

CONTENIDO

| | |
|--|----|
| RESUMEN | 12 |
| ABSTRACT | 13 |
| INTRODUCCION | 14 |
| CAPITULO I CONTEXTO GENERAL | 15 |
| 1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA | 15 |
| 1.2 JUSTIFICACIÓN..... | 16 |
| 1.3 OBJETIVOS..... | 16 |
| 1.3.1 Objetivo General..... | 16 |
| 1.3.2 Objetivos Especificos | 16 |
| 1.4 ENFOQUE METODOLÓGICO..... | 17 |
| CAPITULO II CONTEXTO GENERAL | 18 |
| 2.1 MARCO CONCEPTUAL | 18 |
| 2.2 INSTRUMENTACION INDUSTRIAL..... | 18 |
| 2.2.1 Instrumentos indicadores..... | 18 |
| 2.2.2 Instrumentos ciegos..... | 18 |
| 2.2.3 Elementos primarios..... | 19 |
| 2.2.3.1 Sensor Ultrasónico SRF06..... | 19 |
| 2.2.4 Transmisores..... | 19 |
| 2.2.4.1 Transmisor SIGNET 8550-1 | 20 |
| 2.2.5 Transductores..... | 20 |
| 2.2.6 Convertidores | 21 |
| 2.2.6.1 Tarjeta Convertidora de 4-20 mA a 1-5 Vdc..... | 21 |
| 2.2.7 Receptores | 22 |
| 2.2.8 Controladores | 22 |
| 2.2.8.1 Control lógico programable (PLC) | 22 |
| 2.2.8.2 Controlador Automático Programable (PAC)..... | 23 |
| 2.2.8.3 PLC OPTO 22 SNAP PAC R1..... | 23 |
| 2.2.8.4 PLC Modicon M340 PAC..... | 24 |
| 2.2.9 Elemento final de control | 25 |
| 2.2.9.1 Válvulas solenoides..... | 26 |
| 2.2.9.2 Bombas centrífugas..... | 26 |
| 2.2.9.3 Servoválvula..... | 26 |
| 2.3 SISTEMAS DE CONTROL..... | 26 |
| 2.3.1 Conceptos de sistemas de control..... | 27 |
| 2.3.2 Estrategia de control..... | 27 |
| 2.3.2.1 Lazo abierto..... | 27 |
| 2.3.2.2 Lazo cerrado | 28 |
| 2.3.3 Tipos de sistemas de control | 29 |
| 2.3.3.1 Control ON/OFF | 29 |
| 2.3.3.2 Control PID..... | 30 |

| | | |
|--|---|----|
| 2.3.4 | Métodos de la curva de reacción | 31 |
| 2.3.4.1 | Modelos..... | 31 |
| 2.3.4.2 | Curva de reacción | 31 |
| 2.3.4.3 | Método de la tangente de Ziegler y Nichols | 32 |
| 2.3.4.4 | Método de la tangente Miller | 33 |
| 2.3.4.5 | Método de dos puntos generalizado | 34 |
| 2.3.4.6 | Respuesta de razón de asentamiento de un cuarto | 35 |
| 2.4 | AUTOMATIZACIÓN..... | 35 |
| 2.4.1 | Sistema automatizado | 36 |
| 2.4.2 | Arquitecturas muy conocidas en automatización industrial | 37 |
| 2.4.3 | Programación del PLC..... | 38 |
| 2.4.3.1 | Lenguajes de programación..... | 38 |
| 2.4.4 | Comunicaciones | 39 |
| 2.4.4.1 | Protocolos de comunicación industrial | 40 |
| 2.4.4.2 | Protocolo de comunicación MODBUS/TCP..... | 40 |
| 2.4.4.3 | Protocolo de comunicación PROFIBUS-DP | 41 |
| 2.4.4.4 | Protocolo de comunicación AS-I | 42 |
| 2.4.4.5 | Protocolo de comunicación ETHERNET | 43 |
| 2.5 | HMI | 43 |
| 2.6 | SISTEMA SCADA..... | 44 |
| 2.6.1 | Funciones principales de un sistema SCADA | 44 |
| 2.6.2 | Características de un sistema SCADA | 45 |
| 2.7 | TRABAJOS RELACIONADOS..... | 46 |
| CAPITULO III. REDISEÑO DEL BANCO DE PRUEBAS DE BOMBAS..... | | 48 |
| 3.1 | ESTADO ACTUAL Y FUNCIONAMIENTO DE LA INSTRUMENTACION..... | 49 |
| 3.1.1 | Instrumentación del Banco de Pruebas de Bombas Centrífugas..... | 50 |
| 3.1.1.1 | Tanque reservorio | 50 |
| 3.1.1.2 | Tanques en acrílico | 50 |
| 3.1.1.3 | Bombas Centrífugas..... | 51 |
| 3.1.1.4 | Válvula solenoide | 51 |
| 3.1.1.5 | Válvulas manuales de bypass | 52 |
| 3.1.1.6 | Servoválvula..... | 52 |
| 3.1.1.7 | Válvulas manuales de PVC | 53 |
| 3.1.1.8 | Sensor ultrasónico SRF06..... | 53 |
| 3.1.1.9 | Sensor de caudal SIGNET 2100 | 54 |
| 3.1.1.10 | Transmisor de FLUJO SIGNET 8550-1 | 54 |
| 3.1.1.11 | Pilotos industriales | 55 |
| 3.1.1.12 | Perilla de parada de emergencia..... | 55 |
| 3.1.1.13 | Fuentes de voltaje | 56 |
| 3.1.1.14 | Contactores y relés térmicos | 57 |
| 3.1.1.15 | Tarjeta controladora de relevos..... | 57 |
| 3.1.1.16 | Tarjeta Convertidora de señales | 58 |
| 3.1.1.17 | PLC OPTO 22 SNAP PAC R1 | 58 |

| | | |
|---|---|-----|
| 3.1.2 | Reconocimiento de la instrumentación | 59 |
| 3.1.3 | DIAGRAMAS | 60 |
| 3.1.3.1 | Diagrama P&ID de la planta | 60 |
| 3.1.3.2 | Diagrama de flujo de la planta | 61 |
| 3.1.3.3 | Recorrido de la Bomba Centrífuga EB-100A | 62 |
| 3.1.3.4 | Recorrido de la Bomba Centrífuga EB-100B | 63 |
| 3.1.3.5 | Recorrido en serie | 64 |
| 3.1.3.6 | Recorrido en paralelo | 65 |
| 3.2 | REDISEÑO Y MEJORAMIENTO DEL BANCO DE PRUEBAS | 66 |
| 3.2.1 | Filosofía de control | 67 |
| 3.2.1.1 | Modos de operación | 67 |
| 3.2.1.2 | Descripción general | 68 |
| 3.2.1.3 | Procedimiento | 69 |
| 3.2.2 | PLC | 76 |
| 3.2.2.1 | Comparación del OPTO 22 y Modicon M340 | 76 |
| 3.2.3 | Diseño panel de conexiones eléctricas | 79 |
| 3.3 | DESARROLLO DE LA SUPERVISION Y EL CONTROLADOR | 80 |
| 3.3.1 | Programación | 80 |
| 3.3.1.1 | Programación del PAC Modicon M340 (Unity Pro S) | 80 |
| 3.3.1.2 | Programación Planta del Banco de Pruebas | 81 |
| 3.3.2 | Supervisión | 85 |
| 3.3.3 | Visualización | 85 |
| 3.3.3.1 | Vijeo Designer 6.2 (HMIGTO3510) | 85 |
| 3.3.3.2 | Vijeo Citect 2015 V7.5 (Sistema SCADA) | 88 |
| 3.3.4 | Caracterización del Banco de Pruebas de Bombas Centrífugas .. | 88 |
| 3.3.5 | Sistema de control | 91 |
| 3.3.5.1 | Control ON OFF | 92 |
| 3.3.5.2 | Controlador PID | 93 |
| 3.3.5.3 | Controlador PID | 95 |
| 3.3.6 | Conexión | 97 |
| 3.3.6.1 | Módulos PAC Modicon M340 | 98 |
| 3.3.6.2 | Conexión del PLC al panel del Banco de Pruebas | 98 |
| CAPITULO IV. PRUEBAS Y RESULTADOS DEL BANCO DE PRUEBAS .. | | 101 |
| 4.1 | FLEXIBILIDAD DE CONEXIONES ELÉCTRICAS PANEL BANCO DE BOMBAS | 101 |
| 4.2 | SUPERVISIÓN MEDIANTE HMI Y EL SISTEMA SCADA | 103 |
| 4.2.1 | Pantalla HMI | 103 |
| 4.2.2 | Sistema SCADA | 108 |
| 4.3 | CONTROL ON/OFF | 113 |
| 4.4 | CONTROL PID | 115 |
| 4.4.1 | Curva reacción | 115 |
| 4.4.2 | Método de Ziegler y Nichols | 116 |
| 4.5 | VALIDACION DEL BANCO DE PRUEBAS DE BOMBAS CENTRÍFUGAS | 115 |
| CAPÍTULO V CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES | | 121 |

| | |
|--------------------------------|------|
| 5.1 CONCLUSIONES..... | 121 |
| 5.2 RECOMENDACIONES | 121 |
| 5.3 TRABAJOS FUTUROS | 1213 |
| CAPITULO VI BIBLIOGRAFÍA | 123 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 Fases del proceso cuantitativo. Fuente: [2]..... | 17 |
| Figura 2 Instrumentos Indicadores. Fuente: [5]..... | 18 |
| Figura 3 Instrumentos ciegos. Fuentes: [6] y Autor..... | 19 |
| Figura 4 Sensor ultrasónico SRF06. Fuente: Autor..... | 19 |
| Figura 5 Transmisor SIGNET 8550-1. Fuente: Autor..... | 20 |
| Figura 6 Transductores. Fuente: Autor..... | 21 |
| Figura 7 Tarjeta Convertidora. Fuente: Autor..... | 21 |
| Figura 8 Receptor de frecuencia EB200, Fuente: [9]..... | 22 |
| Figura 9 Controlador PLC OPTO 22 SNAP PAC R1. Fuente: Autor..... | 24 |
| Figura 10 Controlador PLC Modicon M340 Schneider Electric. Fuente: Autor..... | 24 |
| Figura 11 Elementos finales de control. Fuente: Autor..... | 25 |
| Figura 12 Lazo abierto. Fuente: [16]..... | 28 |
| Figura 13 Lazo cerrado. Fuente: [16]..... | 29 |
| Figura 14 Control On Off. Fuente: [17]..... | 29 |
| Figura 15 Curva de reacción (respuesta al escalón). Fuente: [20]..... | 32 |
| Figura 16 Método de la tangente de Ziegler y Nichols. Fuente: [21]..... | 33 |
| Figura 17 Método de la tangente de Ziegler y Nichols. Fuente: [19]..... | 33 |
| Figura 18 Método de dos puntos generalizado. Fuente: [19]..... | 34 |
| Figura 19 Piramide de la automatizacion. Fuente: [23]..... | 36 |
| Figura 20 Estructura de un sistema automatizado. Fuente: [25]..... | 37 |
| Figura 21 Red Modbus con el PLC M340 de Modicon. Fuente: [30]..... | 41 |
| Figura 22 Profibus. Fuente: [3]..... | 42 |
| Figura 23 a) Esquema de distribución de una red AS- I. b) Cable AS-I y método de conexión. Fuente: [29]..... | 42 |
| Figura 24 Banco de Pruebas de bombas centrífugas. Fuente: Autor..... | 49 |
| Figura 25 Tanque reservorio TK103. Fuente: Autor..... | 50 |
| Figura 26 Tanque de acrílico TK101. Fuente: Autor..... | 51 |
| Figura 27 Tanque de acrílico TK102. Fuente: Autor..... | 51 |
| Figura 28 Bombas centrífugas BARNES-QB60. Fuente: Autor..... | 51 |
| Figura 29 Válvula solenoide EBC-HQ. Fuente: Autor..... | 52 |
| Figura 30 Válvulas manuales BYPASS. Fuente: Autor..... | 52 |
| Figura 31 Servoválvula DANFOSS EV260B. Fuente: Autor..... | 53 |
| Figura 32 Válvulas manuales. Fuente: Autor..... | 53 |
| Figura 33 Sensor ultrasónico análogo SRF06. Fuente: Autor..... | 54 |
| Figura 34 Sensor de caudal SIGNET 2100. Fuente: Autor..... | 54 |
| Figura 35 Transmisor SIGNET 8550-1. Fuente: Autor..... | 55 |
| Figura 36 Indicadores de las válvulas solenoide. Fuente: Autor..... | 55 |
| Figura 37 Indicadores de las bombas centrífugas. Fuente: Autor..... | 55 |

| | |
|--|----|
| Figura 38 Indicador de funcionamiento de la planta de bombas centrífugas. Fuente: Autor..... | 55 |
| Figura 39 Perilla de parada de emergencia. Fuente: Autor..... | 56 |
| Figura 40 Fuentes de voltaje (De arriba hacia abajo 5VDC, 12VDC, 24VDC). Fuente: Autor..... | 56 |
| Figura 41 Contactores SASSIN 3SC8. Fuente: Autor | 57 |
| Figura 42 Tarjeta controladora de relevo. Fuente: Autor..... | 57 |
| Figura 43 Tarjeta Convertidora de señal. Fuente: Autor | 58 |
| Figura 44 OPTO 22 SNAP PAC R1. Fuente: Autor..... | 59 |
| Figura 45 Diagrama P&ID de la planta. Fuente: Autor | 61 |
| Figura 46 Diagrama de flujo del proceso de la instrumentación. Fuente: Autor | 62 |
| Figura 47 Diagrama de flujo del proceso de la Bomba Centrífuga EB-100A. Fuente: Autor..... | 63 |
| Figura 48 Diagrama de flujo del proceso de la Bomba Centrífuga EB-100B. Fuente: Autor..... | 64 |
| Figura 49 Diagrama de flujo del proceso de la Bomba Centrífuga en serie. Fuente: Autor..... | 65 |
| Figura 50 Diagrama de flujo del proceso de la Bomba Centrífuga en paralelo. Fuente: Autor..... | 66 |
| Figura 51 Diseño panel eléctrico de encendido y apagado del Banco de Pruebas de Bombas Centrífugas. Fuente: Autor | 79 |
| Figura 52 Diseño panel de control de la Planta de Bombas Centrífugas. Fuente: Autor..... | 80 |
| Figura 53 Características del PLC Modicon M340 en Unity Pro S. Fuente: Autor. 81 | |
| Figura 54 Bloque PID en Unity Pro S. Fuente: Autor | 84 |
| Figura 55 Interface de diseño gráfico en Vijeo Designer 6.2 Fuente: Autor | 86 |
| Figura 56 a) conexión Ethernet pantalla HMIGTO3510 b) Breaker de la pantalla HMIGTO3510. Fuente: Autor. | 87 |
| Figura 57 Comunicación con la pantalla HMIGTO3510. Fuente: Autor..... | 87 |
| Figura 58 Visualización del programa funcionando en la pantalla HMIGTO3510. Fuente: Autor..... | 88 |
| Figura 59 Relación de nivel del tanque TK102 y la respuesta en el sensor SRF06. Fuente: Autor..... | 91 |
| Figura 60 Lazo de control del banco de pruebas. Fuente: Autor..... | 91 |
| Figura 61 Controlador ON/OFF del proceso del Banco de Pruebas. Fuente: Autor. | 92 |
| Figura 62 Control ON/OFF. Fuente: Autor..... | 93 |
| Figura 63 Controlador PID del proceso del Banco de Pruebas. Fuente: Autor. | 94 |
| Figura 64 Control PID Fuente: Autor | 95 |

| | |
|---|-----|
| Figura 65 a) activación de la fuente de 24 V del banco de pruebas, b) Conexión de la fuente para la alimentación de las conexiones de la Figura 82. Fuente: Autor . | 99 |
| Figura 66 Conexión del PLC al panel eléctrico del banco de pruebas de bombas centrífugas. Fuente: Autor | 100 |
| Figura 67 Descripción del panel de la planta de bombas centrífugas. Fuente: Autor | 101 |
| Figura 68 Panel eléctrico físico de la planta de bombas centrífugas. Fuente: Autor | 103 |
| Figura 69 Pantalla de inicio de supervisión HMI. Fuente: Autor | 104 |
| Figura 70 Pantalla del proceso del banco de pruebas de supervisión HMI. Fuente: Autor..... | 104 |
| Figura 71 Pantalla de configuración del banco de pruebas en supervisión HMI. Fuente: Autor..... | 105 |
| Figura 72 Pantalla de configuración del banco de pruebas en supervisión HMI. Fuente: Autor..... | 106 |
| Figura 73 Pantalla del control ON/OFF de supervisión HMI del banco de pruebas. Fuente: Autor..... | 106 |
| Figura 74 Pantalla del control PID del banco de pruebas en HMI. Fuente: Autor | 107 |
| Figura 75 Pantalla de las gráficas del proceso del banco de pruebas en supervisión HMI. Fuente: Autor | 108 |
| Figura 76 Pantalla de históricos de eventos del banco en HMI. Fuente: Autor ... | 108 |
| Figura 77 Pantalla de inicio sistema SCADA. Fuente: Autor | 109 |
| Figura 78 Pantalla del proceso del sistema SCADA del Banco de Pruebas de Bombas Centrífugas. Fuente: Autor | 110 |
| Figura 79 Pantalla de configuración del banco de bombas en el sistema SCADA. Fuente: Autor..... | 111 |
| Figura 80 Pantalla de configuración manual del banco de bombas en el sistema SCADA. Fuente: Autor | 111 |
| Figura 81 Pantalla de control del banco de pruebas en el sistema SCADA. Fuente: Autor..... | 112 |
| Figura 82 Pantalla de tendencias de las variables del banco de pruebas. Fuente: Autor..... | 113 |
| Figura 83 Resultado control ON/OFF del nivel del tanque TK102 configuración EB100A. Fuente: Autor | 113 |
| Figura 84 Resultado control ON/OFF del nivel del tanque TK102 configuración EB100B. Fuente: Autor | 114 |
| Figura 85 Resultado control ON/OFF del nivel del tanque TK102 configuración serie. Fuente: Autor | 114 |
| Figura 86 Curva de reacción de las bombas centrífugas en serie..... | 115 |

| | |
|---|-----|
| Figura 87 Curva de reacción en matlab con un cambio en la FCV100 de %. | |
| Fuente: Autor..... | 116 |
| Figura 88 Curva de reacción de nivel y el modelo de la planta. Fuente: Autor. .. | 117 |
| Figura 89 Comparación métodos de dos puntos vs curva real. Fuente: Autor | 118 |
| Figura 90 Modelo de Viteckova vs curva real. Fuente: Autor | 118 |
| Figura 91 Esquema de control Simulink de Matlab de la panta de Bombas Centrífugas. Fuente: Autor. | 119 |
| Figura 92 Seguimiento de consigna del controlador PID. Fuente: Autor | 119 |
| Figura 93 Esquema de control Simulink de Matlab de la panta de Bombas Centrífugas. Fuente: Autor. | 120 |
| Figura 94 Seguimiento de consigna del controlador PID. Fuente: Autor | 120 |

LISTA DE TABLAS

| | |
|--|-----|
| Tabla 1 Ventajas y desventajas del lazo abierto. Fuente: [16] | 28 |
| Tabla 2 Ventajas y desventajas del lazo cerrado. Fuente: [16] | 29 |
| Tabla 3 Constantes para la identificación de los modelos de primer orden más tiempo muerto. Fuente: [19] | 35 |
| Tabla 4 Parámetros de sintonización de Ziegler y Nichols: Fuente: [22]..... | 35 |
| Tabla 5 Ventajas y desventajas de la automatización. Fuente: [24]..... | 36 |
| Tabla 6 Lenguajes de programación (PLCs) más comunes. Fuente: [27]..... | 39 |
| Tabla 7 Tanques de acrílico TK101 y TK102. Fuente: Autor..... | 51 |
| Tabla 8 Colores de los pilotos industriales. Fuente: Autor | 55 |
| Tabla 9 Instrumentación presente en el banco de pruebas. Fuente: Autor | 60 |
| Tabla 10 Funcionamiento general de Banco de Pruebas de Bombas Centrífugas. Fuente: Autor..... | 71 |
| Tabla 11 Mejoras que se implementara en el Banco de Pruebas de Bombas Centrífugas. Fuente: Autor | 78 |
| Tabla 12 Rangos de funcionamiento de los sensores y servoválvula del banco. Fuente: Autor..... | 82 |
| Tabla 13 Variables de programación utilizadas por el PLC M340 físicamente. Fuente: Autor..... | 83 |
| Tabla 14. Variables utilizadas en Unity Pro S, Vijeo Designer 6.2 y Vijeo Citect. Fuente: Autor..... | 84 |
| Tabla 15 Entradas del bloque PID en Unity Pro S. Fuente: [41]..... | 85 |
| Tabla 16 Caracterización del sensor SRF06. Fuente: Autor | 90 |
| Tabla 17 Parámetros del controlador PID en Unity Pro S. Fuente: [41] | 97 |
| Tabla 18 Entradas del bloque PID en Unity Pro S. Fuente: [41]..... | 97 |
| Tabla 19 Datos obtenidos de los métodos de dos puntos: Fuente: Autor | 117 |

LISTA DE ANEXOS

ANEXO 1 Norma ISA

ANEXO 2 Modicon M340

ANEXO 3 HMIGTO3510

ANEXO 4 Guías Prácticas

ANEXO 5 Manual de usuario

ANEXO 6 Artículo

ANEXO 7 Documentación Técnica

LISTA DE ABREVIATURAS

| Abreviatura | Término |
|--------------------|---|
| PLC | Controlador lógico programable |
| HMI | Interfaz hombre maquina |
| SCADA | Supervisión, Control y Adquisición de Datos |
| PAC | Controlador de automatización programable |
| SP | Set Point |

RESUMEN

Este proyecto tiene como objetivo el mejoramiento del Banco de Pruebas de Bombas Centrífugas, el cual fue implementado en un trabajo de grado anterior y se encuentra en el Laboratorio de Control de Procesos de la Universidad Autónoma del Cauca. De este modo, se plantea el control y supervisión utilizando el PLC Modicon M340, la pantalla HMIGTO3510 y el sistema SCADA, permitiendo que los estudiantes realicen diferentes prácticas de laboratorio y contribuir al mejoramiento de la calidad educativa.

Este proyecto tiene tres fases: la primera es la de funcionamiento y de adecuación de conexiones eléctricas, la segunda es del diseño de control y la tercera es la visualización. La primera fase se realiza la flexibilidad de las conexiones eléctricas y su respectivo funcionamiento. En la segunda parte se procede a realizar las conexiones al PLC con sus módulos que permiten el funcionamiento de la instrumentación y control de la planta. Por último se realiza la visualización, control y supervisión en la pantalla HMIGTO3510 y el sistema SCADA en Vijeo Citect, que permite monitorear el comportamiento de la planta, además de las variables de control de nivel y flujo de las diferentes señales obtenidas durante los procesos.

Palabras claves: PLC, Control, Supervisión, HMI, sistema SCADA, PID, interfaz gráfica.

