEMENS, 2017)(SIEMENS, 2019c), dotados de un módulo de entradas y salidas analógicas y dos módulos de entradas y salidas digitales, una interfaz HMI KTP700 Basic de 7" (SIEMENS, 2019b) y un módulo Ethernet (ver Fig. 3). De igual manera, bajo el mismo programa institucional fue adquirido un transductor de caudal SIEMENS SITRANS F M MAG 1100 F con principio de operación electromagnético (señal de 4 a 20 [mA] con rango de medida de 0 a 10 [m/s] y 0.4 % de precisión (SIEMENS, 2019a)), a su vez complementado por el transmisor SITRANS F M MAG 5000 (protocolo HART, configurable por display (SIEMENS, 2019d)) para constituir un caudalímetro completo (ver Fig. 4). Dicho sensor de caudal fue instalado justo antes de la bomba de impulsión que cierra el circuito de recirculación, para obtener una medida indirecta del nivel a controlar en el tanque de salida.

Por otro lado, para modificar (manipular) el flujo o velocidad del líquido recirculante en las tuberías del prototipo, se hace necesario variar la velocidad del motor eléctrico de la electrobomba. Para ello, se diseñó y construyó un circuito variador de velocidad monofásico de la manera descrita a continuación.



Figura 4. Caudalímetro SIEMENS (SITRANS): (a) FM MAG 1100 y (b) FM MAG 5000

## 2.1. Variador de velocidad para electrobomba

En esencia, el circuito varía los niveles de tensión de corriente alterna monofásica aplicados a los terminales de alimentación de la electrobomba, empleando un tiristor del tipo *TRIAC*, cuyo ángulo de disparo permite regular el paso de corriente hacia la carga. El diagrama de bloques de la Fig.5 ilustra las etapas principales para el esquema de variación de velocidad implementado.

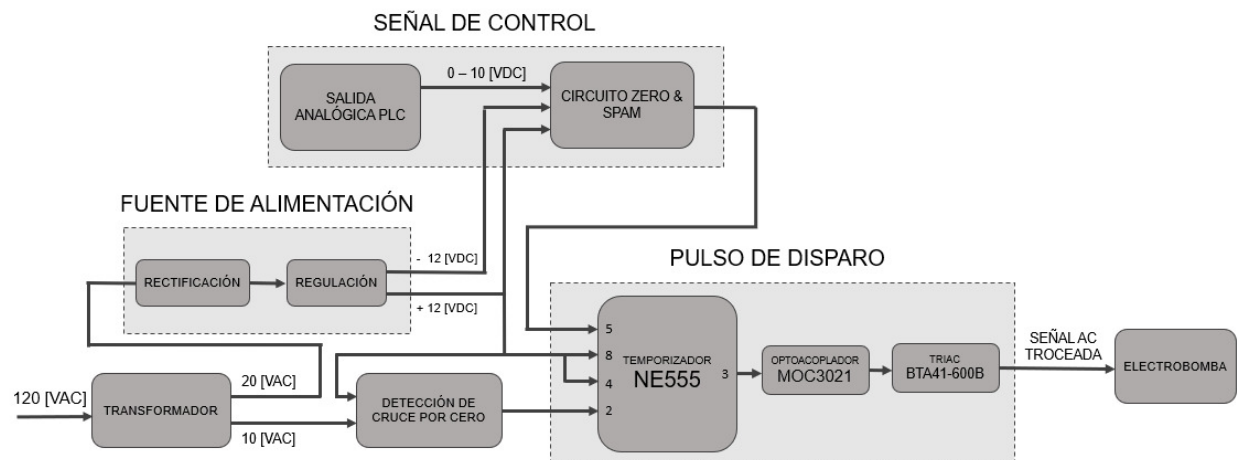


Figura 5. Diagrama de bloques para circuito variador de velocidad

En particular, el variador de velocidad se encuentra constituido por las siguientes etapas funcionales:

- *Fuente de alimentación.* Encargada de crear un voltaje dual a partir de rectificación estática de 20 [VAC] mediante un arreglo encapsulado para puente de onda completa, de referencia KBP203G y capacitores de 1000  $\mu F$  seleccionados para un rizado del 31 %. Posteriormente, la tensión rectificada y filtrada fue acondicionada a  $\pm 12$  [VDC] empleando reguladores de tensión LM7812 y LM7912, complementados por capacitores conectados a sus terminales de entrada y salida (según sugerido en la hoja de datos del fabricante) para eliminar ruidos de alta frecuencia en la señal rectificada.
- *Detección de cruce por cero.* La señal de 10 [VAC] es rectificada y aplicada a una etapa en cascada de dos transistores en *emisor-común* para generar, a través de una red RC, un pulso cuando la tensión se aproxima a los 0 [VAC]. La sensibilidad del disparo es ajustable a partir de los valores del filtro RC.
- *Pulso de disparo.* La señal del detector de cruce por cero activa un multivibrador monoestable NE555, con ángulo de disparo ajustable a través del voltaje en su terminal 5 y duración de pulso configurable mediante el trimmer conectado a sus terminales 6 y 7. El pulso de disparo generado por el circuito temporizador es invertido mediante un transistor BJT y acoplado a un TRIAC de referencia BTA41-600B (con capacidad de hasta 40 [A]) a través de un optoacoplador MOC3021. De esta manera, una variación de voltaje entre 3 y 6 [VDC] permitirá un rango de entre 0 y 122 [VAC] de alimentación para la carga.

- *Acondicionamiento de señal.* El acople entre la señal de actuación correspondiente con la salida analógica de un PLC y la entrada de voltaje para el multivibrador monoestable, fue realizado mediante un circuito de *zero & span* basado en amplificadores operacionales, el cual modifica un rango de entrada de 0 - 10 [VDC] por uno de salida de 3 - 6 [VDC].

La Fig. 6 ilustra el diagrama esquemático final para el circuito, donde A1 hace referencia a la entrada correspondiente con la señal analógica del PLC.

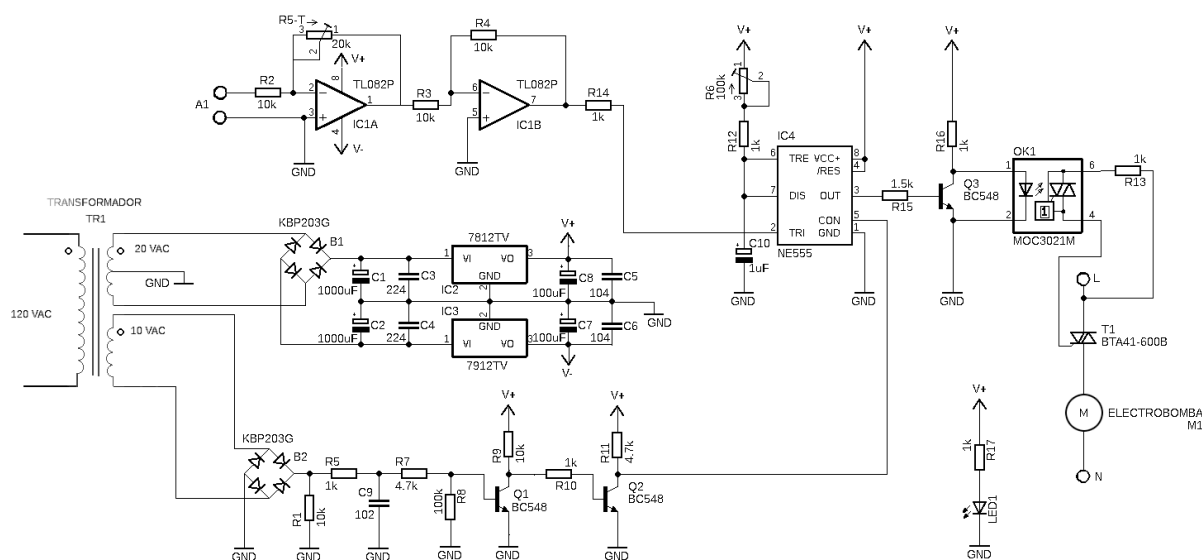


Figura 6. Diagrama esquemático del circuito variador de velocidad

## 2.2. Elementos de instrumentación adicionales

El tanque de abastecimiento (tercer tanque) cuenta con un sensor capacitivo, ubicado en su parte superior para emitir una señal de alarma de rebose (ver Fig. 7(a)). Adicionalmente, relés RELPOL de referencia R15 3 CO (ver Fig. 7(b)) se emplearon para activación automática de la electrobomba principal, la electrobomba auxiliar y la electroválvula ON/OFF que controla el desagüe del sistema.



(a)



(b)

*Figura 7. Instrumentación adicional: (a) Sensor capacitivo en tanque de abastecimiento y (b) Relé para activación de electrobombas y electroválvula*

De esta manera, es posible incluir dichos elementos como parte del automatismo que gobierna la operación del proceso en el PLC.

### **2.3. Prototipo final para pruebas**

Es conveniente mencionar que durante la configuración mencionada se manifestaron averías en la electroválvula industrial que suministra el fluido del tanque principal, razón por la cual en el presente proyecto se reemplazará dicho elemento por una válvula manual.

En consecuencia, el diagrama de instrumentación y conexiones (*PI&D*) definitivo para el prototipo de laboratorio, incluyendo el sensor de flujo y las adecuaciones descritas, se presenta en la Fig. 8. Asimismo, la Fig. 9 ilustra la disposición real de los elementos en laboratorio.

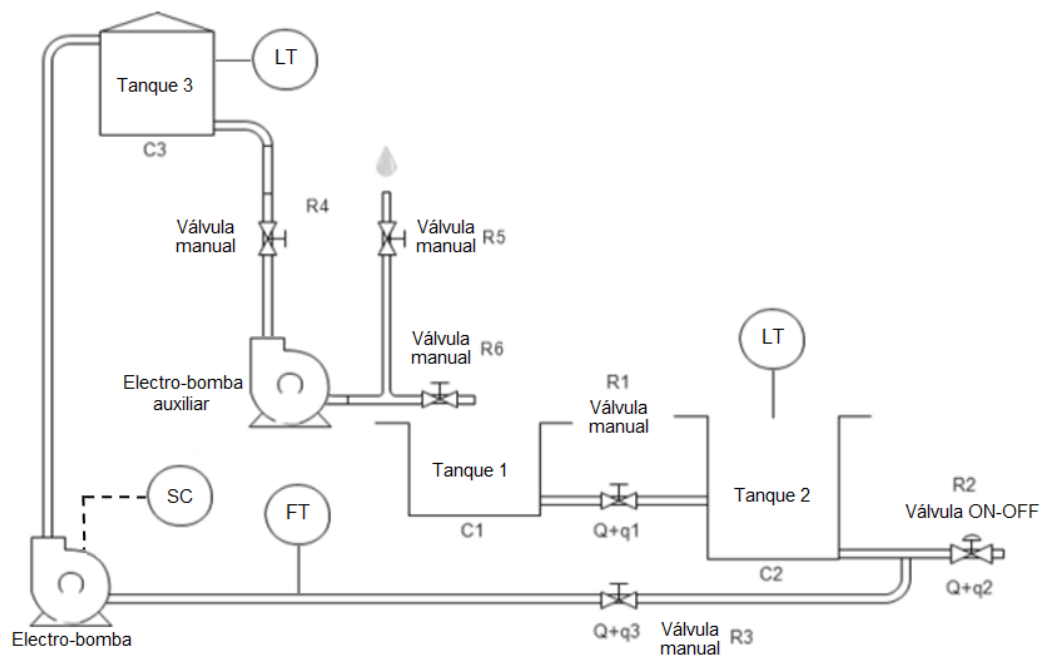


Figura 8. Diagrama P&ID del prototipo acondicionado para control de flujo

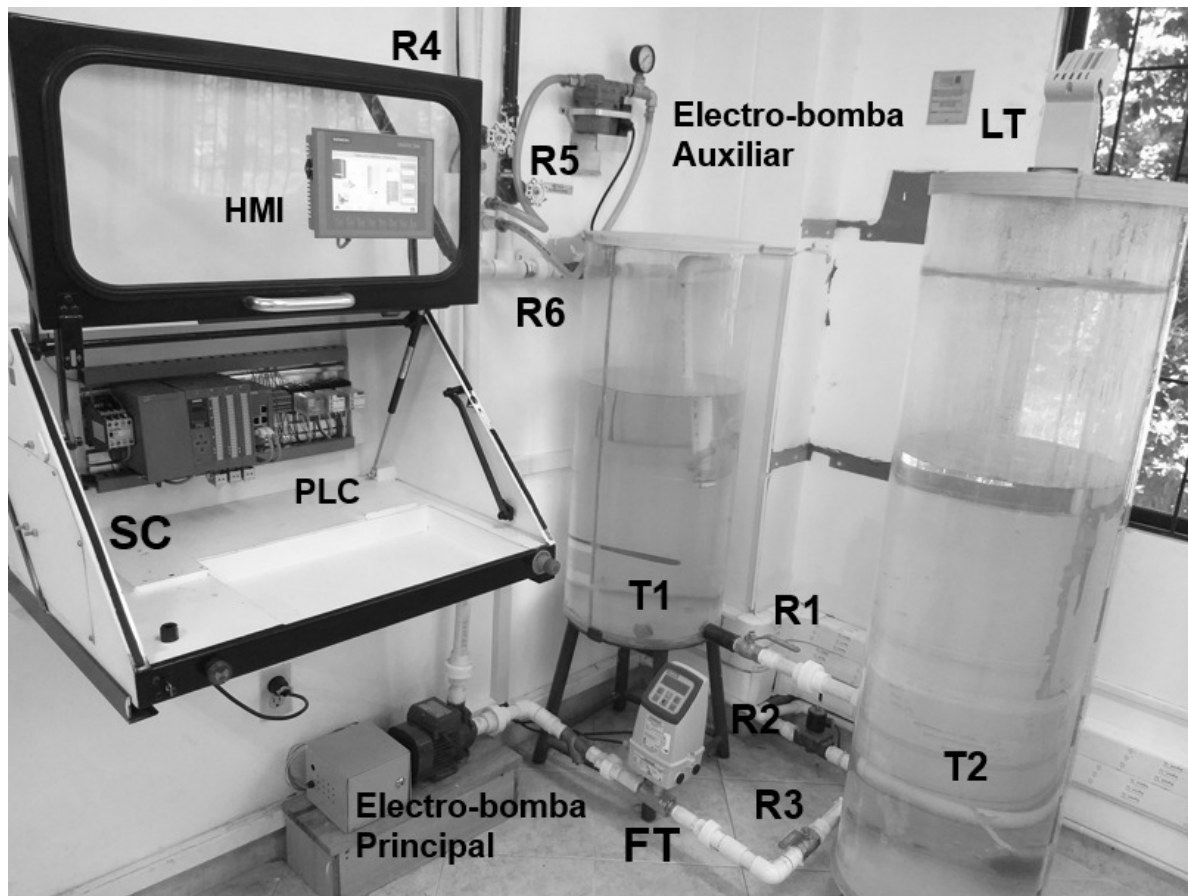


Figura 9. Disposición real de elementos para prototipo final acondicionado en laboratorio

### 3. Operación en lazo abierto

El sistema acondicionado a los nuevos elementos de medida y actuación, debe ser caracterizado para determinar sus valores nominales de operación. El propósito del presente *Capítulo* es por tanto realizar ilustración de los procedimientos de ajuste y configuración para el sensor industrial de flujo, la caracterización operacional del variador de velocidad para la bomba de impulsión, la definición para un protocolo de inicio y la selección de un parámetro de perturbación, sobre la operación del sistema en lazo abierto.

#### 3.1. Configuración del sensor de flujo

De los métodos de comunicación que ofrece el caudalímetro, se eligió la salida analógica por corriente (4 a 20 [mA]) con el fin de leerla a través de una entrada analógica del PLC. Para seleccionar dicha salida se debe: 1) pulsar la tecla *INICIO* por 2 segundos e introducir la contraseña que el transmisor trae por defecto: “1100” (ver Fig. 10); 2) pulsar la tecla *AVANZAR PÁGINA* hasta llegar al menú *Basic Settings* y acceder por medio de la tecla *BLOQUEAR/DESBLOQUEAR*; 3) pulsar la tecla *AVANZAR PÁGINA* hasta la opción *Current output* y acceder por medio de la tecla *BLOQUEAR/DESBLOQUEAR*; 4) seleccionar el parámetro *ON* por medio de la tecla *CAMBIAR*.

De otro lado, para determinar el valor máximo de caudal se realizó una prueba experimental con el *tanque 2* a tope. Una vez accionada la electrobomba a su máxima velocidad permitió capturar, bajo estas condiciones, una lectura de  $\phi = 1750[l/h]$  en el flujo a través del caudalímetro. Dicho valor fue configurado como el máximo del rango en el instrumento, accediendo al menú

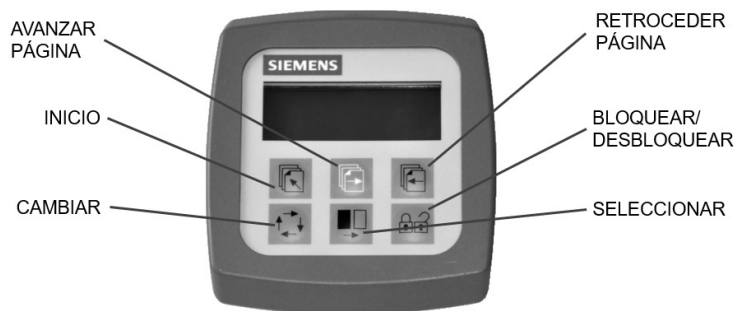


Figura 10. Interfaz de usuario del transmisor SITRANS M F MAG5000

*Basic Settings*, opción  $Q_{max}$ .

El transmisor es alimentado a 120 [VAC] y este a su vez alimenta al sensor. Por su parte, la conexión de señales entre el instrumento y el PLC se realiza de manera directa a través de dos hilos (terminal positivo y negativo).

### 3.2. Determinación del rango de actuación

Una vez configurado el sensor de flujo del sistema, fue posible analizar el comportamiento de la relación entre la velocidad de la electrobomba principal y el flujo circulante a la salida del *tanque 2*. De esta manera, se realizó una prueba experimental consistente en variar completamente el rango de salida de actuación del PLC en pasos de 0.5 [VDC] (señal denominada  $A1$  en la Fig. 6, siendo  $A1 \in [0, 10]$ ), registrando el valor en estado estacionario para el flujo circulante a través del sensor ante aperturas máximas en las resistencias hidráulicas del circuito.

Como resultado se obtuvo el comportamiento ilustrado en la Fig. 11(a), donde se observa una gran zona muerta para  $A1 \in [0, 6]$  y  $A1 \in [8, 10]$ . También es evidente que a mayor valor de  $A1$

la bomba opera con menor velocidad (y por ende menor flujo).

Una segunda exploración se muestra en la Fig. 11(b) para  $A1 \in [6, 7.5]$  en pasos de 0.1 [VDC], permitiendo evidenciar capacidad de actuación para  $A1 \in [6.5, 7.3]$ . Este rango de actuación fue explorado en detalle a través de cuatro pruebas realizadas en pasos de 0.02 [VDC], según ilustrado en la Fig. 11(c), donde la línea punteada representa la primera prueba (en frío).

