



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Implementación de un sistema de ejecución de manufactura (MES) en el laboratorio de instrumentación, supervisión y control de la Universidad Nacional de Colombia

Aldo René Perdomo Osorio

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica
Bogotá, Colombia
2022

Implementación de un sistema de ejecución de manufactura (MES) en el laboratorio de instrumentación, supervisión y control de la Universidad Nacional de Colombia

Aldo René Perdomo Osorio

Trabajo final presentado como requisito parcial para optar al título de:
Maestría en Ingeniería en Automatización Industrial

Director:
Javier Alveiro Rosero García

Línea de Profundización:
Control, Instrumentación y Supervisión Industrial
Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica
Bogotá, Colombia
2022

A mis familiares, que gracias a su incondicional apoyo afectivo y moral, hicieron posible el desarrollo y la culminación de este trabajo de grado.

Agradecimientos

Agradezco a mis familiares que con su ayuda han hecho posible la realización de este trabajo de grado, especial agradecimiento al profesor Javier Rosero García quien dirigió este trabajo y a la Universidad Nacional de Colombia, que mediante su planta docente e instalaciones, permitieron ampliar mis conocimientos experiencia en el área de la ingeniería. También, agradezco a la oportunidad brindada por la universidad para cursar la maestría en Automatización Industrial y el diplomado en Instrumentación Industrial Aplicada que sirvió de gran aporte en el desarrollo de este trabajo.

Resumen

Implementación de un sistema de ejecución de manufactura (MES) en el laboratorio de instrumentación, supervisión y control de la Universidad Nacional de Colombia

En este trabajo se implementa un sistema de ejecución de manufactura (MES) en el del Laboratorio de Instrumentación, Supervisión y Control (LISC) de la Universidad Nacional de Colombia. Mediante esta implementación se muestra la eficiencia energética y el desempeño que tienen los lazos de flujo del laboratorio LISC. Este sistema se desarrolla siguiendo la arquitectura del estándar ISA-95, describiendo todas las configuraciones realizadas a los equipos de instrumentación, control, y supervisión, necesarios para la implementación de la aplicación MES. Los resultados de este trabajo servirán como referencia para la industria colombiana y futuros trabajos relacionados con el diseño, implementación e instalación de estos sistemas manufactura MES enfocados al análisis de datos.

Palabras clave: Sistemas de ejecución de manufactura, MES, ISA-95, Análisis de datos industriales, Recolección de datos industriales.

Abstract

Implementation of a Manufacturing Execution System (MES) in the instrumentation, Supervision and Control Laboratory of the National University of Colombia

This paper presents a manufacturing execution system (MES) implemented in the Instrumentation, Supervision and Control Laboratory (LISC) inside the National University of Colombia. This implementation allows to showcase the energetic efficiency and performance of the flow loops of the LISC laboratory. ISA-95 standard model is used to develop this system (MES). The configurations necessary for the MES implementation that were applied to the instrumentation, control, and supervision equipment, are thoroughly described. The obtained results will be useful as a reference for the Colombian industry and for future developments related to MES implementations focused on analyzing data.

Keywords: Manufacturing Execution Systems, MES, ISA-95, Industrial Data Analysis, Industrial Data Collect.

Contenido

| | |
|---|------------|
| Agradecimientos | VII |
| Resumen | IX |
| Lista de figuras | XV |
| Lista de tablas | XIX |
| Lista de símbolos | XXI |
| 1. Introducción | 1 |
| 2. Sistemas de ejecución de manufactura (MES) | 3 |
| 2.0.1. Estándar ISA-95 | 5 |
| 2.0.2. Características de la aplicación MES | 9 |
| 2.0.3. Aplicaciones MES en el mercado para el análisis de datos | 9 |
| 3. Implementación de la aplicación MES en el laboratorio LISC | 13 |
| 3.1. Equipos instalados en el laboratorio LISC | 13 |
| 3.2. Descripción de los lazos de control de la planta LISC | 15 |
| 3.3. Implementación de la aplicaciones MES en los lazos de flujo del laboratorio LISC | 16 |
| 3.4. Descripción de los lazos de flujo | 17 |
| 3.4.1. Lazo de flujo FIC-12 | 18 |
| 3.4.2. Lazo de flujo FIC-24 | 22 |
| 3.4.3. Lazo de flujo FIC-25 con carga constante | 25 |
| 3.4.4. Desempeño del lazo FIC-12 con carga variable | 28 |
| 3.4.5. Desempeño del lazo FIC-24 con carga variable | 29 |
| 3.4.6. Desempeño del lazo FIC-25 con carga variable | 31 |
| 3.4.7. Control de nivel tanque hidroneumático LIC-03 | 33 |
| 3.4.8. Control de presión del tanque hidrostático PIC-02 | 39 |
| 3.4.9. Controlador de presión ON-OFF del tanque HN-01 | 39 |
| 3.4.10. Controlador de presión PID del tanque HN-01 | 41 |
| 3.4.11. Pruebas de funcionamiento del control de presión PIC-02 | 42 |

| | |
|---|-----------|
| 4. Conclusiones | 49 |
| A. Anexo: Configuración de instrumentos y actuadores | 51 |
| A.1. Transmisores | 51 |
| A.1.1. Transmisor de flujo Vórtex FIT-01 | 51 |
| A.1.2. Transmisor de flujo ultrasónico FIT-02 | 52 |
| A.1.3. Transmisor de flujo magnético FIT-01B | 54 |
| A.1.4. Transmisor de nivel ultrasónico LIT-01 | 56 |
| A.1.5. Transmisor de nivel capacitivo LIT-02 | 57 |
| A.1.6. Transmisor de presión diferencial PDIT-01 | 58 |
| A.1.7. Transmisor de presión manométrica PIT-01 | 60 |
| A.1.8. Transmisor de presión manométrica PIT-02 | 61 |
| A.1.9. Transmisor de temperatura TT-01. | 62 |
| A.1.10. Transmisor de temperatura TT-02, TT-03 y TT-04 | 64 |
| A.2. Válvulas neumáticas proporcionales | 65 |
| A.2.1. Válvula FV-01 | 65 |
| A.2.2. Válvula HV-01 | 66 |
| A.2.3. Válvula NV-01 | 67 |
| A.2.4. Válvula PCV-01 | 68 |
| A.2.5. Válvula PV-01 | 69 |
| A.3. Válvulas motorizadas proporcionales | 70 |
| A.3.1. Válvula motorizada FV-02 | 70 |
| A.3.2. Válvula motorizada FV-03 | 71 |
| A.3.3. Válvula motorizada LV-01 | 72 |
| A.3.4. Válvula motorizada LV-02 | 73 |
| A.4. Bomba centrífuga P-01 | 74 |
| B. Anexo: Configuración del sistema de control de la planta | 77 |
| B.1. Configuración del controlador | 77 |
| B.1.1. Configuración de los canales análogos en corriente | 78 |
| B.1.2. Configuración de los canales análogos en voltaje | 79 |
| B.2. Programación del PLC | 80 |
| B.3. Alarmas e interlocks de la planta | 81 |
| B.4. Programación de las pantallas | 83 |
| B.4.1. Pantalla transmisores | 83 |
| B.4.2. Pantalla válvulas | 84 |
| B.4.3. Pantalla bomba centrífuga P-01 | 85 |
| B.4.4. Pantalla Alarmas | 85 |
| B.5. Sistema supervisor de la planta LISC | 85 |
| B.5.1. Pantalla general del sistema supervisor | 86 |

| | |
|--|------------|
| B.5.2. Pantalla de alarmas | 88 |
| B.5.3. Parámetros de configuración del supervisor | 89 |
| B.6. Configuración del servidor OPC | 90 |
| B.7. Configuración del Historiador | 91 |
| C. Anexo: Sintonización de los lazos de flujo | 93 |
| C.1. Sintonización del lazo de flujo FIC-12 | 93 |
| C.2. Sintonización del lazo de flujo FIC-24 | 95 |
| C.3. Sintonización del lazo de flujo FIC-25 | 96 |
| D. Anexo: Constantes de tiempo de las válvulas | 98 |
| D.1. Medición de la constante de tiempo de la válvula con actuador neumático . . | 98 |
| D.2. Medición de la constante de tiempo de la válvula con actuador motorizado . | 100 |
| E. Anexo: Planos P&ID y planos eléctricos | 103 |
| Referencias | 104 |

Lista de Figuras

| | |
|--|----|
| 2-1. Jerarquía funcional de los sistemas de control según el estándar ISA-95 numeral 5.2.[4]. | 3 |
| 2-2. Modelo comparativo de los sistemas MES con otros tipos de sistemas de manufactura [1]. | 4 |
| 2-3. Modelo de gestión de operaciones de manufactura [7] | 6 |
| 2-4. Modelo de actividades para la categoría de mantenimiento [8] | 6 |
| 2-5. Actividades de recolección de datos, análisis y seguimiento para la categoría de mantenimiento [8] | 7 |
| 3-1. Laboratorio de instrumentación, supervisión y control LISC. | 13 |
| 3-2. Instrumentos del lazo de flujo del laboratorio LISC. | 14 |
| 3-3. Diagrama del lazo de control de flujo FIC-12. | 18 |
| 3-4. Controlador PID del lazo de flujo FIC-12. | 19 |
| 3-5. Señales de flujo y velocidad de la bomba del lazo FIC-12. | 20 |
| 3-6. Señal en frecuencia de la apertura de la válvula HV-01, para un set de flujo de 40 l/min. | 22 |
| 3-7. Diagrama del lazo de control de flujo FIC-24. | 23 |
| 3-8. Señales de flujo y velocidad de la bomba del lazo FIC-24. | 23 |
| 3-9. Diagrama del lazo de control de flujo FIC-25. | 25 |
| 3-10. Señales de flujo y velocidad de la bomba del lazo FIC-25. | 26 |
| 3-11. Lazo FIC-12 señales de flujo y presión con carga variable. | 29 |
| 3-12. Lazo FIC-24 señales de flujo y presión con carga variable. | 30 |
| 3-13. Lazo FIC-25 señales de flujo y presión con carga variable. | 32 |
| 3-14. Lazo de control de nivel del tanque hidrostático LIC-03. | 33 |
| 3-15. Prueba del lazo de nivel LIC-03. En rojo la señal del flujo de entrada a 50 l/min, en azul la señal de apertura de la válvula NV-01 y en naranja la señal nivel del tanque HN-01. | 36 |
| 3-16. Prueba del lazo de nivel LIC-03. En rojo la señal del flujo de entrada a 75 l/min, en azul la señal de apertura de la válvula NV-01 y en naranja la señal nivel del tanque HN-01. | 37 |
| 3-17. Prueba del lazo de nivel LIC-03. En rojo la señal del flujo de entrada a 30 l/min, en azul la señal de apertura de la válvula NV-01 y en naranja la señal nivel del tanque HN-01. | 38 |

| | |
|--|----|
| 3-18. Diagrama de operación del controlador ON-OFF de presión del tanque HN-01. | 40 |
| 3-19. Lazo de control ON-OFF de presión del tanque HN-01. | 41 |
| 3-20. Lazo de control del PID de presión del tanque HN-01. | 42 |
| 3-21. Señales del lazo de presión con controlador ON-OFF para la prueba 1 | 43 |
| 3-22. Señales del lazo de presión con controlador ON-OFF para la prueba 2 | 44 |
| 3-23. Señales del lazo de presión con controlador ON-OFF para la prueba 3 | 45 |
| 3-24. Señales del lazo de presión con controlador PID para la prueba 4 | 46 |
| 3-25. Señales del lazo de presión con controlador PID para la prueba 5 | 47 |
| | |
| A-1. Transmisor de flujo FIT-01. | 51 |
| A-2. Transmisor de flujo FIT-02. | 53 |
| A-3. Transmisor de flujo magnético FIT-01B. | 55 |
| A-4. Transmisor de nivel ultrasónico LIT-01. | 56 |
| A-5. Transmisor de nivel capacitivo LIT-02. | 57 |
| A-6. Transmisor de nivel PDIT-01. | 59 |
| A-7. Transmisor de presión PIT-01. | 60 |
| A-8. Transmisor de presión PIT-02. | 61 |
| A-9. Transmisor de presión TT-01. | 63 |
| A-10 Transmisores de temperatura del intercambiador HT-01. | 64 |
| A-11 Válvula neumática proporcional FV-01. | 65 |
| A-12 Válvula neumática proporcional HV-01. | 66 |
| A-13 Válvula neumática proporcional NV-01. | 67 |
| A-14 Válvula neumática proporcional PCV-01. | 68 |
| A-15 Válvula neumática proporcional PV-01. | 69 |
| A-16 Válvula neumática proporcional FV-02. | 70 |
| A-17 Válvula neumática proporcional FV-03. | 71 |
| A-18 Válvula neumática proporcional LV-01. | 72 |
| A-19 Válvula neumática proporcional LV-02. | 73 |
| A-20 Bomba centrífuga P-01. | 74 |
| A-21 Variador de frecuencia de la bomba P-01. | 75 |
| | |
| B-1. PLC Allen Bradley de la planta LISC. | 77 |
| B-2. Configuración canales análogos de corriente en Studio 5000. | 79 |
| B-3. Configuración canales análogos de voltaje en Studio 5000. | 80 |
| B-4. Pantalla de instrumentos. | 84 |
| B-5. Pantalla válvulas proporcionales. | 84 |
| B-6. Pantalla de operación bomba P-01. | 85 |
| B-7. Pantalla de alarmas. | 85 |
| B-8. Pantalla general del supervisor. | 86 |
| B-9. Menú de configuración transmisores. | 87 |
| B-10 Menú de configuración válvulas. | 87 |

| | |
|--|-----|
| B-11 Menú de operación de la bomba. | 88 |
| B-12 Menú de los controladores PID. | 88 |
| B-13 Pantalla de alarmas del supervisor. | 89 |
| B-14 Parámetros de configuración del puerto del supervisor. | 90 |
| B-15 Parámetros de configuración del dispositivo en el supervisor. | 90 |
| B-16 Parámetros de configuración del canal del servidor OPC. | 91 |
| B-17 TAGS configurados en el historiador. | 92 |
| | |
| C-1. Señales de entrada y de salida cargadas en el Ident de Matlab. | 94 |
| C-2. Diagrama de bloques de los lazos FIC-12 en Simulink. | 94 |
| C-3. Constantes del controlador PI calculadas en Simulink. | 95 |
| C-4. Señales de entrada y de salida cargadas en el Ident de Matlab. | 96 |
| C-5. Señales de entrada y de salida cargadas en el Ident de Matlab. | 97 |
| | |
| D-1. Señales de entrada (PCV-01) y salida (FIT-01), para la medición del tiempo de respuesta de la válvula neumática. | 99 |
| D-2. Medición del tiempo de respuesta generada en Ident. Tiempo de respuesta $T_{p1}=3.1$ segundos. | 99 |
| D-3. Tiempo de respuesta válvula motorizada. Indicador ubicado cuando la señal de salida está en el 0% | 100 |
| D-4. Tiempo de respuesta válvula motorizada. Indicador ubicado cuando la señal de salida está en el 63%. | 101 |
| D-5. Cálculo del tiempo de respuesta de la válvula realizado con Proficy CSense. . | 102 |

Lista de Tablas

| | |
|---|----|
| 3-1. Estadística de funcionamiento del lazo FIC-12 a 40 l/min.. | 20 |
| 3-2. Estadística de funcionamiento del lazo FIC-12 a 50 l/min. | 21 |
| 3-3. Estadística de funcionamiento del lazo FIC-12 a 70 l/min. | 21 |
| 3-4. Estadística de funcionamiento del lazo FIC-24 a 40 l/min. | 24 |
| 3-5. Estadística de funcionamiento del lazo FIC-24 a 50 l/min. | 24 |
| 3-6. Estadística de funcionamiento del lazo FIC-24 a 70 l/min. | 25 |
| 3-7. Estadística de funcionamiento del lazo FIC-25 a 40 l/min. | 26 |
| 3-8. Estadística de funcionamiento del lazo FIC-25 a 50 l/min. | 27 |
| 3-9. Estadística de funcionamiento del lazo FIC-25 a 70 l/min. | 27 |
| 3-10. Estadística de funcionamiento del lazo FIC-12 con carga variable. | 28 |
| 3-11. Estadística de funcionamiento del lazo FIC-24 con carga variable. | 30 |
| 3-12. Estadística de funcionamiento del lazo FIC-25 con carga variable. | 31 |
| 3-13. Parámetros de configuración del controlador PID LIC-03. | 35 |
| 3-14. Datos estadísticos de funcionamiento del control de nivel LIC-03 a 50 l/min . | 36 |
| 3-15. Datos estadísticos de funcionamiento del control de nivel LIC-03 a 75 l/min. | 37 |
| 3-16. Datos estadísticos de funcionamiento del control de nivel LIC-03 a 30 l/min. | 38 |
| 3-17. Setpoint de presión usados para las pruebas del controlador ON-OFF | 43 |
| 3-18. Setpoint de presión usados para las pruebas del controlador PID | 43 |
| 3-19. Estadística de las señales de la prueba 1. | 44 |
| 3-20. Estadística de las señales de la prueba 2. | 45 |
| 3-21. Estadística de las señales de la prueba 3. | 46 |
| 3-22. Estadística de las señales de la prueba 4. | 47 |
| 3-23. Estadística de las señales de la prueba 5. | 48 |
| | |
| A-1. Referencia del transmisor FIT-01. | 52 |
| A-2. Parámetros de configuración transmisor FIT-01. | 52 |
| A-3. Referencia del transmisor de flujo FIT-02. | 53 |
| A-4. Parámetros de configuración transmisor FIT-02. | 54 |
| A-5. Referencia del transmisor FIT-01B. | 55 |
| A-6. Parámetros de configuración transmisor FIT-01B. | 55 |
| A-7. Referencia del transmisor LIT-01. | 56 |
| A-8. Parámetros de configuración transmisor LIT-01. | 57 |
| A-9. Referencia del transmisor LIT-02. | 58 |

| | |
|---|----|
| A-10 Parámetros de configuración transmisor LIT-02. | 58 |
| A-11 Referencia del transmisor PDIT-01. | 59 |
| A-12 Parámetros de configuración transmisor PDIT-01. | 59 |
| A-13 Referencia del transmisor PIT-01. | 60 |
| A-14 Parámetros de configuración transmisor PIT-01. | 61 |
| A-15 Referencia del transmisor PIT-02. | 62 |
| A-16 Parámetros de configuración transmisor PIT-02. | 62 |
| A-17 Referencia del transmisor TT-01 | 63 |
| A-18 Parámetros de configuración transmisor TT-01. | 63 |
| A-19 Referencia del transmisor TT-02 | 65 |
| A-20 Parámetros de configuración transmisor TT-02. | 65 |
| A-21 Características de la válvula FV-01. | 66 |
| A-22 Características de la válvula HV-01. | 67 |
| A-23 Características de la válvula NV-01. | 68 |
| A-24 Características de la válvula PCV-01. | 69 |
| A-25 Características de la válvula PV-01. | 70 |
| A-26 Características de la válvula FV-02. | 71 |
| A-27 Características de la válvula FV-03. | 72 |
| A-28 Características de la válvula LV-01. | 73 |
| A-29 Características de la válvula LV-02. | 74 |
| A-30 Características de la bomba P-01. | 75 |
| A-31 Características del variador de la bomba P-01. | 76 |
| B-1. Disposición tarjetas del PLC. | 78 |
| B-2. Configuración canales análogos 4-20 mA. | 78 |
| B-3. Configuración canales análogos 0-10 VDC. | 79 |
| B-4. Tabla de interlock. | 81 |
| B-5. Alarmas de la planta. | 83 |
| B-6. Parámetros de configuración del puerto del supervisor. | 89 |
| B-7. Parámetros de configuración del dispositivo en el supervisor. | 90 |

Lista de símbolos

| Símbolo | Término |
|---------|------------------------------|
| A | Amperio |
| gpm | Galones por minuto |
| HP | Horse Power |
| kW | Kilovatio eléctrico |
| l/min | Litros por minuto |
| mA | Miliamperios |
| psi | Pounds per Square Inch |
| psig | Pounds per Square Inch Gauge |
| V | Voltaje |
| W | Vatio eléctrico |

Subíndices

| Subíndice | Término |
|-----------|---|
| D | Constante derivativa controlador PID |
| I | Constante integral controlador PID |
| P | Constante proporcional controlador PID |
| t_R | Tiempo de estabilización (Setting Time) |
| t_S | Tiempo de elevación (Rise Time) |

Abreviaturas

| Abreviatura | Término |
|--------------------|--|
| <i>CAE</i> | Computer Aided Engineering |
| <i>CO</i> | Controller Output |
| <i>CPU</i> | Central Processing Unit |
| <i>CRM</i> | Customer Relationship Management |
| <i>CV</i> | Control Variable |
| <i>DC</i> | Direct Current |
| <i>ERP</i> | Enterprise Resource Planning |
| <i>HMI</i> | Human Machine Interface |
| <i>ISA</i> | International Society of Automation |
| <i>LISC</i> | Laboratorio de instrumentación supervisión y control |
| <i>MES</i> | Manufacturing Execution System |
| <i>OPC</i> | OLE for Process Control |
| <i>OLE</i> | Object Linking and Embedding |
| <i>PID</i> | Proportional Integral Derivative |
| <i>PLC</i> | Programmable Logic Controller |
| <i>PV</i> | Process Variable |
| <i>P&ID</i> | Process and Instrumentation Diagram |
| <i>SCADA</i> | Supervisory Control and Data Acquisition |
| <i>SCM</i> | Supply Chain Management |
| <i>SSM</i> | Sales and Service Management |
| <i>TO</i> | Transmitter Output |
| <i>UML</i> | Unified Modeling Language |
| <i>USB</i> | Universal Serial Bus |
| <i>VDC</i> | Voltage Direct Current |

1. Introducción

En los últimos veinte años los sistemas de ejecución de manufactura (MES) han desempeñado un papel central en el avance de la automatización integrando los procesos productivos con los sistemas de planeación de las distintas empresas en todo el mundo. También, debido a los avances en la computación, las redes de comunicación y las tecnologías asociadas a la Internet, ha ocasionado una aceleración en el ritmo de la informatización permitiendo una mayor productividad y calidad en los productos con menores costos [1].

Los sistemas MES son considerados sistemas de control según el estándar ISA-95. Estos sistemas intentan seguir un programa determinado, lo más cerca posible, para conectar el nivel de planificación con el nivel de producción de las empresas. Los sistemas MES, al ser computarizados, proporcionan la información correcta del proceso y son una herramienta de optimización del funcionamiento del proceso que hacen más eficiente la producción de las empresas. También, estos sistemas tienen la ventaja de trabajar en tiempo real controlando múltiples actividades del proceso de producción. Por ejemplo: recolectando datos, mejorando continuamente el desempeño de la maquinaria y haciendo seguimiento del comportamiento del proceso productivo a todo momento [2].

La implementación de los sistemas MES reducen los costos de la producción en tres aspectos principalmente: mediante la optimización del proceso, automatizando el proceso y optimizando el producto. Mediante la optimización de procesos los operadores y supervisores analizan los datos y ajustan el proceso en tiempo real, con el objetivo de mejorar la eficiencia energética y consumo de recursos del proceso productivo. Mediante la automatización de los procesos a medida que más y más procesos y flujos de trabajo requieran de menos intervención humana, se pueden evitar fallas y paradas de producción debidas a malas intervenciones. Por último, mediante el análisis de los datos recolectados, se pueden ajustar las cantidades de los componentes del producto fabricado, en caso de presentar problemas por baja calidad o en caso de que existan desperdicios de materia prima debida a componentes sobredimensionados [3].

En Colombia parte de las empresas del sector manufacturero, minero y energético, cuentan con procesos automatizados que siguen la estructura jerárquica propuesta por el estándar ISA-95. Dentro de esta estructura en los niveles inferiores, conformados por los componentes de campo y de control, la industria cuenta con una amplia gama de tecnologías y de pro-

ductos que se ajustan a las necesidades de los distintos procesos industriales. Caso contrario sucede con las tecnologías de los niveles superiores, encargadas de la administración y planeación de la empresa, ya que estas tecnologías no están tan difundidas en el mercado y la integración en las empresas es una labor compleja. Además, la relación costo beneficio no es tan evidente para el propietario del proceso productivo.

Este trabajo implementa un sistema MES en el laboratorio de Instrumentación, Supervisión y Control (LISC), de la Universidad Nacional de Colombia. Esta implementación sigue como referencia la arquitectura para los sistemas de control descrito en el estándar ISA-95 [2]. En el capítulo 2 se hace una descripción de los sistemas de manufactura tomando como referencia el estándar ISA-95 y se detallan las características de las aplicaciones MES. Siguiendo esta estructura de los sistemas de control del estándar ISA-95, el anexo A muestra la configuración de cada uno de los instrumentos y actuadores instalados en el laboratorio LISC, el anexo B se expone como se programaron los dispositivos de control y los sistemas de supervisión usados en la planta. Por último, se deja para el capítulo 3 la descripción de cada uno de los procesos analizados y resultados obtenidos generados por la aplicación MES instalada en el laboratorio LISC.

2. Sistemas de ejecución de manufactura (MES)

En este capítulo se presenta un resumen de los sistemas de control MES, tomando como referencia el estándar ISA-95. Se hace especial énfasis en los sistemas de manufactura enfocados al análisis de datos de proceso historizados. Por último se hace una referencia de los sistemas MES disponibles en el mercado y que son utilizados en este trabajo.

Las aplicaciones MES son herramientas tecnológicas modernas usadas para la automatización y mejoramiento de procesos, clasificadas en el nivel 3 de la pirámide de la automatización según el estándar ISA-95 [4][2], figura 2-1. De acuerdo con la organización MESA (Manufacturing Execution Systems Association International), las aplicaciones MES recopilan datos de estado y de rendimiento en tiempo real sobre el proceso y los equipos instalados en la línea de producción. Estas aplicaciones procesan los datos recolectados, los transforman en información útil y los difunde a todos los departamentos relacionados con la producción y administración del proceso [2].

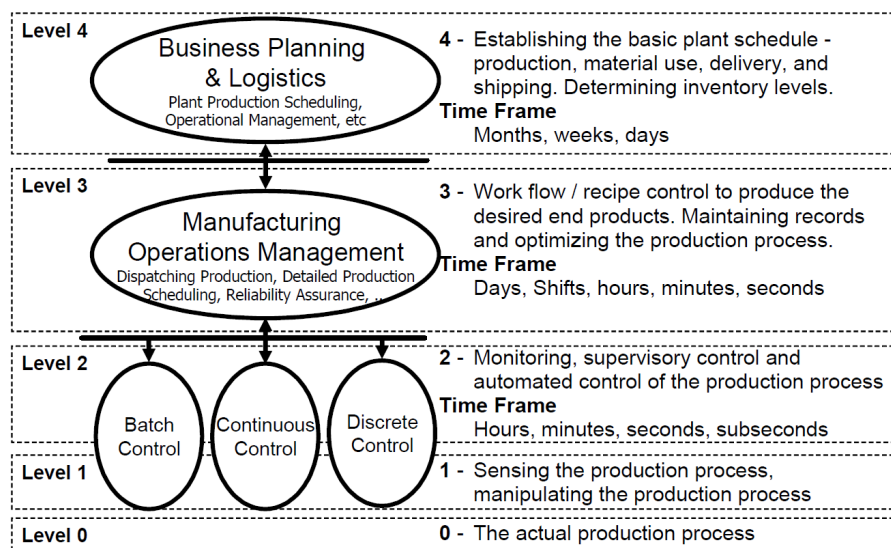


Figura 2-1.: Jerarquía funcional de los sistemas de control según el estándar ISA-95 numeral 5.2.[4].

Durante los últimos años los sistemas MES han crecido y evolucionado de la misma manera como lo han hecho las tecnologías en informática y redes de comunicación. La mayoría de estos sistemas son cliente servidor o basados en la internet, usan base de datos relacionales y corren en diferentes sistemas operativos, como UNIX, y Windows. Normalmente estos sistemas MES proporcionan interfaces programables para facilitar la integración con otras aplicaciones tales como los sistemas ERP (Enterprise Resource Planning), los sistemas SCM (Supply Chain Management), los sistemas CAE (Computer Aided Engineering), los sistemas SSM (Sales and Service Management) y los sistemas CRM (Customer Relationship Management) [1].

Usualmente, Los sistemas MES se superponen a estos sistemas de manufactura tal como se muestra en la figura 2-2. Por ejemplo, tanto los sistemas MES como los sistemas ERP podrían tener algoritmos de control de producción y de asignación de recursos. También, los sistemas MES como los SCM podrían incluir aplicaciones para la administración logística, gestión de inventario y programación de tareas para la producción. En otros casos los planes y documentos de especificación para la producción pueden provenir tanto de la ingeniería de productos y procesos, como también, pueden provenir de los sistemas MES. También, los sistemas de manufactura incluyen aplicaciones hacia el control de la calidad, la recolección de datos y el análisis de datos [1].



Figura 2-2.: Modelo comparativo de los sistemas MES con otros tipos de sistemas de manufactura [1].

Sin embargo, las implementaciones MES generalmente son más específicas en análisis de desempeño de la producción en tiempo real, tienen más funcionalidades para la optimización de operaciones y son más precisas en la ejecución de instrucciones en comparación con los otros sistemas de manufactura y de planeación. También los sistemas MES son usualmente diseñados para el acceso directo del personal de operaciones como jefes de materiales, jefes de mantenimiento, encargados del control de la calidad, técnicos y operadores del proceso productivo [1].

Adicionalmente, los sistemas MES se ven favorecidos, porque cada vez hay más sensores, instrumentos y programadores lógicos económicos con funciones adicionales de manejo y almacenamiento de información, permitiendo procesar la información y la toma de decisiones autónomas entre los sistemas de control de las empresas. En este contexto, podemos ver procesos y productos inteligentes que se comunican dentro de este entorno y aprenden de sus decisiones, mejorando así el rendimiento y la eficiencia del proceso productivo a lo largo del tiempo. A futuro, si continúa esta tendencia, los sistemas de ejecución de manufactura podrían integrarse verticalmente dentro de toda la arquitectura de los sistemas de control, de modo que estas entidades puedan organizar el flujo de datos de manera sincronizada, en lugar de ir a través de cada capa del modelo ISA-95 individualmente [3].

Las ventajas que ofrece el uso de las aplicaciones MES en las empresas son las siguientes: aumento en la eficiencia energética del proceso, mejora en los tiempos de fabricación, ahorro en el consumo de materia prima, reducción en la generación de desperdicios, facilita la consulta de los datos asociados a la producción y permite mejorar la toma de decisiones de gerencia acerca de las actividades y unidades a producir en la empresa [5].

De acuerdo con MESA, esta organización ha definido once funciones como referencia para los sistemas MES, estas son: asignación de recursos, definición de unidades de producción, gestión de la calidad, manejo del mantenimiento, programación de operaciones, descripción de las operaciones, control de documentos, gestión laboral, gestión de proceso, seguimiento de productos, recopilación de datos y análisis de rendimiento [2]. Este trabajo desarrolla las funciones de recolección de datos y análisis de rendimiento mediante la implementación de la aplicación MES en el laboratorio LISC de la Universidad Nacional de Colombia.

2.0.1. Estándar ISA-95

ISA-95 es el estándar internacional para la integración de sistemas empresariales y de control. Este estándar se puede utilizar para determinar qué información debe intercambiarse entre los sistemas de ventas, finanzas, logística, producción, mantenimiento y calidad. Esta información está estructurada en modelos UML (Unified Modeling Language), que son la base para el desarrollo de interfaces estándar entre los sistemas ERP y MES. El estándar ISA-95 se puede utilizar para varios propósitos. Por ejemplo, como una guía para la definición de los requisitos del cliente o usuarios MES, para la selección de proveedores de los sistemas MES y como base para el desarrollo de sistemas MES. [6].