ABSTRACT

The objective of this project is the betterment of the centrifugal pump test bench plant, the which was designed and implemented in a previous degree work and is located in the process control laboratory of the Autonomous University Corporation of Cauca. In this way, control and supervision is proposed using the Modicon M340 PLC, the HMIGTO3510 screen and the SCADA system, allowing students to perform different laboratory practices and contribute to the improvement of educational quality.

This project has three phases: the first is the operation and adequacy of electrical connections, the second is the design of control and the third is the visualization. The first phase is the flexibility of the electrical connections and their respective operation. In the second part, the connections to the PLC are made with their modules, this allows the operation of the instrumentation and control of the plant. Finally, the visualization, control and supervision in the HMIGTO3510 screen and the SCADA system in Vijeo Citect, are carried out which allows to monitor the behavior of the plant, as well as the level and flow control variables of the different signals obtained during the processes .

Keywords: PLC, Control, Supervision, HMI, SCADA system, PID, graphic interface.

INTRODUCCION

La Universidad Autónoma del Cauca, cuenta con un laboratorio de control de procesos, el cual se está dotando de diferentes plantas para que los estudiantes de ingeniería electrónica puedan realizar prácticas de control, supervisión y adquisición de datos mediante un sistema SCADA, por medio de este se tiene un entorno similar a las aplicaciones reales en donde se tiene múltiples instrumentos de control y medición.

En este trabajo se muestra la continuación del proyecto de grado titulado **“IMPLEMENTACION DE UN SISTEMA SCADA PARA EL TANQUE TK-102, UTILIZANDO UN PLC OPTO 22 SNAP PAC R1, EN EL BANCO DE PRUEBAS DE BOMBAS CENTRÍFUGAS EN SERIE Y PARALELO DEL LABORATORIO DE LA CORPORACION UNIVERSITARIA AUTONOMA DEL CAUCA”**, dado que el diseño y la construcción del banco de pruebas de bombas centrífugas que se desea mejorar se realizó en este, por consiguiente, en este trabajo se plantea mejorar la parte de automatización de esta planta, para que los estudiantes puedan afianzar sus conocimientos de control, PLC, Electiva HMI, SCADA y control de procesos, permitiendo de esta manera tener un mejor acercamiento con las aplicaciones reales en la parte industrial.

CAPITULO I CONTEXTO GENERAL

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la actualidad las tecnologías evolucionan de manera acelerada provocando la creación y producción de nuevos equipos con mejores capacidades, con altas prestaciones, con gran robustez y altas posibilidades de ser usados en aplicaciones de tipo industrial, generado mejoras en las técnicas usadas en los procesos de control de producción, además de mejorar la calidad de los productos y servicios obtenidos, gracias a la precisión de los instrumentos tecnológicos de hoy en día, por tal motivo las empresas en el momento de realizar adecuaciones a sus procesos optan por adquirir sistemas integrados de producción avanzados en tecnología que les permitan ser más competitivos empresarialmente. [1]

En los últimos años en Colombia las empresas adquieren tecnologías en procesos industriales para mejorar su producción y distribución, para ser más competitivas con respecto empresas internacionales, por esta razón, se hace necesario que los estudiantes adquieran habilidades en los diferentes campos del conocimiento presentes en la industria, considerando que, desde la formación de los profesionales, exista un enfoque complementario al de la academia, acercando los conocimientos adquiridos a ambientes reales encontrados en el que hacer del futuro ingeniero.

Por lo tanto, con lo expresado anteriormente se ha podido avanzar de una manera rápida y ser competitivas, gracias al enfoque de colaboración entre el estado, la academia y la industria, por consiguiente se considera indispensable que las universidades ayuden a desarrollar mejores habilidades en los nuevos profesionales de la ingeniería, para contribuir con el mejoramiento y desarrollo de nuestro país.

Teniendo en cuenta lo anterior, se plantea el siguiente interrogante:

¿Cómo hacer un sistema de control de nivel con supervisión para el Banco de Pruebas de Bombas Centrífugas de la Universidad Autónoma del Cauca para poder desarrollar diferentes prácticas de laboratorio de procesos?

1.2 JUSTIFICACIÓN

En Electrónica los nuevos profesionales deben ser mejor calificados con diversas habilidades, permitiendo estar expuestos a la tecnología, debido a que sigue avanzando de manera exponencial por los diferentes cambios que se realizan diariamente en todos los campos de aplicación, principalmente en áreas como: la nano electrónica, los sistemas de automatización, la robótica, las comunicaciones, entre otros.

Recientemente la Universidad Autónoma del Cauca se ha fortalecido en los campos de estudio de la carrera profesional de Ingeniería electrónica, por medio de la adquisición de nuevos y mejores equipos de control y automatización industrial de última tecnología, por tal motivo se tienen plantas con elementos industriales que nos permiten tener la posibilidad de realizar prácticas y la virtualización para emular los procesos industriales reales que un profesional va a realizar en la industria, tales procesos como: control de nivel, control de temperatura, control de presión, entre otras. Por lo tanto, este trabajo es justificado en fortalecer la enseñanza actual no solo en algún campo específico, sino en las diferentes áreas donde pueda contribuir dentro de la carrera profesional de manera práctica, por consiguiente en los cursos de PLC, SCADA, Electiva HMI, Sistema de control y Control de procesos.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo General

Implementar un sistema de control de nivel sobre el Banco de Pruebas de Bombas Centrífugas, utilizando para su supervisión un aplicativo en HMI y un sistema SCADA para las prácticas en el Laboratorio de Procesos de la Universidad Autónoma del Cauca.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Implementar un escenario de conexiones eléctricas con mayor flexibilidad de funcionamiento y operación para el Banco de Pruebas de Bombas Centrífugas del Laboratorio de procesos.

- Diseñar el sistema de control de nivel del Banco de Pruebas de Bombas Centrífugas y sus interfaces de supervisión en HMI y en sistema SCADA.
- Validar el funcionamiento del sistema de control implementado y generar guías en el curso de control de procesos industriales de Laboratorio de Procesos.

1.4 ENFOQUE METODOLÓGICO

La investigación es un conjunto de procesos que permiten estudiar un fenómeno o problema, para este proyecto se planteó el enfoque cuantitativo, debido a que se usa la recolección de datos para probar la hipótesis y diferentes teorías. [2]

Las Fases del proceso cuantitativo son las siguientes:

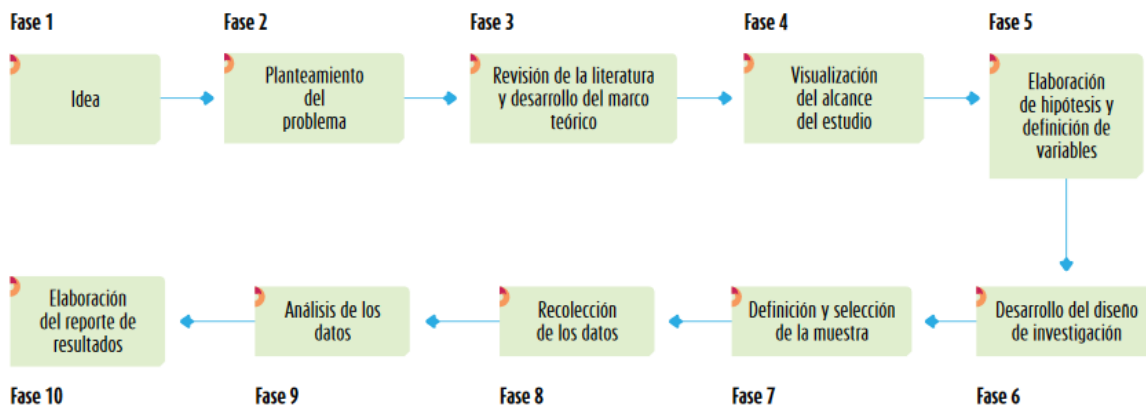


Figura 1 Fases del proceso cuantitativo. Fuente: [2]

CAPITULO II CONTEXTO GENERAL

2.1 MARCO CONCEPTUAL

En la implementación del sistema de control para el Banco de Pruebas de Bombas Centrífugas, es necesario tener conocimientos previos de las diferentes ramas de la ingeniería, por lo tanto se ha decidido realizar un marco conceptual que agrupe la temática necesaria para desarrollar e implementar el proyecto.

2.2 INSTRUMENTACION INDUSTRIAL

Es un conjunto de instrumentos que sirven para la medición y control de una planta o proceso. Existen dos clasificaciones en función del instrumento y según la variable de proceso [3]. Para este proyecto se utiliza según la función:

2.2.1 Instrumentos indicadores

Son aquellos que disponen de un índice y una escala graduada que muestran directamente el valor de la variable que se está midiendo del proceso. Además existen los indicadores analógicos y los digitales, en los cuales se puede visualizar de forma numérica con dígitos la variable del proceso. Ejemplos: manómetros, termómetros, entre otros, [4] como se observa en la Figura 2.



Figura 2 Instrumentos Indicadores. Fuente: [5]

2.2.2 Instrumentos ciegos

Son los que no muestran nada directamente de la variable, como los instrumentos de alarma, tales como: los presostatos (interruptores de presión) y los termostatos (interruptores de temperatura). También se considera instrumentos ciegos los transmisores de caudal, presión, nivel y temperatura que no tienen indicación. [4].

La Figura 3, muestran algunos ejemplos de instrumentos ciegos.



Figura 3 Instrumentos ciegos. Fuentes: [6] y Autor.

2.2.3 Elementos primarios

Son los instrumentos que están en contacto directo con la variable del proceso que se desea medir y dar respuesta al sistema de medición, es decir, a la variación de la variable controlada. El cambio puede ser de presión, fuerza, posición, medida eléctrica, entre otros. [4]

2.2.3.1 Sensor Ultrasónico SRF06

Es un sensor con protocolo de salida de corriente de 4 – 20 mA, se caracteriza por tener una banda muerta de 2 cm y su rango de medición es de 2 cm hasta los 5.1 m. [7] A continuación se observa en la Figura 4.



Figura 4 Sensor ultrasónico SRF06. Fuente: Autor

2.2.4 Transmisores

Estos elementos reciben la señal de la variable del proceso a través del elemento primario y la transmiten a distancia, estas son señales proporcionales a esas

variables; neumática (3 a 15 psi) o eléctrica de corriente continua (4 a 20 mA) o de tensión (1 a 5 V). [4]

2.2.4.1 Transmisor SIGNET 8550-1

Es un transmisor de flujo con una señal eléctrica de salida de 4-20 mA, además indica el caudal en litros o en galones, [8] para este proyecto como se observa en Figura 5.



Figura 5 Transmisor SIGNET 8550-1. Fuente: Autor

2.2.5 Transductores

Son los que reciben una señal de entrada en función de una o más cantidades físicas y la convierten en una señal de salida. Además pueden realizar operaciones matemáticas con señales de uno o más transmisores, un ejemplo de ellos se muestra en la Figura 6. Son transductores; un relé, un transmisor, entre otros. [4]



Sensor Ultrasonico
SRF06



Sensor de caudal
SIGNET 2100

Figura 6 Transductores. Fuente: Autor

2.2.6 Convertidores

Son los que reciben una señal de entrada procedente de un instrumento que puede ser neumática (3 a 15 psi) o electrónica (4 a 20 mA) y después de convertirla envía la señal de salida estándar. [4]

2.2.6.1 Tarjeta Convertidora de 4-20 mA a 1-5 Vdc

Es una tarjeta acondicionadora de señales que esta implementada para la conversión de corriente de 4-20 mA a voltaje 1-5Vdc conectada a las entradas analógicas del PLC y a la señal del sensor ultrasónico, como se observa en la Figura 7.

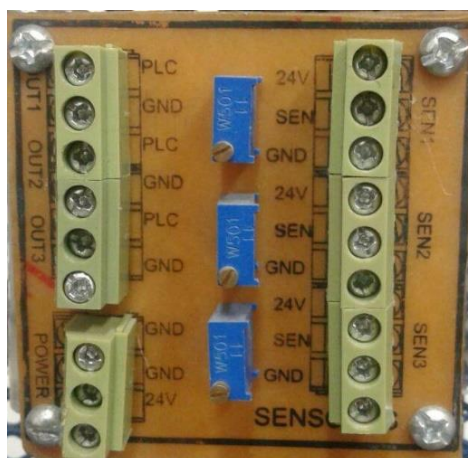


Figura 7 Tarjeta Convertidora. Fuente: Autor

2.2.7 Receptores

Reciben las señales de los transmisores o de un convertidor y las indican o registran, por ejemplo, ver Figura 8. Los receptores controladores envían otra señal de salida normalizada en señal neumática de 3 a 15 psi o electrónica de 4 a 20 mA que actúan sobre el elemento final de control. [4]



Figura 8 Receptor de frecuencia EB200, Fuente: [9]

2.2.8 Controladores

Son los encargados de realizar la función de comparar la variable controlada (presión, nivel, temperatura, flujo) del proceso con un SP y ejerce una acción correctiva de acuerdo con la desviación, además, la variable controlada, la pueden recibir directamente como controlador local o indirectamente en forma de señal neumática, electrónica o digital procedente de un transmisor. [4]

2.2.8.1 Control lógico programable (PLC)

Un control lógico programable (PLC) es un dispositivo electrónico de control que tiene hardware estándar, diseñado para controlar procesos en un ambiente industrial, [10] “para implementar soluciones específicas tales como: funciones lógicas, secuencias, temporizaciones, recuentos y funciones aritméticas, para controlar mediante entradas y salidas, digitales y analógicas diversos tipos de máquinas o procesos y gestionar sensores y actuadores”, [11] además un PLC, está diseñado para trabajar en condiciones adversas, proporcionando robustez y fiabilidad al sistema que controla.

Aplicaciones:

Los PLC se utilizan para el control de dispositivos básicos en los que no sea necesario un complejo control analógico ni de movimiento, las características

frecuentes de estos equipos son programas sencillos, memoria más limitada y en entradas y salidas discretas con control de encendido y apagado. Esto hace que los PLC resulten perfectos para controlar aplicaciones sencillas con requisitos de entradas y salidas mínimos.

2.2.8.2 Controlador Automático Programable (PAC)

Un controlador de automatización programable (Programmable Automation Controller) es un dispositivo electrónico industrial encaminado al control automatizado y a la medición, por lo tanto, el PAC combina eficientemente el control de un autómeta (controlador lógico programable o PLC) junto a la flexibilidad de monitorización y el cálculo de un PC. Está formado por un controlador, módulos de entradas y salidas, además de buses de datos que conectan todo, “este controlador combina eficientemente la fiabilidad de control de un autómeta o PLC junto a la flexibilidad de monitorización, cálculo y desempeño de un computador industrial”. [12] También poseen arquitecturas abiertas y modulares que admiten utilizar los equipos necesarios dependiendo la necesidad y la flexibilidad de comunicación, así mismo utiliza una variedad de lenguajes de programación. Por lo tanto, simplifica el proceso de expansión del sistema, supervisión y control de E/S y de procesos, igualmente facilita añadir o eliminar componentes.

Aplicaciones:

Los PAC son más utilizados para el control de procesos y de máquinas, entre los cuales se destacan los siguientes: adquisición de datos de precisión, monitoreo remoto, análisis matemático, visión artificial, control de movimiento y robótica, seguridad, entre otros.

2.2.8.3 PLC OPTO 22 SNAP PAC R1

En la planta de bombas centrífugas se encuentra empotrado el PLC OPTO 22 SNAP PAC R1 (ver Figura 9), el cual tiene las características de adquisición de datos analógicos y salidas analógicas en voltaje y corriente desde $-/+20\text{mA}$ y $-/+10\text{Vdc}$, además de su alta velocidad de respuesta en los puertos digitales de entrada y salida hasta los 60 Vdc. También cuenta con su propio software llamado PAC Project R9, a parte del entorno de gráficos PAC Display Configurator, que permite crear entornos gráficos utilizando variables de la estrategia asociada a los módulos de entradas analógicas o digitales, permitiendo asociarlas al sistema de control y adquisición de datos del sistema SCADA. [13]



Figura 9 Controlador PLC OPTO 22 SNAP PAC R1. Fuente: Autor

2.2.8.4 PLC Modicon M340 PAC

El Modicon M340 PAC es un PLC de la empresa de Schneider Electric, es un equipo modular debido a que se obtiene por separado sus componentes y se puede modificar dependiendo de las necesidades requeridas, de esta manera permite un mejor control y monitoreo de los dispositivos conectados del proceso, además lo complementa con el software para el autómatas Modicon M340 (Unity Pro S), Pantalla HMIGTO3510 (Vijeo Designer 6.2) y sistema de supervisión SCADA (Vijeo Citect 7.5 de 2015), las características técnicas según la empresa se pueden ver en el Anexo 2, por consiguiente por facilidad es la solución planteada para mejorar el funcionamiento y la adaptabilidad del Banco de Bombas Centrífugas de Laboratorio de Procesos de la Universidad Autónoma del Cauca, porque es el que tiene la universidad como se puede observar en la Figura 10, el PAC Modicon M340 empotrado en un módulo con sus respectivas conexiones para la planta del laboratorio de proceso de la Universidad .



Figura 10 Controlador PLC Modicon M340 Schneider Electric. Fuente: Autor

Características

Los módulos que tiene el PAC PLC Modicon M340 es DDM16025 de E/S digitales este es un módulo binario de 24VCC, además tiene 8 entradas digitales y 8 salidas de relé con 24VCC y AMM0600 de E/S analógicas, este es un módulo que tiene 4 entradas analógicas (1 a 5V/4 a 20 mA) y 2 salidas analógicas (4 a 20 mA y +/- 10V).

Aplicaciones: [14]

- Conteo
- Movimiento
- Control de procesos (Biblioteca Control de procesos integrados).

Para la realización del proyecto se decide trabajar con un PAC Modicon M340 (Ver Figura 9) de Schneider con el cual cuenta la Universidad en el Laboratorio de Procesos. Este equipo combina en una pequeña caja la flexibilidad y los servicios de altas prestaciones, además de la licencias de su respectivo software.

2.2.9 Elemento final de control

Es el elemento que recibe la señal del controlador estando en contacto directo con el proceso y modifica el agente de control. En el control electrónico, la válvula o el servomotor son accionados a través de un convertido de corriente (4 a 20 mA). [4], por ejemplo en la Figura 11 se observa los elementos finales de control que tiene la planta del Banco de Pruebas de Bombas Centrífugas.



Válvula electromecánica



Servo válvula



Bombas centrífugas

Figura 11 Elementos finales de control. Fuente: Autor

2.2.9.1 Válvulas solenoides

Una válvula solenoide es una válvula eléctrica empleada para controlar el paso de gas o fluidos en un proceso, para este caso el agua. Por otra parte, la apertura o cierre de la válvula se basa en impulsos electromagnéticos de un solenoide (un electroimán) que trabaja junto a un muelle diseñado para devolver a la válvula a su posición neutral cuándo el solenoide se desactiva, [3] la válvula solenoide utilizada en esta planta funciona a 110 Vac, es una de uso general y de dos vías, normalmente cerrada, ver Figura 11.

2.2.9.2 Bombas centrífugas

Es una bomba centrífuga de la marca Barnes modelo BQ60, ref. E0280 como se observa en la Figura 11, trabaja con 110vAC, con un consumo de corriente de 7.6 Amperios, con un máximo de caudal de 8 GPM (30.28Lt/min) y una potencia de ½ HP (caballo de fuerza). [15]

Aplicaciones

- Uso domestico
- Sector agrícola
- Industria
- Construcción
- Institucional

2.2.9.3 Servoválvula

Es una servoválvula Marca DANFOSS EV260B, trabaja a 24V y la salida es proporcional con regulación de voltaje continuo de 0 a 10V, utilizada para regular el caudal del líquido en una tubería, la cual varía la apertura de la válvula entre el cierre absoluto y la apertura total, ver Figura 11.

2.3 SISTEMAS DE CONTROL

Un sistema de control posee señales de entradas y salidas que permiten un dominio en un proceso, por consiguiente manteniendo una respuesta dentro de ciertos parámetros deseados y alcanza un valor prefijado o SP. Por ejemplo, el proceso

que se está desarrollando es un sistema de control de nivel, el cual posee dos tanques de acrílico y la idea es que los estudiantes puedan controlar el nivel y poder hacer programaciones para el control y poder seleccionar el tipo de control de diferente SP con perturbaciones para aprender a sintonizar un controlador, por ejemplo ingresando un valor determinado y luego abriendo la válvula para crear un disturbio y que la salida sea el valor deseado, también el control de procesos en el cual nuestro objetivo es mantener las señales en ciertos valores logrando con esto que el estudiante fortalezca su dominio en la práctica de control.