De los resultados se observa un buen grado de repetitividad en la relación de flujo circulante como función de la señal de actuación del PLC ( $\phi$  vs.  $A1$ ), cuando la bomba se encuentra operativa (en caliente), lo cual verifica una capacidad de actuación aproximadamente lineal para manipulación de las variables del sistema.

**3.2.1. Punto nominal de operación.** En favor de obtener un mejor aprovechamiento de la capacidad de actuación para el sistema, idealmente el valor de referencia (o *setpoint*) deberá corresponder con el rango medio identificado en la Fig. 11(c); es decir:  $A1_{ref} \approx 6.9$  [VDC]  $\Rightarrow \phi_{ref} \approx 1200$  [l/h].

Sin embargo, tal y como se observa en la misma figura, dicho valor no corresponde en la práctica con una condición estática y por tanto no podrá conseguirse a menos que se realice un lazo de control, ajustando el valor de  $A1$  alrededor de  $A1_{ref}$  para obtener  $\phi_{ref}$ , tal y como lo muestra la Fig. 12 para el caso de una acción proporcional con  $k_P = 0.02$  (determinado empíricamente).

Ahora bien, tomando en cuenta que el objetivo del proyecto está en realizar un control de nivel empleando un sensor de flujo, conviene comprender la relación que existe entre estas dos magnitudes físicas. De esta manera, para el *tanque 2* en la Fig. 8 (asumiendo  $R_2$  completamente

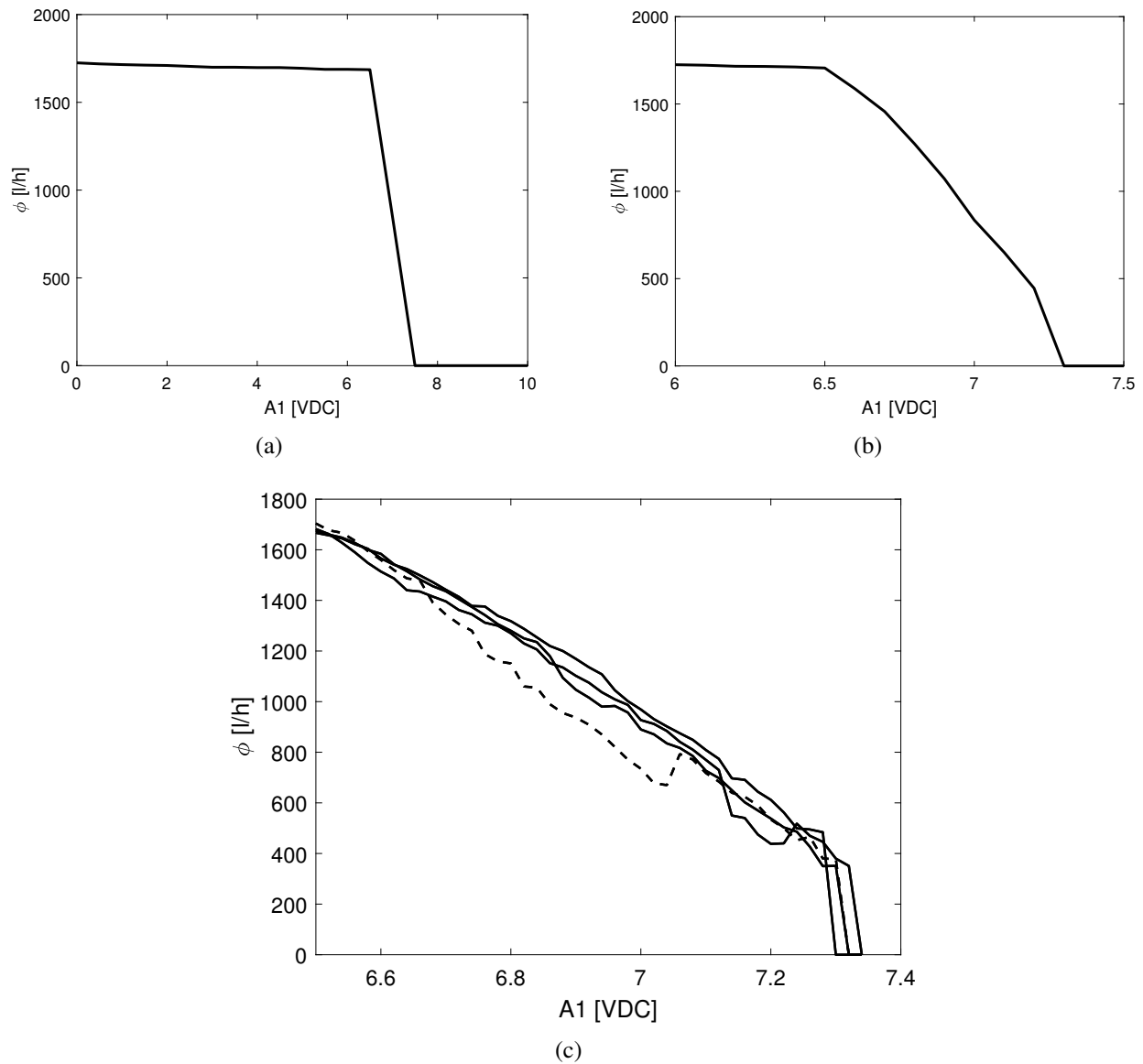


Figura 11. Pruebas para rango de actuación: (a) rango completo; (b) rango reducido y (c) múltiples pruebas en rango reducido

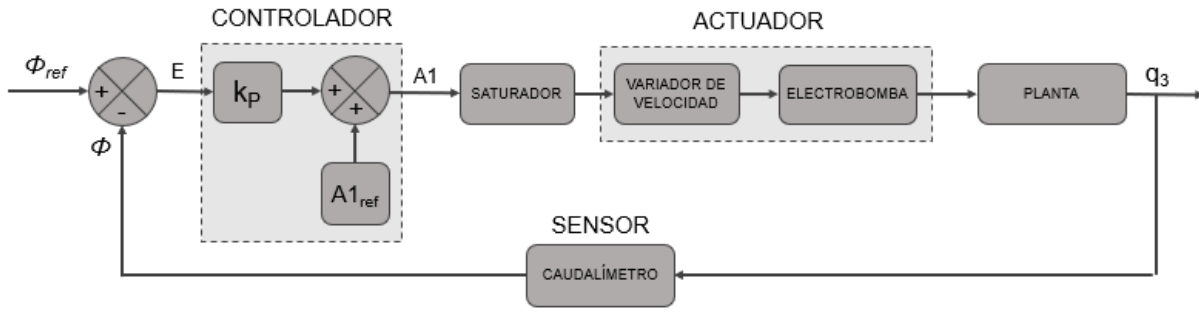


Figura 12. Lazo de control para mantener un flujo constante

cerrada; i.e.  $q_2 = 0$ ) el volumen contenido en un instante del tiempo viene dado por la expresión:

$$C \frac{d}{dt} h_2(t) = q_1(t) - q_3(t), \quad (1)$$

siendo  $C$  el área de sección transversal del tanque (cilíndrico),  $h_2(t)$  su altura y  $q_3(t)$  el valor sensado por el caudalímetro. A partir de lo anterior,  $h_2$  se posicionará en un valor constante siempre que  $q_1 = q_3$ .

A partir de ello, es evidente que no existe un valor único de nivel para el cual se satisfaga dicha condición y, por tanto, deberá establecerse un protocolo de inicio que permita posicionar el nivel del *tanque 2* en un valor estable, por cuenta de un flujo  $q_3$  cercano a  $\phi_{ref}$ .

### 3.3. Protocolo de inicio del sistema

Para garantizar la operación del sistema alrededor de valores nominales, se define la siguiente secuencia de pasos a manera de *prototolo de inicio* o *arranque*:

- I. Con el sistema en ausencia de agua, se cierran totalmente las válvulas R2, R3 y R4 y se

- abren R1, R5 y R6 (Fig. 8) para permitir el llenado de los tanques;
- II. Una vez  $h_2(t)$  alcance los 88 [cm] se cierra completamente R5. Detener el llenado en este punto garantiza que en el sistema no haya más líquido del que puede contener el tanque de almacenamiento principal (*tanque 3*), evitando desbordamientos;
- III. Se abre R3 y se acciona la electrobomba principal a máxima capacidad (i.e.  $A1 = 0$ ) para iniciar el llenado del *tanque 3*;
- IV. Cuando  $h_2(t)$  haya caído a 65 [cm] se abre completamente la válvula R4, se acciona la electrobomba auxiliar para iniciar la recirculación de líquido y se establece  $A1 \approx 6.9 [VDC] \Rightarrow \phi \approx 1200 [l/h]$  para estabilización de  $h_2$  en un valor  $\bar{h}_2$  que dependerá de los tiempos en que sea ejecutada la maniobra (el siguiente *Capítulo* presentará un método para llevar y mantener el sistema en un nivel deseado).

Dichas tareas de inicialización, se ilustran a manera de diagrama GRAFCET mediante el automatismo presentado en la Fig. 13.

### 3.4. Selección parámetro de perturbación

Para alterar las condiciones nominales de operación del sistema (valores de equilibrio), alcanzados tras ejecutar el protocolo de inicio apenas descrito, se seleccionó un cambio en el valor de apertura para la resistencia hidráulica R3, pasando del 100 % al 70 % (a partir de una proporción de giro de la válvula).

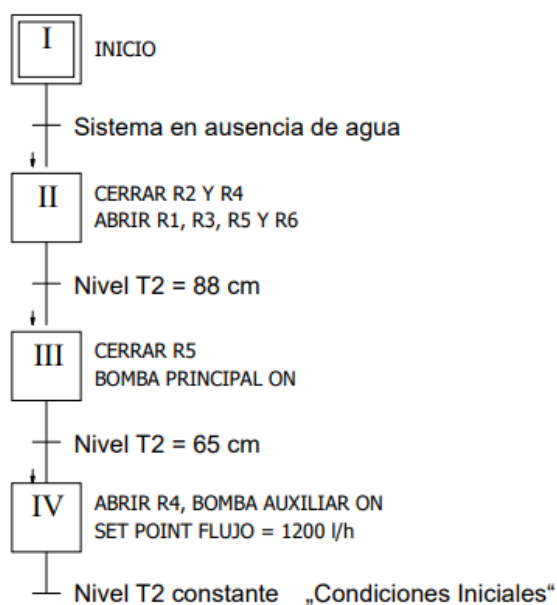


Figura 13. Diagrama GRAFCET del protocolo de inicio del sistema

La Fig. 14(a) muestra una captura de la evolución temporal del flujo  $\phi(t)$  medido por el caudalímetro, cuando la perturbación se aplica en  $t = 60\text{ s}$ . Como se observa, el lazo de control implementado e ilustrado en la Fig. 12 actúa para compensar el flujo circulante a través del circuito hidráulico, de manera que la lectura del caudalímetro recupere su valor nominal. Esta acción de control se ve reflejada en un cambio de la señal de actuación  $A1$ , que modifica la operación de la bomba según ilustrado en la Fig. 14(b).

Esta alteración en los valores de estado estable para  $R3$  y  $\phi$  repercute sin embargo en un cambio de valor para  $\bar{h}_2$ , lo cual implica la necesidad de implementar un lazo adicional para efectuar el control de este nivel, constituyendo el tema central del *Capítulo* siguiente.

Por su parte, las conexiones físicas entre dispositivos de sensado y actuación con el PLC S7-1500, así como la configuración del entorno de Programación de Autómatas: TIA Portal de SIEMENS para el registro de los datos, se presenta detalladamente en el *Anexo 1*.

#### 4. Operación en lazo cerrado

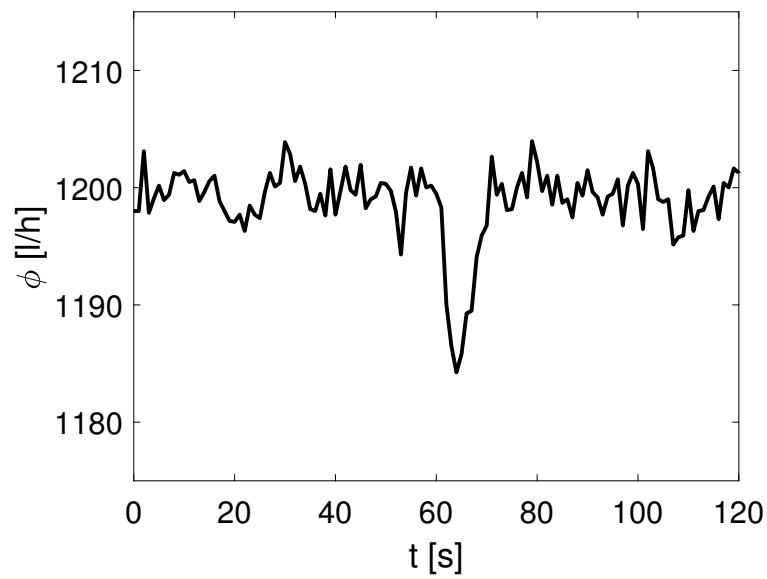
En el *Capítulo* anterior se configuró una estrategia para mantener regulado el flujo recirculante en el sistema de tanques en cascada, aprovechando la medida del caudalímetro; Sin embargo, hasta el momento el nivel de los tanques no ha sido manipulado explícitamente y por tanto, el objetivo principal del presente *Capítulo* es realizar el control automatizado de nivel a partir de información del sensor de flujo industrial instalado y configurado en el proceso.

##### 4.1. Medición de nivel

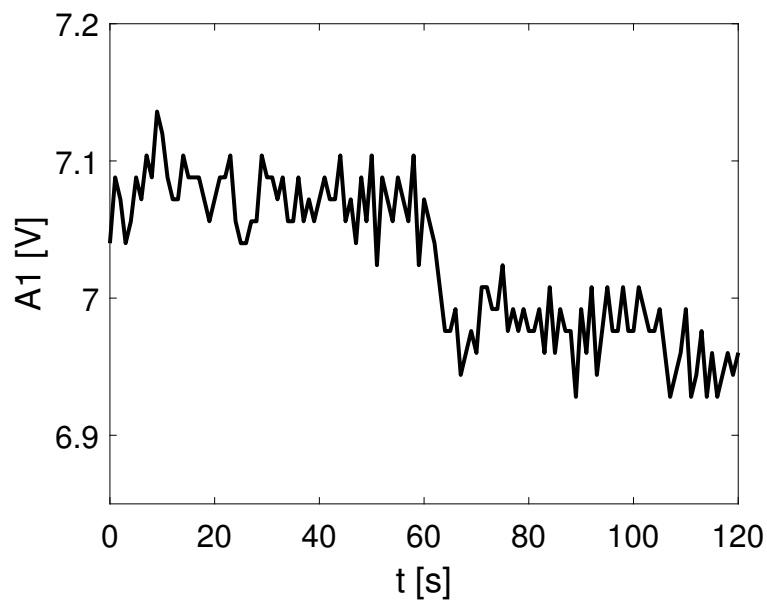
Retomando las ideas introducidas en la *Sección 3.2.1*, existe una relación entre el nivel  $h_2(t)$  y el caudal medido  $\phi(t) = q_3(t)$ , de la cual puede escribirse:

$$C \left( \frac{h_2(T) - h_2(0)}{T} \right) = q_1(T) - \phi(T). \quad (2)$$

Ahora bien, si  $h_2(0) = \bar{h}_2$  corresponde con el valor conocido de nivel obtenido en el protocolo de inicio, de manera tal que  $q_1(0) = \phi_{ref}$  y bajo la suposición que  $q_1(0) = q_1(T)$ , es claro que existirá un  $h_2(T)$  en un tiempo  $T$  como consecuencia de un desbalance de flujos ocasionado por



(a)



(b)

Figura 14. Respuesta temporal en lazo abierto para: (a)  $\phi$  y (b)  $A1$ , ante una perturbación en  $R3$

$\phi(T)$ ; es decir:

$$h_2(T) = \frac{T(\phi_{ref} - \phi(T))}{C} + \bar{h}_2, \quad (3)$$

sugiriendo una estimación indirecta del nivel en el *tanque 2* a partir de medidas de flujo en el caudalímetro.

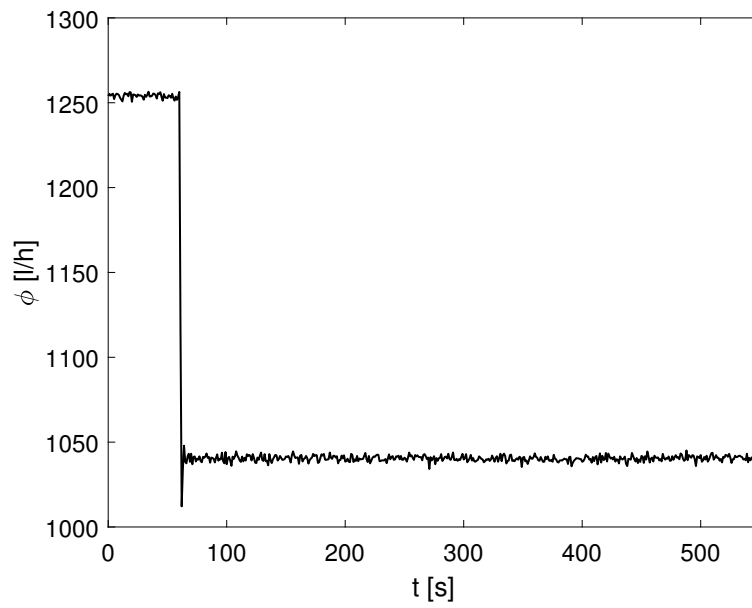
A partir de ello, la Fig. 15(a) ilustra datos experimentales para un cambio escalón en  $\phi(t)$ , pasando de  $\phi(0) = \phi_{ref} = 1250 [l/h]$  a  $\phi(T) = 1040 [l/h]$ . El efecto correspondiente en la evolución del nivel  $h_2(t)$ , capturado empleando el transmisor de nivel ultrasónico SIEMENS *The Probe*, se presenta en la Fig. 15(a) para  $\bar{h}_2 \approx 61 [cm]$  y  $T = 500 [s] \equiv 0.138 [h]$ , replicando el comportamiento lineal sugerido en la expresión (3).

Así entonces, siendo  $C = 1244 [cm^2]$ , el valor de altura predicho por las mediciones de flujo puede calcularse como:

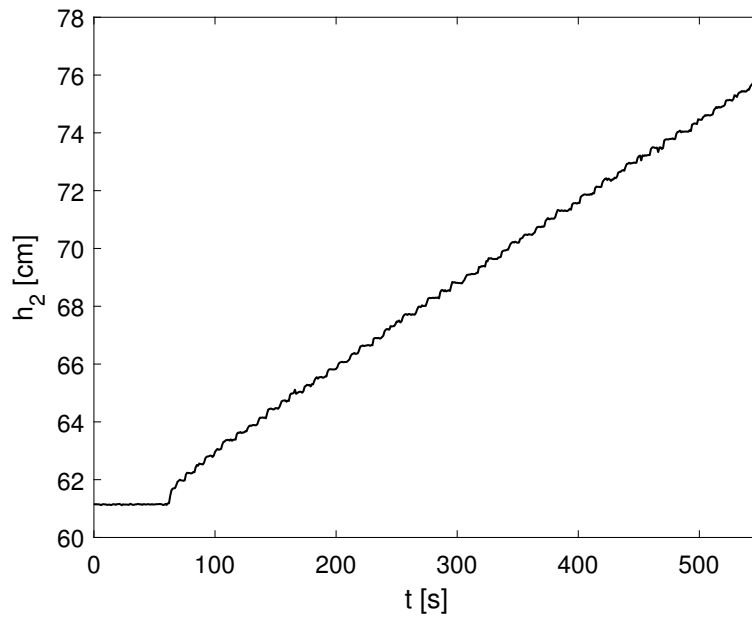
$$\begin{aligned} h_2(T) &= \frac{0.138 (1000 \times (1250 - 1040))}{1244} + 61 \\ &= 84.29 [cm], \end{aligned} \quad (4)$$

que difiere ostensiblemente del valor medido por el transmisor de nivel  $h_2(T) \approx 76 [cm]$ .