El estándar ISA-95 define los sistemas de manufactura y los agrupa en 4 categorías de actividades, que son: producción, calidad, mantenimiento e inventario. La figura **2-3** es un modelo de operaciones de manufactura definido por el estándar, en donde se muestran las 4

categorías encerradas en círculos que están agrupados en líneas punteadas gruesas.

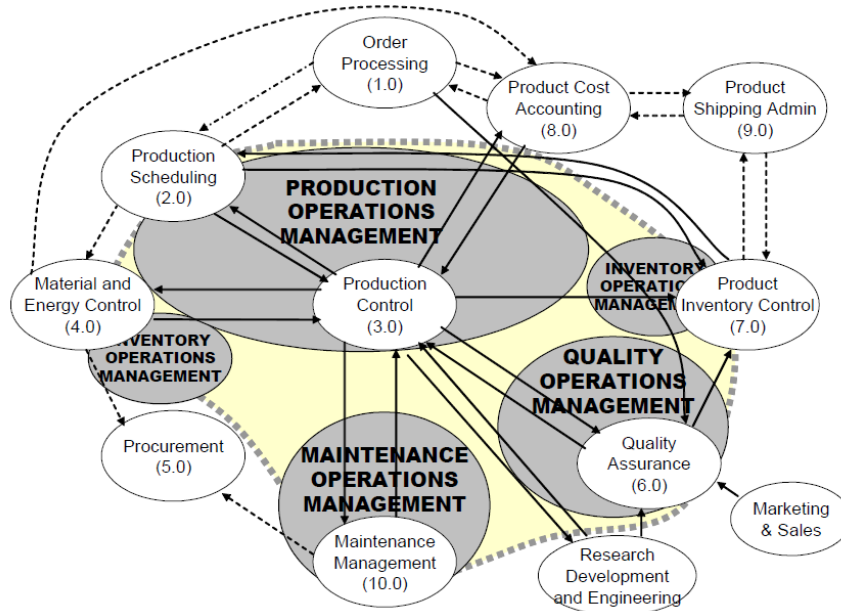


Figura 2-3.: Modelo de gestión de operaciones de manufactura [7]

Cada una de las categorías de actividades usa una plantilla como modelo para definir y gestionar cada una de sus operaciones. Por ejemplo, la figura 2-4 muestra el modelo de actividades para la categoría de mantenimiento.

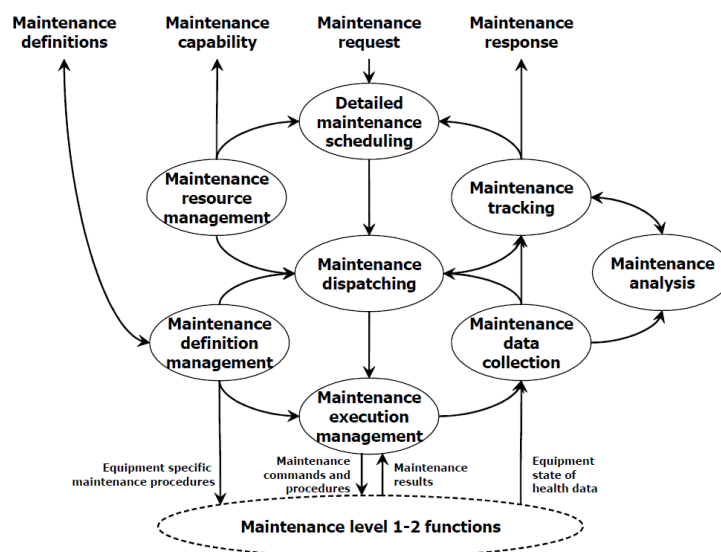


Figura 2-4.: Modelo de actividades para la categoría de mantenimiento [8]

Este estándar aclara que los modelos son para tomar como referencia y que no necesaria-

mente las empresas deben tener todas las categorías y actividades definidas. Además es muy probable que dependiendo de las empresas, habrán unas actividades más importantes que otras. En los modelos las flechas indican el movimiento de información, aunque también, puede haber datos compartidos entre las 4 de categorías producción, calidad, mantenimiento e inventario.

Actividad de recolección de datos

La aplicación MES desarrollada en este trabajo se ocupa principalmente en la actividad de recolección de datos, en la actividad de análisis de datos y en la actividad de seguimiento. Por ejemplo, la figura 2-5, es una representación de estas 3 actividades para la categoría de mantenimiento.

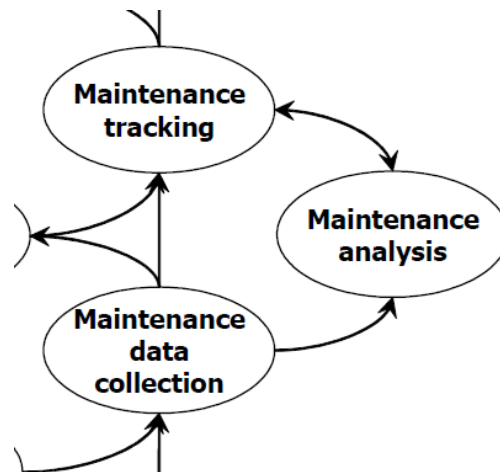


Figura 2-5.: Actividades de recolección de datos, análisis y seguimiento para la categoría de mantenimiento [8]

En la actividad de recolección de datos se toman y se guardan los datos del proceso que pueden ser variables físicas, datos de los productos fabricados o datos de los recursos humanos que intervienen en el proceso. Usualmente estos datos son guardados en aplicaciones llamadas historiadores, pero también pueden ser tomadas por medios escritos. Toda esta información es clave porque es la principal fuente de alimentación para la actividad de análisis [9]. Las tareas principales de la actividad de recolección de datos son:

- Recopilar, recuperar y archivar información relacionada con los procesos de la empresa.
- Proveer las interfaces a las líneas de producción para la recolección de datos.
- Proporcionar reportes de los datos de producción.
- Mantener la información del proceso para las actividades de Análisis y Seguimiento.

- Proporcionar herramientas para la gestión de alarmas y eventos del proceso.
- Proporcionar información sobre la calidad del producto para compararla con las especificaciones requeridas.

Actividad de análisis

En la operación de análisis, los datos recolectados son procesados para generar los informes que comparan los resultados del proceso con lo que se espera obtener. Esta actividad puede ser definida como un grupo de tareas que analizan los datos y prueban el rendimiento con el objetivo de mejorar el proceso y el producto fabricado. Esta actividad también incluye análisis de la variabilidad de la calidad del producto, ciclos de producción, recursos utilizados, equipos usados y eficiencia en los procedimientos. Todas estas tareas de análisis suelen ser un proceso continuo sobre todas las operaciones de la empresa [10]. Las tareas principales de esta actividad son:

- Análisis de datos de producción para generar tendencias de los indicadores críticos de calidad.
- Determinar la precisión de la ejecución de los análisis de datos. Esto incluye la evaluación de la repetibilidad, idoneidad y eficiencia de los análisis realizados.
- Determinar la causa de los problemas que se presentan en la producción y en el producto fabricado.
- Recomendar acciones para corregir los problemas identificados, incluyendo la correlación de las causas, acciones, y resultados.

Actividad de seguimiento

En la actividad de seguimiento se recibe la información generada por la actividad de análisis, esta información incluye mediciones e informes, tales como, la utilización de recursos, la disponibilidad de recursos, tiempo de ciclo de la unidad del producto, conformidad con el programa de producción, rendimiento de los equipos y rendimiento del proceso productivo. También, esta operación de seguimiento se implementan las acciones generadas por la operación de análisis. Estas acciones pueden ser cambios en los puntos de ajuste del proceso, ajuste o instalación de equipos y maquinaria, actividades de mantenimiento, ajustes en las características de la materia prima utilizada o movimientos en el recurso humano. Todas estas acciones y cambios siempre encaminados a mejorar los indicadores establecidos para el proceso y el producto [11].

2.0.2. Características de la aplicación MES

De acuerdo con el estándar ISA-95 las características principales que debe tener una aplicación MES, destinada al análisis de datos, son las siguientes:

- Como mínimo, debe tener la capacidad para tratar los datos generados por las operaciones de producción, calidad, mantenimiento e inventario de la empresa.
- Debe tener las interfaces para el ingreso de datos por parte del personal de la empresa o los datos generados por los equipos del proceso.
- El estándar recomienda que debe contar con herramientas para el análisis de datos. Como por ejemplo: generación de tendencias, generación de reportes, análisis de estadístico de datos y correlación de datos.
- Herramientas para la identificación de causas de los problemas del proceso.
- Herramientas para la generación de acciones de mejora y de seguimiento a los resultados de las acciones implementadas.

Estas características son usadas como referencia para comparar las aplicaciones MES, ofertadas en el mercado, para mejorar el desempeño de los procesos.

2.0.3. Aplicaciones MES en el mercado para el análisis de datos

Actualmente en el mercado existen muchas aplicaciones MES, para mejorar los procesos productivos mediante el análisis de datos historizados y que siguen las funciones descritas por el estándar ISA-95. Algunas de estas aplicaciones son: Proficy CSense, Seeq, Factory Talk Analytics y Yokogawa Process data Analytic.

General Electric Proficy CSense

Proficy CSense es una aplicación de la empresa General Electric enfocada al análisis de datos industriales. Esta aplicación utiliza inteligencia artificial y aprendizaje automático para permitir que los ingenieros de procesos combinen datos de diferentes fuentes industriales, e identifiquen rápidamente y descubran la causa raíz de los problemas, predigan el rendimiento futuro y automaticen acciones de análisis de datos, para mejorar continuamente la calidad de los productos y la productividad del proceso.

Con esta aplicación los ingenieros encargados del proceso pueden analizar, monitorear, predecir, simular y optimizar en tiempo real. Además, brinda las capacidades para extraer información de datos históricos y desarrollar, probar e implementar rápidamente cálculos simples. También, esta aplicación permite hacer análisis predictivos y generar soluciones de

optimización, para reducir la variabilidad y mejorar los procesos de la empresa [12].

Para su funcionamiento Proficy CSense toma datos desde distintas fuentes, que pueden ser, bases de datos relacionales, archivos de texto e historiadores. También, tiene la capacidad de leer y entregar datos en tiempo real por medio de servidores OPC. Esta aplicación tiene las siguientes herramientas avanzadas para el análisis de datos:

- Gráficas de desempeño del proceso.
- Gráficas de las señales historiadas.
- Correlación de los datos.
- Análisis estadísticos de las señales almacenadas en el historiador.
- Análisis en frecuencia de las señales.
- Extracción de modelos del proceso analizado.
- Extracción de reglas de operación del proceso.
- Análisis de causa de fallas o variaciones en el proceso.

Estas herramientas siguen con lo requerido por estandar ISA-95 y tienen la posibilidad de leer datos de cualquier fuente. Además, estas herramientas puede recibir los datos generados por las operaciones de producción, calidad, mantenimiento e inventario de la empresa.

Esta es la principal aplicación trabajada e instalada en el laboratorio LISC, debido a que el distribuidor en Colombia, Urigo S.A.S., suministro 3 licencias cada una con un tiempo de duración de 3 meses. Además, estas licencias tenían extensiones para el uso ilimitado del historiador (Proficy Historian) y del sistema supervisor (Proficy Cimplicity), que son de la misma marca General Electric.

Matlab

Aunque Matlab no es considerado como un sistema MES, tiene varias herramientas y funciones similares a las que describe el estándar ISA-95. Con Matlab se tiene la ventaja de que la universidad cuenta con las licencias académicas y otra ventaja es que esta misma empresa ofrece un programa de especializado llamado Practical Data Science with Matlab, ofrecido por Coursera que estuvo abierto para la universidad durante el año de 2021. Por estas razones Matlab también se considera y se usa en el desarrollo de este trabajo.

Este software cubre fácilmente las siguientes características que debe tener una aplicación MES:

- Genera gráficas de desempeño del proceso.
- Tiene amplias y sofisticadas herramientas para la correlación de los datos.
- Tiene herramientas para el análisis de datos.
- Permite la extracción de modelos del proceso en base a los datos ingresados.

Matlab también tiene posibilidad de generar código de programación, lo que en parte es una ventaja, porque permite ajustar cualquier herramienta de análisis a lo que requieran los datos generados por el proceso, pero es una desventaja porque requiere de más tiempo para ser invertido en programación. También, Matlab requiere de más trabajo en la preparación de datos, ya que no tiene herramientas para leer los historiadores industriales directamente. Usualmente, para leer estos datos se deben pasar los datos historiados a hojas de cálculo o archivos de texto para luego ser cargados a Matlab.

Seeq

Seeq es un software enfocado al mejoramiento de procesos mediante el análisis de datos. Es una aplicación de fácil uso e implementación, de acuerdo a sus tutoriales y videos que son descargables desde su página web [13]. Además, tiene los drivers para la conexión con distintas marcas de equipos de automatización y permite la conexión con distintas bases de datos e historiadores.

Según su hoja de datos, este software tiene las herramientas para realizar la conexión con diferentes aplicaciones del nivel de control y del nivel de gestión de las empresas. Esto es importante porque este es el principal objetivo de las aplicaciones MES. Al igual que Matlab también tiene ambientes para la generación de código en lenguajes de programación como Python.

Este fabricante divide su software en 3 partes Seeq Workbench, Seeq Organizer y Seeq Data Lab.

Seeq Workbench es una aplicación basada en navegador para la investigación de los datos del proceso. Seeq Workbench permite la visualización de datos según su tiempo de muestreo y paneles de herramientas fáciles de usar en funciones analíticas comunes, como búsqueda de señales, limpieza de datos, definiciones de límites y análisis predictivo [14].

Seeq Organizer también es una aplicación basada en navegador, para ensamblar análisis y visualizaciones en informes, presentaciones y agendas de reuniones, así como en documentos web de solo lectura. Los temas de este organizador son dinámicos porque se relacionan directamente con los datos en tiempo real o de acuerdo a su tiempo de muestreo, como por

ejemplo, lote, turno, día, etc [14].

Seeq Data Lab se basa en Jupyter Notebooks y una biblioteca de Seeq Python, llamada SPy, para permitir que los ingenieros de procesos amplíen sus análisis con el uso de Python Machine Learning. También, El personal de datos accede a esta funcionalidad para conectividad de datos, limpieza, modelado y otras características enfocadas al análisis de datos [14].

Existen más aplicaciones MES para el análisis de datos en el mercado, como por ejemplo, el software ofrecido por la empresa Yokowaga llamado Process Data Analytics [15] o el software de Rockwell el FactoryTalk Analytics [16]. Estos también tienen las características descritas por el estándar ISA-95, pero el uso de estas aplicaciones se limitó a la revisión de las hojas de datos únicamente, porque estas compañías no ofrecen demos que sean descargables desde sus páginas.

En el desarrollo de este trabajo se usa principalmente la aplicación Proficy CSense, para cubrir la actividad de análisis y de seguimiento, según el estándar ISA-95. La actividad de recolección de datos se deja a cargo del historiador Proficy Historian. Ambas aplicaciones son instaladas en el computador del laboratorio. Matlab también se usa para el análisis de los datos historiados, pero al no tener conexión directa con el historiador se hace necesario descargar los datos historiados a hojas de cálculo. También, en Matlab es necesario programar código adicional para la lectura y acondicionamiento de estos datos.

3. Implementación de la aplicación MES en el laboratorio LISC

A continuación se describen los pasos seguidos en la implementación de la aplicación MES. Primero se hace una breve descripción del laboratorio LISC, luego se muestra la configuración realizada a los instrumentos de la planta y se expone la programación de los sistemas de control compuestos por el PLC y el sistema supervisor. Por último se muestra la configuración y el análisis realizado a 3 de los lazos de flujo del laboratorio y los lazos de nivel y presión del tanque hidroneumático.

3.1. Equipos instalados en el laboratorio LISC

Las aplicaciones escogidas para el desarrollo del trabajo se instalan en el laboratorio LISC, ubicado en la Universidad Nacional de Colombia en el edificio 412 de ingeniería química. Este laboratorio fue diseñado de tal manera que permite hacer pruebas de instrumentación y control industrial en sus diferentes lazos de flujo, nivel, temperatura y presión. Además cuenta con los instrumentos, controladores industriales y actuadores que lo hacen ideal para la implementación de aplicaciones industriales como sistemas de supervisión, historiadores y aplicaciones de tipo MES.

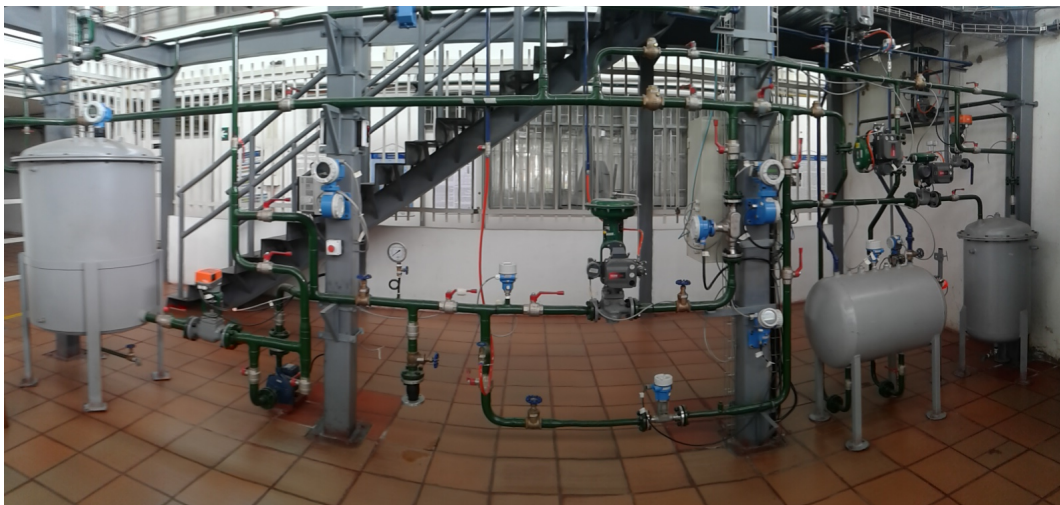


Figura 3-1.: Laboratorio de instrumentación, supervisión y control LISC.

El laboratorio esta compuesto por 2 tanques de almacenamiento de agua de tipo vertical, un tanque hidroneumático, un intercambiador de calor y una bomba centrífuga como equipos principales. Además, la planta tiene instalados 12 instrumentos marca Endress Hauser repar-tidos de la siguiente manera: 2 transmisores de presión manométrica, 1 transmisor de presión diferencial, 1 transmisor de flujo magnético, 1 transmisor de flujo ultrasónico, 1 transmisor de flujo Vortex, 1 transmisor de nivel ultrasónico, 1 transmisor de nivel capacitivo y 4 transmisores de temperatura con sensor tipo RTD. Todos estos instrumentos están alambrados a un controlador de la marca Allen-Bradley de la familia ControlLogix.

También, la planta cuenta con 4 válvulas tipo globo neumáticas marca Fisher, 4 válvulas tipo globo motorizadas marca Belimo y una bomba centrífuga marca Pedrollo, conectada a un motor trifásico tipo jaula de ardilla que es controlado por un variador de frecuencia de la marca Allen-Bradley.



Figura 3-2.: Instrumentos del lazo de flujo del laboratorio LISC.

Los equipos de control de la planta estan conectados mediante protocolo Ethernet-IP y está compuesto por 2 pantallas de 6", un variador de frecuencia y un PLC Allen-Bradley. Todos estos equipos de control tiene la disponibilidad de ser conectados a un sistema supervisor,

un OPC, un historiador o cualquier aplicación de tipo industrial que tenga conexión por protocolo Ethernet.

Para el desarrollo de la implementación de la aplicación MES, se ajustan los instrumentos a los rangos de presión y flujo manejados por la bomba P-01, el rango de operación de las válvulas y a las condiciones del suministro de aire comprimido usado por el tanque hidroneumático HN-01. Todas las características y configuraciones de estos instrumentos se encuentran detalladas en el anexo A. La disposición de los instrumentos en la planta se encuentran en el diagrama de proceso del anexo E, como también, se encuentra la conexión de cada instrumento al PLC de la planta.

Después de configurados los instrumentos se programaron los sistemas de control. Se programa el PLC y el sistema supervisor, para tener operación y monitoreo de la planta. El sistema supervisor usado es el Proficy Cimplicity, que en su versión demo permite trabajar por 2 horas seguidas sin restricción.

Para la recolección de datos se instala la aplicación Proficy Historian, que en su versión demo permite historiar hasta 25 variables sin restricción. Esta aplicación se conecta directamente al PLC por protocolo OPC. El detalle de la configuración de los sistemas de control se encuentra en el anexo B de este documento.

Finalmente, las aplicaciones MES utilizadas para el análisis, se instalan en el computador de la planta. Para realizar los análisis, la aplicación Proficy CSense, lee los datos recolectados directamente del historiador, ya que posee la herramienta para hacer estas lecturas. En el caso de Matlab, como no tiene conexión directa con el historiador, es necesario descargar los datos del historiador en archivos de texto o en hojas de cálculo, para su posterior análisis en Matlab.

3.2. Descripción de los lazos de control de la planta LISC

Los instrumentos y actuadores de la planta están dispuestos de tal manera que permite realizar diversas prácticas de control e instrumentación industrial. La planta esta diseñada para la circulación de agua industrial, como fluido principal y de aire a presión en las líneas del tanque hidroneumático HN-01. Según el diagrama de proceso del anexo E, las configuraciones posibles de lazos de control se listan a continuación:

- Control de nivel de un solo tanque con el actuador a la salida: mediante el tanque TK-01, la válvula FV-03 y el transmisor LIT-01 o mediante el tanque TK-02, la válvula LV-01 y el transmisor LIT-02. También, es posible implementar otro lazo de nivel de este tipo con el tanque hidroneumático HN-01, la válvula neumática NV-01 y el

transmisor de presión PDIT-01 configurado para medición de nivel mediante presión diferencial.

- Control de nivel de un solo tanque con el actuador a la entrada: mediante el tanque TK-01, la válvula LV-01 y el transmisor LIT-01 o mediante el tanque TK-02, la válvula LV-02 y el transmisor LIT-02.
- Control de nivel para dos tanques conectados en serie: integrando los dos tanques, transmisores y válvulas mencionadas en los dos puntos anteriores.
- Control de flujo: mediante la bomba P-01 o la válvula HV-01 como actuador y los transmisores FIT-01 y FIT-02 como variables de proceso, es posible realizar lazos de control de flujo de agua.
- Control de lazos de presión: estos lazos son posibles en el tanque hidrostático HN-01, ya que tiene suministro de aire a presión por medio de la válvula PV-01 y su respectivo alivio mediante la válvula FV-02. La realimentación la hace el transmisor de presión PIT-02.
- Lazo de control de temperatura: El calefactor HT-01 consiste de un tanque que es calentado por una resistencia eléctrica comandada por un controlador PWM electrónico de estado sólido, Se pueden realizar distintos lazos de temperatura ya que el calentador tiene instalados transmisores de temperatura a la entrada, a la salida y dentro del calentador, permitiendo introducir varias condiciones de operación del ciclo de calor y tener lazos alternativos para contrastar distintas condiciones de operación.

Principalmente, los análisis se hacen sobre 3 de los lazos de flujo posibles en la planta, en el lazo de nivel del tanque hidroneumático HN-01, y en el lazo de presión del mismo tanque.

3.3. Implementación de la aplicaciones MES en los lazos de flujo del laboratorio LISC

En el desarrollo del trabajo se usan 3 de los lazos de flujo de la planta, para generar datos que son almacenados en el historiador. Con los datos analizados, por la aplicación MES, se espera mostrar el consumo eléctrico y la eficiencia de la bomba.

Primero se realiza una prueba, a cada lazo de flujo con presión constante en el tanque hidroneumático HN-01. Posteriormente se prueba con flujo constante y con presión variable. Al final del capítulo se detallan las pruebas realizadas al lazo de presión y de flujo del tanque hidroneumático, que es usado en cada una de las pruebas de los lazos de flujo.

3.4. Descripción de los lazos de flujo

La planta permite la configuración de varios escenarios para el control del flujo de entrada de agua en el tanque hidroneumático HN-01. Dependiendo de la alineación de las válvulas manuales es posible obtener estas distintas configuraciones. Los 3 lazos escogidos difieren en su configuración, instrumentos de medición y actuador utilizado. El procedimiento para el análisis de cada lazo es el siguiente:

1. Definir la variable de proceso y el actuador del lazo de control.
2. Programar en el PLC el controlador PID del lazo.
3. Modelar el lazo de control para tener una representación matemática del lazo y obtener las constantes PID de los controladores.
4. Poner en funcionamiento el lazo para la recolección de datos.
5. Análisis y comparación del funcionamiento de los distintos lazos de flujo mediante la aplicación MES.

Dependiendo del lazo probado, se hacen los siguientes análisis estadísticos:

- Análisis promedio de la eficiencia de la bomba: este análisis muestra cuanto de la capacidad de la bomba se está utilizando. Este valor se obtiene de acuerdo a la ecuación 3-1 [17].

$$Eficiencia(\%) = \frac{\Delta P * Q}{1714 * P_{mec}} \quad (3-1)$$

en donde:

ΔP = Diferencia de presión entre la salida y la entrada de la bomba en psig.

Q = Flujo entregado por la bomba en gpm.

P_{mec} = Potencia de la bomba en HP.

- Análisis estadístico del flujo promedio: este dato muestra la capacidad de regulación del controlador PID sintonizado.
- Análisis del promedio de la potencia del motor de la bomba: este valor es el indicador directo de la energía que se le suministra al lazo.
- Análisis del promedio de velocidad de la bomba: este valor se revisa, para asegurar que la bomba trabaje a más del 20% de su velocidad y garantizar una adecuada refrigeración al motor.

- Análisis del promedio del error entre la referencia y el flujo promedio: valor que también muestra la capacidad de regulación del controlador PID.
- Análisis del promedio de apertura de la válvula proporcional: este dato se analiza, porque las válvulas isoporcentuales deben trabajar en su rango lineal de apertura que va del 10 % al 90 % aproximadamente, para no generar oscilaciones que afecten al lazo [18].
- Análisis del espectro en frecuencia de la señal de apertura de la válvula: este es un indicador de la robustez del lazo. Al ser un elemento principalmente mecánico, en lo posible la válvula debería trabajar a bajas frecuencias y sin oscilaciones.

A continuación se explica el desarrollo, funcionamiento y análisis de cada uno de los lazos de flujo probados y se muestran los resultados obtenidos de la aplicación MES.

3.4.1. Lazo de flujo FIC-12

Este lazo de flujo está compuesto por la válvula HV-01 como actuador y el transmisor de flujo tipo Vortex FIT-01. El diagrama de proceso de este lazo se muestra en la figura 3-3. Para este caso la bomba trabaja al 100 % de su velocidad a todo momento. El flujo se regula por medio de la válvula HV-01 que retorna al tanque TK-01 y el resto del flujo entra al tanque hidrostático HN-01.

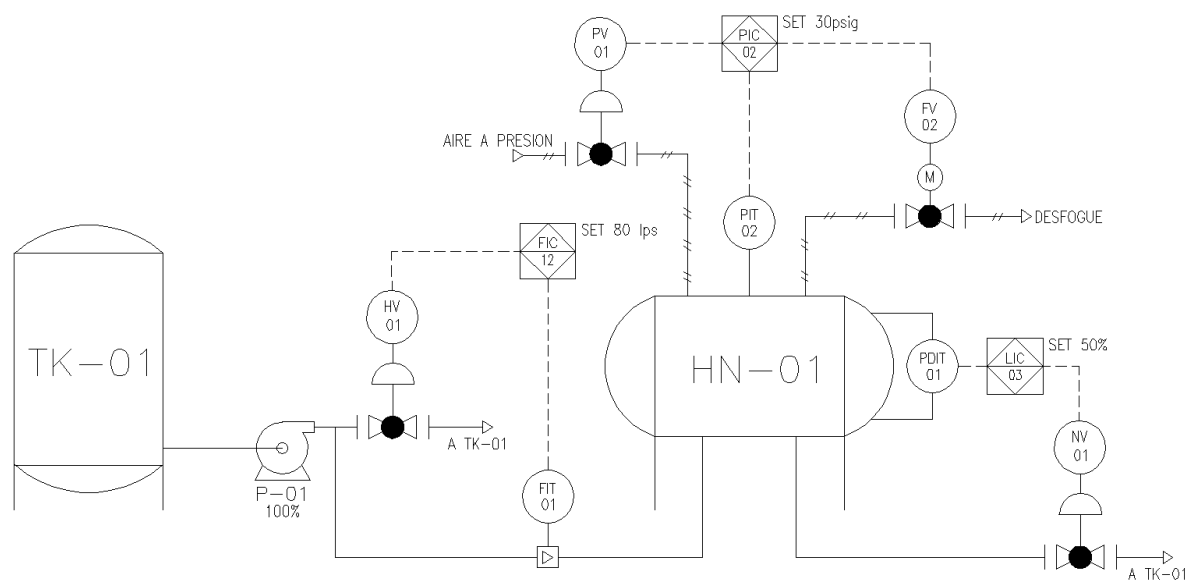


Figura 3-3.: Diagrama del lazo de control de flujo FIC-12.

Para cada lazo de flujo se diseña y se programa en el PLC un controlador de tipo PID con las siguientes características:

- El controlador PID es de tipo de constantes independientes.
- El controlador es de acción inversa.
- El controlador se programa en el PLC en una rutina periódica de 100ms.

La figura 3-4, muestra la programación y configuración del lazo FIC-12, programado en el PLC de la planta.

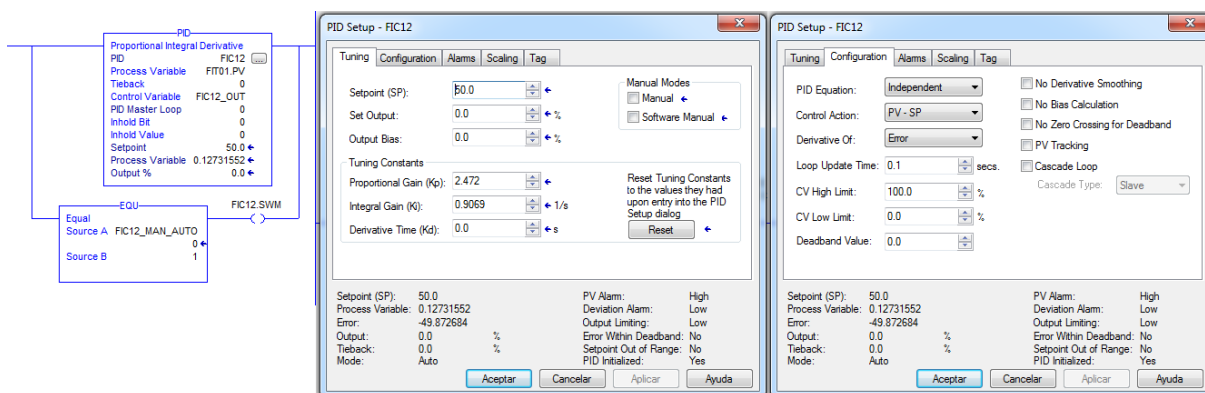


Figura 3-4.: Controlador PID del lazo de flujo FIC-12.

La sintonización de cada uno de los controladores PID de flujo se detallan en el anexo C.

Desempeño del lazo FIC-12 con carga constante

Las siguientes pruebas se realizan a cada uno de los lazos de flujo. El objetivo es verificar el funcionamiento del lazo con la sintonización del controlador PID realizada. También, verificar el error en el flujo controlado, la eficiencia de la bomba, el consumo eléctrico del motor de la bomba y el porcentaje de apertura de la válvula.

El lazo FIC-12 se prueba con carga constante, es decir, la presión en el tanque hidroneumático se ajusta en 25 psig, durante toda la prueba. Se realizan 3 pruebas una con referencia de 40 l/min, 50 l/min y 70 l/min. La gráfica 3-5 muestra las señales del medidor de flujo FIT-01 y el porcentaje de apertura de la válvula HV-01.