2.3.1 Conceptos de sistemas de control

Variable manipulada: Es la variable que se modifica con el fin de afectar la variable controlada. [16]

Planta: El sistema que se desea controlar. [16]

Señal de salida o variable controlada: Es la variable que se mide y se desea controlar (posición, velocidad, presión, temperatura) muchas veces es la salida del sistema. [16]

Señal de referencia o Set Point: Es el valor deseado de la variable de proceso, es decir que se desea que alcance la señal de salida, pero no siempre es la señal de salida del sistema. [16]

Error: Es la diferencia entre la variable del proceso y el SP. [16]

Señales de control: Es la señal que produce el controlador para modificar la variable controlada de tal forma que se disminuye o elimine el error. [16]

Perturbación: Es una señal que tiende a afectar la salida del sistema desviándola del valor deseado. [16]

2.3.2 Estrategia de control

2.3.2.1 Lazo abierto

Los sistemas en lazo abierto no tiene efecto en la salida sobre la acción de control, además cualquier perturbación desestabiliza el sistema y el control no realiza la tarea deseada para su respectiva corrección, por consiguiente, se emplea un control

en lazo abierto cuando se conozca la dinámica del sistema y estimando las perturbaciones, ver Figura 12. [16]

En la Tabla 1, se muestran las ventajas y las desventajas que posee el sistema de control en lazo abierto.

| Ventajas | Desventajas |
|--|---|
| I. Construcción simple y facilidad de mantenimiento. II. Menos costoso que el sistema cerrado. III. No hay problemas de estabilidad. | I. La perturbación y la calibración generan errores, por consiguiente, varía la salida deseada. II. Para mantener la salida deseada debido a perturbaciones, hay que recalibrar. III. La persona que sintonice el controlador debe tener experiencia. |

Tabla 1 Ventajas y desventajas del lazo abierto. Fuente: [16]

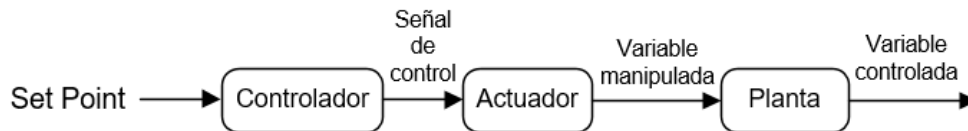


Figura 12 Lazo abierto. Fuente: [16]

2.3.2.2 Lazo cerrado

En un sistema de control en lazo cerrado en donde la acción de control se calcula en función del error medido entre la variable controlada y la señal de referencia o SP, con el fin de reducir el error y modificar la señal de control para que se establezca el sistema. No necesariamente la mayoría de los sistemas de control que se emplean en la actualidad son de lazo cerrado, ver Figura 13. [16]

En la Tabla 2, se describen las ventajas y las desventajas que tiene el sistema de control en lazo cerrado.

| Ventajas | Desventajas |
|--|--|
| I. Más exacto en los valores reales con la igualación de la variable controlada. | I. Hay una pérdida en la ganancia en cuanto a que la función de transferencia de un sistema en lazo abierto. |

| | |
|---|---|
| II. Menos sensible a las perturbaciones. | II. Existe una gran posibilidad de inestabilidad. |
| III. La velocidad de respuesta es mucho más rápida en los intervalos que el sistema responderá. | III. El sistema es más complejo, por lo tanto es más costoso. |

Tabla 2 Ventajas y desventajas del lazo cerrado. Fuente: [16]

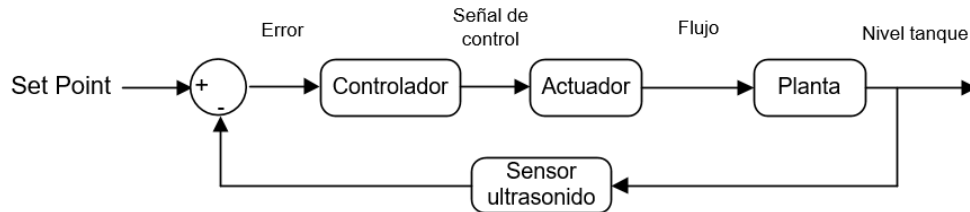


Figura 13 Lazo cerrado. Fuente: [16]

2.3.3 Tipos de sistemas de control

Existen diversos tipos de control industrial dependiendo de sus acciones de control, como son: control ON/OFF, control Proporcional (P), control Integral (I), control Proporcional-Integrativo, control Proporcional-Derivativo (PD), control Proporcional-Integral-Derivativo (PID), control Neuronal, control Difuso, entre otros. [16]

2.3.3.1 Control ON/OFF

Es un control todo o nada observar Figura 14, que permite al actuador del sistema estar en dos estados, para este caso es abierto o cerrado, además es un tipo de control bastante utilizado en los procesos industriales por sencillo y de bajo costo. [16]

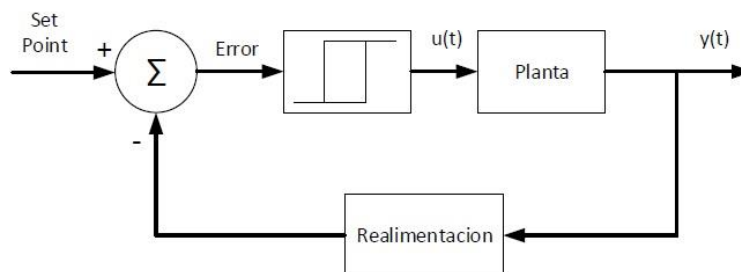


Figura 14 Control On Off. Fuente: [17]

Donde:

$u(t)$: Señal de control o variable manipulada

$y(t)$: Variable controlada o variable de salida del proceso

$e(t)$: Error

SP: Set point

Para este controlador se establece dos estados, los cuales están determinados y se describe a continuación:

$$u(t) = \begin{cases} u_{Max} & \text{si } e > 0 \\ u_{Min} & \text{si } e < 0 \end{cases}$$

2.3.3.2 Control PID

Este es un controlador que tiene retroalimentación, por medio de este se calcula el error presente en el proceso que existe entre el valor medido y el SP, permitiendo de esta manera controlar de manera adecuada el proceso en el transcurso del tiempo, esto varía dependiendo de los valores de las variables del controlador; proporcional, integral y derivativo. [16] Es uno controlador de los más utilizados en la industria.

La ecuación de un controlador PID es la siguiente: [18]

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt + K_p T_d \frac{d}{dt} e(t) \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

K_p : Constante proporcional

T_i : Tiempo integral

T_d : Tiempo derivativo

$e(t)$: Error

$u(t)$: Acción de control

La característica del controlador PID es la anticipación de cambios en la salida con la acción derivativa (tiempo derivativo), le permite realizar una predicción del errores futuros, la acción integral es la multiplicación de los errores pasado, además si se utiliza la acción proporcional el sistema se estabiliza más rápido y permite que el esfuerzo de control sea el apropiado. [18]

2.3.4 Métodos de la curva de reacción mediante métodos experimentales

2.3.4.1 Modelos

Dependiendo el comportamiento de la curva de reacción, los modelos pueden ser de primer segundo orden más tiempo muerto: [19]

- Primer orden más tiempo muerto POMTM

$$G_p(s) = \frac{K_p e^{-tms}}{\tau s + 1} \quad \text{Ecuación 2}$$

- Segundo orden sobreamortiguado más tiempo muerto SOSMTM

$$G_p(s) = \frac{K_p e^{-tms}}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)} \quad \text{Ecuación 3}$$

Para las ecuaciones anteriores 1 y 2

K_p : Ganancia del sistema

τ_1, τ_2 : Constante de tiempo

tm : Tiempo muerto

G_p : Función de transferencia

2.3.4.2 Curva de reacción

Mediante la curva de reacción en lazo abierto se obtiene el modelo dinámico de la planta y de esta manera por medio de los métodos de sintonización se hallan los valores de P (Proporcional), I (Integral) y D (Derivativo) del controlador. [19]

La curva de reacción se realiza mediante una prueba en lazo abierto llevando a la planta a un punto de operación deseado, luego se aplica un cambio en la entrada

de tipo escalón para que la variable del proceso reaccione y se registra la señal de salida, desde el instante en que se aplica el escalón de entrada hasta que el sistema alcance un nuevo punto de operación estable, ver Figura 15. [18]

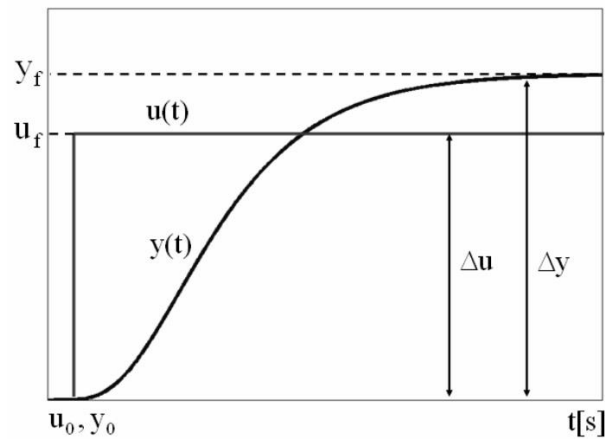


Figura 15 Curva de reacción (respuesta al escalón). Fuente: [20]

La ganancia K_p se obtiene con de relación entre la variable del proceso y el cambio en la variable manipulada, a partir de la siguiente ecuación:

$$K_p = \frac{\Delta y}{\Delta u} = \frac{Y_f - Y_0}{U_f - U_0} \quad \text{Ecuación 4}$$

2.3.4.3 Método de la tangente de Ziegler y Nichols

Fueron los primeros autores en proponer un método identificación como parte de un procedimiento de sintonización de controladores, consiste en trazar una recta tangente en su punto de máxima pendiente como se observa en la Figura 16. [20]

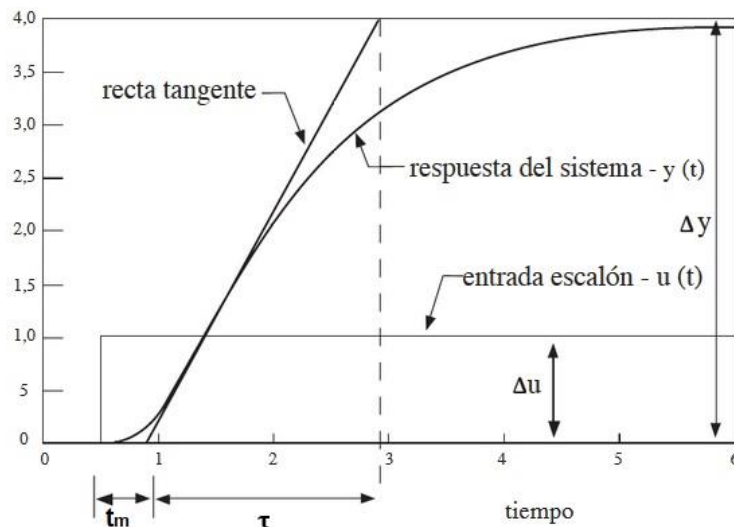


Figura 16 Método de la tangente de Ziegler y Nichols. Fuente: [21]

Para determinar la ecuación 2 del modelo de primer orden con retardo de tiempo se debe encontrar las constantes K_p , τ y t_m del sistema. [20] Las constantes anteriores se calculan en base a la respuesta real del proceso.

2.3.4.4 Método de la tangente Miller

Este procedimiento es una variación del método del Ziegler y Nichols, donde el tiempo requerido para la respuesta alcance 63.2% del cambio del valor final de la salida del proceso, además la respuesta del modelo y la curva de reacción deben coincidir como mínimo en un punto en el instante de tiempo $t = t_m + \tau$, como se observa en la Figura 17. [20]

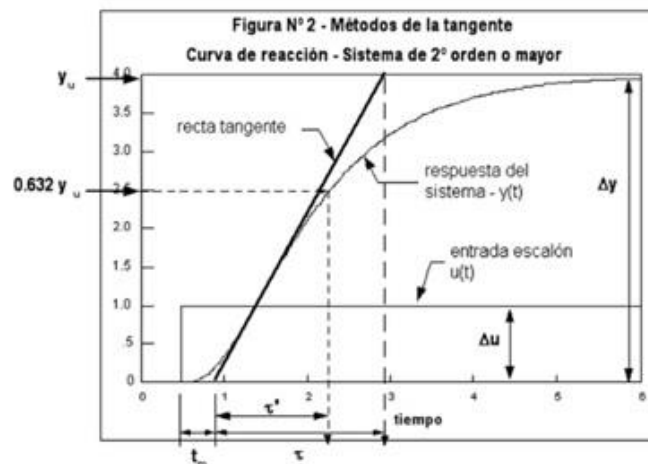


Figura 17 Método de la tangente de Ziegler y Nichols. Fuente: [19]

2.3.4.5 Método de dos puntos generalizado

Este método se trata de coincidir como mínimo en dos puntos la respuesta del modelo y la curva de reacción del proceso, en consecuencia para identificar un modelo de primer orden más tiempo muerto Ecuación 1 se observa la Figura 18, que muestra los puntos porcentuales (P_1 y P_2) ubicados en la curva de reacción del proceso, permitiendo determinar el tiempo (t_1 y t_2) en los puntos, por consiguiente para obtener los parámetros se realiza con las siguientes ecuaciones: [19]

$$\tau = at_1 + bt_2 \quad \text{Ecuación 5}$$

$$t_m = ct_1 + dt_2 \quad \text{Ecuación 6}$$

Para la ganancia K_p se realiza con la Ecuación 4.

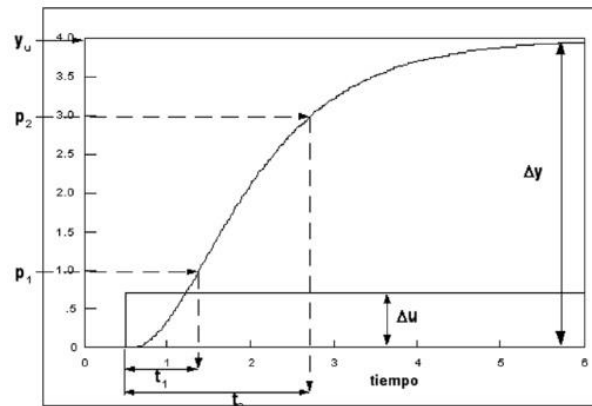


Figura 18 Método de dos puntos generalizado. Fuente: [19]

A continuación, se muestra los porcentajes del cambio en la respuesta para la determinación de los dos tiempos requeridos por el procedimiento de identificación, así como los valores de las constantes a, b, c y d para los diferentes en la Tabla 3. [19]

| Método | % P_1 (t_1) | % P_2 (t_2) | A | b | c | d |
|-------------|-------------------|-------------------|-------|------|-------|--------|
| Alfaro | 25 | 75 | -0.91 | 0.91 | 1.262 | -0.262 |
| Broida | 28 | 40 | -5.5 | 5.5 | 2.8 | -1.8 |
| Chen y Yang | 33 | 67 | -1.4 | 1.4 | 1.5 | 0.54 |
| Ho et al | 35 | 85 | -0.67 | 0.67 | 1.3 | -0.29 |
| Smith | 28,3 | 63.2 | -1.5 | 1.5 | 1.5 | -0.5 |

| | | | | | | |
|-----------|----|----|--------|-------|-------|--------|
| Viteckova | 33 | 70 | -1.245 | 1.245 | 1.498 | -0.498 |
|-----------|----|----|--------|-------|-------|--------|

Tabla 3 Constantes para la identificación de los modelos de primer orden más tiempo muerto.

Fuente: [19]

2.3.4.6 Respuesta de razón de asentamiento de un cuarto

Es una propuesta de Ziegler y Nichols para encontrar los parámetros de sintonización del controlador, después de tener el modelo de primer orden más tiempo muerto, permitiendo hallar las constante K_p , T_i y T_d como se observa en la Tabla 4.

| Tipo de controlador | | Ganancia Proporcional (K_c) | Tiempo de integración (T_i) | Tiempo de derivación (T_d) |
|----------------------------------|------------|---|---------------------------------|--------------------------------|
| Proporcional | P | $\frac{1}{K_p} \left(\frac{\tau}{t_m} \right)$ | - | - |
| Proporcional Integral | PI | $\frac{0.9}{K_p} \left(\frac{\tau}{t_m} \right)$ | $3.33t_m$ | - |
| Proporcional Integral Derivativo | PID | $\frac{1.2}{K_p} \left(\frac{\tau}{t_m} \right)$ | $2t_m$ | $\frac{t_m}{2}$ |

Tabla 4 Parámetros de sintonización de Ziegler y Nichols: Fuente: [22]

2.4 AUTOMATIZACIÓN

Es un proceso o sistema que realiza tareas con la mínima intervención del ser humano. La automatización ha ido evolucionando cada vez más, por motivo de los resultados obtenidos en varias áreas de la ingeniería, permitiendo dar origen a diversos campos temáticos en la automatización. [23]

La automatización está definida por niveles de jerarquía, donde el nivel más inferior es la instrumentación del proceso en campo y los niveles superiores es donde está relacionado con la toma de decisiones, como se observa en la Figura 19.



Figura 19 Pirámide de la automatización. Fuente: [23]

En la Tabla 5, se detalla las ventajas y las desventajas de la automatización.

| Ventajas | Desventajas |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • Mejora la productividad. | <ul style="list-style-type: none"> • Eliminación de puesto de trabajo. |
| <ul style="list-style-type: none"> • Disminuye costo de producción. | <ul style="list-style-type: none"> • Alto costo de implementación. |
| <ul style="list-style-type: none"> • Elimina labores rutinarias. | <ul style="list-style-type: none"> • Personal altamente calificado. |
| <ul style="list-style-type: none"> • Aumenta la calidad de los productos. | <ul style="list-style-type: none"> • Obsolescencia tecnológica. |

Tabla 5 Ventajas y desventajas de la automatización. Fuente: [24]

2.4.1 Sistema automatizado

Es un sistema en donde se realizan las tareas de producción, realizadas regularmente por humanos. [25]

Un sistema automatizado tiene dos áreas bien definidas:

- La parte operativa:

Son la parte de los accionadores, actuadores e instrumentación que actúan sobre el sistema automatizado de los procesos de la planta. [25]

- Parte de mando

Es donde se encuentran los dispositivos de control (PLC's o PC's industriales) y supervisión, por lo tanto el sistema encargado de este tipo de mando es el sistema SCADA, además coordina la parte operativa. [25]

La Figura 20 muestra la parte de control y la parte operativa de un sistema automatizado.

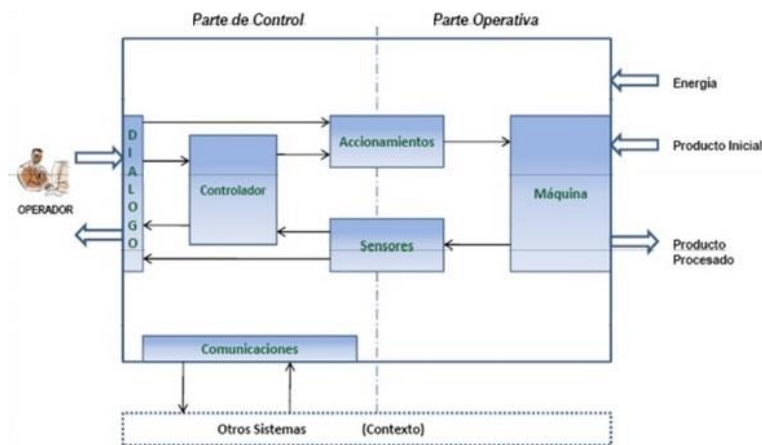


Figura 20 Estructura de un sistema automatizado. Fuente: [25]

2.4.2 Arquitecturas muy conocidas en automatización industrial

- **Control centralizado:**

Es el sistema encargado del control del proceso por medio de un elemento que maneja todo, una interfaz de proceso y una estación de operador que permite monitorear y supervisar, además si el sistema falla, el proceso no se realiza. [26]

- **Control distribuido:**

Es un sistema que se separa en procesos y tienen un control autónomo e independiente, lo que permite asignar un PLC a cada uno de ellos de acuerdo a sus requerimientos y gestionar un proceso más sencillo, además los PLC se encuentran enlazados por medio de una red de comunicaciones. [26]

2.4.3 Programación del PLC

Se habla de la programación de un PLC, refiriéndose a las distintas maneras de escribir instrucciones y ejecutarlas, permitiendo llevar a cabo la secuencia de trabajo deseado.

2.4.3.1 Lenguajes de programación

La norma IEC 61131-3 se refiere a los lenguajes de programación de los controladores lógicos programables, ver Tabla 6. [27]

| Lenguajes | Características | Ejemplo | Nivel |
|--------------------------------------|--|---|-------|
| Lista de instrucciones (IL) | <ul style="list-style-type: none"> Solo una operación está permitida por línea. Se ejecuta en orden secuencial. Se utiliza para implementar soluciones sencillas. La IL ya casi no se utiliza en la actualidad. | <pre>LD BotonPartir OR Motor AND NOT BotonParar OUT Motor</pre> <p>Fuente: [28]</p> | Bajo |
| Texto Estructurado (ST) | <ul style="list-style-type: none"> Permite cálculos complejos y funciones de control avanzadas. El ST es fácil de aprender a aquellos que tengan práctica en la escritura de lenguajes de programación en C. La programación se puede hacer de forma estructurada, rápida y sencilla. | <pre>IF (CajaFuerte=Abierta) AND (Horario=Laboral) THEN Indicador:=1; ELSE IF (CajaFuerte=Abierta) AND (Horario=Laboral) THEN Alarma:=1; END_IF; END_IF;</pre> <p>Fuente: Autor</p> | Alto |
| Diagrama de bloques de función (FBD) | <ul style="list-style-type: none"> Los programas son escritos mediante la organización de bloques con diferentes funciones e indicación de relaciones entre los bloques. Este lenguaje utiliza símbolos lógicos para representar al bloque de función. | <p>Fuente: [28]</p> | Alto |

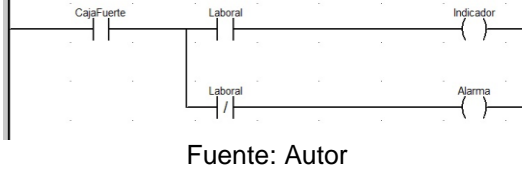
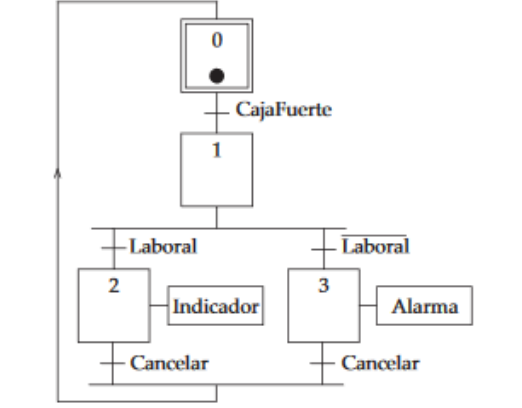
| | | | |
|--|--|--|-------------|
| | <ul style="list-style-type: none"> • Es común en la industria de procesos. • Se utiliza en aplicaciones que tienen flujo de información o datos entre componentes de control. | | |
| <p>Ladder (LD)</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Conjunto de simbología grafica estandarizada. • Está basado en la presentación grafica de la lógica de relés. • Elementos gráficos organizados en redes conectadas por barras de alimentación. • El flujo del programa es fácil de seguir y entender, aun para los principiantes. • Enclavamiento de máquinas. |  <p>Fuente: Autor</p> | <p>Alto</p> |
| <p>Diagrama funcional secuencial (SFC)</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Es un lenguaje que permite programar paso a paso, siguiendo una secuencia y están escritos como diagramas de flujo. • El flujo del programa es fácil de entender. • Secuencia de operaciones repetitivas. • Operación de máquinas de estados. |  <p>Fuente: [28]</p> | <p>Alto</p> |

Tabla 6 Lenguajes de programación (PLCs) más comunes. Fuente: [27]

Para este trabajo se utiliza el estándar IEC 61131, lo cual especifica la normativa sobre PLCs y su aplicación a procesos industriales de medición y control.

2.4.4 Comunicaciones

Las comunicaciones en la parte industrial es muy importante debido a que permite la conexión entre los instrumentos y equipos del proceso de una planta y el sistema

de control, por medio de señales analógicas, las cuales son: neumáticas de 0,2 a 1 bar se utilizan en plantas pequeñas y en válvulas de control, además las electrónicas van de 4 a 20 mA de corriente continua y las digitales, por otra parte, las comunicaciones permite tener una gran capacidad de volumen de datos y permite guardarlos, en la actualidad están aumentando día a día sus aplicaciones en la ámbito industrial. [3]

Las autómatas programables suelen estar conectados a toda una red de dispositivos que sirven en su conjunto para el control, manejo y supervisión del proceso automatizado.

2.4.4.1 Protocolos de comunicación industrial

Las comunicaciones industriales son las encargadas de estudiar la transmisión de información entre sistemas electrónicos que son utilizados para ejecutar tareas de control y gestión en los procesos de producción industrial. [3]

Los protocolos más comunes utilizados para comunicación industrial son los siguientes:

2.4.4.2 Protocolo de comunicación MODBUS/TCP

Es el protocolo de comunicación Modbus es más utilizado en entornos industriales y monitorización, además está encaminado a la transmisión de información entre distintos instrumentos electrónicos conectados a un mismo bus y a recibir datos de sensores, actuadores, y demás equipos industriales como Controladores Lógicos Programables (PLCs). [3]

“Modbus puede implementarse sobre cualquier línea de comunicación serie y permite la comunicación por medio de tramas binarias o ASCII con un proceso interrogación – respuesta simple, se utiliza como soporte físico el par trenzada o fibra óptica.” [29]

En la actualidad Modbus es soportado por el grupo de automatización Schneider (Telemecanique, Modicon), además es un sistema que tiene mayor disponibilidad para la conexión de dispositivos industriales, [14] a continuación en la Figura 16 se muestra la conexión en red Modbus de los PLC Modicon M340 de Schneider Electric, ver Figura 21.