Sin embargo, dicho error de aproximación (como era de esperarse a partir de la definición de límite para una derivada) se reduce en la medida que  $T$  se hace pequeño y por tanto, para



(a)



(b)

Figura 15. Análisis gráfico experimental para relación entre flujo y altura: (a)  $\phi(t)$ ; (b)  $h_2(t)$

$T = 240 [s] \approx 0.0667 [h]$  el mismo cálculo permite predecir  $h_2(T) = 72.26 [cm]$ , un valor más cercano al medido en dicho instante:  $h_2(T) \approx 70 [cm]$ .

Tomando en cuenta los niveles de imprecisión evidenciados en el cálculo indirecto de nivel a través de medidas de flujo, se decide emplear la información capturada por el transmisor de nivel ultrasónico como medida fehaciente del valor de nivel para  $h_2(t)$ . La configuración y calibración del transmisor SIEMENS *The Probe* 7ML1201EF00 puede consultarse en (Acelas and Mendoza Díaz, 2016).

## 4.2. Control de nivel en cascada

Empleando la ecuación (1) y los resultados de la *Sección* anterior, es posible proponer la siguiente función de transferencia para la relación entrada-salida en el *tanque* 2:

$$G(s) = \frac{\Delta H_2(s)}{\Delta Q(s)} = \lambda \frac{1}{sC}, \quad (5)$$

siendo  $\lambda$  una constante de ajuste de proporcionalidad.

A partir de ello es posible constituir la estructura de control en cascada ilustrada en la Fig. 16, donde el lazo externo de nivel produce la señal de referencia para el lazo interno de flujo, introducido en el *Capítulo* anterior.

La Fig. 17(a) ilustra el comportamiento del sistema de control de nivel en cascada ante un cambio escalón en  $\bar{h}_2$ , pasando de  $60 [cm]$  a  $70 [cm]$  en  $t = 60 [s]$ . Como se observa, la respuesta del sistema se asienta en el valor final requerido mediante una respuesta amortiguada con sobreimpulso

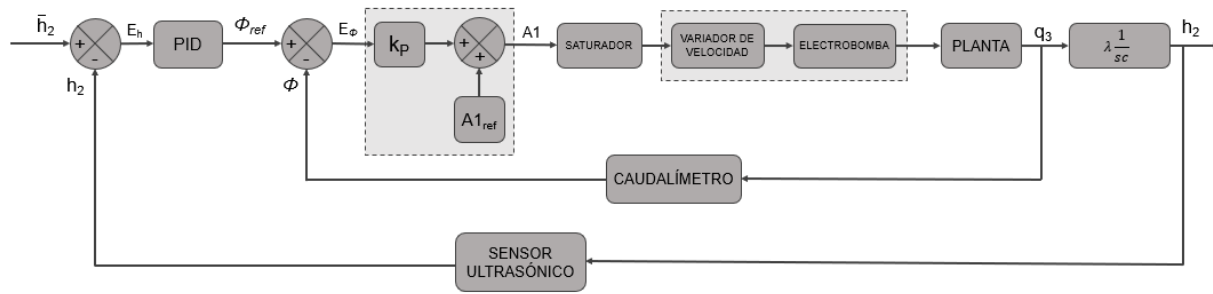


Figura 16. Estructura de control en cascada para control de nivel a partir de medidas de flujo

cercano al 10% y un tiempo de establecimiento de alrededor 150 [s]. Posteriormente, en  $t = 240$  [s] se aplica la perturbación en R3 con un efecto imperceptible en  $h_2$  por cuenta de la acción de control  $A1$  mostrada en la Fig. 17(c), la cual a su vez hace insensible a  $\phi$  de esta acción externa según visualizado en la Fig. 17(b).

De otro lado, la determinación de los parámetros para el controlador PID implementado:

$$u_{PID}(t) = k_p \left( e_h(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e_h dt + T_d \frac{d}{dt} e_h(t) \right),$$

se realizó empleando la herramienta de autosintonización que posee el entorno TIA Portal de SIEMENS, permitiendo obtener  $k_p = 19.46$ ,  $T_i = 7.80$  [s] y  $T_d = 1.76$  [s], siguiendo el procedimiento ilustrado en el Anexo 1.

### 4.3. Control de nivel simple

Para efectos de comparación, considere el lazo simple mostrado en la Fig. 18 constituido por un sólo bucle de realimentación de nivel.

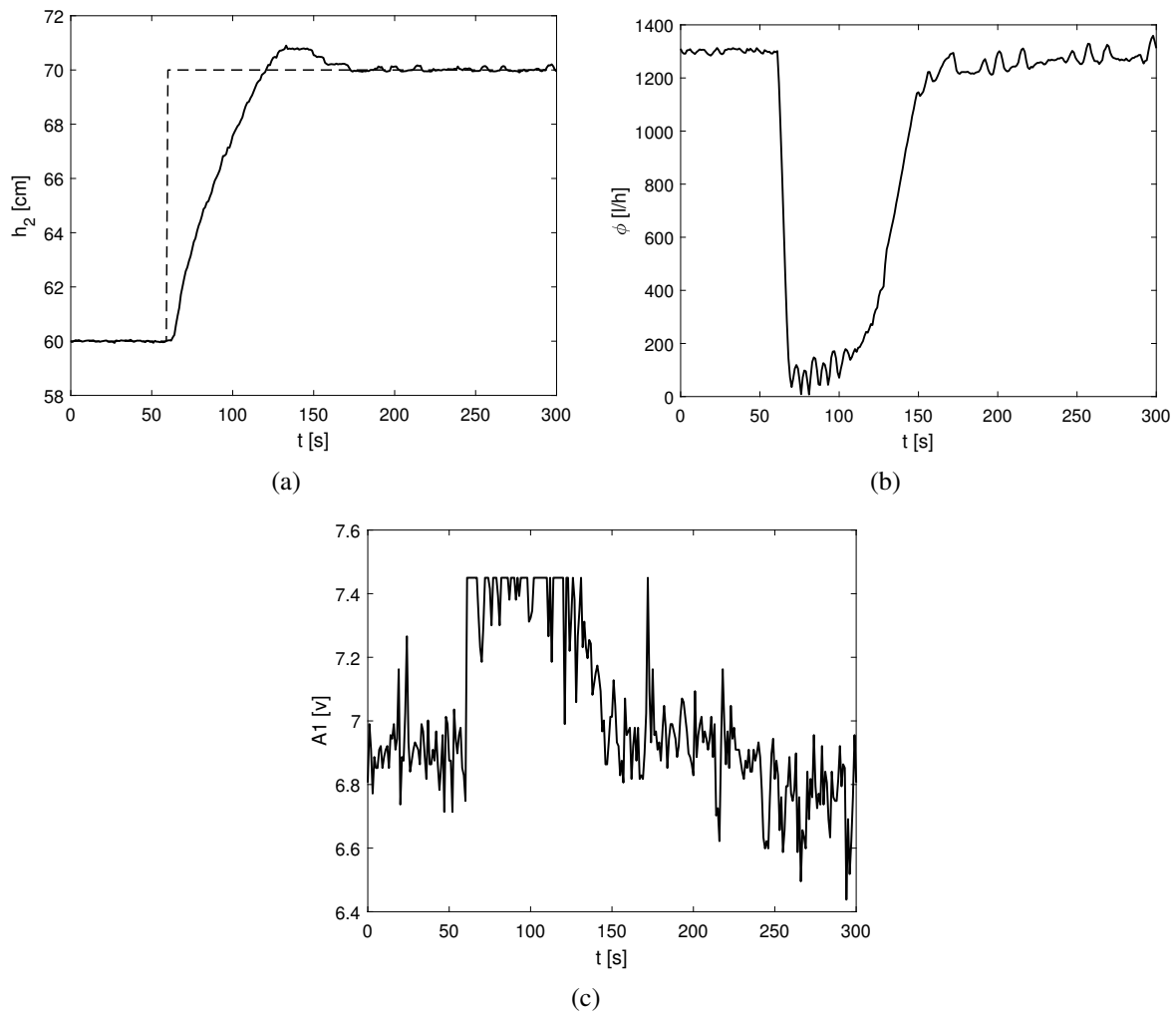


Figura 17. Respuesta temporal de lazo en cascada para: (a)  $h_2$ , (b)  $\phi$  y (c)  $A1$ , ante cambio de referencia y perturbación en R3

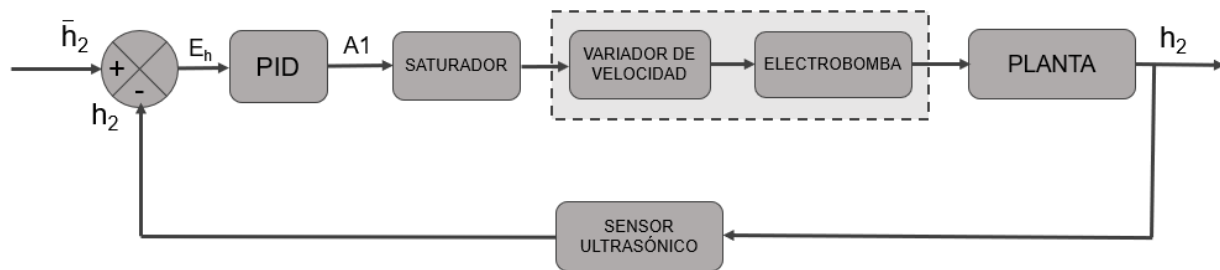


Figura 18. Estructura de control simple para control de nivel a partir de medidas de nivel

En este caso, se ha obviado la medida de flujo y por tanto, la señal de actuación  $A1$  depende directamente del error de nivel.

A partir de ello, la Fig. 19 muestra el comportamiento del sistema para el lazo simple ante el mismo escenario presentado en la Fig. 17. La determinación de los parámetros para el controlador PID implementado se realizó empleando la herramienta de autosintonización que posee el entorno TIA Portal de SIEMENS, permitiendo obtener  $k_p = 29.29$ ,  $T_i = 6.08 [s]$  y  $T_d = 1.62 [s]$ , siguiendo el procedimiento ilustrado en el *Anexo 1*.

De estos resultados se observa que  $h_2$  alcanza su valor de estado estable en modo más amortiguado (de hecho no posee sobreimpulso) y con menor tiempo de asentamiento que para el caso del control en cascada. Asimismo, es evidente la leve alteración presentada en  $h_2$  por parte de la perturbación aplicada en  $t = 240 [s]$  según mostrado en la Fig. 19(a). Como consecuencia directa de esto, en la Fig. 19(b) se observa variación en el valor de  $\phi$  ante la perturbación aplicada en R3. Por su parte la Fig. 19(c) evidencia el esfuerzo de control  $A1$  requerido para compensar los cambios del sistema.

De lo anterior se concluye que la configuración para el lazo de control en cascada, otorga mayor robustez al sistema para regular el nivel ante perturbaciones en las resistencias hidráulicas.

#### **4.4. Operación automatizada del sistema**

Utilizando como base la secuencia de operaciones introducida a manera de diagrama GRAFCET en la *Sección 3.3*, se desarrolló la automatización de rutinas para operación y control de nivel del sistema de tanques empleando la interfaz humano máquina (HMI) ilustrada en la Fig. 20.

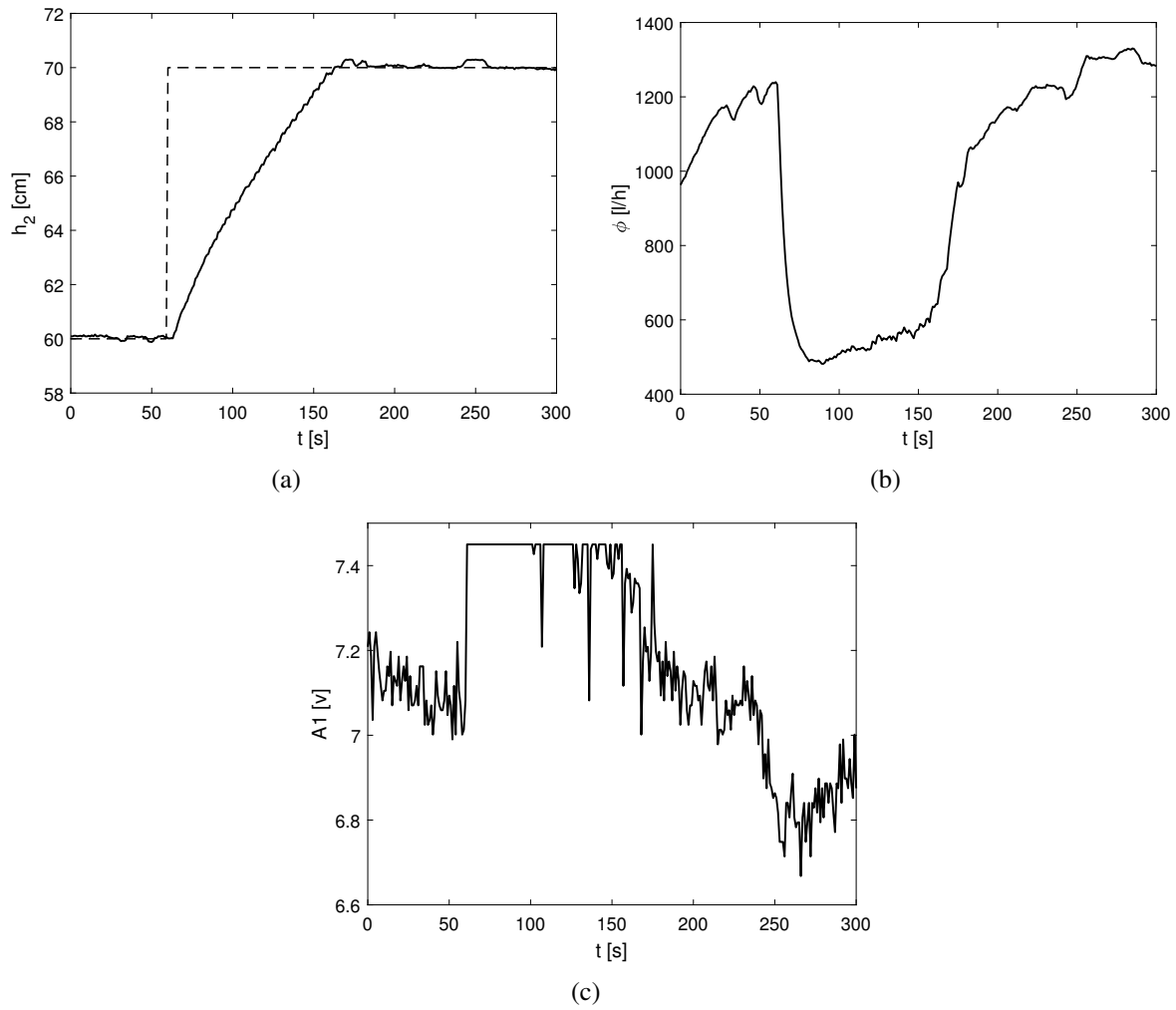


Figura 19. Respuesta temporal de lazo simple para: (a)  $h_2$ , (b)  $\phi$  y (c)  $A1$ , ante cambio de referencia y perturbación en R3

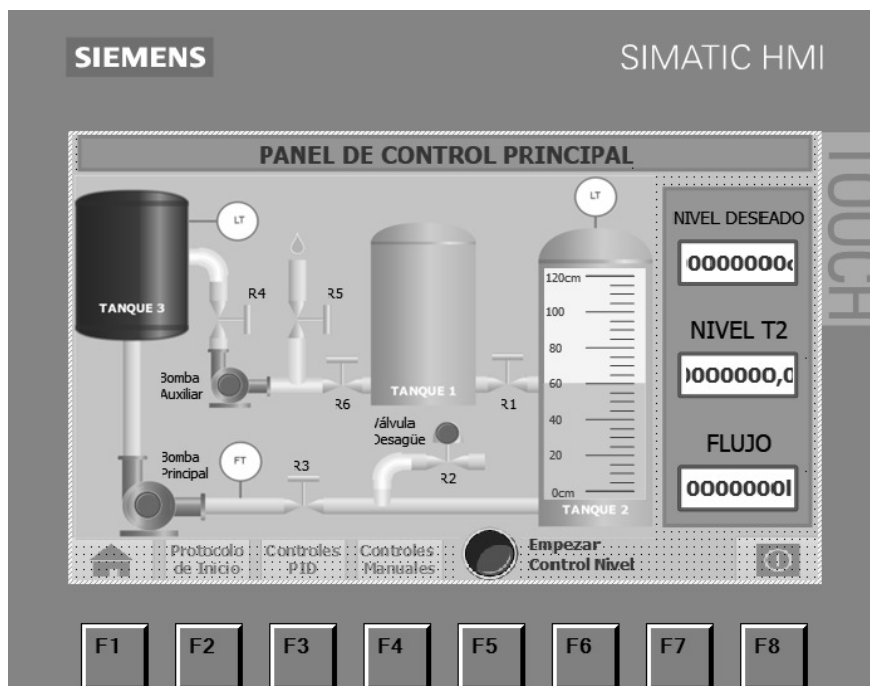


Figura 20. Interfaz HMI desarrollada para automatizar la operación del sistema

Inicialmente, el diagrama secuencial de operaciones de la Fig. 13 se amplía con las rutinas de registro y procesamiento de señal (control) ilustradas en el diagrama GRAFCET extendido de la Fig. 21. En particular, los pasos I-IV corresponden con el protocolo de inicio previamente descrito en la Sección 3.3.

Posteriormente, la HMI permitirá al usuario seleccionar entre *operación* del sistema en *lazo cerrado* o en *lazo abierto*. Si la selección es *operación en lazo abierto*, se podrán manipular manualmente los valores de variables del sistema ( $A1$  como entrada,  $\phi$  y  $h_2$  como salidas), siendo monitoreados en la interfaz desarrollada.

Si por el contrario se selecciona la *operación en lazo cerrado*, el usuario tendrá la posibilidad de elegir (etapa V) entre un *control PID de lazo simple* y un *control PID de doble lazo en*

*cascada*, con estructuras de control previamente ilustradas en el presente texto.

Posterior a la ejecución de rutinas de control (manual o automático), es posible realizar el registro de datos de actuación y sensado en modo manual (etapas *VI* y *IX*) o temporizada con perturbación (etapas *VII*, *VIII* y *IX*).

La programación en escalera (LADDER), ejecutada para implementar el autómeta que permite operar el sistema de control de nivel de tanques consta de 14 segmentos de programa. Dichas subrutinas se presentan en modo detallado en el *Anexo 2*.