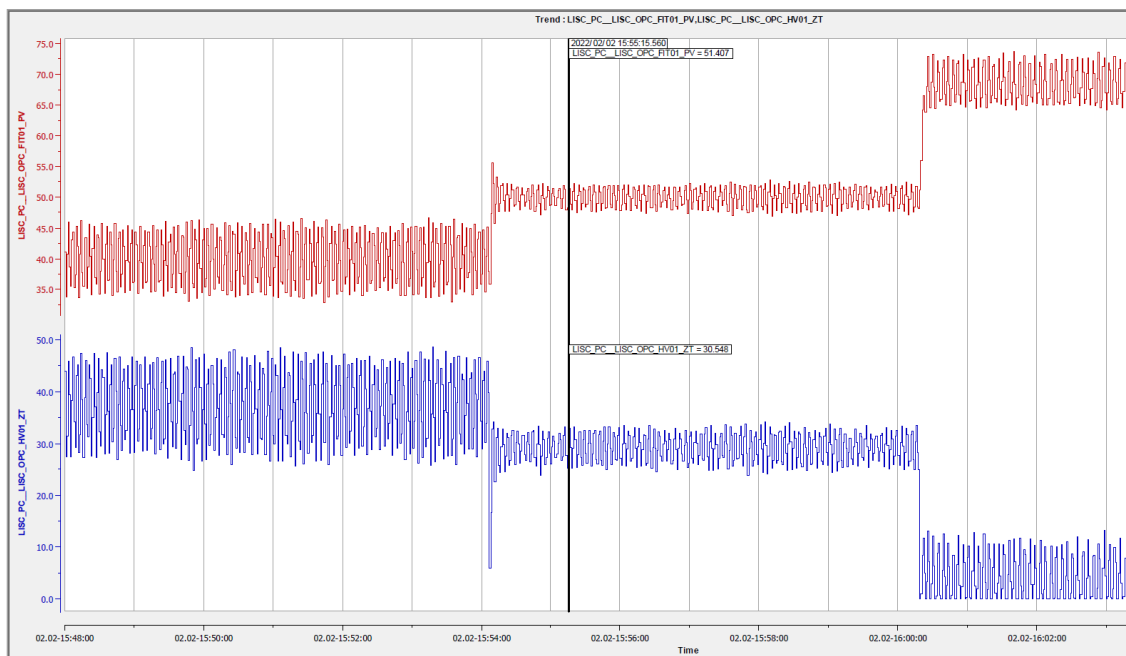


Figura 3-5.: Señales de flujo y velocidad de la bomba del lazo FIC-12.

Las tablas **3-1** a **3-3** muestran los datos estadísticos obtenidos de las 3 pruebas realizadas al lazo a 40 l/min, 50 l/min y 70 l/min. La mejor eficiencia se consigue para un flujo de 70 l/min con un valor del 32%. Este lazo regula bien el flujo para ajustes de 50 l/min y 70 l/min, porque el error promedio es menor de 2.7 l/min. El lazo a 40 l/min no lo regula bien, porque el error promedio es de 3.7 l/min y su desviación estándar es la más alta con un valor de 4.1 l/min.

| FIC 12 Set a 40 l/min | Promedio | Varianza | Std Dev | Mínimo | Máximo |
|------------------------------|-----------------|-----------------|----------------|---------------|---------------|
| Eficiencia (%) | 16.29 | 0.03 | 1.84 | 13.22 | 19.33 |
| FIT-01 (l/min) | 40.0 | 17.4 | 4.2 | 32.9 | 46.7 |
| Error (l/min) | 3.711 | 3.607 | 1.899 | 0.007 | 7.071 |
| HV-01 % Apertura | 37.3 | 51.2 | 7.2 | 24.8 | 48.7 |
| P-01 (kW) | 1.15 | 0.000 | 0.01 | 1.13 | 1.16 |

Tabla 3-1.: Estadística de funcionamiento del lazo FIC-12 a 40 l/min..

| FIC 12 Set a 50 l/min | Promedio | Varianza | Std Dev | Mínimo | Máximo |
|------------------------------|-----------------|-----------------|----------------|---------------|---------------|
| Eficiencia (%) | 21.12 | 0.01 | 0.75 | 19.69 | 22.45 |
| FIT-01 (l/min) | 50.0 | 2.4 | 1.6 | 46.9 | 52.8 |
| Error (l/min) | 1.380 | 0.533 | 0.730 | 0.023 | 3.060 |
| HV-01 % Apertura | 29.3 | 7.3 | 2.7 | 23.9 | 34.3 |
| P-01 (kW) | 1.14 | 0.000 | 0.01 | 1.13 | 1.15 |

Tabla 3-2.: Estadística de funcionamiento del lazo FIC-12 a 50 l/min.

| FIC 12 Set a 70 l/min | Promedio | Varianza | Std Dev | Mínimo | Máximo |
|------------------------------|-----------------|-----------------|----------------|---------------|---------------|
| Eficiencia (%) | 32.01 | 0.02 | 1.58 | 29.38 | 35.18 |
| FIT-01 (l/min) | 68.6 | 7.7 | 2.8 | 64.2 | 73.8 |
| Error (l/min) | 2.712 | 2.332 | 1.527 | 0.011 | 5.755 |
| HV-01 % Apertura | 4.1 | 17.2 | 4.1 | 0.0 | 13.2 |
| P-01 (kW) | 1.13 | 0.000 | 0.01 | 1.12 | 1.15 |

Tabla 3-3.: Estadística de funcionamiento del lazo FIC-12 a 70 l/min.

También, se hace análisis en frecuencia de la señal de apertura usando la aplicación Proficy CSense. La gráfica **3-6** muestra el espectro de la señal de apertura de la válvula HV-01, para un set de flujo de 40 l/min. Los períodos de la frecuencia principal de la señales de apertura de la válvula HV-01 son los siguientes:

- 3.6 segundos, para el lazo con set a 40 l/min.
- 4.3 segundos, para el lazo con set a 50 l/min.
- 4.6 segundos, para el lazo con set a 70 l/min.

Estos períodos de tiempo indican que la válvula operó en bajas frecuencias sin oscilaciones durante cada una de las 3 pruebas.

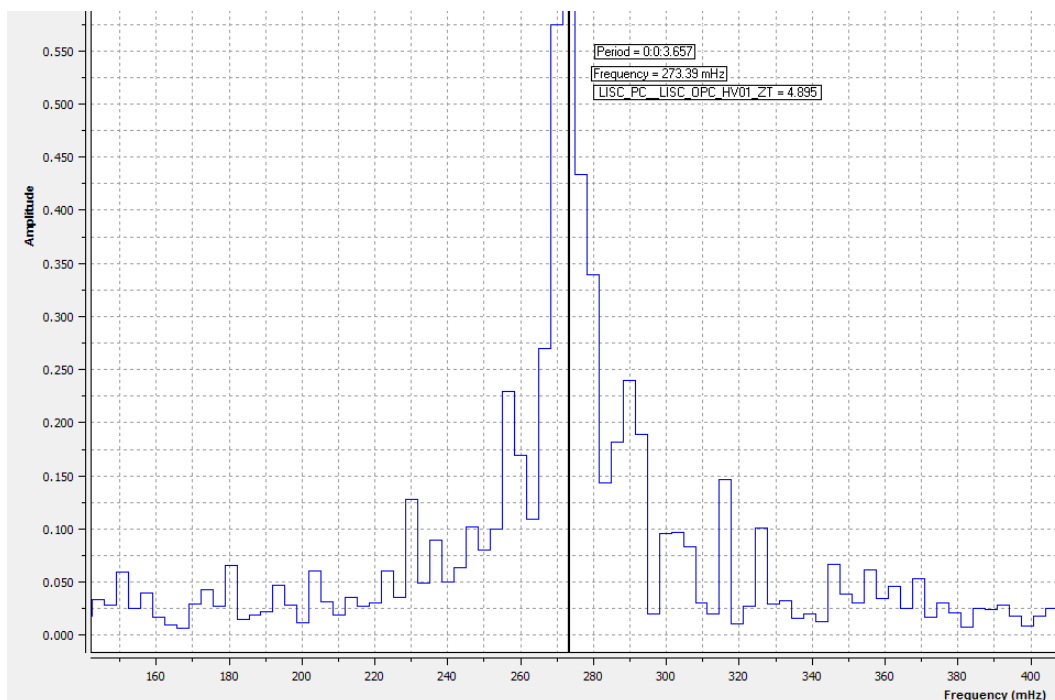


Figura 3-6.: Señal en frecuencia de la apertura de la válvula HV-01, para un set de flujo de 40 l/min.

Estos resultados obtenidos para el lazo FIC-12, indican lo siguiente, la sintonización realizada al controlador PID mantiene el flujo promedio cercano a la referencia ajustada para el lazo. El error fue inferior a 1.3 l/min para un set de 50 l/min e inferior a 2.7 l/min para un set de 70 l/min. La eficiencia más alta se consigue para un set de 70 l/min. El consumo eléctrico de la bomba es el mismo para las 3 referencias de flujos, debido a que la regulación del lazo la realiza la válvula. Por último, la válvula se mantiene en su rango de apertura, cuando la referencia del flujo es de 40 l/min o de 50 l/min, pero en 70 l/min la válvula trabajó con un promedio de apertura del 4%, el cual no es recomendable para este tipo de válvulas.

3.4.2. Lazo de flujo FIC-24

El diagrama de proceso de este lazo de flujo se muestra en la figura 3-7. Este lazo está compuesto por el transmisor de flujo FIT-02, como variable de proceso, y la bomba P-01 como actuador.

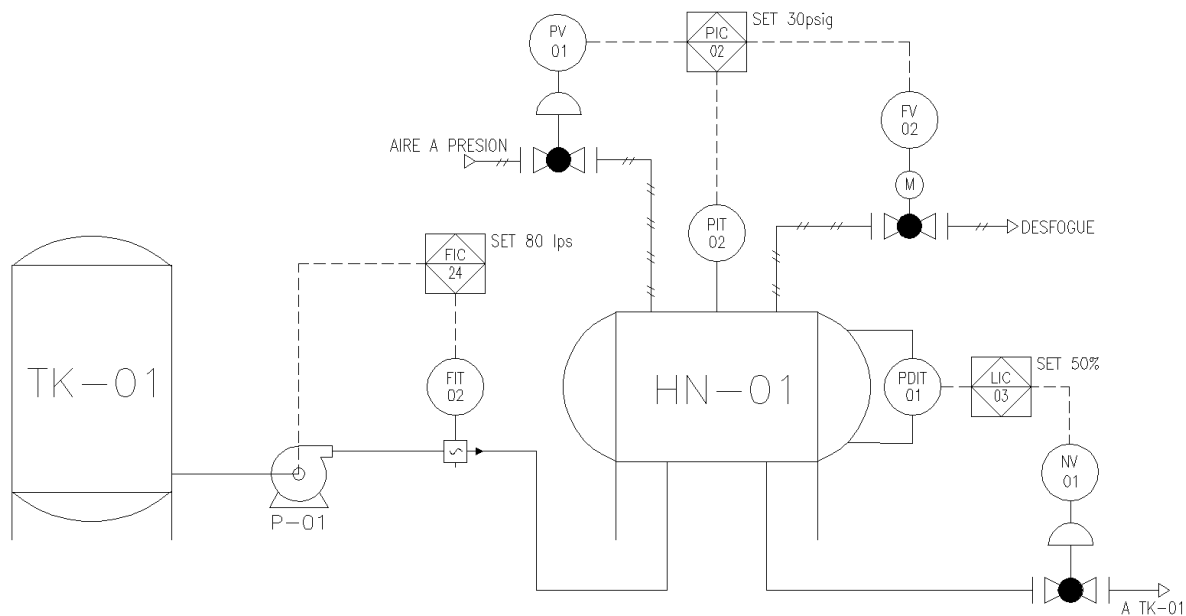


Figura 3-7.: Diagrama del lazo de control de flujo FIC-24.

Desempeño del lazo FIC-24 con carga constante

Para este lazo se realizan las mismas 3 pruebas que en lazo FIC-12 con las mismas condiciones. La gráfica 3-8 muestra las señales del medidor de flujo FIT-02 y el porcentaje de velocidad de la bomba P-01.

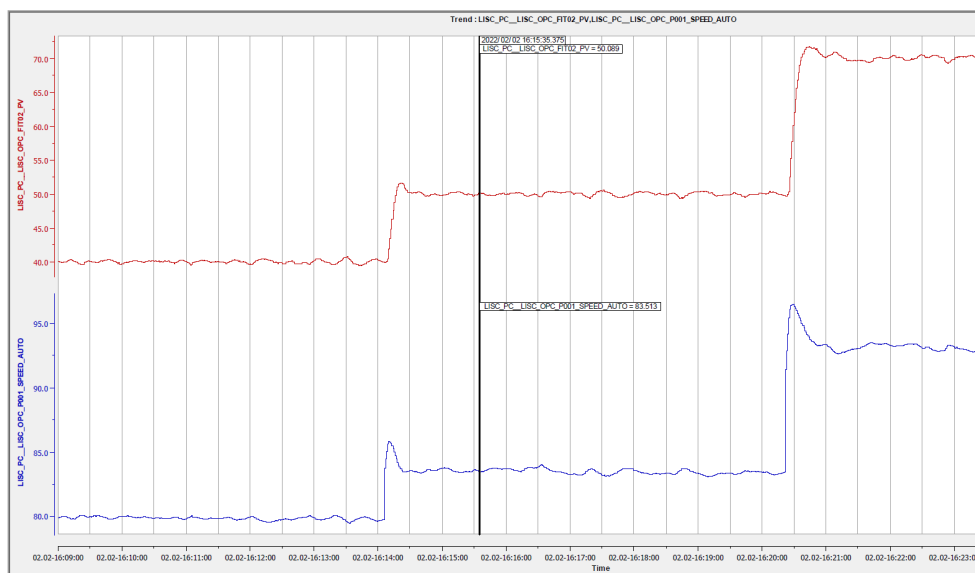


Figura 3-8.: Señales de flujo y velocidad de la bomba del lazo FIC-24.

Las tablas 3-4 a 3-6 muestran los datos estadísticos obtenidos de las 3 pruebas realizadas al lazo a 40 l/min, 50 l/min y 70 l/min. En este lazo se encuentra el menor consumo eléctrico promedio de la bomba de todos los lazos probados, con un valor de 0.54 kW, debido a que no hay restricción del flujo impuesta por la válvula. También, se tiene buen desempeño en la regulación del flujo, porque la desviación estándar del flujo promedio es menor a 0.5 l/min, en los 3 casos. y el error promedio máximo es de 0.3 l/min, cuando el lazo está operando 70 l/min.

| FIC 24 Set a 40 l/min | Promedio | Varianza | Std Dev | Mínimo | Máximo |
|------------------------------|-----------------|-----------------|----------------|---------------|---------------|
| Eficiencia (%) | 34.66 | 0.002 | 0.46 | 33.49 | 36.20 |
| FIT-02 (l/min) | 40.0 | 0.05 | 0.22 | 39.5 | 40.8 |
| Error (l/min) | 0.177 | 0.018 | 0.135 | 0.002 | 0.797 |
| P-01 (kW) | 0.54 | 0.000 | 0.01 | 0.53 | 0.56 |
| P-01 % Velocidad | 79.9 | 0.02 | 0.12 | 79.5 | 80.1 |

Tabla 3-4.: Estadística de funcionamiento del lazo FIC-24 a 40 l/min.

| FIC 24 Set a 50 l/min | Promedio | Varianza | Std Dev | Mínimo | Máximo |
|------------------------------|-----------------|-----------------|----------------|---------------|---------------|
| Eficiencia (%) | 37.92 | 0.002 | 0.46 | 36.60 | 38.91 |
| FIT-02 (l/min) | 50.0 | 0.07 | 0.27 | 49.4 | 50.6 |
| Error (l/min) | 0.222 | 0.022 | 0.149 | 0.002 | 0.600 |
| P-01 (kW) | 0.65 | 0.000 | 0.01 | 0.64 | 0.67 |
| P-01 % Velocidad | 83.48 | 0.03 | 0.19 | 83.08 | 84.02 |

Tabla 3-5.: Estadística de funcionamiento del lazo FIC-24 a 50 l/min.

| FIC 24 Set a 70 l/min | Promedio | Varianza | Std Dev | Mínimo | Máximo |
|-----------------------|----------|----------|---------|--------|--------|
| Eficiencia (%) | 40.41 | 0.002 | 0.47 | 39.10 | 41.93 |
| FIT-02 (l/min) | 70.0 | 0.15 | 0.39 | 69.1 | 70.9 |
| Error (l/min) | 0.309 | 0.056 | 0.236 | 0.003 | 0.943 |
| P-01 (kW) | 0.951 | 0.000 | 0.009 | 0.930 | 0.970 |
| P-01 % Velocidad | 93.1 | 0.06 | 0.24 | 92.6 | 93.6 |

Tabla 3-6.: Estadística de funcionamiento del lazo FIC-24 a 70 l/min.

3.4.3. Lazo de flujo FIC-25 con carga constante

El diagrama de proceso de este lazo se muestra en la figura 3-9. En este lazo la variable de proceso es el transmisor FIT-02 y el actuador es la válvula proporcional neumática HV-01. Al igual que en el lazo de flujo FIC-12, este lazo durante su funcionamiento la bomba trabaja al 100% de su velocidad.

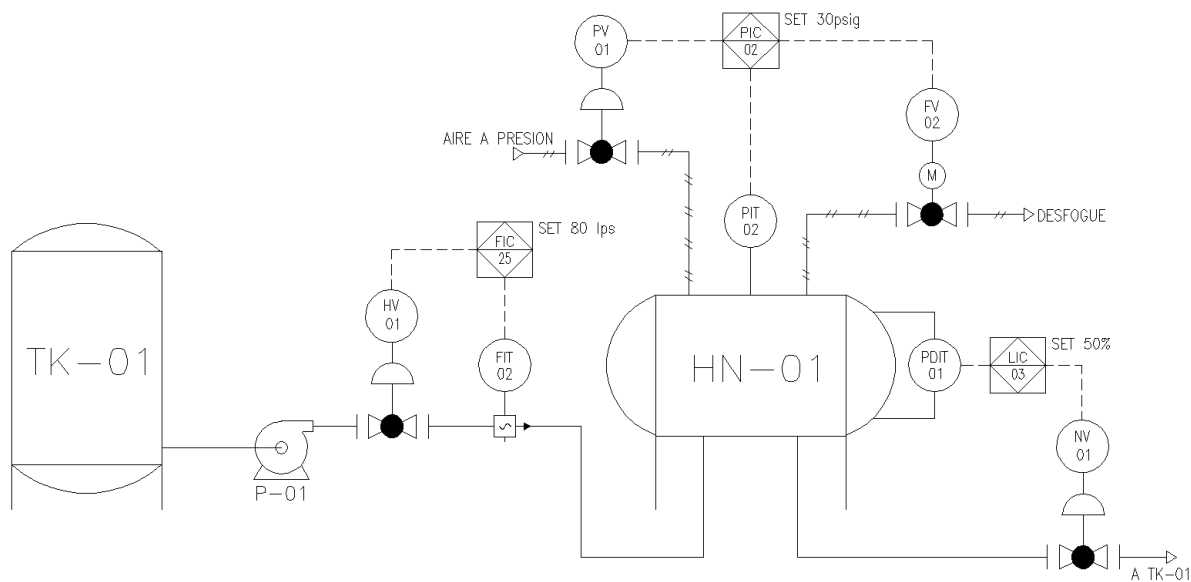


Figura 3-9.: Diagrama del lazo de control de flujo FIC-25.

Desempeño del lazo FIC-25

Para este lazo se realizan las mismas 3 pruebas que en lazo FIC-12 con las mismas condiciones. La gráfica 3-10 muestra las señales del medidor de flujo FIT-02 y el porcentaje de apertura de la válvula HV-01.

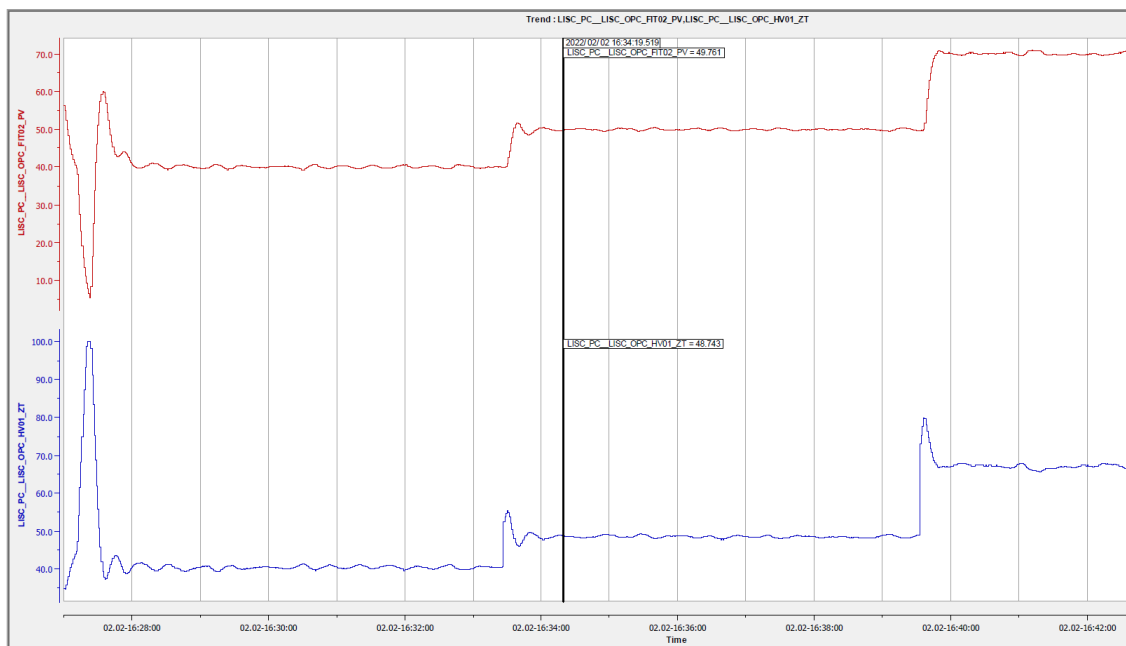


Figura 3-10.: Señales de flujo y velocidad de la bomba del lazo FIC-25.

Las tablas **3-7** a **3-9** muestran los datos estadísticos obtenidos de las 3 pruebas realizadas al lazo a 40 l/min, 50 l/min y 70 l/min. Este lazo muestra la menor desviación estándar del flujo con un valor de 0.23 l/min, cuando el lazo trabaja a 50 l/min. También, este lazo muestra la mejor eficiencia de todas las pruebas realizadas, cuando el lazo está trabajando a 70 l/min con un valor del 41 %.

| FIC 25 Set a 40 l/min | Promedio | Varianza | Std Dev | Mínimo | Máximo |
|------------------------------|-----------------|-----------------|----------------|---------------|---------------|
| Eficiencia (%) | 33.10 | 0.002 | 0.44 | 32.17 | 34.25 |
| FIT-02 (l/min) | 40.0 | 0.14 | 0.37 | 39.3 | 41.1 |
| Error (l/min) | 0.315 | 0.042 | 0.205 | 0.012 | 1.064 |
| HV-01 % Apertura | 40.41 | 0.24 | 0.49 | 39.45 | 41.76 |
| P-01 (kW) | 0.98 | 0.00 | 0.01 | 0.97 | 0.99 |

Tabla 3-7.: Estadística de funcionamiento del lazo FIC-25 a 40 l/min.

| FIC 25 Set a 50 l/min | Promedio | Varianza | Std Dev | Mínimo | Máximo |
|------------------------------|-----------------|-----------------|----------------|---------------|---------------|
| Eficiencia (%) | 37.42 | 0.001 | 0.26 | 36.80 | 38.04 |
| FIT-02 (l/min) | 50.0 | 0.05 | 0.23 | 49.5 | 50.6 |
| Error (l/min) | 0.184 | 0.018 | 0.133 | 0.000 | 0.587 |
| HV-01 % Apertura | 48.5 | 0.09 | 0.30 | 47.8 | 49.3 |
| P-01 (kW) | 1.03 | 0.000 | 0.01 | 1.02 | 1.04 |

Tabla 3-8.: Estadística de funcionamiento del lazo FIC-25 a 50 l/min.

| FIC 25 Set a 70 l/min | Promedio | Varianza | Std Dev | Mínimo | Máximo |
|------------------------------|-----------------|-----------------|----------------|---------------|---------------|
| Eficiencia (%) | 41.09 | 0.001 | 0.36 | 40.33 | 42.20 |
| FIT-02 (l/min) | 70.0 | 0.09 | 0.30 | 69.4 | 70.8 |
| Error (l/min) | 0.239 | 0.031 | 0.176 | 0.000 | 0.825 |
| HV-01 % Apertura | 66.9 | 0.27 | 0.52 | 65.3 | 67.8 |
| P-01 (kW) | 1.13 | 0.000 | 0.01 | 1.11 | 1.14 |

Tabla 3-9.: Estadística de funcionamiento del lazo FIC-25 a 70 l/min.

En el análisis de espectro, realizado a la señal de apertura de la válvula HV-01, los periodos de la componente principal son los siguientes:

- 25 segundos, para el lazo con set a 40 l/min.
- 28 segundos, para el lazo con set a 50 l/min.
- 100 segundos, para el lazo con set a 70 l/min.

Comparado este lazo con el lazo FIC-12, la válvula no presenta movimiento prácticamente, condición ideal para la operación mecánica de la válvula.

De los 3 lazos de flujo analizados, el lazo FIC-25 es el de menor desviación en el flujo. Además, el rango mínimo de apertura fue del 39 %, para un flujo de 40 l/min y un máximo de apertura del 67 % para un flujo de operación de 70 l/min. El rango de operación se encuentra entre los límites de operación, para este tipo de válvulas de globo proporcional.

3.4.4. Desempeño del lazo FIC-12 con carga variable

La siguiente prueba que se realiza en cada lazo de flujo, para probar su desempeño, consiste en variar la carga del lazo. Esto se hace variando la presión en el tanque hidroneumático, aumentando la presión en 1 psig cada segundo de 15 psig a 35 psig y luego decrementado la presión en 1 psig cada segundo de 35 psig hasta los 15 psig. El objetivo de esta prueba es revisar el error en el flujo cuando la perturbación, en esta caso la presión, cambia en este rango seleccionado. La referencia del lazo se ajusta en 50 l/min.

Se analizan los mismos datos que las pruebas anteriores para probar el desempeño del lazo. Se analizan los datos de la eficiencia de la bomba, el error en el flujo controlado, el promedio del flujo controlado, la señal de apertura de la válvula y la potencia eléctrica del motor de la bomba.

La tabla **3-10** muestra los datos estadísticos de la prueba. Las condiciones del lazo son las mismas que la prueba anterior, excepto que se varía la presión en el tanque hidroneumático como se muestra en la gráfica **3-10**. Esta prueba se hace con una duración de 30 minutos. En este análisis se agregan los datos de la presión a la salida de la bomba, medida por el transmisor de presión PIT-01 y la presión del tanque hidroneumático medida por el transmisor PIT-02.

| Lazo FIC-12 | Promedio | Varianza | Std Dev | Mínimo | Máximo |
|--------------------|----------|----------|---------|--------|--------|
| Eficiencia (%) | 23.9 | 18.4 | 4.3 | 15.2 | 32.9 |
| Error (l/min) | 0.45 | 0.17 | 0.41 | 0.00 | 3.92 |
| FIT-01 (l/min) | 50.0 | 0.37 | 0.61 | 46.1 | 52.0 |
| HV-01 (% Apertura) | 72.3 | 65.4 | 8.1 | 45.2 | 88.2 |
| P-01 (kW) | 1.13 | 0.00 | 0.01 | 1.07 | 1.15 |
| PIT-01 (psig) | 31.1 | 26.5 | 5.1 | 20.4 | 40.9 |
| PIT-02 (psig) | 26.4 | 33.1 | 5.8 | 14.5 | 38.0 |

Tabla 3-10.: Estadística de funcionamiento del lazo FIC-12 con carga variable.

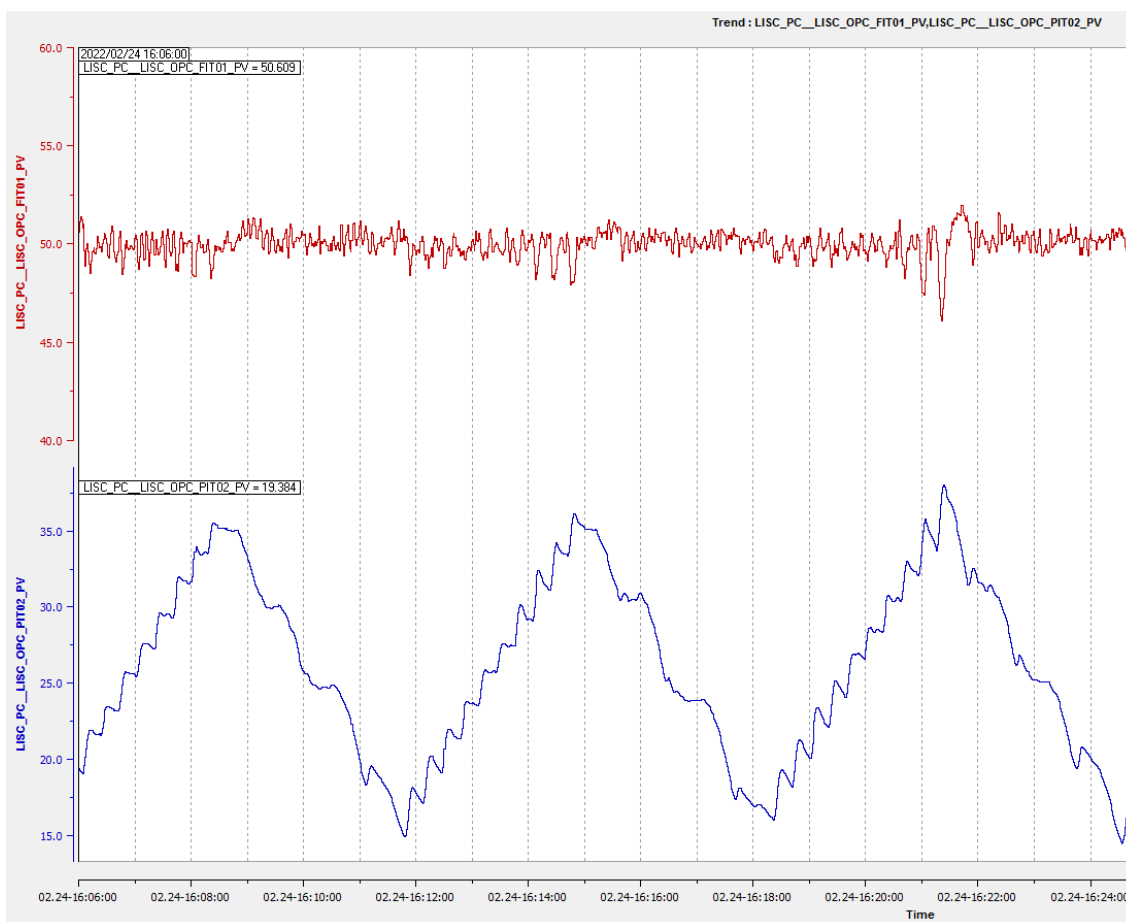


Figura 3-11.: Lazo FIC-12 señales de flujo y presión con carga variable.

De acuerdo con los datos de la tabla **3-10**, el desempeño del lazo se mantiene si se compara con la prueba anterior del punto 3.4.1, que fue realizada con presión constante y con una referencia para el flujo de 50 l/min. La eficiencia de la bomba de la prueba anterior fue del 21.1% y en este caso es de 23.9%. La regulación se mantiene, porque el flujo promedio es de 50 l/min con un error promedio de 0.45 l/min.