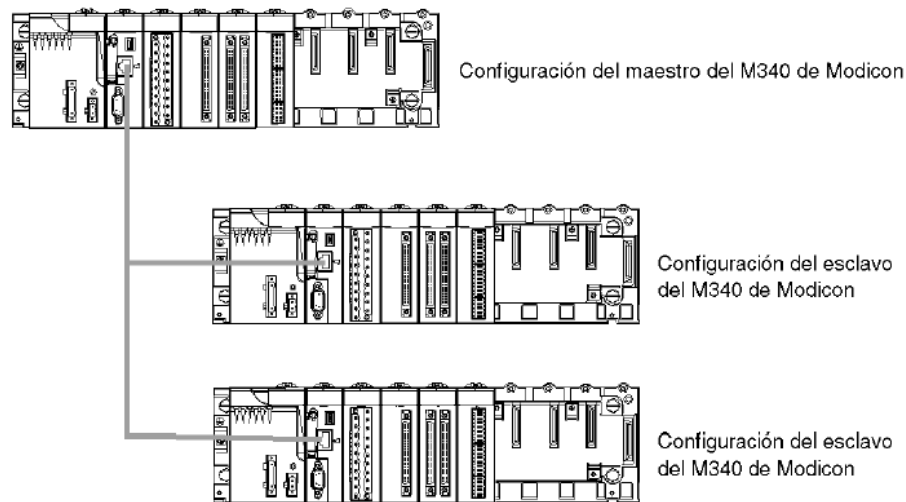


Figura 21 Red Modbus con el PLC M340 de Modicon. Fuente: [30]

2.4.4.3 Protocolo de comunicación PROFIBUS-DP

“Es una red abierta y dispone de tres perfiles de usuario: Profibus FMS (universal), Profibus DP (rápido) y Profibus PA (orienta a la aplicación con automatización de procesos incluso en áreas con riesgo de explosión y comunicación con equipos de campo)”, ver Figura 22. [3]

El protocolo PROFIBUS-DP es para la comunicación rápida con unidades próximas descentralizadas con rápidos tiempos de reacción, también existen numerosos equipos que van desde módulos sencillos de entradas o de salidas hasta controladores de motores y sistemas de automatización (orientado a sensores y actuadores conectados al PLC o terminales). [29]

Un sistema que tiene mayor disponibilidad para la conexión de dispositivos industriales, este protocolo por lo general tiene un maestro y varios esclavos.

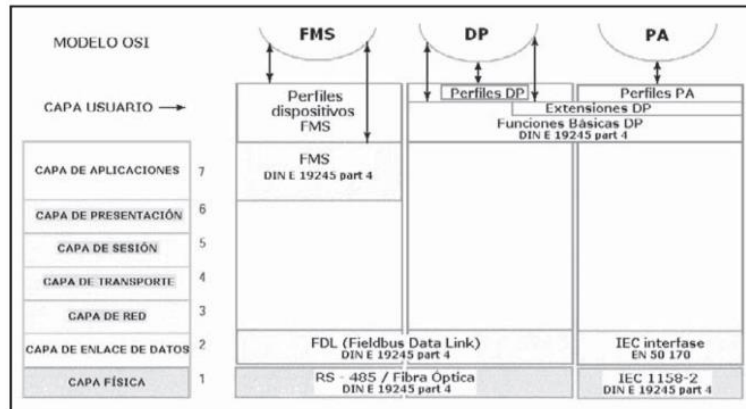


Figura 22 Profibus. Fuente: [3]

2.4.4.4 Protocolo de comunicación AS-I (Actuador Sensor Interface)

Es un bus de campo desarrollado inicialmente por Siemens, para la interconexión de actuadores y sensores binarios. “El bus AS-I es considerado uno de los sistemas de comunicación más sencillos y con menos prestaciones. Permite adoptar cualquier tipo de topología, además el medio físico de transmisión, emplea un único cable que permite tanto la transmisión como la alimentación de los dispositivos conectados a la red”. [29]

En la Figura 23, se explica una red AS-I y como es su conexión.

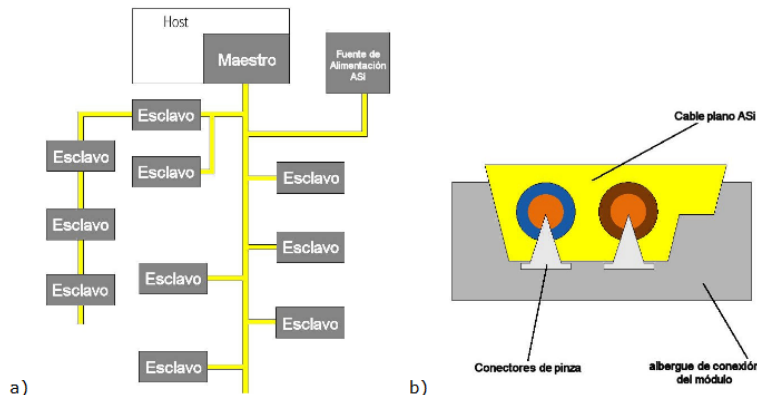


Figura 23 a) Esquema de distribución de una red AS- I. b) Cable AS-I y método de conexión. Fuente: [29]

- **Un maestro de bus AS-I**

Suele estar conectado a un PLC o al elemento de control principal.

- **Una fuente de alimentación AS-I**

Proporciona 30 VDC y hasta 8 A para suministrar a los elementos esclavos a través de un solo cable.

- **Los esclavos del bus AS-I**

Existen dos tipos:

1. Los que integran el protocolo en el mismo elemento de entrada/salida mediante un chip ASIC.
2. Los módulos AS-I genéricos que disponen de 4 entradas/salidas de tensión para poder conectarles a cualquier dispositivo sensor/actuador.

2.4.4.5 Protocolo de comunicación ETHERNET

También conocido como estándar IEEE 802.3, en la actualidad se ha desplazado hacia las redes industriales, permitiendo que diferentes protocolos de comunicación lo adopten como: Profibus, Modbus, entre otros. Debido a las ventajas fundamentales que aporta cuando es instalado en la industria (coste de instalación, rapidez, configuración, entre otras). [31]

La conexión entre el PLC y el centro de control y supervisión se realiza a través de un bus Ethernet con protocolo de red TCP/IP, además permite conectar equipos externos con el centro de control y supervisión, por lo tanto estos se conectan con el puerto de red disponible en la CPU del PLC. [31]

2.5 HMI

El HMI es un interfaz humano – máquina, el cual es un software de monitoreo y control de supervisión de procesos industriales, por lo tanto, este sistema permite monitorear señales y estados del proceso, por medio de dispositivos de campo tales como: sensores y actuadores. [32]

El HMI es una pantalla más pequeña con menos recursos de imágenes que se utiliza para indicar diferentes pantallas del proceso al usuario, pantalla de proceso, pantalla del tipo del controlador: ON/OFF, PID y seleccionar el SP, entre otras pantallas y funciones.

2.6 Sistema SCADA

El Sistema SCADA es un sistema de control, supervisión y adquisición de datos [33], que permite supervisar y controlar a distancia un proceso de una planta o una instalación industrial, además admite que el operador tenga acceso completo al proceso mediante su visualización en una pantalla. [34]

El sistema SCADA permite comunicarse con los diferentes dispositivos de campo (sistemas de medición, actuadores, controladores, PLC, entre otros), para controlar todo el proceso o la planta de forma automática por medio de la pantalla del ordenador que está configurada por el usuario y puede ser modificada con facilidad., también permite proveer de toda la información que se genera en el proceso o la planta a sus diversos usuarios.

Frecuentemente, las palabras HMI y SCADA provocan cierta confusión, su diferencia está en la función de supervisión que pueden realizar, el sistema SCADA está diseñado para la supervisión del control de los procesos de forma automática en un ordenador. Por otro lado, lo que se menciona como pantalla HMI se define como un panel capaz de controlar los dispositivos y procesos en una planta, es decir, los sistemas de interfaz gráfica de este tipo ofrecen al operario una gestión básica de la planta tales como: realizar activación de equipos, paradas de emergencia y ver lecturas de los instrumentos de medición, entre otras. [34]

2.6.1 Funciones principales de un sistema SCADA

- Adquisiciones de datos:

Los datos se envían desde el PLC o PAC al ordenador, el cual se encarga de recoger, procesar y almacenar la información del proceso recibida. [34]

- Control:

Permite realizar modificaciones a la evolución del proceso desde la aplicación de supervisión y control. Esto actuando sobre los autómatas, modificando los estados y valores de las variables de salida. [34]

- Almacenamiento de datos:

Se pueden almacenar de manera eficiente los datos obtenidos de las variables del proceso. [34]

- Supervisión:

Para observar la evolución y comportamiento de las variables de control, mediante un monitor. Un buen diseño de la interfaz de visualización debe contar con distintos niveles que muestren la operación de la planta en tiempo real. [34]

1. Mostrar una visión general de la planta a controlar. [34]
2. Mostrar el detalle de un subproceso de la planta y solo se desplegarán las variables más importantes. [34]
3. Presentar todos los detalles de cada uno de los equipos del sub proceso, tales como alarmas, información de sensores, variables y comandos de control. Los gráficos deben ser lo más claro posibles, mostrando toda la información importante evitando saturar la pantalla con excesivos datos. [34]

2.6.2 Características de un sistema SCADA

Los módulos o bloques de software de un sistema SCADA son los siguientes:

- Configuración:

Permite elegir el entorno de trabajo al usuario como son las pantallas graficas o de texto, los diferentes usuarios y la comunicación con los dispositivos de campo. [34]

- Interfaz gráfica del operador:

Proporciona al operador las funciones de control y supervisión de la planta. Por lo tanto, para diseñar las pantallas se debe tener en cuenta que deben tener una “apariencia consistente, con zonas diferenciadas para mostrar la

pantalla (sinópticos), las botoneras y entradas de mando (control) y las salidas de mensajes del sistema (estados, alarmas)". [34]

- Módulo de proceso:

Ejecuta las acciones de mando pre programado a partir de valores actuales de variables leídas. Como el control de proceso, análisis de tendencias, generación de históricos, entre otros. [34]

- Gestión y archivo de datos:

Se encarga del almacenamiento y procesado ordenado de los datos de forma que otro dispositivo o aplicación pueda acceder a ellos. [34]

2.7 TRABAJOS RELACIONADOS

En [10], el autor realiza un tablero de control y un sistema de automatización de un ascensor para discapacitados en la ciudad de Riobamba del al Mirador del Parque Guayaquil "Parque Infantil".

En [35], el autor expone la creación de un sistema controlado por un PLC ubicado en el edificio IFCA, el cual es un sistema SCADA para el servicio de infraestructura de la universidad de Cantabria, que sustituyera el sistema de automatización de las calderas de la IFCA y que fuera propiedad de la universidad.

En [36], el autor expone como controlar el nivel de dos depósitos por medio de un sistema SCADA con una interfaz HMI, el cual puede controlar y visualizar todo el proceso que se ejecuta en la planta de laboratorio.

En [11], se presenta un sistema Scada para el control y monitoreo de la dosificación de líquidos a los problemas de corrosión industrial en un prototipo de laboratorio desarrollado en la Universidad Pontifica Bolivariana.

En [37], se describe la propuesta de automatización de la red de distribución de agua potable en la planta de tratamiento de Puerto Tejada, además de la implementación de un sistema Scada para el monitoreo.

En [38], se describe el diseño e implementación de un sistema SCADA para el laboratorio de fluidos de la facultad de ingeniería mecánica de la Escuela Politécnica Nacional, conectado a un PLC para supervisar el funcionamiento de ensayo de la bomba centrífuga utilizando un PLC Siemens S7-1200 con su respectiva interfaz gráfica para el usuario.

En [39], el autor explica el modelamiento de un sistema de manufactura flexible mediante HMI/SCADA como herramienta de supervisión y control de un caso de estudio en el laboratorio CTAI de la Pontificia Universidad Javeriana, con software Vijeo Citect y LabVIEW.

CAPITULO III. REDISEÑO DEL BANCO DE PRUEBAS DE BOMBAS CENTRÍFUGAS.

En este capítulo se describen los procesos elaborados para el rediseño del Banco de Pruebas de Bombas Centrífugas que se encuentra en el Laboratorio de Control de Procesos de la Universidad Autónoma del Cauca, desde la comprobación de funcionamiento e instalación del tablero de conexiones eléctricas hasta el control y supervisión de la planta por medio de la pantalla HMI y el sistema SCADA.

Por este motivo, este proyecto se relaciona con la instrumentación industrial presente en la Planta de Bombas Centrífugas y los diagramas de instrumentación, además de la programación del PLC con un nuevo programa realizado para el control del sistema de bombas centrífugas, el cual fue diseñado para el PAC Modicon M340 de Schneider Electric, que se programó utilizando el software Unity Pro S versión 11.0 propio de la marca.

Por otra parte, la visualización se realizó para el usuario en pantallas HMI (Vijeo Designer versión 6.2) y SCADA (Vijeo Citect versión 7.5). Los anteriores programas se encuentran licenciados por la Universidad Autónoma del Cauca.

Por medio de los equipos PAC Modicon M340 y HMIGTO3510 conectados a la planta y al PC, se realizó el control y supervisión mediante HMI y el sistema de supervisión SCADA para la planta de bombas centrífugas.

Por otra parte, se desea mejorar el sistema de supervisión SCADA con el que cuenta el Banco de Pruebas de Bombas Centrífugas, debido a que poco se utiliza en las diferentes asignaturas, igualmente la tarjeta de salidas analógicas se encuentra dañada y no ha podido ser reemplazada, por este motivo no se puede realizar el respectivo control y supervisión de la planta por medio del PLC OPTO 22 SNAP PAC R1 completamente. Por consiguiente se desea reemplazar primero que todo el PAC OPTO 22 por un PAC Modicon M340 de Schneider Electric, porque la universidad tiene este tipo de equipos y pantallas HMIGTO3510, así mismo este autómatas cuenta con módulos de entradas y salidas digitales y analógicas lo que permite tener comunicación con todos los dispositivos conectados en el Banco de Pruebas de Bombas Centrífugas y tiene el módulo de entrada y salida analógica con la comunicación estándar de 4 – 20 mA en corriente para el sensor de ultrasonido que tiene el TK-102 para la medición de nivel de agua y de -10v a +10v para el funcionamiento de la servoválvula. Del mismo modo se desea implementar el sistema de supervisión y de control no solo del sistema SCADA, sino de una

pantalla HMIGTO3510 de la empresa Schneider Electric, porque en las asignaturas de últimos semestres como: PLC, SCADA, electiva HMI, sistemas de control y control de procesos respecto a la industria se utilizan, de este modo se puede utilizar para realizar diversas prácticas en ellas.

3.1 ESTADO ACTUAL Y FUNCIONAMIENTO DE LA INSTRUMENTACION DEL BANCO DE PRUEBAS DE BOMBAS CENTRÍFUGAS

En esta sección se describe de manera general el funcionamiento del Banco de Pruebas de Bombas Centrífugas actual como se observa en la Figura 24, además de la instrumentación necesaria para realizar el respectivo control del banco de pruebas. Este banco de pruebas se va a automatizar, por consiguiente se va a mejorar la capacidad de automatización por medio de un PAC Modicon M340 lo que permite realizar más prácticas de las diferentes asignaturas para complementar la teoría y el uso de los PLC, además de que se necesita flexibilizar las conexiones eléctricas que cuenta actualmente la planta del banco de pruebas, permitiendo de esta manera mejorar las conexiones con otros dispositivos externos con el banco de pruebas.

El banco de pruebas de control de nivel existente se puede observar en la Figura 24 y se encuentra en el laboratorio de procesos de la universidad, este posee un PLC OPTO 22 SNAP PAC R1 que realiza el control del nivel, el cual tiene bombas centrífugas, válvulas solenoides, entre otros elementos, que permiten trabajar en condiciones individuales, en serie y paralelo de las bombas centrífugas.



Figura 24 Banco de Pruebas de bombas centrífugas. Fuente: Autor

3.1.1 Instrumentación del Banco de Pruebas de Bombas Centrífugas

Este banco se compone de siguiente instrumentación.

3.1.1.1 Tanque reservorio

Es un tanque cilíndrico de PVC de color blanco que permite almacenar agua, como se puede observar en la Figura 25 y se utiliza como reservorio principal para el Banco de Pruebas de Bombas Centrífugas y a la vez permite recibir el líquido de los tanques de acrílico superiores permitiendo reutilizar el agua.



Figura 25 Tanque reservorio TK103. Fuente: Autor

3.1.1.2 Tanques en acrílico

Son tanques en acrílico de calibre 4mm con 32 cm de ancho, 45 cm largo y 40 cm de alto que puede almacenar 46 litros por tanque. El Banco de Pruebas de Bombas Centrífugas tiene 2 tanques en acrílico, los cuales están ubicados de la siguiente manera, ver Tabla 7:

| Tanque | TK101 | TK102 |
|----------------|--|--|
| Ubicación | Este se encuentra ubicado en la estructura en la parte superior. | Este se encuentra ubicado en la estructura en la parte central. |
| Característica | Es utilizado como tanque auxiliar para las configuraciones del Banco de Pruebas de Bombas Centrífugas, tales como: individual, serie y paralelo. | Es utilizado como tanque principal en donde se realiza el control de nivel por medio de un sensor SRF06 y permite las diferentes configuraciones del Banco de Pruebas de Bombas Centrífugas. |
| Imagen | | |

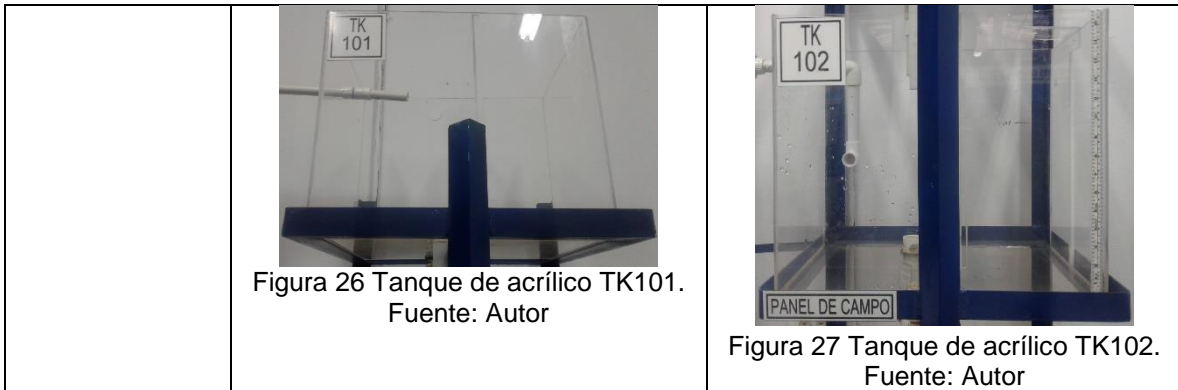


Tabla 7 Tanques de acrílico TK101 y TK102. Fuente: Autor

3.1.1.3 Bombas Centrífugas

En el banco de pruebas se tienen 2 bombas centrífugas, las cuales se visualizan en la Figura 28, así mismo, suministran el líquido del tanque reservorio hacia los tanques superiores (TK101 Y TK102), dependiendo de las configuraciones: individuales, serie y paralelo.



Figura 28 Bombas centrífugas BARNES-QB60. Fuente: Autor

3.1.1.4 Válvula solenoide

Son utilizadas frecuentemente para abrir o cerrar el paso de un líquido a través de una tubería. Para este Banco de Pruebas de Bombas Centrífugas se tienen seis válvulas solenoide como se observa en la Figura 29 y son normalmente cerradas, dependiendo de su combinación (abrir o cerrar) se puede configurar las bombas centrífugas en individuales, serie y paralelo.



Figura 29 Válvula solenoide EBC-HQ. Fuente: Autor

3.1.1.5 Válvulas manuales de bypass

El Banco de Pruebas de Bombas Centrífugas tiene 2 válvulas manuales, como se observa en la Figura 30, de tipo bola que permiten variar el fluido por medio del cierre o apertura de las mismas, esto es BYPASS, además de regular el caudal dirigido a los tanques superiores (TK101 y TK102).



Figura 30 Válvulas manuales BYPASS. Fuente: Autor

3.1.1.6 Servoválvula

El Banco de Pruebas de Bombas Centrífugas tiene una servoválvula y es la encargada de regular el caudal a los tanques superiores (TK101 y TK102) y esto permite realizar las diferentes configuraciones de las bombas centrífugas y el control de nivel (ON/OFF o PID), por medio del cierre y la apertura total que admite la regulación de voltaje continuo (0V-10V), ver Figura 31.



Figura 31 Servoválvula DANFOSS EV260B. Fuente: Autor

3.1.1.7 Válvulas manuales de PVC

El Banco de Pruebas de Bombas Centrífugas tiene 2 válvulas de PVC como se ilustra en la Figura 32, ubicadas en la parte debajo de cada tanque superior (TK101 y TK102), estas se encuentran diferenciadas por el color rojo y azul; la de color rojo permite vaciar el tanque, por ser de mayor diámetro y la de color azul permite ser utilizada como disturbio en los tanques.

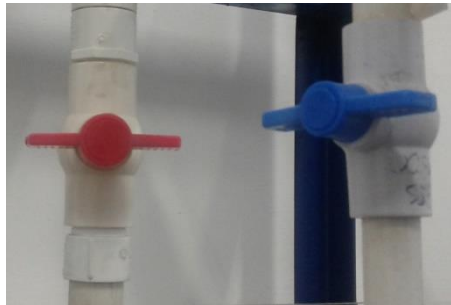


Figura 32 Válvulas manuales. Fuente: Autor

3.1.1.8 Sensor ultrasónico SRF06

El Banco de Pruebas de Bombas Centrífugas tiene un sensor ultrasonido SRF06, como se observa en la Figura 33, que permite realizar la medición del nivel del agua en el tanque TK102 en cm.



Figura 33 Sensor ultrasónico análogo SRF06. Fuente: Autor

3.1.1.9 Sensor de caudal SIGNET 2100

El Banco de Pruebas de Bombas Centrífugas tiene un sensor de caudal SIGNET 2100 como se observa en la Figura 34 y un transmisor de la misma marca, lo que permite determinar el caudal en la tubería de salida desde 0 a 10 GPM (0 a 38 Lt/min).



Figura 34 Sensor de caudal SIGNET 2100. Fuente: Autor

3.1.1.10 Transmisor de FLUJO SIGNET 8550-1

El Banco de Pruebas de Bombas Centrífugas tiene un transmisor de flujo, el cual es el encargado de transmitir la señal del sensor de caudal SIGNET 2100 y permite mostrar el caudal en litros por minuto, como se visualiza en la Figura 35, además permite enviar la señal al PLC para ser procesada, también se visualiza en el sistema HMI y el sistema SCADA.