#### **4.5. Sistema automatizado para recirculación de aguas lluvias**

Tomando como base la Fig. 1, introducida en la *Introducción* para describir el sistema de recirculación de agua lluvia actualmente instalado en el Edificio de Ingeniería Eléctrica de la UIS, es posible enunciar lo siguiente:

- El edificio de Ingeniería Eléctrica de la E3T está diseñado bajo un concepto de sostenibilidad ambiental, que busca aprovechar en la mejor manera posible los recursos naturales disponibles;
- La operación eficiente de dicho recinto se determina en términos de un uso apropiado de la circulación natural del aire, aprovechamiento de la iluminación natural y la utilización de aguas lluvias para labores de aseo y descarga de baterías sanitarias;
- La capacidad instalada para almacenamiento de aguas lluvias es de 22000 [L], a partir de un

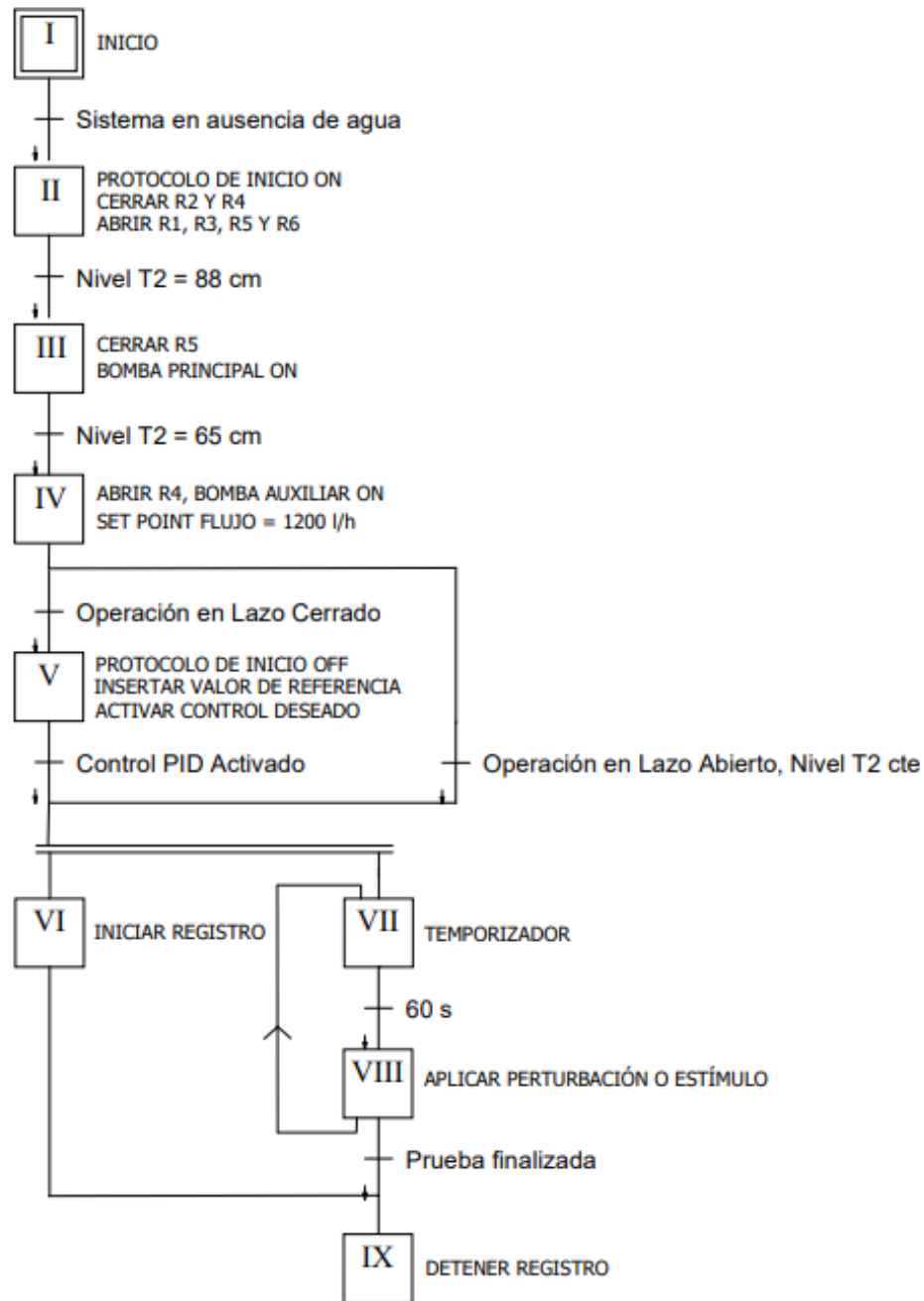


Figura 21. Diagrama GRAFCET ampliado para automatización de operación del sistema de tanques

tanque subterráneo, con recirculación de agua realizada a través de 2 electrobombas de 10 HP conectadas al tanque de abastecimiento y a la red del acueducto, respectivamente.

- Un sensor de nivel (tipo flotador) es usado para alternar el accionamiento de cada electrobomba. Si hay suficiente reserva de agua la electrobomba conectada al tanque de abastecimiento se acciona e impulsa el agua al edificio. Si el tanque está vacío, la electrobomba conectada al acueducto será la encargada de proveer el servicio.

A partir de lo anterior, es posible complementar el sistema de control de nivel y de recirculación de líquido desarrollado y propuesto según el esquema *PI&D* de la Fig. 8, para acondicionarse a las necesidades de un sistema de respaldo basado en agua lluvia, para satisfacer la demanda de agua requerida para las descargas de las baterías sanitarias de los baños del segundo piso (Laboratorios de Ingeniería Electrónica) del Edificio de Alta Tensión de la UIS.

De esta manera, considerando un consumo promedio de 10 litros por descarga (*lpf* - *liters per flush*) en las baterías sanitarias del edificio, y sabiendo que existen 4 inodoros (2 en el baño de hombres y 2 más en el baño de mujeres), lo anterior implica un consumo de 40 litros máximos por descarga. Ahora bien, teniendo en cuenta que el *tanque 2* posee una capacidad de almacenamiento de 166 [L], mantener el nivel  $h_2$  en su valor máximo representa una capacidad potencial de alrededor de 16 descargas.

Por tanto, considere el diagrama *PI&D* de la Fig. 22 modificado mediante: 1) una carga directa del *tanque 3* a través de un sistema de colección de aguas lluvias; 2) una derivación del flujo  $q_3$  hacia las baterías sanitarias posterior a la electrobomba principal (donde previamente se

Figura 22. Diagrama P&ID modificado para sistema de recirculación de aguas lluvias

Para discutir la viabilidad del sistema de recirculación de aguas lluvias propuesto, se debe pensar en el beneficio ambiental de dicha adecuación, además de los bajos costos que implica acondicionar las tuberías desde las baterías sanitarias del segundo piso del edificio de Alta Tensión y hasta el prototipo del laboratorio. Quizás la adecuación de infraestructura más laboriosa corresponda con la implementación de un sistema para la canalización de aguas lluvias. Sin embargo,

dicho sistema existe actualmente en el edificio y podría simplemente ser modificado para capturar por gravedad una derivación de agua hacia el tanque de abastecimiento principal (*tanque 3*).

Tomando en cuenta lo anterior, se muestra la manera cómo la utilización del prototipo desarrollado en el sistema de recirculación propuesto es ampliamente viable (desde puntos de vista técnicos, económicos y medioambientales).

### **5. Recomendaciones**

La operación segura del sistema de tanques se facilita a través de la correcta ejecución de un protocolo de inicio en el cual se garantiza que los niveles de líquido recirculantes no sobrepasen la capacidad del tanque de almacenamiento principal, y por ende ocasionen rebosamientos indeseados con sus respectivas consecuencias en el entorno de laboratorio.

Por tanto, la instrumentación instalada (incluyendo alarmas y paradas de emergencia) se debe complementar con buenas prácticas de inicialización para mejorar la operatividad del prototipo.

### **6. Trabajo futuro**

Actividades complementarias a los desarrollos presentados, incluyen la inclusión de la servoválvula proporcional para manipulación del caudal de entrada al *tanque 1* y el correspondiente análisis de esquemas de control multilazo, experimentales, a través de rutinas de programación desarrolladas en el TIA PORTAL de SIEMENS.

Asimismo se deberán desarrollar guías de laboratorio para incluir el prototipo en las activi-

dades experimentales de las asignaturas de la línea de *Control y Automatización* de la E3T-UIS.

## 7. Conclusiones

A partir de los desarrollos presentados y los resultados obtenidos en el presente trabajo de grado, es posible enunciar la siguiente conclusión general:

Se realizó la instalación, adecuación y configuración para un sensor de flujo industrial SIEMENS (transductor SITRANS F M MAG 1100 F con principio de operación electromagnético, complementado por el transmisor SITRANS F M MAG 5000) en el sistema de tanques acoplados cilíndricos del *Laboratorio de Control e Instrumentación* de la E3T-UIS. A partir de ello se implementó un lazo de control automatizado de nivel basado en medidas de flujo, empleando un PLC S7-1500 de SIEMENS y una interfaz HMI, utilizando como elemento de actuación la variación de velocidad de una electrobomba monofásica.

De manera más puntual:

Se instaló y configuró un sensor de flujo industrial SIEMENS en el sistema de tanques del *Laboratorio de Control e Instrumentación* de la E3T-UIS. Tal y como fue abordado en el *Capítulo 2*, se realizó una descripción de la evolución en la instrumentación del sistema de tanques acoplados cilíndricos del laboratorio y se definieron los ajustes necesarios para incluir en la estructura del prototipo un transductor de caudal SIEMENS SITRANS F M MAG 1100 F, complementado por el transmisor SITRANS F M MAG 5000. Asimismo, en la *Sección 3.1* del *Capítulo 3*, se abordó de manera detallada la configuración realizada al dispositivo en mención.

Se determinó la configuración para un lazo de control de nivel en el sistema a partir de medidas de flujo de líquido mediante un sensor industrial SIEMENS. En particular, la Fig. 8 presenta la disposición final de elementos diseñada para la adecuación del sistema de tanques, incluyendo el sensor de flujo. En este punto es importante resaltar que para obtener manipulación dinámica en la medida de la variable  $\phi$ , fue necesario desarrollar una capacidad de actuación sobre la velocidad de la electrobomba principal encargada de realizar la recirculación del flujo de líquido. De esta manera, se realizó en la *Subsección 2.1* una descripción detallada del diseño de un circuito electrónico para realizar la variación de velocidad en la bomba monofásica. A partir de ello, se analizaron tres situaciones particulares: operación a lazo abierto con control de flujo (*Capítulo 3*), operación a lazo cerrado con control de nivel en cascada a partir de medidas del flujo (*Sección 4.2*) y operación a lazo cerrado con control de nivel simple a partir de medidas de nivel (*Sección 4.3*).

Se implementó el lazo de control y se verificó su desempeño a través de pruebas experimentales. De los resultados presentados en el *Capítulo 4*, y particularmente, mediante el análisis comparativo de las Figs. 17 y 19, fue posible concluir que la configuración para el lazo de control en cascada otorga mayor robustez al sistema para regular el nivel ante perturbaciones en las resistencias hidráulicas. Sin embargo, se resalta el hecho de que una configuración de lazo simple como la abordada en la *Sección 4.3*, puede considerarse como una alternativa de menor costo y con buenos resultados para realizar la tarea en mención.

Se analizó la viabilidad del sistema para ser empleado en la recirculación de aguas lluvias

del edificio del laboratorio de Alta Tensión de la E3T-UIS. En particular, la *Sección 4.5* plantea una solución de bajo costo para un sistema de respaldo basado en agua lluvia, para satisfacer la demanda de agua requerida para las descargas de las baterías sanitarias del segundo piso (Laboratorios de Ingeniería Electrónica) del Edificio de Alta Tensión de la UIS. Por tanto, a partir del esquema *PI&D* de la Fig. 22, se propone una modificación al prototipo de laboratorio actual que favorece desde puntos de vista económicos, técnicos y medioambientales, la viabilidad de la adecuación.

### Referencias Bibliográficas

- Acelas, S. J. and Mendoza Díaz, A. M. (2016). Control de nivel para un sistema de tanques en cascada empleando un PLC SIEMENS S7 1200. Trabajo de grado (ingeniería electrónica), Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.
- Ahmed, M., Hewavitharana, L., McKay, S., Ahmed, K., and Rashid, M. (2015). Development of low-cost laboratory experiments for Southern Arkansas University's engineering program. In *American Society of Engineering Education (ASEE) Zone III conference*, Seattle, WA.
- Atuesta Robledo, A. J. and Velandia Suárez, J. A. (2015). Instrumentación y puesta en marcha de un control de nivel de líquidos empleando un PLC ALLEN-BRADLEY. Trabajo de grado (ingeniería electrónica), Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.
- Crespi, F. and Pianta, M. (2008). Demand and innovation in productivity growth. *International Review of Applied Economics*, 22(6):655–672.
- DANE (2017a). Comunicado de prensa: Comercio exterior. *Departamento Administrativo Nacional de Estadística DANE, Bogotá Colombia*.
- DANE (2017b). Comunicado de prensa: Encuesta mensual manufacturera. *Departamento Administrativo Nacional de Estadística DANE, Bogotá Colombia*.
- Federation of Robotics (IFR), I. (2017). IFR FORECAST: 1.7 million new robots to transform the world's factories by 2020.

- Flórez Reyes, J. O. (2014). Uso racional de la energía: Iluminación y climatización en edificaciones a partir de procesos de automatización. Tesis de maestría (magister en ingeniería electrónica), Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.
- (iSTEM), I. I. S. E. (2013). welab: Low-cost engineering laboratory project. *Ohio State University*.
- LTDA., A. D. I. T. (2016). *Unidad de Entrenamiento en Automatización UEA: Manual de Operación y Mantenimiento*. Independiente, Bogotá, Colombia.
- Mendez, J. A., Torres, S., Acosta, L., Sigut, M., and Moreno Ruiz, L. (2006). A control engineering laboratory based on a low-cost non-linear plant. *International Journal of Engineering Education*, 22.
- Muñoz Suárez, S. F., Guarín Mantilla, D. F., and Sarmiento Cruz, G. R. (2013). Instrumentación y control de velocidad para un motor de corriente alterna en el laboratorio de control e instrumentación de la E3T-UIS. Trabajo de grado (ingeniería eléctrica e ingeniería electrónica), Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.
- Neira Duarte, L. Y. and Prada Medina, R. I. (2008). Diseño del proyecto para implementación de una sala TIA (Totally Integrated Automation) y adaptación de un proceso industrial para desarrollo de prácticas de entrenamiento en las áreas de instrumentación, automatización y control. Trabajo de grado (ingeniería electrónica), Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.
- Novoa Díaz, D. F. and Prada Mejía, J. A. (2001). Planeación, diseño y realización del laboratorio de

instrumentación electrónica para la E3T. Trabajo de grado (ingeniería electrónica), Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.

Osma Pinto, G. A. (2016). *Caracterización del desempeño de paneles fotovoltaicos en terrazas de edificaciones localizadas en entornos con clima cálido tropical*. Doctor en ingeniería (ing. eléctrica), Universidad Industrial de Santander.

Peñaranda, C. Y., Silva, W. R., and Gómez Arias, E. (2014). Instrumentación y control de nivel para un sistema de tanques acoplados en el laboratorio de control e instrumentación de la E3T-UIS. Trabajo de grado (ingeniería eléctrica e ingeniería electrónica), Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.

Ramires Vega, D. H. and Torres Sánchez, E. E. (2007). Sistema de gestión para un prototipo de sistema SCADA en el laboratorio de instrumentación electrónica de la E3T. Trabajo de grado (ingeniería electrónica), Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.

Reck, R. M. (2015). BYOE: Affordable and portable laboratory kit for controls courses. In *American Society of Engineering Education (ASEE) Zone III conference*, Seattle, WA.

SIEMENS (2017). Comparativa para S7-1200 / S7-1500.

SIEMENS (2019a). Sensor SITRANS F M MAG 1100 F.

SIEMENS (2019b). SIMATIC KTP700 Basic.

SIEMENS (2019c). SIMATIC S7 - 1500.

SIEMENS (2019d). Transmisor SITRANS F M MAG 5000.

Yu, Q. and Dahl, J. (2017). Kepler Tech Lab: Developing an affordable skills-based engineering lab course in Rwanda. In *American Society of Engineering Education (ASEE) International Forum*, Columbus , Ohio.

## Apéndices

### Apéndice A. Configuración PLC Siemens S7-1500

La configuración del controlador se debe realizar a nivel de *hardware* y *software* con el fin de operar y realizar las pruebas pertinentes. Este *Anexo* describe las distintas configuraciones que se llevaron a cabo para la ejecución del proyecto.

#### Interconexiones entre el PLC y los dispositivos

El PLC *S7-1500*, utilizado en este proyecto, cuenta con un módulo de entradas y salidas analógicas que permiten leer y generar señales de  $0 - 20[mA]$  y  $0 - 10[V]$ , con una resolución de 16 bits. Asimismo, cuenta con dos módulos de entradas y salidas digitales que pueden leer o generar bajos de  $0[V]$  y altos de  $24[V]$ . Estos dos módulos hacen posible la interacción con los distintos elementos de la planta como se muestra en la Figura 23.

Tanto el transmisor de nivel como el de caudal cuentan con dos terminales que generan una señal de  $4 - 20[mA]$ . Sin embargo, el sensor de caudal es alimentado externamente a 120 [VAC], permitiendo que su conexión con el PLC sea sólo a nivel de señal. Por su parte, el transmisor de nivel debe ser alimentado a 24 [V], haciendo que su conexión sea distinta a la del sensor de caudal, aún cuando ambos son sensores de dos hilos. En cuanto a las salidas, el circuito variador de velocidad es controlado por una señal analógica de  $0 - 10[V]$  y los relés son activados por medio de una señal de  $24[V]$ . Todas las interconexiones fueron realizadas con cable vehicular calibre 22.