Haciendo el análisis en frecuencia de la señal de la apertura de la válvula, el periodo de la señal fundamental es de 300 segundos, lo que indica que el actuador trabaja de manera suave y no oscilatoria. El rango de trabajo de la válvula se mantiene entre un mínimo del 45.2% de apertura y un máximo del 88.2%.

3.4.5. Desempeño del lazo FIC-24 con carga variable

La prueba con el lazo FIC-24 se realiza en las mismas condiciones que la prueba anterior y con la misma duración de 30 minutos. La tabla **3-11** muestra los datos de la prueba y la

gráfica **3-12** las señales de flujo del lazo y la presión del tanque hidroneumático.

| Lazo FIC-24 | Promedio | Varianza | Std Dev | Mínimo | Máximo |
|--------------------|----------|----------|---------|--------|--------|
| Eficiencia (%) | 37.7 | 3.7 | 1.9 | 31.4 | 44.4 |
| Error (l/min) | 1.84 | 1.66 | 1.29 | 0.00 | 6.12 |
| FIT-02 (l/min) | 49.9 | 5.0 | 2.2 | 43.9 | 55.5 |
| P-01 (kW) | 0.65 | 0.02 | 0.14 | 0.38 | 0.93 |
| P-01 (% Velocidad) | 83.0 | 41.6 | 6.4 | 69.0 | 94.7 |
| PIT-01 (psig) | 28.4 | 32.0 | 5.7 | 17.3 | 38.5 |
| PIT-02 (psig) | 26.0 | 32.3 | 5.7 | 14.4 | 36.4 |

Tabla 3-11.: Estadística de funcionamiento del lazo FIC-24 con carga variable.

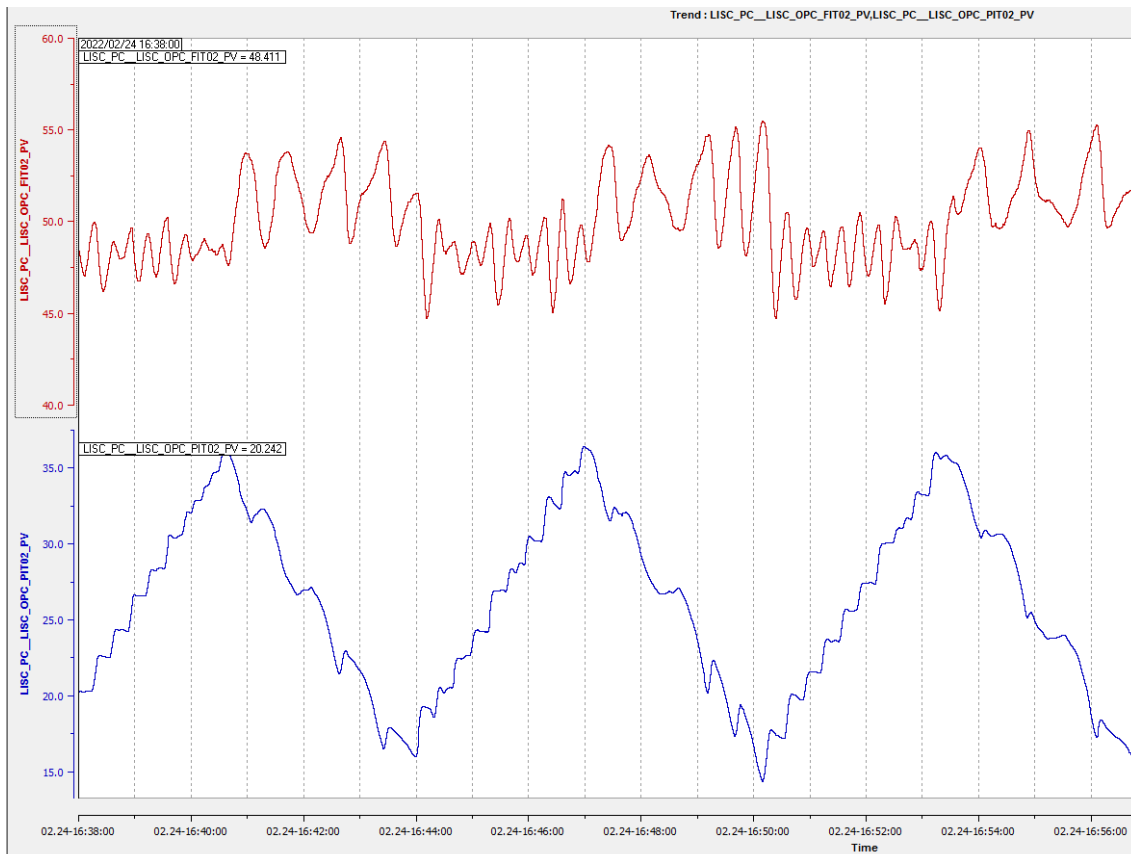


Figura 3-12.: Lazo FIC-24 señales de flujo y presión con carga variable.

De acuerdo a los datos, este es el lazo tiene el mejor consumo eléctrico con 0.65 kW y una

eficiencia de la bomba con 37.7%. También, es el lazo con la menor presión promedio a la salida de la bomba en 28.4 psig, ya que no tiene la restricción de la válvula. Tiene buen desempeño regulando el flujo, porque el valor promedio del flujo es del 49.9% y un error promedio del 1.84 l/min, un error menor al 2%. Pero la desviación estándar del error es la mas alta, si se compara con los otros 2 lazos de flujo, con un valor de desviación estándar de 1.29 l/min. Esta desviación es alta debido a que el tiempo de respuesta de la bomba es mayor si se compara con el tiempo de respuesta de la válvula

3.4.6. Desempeño del lazo FIC-25 con carga variable

Por último esta la prueba con carga variable del lazo FIC-25, La tabla **3-12** muestra los datos de la prueba y la gráfica **3-13** las señales de flujo del lazo y la presión del tanque hidroneumático.

| Lazo FIC-25 | Promedio | Varianza | Std Dev | Mínimo | Máximo |
|--------------------|----------|----------|---------|--------|--------|
| Eficiencia (%) | 37.9 | 1.01 | 1.01 | 34.3 | 41.0 |
| Error (l/min) | 0.94 | 0.52 | 0.72 | 0.00 | 3.92 |
| FIT-02 (l/min) | 50.0 | 1.4 | 1.2 | 46.1 | 53.2 |
| HV-01 (% Apertura) | 49.2 | 28.6 | 5.3 | 39.6 | 63.4 |
| P-01 (kW) | 1.03 | 0.00 | 0.01 | 0.99 | 1.06 |
| PIT-01 (psig) | 44.0 | 0.15 | 0.39 | 43.1 | 45.2 |
| PIT-02 (psig) | 26.4 | 33.2 | 5.8 | 14.3 | 37.6 |

Tabla 3-12.: Estadística de funcionamiento del lazo FIC-25 con carga variable.

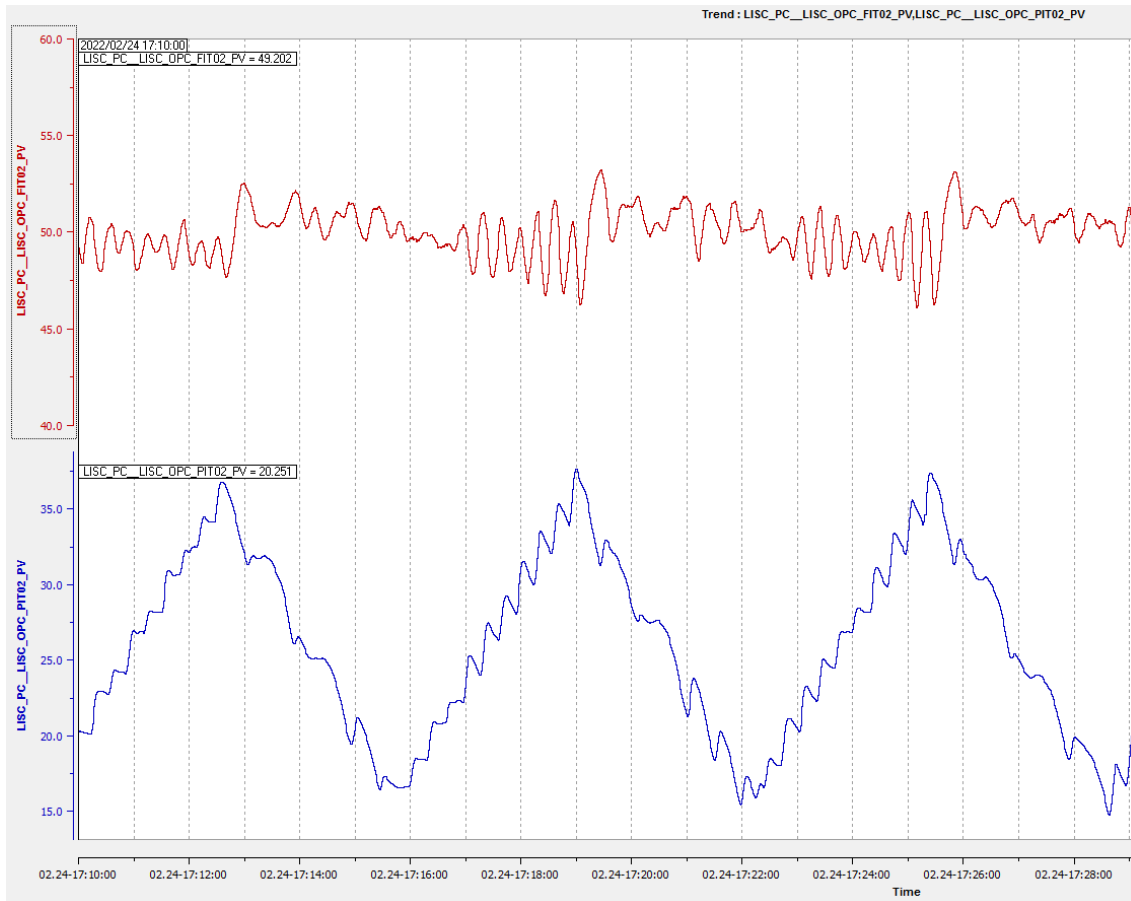


Figura 3-13.: Lazo FIC-25 señales de flujo y presión con carga variable.

Teniendo en cuenta la restricción puesta por la válvula, este lazo tiene una eficiencia en 37.5 %, similar al lazo FIC-24, pero el lazo trabaja con la mayor presión promedio a la salida de la bomba con 43.9 psig y un consumo de 1.03 kW. Esto es un indicativo de que la bomba necesita más energía para vencer la oposición puesta por la válvula, pero la eficiencia de la bomba se mantiene. Además, el lazo cuenta con una buena regulación, porque el flujo promedio es de 50 l/min, con una baja desviación 1.2 l/min y un error promedio bajo del 0.94 l/min.

En el análisis de frecuencia de la señal de apertura de la válvula, el periodo de la señal fundamental es de 300 segundos igual al medido en el lazo FIC-12. El rango de trabajo de la válvula se mantiene entre un mínimo del 39.6 % de apertura y un máximo del 63.3 %.

De las pruebas realizadas con carga variable, los lazos FIC-12 y FIC25 tienen la menor desviación estándar en el valor del flujo, debido a la rapidez del actuador, que en este caso es la válvula. Esto es ideal para mantener el flujo lo mas cercano al set ajustado en 50 l/min, pero se requiere de mas energía eléctrica para vencer la restricción de la válvula.

El lazo FIC-24 fue el de menor consumo eléctrico promedio de la bomba, debido a que no tiene la restricción de la válvula, pero fue el de mayor desviación en el flujo controlado y la eficiencia de la bomba es similar si se compara con los otros 2 lazos que son controlados por la válvula.

3.4.7. Control de nivel tanque hidroneumático LIC-03

Dentro del análisis de funcionamiento de los lazos de flujo, el tanque hidroneumático se comporta como la carga que consume la energía del lazo. Esta carga puede ser variada mediante el aumento o decremento de la presión interna del tanque.

Debido a la poca capacidad del tanque (96 litros) en relación con el caudal máximo entregado de la bomba (100 litros por minuto), es necesario mantener el nivel del tanque hidrostático constante, de tal manera que el caudal de salida del tanque sea igual al caudal de entrada. Este control se hace por medio de la válvula NV-01 y el transmisor de presión diferencial PDIT-01, configurado para medir el nivel de este tanque.

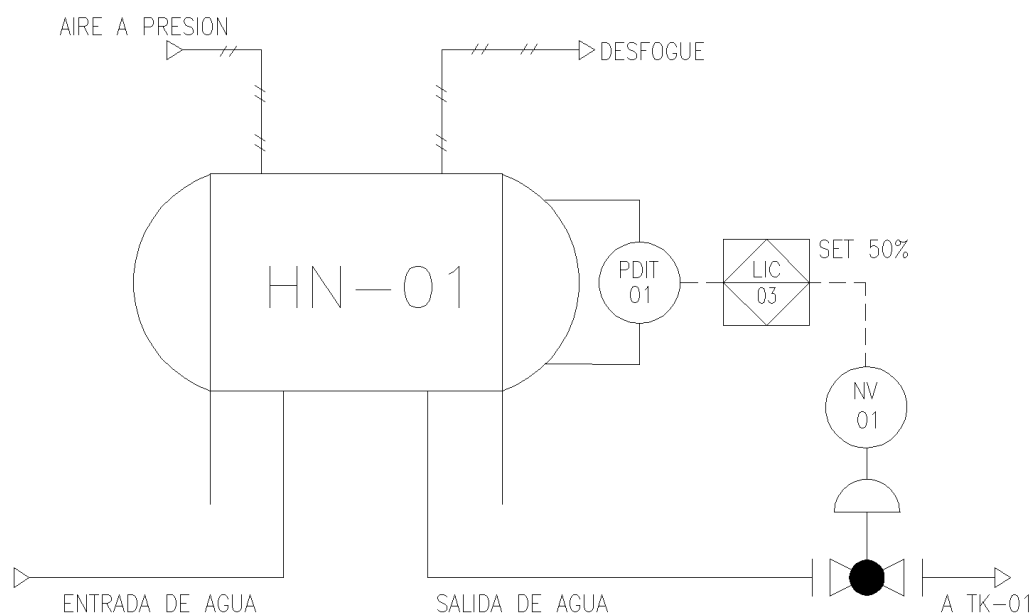


Figura 3-14.: Lazo de control de nivel del tanque hidrostático LIC-03.

En el PLC se programa un controlador PID como estrategia de control para mantener el nivel del tanque al 50%. Las constantes del controlador PID se calculan mediante la técnica de sintonización de controladores para procesos integrantes [19].

Para el caso de este tanque, debido a que es un proceso integrante, solo se calcula la constante proporcional máxima que hace que la respuesta del sistema no sea oscilatoria:

$$K_c = \frac{A}{4\tau_v K_v K_T} \quad (3-2)$$

donde:

A = Área de la sección transversal del tanque.

τ_v = Constante de tiempo de la válvula.

K_v = Ganancia de la válvula.

K_T = Ganancia del transmisor.

La ganancia de la válvula es igual a:

$$K_v = \frac{\ln(\alpha) * flujo}{Salida del controlador} \quad (3-3)$$

donde:

K_v = Ganancia de la válvula.

$\alpha = 50$, Parámetro de rangueabilidad para válvulas isoporcentuales.

$flujo$ = flujo de diseño que pasa por la válvula.

Salida del controlador = Porcentaje de la salida del controlador.

$$K_v = \frac{\ln(50) * 50l/min}{100 \%CO} = 1,95 \frac{l/min}{\%CO} \quad (3-4)$$

La constante de tiempo de la válvula es de 0.5 segundos o 0.0083 minutos. Este valor se obtiene experimentalmente y es descrito en el anexo D.

La ganancia del transmisor es igual a:

$$K_T = \frac{Salida del transmisor}{Entrada del transmisor} = \frac{(100 - 0) \%TO}{(2,2 - 0)dm} = 45,45 \frac{\%TO}{dm} \quad (3-5)$$

El rango de la señal de salida del transmisor va de 0 %TO a 100 %TO.

El rango de entrada del transmisor, que es equivalente al nivel del tanque, va de 0 dm a 2.2 dm, tomando como referencias las boquillas inferior y superior del instrumento.

El área transversal del tanque, en donde el nivel del tanque es igual al 50 %, es igual a:

$$A = 43,551dm^2$$

De acuerdo a la ecuación 3-2, la constante proporcional máxima para el controlador es:

$$K_c = \frac{43,551 dm^2}{4 * (0,0517 min) * (1,95 l/min \%CO) * (45,45 \%TO/dm)} = 2,37 \frac{\%CO}{\%TO} \quad (3-6)$$

La tabla **3-13** muestra los parámetros de configuración del controlador PID programados en el PLC de la planta.

| Parámetro | Valor |
|----------------------------|---------|
| Ganancia proporcional (Kc) | 2.37 |
| Ganancia integral (Ki) | 0 |
| Ganancia derivativa (Kd) | 0 |
| Tiempo de muestreo | 100ms |
| Acción del controlador | Directa |

Tabla 3-13.: Parámetros de configuración del controlador PID LIC-03.

Verificación del funcionamiento del control de nivel LIC-03

El control de nivel del tanque hidroneumático se programa en el PLC y se verifica su funcionamiento con ayuda de la aplicación instalada el Proficy CSense. Los datos de funcionamiento del lazo se almacenan en el historiador Proficy Historian, también instalado en el laboratorio.

El control de nivel se verifica con las siguientes condiciones: el flujo de entrada del tanque se controla usando el lazo de flujo FIC-12 y la presión del tanque hidroneumático se ajusta en 25 psig. Se hacen pruebas de funcionamiento con flujo de entrada a 50 l/min, 75 l/min y 30 l/min de 10 minutos para cada flujo.

La gráfica **3-15** muestra las señales del flujo de entrada al tanque, el porcentaje de apertura de la válvula NV-01 y el nivel del tanque.

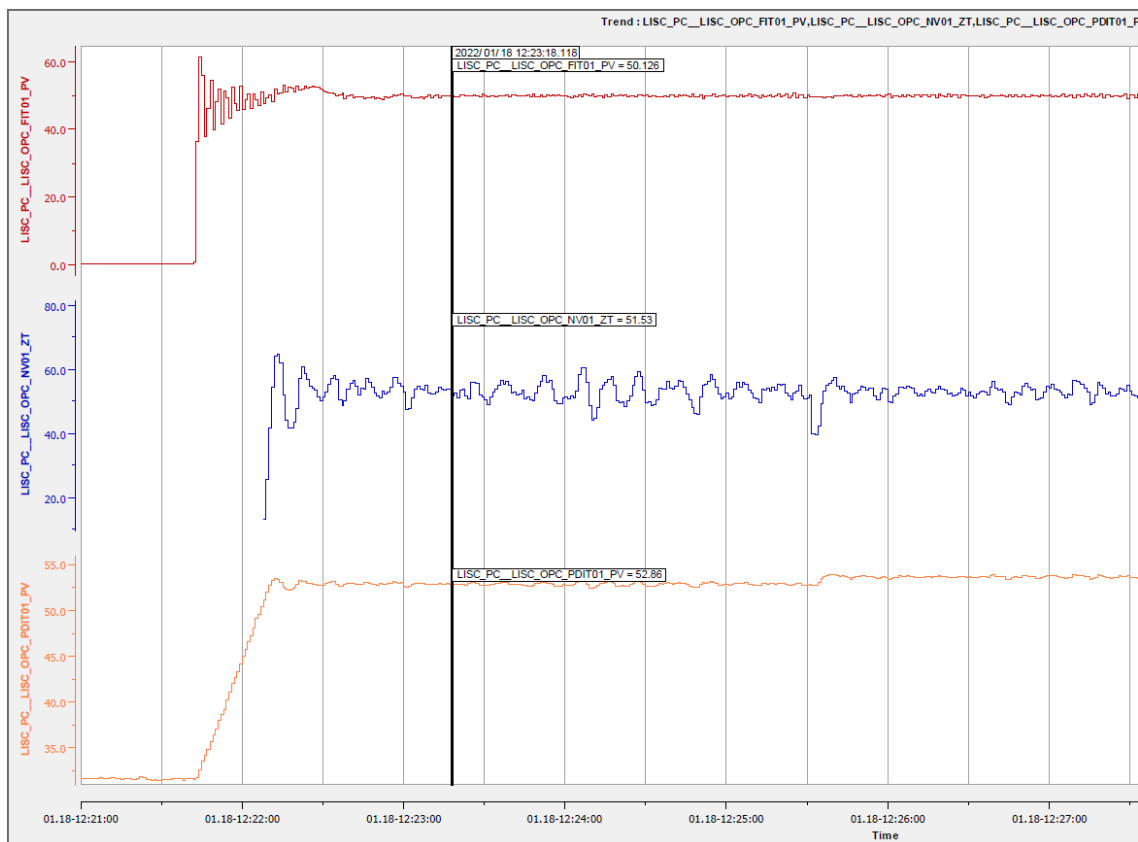


Figura 3-15.: Prueba del lazo de nivel LIC-03. En rojo la señal del flujo de entrada a 50 l/min, en azul la señal de apertura de la válvula NV-01 y en naranja la señal nivel del tanque HN-01.

| Señal | Promedio | Std Dev | Mínimo | Máximo |
|---------------------------|----------|---------|--------|--------|
| Nivel PDIT01 (%) | 53.5 | 0.44 | 52.4 | 55.5 |
| Flujo FIT01 (l/min) | 50.0 | 0.34 | 48.6 | 51.3 |
| Válvula NV01 (% Apertura) | 53.1 | 3.21 | 39.6 | 78.2 |

Tabla 3-14.: Datos estadísticos de funcionamiento del control de nivel LIC-03 a 50 l/min

De acuerdo con la tabla 3-14, el nivel promedio es de un 53.4%, durante los 10 minutos que duro la prueba. También se verifica el rango de apertura de la válvula NV-01 cuyo valor promedio es del 52% y su rango se movió entre el 39.5% y el 78.2%.

La prueba con flujo de entrada a 75 l/min se muestra en la gráfica 3-16.

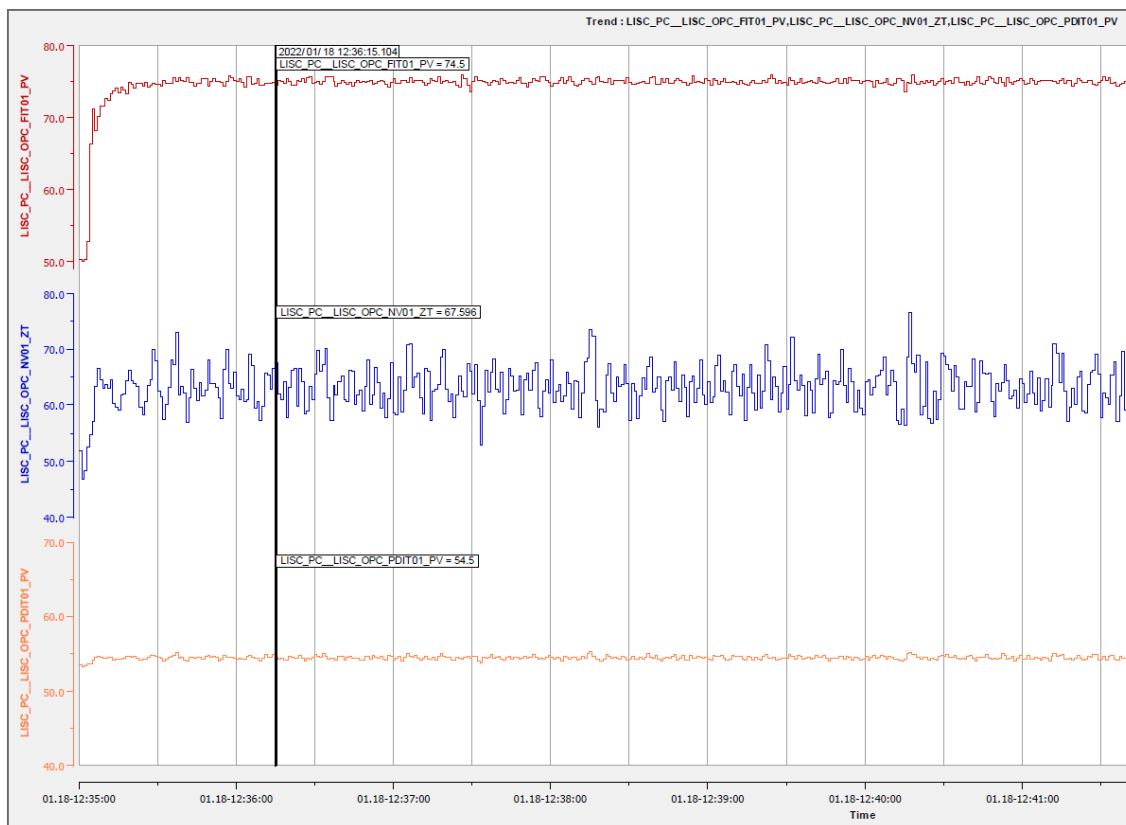


Figura 3-16.: Prueba del lazo de nivel LIC-03. En rojo la señal del flujo de entrada a 75 l/min, en azul la señal de apertura de la válvula NV-01 y en naranja la señal nivel del tanque HN-01.

| Señal | Promedio | Std Dev | Mínimo | Máximo |
|---------------------------|----------|---------|--------|--------|
| Nivel PDIT01 (%) | 54.4 | 0.25 | 53.8 | 55.3 |
| Flujo FIT01 (l/min) | 75.0 | 0.33 | 73.6 | 75.9 |
| Válvula NV01 (% Apertura) | 63.3 | 3.60 | 52.8 | 76.5 |

Tabla 3-15.: Datos estadísticos de funcionamiento del control de nivel LIC-03 a 75 l/min.

De acuerdo con la tabla **3-15**, el nivel promedio fue del 54.4%, durante los 10 minutos que duro la prueba. También se verifica el rango de apertura de la válvula NV-01 cuyo valor promedio es del 63.2% y su rango se movió entre el 52.8% y el 76.4%.

La última prueba se hace con flujo de entrada a 30 l/min y se muestra en la gráfica **3-17**.

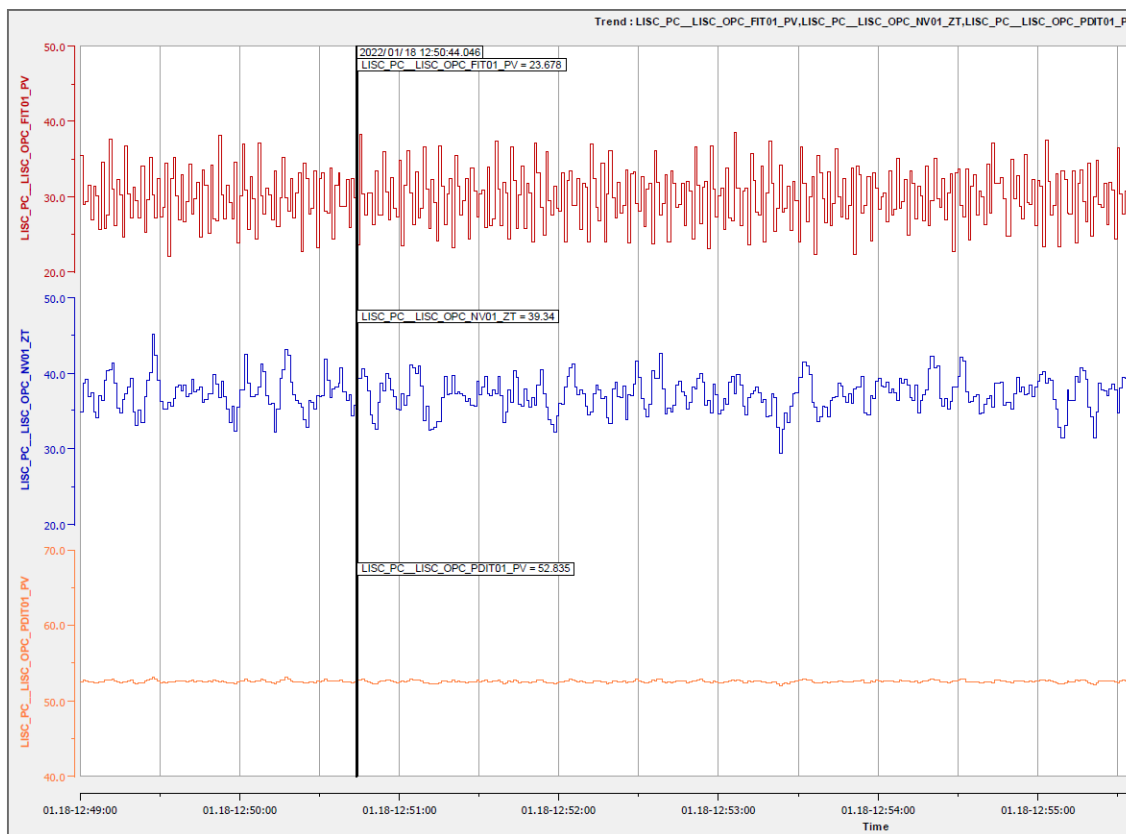


Figura 3-17.: Prueba del lazo de nivel LIC-03. En rojo la señal del flujo de entrada a 30 l/min, en azul la señal de apertura de la válvula NV-01 y en naranja la señal nivel del tanque HN-01.

| Señal | Promedio | Std Dev | Mínimo | Máximo |
|---------------------------|----------|---------|--------|--------|
| Nivel PDIT01 (%) | 52.6 | 0.15 | 52.1 | 53.1 |
| Flujo FIT01 (l/min) | 30.0 | 3.55 | 21.6 | 38.5 |
| Válvula NV01 (% Apertura) | 37.4 | 2.12 | 29.4 | 45.1 |

Tabla 3-16.: Datos estadísticos de funcionamiento del control de nivel LIC-03 a 30 l/min.

De acuerdo con la tabla **3-16**, el nivel promedio fue del 52.6 %, durante los 10 minutos que duro la prueba. También se verifica el rango de apertura de la válvula NV-01 cuyo valor promedio es del 37.3 % y su rango se movió entre el 29.4 % y el 45.1 %.

Mediante la aplicación Proficy CSense se verificó el correcto funcionamiento y sintonización del lazo de nivel, con flujos de entrada 50 l/min, 75 l/min y 30 l/min, ya que el error promedio del nivel para los tres casos fue inferior al 8 %. Este ajuste del lazo de nivel se usa en

el análisis de los lazos de flujo de la planta.

También se observa que el comportamiento del lazo de nivel es estable y aunque hay un error del 8 %, cuando el flujo es de 75 l/min, este error es aceptable ya que la función principal es mantener el flujo de salida del tanque igual al flujo de entrada.

3.4.8. Control de presión del tanque hidrostático PIC-02

En la planta LISC el tanque hidroneumático recibe el agua impulsada por la bomba P-01 y este fluido puede ser conducido al tanque TK-01 o al tanque TK-02. Para su funcionamiento este tanque tiene una entrada de aire comprimido y una salida de aire, ambas controladas por válvulas proporcionales. Debido a este diseño que tiene el tanque HN-01 es ideal para usar como carga en las pruebas de los lazos de flujo. Además permite generar perturbaciones durante el desarrollo de estas pruebas mediante la variación de la presión del aire comprimido.

Diseñar una estrategia de control no es sencillo debido a que el tanque cuenta con dos válvulas de globo con diferente actuador. Esta diferencia está principalmente en el tiempo de respuesta de las válvulas, debido a que la válvula neumática tiene un tiempo de respuesta inferior a los 5 segundos y el tiempo de respuesta de la válvula motorizada es de 70 segundos aproximadamente. Otro inconveniente en el diseño de control es que el proceso es de tipo integrante, lo que dificulta su sintonización mediante técnicas tradicionales, además que obtener el modelo matemático de esta planta tampoco resulta ser tan fácil.

Debido a esta complejidad se plantean dos estrategias de control para el control de presión: un regulador de tipo PID y un controlador de tipo ON-OFF. El lazo de presión está compuesto por el transmisor de presión PIT-02, como variable de proceso, y las válvulas PV-01 y FV-02, como actuadores.