Figura 35 Transmisor SIGNET 8550-1. Fuente: Autor

3.1.1.11 Pilotos industriales

Son los encargados de mostrar que dispositivos y equipos del Banco de Pruebas de Bombas Centrífugas de campo están funcionando, por consiguiente se diferencia debido a los colores, como se observa en la siguiente Tabla 8.

| Color | Amarillo | Azul | Verde |
|----------------|---|--|--|
| Función | Indica que la válvula solenoide está funcionando. | Indica que la bomba centrífuga este funcionamiento. | Indica que todo el banco de pruebas tiene alimentación de 110 VAC y está en funcionamiento. |
| Imagen |  <p>Figura 36 Indicadores de las válvulas solenoide. Fuente: Autor</p> |  <p>Figura 37 Indicadores de las bombas centrífugas. Fuente: Autor</p> |  <p>Figura 38 Indicador de funcionamiento de la planta de bombas centrífugas. Fuente: Autor</p> |

Tabla 8 Colores de los pilotos industriales. Fuente: Autor

3.1.1.12 Perilla de parada de emergencia

El Banco de Pruebas de Bombas Centrífugas tiene un dispositivo de emergencia que permite aislar o cerrar la línea de alimentación de 110VAC para la instrumentación de campo como son: bombas centrífugas y válvulas solenoides,

este funciona como un switch en caso de una parada de emergencia permite aislar la alimentación eléctrica, se debe tener en cuenta que esta perilla siempre está normalmente abierta (NA), esta perilla se visualiza en la siguiente Figura 39.



Figura 39 Perilla de parada de emergencia. Fuente: Autor

3.1.1.13 Fuentes de voltaje

El Banco de Pruebas de Bombas Centrífugas tiene 3 fuentes de alimentación como se observa en la Figura 40, las cuales son:

1. 5VDC a 3 A
2. 12VDC a 3A
3. 24VDC a 2A

Estas se utilizan para la alimentación de la tarjeta controladora de relevos, tarjeta convertidora de señales de corriente a voltaje, sensor SRF06, sensor SIGNET 2100, transmisor de caudal, la servoválvula y el PLC OPTO 22 SNAP PAC R1.



Figura 40 Fuentes de voltaje (De arriba hacia abajo 5VDC, 12VDC, 24VDC). Fuente: Autor

3.1.1.14 Contactores y relés térmicos

El Banco de Pruebas de Bombas Centrífugas tiene 2 contactores de potencia que permiten activar las bombas centrífugas y 2 relés térmicos para protegerlas de sobrecargas de tensión, tal como se observa en la Figura 41.



Figura 41 Contactores SASSIN 3SC8. Fuente: Autor

3.1.1.15 Tarjeta controladora de relevos

El Banco de Pruebas de Bombas Centrífugas tiene una tarjeta controladora de relevos para los voltajes de las fuentes y distribuirlos a los dispositivos como se ilustra en la Figura 42, además de seleccionar el tipo de controlador a utilizar. Los dispositivos conectados a esta tarjeta son: el sensor SRF06, el sensor de SIGNET 2100, transmisor de flujo SIGNET 8550-1, la servoválvula, el PLC OPTO 22 SNAP PAC R1 y el voltaje de 110VAC para las bombas centrífugas y las válvulas solenoides.

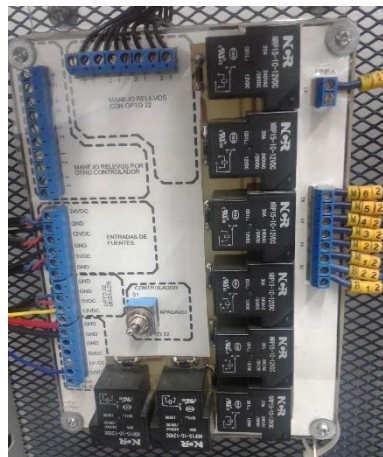


Figura 42 Tarjeta controladora de relevo. Fuente: Autor

3.1.1.16 Tarjeta Convertidora de señales

El Banco de Pruebas de Bombas Centrífugas tiene una tarjeta Convertidora de señales que permite la conversión de corriente (4mA – 20mA) a voltaje (1 – 5VDC) esto se visualiza en la Figura 43, para poder utilizar las señales del sensor SRF06 y el transmisor de caudal para ser enviadas al módulo de entradas analógicas del PLC OPTO 22 (modulo SNAP-AOV-27).

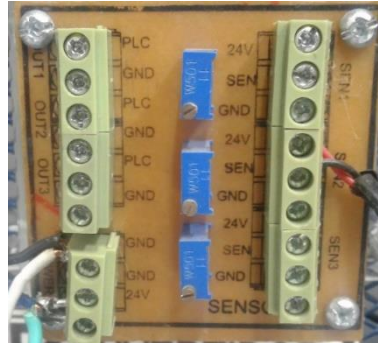


Figura 43 Tarjeta Convertidora de señal. Fuente: Autor

3.1.1.17 PLC OPTO 22 SNAP PAC R1

El Banco de Pruebas de Bombas Centrífugas tiene un PLC OPTO 22 SNAP PAC R1 (ver Figura 44), el cual está empotrado al panel de control, este es el utilizado en la planta porque fue con el que se realizó el anterior proyecto de grado titulado “IMPLEMENTACION DE UN SISTEMA SCADA PARA EL TANQUE TK-102, UTILIZANDO UN PLC OPTO 22 SNAP PAC R1, EN EL BANCO DE PRUEBAS DE BOMBAS CENTRÍFUGAS EN SERIE Y PARALELO DEL LABORATORIO DE LA CORPORACION UNIVERSITARIA AUTONOMA DEL CAUCA”, este PLC posee 4 módulos externos como se describe:

- 2 módulos de salidas digitales

En estos módulos se encuentran conectados las válvulas solenoides y las bombas centrífugas.

- Un módulo de entrada analógica

Este módulo está configurado (-10 - +10 VDC) y se encuentran conectados el sensor de nivel SRF06 y el transmisor de flujo SIGNET 8550-1.

- Un módulo de salida analógica

Este módulo se encuentra configurado (-10 - +10 VDC) y se encuentra conectado a la servoválvula.



Figura 44 OPTO 22 SNAP PAC R1. Fuente: Autor

3.1.2 Reconocimiento de la instrumentación

En la presente Tabla 9 se observa la instrumentación que se encuentra en el Banco de Pruebas de Bombas Centrífugas:

| Nombre | TAG | Ubicación |
|-------------------------------|---|------------------|
| Bombas centrífugas | EB100A, EB100B | Panel de campo |
| Tanque reservorio | TK103 | Panel de campo |
| Tanque de acrílico | TK101, TK102 | Panel de campo |
| Válvula solenoide | FV100A, FV100B, FV100C, FV100D, FV100E, FV100F | Panel de campo |
| Válvula manual de bypass | HV100A, HV100B | Panel de campo |
| Válvula manual PVC | HV100C, HV100D, HV100E, HV100F | Panel de campo |
| Sensor de caudal SIGNET | FE100 | Panel de campo |
| Sensor ultrasonido | LE101 | Panel de campo |
| Transmisor indicador de flujo | FIT100 | Panel de control |

| | | |
|---------------------------------|---|------------------|
| Luces piloto | FV100A, FV100B, FV100C, FV100D, FV100E, FV100F | Panel de control |
| Indicadores de estado | EB100A, EB100B | Panel de control |
| Perilla de parada de emergencia | | Panel de control |
| Controlador lógico programable | PLC100 | Panel de control |
| Tarjeta controladora de relés | FY100 | Panel de control |
| Relé Motor | RM1, RM2 | Panel de control |
| Relé Térmico | RT1, RT2 | Panel de control |
| Breaker | | Panel de control |

Tabla 9 Instrumentación presente en el banco de pruebas. Fuente: Autor

3.1.3 DIAGRAMAS

3.1.3.1 Diagrama P&ID de la planta

El diagrama P&ID es el diseño de las tuberías e instrumentación del proceso, así mismo muestra los equipos instalados teniendo en cuenta las conexiones como lo exige la norma ISA S5.1 que se encuentra en el Anexo 1, a continuación se observa en la Figura 45 el diagrama P&ID del Banco de Pruebas de Bombas Centrífugas.

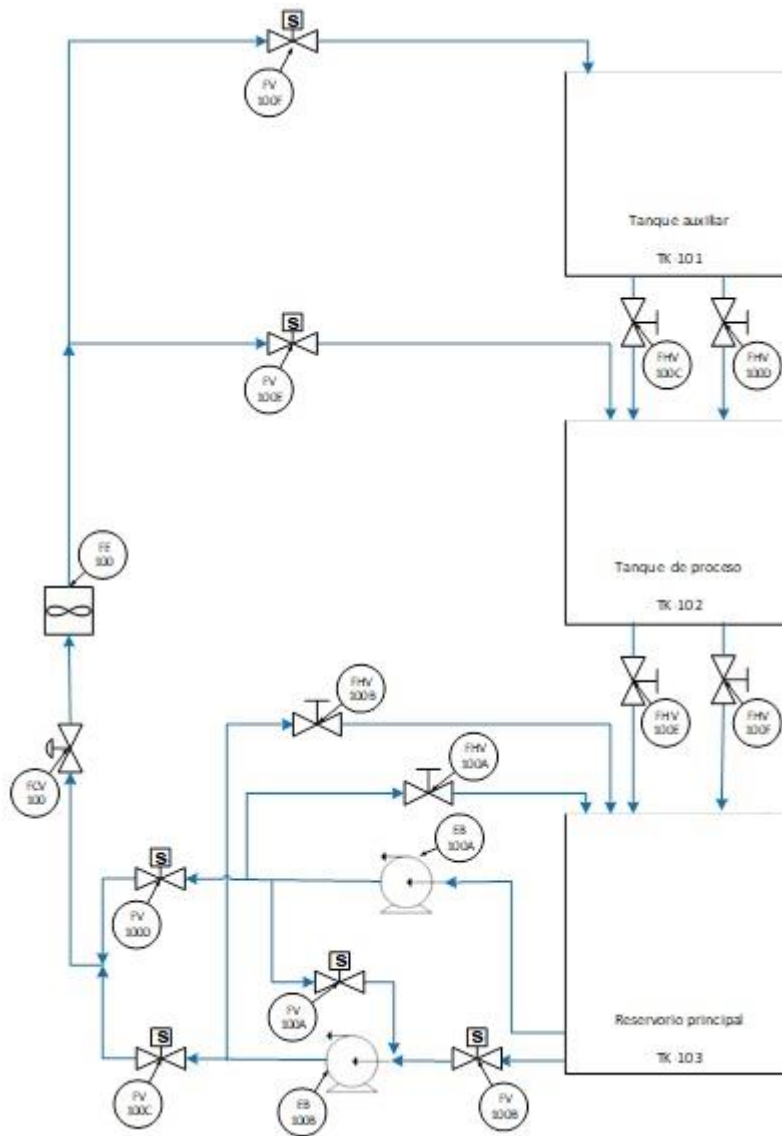


Figura 46 Diagrama de flujo del proceso de la instrumentación. Fuente: Autor

En este tipo de diagrama de PFD se tiene en cuenta que en el Banco de Pruebas de Bombas Centrífugas se tiene diferentes configuraciones, como son las siguientes:

3.1.3.3 Recorrido de la Bomba Centrífuga EB-100A

En este diagrama se muestra como es el recorrido del líquido cuando se implementa este tipo de configuración en el Banco de Pruebas de Bombas Centrífugas, además de la bomba que está en funcionamiento individual EB100A, como se observa en la Figura 47.

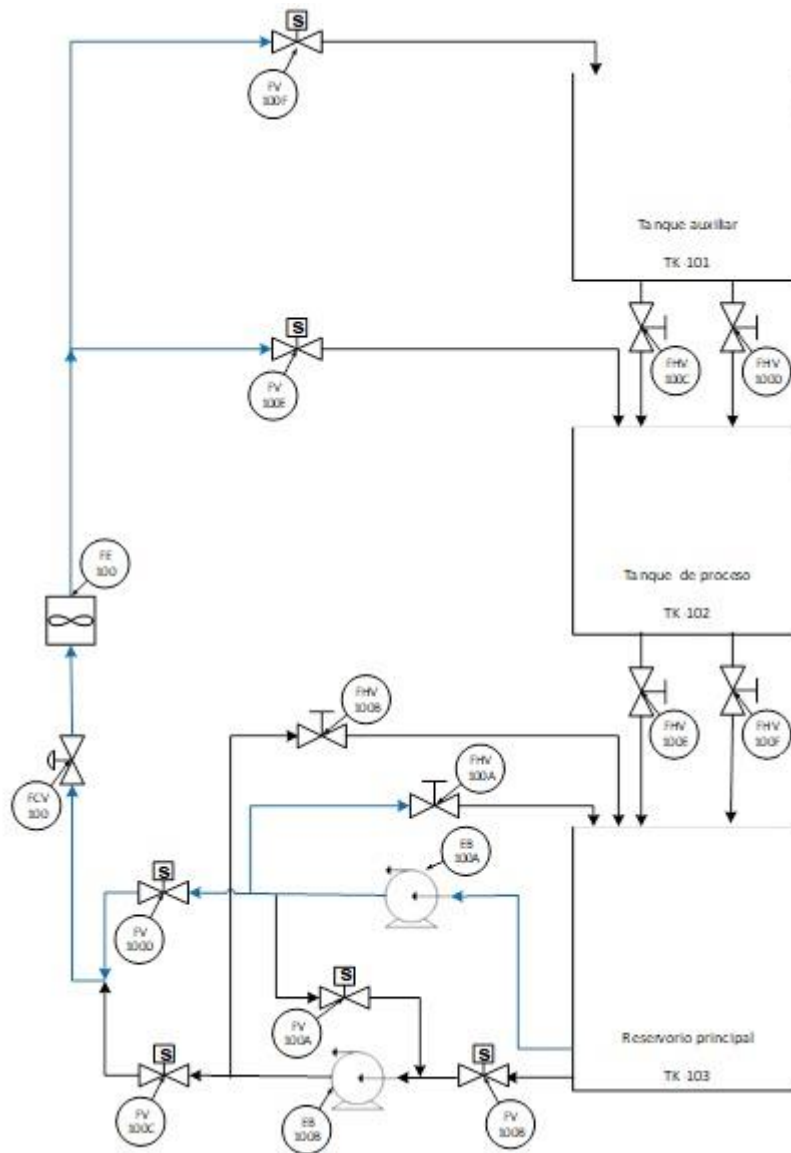


Figura 47 Diagrama de flujo del proceso de la Bomba Centrífuga EB-100A. Fuente: Autor

3.1.3.4 Recorrido de la Bomba Centrífuga EB-100B

En este diagrama se observa el flujo del líquido cuando se implementa este tipo de configuración en el Banco de Pruebas de Bombas Centrífugas, además la bomba está en funcionamiento individual EB100B, como se visualiza en la figura 48.

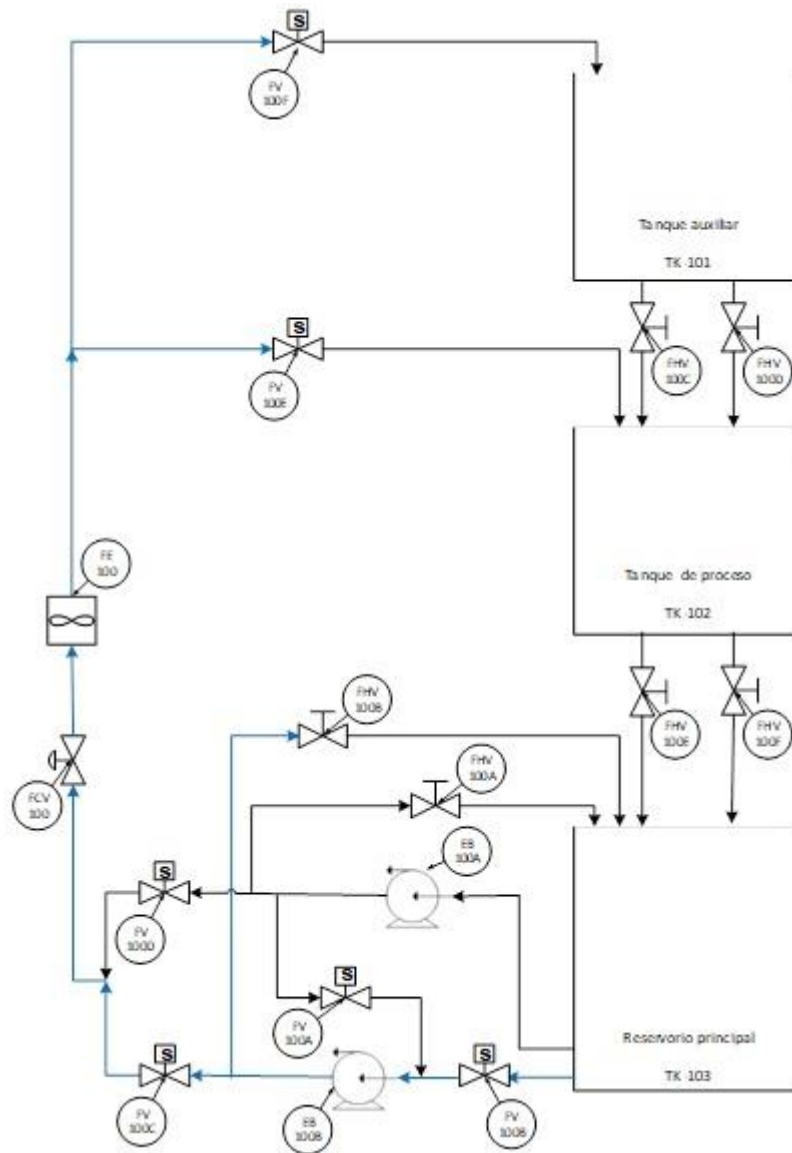


Figura 48 Diagrama de flujo del proceso de la Bomba Centrífuga EB-100B. Fuente: Autor

3.1.3.5 Recorrido en serie

En este diagrama se observa el flujo del proceso cuando se realiza esta configuración en el Banco de Pruebas de Bombas Centrífugas, además las dos bombas centrífugas que están en funcionamiento, ver Figura 49.

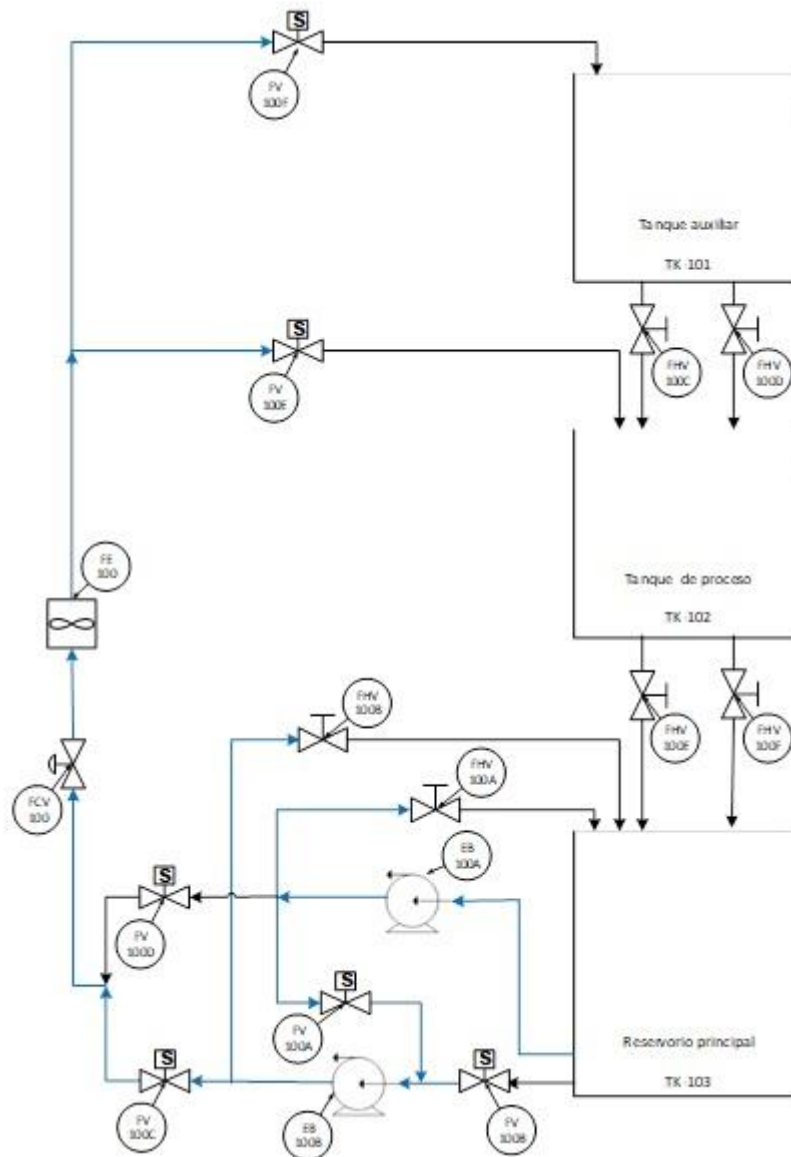


Figura 49 Diagrama de flujo del proceso de la Bomba Centrífuga en serie. Fuente: Autor

3.1.3.6 Recorrido en paralelo

En este diagrama se observa el flujo del proceso del líquido cuando se realiza esta configuración en el Banco de Pruebas de Bombas Centrífugas, además las dos bombas centrífugas están en funcionamiento, como se observa en la Figura 50.