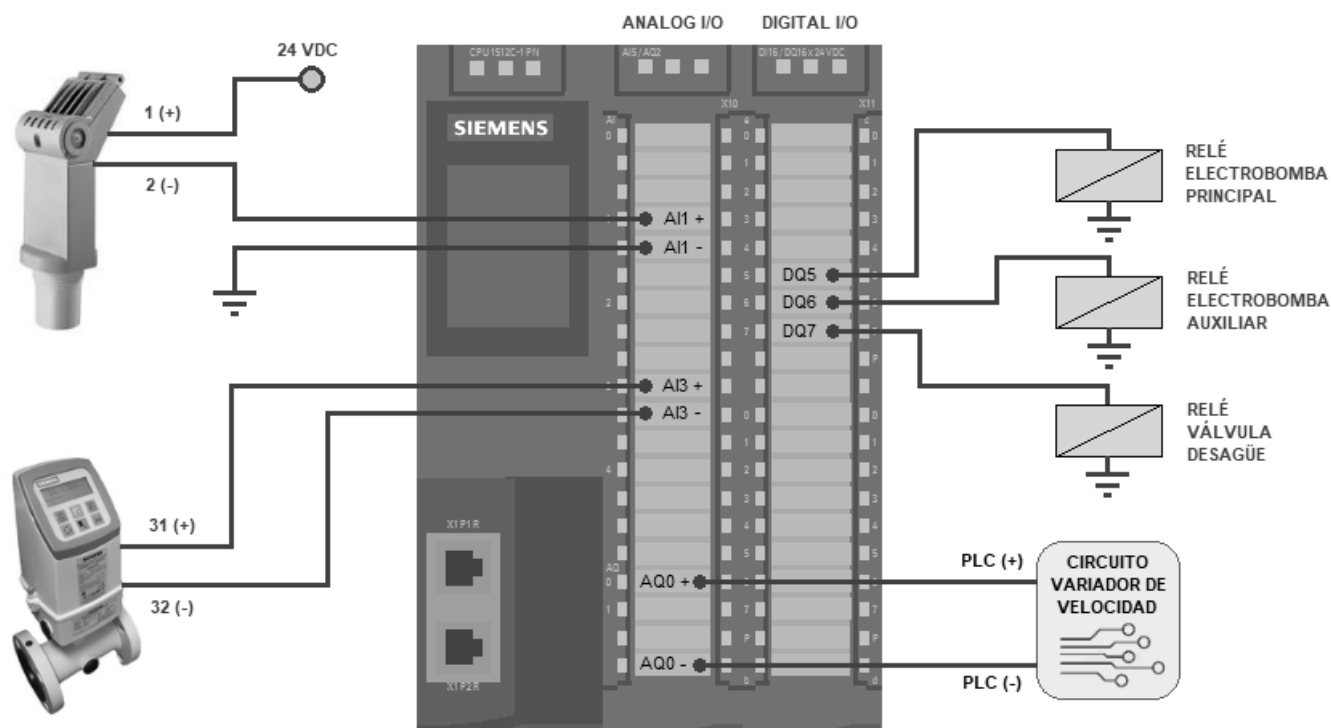


Figura 23. Diagrama de conexiones entre PLC y dispositivos

### Nuevo proyecto y configuración de dispositivos

La configuración de los dispositivos, así como la programación de las rutinas utilizadas en cada uno de los procesos de este proyecto, fueron realizadas por medio de la herramienta *TIA PORTAL* del paquete de software *SIMATIC STEP 7 BASIC* en su versión 14.

Al abrir la herramienta *TIA Portal*, la ventana que emerge (ver Fig. 24) nos ofrece varias opciones para iniciar, entre ellas abrir un proyecto existente, un proyecto reciente o crear un nuevo proyecto. Para crear un nuevo proyecto se debe: 1) Seleccionar *Crear proyecto*; 2) Nombrar el

proyecto; 3) Hacer click en *Crear*.

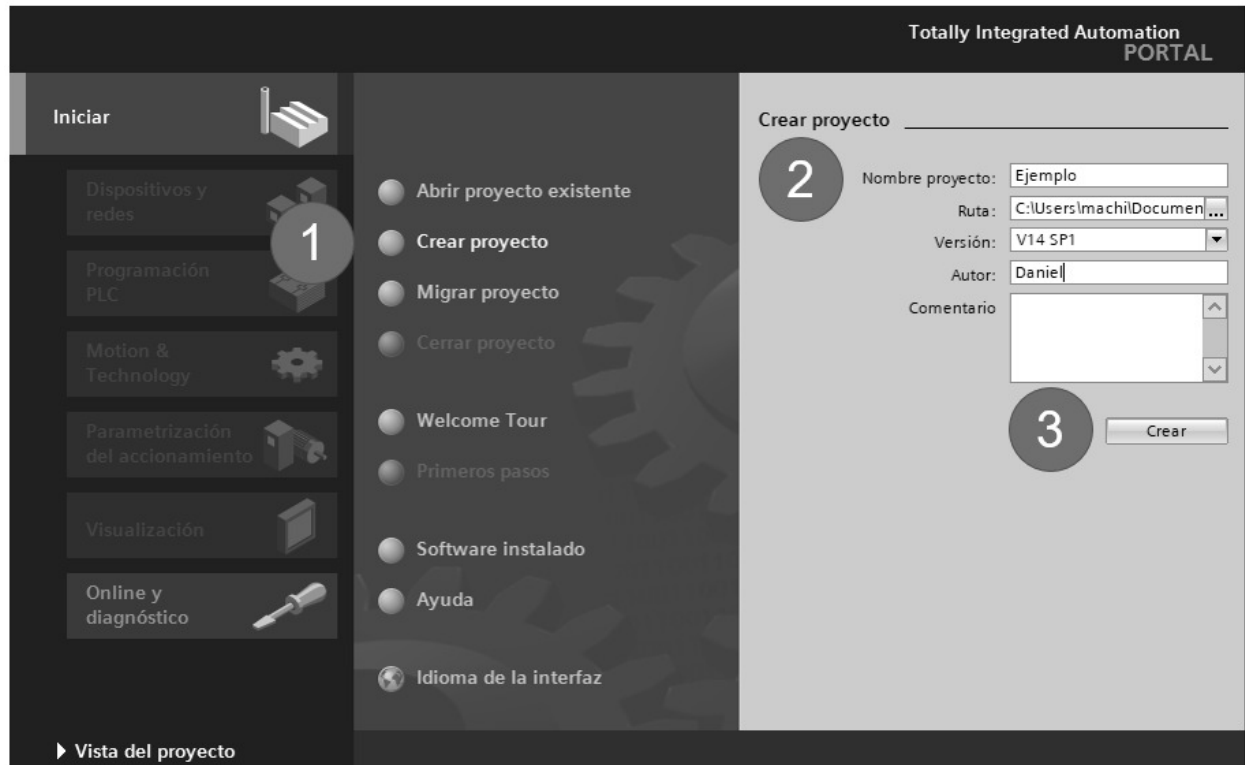


Figura 24. Creación de proyecto en TIA Portal

Una vez creado el proyecto, es necesario vincular al programa los dispositivos que se van a usar (ver Fig. 25), en este caso la CPU del controlador y la HMI. Para agregar la CPU se debe conocer su referencia de antemano y seleccionar: 1) *Dispositivos y redes*; 2) *Agregar dispositivo*; 3) *Controladores*; 4) y a partir de allí seleccionar del árbol la referencia exacta, en este caso *SIMATIC S7-1500, CPU y 1512C-1 PN 6ES7 512-1CK00-0AB0*. El procedimiento se debe repetir para agregar la HMI.

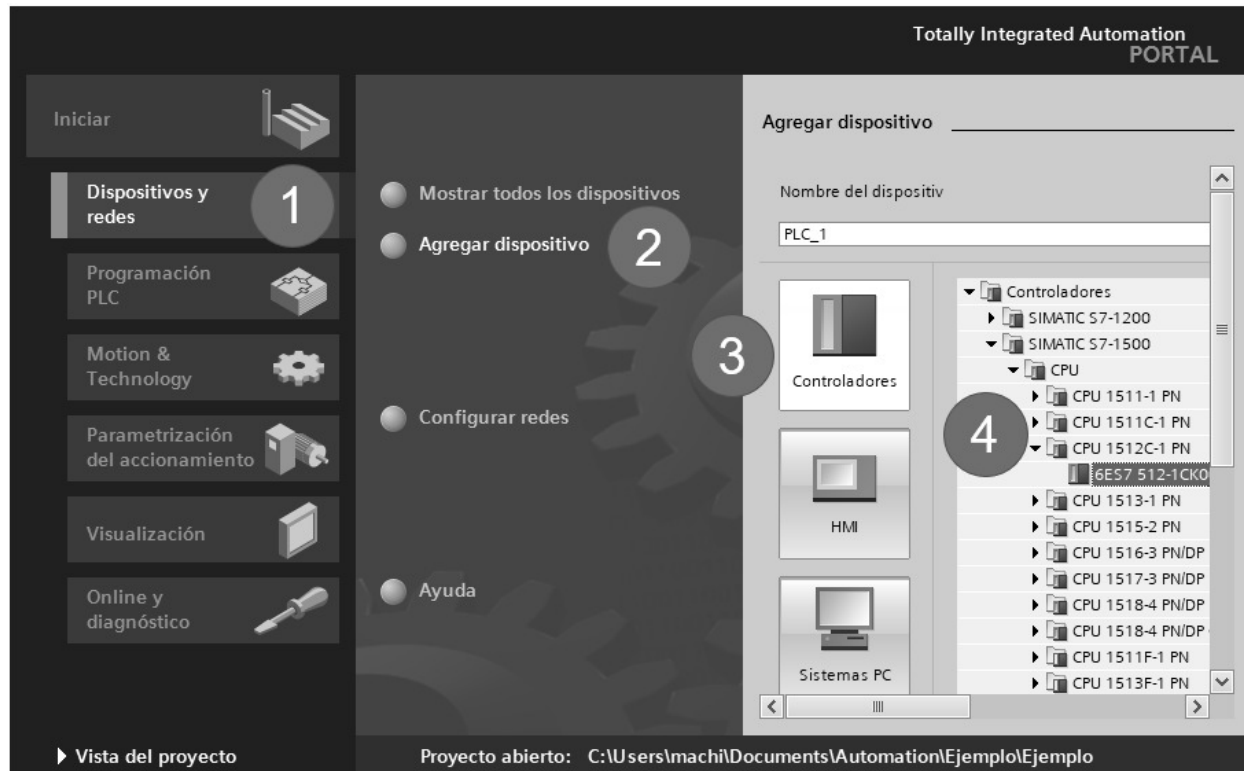


Figura 25. Agregar dispositivo

La nueva pantalla nos permite agregar módulos adicionales a ser usados en el proyecto. La referencia de esta CPU incluye de antemano el módulo de entradas y salidas tanto analógicas como digitales, por lo que no es necesario agregarlos. Al hacer doble click en el dispositivo que queramos es posible acceder a las propiedades del mismo para configurar su dirección IP (ver Fig. 26).

Con los dispositivos necesarios agregados y configurados, es posible proceder a crear rutinas y programas en el lenguaje deseado para su posterior carga.

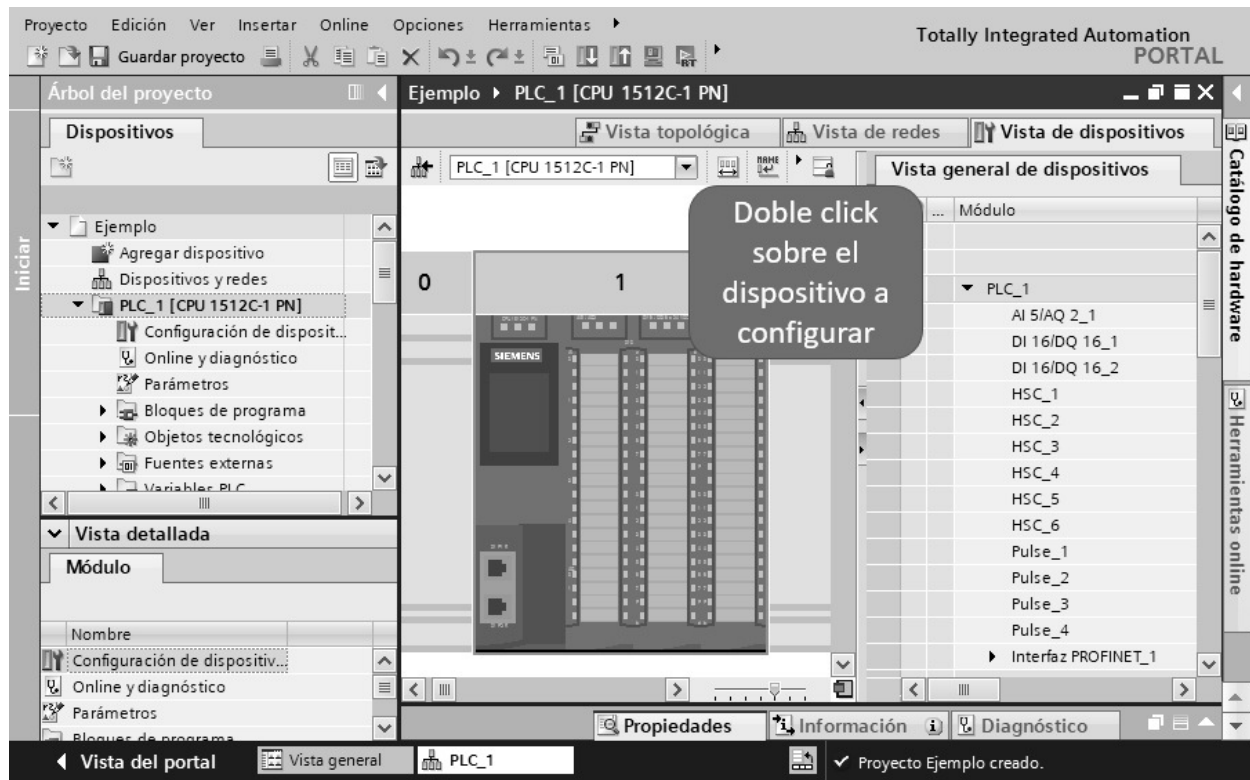


Figura 26. Propiedades de dispositivo

### Conexión, programación y carga de rutinas

La carga de rutinas del PC al PLC requiere que exista una conexión entre los dos dispositivos. Haciendo *Online* y luego en *Establecer conexión online* es posible acceder a la ventana de comunicación, ilustrada en la Figura 27, para posteriormente iniciar la conexión.

De entre las opciones de programación que permite esta herramienta, se hizo uso principalmente del lenguaje *FUP*, usando bloques de funciones prediseñados, y el lenguaje *KOP* o ladder para diseñar la lógica del sistema.

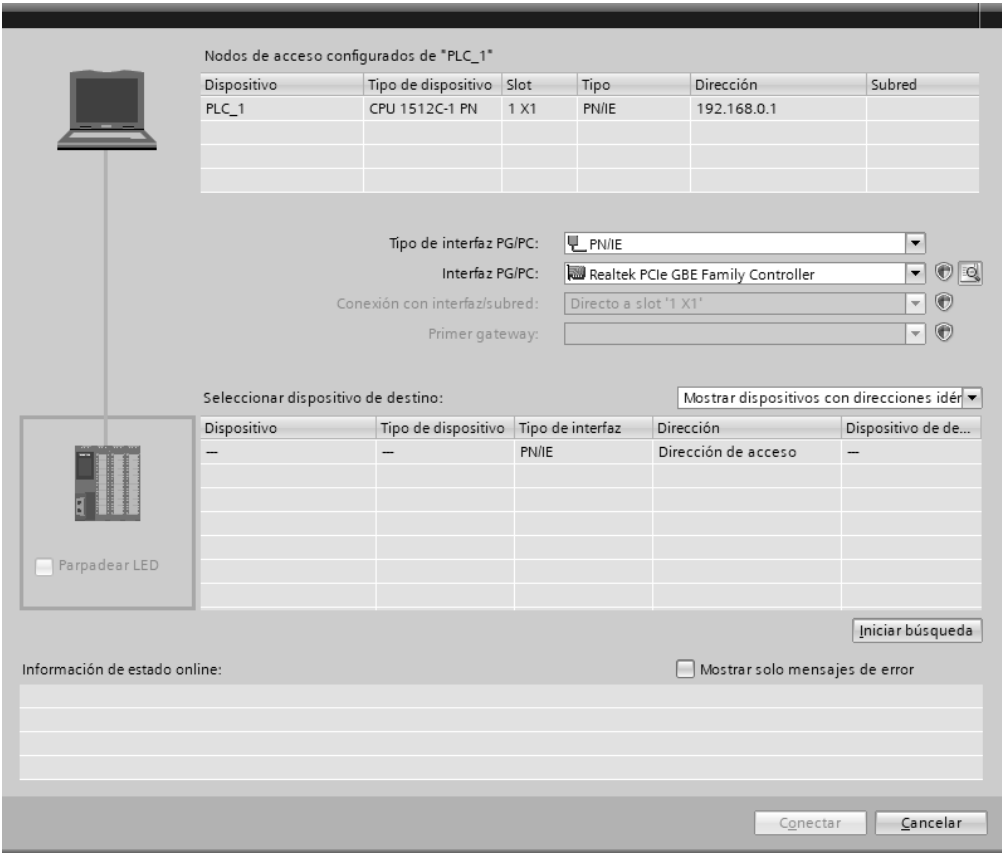


Figura 27. Ventana de comunicación entre dispositivos

El lenguaje *FUP* fue utilizado principalmente para la lectura, tratamiento y generación de señales analógicas involucradas en el proyecto. A modo de ejemplo, se describirá el procedimiento para la programación de un segmento que lea la señal generada por el sensor de caudal, conectado en la entrada analógica AI3 del PLC. Para iniciar la programación se debe seguir la siguiente ruta en la sección *Árbol del proyecto*: PLC\_1 [CPU 1512C-1 PN] > Bloques de programa > Main [OB] (ver Fig. 28).

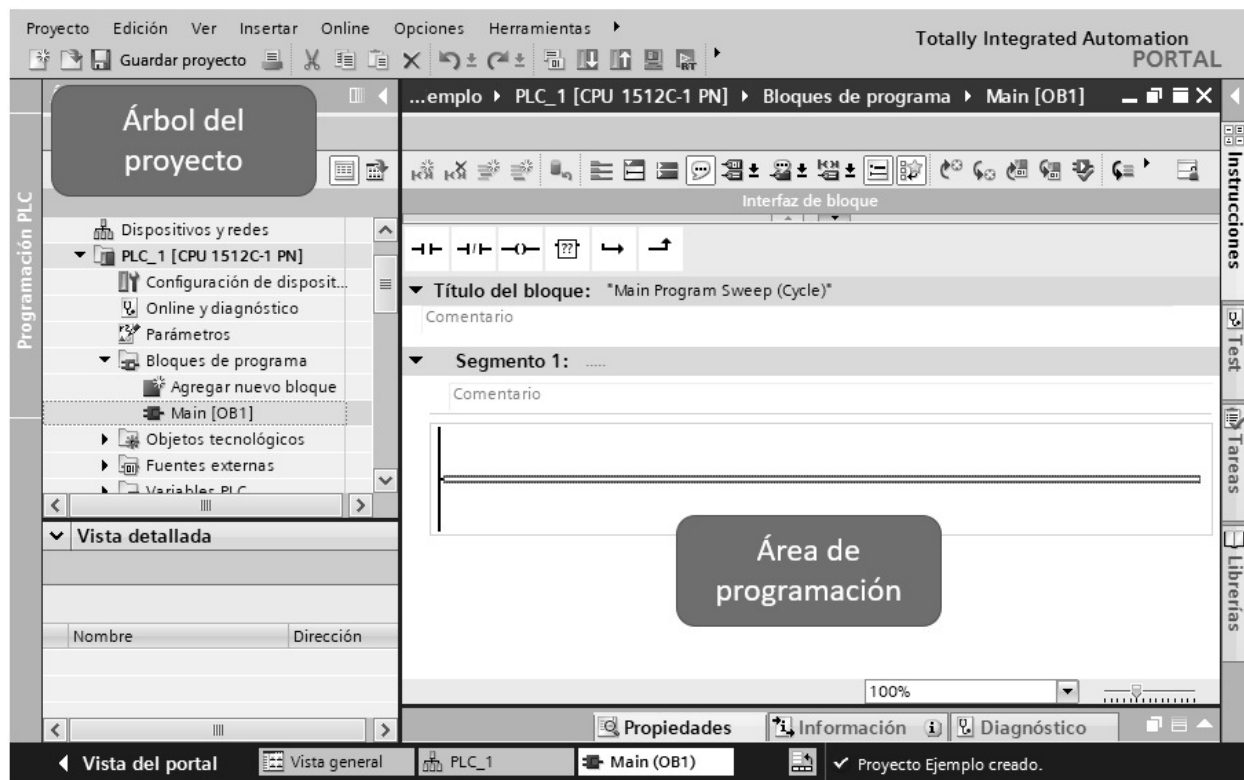


Figura 28. Iniciar programación

Es necesario considerar que la tarjeta del controlador *S7-1500* lee entradas de 0 a 20 [mA], generando valores entre un rango de 0 a 27648 dentro de una variable de tipo entero (INT). Siendo que el sensor genera una señal cuyo mínimo valor es de 4 [mA], el valor mínimo generado por el controlador será de 5530. Esta variable de tipo INT requiere ser normalizada y escalada para su tratamiento y análisis, operaciones que se ejecutarán por medio de bloques funcionales prediseñados en el software. Para añadir uno de estos bloques, basta con arrastrar un bloque vacío de la barra de herramientas y escribir el nombre de la función deseada.