Para el ajuste del control de presión se realizan 5 pruebas para analizar su funcionamiento mediante la aplicación Proficy CSense y escoger la de mejor desempeño. Estas pruebas se hacen con un flujo de entrada de 50 l/min y con un set de nivel del 50 % de la altura del tanque hidroneumático.

3.4.9. Controlador de presión ON-OFF del tanque HN-01

El controlador ON-OFF programado en el PLC tiene dos parámetros de ajuste, uno de baja presión y otro de alta presión para cada válvula. Para la válvula PV-01, cuando hay baja presión en el tanque, se abre esta válvula para inyectar aire a presión y cuando hay alta presión, se cierra la válvula para detener el suministro de aire.

Para la válvula FV-02 esta se abre cuando la presión del tanque supera su valor de alta

presión, para desfogar el aire, y se cierra cuando la presión supera su parámetro de baja presión. La gráfica **3-18** muestra el diagrama de proceso para la implementación de este controlador.

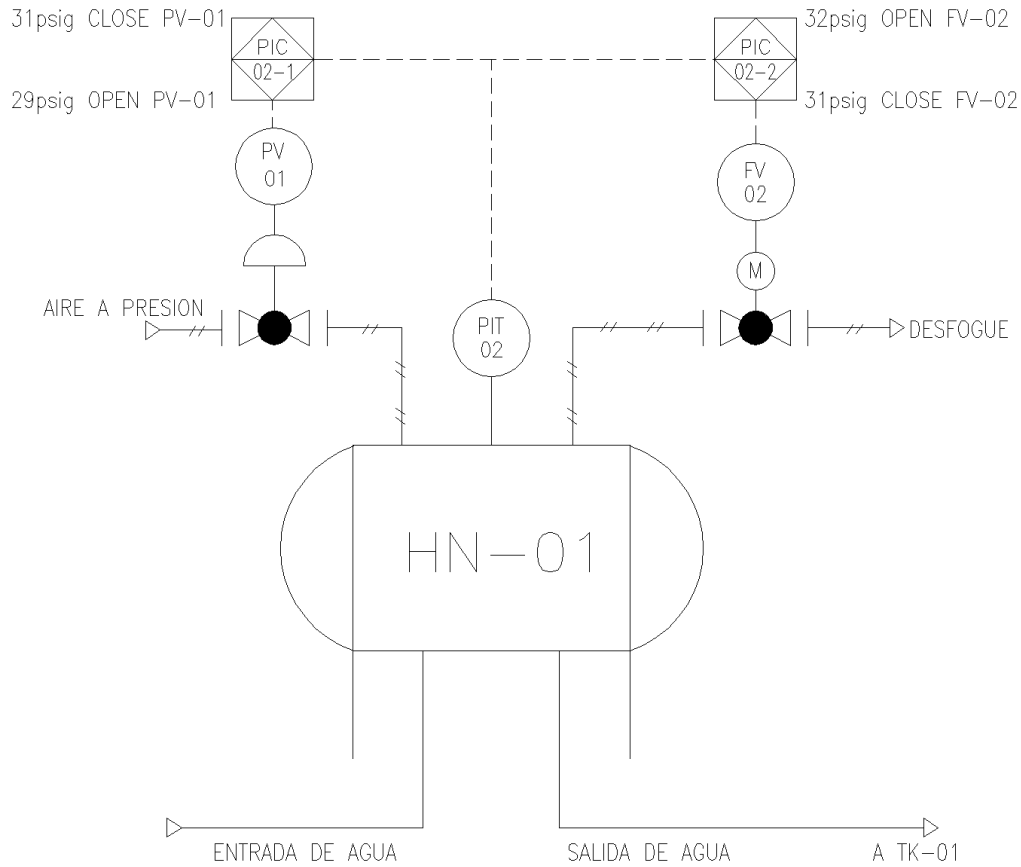


Figura 3-18.: Diagrama de operación del controlador ON-OFF de presión del tanque HN-01.

La gráfica **3-19** muestra la operación del controlador ON-OFF del tanque hidroneumático.

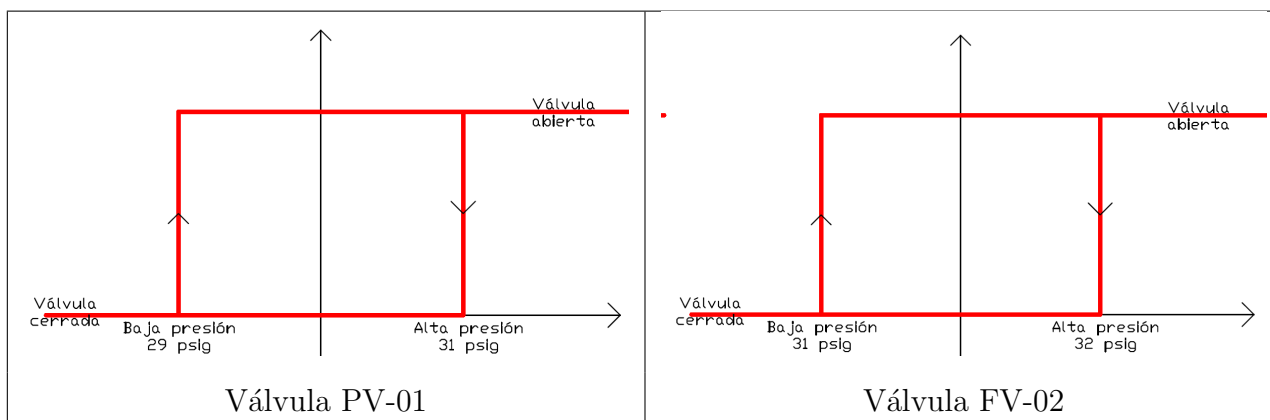


Figura 3-19.: Lazo de control ON-OFF de presión del tanque HN-01.

Para el caso mostrado en la figura **3-19**, el control trabaja de la siguiente manera:

- Setpoint 1: ajustado en 29 psig, abre la válvula PV-01.
- Setpoint 2: ajustado en 31 psig, cierra la válvula PV-01.
- Setpoint 3: ajustado en 31 psig, cierra la válvula FV-02.
- Setpoint 4: ajustado en 32 psig, abre la válvula FV-02.

3.4.10. Controlador de presión PID del tanque HN-01

En el controlador de presión tipo PID, este toma la misma variable de proceso, el transmisor PIT-02, pero el controlador PID actúa regulando la apertura de la válvula PV-01. La válvula FV-02 mantiene el mismo controlador ON-OFF del punto anterior, principalmente para evitar sobrepresión en el tanque HN-01. La gráfica **3-18** muestra el diagrama de proceso para la implementación de este controlador PID.

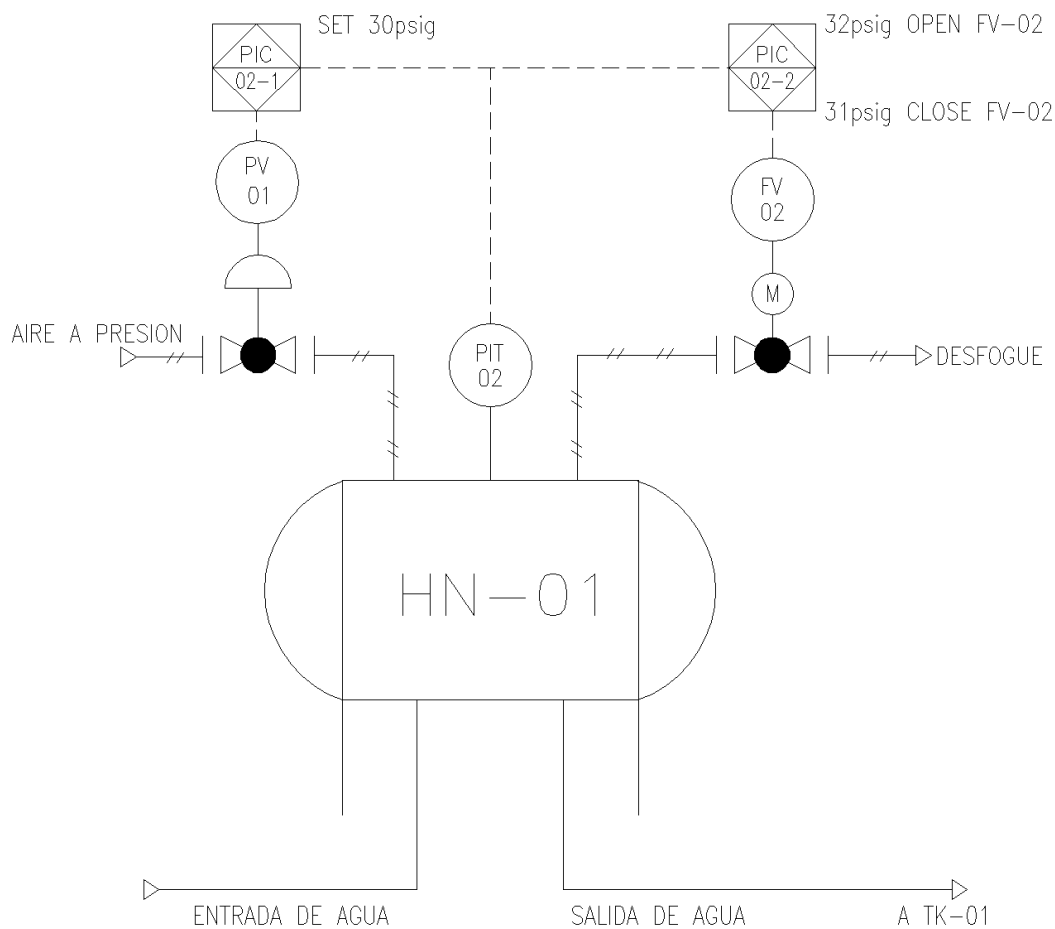


Figura 3-20.: Lazo de control del PID de presión del tanque HN-01.

3.4.11. Pruebas de funcionamiento del control de presión PIC-02

Se realizan cinco pruebas de desempeño para los dos controladores de presión. En estas pruebas se varían los setpoint de cada controlador, para luego analizar su comportamiento y escoger el de mejor desempeño. Los parámetros de presión para cada una de estas pruebas del controlador ON-OFF se muestran en la tabla 3-17 y las de controlador PID se muestran en la tabla 3-18.

La prueba 1, para el controlador ON-OFF, se pone a correr durante 5 minutos, con un flujo de entrada de agua de 50 l/min. La gráfica 3-21 muestra la señal del flujo de salida de aire del tanque tomada mediante el transmisor FIT-03, la señal de apertura de la válvula de salida de aire FV-02, la señal de presión del tanque tomada por el transmisor PIT-02 y la señal de apertura de la válvula de alimentación de aire comprimido PV-01.

| | Setpoint 1 (psig) | Setpoint 2 (psig) | Setpoint 3 (psig) | Setpoint 4 (psig) |
|----------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Prueba 1 | 24 | 25 | 26 | 27 |
| Prueba 2 | 24.5 | 25 | 25.5 | 26 |
| Prueba 3 | 24.5 | 25 | 25 | 25.5 |

Tabla 3-17.: Setpoint de presión usados para las pruebas del controlador ON-OFF

| | Setpoint 1 (psig) | Setpoint 3 (psig) | Setpoint 4 (psig) |
|----------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Prueba 4 | 25 | 26 | 27 |
| Prueba 5 | 25 | 25 | 25.5 |

Tabla 3-18.: Setpoint de presión usados para las pruebas del controlador PID

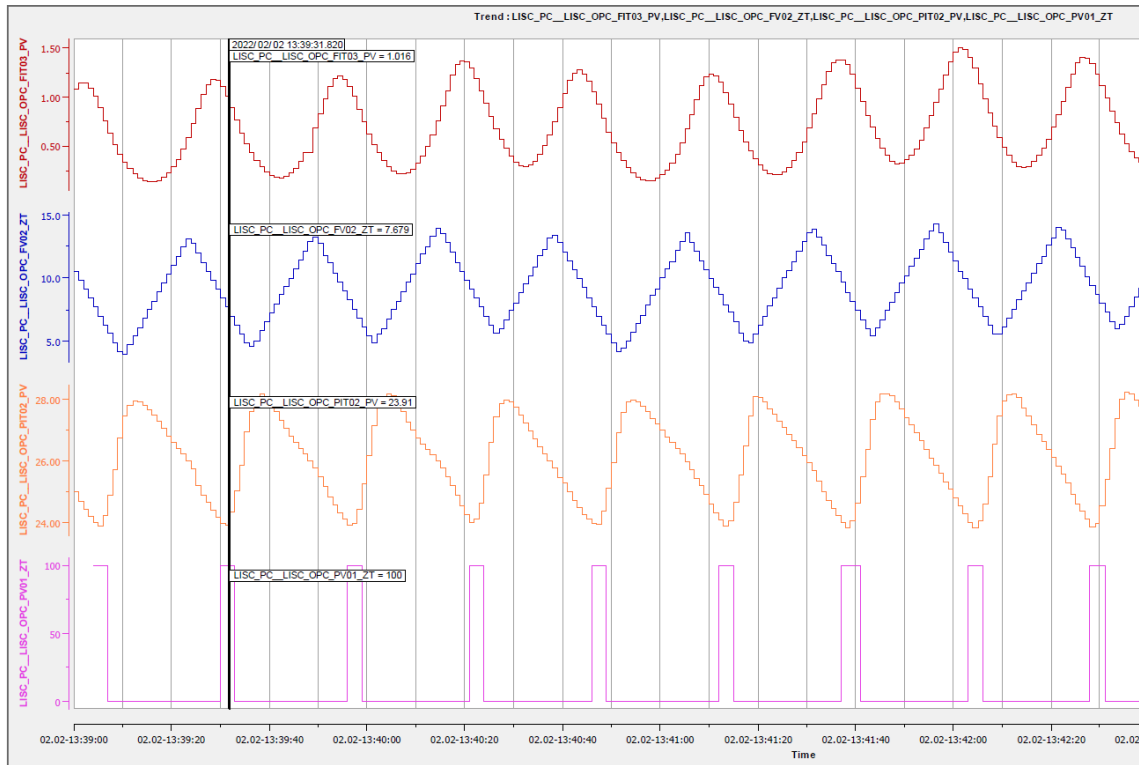


Figura 3-21.: Señales del lazo de presión con controlador ON-OFF para la prueba 1

La tabla 3-19 muestra los datos estadísticos de la prueba 1. Se extraen los valores de la presión del tanque hidroneumático (PIT-02), la apertura de las dos válvulas (PV-01 y FV-02), el flujo de entrada de agua (FIT-01) y el flujo de salida de aire (FIT-03).

| Señal | Promedio | Std Dev | Mínimo | Máximo |
|-------------------|----------|---------|--------|--------|
| PIT-02 (psig) | 26.1 | 1.4 | 23.8 | 28.2 |
| PV-01 (%Apertura) | 12.9 | 33.5 | 0.0 | 100.0 |
| FV-02 (%Apertura) | 9.54 | 2.71 | 3.87 | 14.70 |
| FIT-01 (l/min) | 50.0 | 1.3 | 46.3 | 51.9 |

Tabla 3-19.: Estadística de las señales de la prueba 1.

La prueba 2 se hace con las mismas condiciones que la prueba 1. La gráfica **3-22** muestra las señales obtenidas durante la prueba de 5 minutos de duración. Si se compara este caso con el de la prueba 1, el valor máximo de variación de la presión disminuye de 28 psig a 27 psig, pero hay un consumo de aire mayor porque la válvula FV-02 trabaja más abierta.

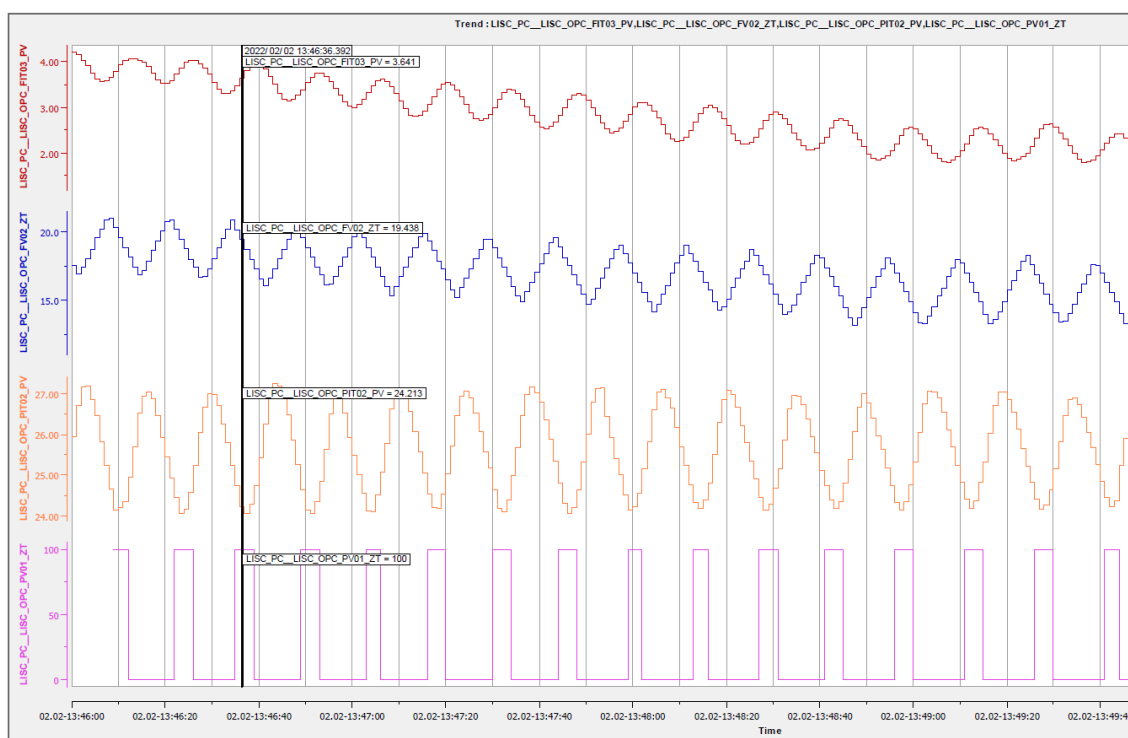


Figura 3-22.: Señales del lazo de presión con controlador ON-OFF para la prueba 2

La tabla **3-20** muestra los datos estadísticos de la prueba 2.

| Señal | Promedio | Std Dev | Mínimo | Máximo |
|-------------------|----------|---------|--------|--------|
| PIT-02 (psig) | 25.7 | 1.0 | 24.0 | 27.3 |
| PV-01 (%Apertura) | 25.9 | 43.8 | 0.00 | 100.0 |
| FV-02 (%Apertura) | 16.4 | 2.1 | 11.5 | 21.0 |
| FIT-01 (l/min) | 50.0 | 1.2 | 47.2 | 52.1 |

Tabla 3-20.: Estadística de las señales de la prueba 2.

La prueba 3 se hace con las mismas condiciones que la prueba 1. La gráfica **3-23** muestra las señales obtenidas para un tiempo de prueba de 5 minutos. Para este caso el rango de variación disminuye de la presión cambia de 24 a 26.5 psig, pero el consumo de aire aumenta debido a que la válvula de alimentación FV-01 permanece más tiempo abierta.

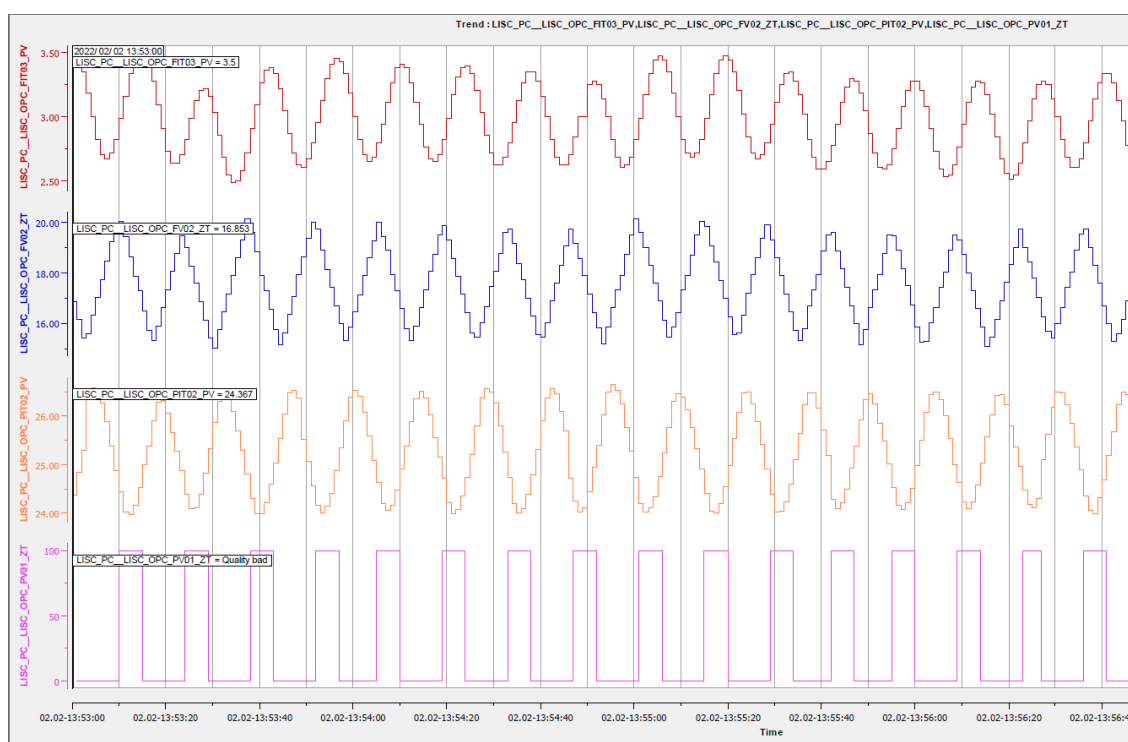


Figura 3-23.: Señales del lazo de presión con controlador ON-OFF para la prueba 3

La tabla **3-21** muestra los datos estadísticos de la prueba 3.

| Señal | Promedio | Std Dev | Mínimo | Máximo |
|-------------------|----------|---------|--------|--------|
| PIT-02 (psig) | 25.3 | 0.87 | 24.0 | 26.7 |
| PV-01 (%Apertura) | 34.9 | 47.7 | 0.0 | 100.0 |
| FV-02 (%Apertura) | 17.6 | 1.4 | 15.0 | 20.1 |
| FIT-01 (l/min) | 50.0 | 1.1 | 47.8 | 52.3 |

Tabla 3-21.: Estadística de las señales de la prueba 3.

La prueba 4 se hace con las mismas condiciones que la prueba 1, pero el controlador de la válvula cambia a uno de tipo PID. La gráfica **3-24** muestra las señales obtenidas para un tiempo de 5 minutos de duración de la prueba. Se observa una mejora en la presión del tanque ya que permanece aproximadamente en 25 psig y la válvula PV-01 no se abrió, lo que indica que no hubo consumo de aire.

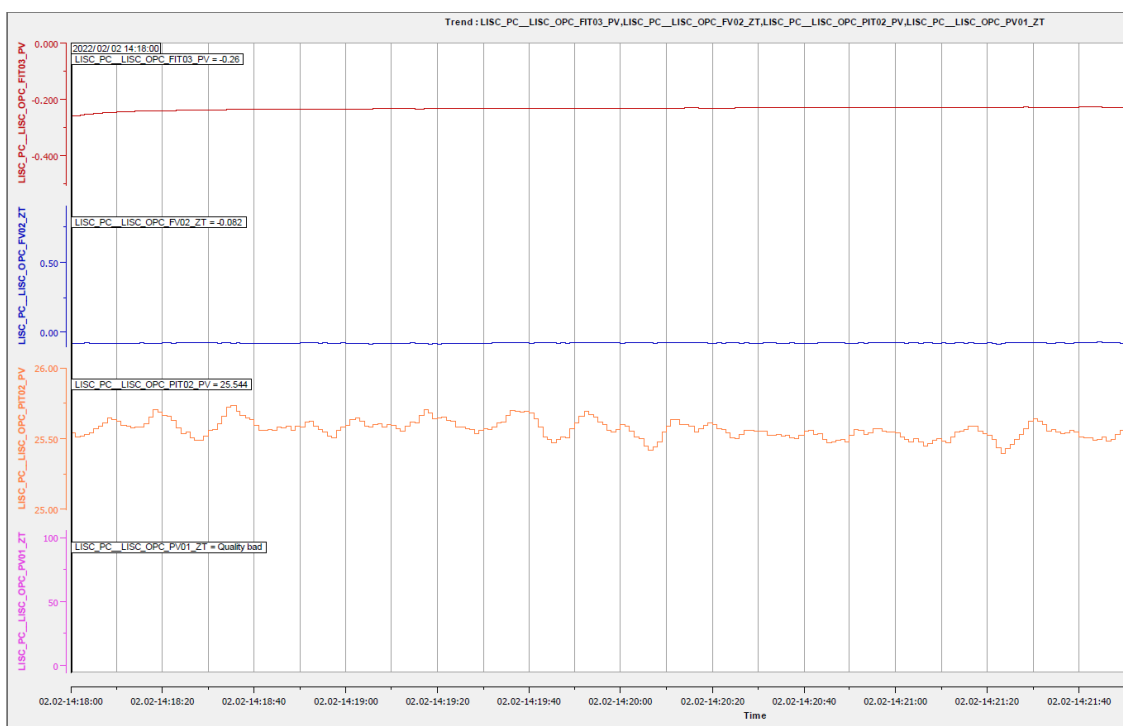


Figura 3-24.: Señales del lazo de presión con controlador PID para la prueba 4

La tabla **3-22** muestra los datos estadísticos de la prueba 4.

| Señal | Promedio | Std Dev | Mínimo | Máximo |
|-------------------|----------|---------|--------|--------|
| PIT-02 (psig) | 25.5 | 0.07 | 25.4 | 25.7 |
| PV-01 (%Apertura) | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| FV-02 (%Apertura) | -0.1 | 0.0 | -0.1 | -0.1 |
| FIT-01 (l/min) | 50.0 | 0.3 | 48.8 | 51.1 |

Tabla 3-22.: Estadística de las señales de la prueba 4.

Finalmente, en la prueba 5 se hace con las mismas condiciones que la prueba 4. La gráfica **3-25** muestra las señales obtenidas para un tiempo de 5 minutos de duración de la prueba. Se observa durante la prueba que al principio la presión permanece en 26 psig, pero una baja en la presión resulto en que la válvula PV-01 se abriera aumentando la presión y posteriormente haciendo que la válvula FV-02 se abriera también, perdiendo el control y haciendo que la presión oscilara. Debido a los rangos de ajuste tan cercanos y a la lentitud de la válvula FV-02.

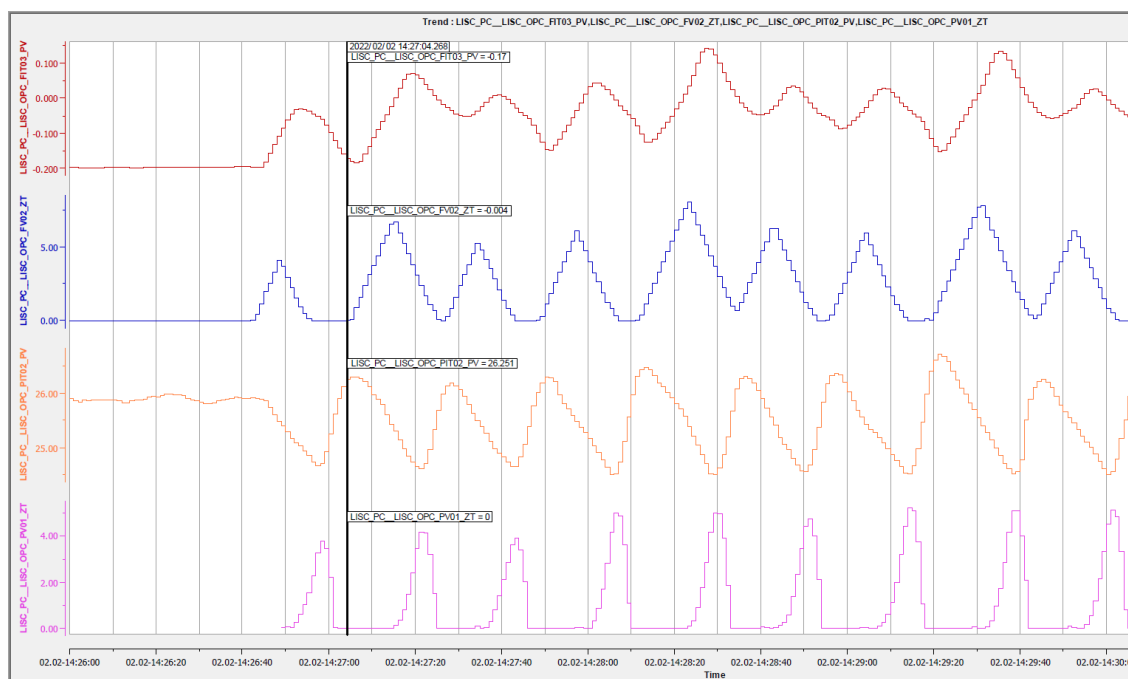


Figura 3-25.: Señales del lazo de presión con controlador PID para la prueba 5

La tabla **3-23** muestra los datos estadísticos de la prueba 5.

| Señal | Promedio | Std Dev | Mínimo | Máximo |
|-------------------|----------|---------|--------|--------|
| PIT-02 (psig) | 25.5 | 0.57 | 24.5 | 26.7 |
| PV-01 (%Apertura) | 1.1 | 1.6 | 0.00 | 5.2 |
| FV-02 (%Apertura) | 2.2 | 2.3 | -0.09 | 8.1 |
| FIT-01 (l/min) | 50.0 | 0.60 | 48.3 | 51.2 |

Tabla 3-23.: Estadística de las señales de la prueba 5.

El mejor desempeño se encuentra para la prueba 4, caso en el cual la válvula PV-01 es controlada por un PID con un set a 25 psig y la válvula FV-02 con un control ON-OFF, con set de apertura ajustado en 27 psig y un set de cierre de 26 psig. En esta prueba se obtiene la menor variación y el promedio de la presión esta es de 25.5 psig, 0.5 psig por encima de lo deseado. Además, las válvulas permanecieron cerradas y no hubo la necesidad de inyectar aire al tanque, solo con la presión generada por la bomba fue suficiente para mantener el flujo de salida del agua. Esta configuración de control es la elegida para la realización de las pruebas de los lazos de flujo.

Por medio de la aplicación Proficy CSense se mostró el desempeño de cada uno de los 3 lazos de flujo escogidos del laboratorio LISC. En estos análisis se expuso el consumo eléctrico del motor de la bomba, la eficiencia de la bomba y el rango de apertura de la válvula proporcional a las condiciones de flujo y presión seleccionadas. Se analizó también el comportamiento de la sintonización realizada a los 3 lazos de flujo, el lazo de nivel del tanque hidroneumático y el lazo de presión del mismo tanque que finalmente fue utilizado como carga para el estudio de los lazos de flujo.

4. Conclusiones

Este trabajo implementó un sistema MES, para recolectar y analizar datos de los lazos de flujo del laboratorio LISC, siguiendo recomendaciones del estándar ISA-95. Este sistema de control recolecta datos de los lazos en tiempo real con muestreos de un segundo para cada una de las señales analizadas. Esto permitió generar gráficas y análisis estadísticos de cada una de las señales historiadas, para mostrar el desempeño y la eficiencia de cada uno de los lazos analizados.