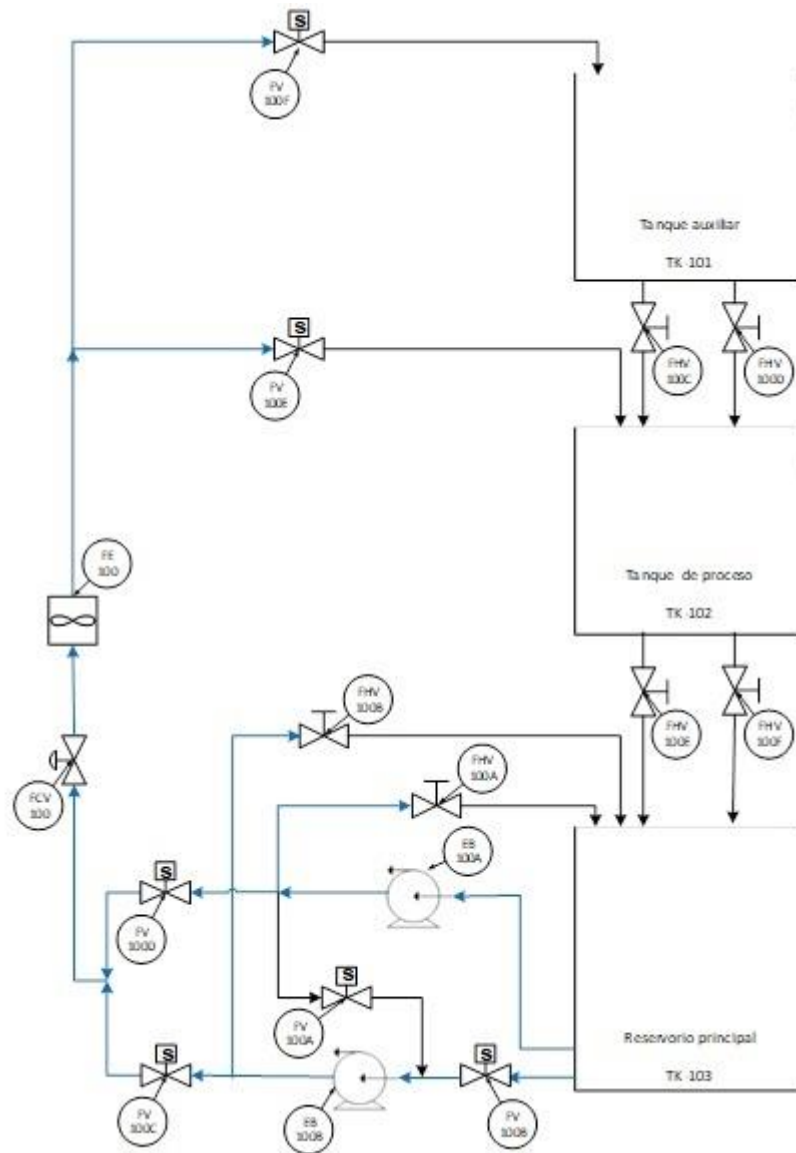


Figura 50 Diagrama de flujo del proceso de la Bomba Centrífuga en paralelo. Fuente: Autor

3.2 REDISEÑO Y MEJORAMIENTO DEL BANCO DE PRUEBAS DE BOMBAS CENTRÍFUGAS.

Para este proyecto continua con la instrumentación anteriormente mencionada en el estado actual de la planta, además se realiza el mejoramiento de la misma con el PAC Modicon M340 como se explica más adelante, de igual manera realizar un cambio de Breaker de 6 amperios que tenía a uno de 16 amperios para conectar directamente las bombas para su respectiva protección eléctrica debido a que estaban conectados a la línea antes del Breaker.

3.2.1 Filosofía de control

A continuación se describe la filosofía de control del Banco de Pruebas de Bombas Centrífugas de la Universidad Autónoma del Cauca, de acuerdo a lo establecido respecto al sistema de automatización a implementarse en el marco del presente proyecto.

En el laboratorio de control de procesos de la Universidad Autónoma del Cauca se encuentra la planta del banco de pruebas de bombas, la cual presenta la necesidad de mejorar su presentación y la adaptación de sus conexiones eléctricas, debido a que actualmente posee una tarjeta de relevos conectados con los diversos dispositivos e instrumentación del panel de control, de campo y conexión para dispositivos externos como el PLC, lo cual dificulta la interacción por parte de los estudiantes, por tal motivo, el rediseño propuesto se hizo pensando en una conexión amigable y con conectores estandar según los cables suministrados en los laboratorios, adicionalmente permitiera al estudiante realizar diversas prácticas independiente del controlador utilizado para esta.

La automatización del Banco de Pruebas de Bombas Centrífugas comprende el tanque TK102, pero su funcionamiento es independiente, debido a que los tanques se llenan dependiendo del sistema de bombeo de agua por medio de las bombas centrífugas, por otra parte, para el sensado de nivel se utiliza un sensor ultrasónico SRF06, por medio de este se leen sus lecturas para el PLC, además de una pantalla HMIGTO3510.

3.2.1.1 Modos de operación

- Modo manual

Permite el encendido y apagado del Banco de Pruebas de Bombas Centrífugas mediante un Breaker de 110 VAC de 16 amperios.

- Modo automático

Se realiza la respectivas conexiones para el buen funcionamiento de la planta por medio de las válvulas solenoides, bombas centrífugas, servoválvula, sensores de nivel y flujo, por medio de un PLC. Este será el modo normal de funcionamiento de todo el banco de pruebas.

- Parada de emergencia

En caso de una avería, sobrecarga o error de funcionamiento de la instrumentación de campo del Banco de Pruebas de Bombas Centrífugas, se implementa la parada de emergencia de las válvulas solenoides y las bombas centrífugas.

3.2.1.2 Descripción general

La automatización del banco se plantea para realizar la adecuación de conexiones por medio del panel de control al módulo del PAC Modicon M340 y una pantalla HMIGTO3510, por otro lado, es necesario modificar las diferentes conexiones de la instrumentación que interviene en el proceso y facilitar el manejo por parte de los usuarios.

El sistema consiste de dos bombas centrífugas, las cuales permite impulsar el agua hacia los tanques superiores por medio de las tuberías de PVC, proveniente del tanque reservorio, en la planta se tiene 6 válvulas solenoides que permite o impiden el paso del flujo del líquido por la tubería, que dependiendo su configuración el sistema de bombeo puede ser: las bombas individuales, en serie o paralelo, el nivel del flujo de agua se dirige a los tanques superiores del banco de pruebas y se controla por medio de una servoválvula que se abre dependiendo del valor del voltaje establecido por el usuario o por el controlador, de esta manera cuando el líquido alcance cierto nivel en el tanque TK102 mínimo o máximo medido por el sensor ultrasonido SRF06 envía una señal al controlador para que determine la apertura de la servoválvula. De esta manera permite controlar el proceso de nivel del tanque TK102 de manera constante con mínimo error.

El banco de pruebas tiene una servoválvula que es la encargada de realizar el respectivo control sobre la variable manipulada para el paso del líquido hacia la parte superior y poder llenar los tanques de agua dependiendo del valor de la altura deseado (SP) por el usuario o determinado para su funcionamiento.

Por otra parte, la planta de bombas centrífugas por medio de la pantalla HMIGTO3510 y el sistema SCADA se realiza el control y supervisión del respectivo funcionamiento, por lo tanto, los estudiantes realizan prácticas para probar los conceptos de las asignaturas enfocadas a los sistemas de control industrial, por ejemplo, el sistema de control y supervisión que permite tomar la señal del sensor de nivel y el controlador va a permitir un sistema controlado dependido si es ON/OFF

o PID, instrumentación industrial, PLC, HMI y sistema SCADA, además de reforzar y comparar los conceptos del modelado matemático de los procesos.

3.2.1.3 Procedimiento

1. Recomendaciones

Para garantizar el buen funcionamiento del Banco de Pruebas de Bombas Centrífugas:

- El tanque reservorio debe de tener agua suficiente para que no se dañe las bombas, se debe más de la mitad.
 - Las válvulas manuales de bypass se deben dejarse abiertas inicialmente al 50% la FHV100A y FHV100B, de esta manera se evita que se genere un bloqueo de la circulación de agua y afecte las bombas.
2. Conectar el banco de bombas a la toma corriente de 110VAC que se encuentra en la parte izquierdo superior de la planta.
 3. Realizar las conexiones del tablero de control con el modulo del PLC M340 y la pantalla HMIGTO3510.
 4. Verificar que el switch de parada de emergencia está cerrado.
 5. Encender el Breaker del Banco de Pruebas de Bombas Centrífugas.
 6. Conectar el modulo al toma corriente de 110VAC.
 7. Configuración de las válvulas manuales de bypass FHV100A y FHV100B de las bombas centrífugas para evitar daños en la estructura de la tubería.
 8. Encender PC.
 9. Abrir Unity Pro S y el programa del banco de bombas centrífugas.
 10. Descargar programa banco bombas al PLC M340.
 11. Determinar qué tipo de configuración de bombas y el tipo de controlador desea utilizar el usuario:
 - Tanque
 - Tanque TK101
 - Tanque TK102
 - Bombas

En la Tabla 10 se describe la instrumentación que debe funcionar en cada una de las configuraciones que tiene las bombas centrífugas y los tanques en el banco de pruebas, para impulsar el agua desde el tanque reservorio hasta los dos tanques superiores en este caso TK102.

| Funcionamiento | | Condiciones iniciales |
|-----------------------|---------------------|--|
| 1 | Bomba EB100A | Paso 1: <ul style="list-style-type: none"> • Abrir la válvula solenoide FV100D y cerrar la válvula FV100A. Paso 2: <ul style="list-style-type: none"> • Encender la bomba centrífuga EB100A y apagar la bomba EB100B. |
| 2 | Bomba EB100B | Paso 1: <ul style="list-style-type: none"> • Abrir las válvulas solenoides FV100B, FV100C y cerrar la válvula FV100A. Paso 2: <ul style="list-style-type: none"> • Encender la bomba centrífuga EB100B y apagar la bomba EB100A. |
| 3 | Serie | Paso 1: <ul style="list-style-type: none"> • Abrir las válvulas solenoides FV100A, FV100C y cerrar la válvula FV100A. Paso 2: <ul style="list-style-type: none"> • Encender la bomba centrífuga EB100A y EB100B. |
| 4 | Paralelo | Paso 1: <ul style="list-style-type: none"> • Abrir las válvulas solenoides FV100B, FV100C, FV100D y cerrar la válvula FV100A. Paso 2: <ul style="list-style-type: none"> • Encender la bomba centrífuga EB100A y EB100B. |
| 5 | Tanque TK101 | Paso 1: <ul style="list-style-type: none"> • Abrir la válvula solenoide FV100F y cerrar la válvula FV100E. |
| 6 | Tanque TK102 | Paso 1: |

| | | |
|--|--|--|
| | | <ul style="list-style-type: none"> • Abrir la válvula solenoide FV100 y cerrar la válvula FV100F. <p>Paso 2:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Cerrar de las válvulas manuales FHV100E y FHV100F que están en la parte inferior del tanque. |
|--|--|--|

Tabla 10 Funcionamiento general de Banco de Pruebas de Bombas Centrífugas.
Fuente: Autor

12. Encender el Breaker del PLC.

13. Qué tipo de supervisión va a utilizar:

- Pantalla HMI
- Sistema SCADA

14. Pantalla HMI

- Conectar el cable de Ethernet del PLC al puerto Ethernet de la Pantalla HMIGTO3510.
- Encender el Breaker de la pantalla HMIGTO3510.
- Ingresar el usuario correspondiente en la pantalla HMIGTO3510.
- Encender el proceso en la pantalla HMIGTO3510, para que todo el sistema de la programación se active para su respectivo funcionamiento.
- Selecciona el tanque en el cual desea trabajar:
 - Tanque TK101
 - Tanque TK102
- Selecciona la configuración de las bombas centrífugas para la activación de las válvulas solenoides:
 - EB100A
 - Se activa la válvula solenoide FV100D y las válvulas FV100A, FV100B, FV100C deben estar cerradas.
 - EB100B

Se activa las válvulas solenoides FV100A, FV100B y FV100C deben estar abiertas y la válvula FV100D debe estar cerrada.

- Serie

Se activan las válvulas FV100A, FV100C, además deben estar cerradas las FV100B y FV100D.

- Paralelo

Se activan las válvulas FV100B, FV100C y FV100D, además la válvula cerrada es FV100A.

- Selecciona el tipo de controlador que se desea implementar para el banco de pruebas:

- Control ON OFF

1. Ingresar el valor de la consigna del nivel (cm) que desea en el tanque para determinar su modelo matemático.
2. La apertura de la servoválvula es abierta o cerrada (0 o 100%).
3. Inicio del proceso
 - Encender las bombas para el funcionamiento completo de las configuraciones.
4. Cuando la lectura de nivel del tanque seleccionado es menor que el SP, la servoválvula solenoide se abre completamente, si es igual o mayor se cierra automáticamente.
5. Selecciona la gráfica
 - Aparecen todas las gráficas del banco de pruebas flujo, apertura de la servoválvula y el nivel del tanque TK102.

- Control PID

1. Cuando la lectura de nivel del tanque seleccionado es menor que el SP, se corrigen con la variación de la servoválvula automáticamente.
2. Inicio del proceso
 - Encender las bombas para el funcionamiento completo de las configuraciones.
3. Selecciona la gráfica:
 - Aparecen todas las gráficas del banco de pruebas flujo, apertura de la servoválvula y el nivel del tanque TK102.
- Selecciona Históricos
 - Eventos
 1. Para visualizar los eventos ocurridos del proceso de la planta.
- Apagar o resetear el proceso en la pantalla
- Apagar el Breaker de la pantalla HMIGTO3510.

15. Sistema SCADA

- Conectar el sistema SCADA al PLC por medio del cable Ethernet.
- Ingresar al programa del sistema SCADA en Vijeo Citect.
- Verificar la comunicación del sistema con el PLC Modicon M340.
- Ejecutar el programa del sistema de supervisión de la planta de bombas centrífugas.
- Ingresar al proceso en el sistema SCADA.
- Encender el proceso en el sistema SCADA, para que todo el sistema de la programación se active para su respectivo funcionamiento.
- Selecciona el tanque en el cual desea trabajar:
 - Tanque TK101
 - Tanque TK102

- Selecciona la configuración de las bombas centrífugas para la activación de las válvulas solenoides:
 - EB100A

Se activa la válvula solenoide FV100D y las válvulas FV100A, FV100B, FV100C deben estar cerradas.
 - EB100B

Se activa las válvulas solenoides FV100A, FV100B y FV100C deben estar abiertas y la válvula FV100D debe estar cerrada.
 - Serie

Se activan las válvulas FV100A, FV100C, además deben estar cerradas las FV100B y FV100D.
 - Paralelo

Se activan las válvulas FV100B, FV100C y FV100D, además la válvula cerrada es FV100A.
- Selecciona el tipo de controlador que se desea implementar para el banco de pruebas:
 - Control ON OFF
 1. Ingresar el valor de la consigna del nivel (cm) que desea en el tanque para determinar su modelo matemático.
 2. La apertura de la servoválvula es abierta o cerrada (0 o 100%).
 3. Inicio del proceso
 - Encender las bombas para el funcionamiento completo de las configuraciones.
 4. Cuando la lectura de nivel del tanque seleccionado es menor que el SP, la servoválvula solenoide se abre completamente, si es igual o mayor se cierra automáticamente.
 5. Selecciona la gráfica

- Aparecen todas las gráficas del banco de pruebas flujo, apertura de la servoválvula y nivel del tanque TK102.
- Control PID
 1. Cuando la lectura de nivel del tanque seleccionado es menor que el SP, se corrigen con la variación de la servoválvula automáticamente.
 2. Selecciona la gráfica
 - Aparecen todas las gráficas del banco de pruebas flujo, apertura de la servoválvula y el nivel del tanque TK102.
 3. Inicio del proceso
 - Encender las bombas para el funcionamiento completo de las configuraciones
- Selecciona Históricos
 - Tendencia Histórica

Se visualiza todos los datos en el transcurso del tiempo de las variables de los sensores del banco de pruebas:

 1. Guardar los datos de la gráfica para realizar el modelo matemático y comprobarlo con el modelo teórico del Banco de Pruebas de Bombas Centrífugas.
 2. Guardar el archivo, .xls de un documento Excel para ser leído en matlab.
 3. Selecciona donde deseas guardar el archivo de la gráfica.
 4. Comparar el modelo matemático teórico ya simulado con el modelo práctico de la planta de bombas centrífugas.
- Apagar o resetear el proceso en la pantalla.
- Salir del sistema SCADA.
- Salir de programa ejecutado de supervisión del sistema SCADA.

- Cerrar el programa Vijeo Citect del PC.
16. Desconectarse del módulo por medio del cable Ethernet.
 17. Apagar el PC.
 18. Apagar el Breaker del PLC.
 19. Desconectar las conexiones realizadas del PLC al panel de control de planta de bombas centrífugas.
 20. Desconectar las conexiones del panel de control del banco.
 21. Apagar el Breaker de la planta de bombas centrífugas.

3.2.2 PLC

Se implementa un controlador con el PLC Modicon M340 de Schneider, el cual tiene la ventaja de tener un curso particular para el PID, la universidad tiene todo el software, las licencias, todo el soporte de Schneider.

Este tipo de PLC se utiliza en algunas asignaturas de la carrera profesional Ingeniería Electrónica de la Universidad Autónoma del Cauca, por lo tanto algunos estudiantes ya cuentan con conocimiento y práctica en el uso de este tipo de PLC Modicon M340 con los módulos.

3.2.2.1 Comparación del OPTO 22 SNAP PAC R1 y Modicon M340 PAC

- **Ventajas del PLC OPTO 22 frente al PLC Modicon M340**
 - Entre las cuales se destaca su programación, por lo tanto si sabe programar un opto, va a quedar más fácil que programar un Schneider si no lo ha manejado, además un OPTO 22 es mucho más económico que un Modicon M340.
 - El OPTO 22 tiene un sistema SCADA de la planta de bombas centrífugas, de esta manera existe un documento guía donde se encuentra cómo se maneja el sistema, el OPTO 22 tiene módulos que si se dañan o no se dañan depende de cómo conectemos el sistema, es poco robusto ante cambios de corriente.

- **Ventajas del PLC Modicon M340 frente al PLC OPTO 22**

- El Modicon M340 es fácil de programar, porque existe la capacitación en la universidad sobre el uso del autómatas, además es un PLC mucho más robusto, más industrial que un OPTO 22.
- En el laboratorio de la Universidad Autónoma del Cauca el PLC Modicon M340 tiene una disponibilidad de 6 equipos, en cambio el opto solo es uno, la universidad cuenta con las licencias de software para la programación del Modicon M340 (Unity Pro S V11.0), Pantalla HMIGTO3510 (Vijeo Designer V6.2) y sistema de supervisión SCADA (Vijeo Citect 7.5 de 2015), existe curso dedicado a la programación del PLC, la pantalla HMIGTO3510 y sistema SCADA de Schneider, estas son las ventajas del Modicon respecto al opto.
- El PLC Modicon es mejor con respecto al PLC OPTO 22, porque cada autómatas tiene su mejor función, por consiguiente pueda que solo este controlando un proceso con poca instrumentación para que voy a comprar un PLC más costoso si con uno más económico por ejemplo un OPTO 22 puedo hacerlo, además es mucho más fácil de cambiar instalar las tarjetas, pero es más complicado de conseguir las para reemplazarlas, por otra parte, si se está controlando un proceso que tiene mucha instrumentación y actuadores, es mejor implementar un autómatas mucho más robusto en este caso un autómatas Modicon M340 de Schneider, debido a que tiene mejores protecciones de corriente, garantizando la seguridad de que todos los equipos funcionen bien.
- Este tipo de PLC se utiliza en algunas asignaturas de la carrera profesional Ingeniería Electrónica de la Universidad Autónoma del Cauca, por lo tanto algunos estudiantes ya cuentan con conocimiento y de práctica en el uso de este tipo de PLC Modicon M340 con los módulos.

Además se muestra la siguiente Tabla 11, que describe las mejoras que se van a realizar al banco de pruebas y que va a solucionar.

| N° | Fallas | Mejora |
|----|--|---|
| 1 | Poca capacitación del PLC OPTO 22 y del Software utilizado por el mismo (PAC Control Basic 9.4) | La universidad tiene asignaturas para la programación, diseño y pruebas de PLC Modicon M340. |
| 2 | Módulo de salida analógica (SNAP-AOV-27) dañado, el cual está encargado del funcionamiento de la servoválvula. | El PLC Modicon M340 tiene un módulo de entradas y salidas analógicas (AMM0600) que funciona (-10V – +10V), el cual permite operar la servoválvula. |
| 3 | El sensor Ultrasonido SRF06 del TK102 se encuentra dañado y necesita de una tarjeta convertidora de señal para convertir la corriente de 4 – 20 mA a 1 – 5V. | Se reemplaza el Sensor Ultrasonido SRF06 del TK102 se encuentra dañado, por uno nuevo. Además el PLC Modicon tiene un módulo de entradas y salidas analógicas (AMM0600) que funciona (4mA – 20mA) y no necesita de una tarjeta Convertidora. |
| 4 | Poco amigable la programación del sistema SCADA (PAC Display Configurator Basic 9.4), debido a sus pocos componentes en el mímico. | La Universidad Autónoma del Cauca posee las licencias del Unity Pro S (programación del PLC), Vijeo designer 6.2 (Pantalla HMIGO3510) y Vijeo Citect 2015 V7.5 (SCADA en el PC). El Vijeo Citect tiene más tipos de instrumentación para ejecutar un mímico mucho más parecido al tipo industrial. |
| 5 | No dispone de conectores eléctricos que permitan conectarse fácilmente con otros dispositivos externos de uso educativo, a parte del PLC OPTO 22 que se encuentra empotrado en el panel de control de la planta de bombas centrífugas. | Se flexibilizan las conexiones eléctricas, realizando un panel de circuitos eléctricos para la respectiva conexión de la instrumentación del panel de control con el panel eléctrico del campo de Banco de Pruebas de Bombas Centrífugas y con dispositivos externos de uso educativo tales como: PIC, arduino, PLC, FPGA, entre otros. |
| 6 | Otros: <ul style="list-style-type: none"> • La Bomba centrífuga EB100A se encuentra con filtración de líquido debido al empaque de 12 mm que está dañado. | Otros: <ul style="list-style-type: none"> • Se realizara la visualización del sistema de control de nivel por medio de pantalla HMIGTO3510 que tiene la Universidad Autónoma del Cauca. • Se realizara el sistema SCADA en el PC para el control y supervisión de planta de nivel del Banco de Pruebas de Bombas Centrífugas del laboratorio de procesos de la Universidad Autónoma del Cauca. |

Tabla 11 Mejoras que se implementara en el Banco de Pruebas de Bombas Centrífugas. Fuente: Autor

Por consiguiente se consideró la necesidad de emplear este tipo de PLC Modicon M340 con respecto al OPTO 22 SNAP PAC R1.

3.2.3 Diseño panel de conexiones eléctricas

Para el cumplimiento del primer objetivo propuesto para este proyecto, se plantea mejorar y flexibilizar el panel de control y sus respectivas conexiones con los dispositivos conectados, por lo tanto, se realiza el siguiente diseño de panel de conexiones del Banco de Pruebas de Bombas Centrífugas. El primer tablero de control es el encargado del funcionamiento de todo el banco de pruebas como se muestra en la Figura 51, porque es donde se enciende y apaga, de igual manera se encarga de suministrar de energía a toda la planta, además tiene una parada de emergencia de la instrumentación de campo del banco de pruebas y un piloto.

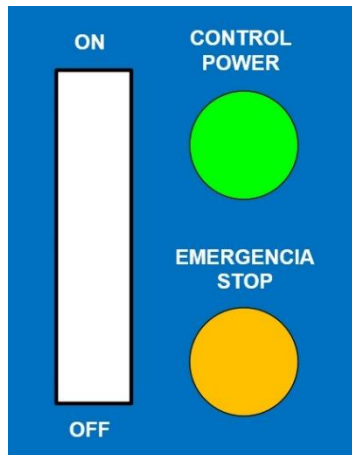


Figura 51 Diseño panel eléctrico de encendido y apagado del Banco de Pruebas de Bombas Centrífugas. Fuente: Autor

En este tablero se plantea la flexibilidad de las conexiones eléctricas de la instrumentación como se observa en la Figura 52, el cual se efectúa para ubicar los dispositivos ya instalados en el panel de control y sus conexiones externas del Banco de Pruebas de Bombas Centrífugas de una manera más flexible y adecuada para su respectivo uso.