La función de normalizado tomará el valor que reciba de la variable INT y generará un valor entre 0 y 1, por medio del bloque *NORM\_X*, que se configurará como se muestra en la Figura 29.

Los parámetros MIN y MAX definen los límites del rango de entrada que se reflejarán en la escala de salida. La variable a normalizar por medio del parámetro VALUE será la dirección de la entrada analógica AI3, en este caso IW6. En función del valor de la variable de entrada dentro de la escala definida, el bloque generará un valor que depositará como número en coma flotante dentro de la variable especificada en el parámetro OUT.

La función de escalado, por medio del bloque SCALE\_X, tomará el valor generado por el bloque NORM\_X y lo mapeará dentro de un rango de valores que debe ser definido de acuerdo a los límites de la variable medida. Para el ejemplo, el transmisor de caudal sensa un flujo mínimo de 0 [l/h] y un flujo máximo de 1750 [l/h]. El parámetro VALUE indica la variable a ser escalada dentro del rango de valores definidos por medio de los parámetros MIN y MAX, para posteriormente generar un valor de tipo entero dentro de la variable MD56 especificada en el parámetro OUT, como se muestra en la Figura 29.

Con la rutina ya programada, es posible iniciar la carga a la CPU del controlador. Al hacer *Online* y luego en *Carga en dispositivo* se despliega la ventana ilustrada en la Figura 30, que nos indicará el estado de compilación, para posteriormente cargar el programa.

### **Diseño e implementación de una HMI**

Con el fin de interactuar con las rutinas programadas en el PLC, ya sea para conocer el estado o el valor de una variable, o para directamente alterarlo, es posible valerse de una interfaz Hombre-Máquina. Para ilustrar cómo se configura una HMI se diseñará un visor que permita conocer el flujo sentido por el caudalímetro, al mostrar la variable normalizada y escalada previamente.

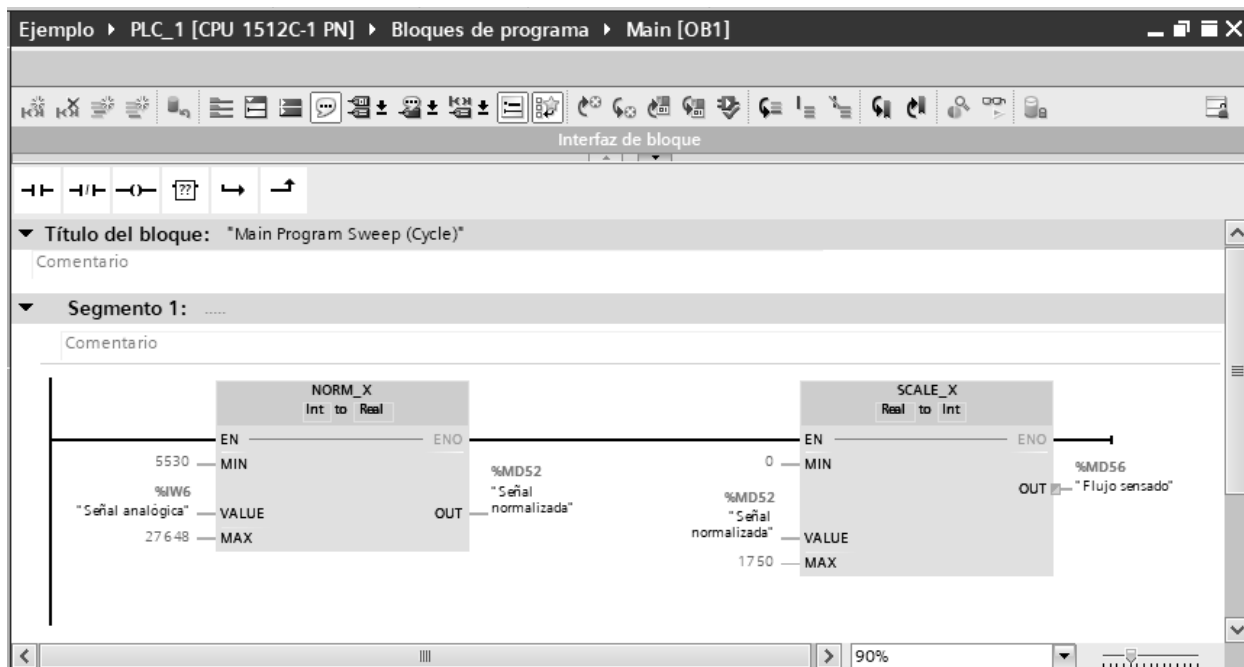


Figura 29. Lectura de señal analógica

Para iniciar la programación de la HMI se debe seguir la siguiente ruta en la sección *Árbol del proyecto*: HMI\_1 [KTP700 Basic DP] > Imágenes > Imagen raíz (ver Fig. 31). Luego, para agregar el visor se sigue la siguiente secuencia en la sección *Herramientas*: Opciones > Elementos > Campos E/S. Este elemento funciona como campo de entrada, para ingresar algún valor, o salida, para visualizar una variable. Seguidamente, se ejecuta la siguiente secuencia en la sección *Propiedades*: General > Proceso > Variable > Variables PLC > Tabla de variables > 'Flujo sentido'.

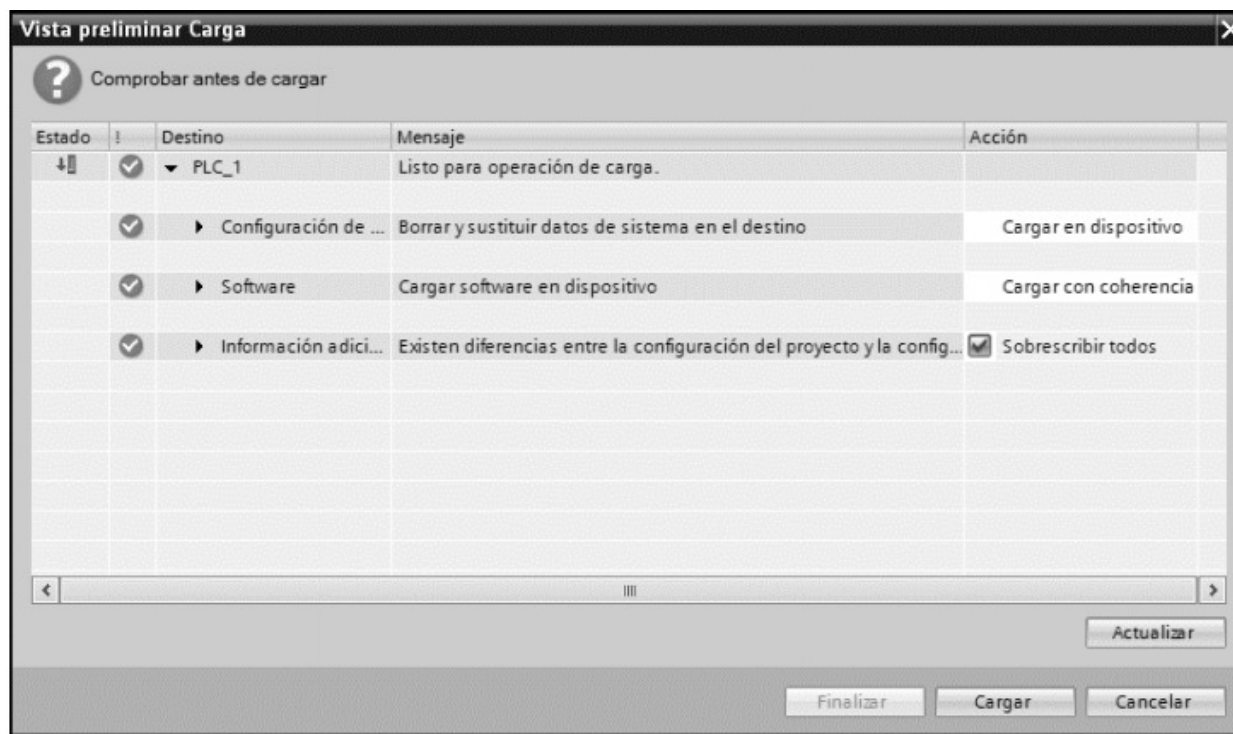


Figura 30. Ventana de carga de programa

### Captura de datos por medio de HMI

La HMI *KTP700 BASIC* permite realizar la captura de datos en tiempo real por medio de una memoria de tipo USB, conectada a la pantalla. Siendo esta una alternativa práctica y eficaz que evita la implementación de elementos adicionales para protocolos de almacenamiento de datos más complejos.

La configuración de un fichero para almacenar los valores de flujo sensado a lo largo del tiempo se ilustra en la figura 32: HMI\_1 [KTP700 Basic DP] > Ficheros > Ficheros de variables (Agregar) > Variables de ficheros (Agregar) > Variable de proceso (Seleccionar 'Flujo sensado'). El producto final es un archivo de extensión .txt, con un registro de la variable sensada y hora y

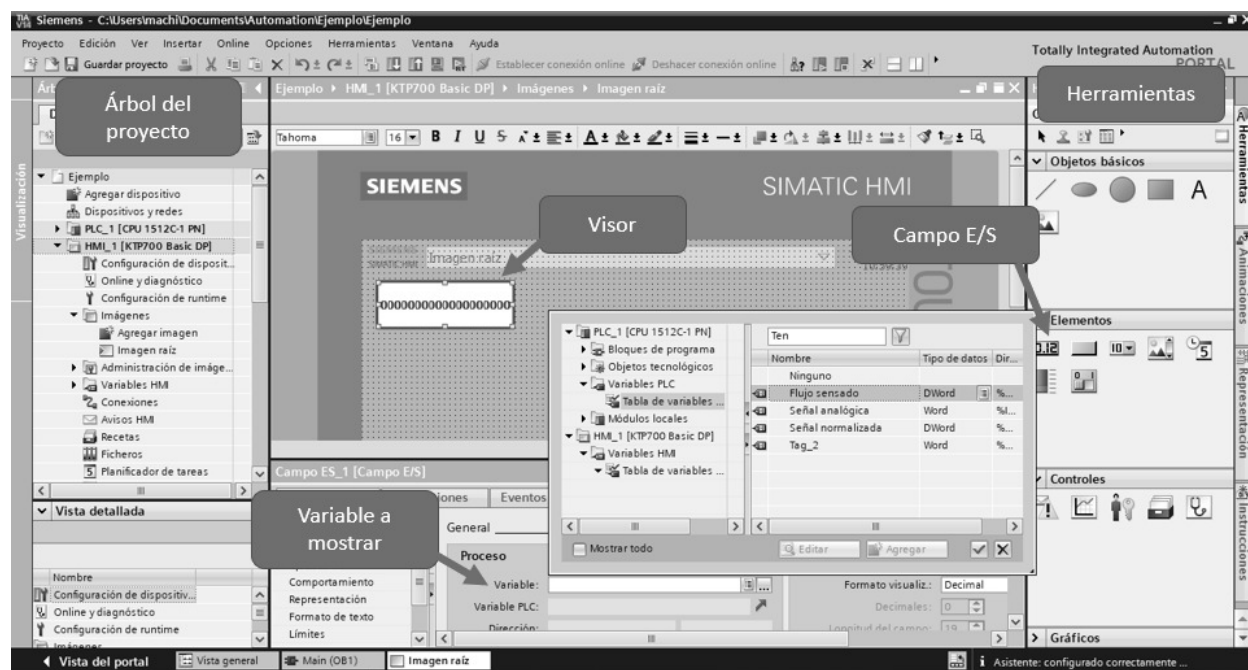


Figura 31. Configuración de imagen para HMI

fecha de cada dato.

## Creación y configuración de un control PID

Para generar y configurar un bloque de control de tipo PID es necesario seguir la secuencia de pasos ilustrada en la Figura 33 bajo la sección *Árbol de proyecto*: PLC\_1 [CPU 1512C-1 PN] > Objetos tecnológicos > Agregar objeto > PID Control > Compact PID > PID\_Compact.

Con fin de utilizar el bloque de control PID dentro de la rutina programada, es necesario crear un bloque de tipo *interrupción cíclica* de la siguiente manera (ver Fig. 34), bajo la sección *Árbol de proyecto*: PLC\_1 [CPU 1512C-1 PN] > Bloques de programa > Agregar nuevo bloque > Bloque de organización > Cyclic interrupt.

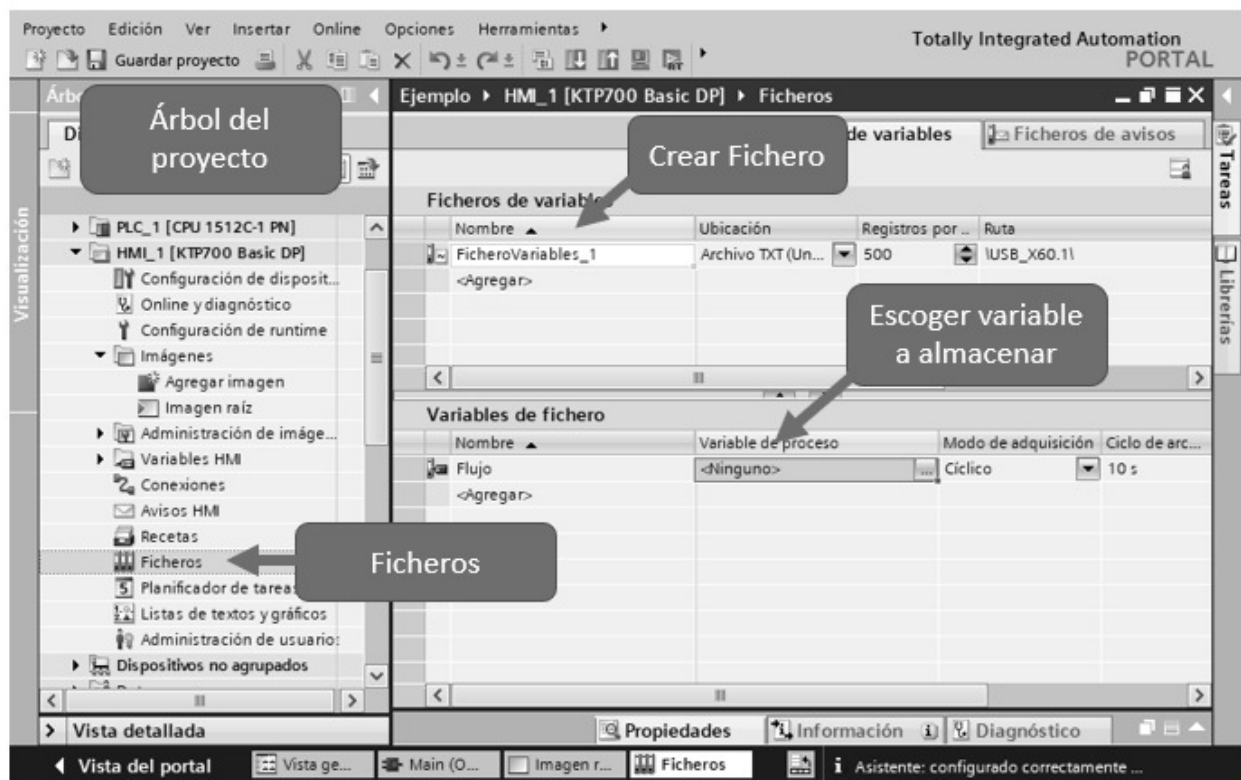


Figura 32. Creación de fichero para toma de datos por medio de USB

Ahora, es posible agregar el bloque PID generado anteriormente dentro de este nuevo bloque organizacional, siguiendo la siguiente rutina (ver Fig. 35) bajo la sección *Instrucciones*: Opciones > Tecnología > PID Control > Compact PID > PID\_Compact. Una vez completada la secuencia, el bloque estará dentro de la rutina y deberá ser configurado antes de sintonizarlo. Para ello se siguen los siguientes pasos bajo la sección *Arbol del proyecto*: PLC\_1 [CPU 1512C-1 PN] > Objetos tecnológicos > PID\_Compact\_1 > Configuración. Dentro, es posible definir el tipo de variable que se va a controlar, las variables de entrada y salida, los límites del rango de operación, entre otros.