El uso de la aplicación Proficy CSsense sirvió para analizar el desempeño y evaluar la eficiencia energética del proceso, que en este caso fueron 3 lazos de flujo, el lazo de nivel y el lazo de presión del tanque hidroneumático. Mediante la aplicación se analizaron los indicadores del error y la variación en el flujo de cada uno de los lazos. También, se logró evaluar el desempeño de cada uno de los equipos de cada lazo, como por ejemplo, el consumo eléctrico del motor de la bomba, la eficiencia de la bomba y los rangos de operación de apertura de las válvulas proporcionales.

En los 3 lazos de flujo analizados la eficiencia de la bomba estuvo en el rango del 20 % al 50 %, lo que indica que la bomba casi nunca trabajó a más de la mitad de su capacidad total. Lo ideal es que las bombas centrifugas trabajen en un rango cercano de eficiencia al 85 %. Esto indica que la bomba estaría sobredimensionada para los rangos de flujo y de presión analizados en el laboratorio.

Todos los lazos de flujo analizados tuvieron buen desempeño, porque el flujo controlado siempre siguió a la referencia y el error promedio nunca se ubicó en más del 8 %. El error promedio más alto se obtuvo en el lazo FIC-12 ajustado en 40 l/min con un valor de 3.7 l/min. Cualquiera de los 3 lazos analizados sirven para la regulación del flujo para los rangos entre 40 l/min a 70 l/min.

El lazo de flujo con menor consumo eléctrico fue el lazo FIC-24. El valor promedio máximo fue 0.95 kW, cuando se ajustó para un flujo de 70 l/min y una presión del tanque hidroneumático de 25 psig. Esto a causa de no tener la restricción impuesta por la válvula. Este resultado es el lazo con el desempeño ideal ya que controla el flujo con un mínimo de error y tiene el mejor consumo eléctrico de los 3 lazos de flujo analizados.

En la implementación de la aplicación MES y tomando con referencia la arquitectura de los sistemas de control del estándar ISA-95, la distribución del tiempo empleado fue el siguiente: un 60 % para el nivel de la instrumentación, un 20 % para el nivel de control y un 30 % para la instalación y configuración de la aplicación MES y el historiador. Fue necesario disponer de un tiempo mayor en el ajuste y configuración de los instrumentos, para que los datos analizados fueran confiables y estuvieran dentro de los rangos de operación de los equipos de la planta.

Durante la implementación fue necesario ajustar los instrumentos de flujo y de presión a los rangos de trabajo de las válvulas y de la bomba de la planta. Los instrumentos de flujo se ajustaron de 0 a 150 l/min y los instrumentos de presión de 0 a 60 psig. También, fue necesario revisar los rangos de operación de la bomba y las válvulas proporcionales. Todos estos instrumentos y equipos finalmente se trabajaron y analizaron para rangos de flujo de 40 l/min a 70 l/min.

Las herramientas estadísticas del cálculo del promedio, variación, desviación estándar y valores mínimo y máximo fueron suficientes para el análisis del funcionamiento de los lazos de flujo. Las tablas mostradas con estos resultados estadísticos se generaron con la aplicación Proficy CSense. También, con Matlab se generaron estos mismos resultados, pero Matlab no tiene conexión directa con el historiador utilizado, necesitando de tiempo adicional para la descarga los datos almacenados en hojas de cálculo.

A. Anexo: Configuración de instrumentos y actuadores

En el siguiente anexo se hace una descripción de la configuración de cada uno de los instrumentos instalados en el laboratorio LISC.

A.1. Transmisores

A.1.1. Transmisor de flujo Vórtex FIT-01

El transmisor Vórtex mide el flujo de agua a la descarga de la bomba P-01. El principio de funcionamiento de este instrumento tipo Vórtex se basa en el efecto Von Karman donde un cuerpo en forma de cono genera alternativamente vórtices, áreas de baja presión e inestabilidad en el fluido, desfasados en 180 grados, cuya frecuencia es directamente proporcional a la velocidad del fluido que pasa por el instrumento [20] [21].

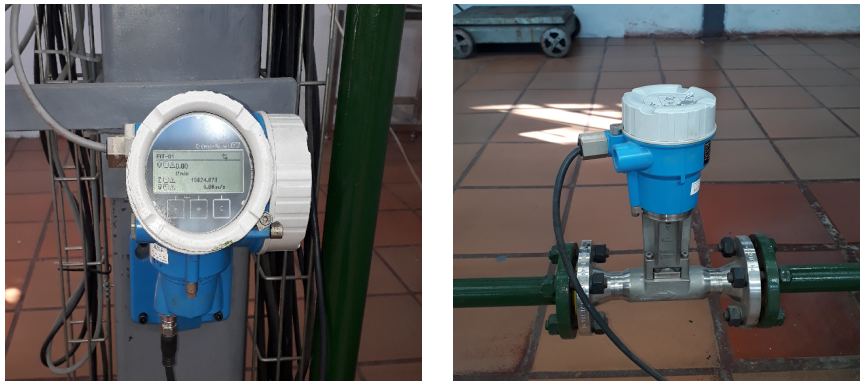


Figura A-1.: Transmisor de flujo FIT-01.

La referencia del instrumento y los parámetros configurados se muestran en las tablas **A-1** y **A-2**, respectivamente. El resto de los parámetros no se muestran en la tabla ya que se dejan los valores que vienen por defecto de fábrica, esto aplica también, para todos los transmisores descritos en este capítulo.

| | |
|------------|-------------------------|
| TAG | FIT-01 |
| Marca | Endress+Hauser |
| Referencia | PROWIRL200 7F2B25-4HH/0 |
| Serial | K400D916000 |
| Serial UN | 2332684 |

Tabla A-1.: Referencia del transmisor FIT-01.

| Menú | Parámetro | Valor |
|------------------|-----------------------|---------------|
| System Units | Volume flow unit | l/min |
| | Volume unit | m^3 |
| | Temperature unit | °C |
| | Velocity unit | m/s |
| Setup | Select medium | Liquid |
| Current output 1 | Assign current output | Volume flow |
| | Current span | 4-20mA Namur |
| | 4mA value | 0.000 l/min |
| | 20mA value | 150.000 l/min |
| | Failure mode | Max. |

Tabla A-2.: Parámetros de configuración transmisor FIT-01.

A.1.2. Transmisor de flujo ultrasónico FIT-02

El transmisor ultrasónico mide el flujo de agua a la salida de la válvula proporcional HV-01. Este instrumento mide el caudal por diferencia de velocidades del sonido al propagarse en el sentido del flujo del fluido y en el sentido contrario [20] [22]. Los sensores ultrasónicos están situados alrededor de la tubería y mediante el área y el perfil de velocidades, el transmisor hace el cálculo y lo acondiciona para entregar una señal de 4-20 mA proporcional al flujo que pasa por el instrumento.



Figura A-2.: Transmisor de flujo FIT-02.

La referencia del instrumento y los parámetros configurados se muestran en la tablas **A-3** y **A-4**, respectivamente.

| | |
|------------|-------------------------------------|
| TAG | FIT-02 |
| Marca | Endress+Hauser |
| Referencia | PROSONIC FLOW 92 92F25-DSKA1AEAB4AW |
| Serial | K3073E16000 |
| Serial UN | 2332687 |

Tabla A-3.: Referencia del transmisor de flujo FIT-02.

| Menú | Parámetro | Valor |
|-------|---------------------|-------------------|
| Setup | Unit type | Volume flow |
| | System units | Unit flow |
| | Unit flow | l/min |
| | Unit totalizer | 1 |
| | Assing LF-cutoff | Volume flow |
| | ON Value LF-Cutoff | 3.000 l/min |
| | OFF Value LF-Cutoff | 50 % |
| | Select output | Current output |
| | Current Span | 4-20mA Hart Namur |
| | 4mA value | 0.000 l/min |
| | 20mA value | 150.000 l/min |
| | Time constant | 5 s |
| | Failure mode | Max. |

Tabla A-4.: Parámetros de configuración transmisor FIT-02.

A.1.3. Transmisor de flujo magnético FIT-01B

Este instrumento mide el flujo de salida del tanque TK-02. Este medidor usa el principio de la ley de Faraday, que establece que la tensión inducida a través de cualquier conductor al moverse éste perpendicularmente a través de un campo magnético, es proporcional a la velocidad del conductor.

En el medidor magnético de caudal el conductor es el líquido y la tensión inducida es una señal generada por el transmisor, esta señal es captada por dos electrodos del transmisor rasantes con la superficie interior del tubo y que están ubicados diametralmente opuestos [20] [23]. Esta señal es convertida para que el transmisor entregue una señal de 4-20 mA proporcional al flujo que pasa por el medidor.



Figura A-3.: Transmisor de flujo magnético FIT-01B.

La referencia y los parámetros configurados para este instrumento se muestran en la tablas **A-5** y **A-6**, respectivamente.

| | |
|------------|-----------------------------|
| TAG | FIT-01B |
| Marca | Endress+Hauser |
| Referencia | PROMAG W 10W25-UR0A1AG2B1AA |
| Serial | K4000C16000 |
| Serial UN | 233686 |

Tabla A-5.: Referencia del transmisor FIT-01B.

| Menú | Parámetro | Valor |
|----------------|------------------|------------------|
| System Units | Volume flow unit | dm^3/m |
| | Volume unit | dm^3 |
| Current output | Current span | 4-20mA Hart |
| | 20mA value | $150.000 dm^3/m$ |
| | Time constant | 1 s |

Tabla A-6.: Parámetros de configuración transmisor FIT-01B.

A.1.4. Transmisor de nivel ultrasónico LIT-01

El transmisor de nivel ultrasónico LIT-01 mide el nivel del tanque TK-01 y está montado en la parte superior de este tanque. El principio básico de operación se basa en que el instrumento genera un pulso ultrasónico hacia abajo dentro del tanque. Este pulso, viaja a la velocidad del sonido y se refleja en la superficie del líquido, retornando al instrumento. El transmisor mide el tiempo de retraso entre el pulso transmitido y el pulso recibido para calcular la distancia entre el instrumento y la superficie del líquido [24].



Figura A-4.: Transmisor de nivel ultrasónico LIT-01.

Una vez el transmisor está programado con la referencia inferior del tanque, para este caso el fondo del tanque, el nivel del líquido es calculado por el microprocesador del transmisor. Este transmisor de nivel Endress+Hauser Prosonic es un instrumento de medición compacto que permite realizar mediciones continuas sin contacto con el líquido del tanque. El instrumento se configura para que mida el nivel del tanque TK-01 y su medición se ajuste a las características de este tanque. Los parámetros de configuración modificados se muestran en la tabla A-8.

| | |
|------------|-------------------------|
| TAG | LIT-01 |
| Marca | Endress+Hauser |
| Referencia | PROSONIC M FMU40-ANB2A4 |
| Serial | K3015C1509A |
| Serial UN | 2332685 |

Tabla A-7.: Referencia del transmisor LIT-01.

| Menú | Parámetro | Valor |
|---------------|-------------------|--------------|
| Basic setup | Tank shape | Dome ceiling |
| | Empty calibration | 1115 mm |
| | Blocking distance | 250 mm |
| | Full calibration | 800 mm |
| Linearisation | Customer unit | mm |
| | Max. scale | 800mm |
| Output | 4mA value | 0.0mm |
| | 20mA value | 800.0mm |

Tabla A-8.: Parámetros de configuración transmisor LIT-01.

A.1.5. Transmisor de nivel capacitivo LIT-02

El transmisor de nivel LIT-02 mide el nivel de agua del tanque TK-02 y usa el principio capacitivo. Un capacitor se forma cuando se instala un electrodo sensible al lo largo del tanque. Este electrodo actúa como una placa del capacitor y la pared del tanque actúa como la otra placa. A medida que cambia el nivel del liquido que rodea el electrodo, también varia la constante dieléctrica. Esta variación es usada por el instrumento para entregar una señal de 4 a 20mA en proporción al nivel del tanque [25].



Figura A-5.: Transmisor de nivel capacitivo LIT-02.

La referencia y los parámetros configurados para este instrumento se muestran en la tablas

A-9 y A-10, respectivamente.

| | |
|------------|------------------------------|
| TAG | LIT-02 |
| Marca | Endress+Hauser |
| Referencia | LIQUICAP M FMI52-A1ARDJA2C1A |
| Serial | K30053010F1 |
| Serial UN | 2332680 |

Tabla A-9.: Referencia del transmisor LIT-02.

| Menú | Parámetro | Valor |
|---------------|-------------------|--------------|
| Basic setup | Tank shape | Dome ceiling |
| | Empty calibration | 1115 mm |
| | Blocking distance | 250 mm |
| | Full calibration | 800 mm |
| Linearisation | Customer unit | mm |
| | Max. scale | 1000mm |
| Output | 4mA value | 0.0mm |
| | 20mA value | 800.0mm |

Tabla A-10.: Parámetros de configuración transmisor LIT-02.

A.1.6. Transmisor de presión diferencial PDIT-01

El transmisor PDIT-01 mide el nivel del tanque hidroneumático HN-01. Este instrumento usa el principio de presión diferencial para calcular el nivel. El instrumento está conectado al tanque mediante dos boquillas una ubicada a 500 mm y la otra a 700 mm medidos desde el fondo del tanque. En normal funcionamiento el nivel del tanque estará entre las dos boquillas de tal manera que la boquilla inferior mida la presión hidrostática del agua más la presión interna del tanque y la boquilla superior solo mida la presión interna del tanque [26]. Esta diferencia de presión es tomada por el transmisor y convertida a una señal de salida de 4-20 mA proporcional al nivel del tanque.



Figura A-6.: Transmisor de nivel PDIT-01.

La referencia y los parámetros configurados para este instrumento se muestran en la tablas **A-11** y **A-12**, respectivamente.

| | |
|------------|--------------------|
| TAG | PDIT-01 |
| Marca | Endress+Hauser |
| Referencia | FMD78-AAA7L31TC1AA |
| Serial | K301A71509D |
| Serial UN | 2332692 |

Tabla A-11.: Referencia del transmisor PDIT-01.

| Menú | Parámetro | Valor |
|-------------|-------------------|-----------------|
| Quick setup | Measuring mode | Level selection |
| | Pos. zero adjust | |
| | Empty calibration | |
| | Full calibration | |
| | Damping value | |

Tabla A-12.: Parámetros de configuración transmisor PDIT-01.

A.1.7. Transmisor de presión manométrica PIT-01

La presión de descarga de la bomba P-01 es medida por el transmisor PIT-01. Los instrumentos de presión manométrica usan una membrana o celda que consta de un material eléctricamente conductor al cual se le aplica un sustrato de cerámica para formar un capacitor, a medida que se aplica presión, esta membrana se deforma provocando cambios en la capacitancia. Esta membrana tiene un orificio para compensar la presión atmosférica y así poder entregar una señal acondicionada de 4-20 mA proporcional a la presión manométrica interna de la tubería [27].



Figura A-7.: Transmisor de presión PIT-01.

La referencia y los parámetros configurados para este instrumento se muestran en la tablas A-13 y A-14, respectivamente.

| | |
|------------|-----------------------|
| TAG | PIT-01 |
| Marca | Endress+Hauser |
| Referencia | CERABAR M PMP51-1UEL8 |
| Serial | K300F515129 |
| Serial UN | 2332691 |

Tabla A-13.: Referencia del transmisor PIT-01.

| Menú | Parámetro | Valor |
|-------|----------------|----------|
| Setup | Measuring mode | Pressure |
| | Pressure unit | bar |
| | LRV | 0.000 |
| | URV | 100.000 |
| | Damping value | 2.0 s |

Tabla A-14.: Parámetros de configuración transmisor PIT-01.

A.1.8. Transmisor de presión manométrica PIT-02

La presión interna del tanque hidrostático HN-01 es medida por el transmisor PIT-02. Este instrumento usa el mismo principio de operación que el PIT-01 ya que son de la misma familia Cerabar Endress+Hauser.



Figura A-8.: Transmisor de presión PIT-02.

La referencia y los parámetros configurados para este instrumento se muestran en la tablas A-15 y A-16, respectivamente.

| | |
|------------|----------------------|
| TAG | PIT-02 |
| Marca | Endress+Hauser |
| Referencia | CERABAR M PMC51-FE72 |
| Serial | K3008815128 |
| Serial UN | 2332690 |

Tabla A-15.: Referencia del transmisor PIT-02.

| Menú | Parámetro | Valor |
|-------|----------------|----------|
| Setup | Measuring mode | Pressure |
| | Pressure unit | bar |
| | LRV | 0.000 |
| | URV | 150.000 |
| | Damping value | 2.0 s |

Tabla A-16.: Parámetros de configuración transmisor PIT-02.

A.1.9. Transmisor de temperatura TT-01.

Este transmisor mide la temperatura del agua a la salida del intercambiador HT-01. La medida de temperatura que utiliza sondas RTD depende de la variación de la resistencia en función de la temperatura. El sensor de temperatura consiste de en un arrollamiento de hilo muy fino del conductor bobinado entre capas de material aislante y protegido con un revestimiento de vidrio o de cerámica. El material que forma el conductor, platino para este caso, se caracteriza por su coeficiente de temperatura, que indica la variación de la resistencia en ohmios del conductor por cada grado que cambia su temperatura [20].

Todos los transmisores de temperatura instalados en la planta son de tipo RTD y tienen el mismo principio de operación explicado anteriormente.



Figura A-9.: Transmisor de presión TT-01.

La referencia y los parámetros configurados para este instrumento se muestran en la tablas **A-17** y **A-18**, respectivamente.

| | |
|------------|--------------------|
| TAG | TT-01 |
| Marca | Endress+Hauser |
| Referencia | TR10-ACA1CDS5H3000 |
| Serial | K30BDC23152 |
| Serial UN | 233694 |

Tabla A-17.: Referencia del transmisor TT-01

| Menú | Parámetro | Valor |
|--------|------------|--------|
| Output | 4mA value | 0.000 |
| | 20mA value | 80.000 |

Tabla A-18.: Parámetros de configuración transmisor TT-01.

A.1.10. Transmisor de temperatura TT-02, TT-03 y TT-04

Los transmisores TT-02, TT-03 y TT-04 están asociados al intercambiador de calor HT-01. El transmisor TT-02 mide la temperatura a la entrada del intercambiador, el TT-03 a la salida del intercambiador y el TT-04 mide la temperatura interna del intercambiador. Todos estos transmisores de temperatura tienen señal de salida de 4-20 mA y pertenecen a la misma marca, tienen la misma referencia y vienen configurados de fábrica con los parámetros expuestos en la tabla A-20.



Figura A-10.: Transmisores de temperatura del intercambiador HT-01.

| | |
|----------------|--------------------|
| TAG | TT-02/TT-03/TT-04 |
| Marca | Pixsys Electronics |
| Referencia | 2000.35.015 |
| Tipo de sensor | RTD PT100 3 hilos |

Tabla A-19.: Referencia del transmisor TT-02

| Menú | Parámetro | Valor |
|--------|------------|--------|
| Output | 4mA value | 0.000 |
| | 20mA value | 80.000 |

Tabla A-20.: Parámetros de configuración transmisor TT-02.

A.2. Válvulas neumáticas proporcionales

El laboratorio LISC tiene 5 válvulas proporcionales neumáticas marca Fisher [28]. Todas estas válvulas están conectadas a la red de aire comprimido del edificio. Cada señal de control de estas válvulas esta conectada al módulo de salidas analógicas del PLC mediante protocolo 4-20 mA Hart.

A.2.1. Válvula FV-01

Esta válvula esta en la salida del intercambiador de calor HT-01. la tabla **A-21** muestra la referencia y las características más importantes de la válvula.



Figura A-11.: Válvula neumática proporcional FV-01.

| | |
|------------------|---------------|
| Serial | F000542010 |
| Serial UN | 2298814 |
| Tamaño | 1-1/2" |
| Tipo de falla | Fail Open |
| Tipo Trim | Equal Percent |
| Señal de entrada | 4-20 mA |

Tabla A-21.: Características de la válvula FV-01.

A.2.2. Válvula HV-01

Esta válvula está conectada a la descarga del bomba P-01, la tabla **A-22** muestra la referencia y las características más importantes de esta válvula.



Figura A-12.: Válvula neumática proporcional HV-01.

| | |
|------------------|---------------|
| Ref. válvula | 24000CVF |
| Serial | F000542008 |
| Serial UN | 2298813 |
| Tamaño | 1-1/2" |
| Tipo de falla | Fail Open |
| Tipo Trim | Equal Percent |
| Señal de entrada | 4-20 mA |

Tabla A-22.: Características de la válvula HV-01.

A.2.3. Válvula NV-01

Esta válvula está instalada en la salida del tanque hidroneumático HN-01. Su función principal es controlar el nivel del tanque hidrostático. La tabla **A-23** muestra la referencia y las características más importantes de la válvula.



Figura A-13.: Válvula neumática proporcional NV-01.

| | |
|------------------|---------------|
| Ref. válvula | 24548CVF |
| Serial | F000542011 |
| Serial UN | 2298811 |
| Tamaño | 1" |
| Tipo de falla | Fail Open |
| Tipo Trim | Equal Percent |
| Señal de entrada | 4-20 mA |

Tabla A-23.: Características de la válvula NV-01.

A.2.4. Válvula PCV-01

Esta válvula está instalada a la entrada del intercambiador de calor HT-01. La tabla **A-24** muestra la referencia y las características más importantes de la válvula.



Figura A-14.: Válvula neumática proporcional PCV-01.

| | |
|------------------|---------------|
| Ref. válvula | 24577CVF |
| Serial | F000519595 |
| Serial UN | 2298812 |
| Tamaño | 1" |
| Tipo de falla | Fail Open |
| Tipo Trim | Equal Percent |
| Señal de entrada | 4-20 mA |

Tabla A-24.: Características de la válvula PCV-01.

A.2.5. Válvula PV-01

Esta válvula está instalada a la entrada del tanque HN-01, su función principal es controlar la presión del tanque HN-01. La tabla **A-25** muestra la referencia y las características más importantes de la válvula.

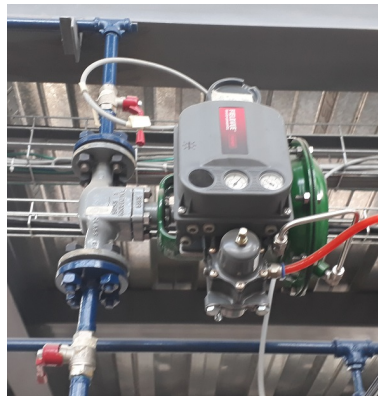


Figura A-15.: Válvula neumática proporcional PV-01.

| | |
|------------------|---------------|
| Ref. válvula | 24577CVF |
| Serial | F000542007 |
| Serial UN | 2298809 |
| Tamaño | 1/2" |
| Tipo de falla | Fail Open |
| Tipo Trim | Equal Percent |
| Señal de entrada | 4-20 mA |

Tabla A-25.: Características de la válvula PV-01.

A.3. Válvulas motorizadas proporcionales

El laboratorio cuenta con 4 válvulas de globo con actuador motorizado marca Belimo [29]. Cada válvula tiene una señal de entrada para su control de 2 a 10 VDC y una señal de salida que es proporcional a la apertura de la válvula de 2 a 10 voltios, en donde 2 voltios indica que la válvula está totalmente cerrada y 10 voltios para indicar que la válvula está totalmente abierta. Además el actuador de estas válvulas requieren ser alimentadas con un voltaje de 24 VDC.

A.3.1. Válvula motorizada FV-02

Esta válvula está instalada a la salida del tanque hidroneumático HN-01, su función principal es controlar el aire de salida del tanque HN-01. la tabla **A-26** muestra la referencia y las características más importantes de la válvula.



Figura A-16.: Válvula neumática proporcional FV-02.

| | |
|------------------|----------------|
| Ref. válvula | 24548CVF |
| Ref. actuador | NVF24-MFT-E-75 |
| Serial UN | 2298816 |
| Tamaño | 1/2" |
| Tipo de falla | Fail Closed |
| Tipo Trim | Equal Percent |
| Señal de entrada | 2-10 VDC |
| Señal de salida | 2-10 VDC |

Tabla A-26.: Características de la válvula FV-02.

A.3.2. Válvula motorizada FV-03

Esta válvula está a la salida del tanque TK-01. las tabla **A-27** muestra la referencia y las características más importantes de la válvula.



Figura A-17.: Válvula neumática proporcional FV-03.

| | |
|------------------|----------------|
| Ref. válvula | 24548CVF |
| Ref. actuador | NVF24-MFT-E-75 |
| Serial UN | 2298810 |
| Tamaño | 2" |
| Tipo de falla | Fail Closed |
| Tipo Trim | Equal Percent |
| Señal de entrada | 2-10 VDC |
| Señal de salida | 2-10 VDC |

Tabla A-27.: Características de la válvula FV-03.

A.3.3. Válvula motorizada LV-01

Esta válvula está instalada a la entrada del tanque TK-01. las tabla **A-28** muestra la referencia y las características más importantes de la válvula.



Figura A-18.: Válvula neumática proporcional LV-01.

| | |
|------------------|----------------|
| Ref. válvula | 24548CVF |
| Ref. actuador | NVF24-MFT-E-50 |
| Serial UN | 2298815 |
| Tamaño | 1/2" |
| Tipo de falla | Fail Closed |
| Tipo Trim | Equal Percent |
| Señal de entrada | 2-10 VDC |
| Señal de salida | 2-10 VDC |

Tabla A-28.: Características de la válvula LV-01.

A.3.4. Válvula motorizada LV-02

Esta válvula está a la entrada del tanque TK-02. Su función principal es controlar el suministro de agua a toda la planta LISC. La tabla **A-29** muestra la referencia y las características más importantes de la válvula.



Figura A-19.: Válvula neumática proporcional LV-02.

| | |
|------------------|----------------|
| Ref. válvula | 24548CVF |
| Ref. actuador | NVF24-MFT-E-50 |
| Serial UN | 2298817 |
| Tamaño | 1/2" |
| Tipo de falla | Fail Closed |
| Tipo Trim | Equal Percent |
| Señal de entrada | 2-10 VDC |
| Señal de salida | 2-10 VDC |

Tabla A-29.: Características de la válvula LV-02.

A.4. Bomba centrífuga P-01

La bomba centrífuga toma el agua del tanque TK-01 y lo impulsa al tanque TK-02, al tanque hidrostático HN-01 o al intercambiador de calor HT-01; dependiendo de la alineación de las válvulas manuales de la planta. La bomba es de la marca Pedrollo de referencia CP620, la cual maneja un caudal de 10 l/min, con una cabeza de 35 metros, hasta un caudal de 100 l/min con una cabeza de 19 metros.

La bomba trabaja con un motor jaula de ardilla trifásico de 0.75kW configurado en conexión triángulo para trabajar a un voltaje de 220VAC [30]. La tabla muestra las características de la bomba.



Figura A-20.: Bomba centrífuga P-01.

| | |
|----------------------|----------------|
| Marca | PEDROLLO |
| Referencia | CP 620 |
| Caudal | 10 a 100 l/min |
| Cabeza | 35 a 19 metros |
| Potencia | 0.75 kW |
| Frecuencia | 60 Hz |
| Velocidad nominal | 3450 rpm |
| Voltaje de operación | 220 VAC |
| Corriente nominal | 4.2 A |

Tabla A-30.: Características de la bomba P-01.

El motor de la bomba se conecta a un variador de frecuencia como se muestra en los planos eléctricos, que se encuentra en el anexo E de este documento y como se referencia en su hoja de datos [31].



Figura A-21.: Variador de frecuencia de la bomba P-01.

El variador de frecuencia y el PLC están conectados por medio del protocolo Ethernet IP, como se muestra en la arquitectura de control del anexo E. Este protocolo de comunicación industrial es usado principalmente por los equipos de la marca Allen Bradley para comunicarse entre ellos.

| | |
|----------------------------|---------------|
| Marca | Allen-Bradley |
| Familia | PowerFlex 70 |
| Referencia | 4P2A0AYNNNC0 |
| Potencia | 1 HP |
| Frecuencia | 60 Hz |
| Rango voltaje de entrada | 180-264VAC |
| Rango voltaje de entrada | 0-230VAC |
| Rango frecuencia de salida | 0-400 Hz |
| Frecuencia | 60 Hz |
| Corriente nominal | 4.2 A |

Tabla A-31.: Características del variador de la bomba P-01.

B. Anexo: Configuración del sistema de control de la planta

El sistema de control y monitoreo de la planta esta compuesto por los instrumentos y actuadores mencionados en el anexo A, un PLC, dos pantallas de 6" Allen-Bradley y un sistema de supervisión de la marca General Electric instalado en el computador de la planta. Además, en el mismo computador se instalan el historiador de datos y el OPC.

Todos los instrumentos, válvulas proporcionales y el variador de la bomba están conectados al PLC como lo muestra la arquitectura de control mostrada en el anexo E. Los instrumentos están conectados al PLC mediante protocolo 4-20 mA Hart, las válvulas neumáticas mediante señal análoga 4-20 mA, las válvulas motorizadas con señal de 2-10 VDC y el variador de la bomba esta comunicado mediante protocolo Ethernet IP.

B.1. Configuración del controlador

El PLC de la planta esta compuesto por un Rack, en donde esta instalada la CPU, la tarjeta de comunicación Ethernet y las tarjetas análogas y digitales. La tabla B-1 muestra la disposición de las tarjetas en el Rack del PLC.



Figura B-1.: PLC Allen Bradley de la planta LISC.

| Módulo | Referencia | Descripción |
|--------|------------|--------------------------------------|
| 0 | 1756-L71 | CPU del PLC |
| 1 | MVI56I-MCM | Tarjeta de comunicaciones Ethernet |
| 2 | 1756-EN2T | Tarjeta de comunicaciones Modbus RTU |
| 3 | 1756-IF8H | Módulo de 8 entradas análogas Hart |
| 4 | 1756-IF8H | Módulo de 8 entradas análogas Hart |
| 5 | 1756-OF8H | Módulo de 8 salidas análogas Hart |
| 6 | 1756-OF8H | Módulo de 8 salidas análogas Hart |
| 7 | 1756-IB16 | Módulo de 16 entradas digitales |
| 8 | 1756-OB16I | Módulo de 16 salidas digitales |

Tabla B-1.: Disposición tarjetas del PLC.

B.1.1. Configuración de los canales análogos en corriente

La tabla **B-2**, muestra la configuración de cada uno de los canales de las tarjetas análogas del PLC para las señales en corriente de 4-20 mA. Esta configuración se hace con ayuda del programador Studio 5000 de Allen Bradley.

| Parámetro | Valor |
|--------------------------|--------------|
| Input Range | 4 mA to 20mA |
| Sensor Offset | 0.0000 |
| Scaling High Signal | 20.0000 |
| Scaling Low Signal | 4.0000 |
| Scaling High Engineering | 20.0000 |
| Scaling Low Engineering | 4.0000 |

Tabla B-2.: Configuración canales análogos 4-20 mA.

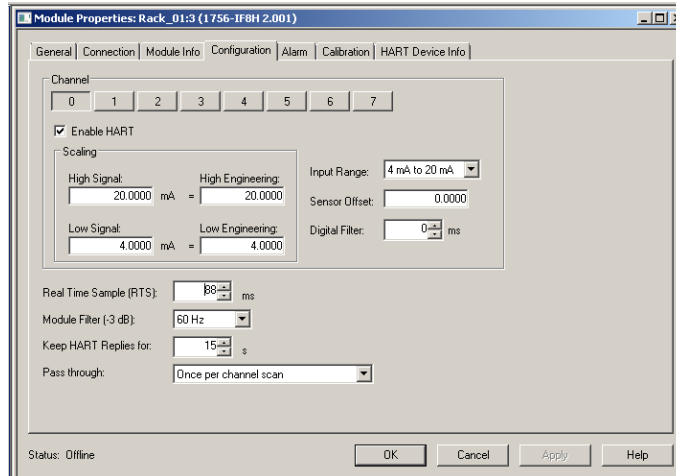


Figura B-2.: Configuración canales analógicos de corriente en Studio 5000.