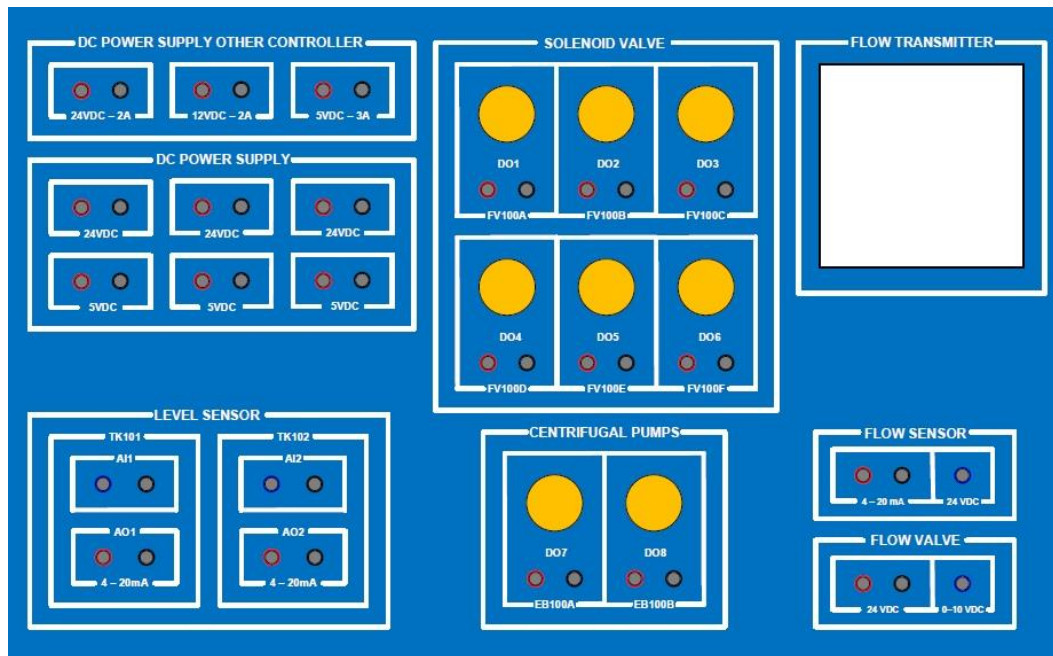


Figura 52 Diseño panel de control de la Planta de Bombas Centrífugas. Fuente: Autor

3.3 DESARROLLO DE LA SUPERVISION Y EL CONTROLADOR DEL BANCO DE PRUEBAS DE BOMBAS CENTRÍFUGAS

3.3.1 Programación

Como se propuso para el desarrollo de este proyecto, se emplearon diferentes entornos para la implementación de este trabajo, el cual consta de tres tipos de software de programación como son: Unity Pro S V11.0, Vijeo Designer 6.2 y Vijeo Citect 2015 V7.5.

3.3.1.1 Programación del PAC Modicon M340 (Unity Pro S)

En esta parte se trabaja lo relacionado con la programación del proceso y control para la planta de bombas centrífugas.

El Unity Pro S es un software entregado por el fabricante llamado Unity Pro, para este caso es el Unity Pro S versión 11.0, por consiguiente es el programa utilizado para la programación del PLC Modicon M340, por otra parte existen más versiones del mismo programa Unity Pro. El software de Unity Pro S permite las diferentes programaciones de diferentes PLC's como: el Modicon M340, Premium, Atrium, Quantum.

Por otro lado cumple con la norma de programación de PLC IEC61131-3, entre los cuales están son los siguientes: Diagrama de bloques funcionales (FBD), Lenguaje de diagrama de contactos (LD), Lista de instrucciones (IL), Texto estructurado (ST) y control secuencial (SFC) [40].

Para este proyecto se utilizó el PLC el Modicon M340, puesto que la Universidad Autónoma del Cauca en sus laboratorios de electrónica dispone de ellos, por consiguiente tiene las licencias de programación del mismo.

Antes de iniciar la parte de la programación del PLC, se probó el funcionamiento respectivo de toda la planta de bombas centrífugas, de esta manera se pudo conocer toda la instrumentación y sus características en las cuales trabaja y entender el proceso para de esta manera poder realizar su respectiva programación de control en Unity Pro S. El lenguaje de programación que se utilizó fue el de diagrama de contactos (LD).

3.3.1.2 Programación Planta del Banco de Pruebas de Bombas Centrífugas

Se crea un proyecto en Unity Pro S, estableciéndole las características del hardware del PLC con las que cuenta como se muestra en la siguiente Figura 53.

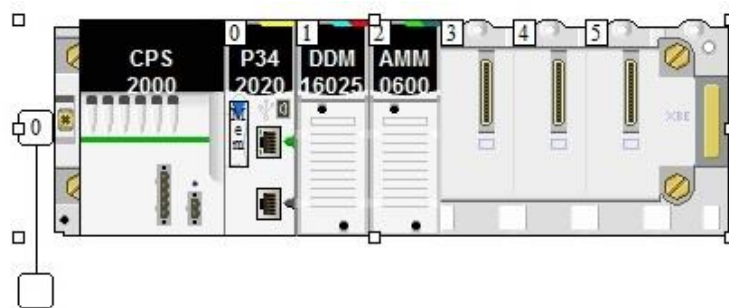


Figura 53 Características del PLC Modicon M340 en Unity Pro S. Fuente: Autor

Variables

Para la programación del control del proceso de la planta del banco de bombas se utilizaron las variables que se muestran en las Tablas 9, 10 y 11, además están explicados de manera general, también se procedió a declararlas teniendo en cuenta el tipo, la dirección y su función, por otra parte, estas aparecen en la programación de Unity Pro S, Vijeo Designer 6.2 y Vijeo Citect 7.5.

Antes de iniciar la programación del proceso del banco se tiene en cuenta el funcionamiento de las variables de los sensores y sus rangos de funcionamiento como se muestra en la Tabla 12.

| Instrumento | Rango | Rango de funcionamiento de la planta |
|----------------------------------|--------------|---|
| Sensor ultrasonido análogo SRF06 | 4mA – 20mA | Este sensor realiza la medida de nivel del tanque TK - 102 (0 cm – 33 cm). |
| Servoválvula | 0VDC – 10VDC | Esta servoválvula permite una apertura gradualmente al voltaje (0% – 100 % de apertura) |
| Sensor de caudal | 4mA – 20mA | Este sensor realiza la medición del flujo de la tubería hacia el tanque TK101 y TK102 (0 Lt/min – 35 Lt/min). |

Tabla 12 Rangos de funcionamiento de los sensores y servoválvula del banco. Fuente: Autor

Con base en la anterior Tabla 12, se declaran las siguientes variables que se observan en la Tabla 13, en este caso las variables físicas del PLC Modicon M340, como su nombre, tipo dirección y una descripción.

| Variables Físicas del PLC Modicon M340 | | | | |
|---|-------------------|-------------|------------------|--|
| Nombre | I/O | Tipo | Dirección | Función |
| V_FV100A | Salida digital | BOOL | %Q0.1.16 | Switch ON/OFF de la válvula solenoide FV100A de la planta. |
| V_FV100B | Salida digital | BOOL | %Q0.1.17 | Switch ON/OFF de la válvula solenoide FV100B de la planta. |
| V_FV100C | Salida digital | BOOL | %Q0.1.18 | Switch ON/OFF de la válvula solenoide FV100C de la planta. |
| V_FV100D | Salida digital | BOOL | %Q0.1.19 | Switch ON/OFF de la válvula solenoide FV100D de la planta. |
| V_FV100E | Salida digital | BOOL | %Q0.1.20 | Switch ON/OFF de la válvula solenoide FV100E de la planta. |
| V_FV100F | Salida digital | BOOL | %Q0.1.21 | Switch ON/OFF de la válvula solenoide FV100F de la planta. |
| P_EB100A | Salida digital | BOOL | %Q0.1.22 | ON/OFF de la Bomba EB100A. |
| P_EB100B | Salida digital | BOOL | %Q0.1.23 | ON/OFF de la Bomba EB100B. |
| LE100 | Entrada analógica | INT | %QW0.2.1 | Valor de entrada del sensor ultrasonido tanque TK102 de la planta. |
| FE100 | Entrada analógica | INT | %QW0.2.2 | Valor de entrada del sensor de flujo de la planta. |
| SV_FCV100 | Salida analógica | INT | %QW0.2.5 | Valor de salida de la servoválvula FCV100 |

| | | | | |
|--|--|--|--|---|
| | | | | dependiendo del control y del usuario de la planta. |
|--|--|--|--|---|

Tabla 13 Variables de programación utilizadas por el PLC M340 físicamente. Fuente: Autor

Luego, se realizó el programa relacionando las variables físicas del Banco de Pruebas de Bombas Centrífugas a las variables del sistema y marcas para emplearlas en la programación del PLC, HMI y sistema SCADA, como se muestra en la Tabla 14.

| Variables marcas | | | |
|-------------------------|-------------|------------------|--|
| Nombre | Tipo | Dirección | Función |
| Inicio | BOOL | %M1 | Inicia el proceso. |
| Reset | BOOL | %M2 | Resetea los estados de los actuadores. |
| Tanque_TK101 | BOOL | %M5 | Activa la válvula de la entrada hacia el tanque TK101 de la planta. |
| Tanque_TK102 | BOOL | %M6 | Activa la válvula de la entrada hacia el tanque TK102 de la planta. |
| Inividual_EB100A | BOOL | %M7 | Activa la configuración de la bomba EB100A. |
| Inividual_EB100B | BOOL | %M8 | Activa la configuración de la bomba EB100B. |
| Serie | BOOL | %M9 | Activa la configuración serie de las bombas centrífugas. |
| Paralelo | BOOL | %M10 | Activa la configuración paralelo de las bombas centrífugas. |
| ON_Configuracion | BOOL | %M11 | Inicia el proceso con las configuraciones. |
| Reset_Configuracion | BOOL | %M12 | Resetea las configuraciones realizadas al proceso. |
| ON_OFF_Bombas | BOOL | %M14 | Activa las bombas centrífugas. |
| B_Manual | BOOL | %M13 | Activa la configuración manual. |
| C_ON_OFF | BOOL | %M16 | Activar el controlador ON/OFF del proceso. |
| C_PID | BOOL | %M17 | Activa el controlador PID del proceso. |
| Valvula_FV100A | BOOL | %M21 | Activa la válvula solenoide FV100A. |
| Valvula_FV100B | BOOL | %M22 | Activa la válvula solenoide FV100B. |
| Valvula_FV100C | BOOL | %M23 | Activa la válvula solenoide FV100C. |
| Valvula_FV100D | BOOL | %M24 | Activa la válvula solenoide FV100D. |
| Valvula_FV100E | BOOL | %M25 | Activa la válvula solenoide FV100E. |
| Valvula_FV100F | BOOL | %M26 | Activa la válvula solenoide FV100E. |
| Bomba_EB100A | BOOL | %M27 | Activa la bomba EB100A. |
| Bomba_EB100B | BOOL | %M28 | Activa la bomba EB100B |
| Reset_Controlador | BOOL | %M29 | Resetea el controlador. |
| SetPoint_TK102 | INT | %MW2 | Variable que ingresa en cm el usuario para determinar el nivel del tanque TK102. |

| | | | |
|---------------------|-----|-------|---|
| VU_FCV100 | INT | %MW3 | Variable que ingresa en porcentaje el usuario para determinar el porcentaje de apertura de la servoválvula. |
| Nivel_TK102 | INT | %MW7 | Variable que muestra el nivel en cm en el tanque TK102. |
| Flujo | INT | %MW8 | Variable que muestra el flujo en Lt/min hacia los tanques superiores TK101 y TK102. |
| Servovalvula_FCV100 | INT | %MW9 | Variable de salida analógica. |
| K_p | INT | %MW11 | Variable Kp proporcional del controlador. |
| T_i | INT | %MW12 | Variable Ti de tiempo integral del controlador. |
| T_d | INT | %MW13 | Variable de tiempo diferencial del controlador. |

Tabla 14. Variables utilizadas en Unity Pro S, Vijeo Designer 6.2 y Vijeo Citect. Fuente: Autor

- **Controlador PID en Unity Pro S**

Por otra parte, el controlador que se implementa en la programación del PLC es como se muestra en la Figura 54, por consiguiente esto depende a la configuración y sintonización realizada se introduce los parámetros obtenidos por el método empleado.

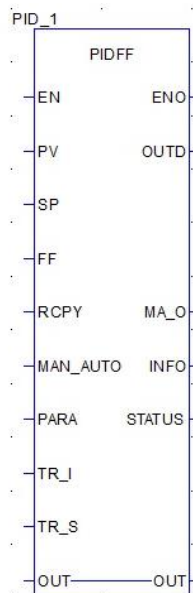


Figura 54 Bloque PID en Unity Pro S. Fuente: Autor

En la Tabla 15 se describen los parámetros de entrada que debe ingresar al bloque del controlador PID en programación Unity Pro S.

| Parámetro | Tipo de datos | Descripción |
|-----------|---------------|---|
| EN | BOOL | Activación del PID |
| PV | REAL | Valor de proceso, lectura del sensor de nivel |
| SP | REAL | Valor del Set point del nivel requerido por el usuario |
| FF | REAL | Entrada de interrupción |
| MAN_AUTO | BOOL | Modo de funcionamiento del controlador; 1 activado modo automático y 0 activado modo manual |
| PARA | Para_PIDFF | Parámetro |
| TR_I | REAL | Entrada de inicio |
| TR_S | BOOL | Comando y activación de inicio |
| OUT | REAL | Valor de salida absoluto |

Tabla 15 Entradas del bloque PID en Unity Pro S. Fuente: [41]

3.3.2 Supervisión

Se emplea diferentes entornos de programación para la supervisión del Banco de Pruebas de Bombas Centrífugas, el Vijeo Designer 6.2 y Vijeo Citect 2015 V7.5.

- **Variables**

Se utilizan las variables declaran en el PLC en Unity Pro S.

3.3.3 Visualización

En esta parte se trabaja lo relacionado con el control, visualización, monitoreo y supervisión del proceso de la planta de bombas centrífugas, para la supervisión en la pantalla HMIGTO3510 y en el sistema SCADA se visualiza el estado de la instrumentación y el funcionamiento del Banco de Pruebas de Bombas Centrífugas, además por medio de las pantallas se presenta la información y el control del proceso.

3.3.3.1 Vijeo Designer 6.2 (HMIGTO3510)

Vijeo Designer es un software de la empresa Schneider Electric de última generación con la que el usuario puede crear interfaces de operadores y configurar parámetros operativos para dispositivos de la interfaz usuario-máquina (HMI). Este programa proporciona todas las herramientas necesarias para el diseño de un proyecto HMI, desde la adquisición de datos hasta la creación y la visualización del proceso del banco.

Para la realización de este trabajo se tiene una pantalla HMIGTO3510, en el cual el software de Vijeo designer tiene un entorno en donde permite el empleo de variables y la adquisición de datos, además tiene animación de imágenes y figuras que simulan el funcionamiento real de un determinado proceso, en este caso de la planta.

- **Pantallas de visualización**

Es lo relacionado a la visualización, monitoreo y supervisión del proceso de la planta de bombas centrífugas. En la Figura 55, se observa el entorno grafico de la pantalla HMI, en donde el usuario diseña la interfaz para el proceso.

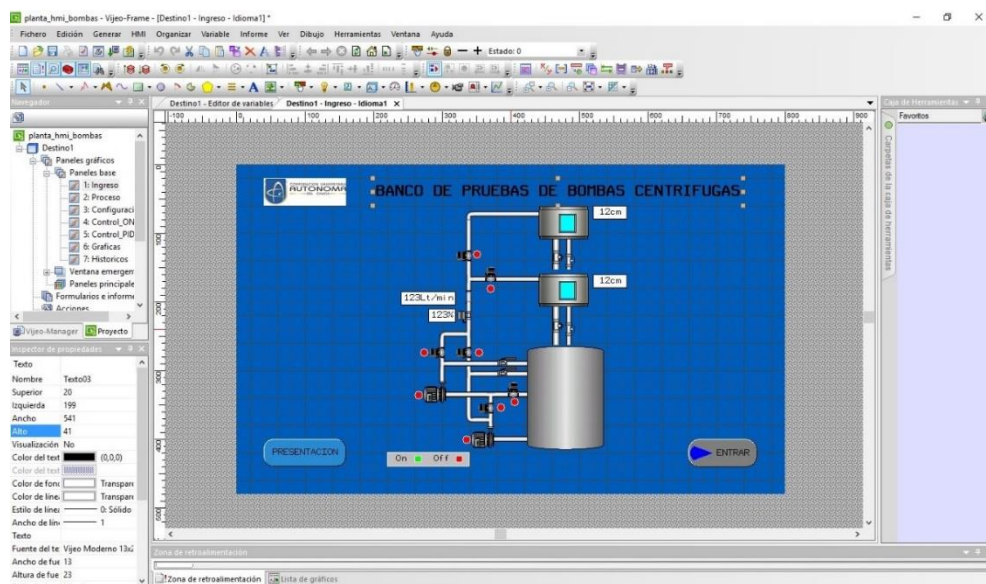


Figura 55 Interface de diseño gráfico en Vijeo Designer 6.2 Fuente: Autor

Luego de reconocer la interfaz de usuario se verifica que el programa de la interfaz de supervisión no tiene errores de programación, después se procede a encender en el módulo el Breaker de la pantalla HMIGTO3510 y se debe conectar el cable Ethernet que tiene el módulo al puerto Ethernet de la pantalla HMIGTO3510 como se muestra en la Figura 56.

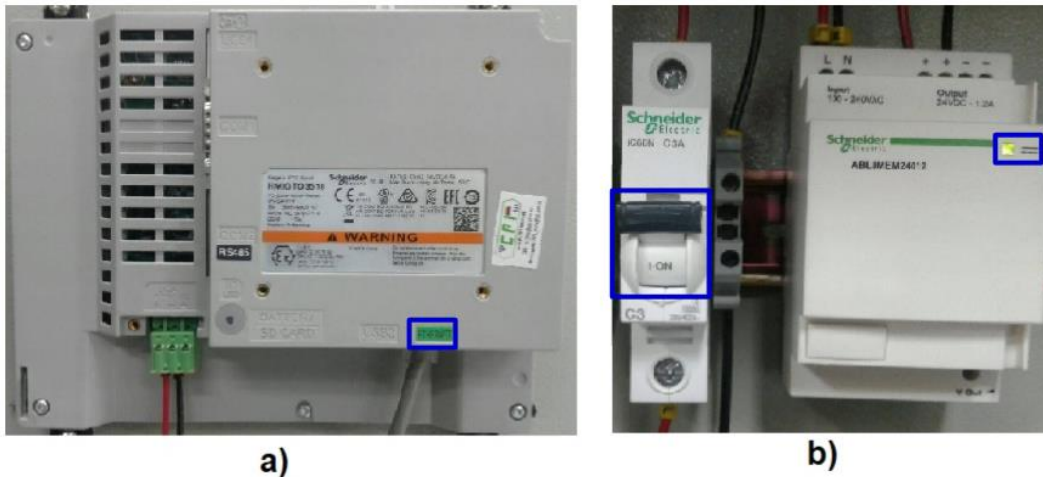


Figura 56 a) conexión Ethernet pantalla HMIGTO3510 b) Breaker de la pantalla HMIGTO3510.
Fuente: Autor.

Después de tener la interfaz gráfica se realiza la prueba en la pantalla HMIGTO3510 en donde se descarga el programa como se observa en la Figura 57.

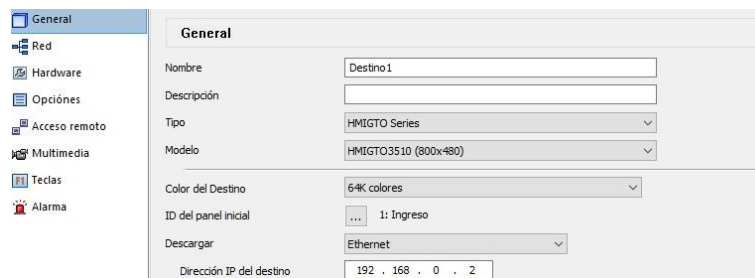


Figura 57 Comunicación con la pantalla HMIGTO3510. Fuente: Autor

Por último, se verifica si el programa descargo a la pantalla HMIGTO3510 como se muestra en la Figura 58 y si funciona con el PAC Modicon M340 se procede a verificar la interfaz de supervisión de la pantalla HMIGTO3510.



Figura 58 Visualización del programa funcionando en la pantalla HMIGTO3510. Fuente: Autor

3.3.3.2 Vijeo Citect 2015 V7.5 (Sistema SCADA)

Vijeo Citect es un software de la empresa Schneider Electric planteado para la programación de sistemas SCADA. Esto permite realizar el almacenamiento y adquisición de datos, para el empleo de variables, gestión y estadística, además del funcionamiento desde el mímico que simulan el funcionamiento real del proceso, también es un entorno de trabajo donde se muestran herramientas de configuración para cada función de desarrollo orientada a la adquisición, control y supervisión de un proceso por un usuario. Se emplea la programación del sistema SCADA en Vijeo Citect V7.5 para la supervisión del Banco de Pruebas de Bombas Centrífugas con el sistema SCADA en Vijeo Citect 2015 V7.5. En esta parte se trabaja lo relacionado con la programación de bombas centrífugas

3.3.4 Caracterización del Banco de Pruebas de Bombas Centrífugas

Para el Banco de Pruebas de Bombas Centrífugas se realiza la caracterización de la siguiente manera:

Actuador

Se utilizó una válvula proporcional solenoide marca DANFOSS EV260B, este instrumento es el elemento que controla el caudal hacia la planta regulando el

voltaje de forma proporcional entre cero voltios y 10 voltios con el cual se dirige la apertura de esta.

La caracterización de este elemento es demasiado variante por el flujo del caudal de agua que circula hacia los tanques superiores.

El sensor

Para el Banco de Pruebas la medición de la variable de nivel en el tanque TK102 se realiza por medio de un sensor ultrasónico SRF06, el cual entrega una corriente proporcional a la distancia medida al módulo analógico BMX AMM0600 con el que cuenta el PAC Modicon M340.

Para la conversión proporcional de la distancia medida a señal de corriente se realiza con la Ecuación 7.

$$I_s = I_i + \frac{I_f - I_i}{N_{max} - N_{min}} \quad \text{Ecuación 7}$$

I_i : Corriente inicial

I_f : Corriente final

I_s : Corriente de salida del sensor ultrasonido

N_{min} : Nivel mínimo del sensor ultrasonido

N_{max} : Nivel máximo del sensor ultrasonido

Con base en la Ecuación 7 se calcula el valor de corriente de salida del sensor proporcional a la distancia medida.

$$I_s = 4mA + \frac{20mA - 4mA}{510cm - 2cm} = 4mA + \frac{16mA}{508cm} \quad \text{Ecuación 8}$$

$$I_s = 4mA + (hcm * 3.1496) \frac{mA}{m} \quad \text{Ecuación 9}$$

Con la Ecuación 9 se realiza la Tabla 18, teniendo en cuenta las medidas de altura de nivel del tanque TK102 que se van a emplear, nivel mínimo tanque es 0 cm y el nivel máximo tanque es 33 cm.