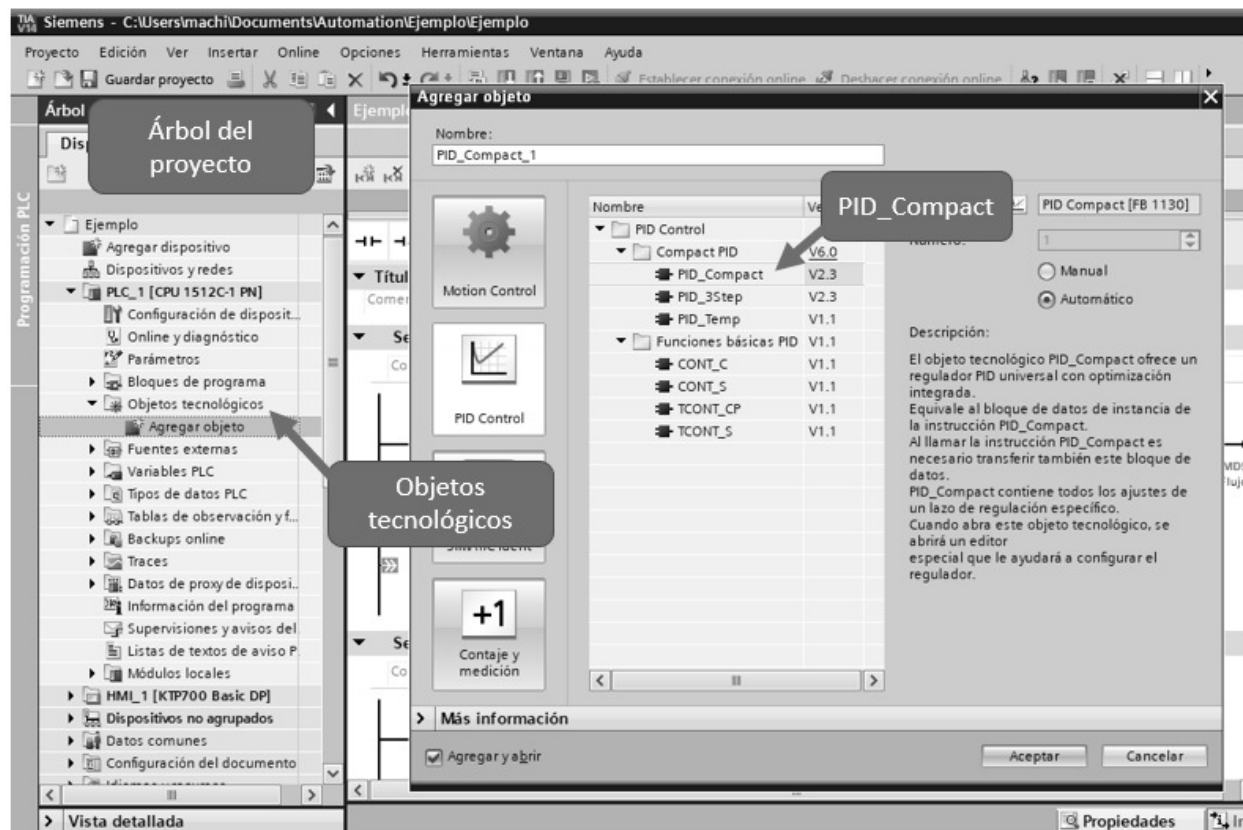


Figura 33. Generación de bloque de control PID

### Sintonización automática de un bloque de control PID

La configuración del bloque PID\_Compact permite ingresar valores de manera manual para sus parámetros PID. Sin embargo, el software *TIA PORTAL* ofrece una sintonización automática siguiendo la secuencia bajo la sección *Árbol del proyecto*: PLC\_1 [CPU 1512C-1 PN] > Objetos tecnológicos > PID\_Compact\_1 > Puesta en marcha, lo que desplegará la ventana ilustrada en la Figura 36. Dentro de esta ventana será posible visualizar en tiempo real la sintonización del control PID al seguir la siguiente secuencia: 1) Tiempo de muestreo = 0.3 [s]; 2) Start; 3) Modo de ajuste:

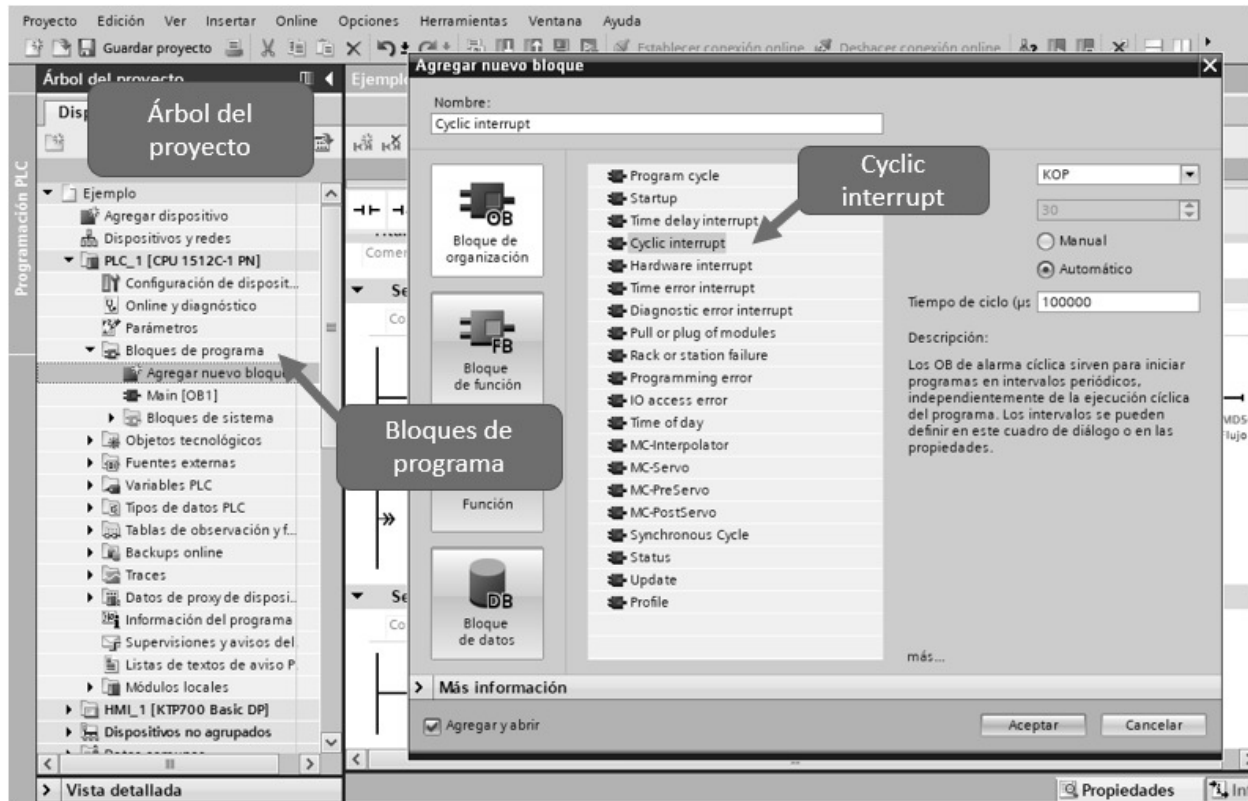


Figura 34. Generación de bloque organizacional tipo *interrupción cíclica*

Optimización Inicial; 4) Start; 5) Cargar parámetros PID.

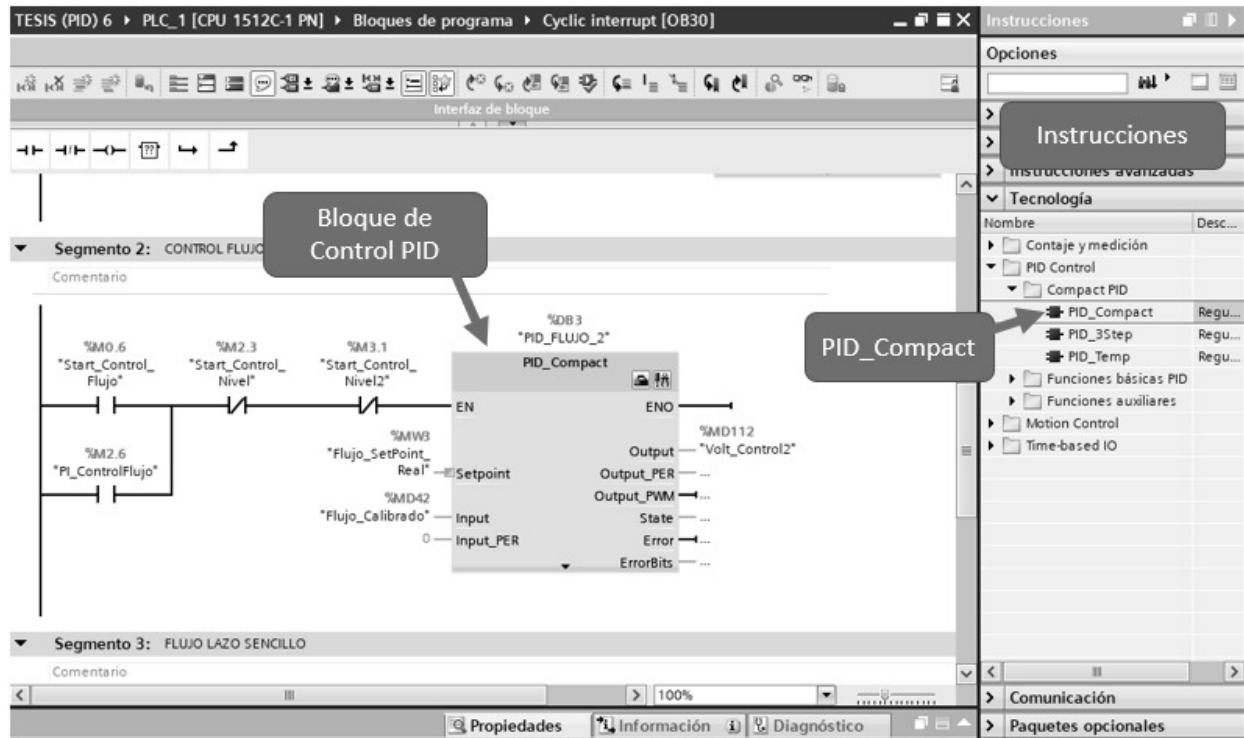


Figura 35. Bloque de control PID en rutina de programa

## Apéndice B. Rutinas de programación LADDER



Figura 36. Ventana para sintonización automática de bloque PID

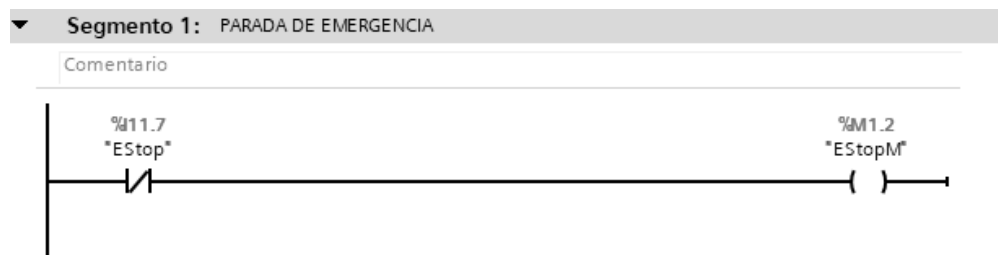


Figura 37. Parada de emergencia del sistema

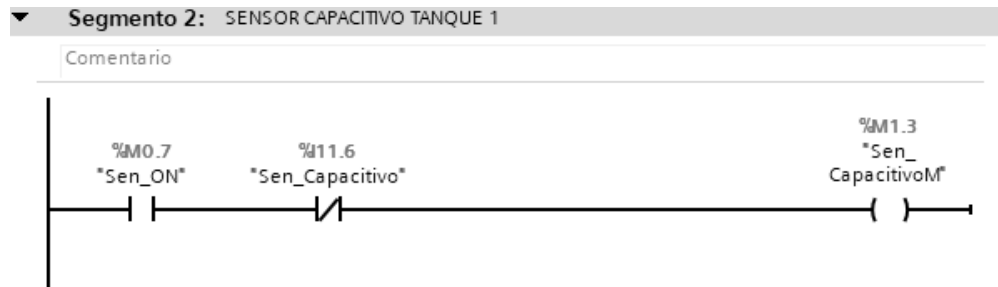


Figura 38. Lógica de sensor capacitivo situado en tanque principal

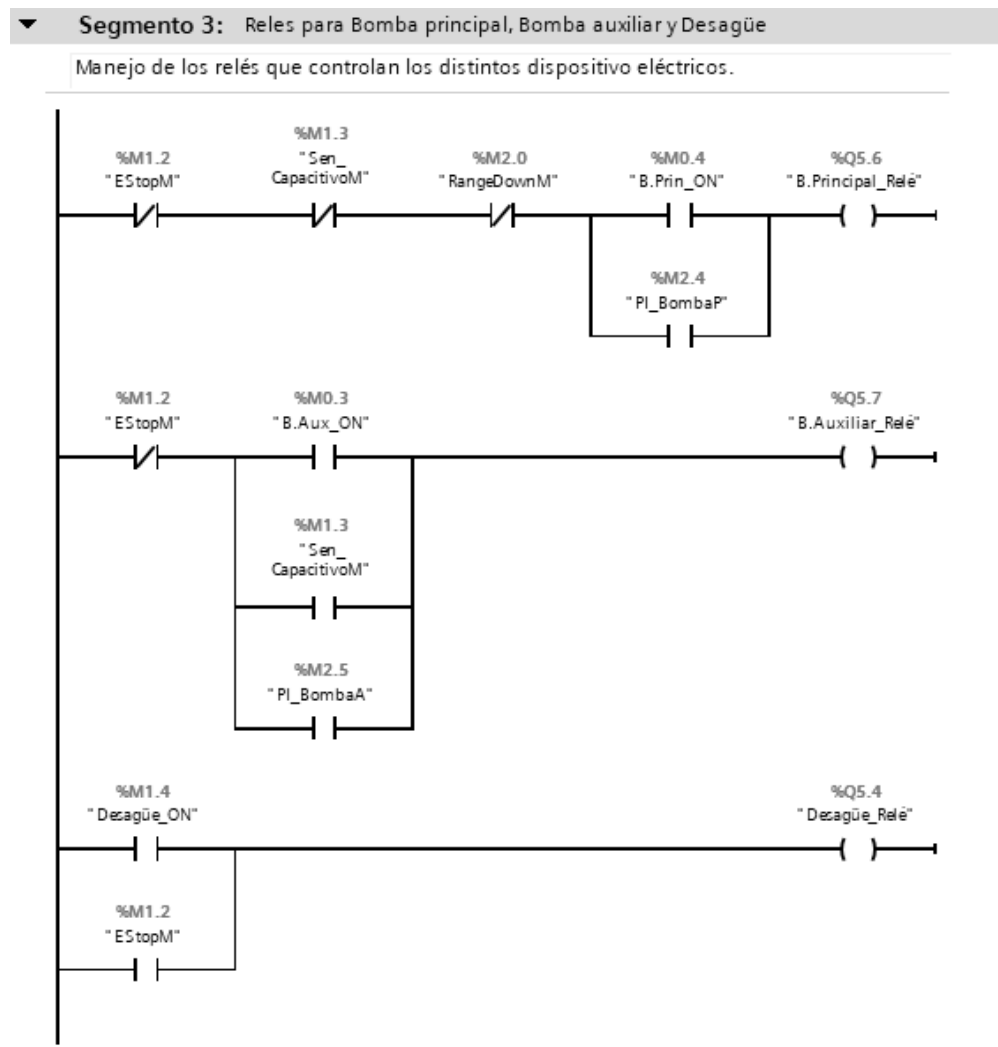


Figura 39. Manejo y control de relés vinculados a elementos eléctricos

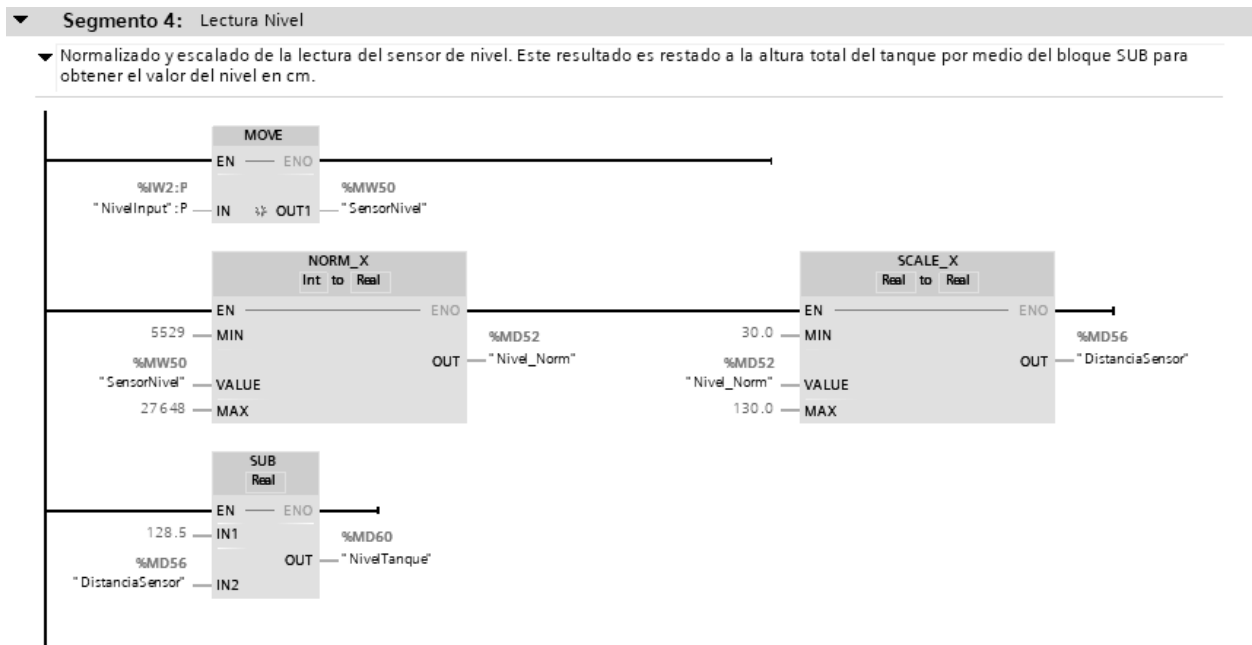


Figura 40. Lectura y calibración de señal del transmisor de nivel ultrasónico

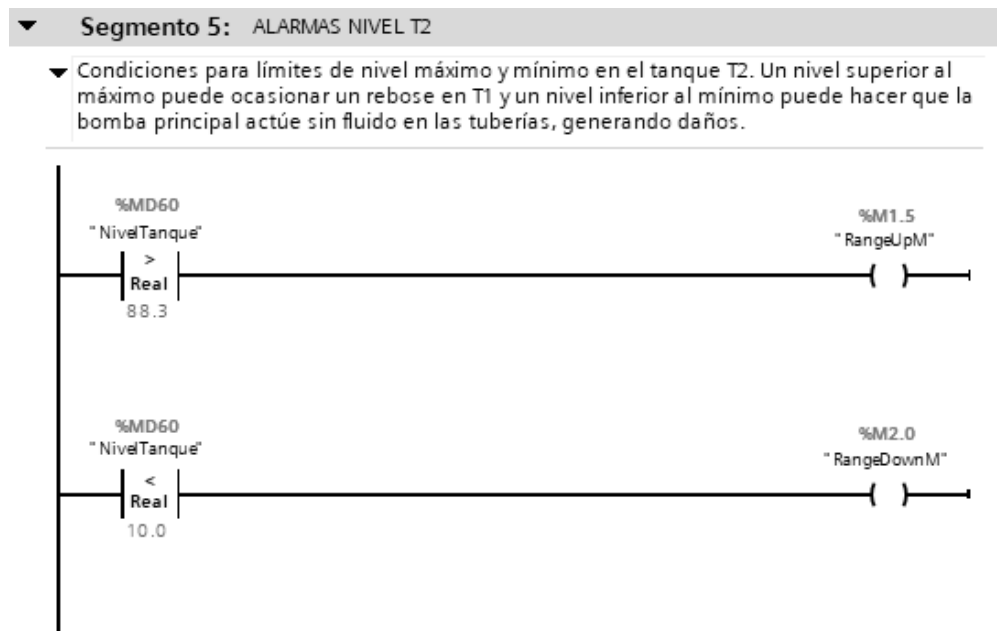


Figura 41. Lógica para accionar alarma de niveles críticos en  $h_2$

**▼ Segmento 6: ALARMA BUZZER**

- ▼ Todas las distintas opciones que activan el buzzer de la alarma: Parada de Emergencia, Sensor Capacitivo en T1, Nivel máximo o mínimo de agua superados en T2. El contacto normalmente abierto "BuzzON" permite tener control sobre el buzzer desde la HMI.