B.1.2. Configuración de los canales analógicos en voltaje

La tabla **B-3**, muestra la configuración de cada uno de los canales de las tarjetas analógicas del PLC para las señales en voltaje de 0-10 VDC.

| Parámetro | Valor |
|--------------------------|-----------|
| Input Range | 0V to 10V |
| Sensor Offset | 0.0000 |
| Scaling High Signal | 10.0000 |
| Scaling Low Signal | 0.000 |
| Scaling High Engineering | 10.0000 |
| Scaling Low Engineering | 0.0000 |

Tabla B-3.: Configuración canales analógicos 0-10 VDC.

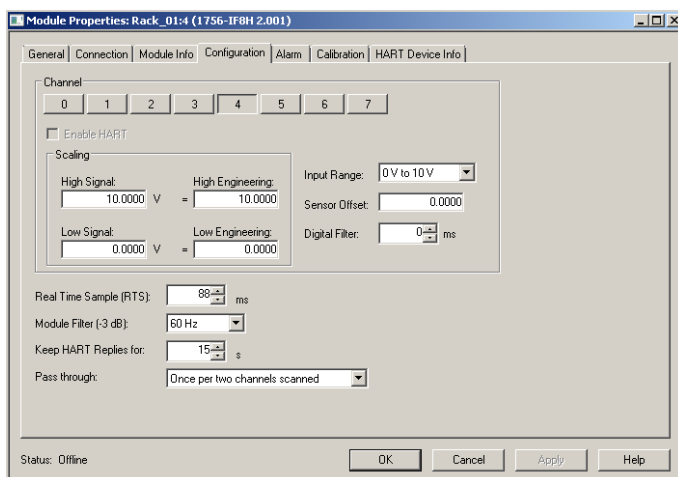


Figura B-3.: Configuración canales analógicos de voltaje en Studio 5000.

B.2. Programación del PLC

Mediante el programador Studio 5000 se programan el PLC y las pantallas de 6" de la planta LISC. El programa del PLC consta de 2 tareas, una para el control general llamada Main-Task y otra tarea en donde se ubican los bloques de control PID llamada PID_Control_Task.

La tarea principal consta de 12 rutinas, estas son:

- MainRoutine: es la rutina principal de esta tarea e invoca todas las subrutinas programadas en esta tarea.
- A_Inputs_Analog: esta rutina lee el valor de cada una de las entrada análogas del PLC. También escala el valor leído de 4-20mA al valor de proceso correspondiente y lo almacena en variables de tipo real.
- A_Inputs_Digital: esta rutina lee el estado de las entradas digitales del PLC y la almacena en variables de tipo booleana.
- A_Alarm_Analog: esta rutina tiene la lógica de ajuste y activación de las alarmas asociadas a los instrumentos que entregan señal análoga.
- C_Alarm_Digital: esta rutina tiene la lógica de activación de las alarmas provenientes de señales digitales.
- D_Trips: contiene la lógica de activación de los disparos de la planta según la tabla de interlock.
- E_Control_HMI: lógica de control necesaria para la operación de la HMI.

- E_Control_P001: contiene la lógica de control de la bomba P-001.
- E_Control_PIC02: esta rutina tiene programada un control de tipo ON-OFF para el control de la presión en el tanque hidrostático.
- E_Control_Valves: tiene la lógica de operación de las válvulas proporcionales de la planta.
- F_Outputs_Analog: en esta rutina se ajustan cada una de las salidas análogas al resultado de las instrucciones de control programadas en el PLC.

La tarea PID_Control_Task contiene todas las rutinas de los lazos PID, estas son:

- MainRoutine: es la rutina principal de esta tarea e invoca todas las subrutinas programadas en esta tarea.
- Flujos: contiene los lazos de control PID de flujo.
- Niveles: contiene los lazos de control PID de nivel.
- PIC02: contiene los lazos de control PID de presión para el tanque hidrostático HN-01.

B.3. Alarmas e interlocks de la planta

Para tener una operación segura de la planta, se hace necesario programar las alarmas expuestas en la tabla de interlock, Tabla B-4. En esta se muestra la señal que causa la alarma y las acciones de control que se ejecutan cuando ocurre la alarma.

| Interlock | Causa | Set | Acciones |
|-----------|--|--------|--------------|
| I1 | ESD-01 Paro de emergencia | — | Apagar P-01 |
| | LAHH-01 Muy alto nivel tanque TK-01 | 750mm | Abrir HV-01 |
| | LAHH-02 Muy alto nivel tanque TK-02 | 750mm | Cerrar PV-01 |
| | PAHH-01 Muy alta presión descarga bomba P-01 | 55psig | Cerrar NV-01 |
| | PAHH-02 Muy alta presión tanque HN-01 | 60psig | Cerrar NV-01 |
| | PDALL-01 Muy bajo nivel tanque HN-01 | 5 % | Cerrar LV-01 |
| | PDAHH-01 Muy alto nivel presión tanque HN-01 | 85 % | Cerrar LV-02 |
| I2 | LALL-01 Muy bajo nivel tanque TK-01 | 200mm | Apagar P-01 |

Tabla B-4.: Tabla de interlock.

A continuación se justifica la razón de programar cada alarma de la tabla de interlock.

- ESD-01: Es un botón de paro de emergencia ubicado en el centro de la planta. Se activa de forma manual en caso de ser necesario parar la planta.
- LAHH-01: Esta alarma es activada por el transmisor de nivel LIT-01, cuando el nivel del tanque sobrepasa los 750 mm. La función es evitar que el tanque TK-01 se siga llenado y evitar que el nivel desborde el tanque.
- LAHH-02: Esta alarma es activada por el transmisor de nivel LIT-02, cuando el nivel del tanque sobrepasa los 750 mm. La función es evitar que el tanque TK-02 se siga llenado y evitar que el nivel desborde el tanque.
- PAHH-01: esta alarma la genera el transmisor de presión PIT-01, protege la bomba y la tubería de descarga en caso de sobrepresión en esta línea.
- PAHH-02: esta alarma la genera el transmisor de presión PIT-02, protege de sobrepresión en el tanque hidroneumático. Esta coordinada a 5 psig por encima de la activación de la alarma PAHH-01.
- PDALL-01: la alarma es generada por el transmisor de presión diferencial PDIT-01, configurado para medir el nivel del tanque HN-01. Se activa cuando el nivel del tanque es inferior al 5 %, para evitar que en la salida del tanque circule aire a presión y se produzcan golpes de ariete en esta línea.
- PDAHH-01: esta alarma es generada por el transmisor PDIT-01 cuando el nivel del tanque supera el 85 % de su nivel. Evita sobrellenado y sobrepresión en el tanque hidrostático HN-01.
- LALL-01: Esta alarma es activada por el transmisor de nivel LIT-01, cuando el nivel del tanque es inferior a 200 mm. La función es evitar que la bomba P-01 trabaje en vacío.

La tabla **B-5** contiene las alarmas que no tienen ninguna acción de control, estas solo tienen indicación visual en la HMI para alertar al operador en caso de que la planta se desvíe de sus condiciones normales de operación.

| Instrumento | Alarma | Set | Descripción |
|-------------|---------|--------|----------------------------------|
| LIT-01 | LAH-01 | 700mm | Alto nivel tanque TK-01 |
| | LAL-01 | 250mm | Bajo nivel tanque TK-01 |
| LIT-02 | LAH-02 | 700mm | Alto nivel tanque TK-02 |
| PDIT-01 | PDAH-01 | 80 % | Alto nivel tanque HN-01 |
| | PDAL-01 | 10 % | Bajo nivel tanque HN-01 |
| PIT-01 | PDAH-01 | 50psig | Alta presión descarga bomba P-01 |
| PIT-02 | PDAH-02 | 55psig | Alta presión tanque HN-01 |

Tabla B-5.: Alarmas de la planta.

B.4. Programación de las pantallas

La planta LISC tiene dos pantallas Allen-Bradley PanelView Plus 600. Estas se programan para monitorear todos los transmisores, válvulas y bomba centrífuga instalados en la planta. También tiene una pantalla dedicada a la visualización de alarmas activas. Las pantallas se comunican mediante protocolo Ethernet IP con el PLC de la planta. A continuación se hace una breve descripción de las pantallas programadas.

B.4.1. Pantalla transmisores

Esta pantalla se programa para ver el valor medido por cada instrumento. Dando clic sobre el instrumento de interés se puede acceder al valor medido, al valor de la señal de 4-20 mA y a los valores de escalamiento del respectivo transmisor. La figura B-4 muestra la pantalla para acceder al instrumento y la pantalla del transmisor.



Figura B-4.: Pantalla de instrumentos.

B.4.2. Pantalla válvulas

Se programa una pantalla similar a la anterior para el monitoreo de las válvulas proporcionales, en la cual se abre el detalle de cada válvula y que permite la operación manual o automático y ver el porcentaje de apertura de la respectiva válvula.

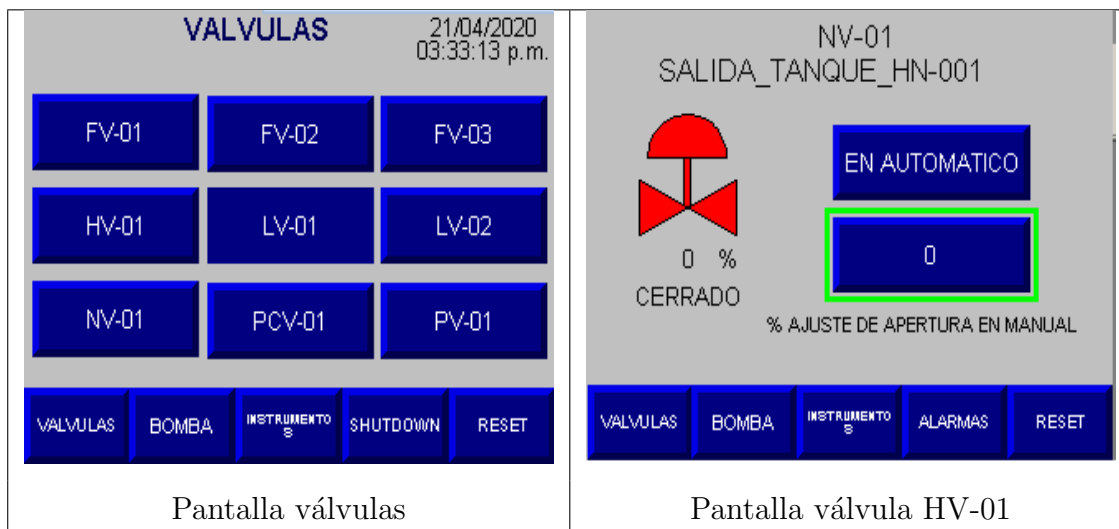


Figura B-5.: Pantalla válvulas proporcionales.

B.4.3. Pantalla bomba centrífuga P-01

Para la operación y monitoreo de la bomba P-01 se programa la pantalla mostrada en el figura B-6. En esta pantalla se puede operar la bomba en modo manual o automático. También se puede dar reset al variador y se permite monitorear la velocidad del motor y el ver estado del motor si esta apagado, en servicio o en falla.

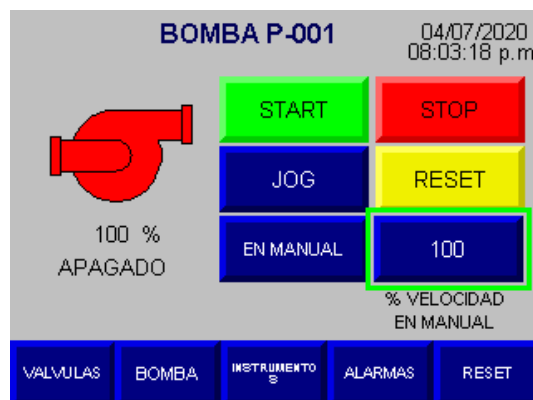


Figura B-6.: Pantalla de operación bomba P-01.

B.4.4. Pantalla Alarmas

En esta pantalla se muestran las alarmas activas existentes en la planta, figura B-7.

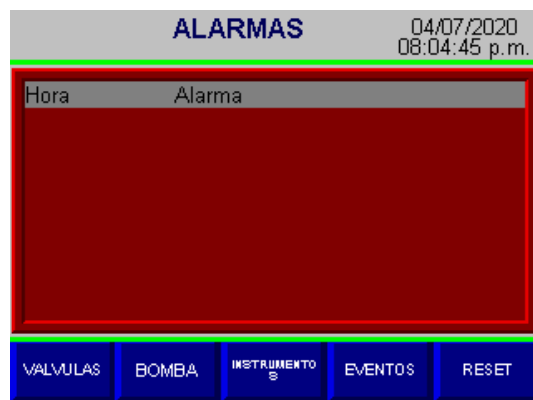


Figura B-7.: Pantalla de alarmas.

B.5. Sistema supervisor de la planta LISC

En el computador de la planta LISC se instala y se programa un sistema de supervisión de la empresa General Electric Proficy Cimplicity versión 10.0. Este sistema supervisor permite una operación y monitoreo más completo en comparación con las pantallas instaladas en los

tableros de control de la planta.

En este supervisor se programa una pantalla general, una pantalla de alarmas y menús para cada una de las válvulas y transmisores de la planta que son descritos a continuación.

B.5.1. Pantalla general del sistema supervisor

Esta es la pantalla principal del sistema supervisor, desde esta se observa el valor medido por cada instrumento, el estado de cada válvula y el estado de la bomba centrífuga. Desde esta pantalla se accede al menú de configuración de cada instrumento, válvula y bomba centrífuga de la planta. También, se accede al menú de configuración de cada controlador PID programado en el PLC. La figura B-8 muestra la pantalla general del supervisor.

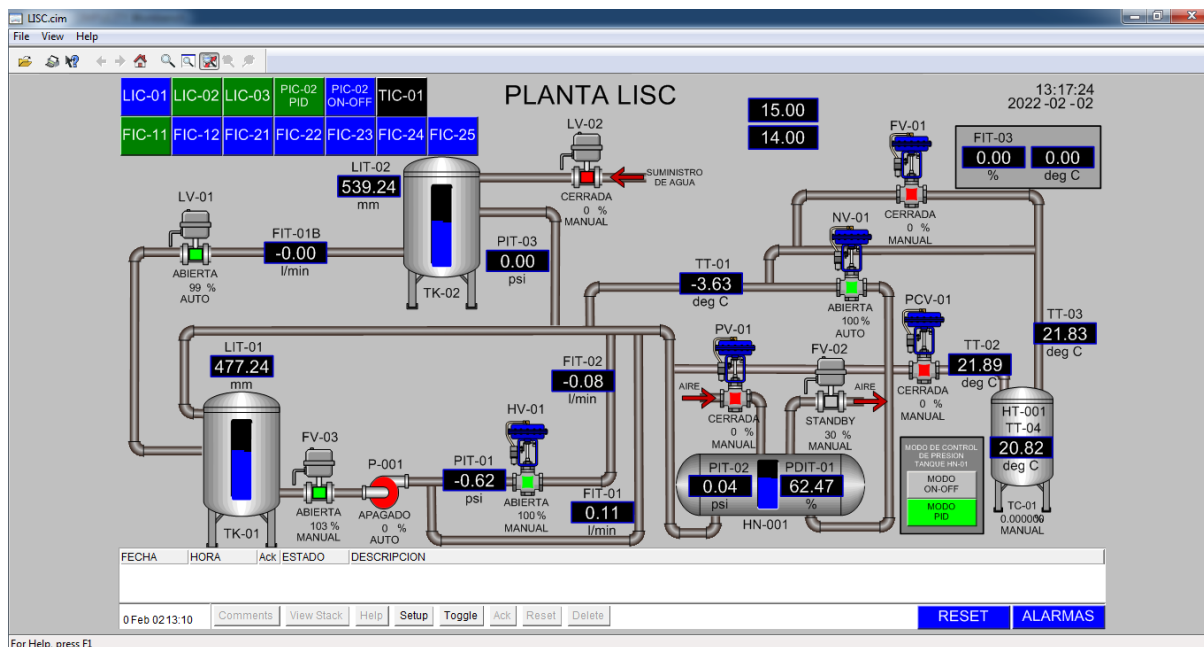


Figura B-8.: Pantalla general del supervisor.

Menú de configuración de los transmisores

Dando clic desde la pantalla general sobre cualquier instrumento se accede al menú de configuración del respectivo instrumento. En este menú se puede configurar los valores de escalamiento, las alarmas asociadas y se puede monitorear el valor medido y la señal 4-20 mA del instrumento, figura B-9.

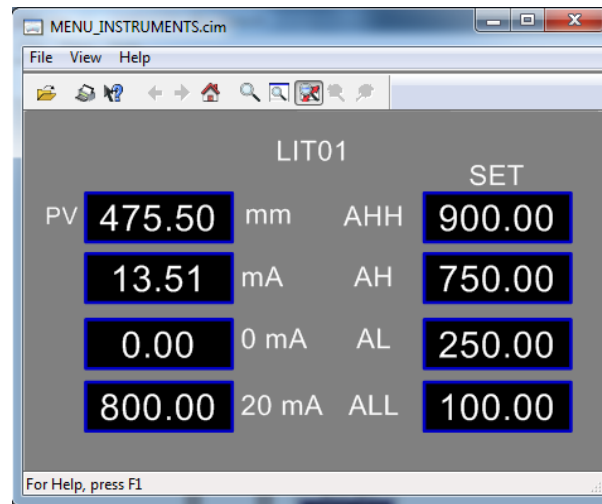


Figura B-9.: Menú de configuración transmisores.

Menú de configuración válvulas

Dando clic desde la pantalla general sobre cualquier válvula se accede al menú de configuración de la respectiva válvula. Este menú permite la operación en modo manual o automático y el porcentaje de apertura de la válvula (figura B-10).

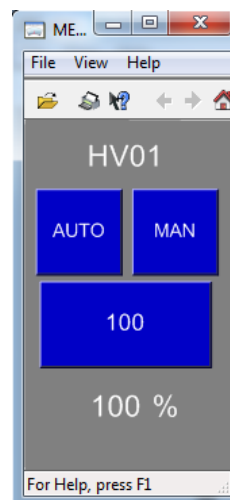


Figura B-10.: Menú de configuración válvulas.

Menú bomba centrífuga

Mediante este menú se opera la bomba en modo automático o manual, se ajusta la velocidad de la bomba en modo manual y se monitorea el estado de la bomba si esta apagada, en servicio o en falla (figura B-11).

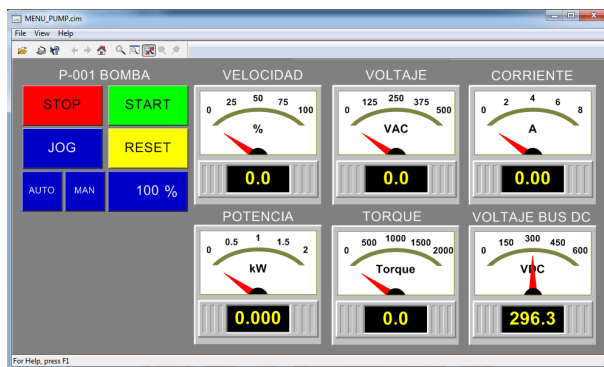


Figura B-11.: Menú de operación de la bomba.

Menú de configuración controladores PID

Todos los lazos de control PID programados en el PLC tienen su propio menú de configuración, figura B-12. Desde este menú se puede modificar el valor de la constante proporcional, integral y derivativa. También se puede ajustar el modo de operación manual o automático y monitorear los valores de la variable de proceso, la señal del error y la señal de control calculada por el controlador PID.

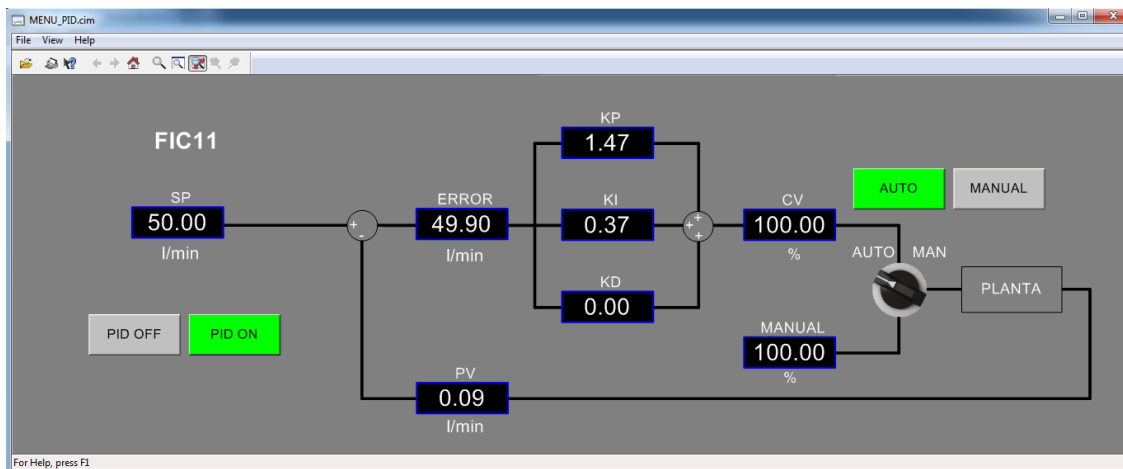


Figura B-12.: Menú de los controladores PID.

B.5.2. Pantalla de alarmas

La pantalla de alarmas muestra las alarmas activas de la planta LISC. Su modo de operación es similar al de las Panel View instaladas en los tableros de control de la planta, en la parte inferior de la pantalla tiene dos comandos uno para salir de la pantalla de alarmas que retorna a la pantalla general y otro comando para dar reset a las alarmas que se han restablecido.

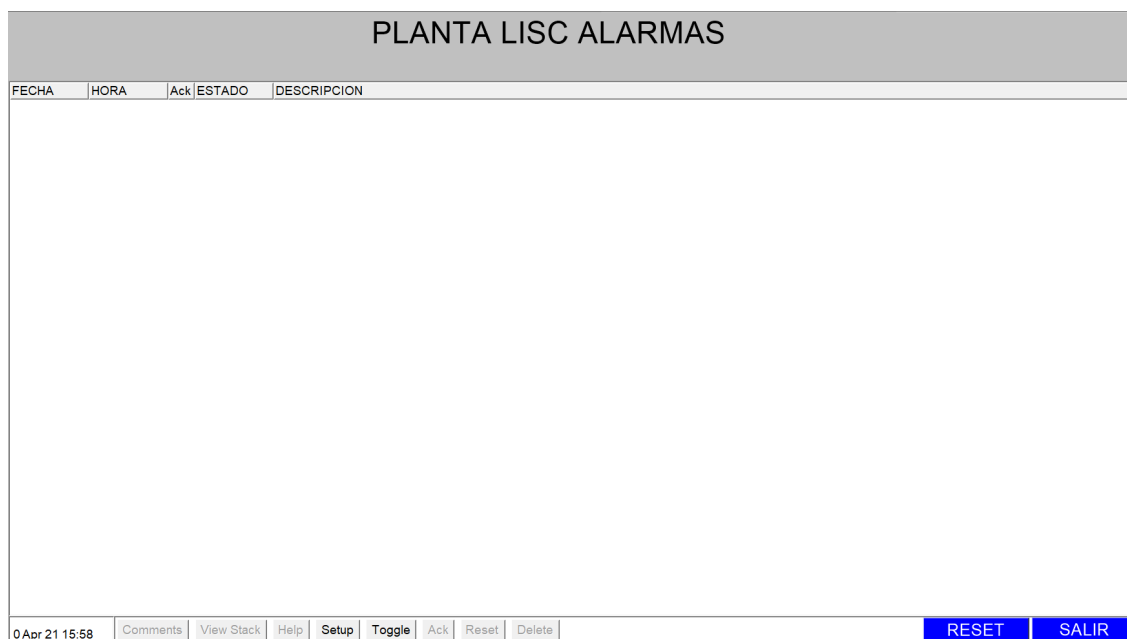


Figura B-13.: Pantalla de alarmas del supervisor.

B.5.3. Parámetros de configuración del supervisor

Para conectar el sistema supervisor con el OPC se crea y se configura un puerto en el sistema supervisor con los valores mostrados en la tabla **B-6**. Para efecto del desarrollo de este trabajo se escoge trabajar con el OPC, debido a que el driver para realizar esta conexión viene por defecto instalado en el software del supervisor. La tabla **B-6** muestra los valores de configuración modificados del puerto y la tabla **B-7** muestra los valores modificados del dispositivo creado en el sistema supervisor. El resto de los valores, que no aparecen en las tablas, se deja por defecto el que viene configurado de fabrica.

| | |
|-------------|-----------|
| Protocol | OPCCLIENT |
| Scan rate | 5 seconds |
| Retry count | 1 |
| Enable | ON |

Tabla B-6.: Parámetros de configuración del puerto del supervisor.

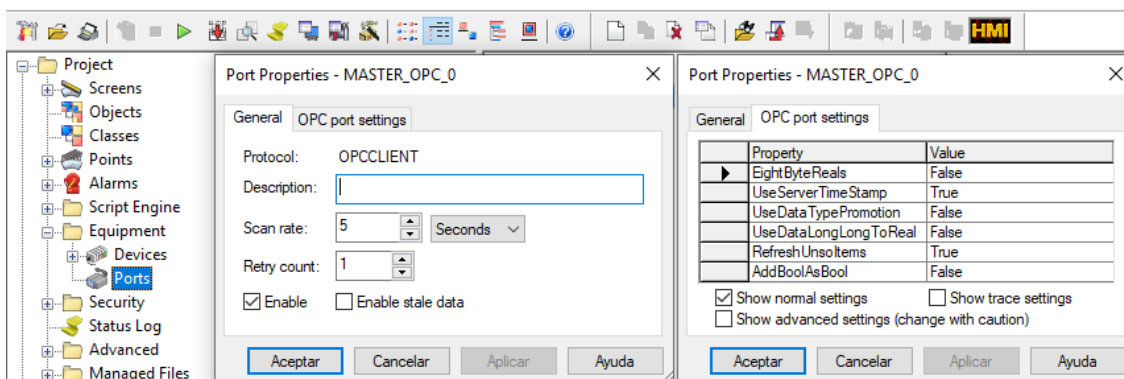


Figura B-14.: Parámetros de configuración del puerto del supervisor.

| | |
|--------------------|-------------------|
| Port | MASTER_OPC_0 |
| Resource ID | MAC_FR |
| Model Type | OPC Client |
| OPC Server Address | RSLink OPC Server |
| Device enable | YES |

Tabla B-7.: Parámetros de configuración del dispositivo en el supervisor.

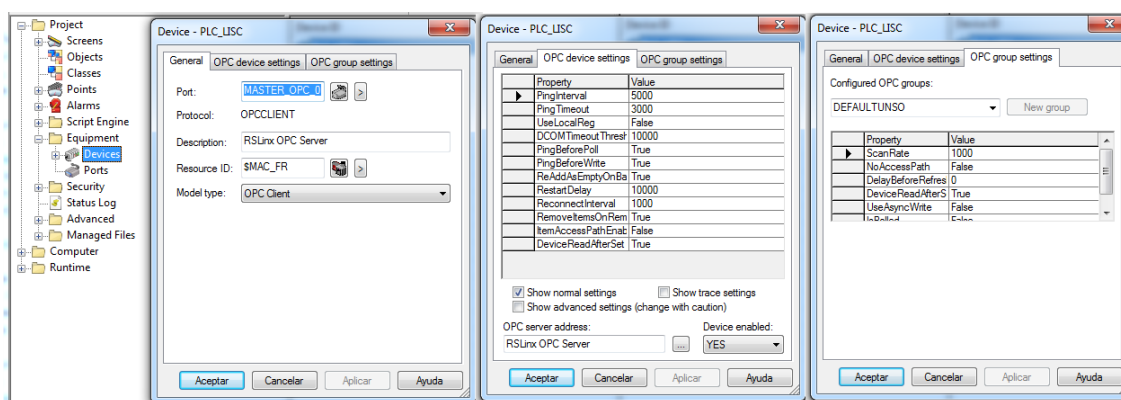


Figura B-15.: Parámetros de configuración del dispositivo en el supervisor.

B.6. Configuración del servidor OPC

El servidor OPC es la interfaz de comunicación entre el PLC, el sistema supervisor y el historiador. El servidor OPC usado en este trabajo es el RSLink de Allen Bradley. Este servidor

OPC tiene los drivers necesarios para establecer la comunicación con el PLC de la planta LISC. La figura B-16 muestra los parámetros de configuración del OPC.

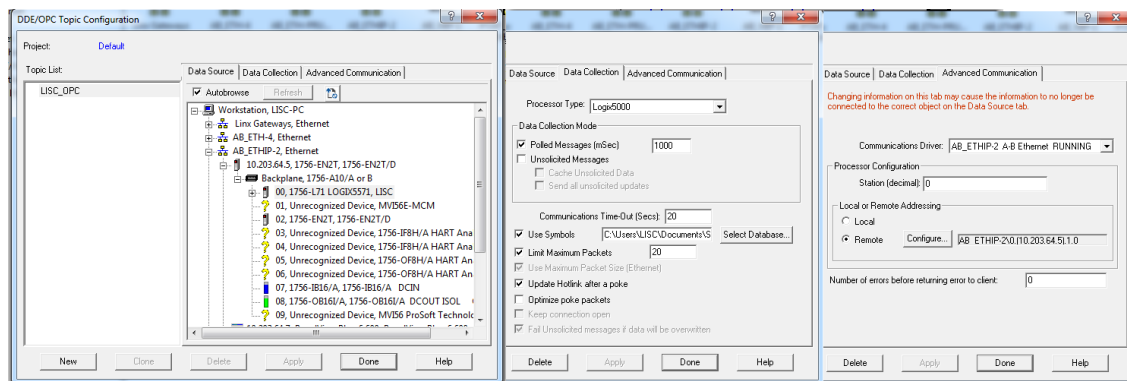


Figura B-16.: Parámetros de configuración del canal del servidor OPC.

B.7. Configuración del Historiador

Para el almacenamiento de los datos medidos por los instrumentos de la planta se utiliza el historiador Proficy Historian de la empresa General Electric, el cual permite en su versión demo guardar hasta 25 variables sin restricción.

La gráfica B-17 muestra los TAGS configurados en el historiador que son leídos directamente desde el OPC RSLink.

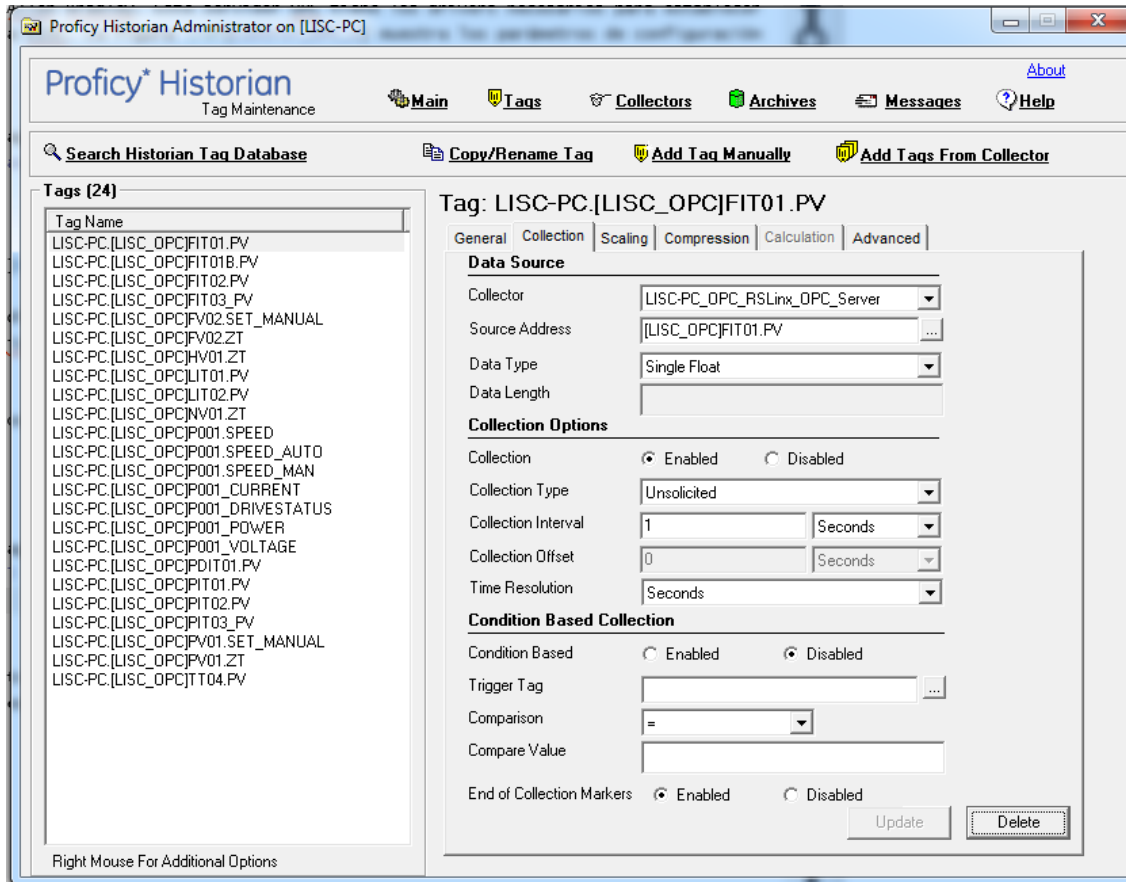


Figura B-17.: TAGS configurados en el historiador.

En el historiador se agregan los registros que son leídos desde el OPC. El tiempo de muestreo de cada registro se ajustan en un segundo, igual al tiempo de consulta que hace el OPC al PLC para la lectura de cada registro.

C. Anexo: Sintonización de los lazos de flujo

C.1. Sintonización del lazo de flujo FIC-12

Para la sintonización del lazo se usa la técnica de inyectar una señal cuadrada en la entrada del actuador y medir la respuesta del flujo por medio del transmisor. El procedimiento para la obtención de la función de transferencia de la planta y la constantes del controlador es el siguiente:

1. Para este caso se alinean las válvulas manuales de para que el flujo que pasa por la válvula HV-01 retorne al tanque TK-01 y el flujo que pasa por el medidor FIT-01, pase al tanque hidroneumático HN-01 ajustado a 25 psig.
2. Como la válvula HV-01 es el actuador del lazo, se le inyecta una señal cuadrada del 0 % al 100 %, para abrir y cerrar la válvula, y obtener la función de transferencia de la planta. La bomba se deja trabajando al 100 % de su velocidad.
3. Se guardan en el historiador la señal forzada de apertura de la válvula (Señal de entrada) y la señal medida por el transmisor de flujo FIT-01 (Señal de salida). Estas señales recolectadas se muestran en la figura **C-1**.
4. Las dos señales se extraen del historiador en una hoja de calculo para luego ser tratadas mediante el Toolbox Ident de Matlab. La función de transferencia de la planta es:

$$G_{FIC12}(s) = \frac{0,7788e^{-0,682s}}{1 + 2,256s} \quad (C-1)$$

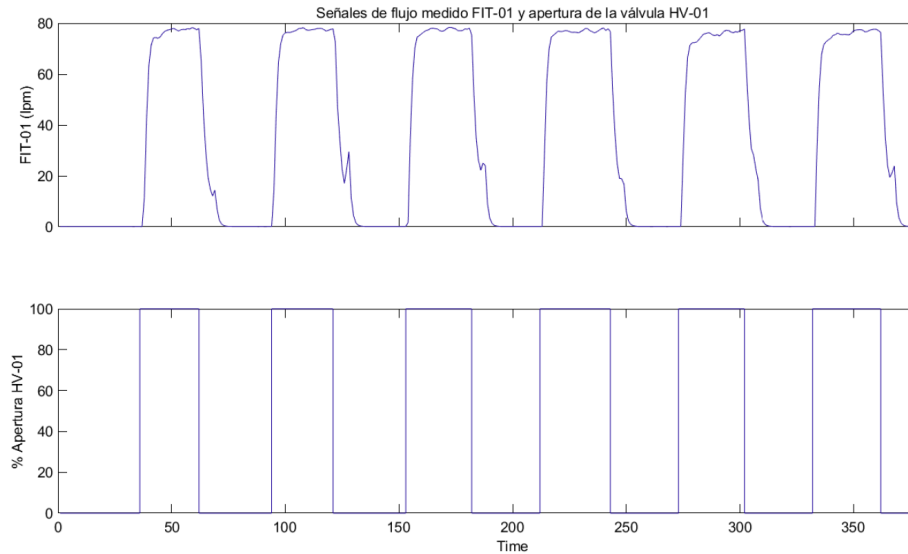


Figura C-1.: Señales de entrada y de salida cargadas en el Ident de Matlab.

5. Mediante simulink y con la función de transferencia de la planta obtenida, se calculan las constantes del controlador PID (Figura C-3). Se establece como condición que el lazo debe tener un tiempo de respuesta inferior a 10 segundos y un sobrepico inferior al 10%. En las simulaciones realizadas en Simulink las respuestas del controlador PI y las del controlador PID son similares y cumplen con las condiciones requeridas, razón por la cual se escoge trabajar con controladores de tipo Proporcional-Integral.

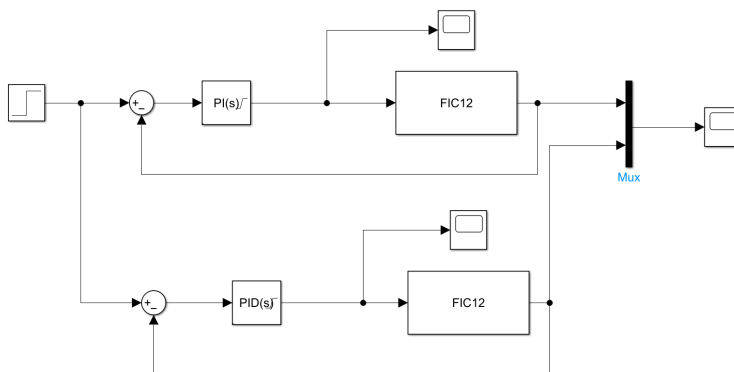


Figura C-2.: Diagrama de bloques de los lazos FIC-12 en Simulink.

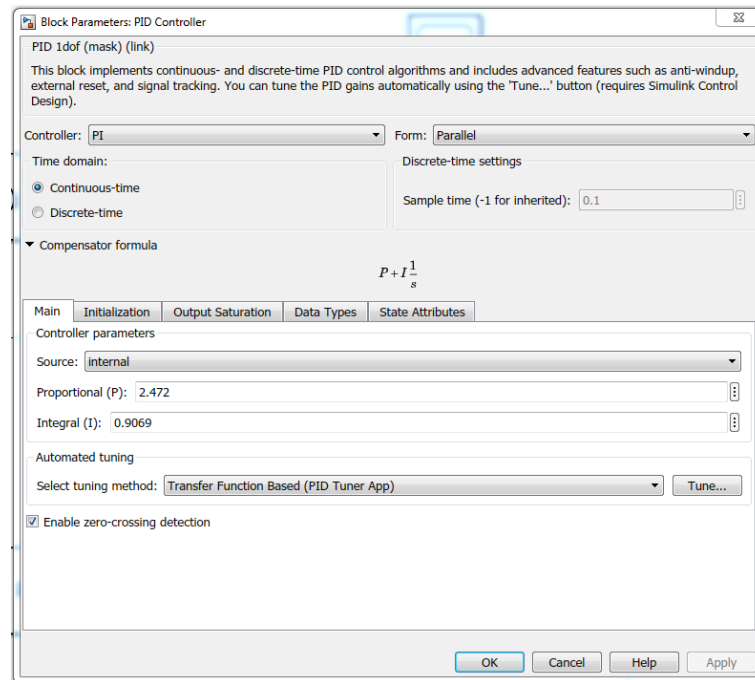


Figura C-3.: Constantes del controlador PI calculadas en Simulink.

Las constantes obtenidas y programadas en el controlador PID del PLC son las siguientes:

$P = 2,472$ Constante proporcional.

$I = 0,906$ Constante integral.

C.2. Sintonización del lazo de flujo FIC-24

Este lazo se sintoniza siguiendo el mismo procedimiento al usado en el lazo FIC-12. Para este caso se alinean las válvulas manuales para que el flujo pase por el transmisor de flujo FIT-02. Se ajusta el tanque hidroneumático HN-01 en 25 psig.

A la bomba P-01 se le inyecta una señal cuadrada del 0 % al 100 %, para variar su velocidad, y obtener la función de transferencia de la planta.

$$G_{FIC24}(s) = \frac{0,692e^{-7,391s}}{1 + 4,696s} \quad (C-2)$$

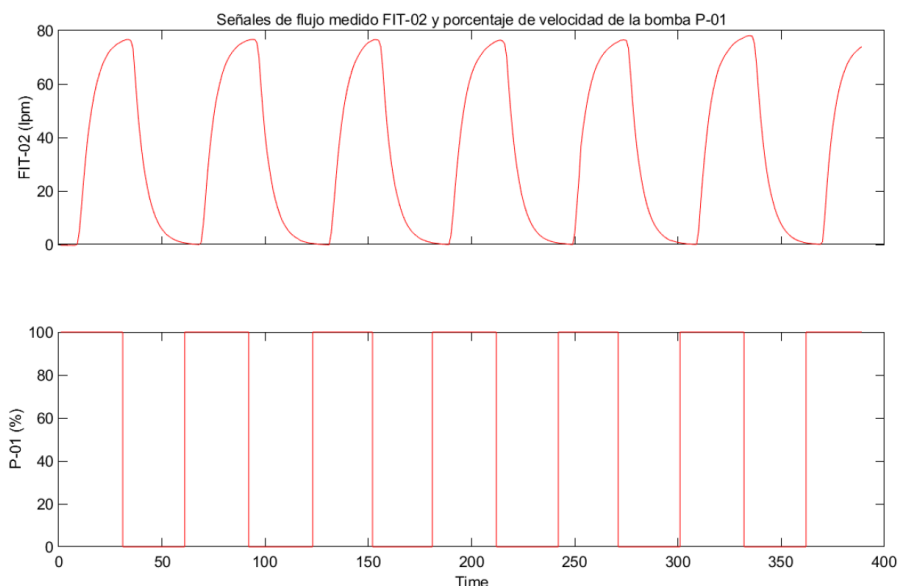


Figura C-4.: Señales de entrada y de salida cargadas en el Ident de Matlab.

Las constantes obtenidas y programadas en el controlador PID del PLC son las siguientes:

$P = 0,505$ Constante proporcional.

$I = 0,103$ Constante integral.

C.3. Sintonización del lazo de flujo FIC-25

Este lazo se sintoniza siguiendo el mismo procedimiento al usado en el lazo FIC-12. Para este caso se alinean las válvulas manuales de para que el flujo pase por el transmisor de flujo FIT-02. También se ajusta el tanque hidroneumático HN-01 en 25 psig.

La bomba P-01 se deja operando al 100 % y se inyecta una señal cuadrada del 30 % al 100 %, para abrir y cerrar la válvula HV-01, y obtener la función de transferencia de la planta.

$$G_{FIC25}(s) = \frac{0,806e^{-3,528s}}{1 + 7,976s} \quad (C-3)$$

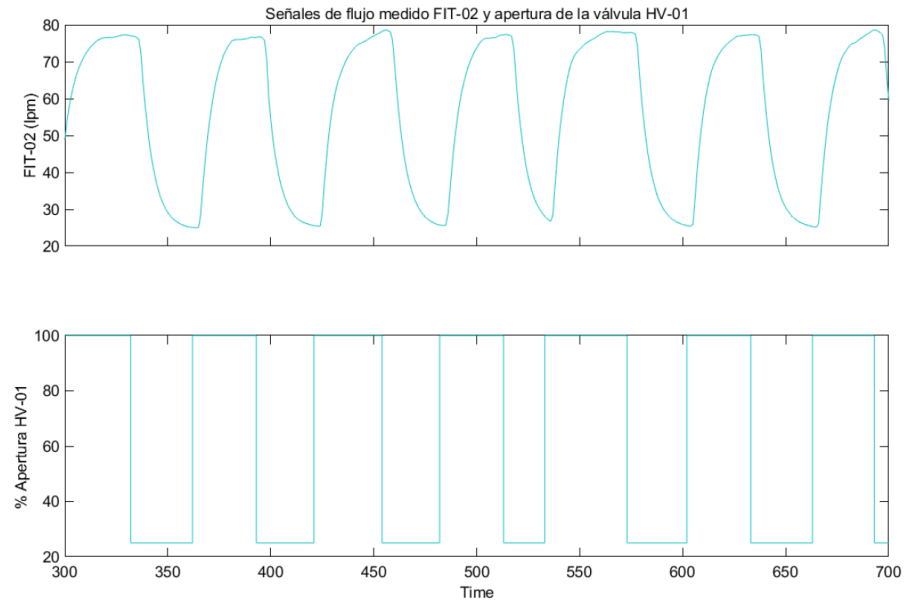


Figura C-5.: Señales de entrada y de salida cargadas en el Ident de Matlab.

Las constantes obtenidas y programadas en el controlador PID del PLC son las siguientes:

$P = 1,647$ Constante proporcional.

$I = 0,185$ Constante integral.

D. Anexo: Constantes de tiempo de las válvulas

El siguiente anexo muestra la medición de las constantes de tiempo para los dos tipos de válvulas instaladas en el laboratorio. Se describe el procedimiento para la obtención del tiempo de respuesta de la válvula con actuador neumático y también para la válvula con actuador motorizado. Estas constantes de tiempo son utilizadas principalmente, para el cálculo de las constantes de los controladores PID programados en el PLC.

D.1. Medición de la constante de tiempo de la válvula con actuador neumático

La medición del tiempo de respuesta de la válvula con actuador neumático se hace con la válvula PCV-01, ubicada a la salida del medidor de flujo FIT-01. La medición se hace con la bomba prendida al 100 % de su velocidad. Durante la medición se guardan las señales de comando de apertura de la válvula (Señal de entrada) y la señal del transmisor de flujo FIT-01 (Señal de respuesta).

Las señales son cargadas en la herramienta Ident de Matlab por medio de una hoja de cálculo. La gráfica **D-1** muestra las dos señales recolectadas de apertura de la válvula y la señal de flujo del transmisor FIT-01.

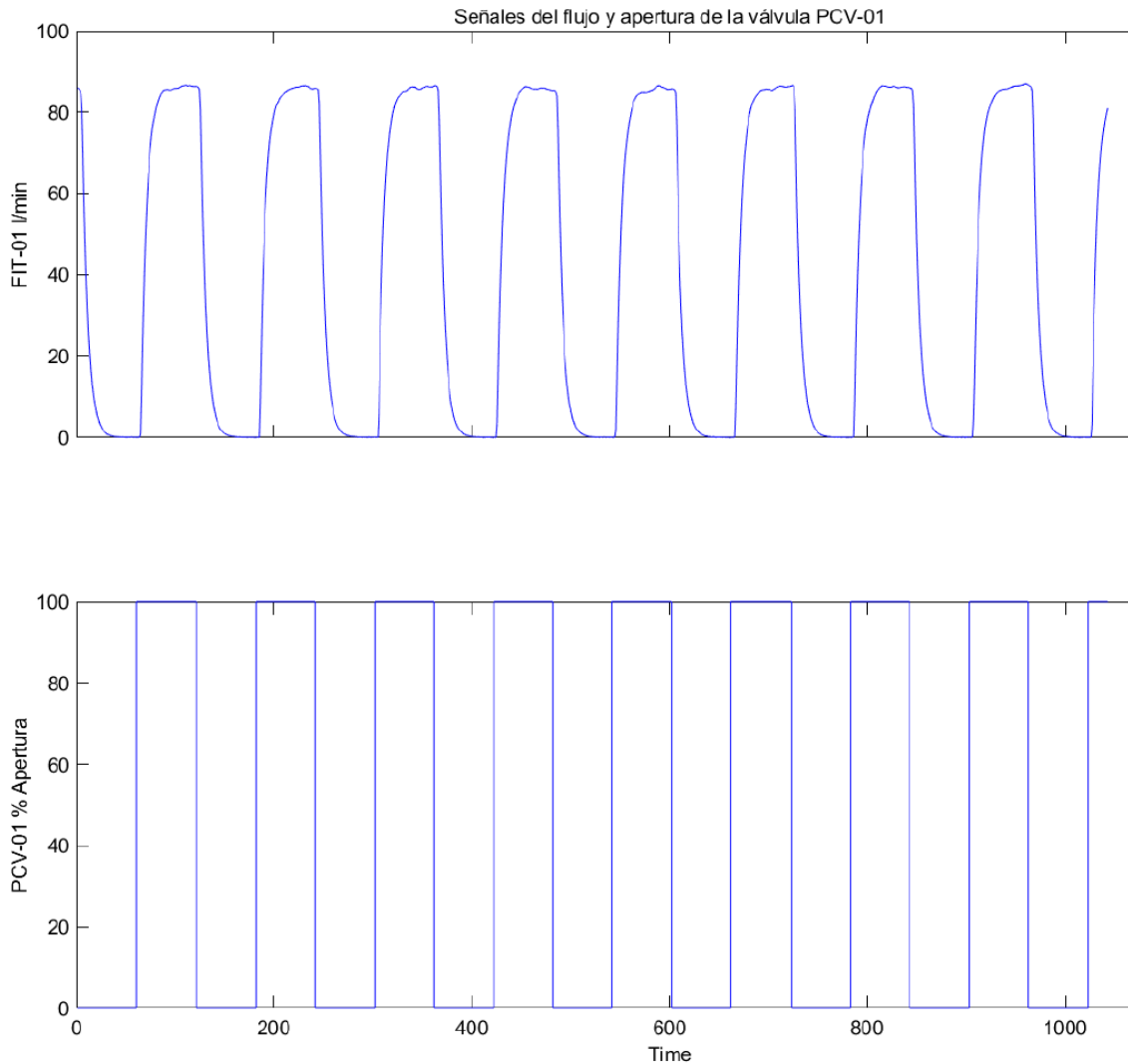


Figura D-1.: Señales de entrada (PCV-01) y salida (FIT-01), para la medición del tiempo de respuesta de la válvula neumática.

La gráfica **D-2** muestra el cálculo realizado por el Ident de Matlab. El tiempo de respuesta de la válvula medido es de 3.1 segundos aproximadamente.

```
Process model with transfer function:  
      Kp  
G(s) = ----- * exp(-Td*s)  
      1+Tp1*s  
  
      Kp = 0.65726  
      Tp1 = 3.1259  
      Td = 0
```

Figura D-2.: Medición del tiempo de respuesta generada en Ident. Tiempo de respuesta $Tp1=3.1$ segundos.

D.2. Medición de la constante de tiempo de la válvula con actuador motorizado

Las válvulas con actuador motorizado tienen tiempos de respuesta mayores a un segundo y son más lentas comparadas con las válvulas neumáticas. Para la medición de la constante de tiempo se usa el historiador, para almacenar las señales, y la aplicación Proficy CSense, para calcular el tiempo de respuesta de la válvula.

En la gráfica **D-3** se muestran las señales de entrada y de salida medidas. El indicador se ubica en el momento que la señal de entrada cambia del 0% al 100%. La señal en rojo corresponde al flujo medido por el transmisor FIT-01B en litros por minuto y la señal en azul corresponde al comando de apertura de la válvula en unidades de porcentaje.

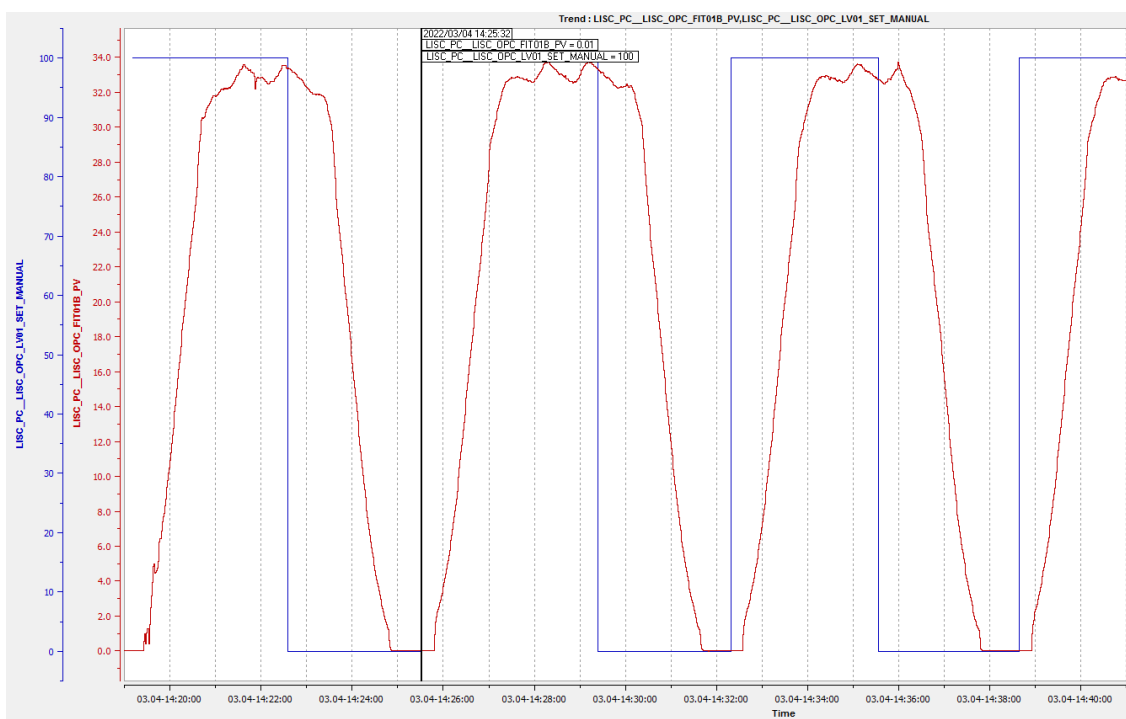


Figura D-3.: Tiempo de respuesta válvula motorizada. Indicador ubicado cuando la señal de salida está en el 0%

En la gráfica **D-4** se muestran las señales de entrada y de salida medidas, cuando la señal de salida se encuentra aproximadamente al 63% del flujo máximo.

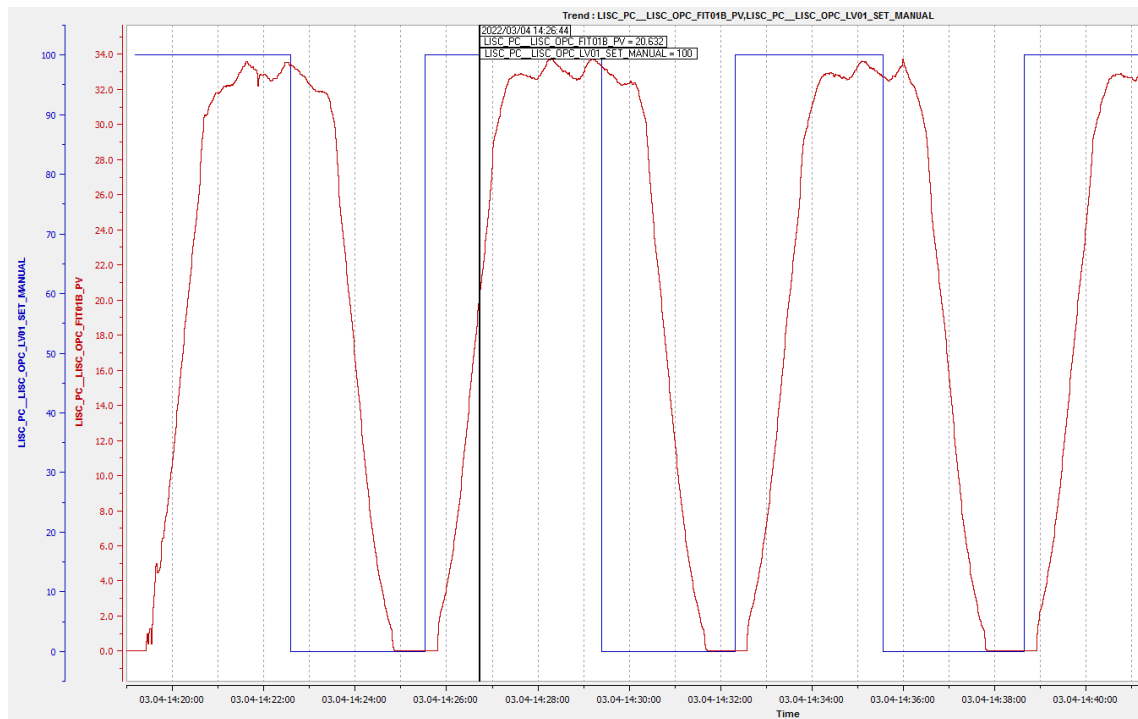


Figura D-4.: Tiempo de respuesta válvula motorizada. Indicador ubicado cuando la señal de salida está en el 63%.

Según las dos gráficas anteriores y a la diferencia de tiempos de los dos indicadores, la constante de tiempo de la válvula se calcula en 72 segundos aproximadamente.

Para corroborar el cálculo realizado, la aplicación Proficy CSense tiene la función de estimación de retraso de señales. Esta función se usa para el cálculo del tiempo de respuesta de la válvula motorizada, como se muestra en la figura **D-5**. El tiempo calculado por la aplicación es de 76 segundos.

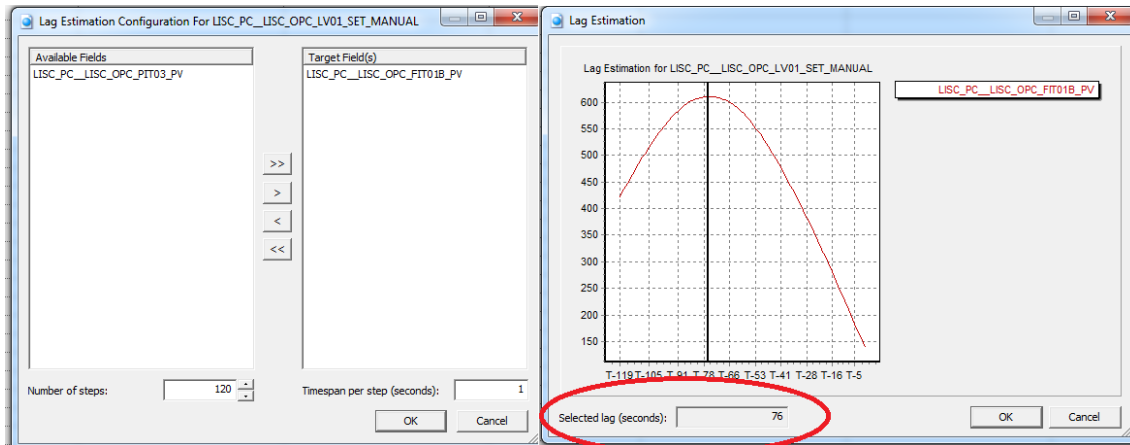


Figura D-5.: Cálculo del tiempo de respuesta de la válvula realizado con Proficy CSense.

E. Anexo: Planos P&ID y planos eléctricos

Referencias

- [1] R. G. Q. and, «Mighty mess; state-of-the-art and future manufacturing execution systems», *IEEE Robotics Automation Magazine*, vol. 11, n.º 1, págs. 19-25, mar. de 2004, ISSN: 1070-9932. DOI: 10.1109/MRA.2004.1275947.
- [2] M. I. Mahmoud, H. H. Ammar, M. M. Hamdy y M. H. Eissa, «Production operation management using Manufacturing Execution Systems (MES)», *2015 11th International Computer Engineering Conference: Today Information Society What's Next?, ICENCO 2015*, págs. 111-116, 2016. DOI: 10.1109/ICENCO.2015.7416334.
- [3] K. L. Lueth, «Industrial Analytics 2016/2017 The current state of data analytics usage in industrial companies», *Digital Analytics Association Germany*, 2016.
- [4] *Enterprise-control system integration part 1: Models and terminology*, ANSI/ISA-95.00.01-2010, Standards Department ISA, 2010.
- [5] MESA. (). Mesa model, dirección: <http://www.mesa.org/en/modelstrategicinitiatives/MESAModel.asp>. (Consultado: 28.02.2019).
- [6] ANSI/ISA-95. ()., dirección: <https://en.wikipedia.org/wiki/ANSI/ISA-95>. (Consultado: 18.01.2022).
- [7] *Enterprise-control system integration part 3: Activity models of manufacturing operations management*, ANSI/ISA-95.00.03-2005, Standards Department ISA, 2005, pág. 19.
- [8] *Enterprise-control system integration part 3: Activity models of manufacturing operations management*, ANSI/ISA-95.00.03-2005, Standards Department ISA, 2005, pág. 55.
- [9] *Enterprise-control system integration part 3: Activity models of manufacturing operations management*, ANSI/ISA-95.00.03-2005, Standards Department ISA, 2005, págs. 45-46.
- [10] *Enterprise-control system integration part 3: Activity models of manufacturing operations management*, ANSI/ISA-95.00.03-2005, Standards Department ISA, 2005, págs. 70-71.
- [11] *Enterprise-control system integration part 3: Activity models of manufacturing operations management*, ANSI/ISA-95.00.03-2005, Standards Department ISA, 2005, pág. 51.
- [12] G.E. (). General electric proficy csense 6.0, dirección: <https://www.ge.com/digital/applications/proficy-csense>. (Consultado: 21.02.2022).
- [13] Seeq. (). Seeq r21, dirección: <https://www.seeq.com/>. (Consultado: 15.12.2021).

-
- [14] —, (). Seeq r21, dirección: <https://www.seeq.com/product/seeq-architecture>. (Consultado: 03.03.2022).
- [15] Yokogawa. (). Yokogawa process data analytics, dirección: <https://www.yokogawa.com/solutions/solutions/industrial-iot/iiot-efficiency/process-data-analytics/>. (Consultado: 01.02.2022).
- [16] R. Automation. (). Factorytalk analytics, dirección: <https://www.rockwellautomation.com/es-co/products/software/factorytalk/innovationsuite/analytics.html>. (Consultado: 21.02.2022).
- [17] I. J. Karassik, «Centrifugal pumps selection, operation and maintenance», en. 1960, pág. 193.
- [18] S. M. Choudhury, «Diagnosis of process nonlinearities and valve stiction data driven approaches», en. Springer eBooks, 2008, págs. 117-120.
- [19] C. Smith y A. Corripio, *Control automatico de procesos : Teoria y practica*. Editorial Limusa S.A. De C.V., 2014, ISBN: 9786070507212.
- [20] A. C. Sole, *Instrumentación industrial, sexta edición*. Marcombo, S.A., 1997.
- [21] *Technical information proline prowirl f 200*, TI01084D/06/EN/05.15, Endress Hauser, 2015.
- [22] *Technical information proline prosonic flow 92f*, TI00073D/06/EN/13.10, Endress Hauser, 2010.
- [23] *Technical information proline promag 10w*, TI00093D/06/EN/14.17, Endress Hauser, 2017.
- [24] *Technical information prosonic m*, TI00365F/00/EN/17.14, Endress Hauser, 2014.
- [25] *Technical information liquicap m*, TI00401F/00/EN/15.17, Endress Hauser, 2017.
- [26] *Technical information deltabar s*, TI00382P/00/EN/20.14, Endress Hauser, 2014.
- [27] *Technical information cerabar m*, TI00436P/00/EN/26.17, Endress Hauser, 2017.
- [28] *24000cvf and 24000svf valves*, D103333X012, EMERSON, 2017.
- [29] *Nvf...24-mft(-e) us actuators*, 20A-TD001J-EN-P, Belimo Aircontrols, 2014.
- [30] *Cp centrifugal pumps*, GENERAL CATALOGUE 60Hz, Pedrollo.
- [31] *Powerflex 70 adjustable frequency ac drive*, GENERAL CATALOGUE 60Hz, Rockwell Automation, 2017.