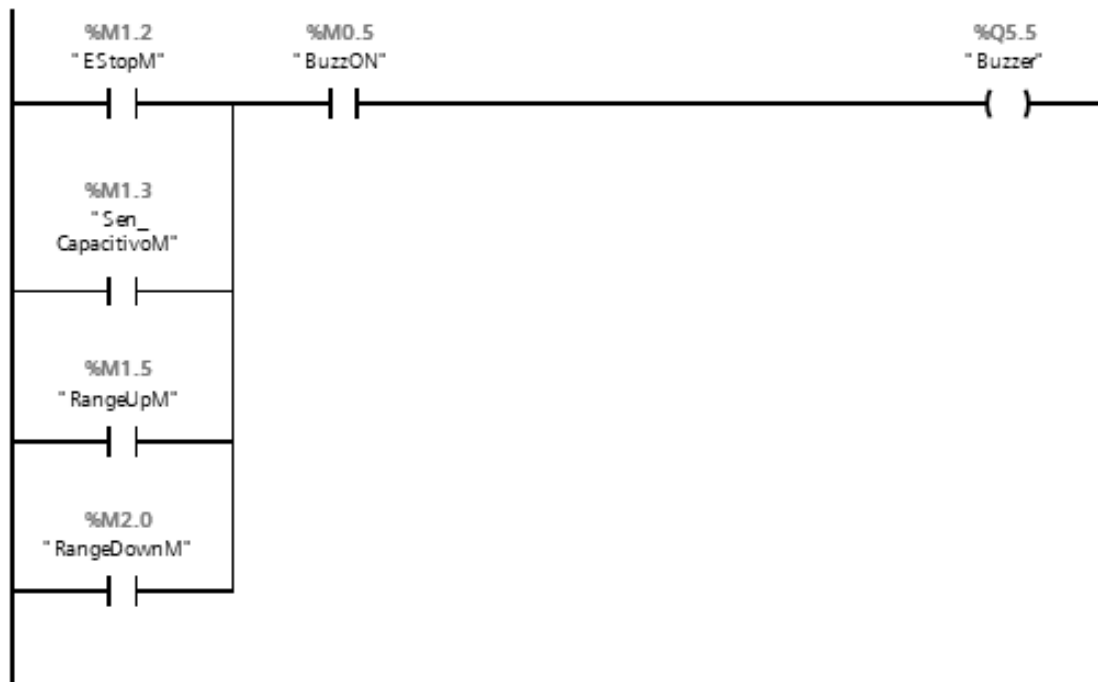


Figura 42. Condiciones que accionan alarma del prototipo

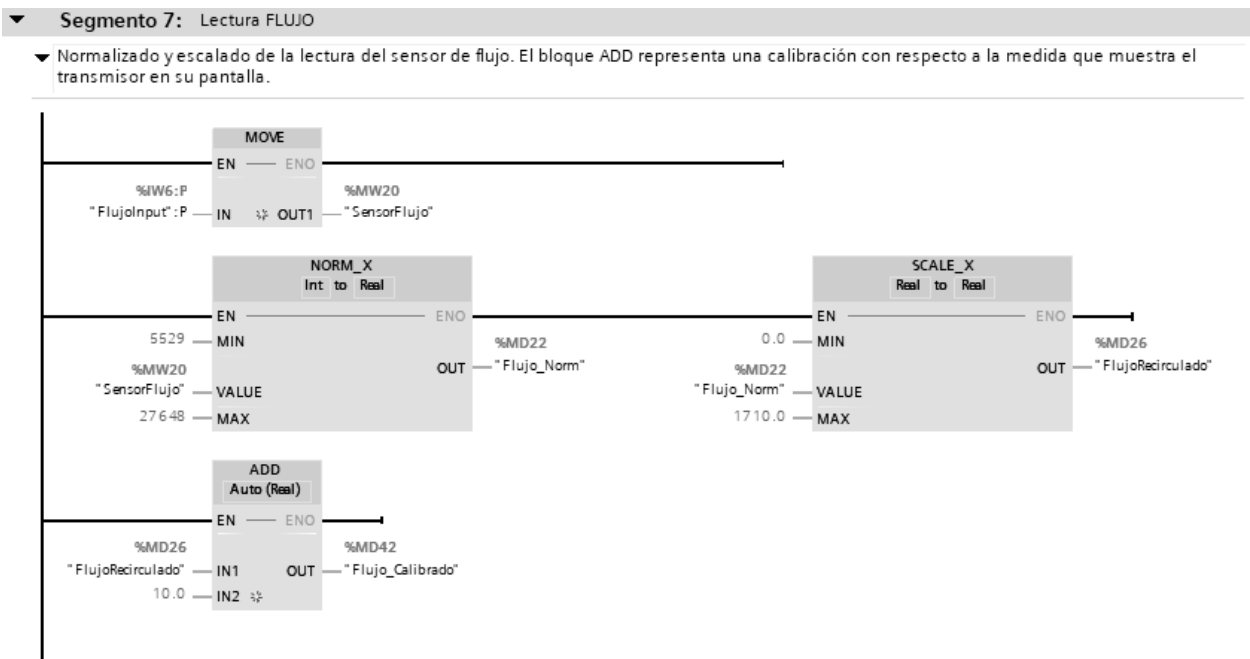


Figura 43. Lectura y calibración de señal del transmisor de flujo

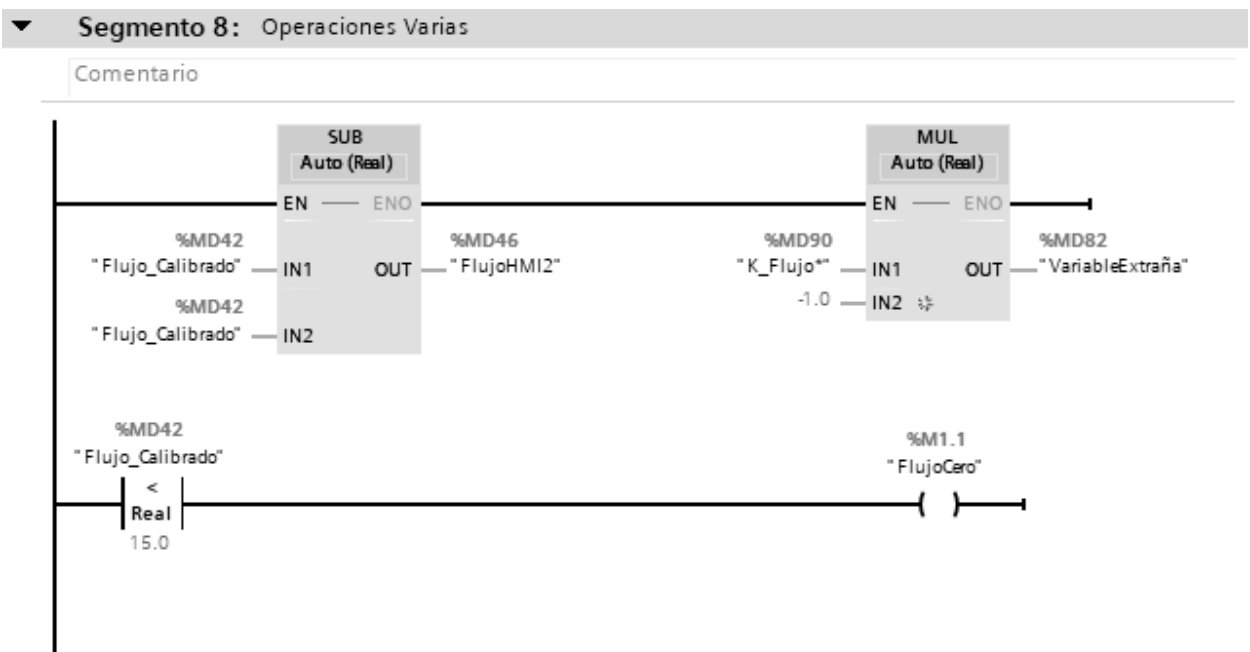


Figura 44. Lógica generada para desplegar en HMI valores de flujo mínimo

#### ▼ Segmento 9: Adecuación señales de control para NIVEL (tension para flujo)

▼ Tratamiento de la señal de control generada por el controlador PID. El bloque SUB invierte la señal, puesto que el funcionamiento del circuito controlador es inverso. A mayor tensión menor velocidad en la bomba. El bloque SCALE\_X asegura que la señal de control mínima sea 6,3 (17418) y la máxima sea 7,4 (20736). Los bloques MOVE permiten llevar la señal de control a la periferia; la salida analógica recibirá la señal de control del PID tratada si el control está habilitado, o enviará 0V si el control está inhabilitado.

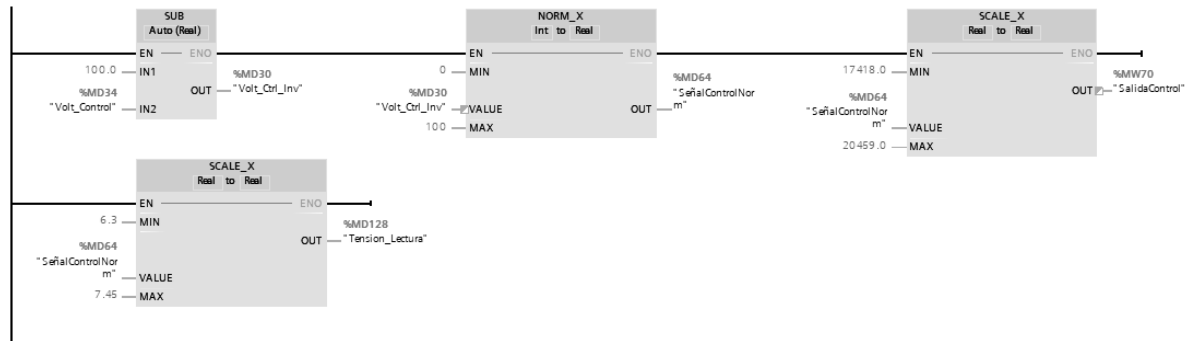


Figura 45. Tratamiento de señal PID para control en cascada y sencillo de nivel

#### ▼ Segmento 10: Adecuación señal de control para NIVEL (flujo para nivel)

► Tratamiento de la señal de control generada por el controlador PID. El bloque SUB invierte la señal, puesto que el funcionamiento del circuito controlador es inverso. ...

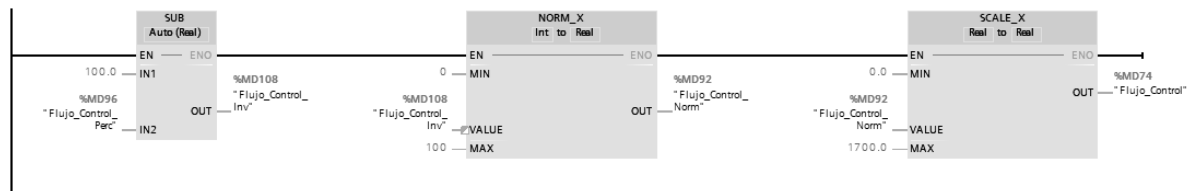


Figura 46. Tratamiento de señal PID para control en cascada de nivel

#### ▼ Segmento 11: Adecuación señal de control para FLUJO (tensión)

▼ Tratamiento de la señal de control generada por el controlador PID. El bloque SUB invierte la señal, puesto que el funcionamiento del circuito controlador es inverso. A mayor tensión menor velocidad en la bomba. El bloque SCALE\_X asegura que la señal de control mínima sea 6 (16589) y la máxima sea 7,6 (21013). Los bloques MOVE permiten llevar la señal de control a la periferia; la salida analógica recibirá la señal de control del PID tratada si el control está habilitado, o enviará 0V si el control está inhabilitado.

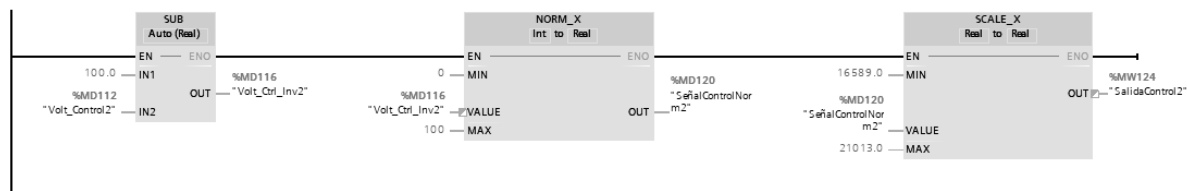


Figura 47. Tratamiento de señal PID para control sencillo de flujo

▼ Segmento 12: Bloques MOVE para elegir qué señal es enviada a la salida analógica dependiendo del control usado.

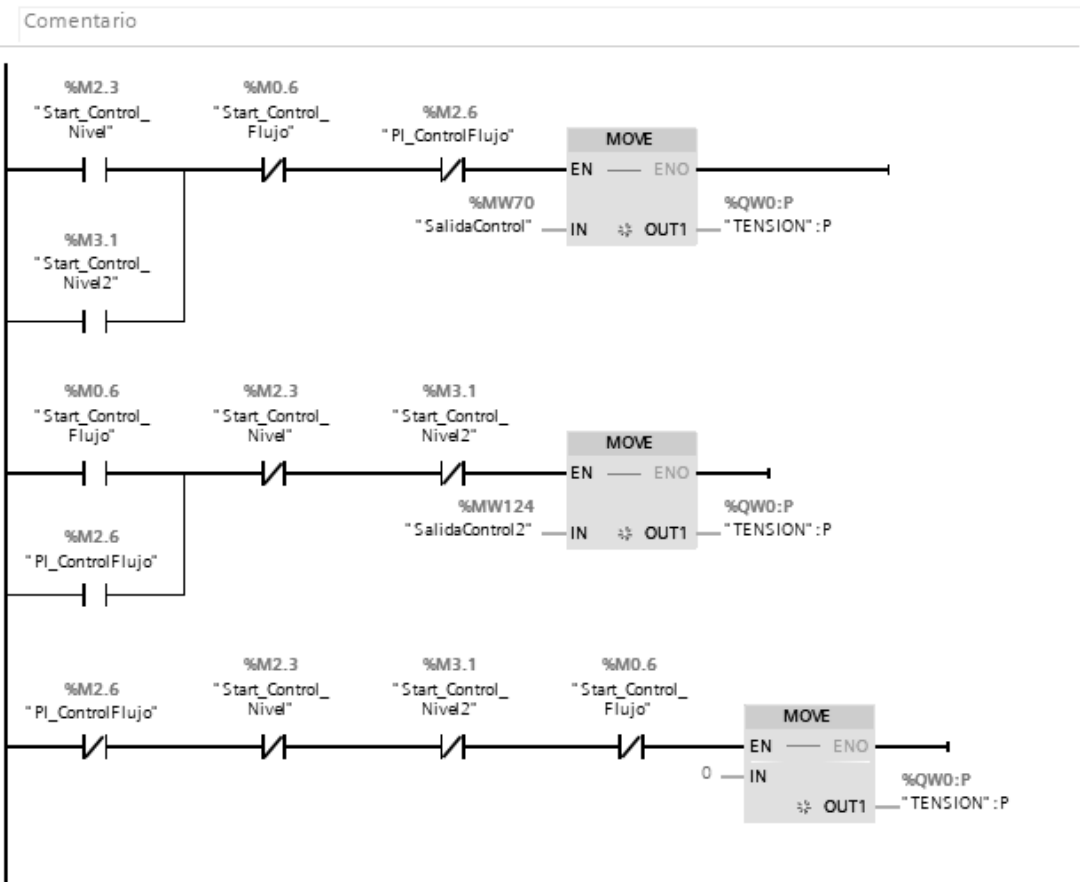


Figura 48. Lógica para bomba a máxima potencia sin control

▼ Segmento 13: .....



Figura 49. Lógica para selección exclusiva de controlador

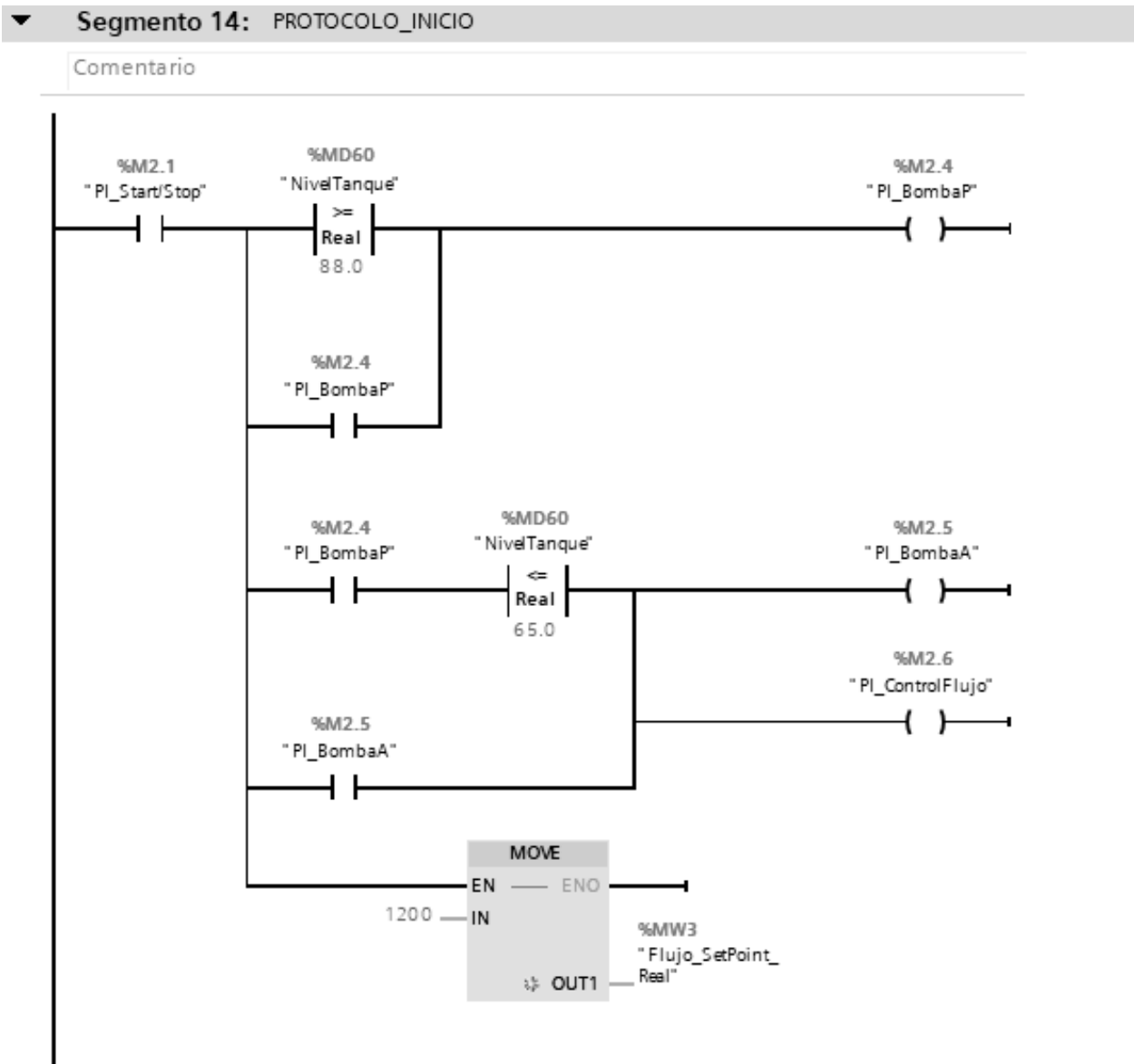


Figura 50. Automatización protocolo de inicio