Posteriormente se realiza la prueba física experimental para validar los datos obtenidos de manera matemática, para la Tabla 16 se recomienda utilizar las medidas de altura de nivel en metros y la corriente en mA.

| Caracterización del sensor SRF06 | | | | | | | |
|---|-----------------------|------------------|-----------------------|---------------------|-----------------------|------------------|-----------------------|
| Real | | | | Experimental | | | |
| Nivel (m) | Corriente (mA) | Nivel (m) | Corriente (mA) | Nivel (m) | Corriente (mA) | Nivel (m) | Corriente (mA) |
| 0 | 5.259 | 0,17 | 4.724 | 0 | 5.274 | 0,17 | 4.748 |
| 0,01 | 5.228 | 0,18 | 4.693 | 0,01 | 5.217 | 0,18 | 4.704 |
| 0,02 | 5.197 | 0,19 | 4.661 | 0,02 | 5.198 | 0,19 | 4.663 |
| 0,03 | 5.165 | 0,2 | 4.630 | 0,03 | 5.167 | 0,2 | 4.634 |
| 0,04 | 5.134 | 0,21 | 4.598 | 0,04 | 5.148 | 0,21 | 4.621 |
| 0,05 | 5.102 | 0,22 | 4.567 | 0,05 | 5.090 | 0,22 | 4.582 |
| 0,06 | 5.071 | 0,23 | 4.535 | 0,06 | 5.076 | 0,23 | 4.550 |
| 0,07 | 5.039 | 0,24 | 4.504 | 0,07 | 5.057 | 0,24 | 4.507 |
| 0,08 | 5.008 | 0,25 | 4.472 | 0,08 | 5 | 0,25 | 4.499 |
| 0,09 | 4.976 | 0,26 | 4.441 | 0,09 | 4.994 | 0,26 | 4.456 |
| 0,1 | 4.945 | 0,27 | 4.409 | 0,1 | 4.937 | 0,27 | 4.413 |
| 0,11 | 4.913 | 0,28 | 4.378 | 0,11 | 4.922 | 0,28 | 4.407 |
| 0,12 | 4.882 | 0,29 | 4.346 | 0,12 | 4.878 | 0,29 | 4.365 |
| 0,13 | 4.850 | 0,3 | 4.315 | 0,13 | 4.871 | 0,3 | 4.322 |
| 0,14 | 4.819 | 0,31 | 4.283 | 0,14 | 4.827 | 0,31 | 4.312 |
| 0,15 | 4.787 | 0,32 | 4.252 | 0,15 | 4.783 | 0,32 | 4.270 |
| 0,16 | 4.756 | 0,33 | 4.220 | 0,16 | 4.776 | 0,33 | 4.253 |

Tabla 16 Caracterización del sensor SRF06. Fuente: Autor

Con base en los datos obtenidos, aumentando el nivel de agua en el tanque TK102 por un centímetro y midiendo la corriente que entrega la salida de del sensor se obtuvo la Tabla 16 y se representa gráficamente en la Figura 59 que muestra la relación proporcional lineal de la corriente y el nivel del tanque TK102.

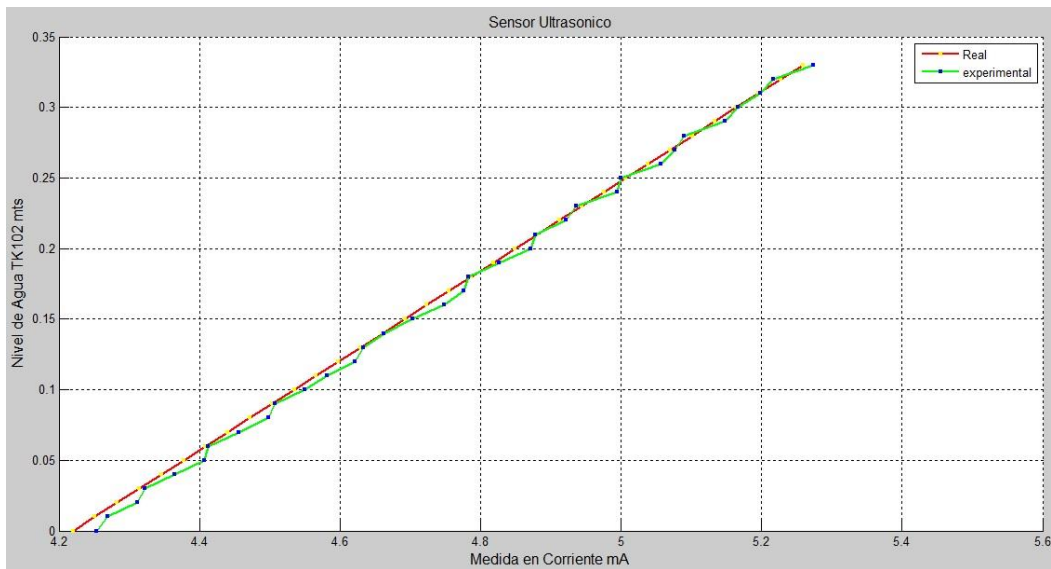


Figura 59 Relación de nivel del tanque TK102 y la respuesta en el sensor SRF06. Fuente: Autor

Por otra parte, se realizó la caracterización de la señal del sensor en el PLC dejando el rango nominal de 0 a 10000, por este motivo tengo más datos para la realización de la conversión al rango de medida del nivel del tanque TK102.

3.3.5 Sistema de control

Para este proceso, se tiene en cuenta que la variable controlada es el nivel del respectivo tanque TK102 y la variable manipulada es el flujo del agua de la tubería de PVC que pasa por la servoválvula FCV100, por consiguiente se implementó el lazo cerrado como se observa en la Figura 60.

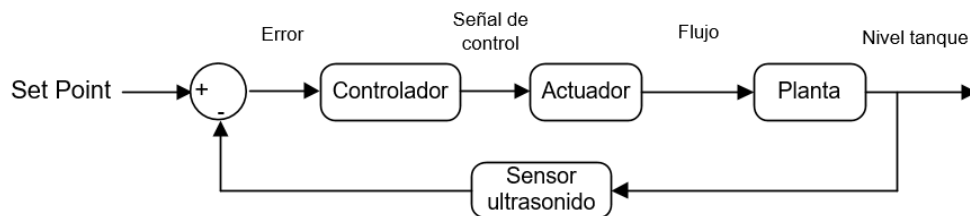


Figura 60 Lazo de control del banco de pruebas. Fuente: Autor.

Un sistema de control se define como el conjunto de elementos que hace posible que un proceso o planta cumpla con unas características, dentro de los sistemas de control se encuentra el control PID, el cual, mediante un elemento final de control como un actuador, mantiene una variable o proceso estable dentro de unas escalas de medición proporcionadas por un sensor.

Para la implementación del controlador se plantea los conceptos generales en la implementación de un sistema de control ON-OFF y PID, para el control de nivel del tanque TK-102 del Banco de Pruebas de Bombas Centrífugas.

Variables del proceso

- Variable manipulada en el proceso: El Flujo (FE100)
- Variable controlada en el proceso: Es el nivel del tanque TK102 (LE100).
- Disturbio presente en el proceso: Se puede presentar por la válvula manual FHV100E que se encuentra en parte inferior del tanque TK102.

3.3.5.1 Control ON OFF

Este controlador apaga y enciende las bombas centrífugas dependiendo de la lectura del sensor de nivel, es donde se evalúa una condición de igualdad entre el valor del SP y el valor de nivel en el tanque TK102, si se cumple apaga el sistema y nuevamente se procede a configurar el proceso, de no ser así el proceso será continuo hasta que se cumpla la condición.

Como se acaba de mencionar anteriormente se implementa un control ON/OFF al proceso, en donde se hace la lectura análoga del nivel del tanque comparándola con la consigna, de esta manera se utiliza para mantener el nivel fijo o si desea un rango determinado como es un nivel mínimo y un máximo, a continuación se observa la Figura 61 que permite la representación del controlador ON/OFF.

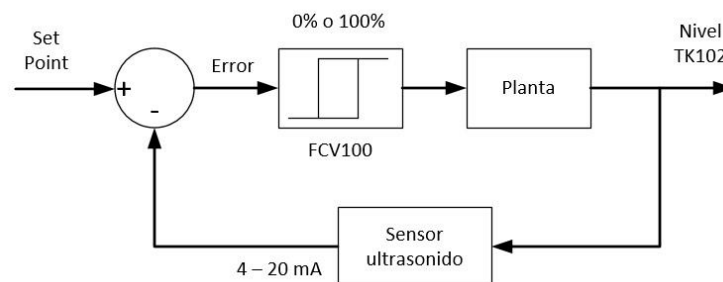


Figura 61 Controlador ON/OFF del proceso del Banco de Pruebas. Fuente: Autor.

En la siguiente Figura 62 se muestra la configuración del control ON/OFF en la supervisión de la pantalla HMI.

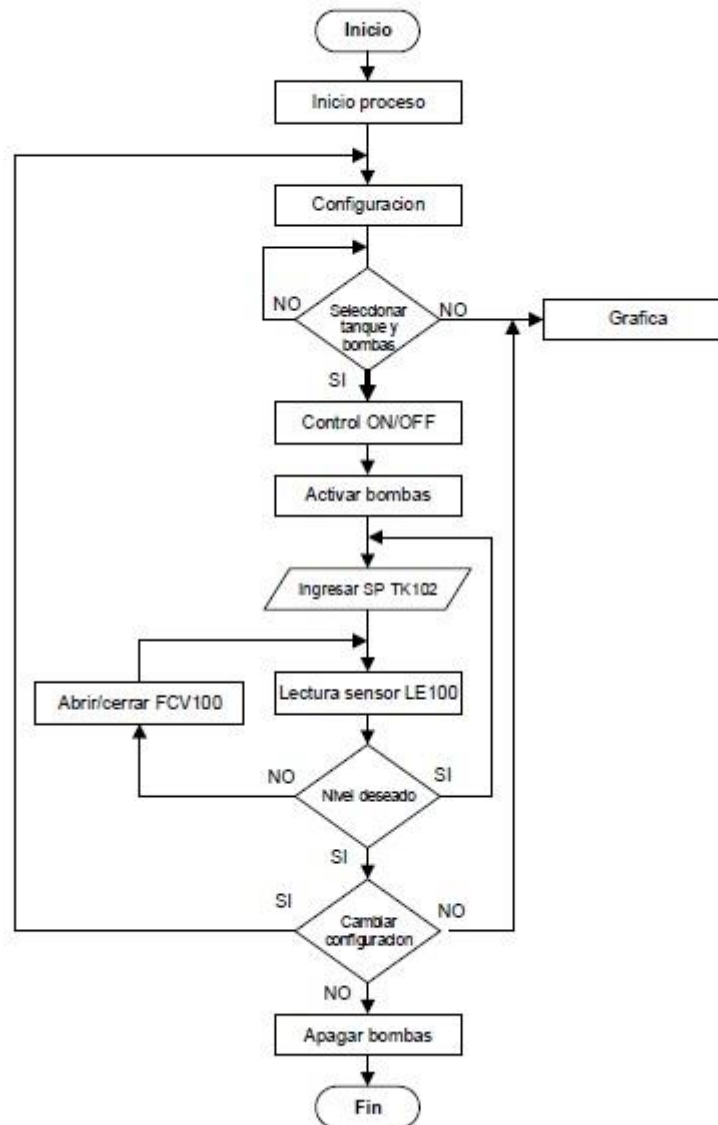


Figura 62 Control ON/OFF. Fuente: Autor

3.3.5.2 Controlador PID

Este es un controlador que se adapta más fácilmente al proceso, este control PID evalúa las variables de flujo y de nivel, por medio de un lazo de retroalimentación para regular el flujo presente en la entrada al tanque TK102, el cual depende del encendido de las bombas centrífugas, de esta manera se establece una medida de nivel para este proceso continuo y la manera de apagarlo sería manual en el botón de stop del Banco de Pruebas de Bombas Centrífugas, de este modo se representa el controlador PID en la Figura 63.

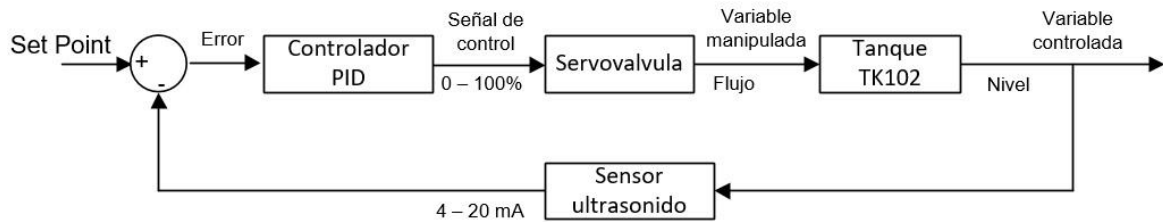


Figura 63 Controlador PID del proceso del Banco de Pruebas. Fuente: Autor.

Como se observa en la Figura 63 el controlador PID tiene en su esquema; la servoválvula en el encargada la señal manipulada de graduar el caudal de agua hacia los tanques superiores manteniendo un flujo deseado, el tanque TK102 y el sensor de ultrasonido, el cual envía una señal de 4 a 20 mA proporcional a la distancia medida al controlador.

En la siguiente Figura 64 se muestra la configuración del control ON/OFF en la supervision de la pantalla HMI.

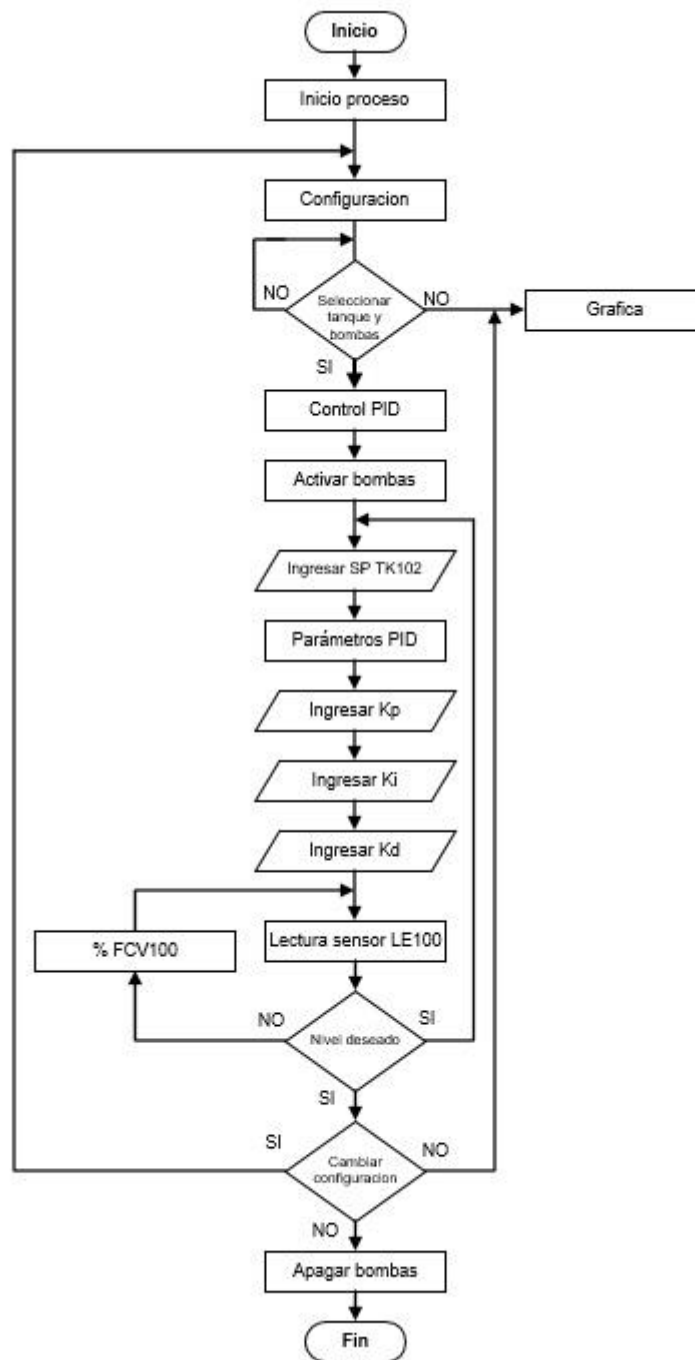


Figura 64 Control PID Fuente: Autor

3.3.5.3 Controlador PID

Para el correcto funcionamiento de un controlador PID se necesitan al menos de tres elementos:

- **Sensor**

Este elemento determina el estado del sistema por medio de una señal analógica o digital el cual representa el punto actual en el cual se encuentra el proceso. Para este caso del Banco de Pruebas de Bombas Centrífugas se utiliza el sensor de nivel (sensor ultrasonido SRF06).

- **Actuador**

Los actuadores se definen como elementos que manipulan la variable de proceso y son manipulados por el controlador, en el caso del Banco de Pruebas de Bombas Centrífugas se utiliza la servoválvula DANFOSS EV260B (FCV100).

- **Controlador**

El elemento controlador lee las señales externas que representan los valores que se desean alcanzar y las compara con los valores de la señal que proporciona el sensor, obteniendo así la señal de error en cada instante para determinar la diferencia que hay entre el valor deseado y el valor medio. La señal de error es utilizada por cada uno de los tres componentes del controlador PID (proporcional, integral y derivativa), sumando estas tres señales y generando la señal de salida que el controlador va a utilizar para gobernar el actuador y modificar el estado del sistema de manera controlada, para el banco de pruebas se utilizó el PAC Modicon M340.

- **Escalización**

Se implementan bloques para la conversión de las variables enteras ingresadas desde las pantallas de supervisión a variable reales, porque de esta manera se puede hacer la respectiva comparación de la lectura que desea el usuario y el nivel que se encuentra el tanque en el proceso actualmente.

Por otra parte, debe tener en cuenta los parámetros del controlador PID como se muestra en la Tabla 19.

| Parámetros | Tipo de datos | Descripción |
|------------|---------------|---|
| pv_inf | REAL | Límite inferior del rango del valor real. |

| | | |
|---------|------|---|
| pv_sup | REAL | Límite superior del rango del valor real. |
| out_inf | REAL | Límite inferior del rango de valores de salida. |
| out_sup | REAL | Límite superior del rango de valores de salida. |
| Rev_dir | REAL | 1 acción directa del controlador PID. |
| Mix_par | REAL | 0 controlador PID con estructura mixta. |
| kp | REAL | Coefficiente de acción proporcional (ganancia). |
| ti | TIME | Tiempo integral |
| td | TIME | Tiempo diferencial |
| kd | REAL | Ganancia diferencial |
| out_min | REAL | Límite inferior de la salida. |
| Out_max | REAL | Límite superior de la salida. |

Tabla 17 Parámetros del controlador PID en Unity Pro S. Fuente: [41]

En la Tabla 20 se describen los parámetros de entrada que debe ingresar al bloque del controlador PID en programación Unity Pro S.

| Parámetro | Variable | Tipo de datos | Descripción |
|-----------|----------------|---------------|---|
| EN | PID | BOOL | Activación del PID |
| PV | Nivel_Real | REAL | Valor de proceso, lectura del sensor de nivel. |
| SP | SP_Real_TK102 | REAL | Valor del Set point del nivel requerido por el usuario |
| FF | 0 | REAL | Entrada de interrupción |
| MAN_AUTO | Activado | BOOL | Modo de funcionamiento del controlador; 1 activado modo automático y 0 activado modo manual |
| PARA | PID_Parametros | Para_PIDFF | Parámetro |
| TR_I | 0.0 | REAL | Entrada de inicio. |
| TR_S | CMD_INIPID | BOOL | Comando y activación de inicio. |
| OUT | PID_SALIDA | REAL | Valor de salida absoluto. |

Tabla 18 Entradas del bloque PID en Unity Pro S. Fuente: [41]

3.3.6 Conexión

Para el funcionamiento de la planta desde el PLC PAC Modicon M340 fue necesario realizar el cableado del módulo digital y el analógico, en consecuencia, es necesario

tener en cuenta las recomendaciones que da el fabricante en el manual de Modicon M340, además se puede consultar el Anexo 2, para evitar los daños en los equipos.

3.3.6.1 Módulos PAC Modicon M340

Para las conexiones del panel eléctrico y el PLC Modicon M340, se deben tener en cuenta las conexiones que da el fabricante Schneider Electric de los módulos BMX DDM16025 y AM0600.

3.3.6.2 Conexión del PLC al panel del Banco de Pruebas de Bombas Centrifugas

Conexión modulo digital BMX DDM 16025

El módulo BMX DDM16025 es un módulo binario con voltaje de 24V, además tiene un bloque de terminales de 20 pines, los cuales 8 son canales de entradas digitales de 0 al 7 y 8 canales de salidas digitales de 16 al 23, además tiene entrada de 24v y la salida de 24 v, también el fusible de entrada es de 0.5A y de salida de 12 A, consultar más en Schneider Electric [42]

Conexión modulo analógico BMX AMM 0600

El módulo BMX AMM0600 combina 4 entradas analógicas sin separación de potencial con 2 salidas analógicas sin separación de potencial, por lo tanto los bloques de entradas y salidas tienen separación de potencial. [43]

Por otra parte proporciona el rango en función de la selección que realice durante la configuración en el software: [43]

- Rango de entrada de tensión +/- 10V/ de 0 a 10V / de 0a 5V/ de 1 a 5V.
- Rango de entrada de corriente de 0 a 20 mA/ de 4 a 20 mA
- Rango de salida de tensión +/- 10V
- Rango de salida de corriente de 0 a 20 mA/ de 4 a 20 mA

Para la conexión del PLC PAC Modicon M340 desde el modulo al panel eléctrico del banco se realiza de la siguiente manera como se observa Figura 65. Además se puede trabajar de dos maneras que el PLC alimente todo el panel o desde la

activación de la fuente de 24V propia del Banco de Pruebas de Bombas Centrífugas, como se observa en la Figura 65.

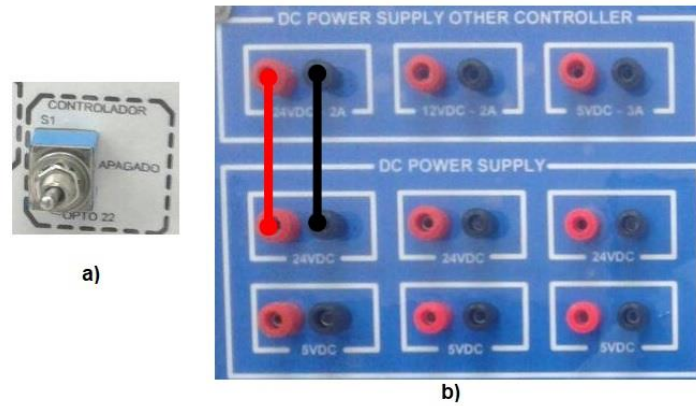


Figura 65 a) activación de la fuente de 24 V del banco de pruebas, b) Conexión de la fuente para la alimentación de las conexiones de la Figura 82. Fuente: Autor

Teniendo en cuenta como se deben conectar los módulos, se procede a realizar las conexiones para el banco de pruebas.

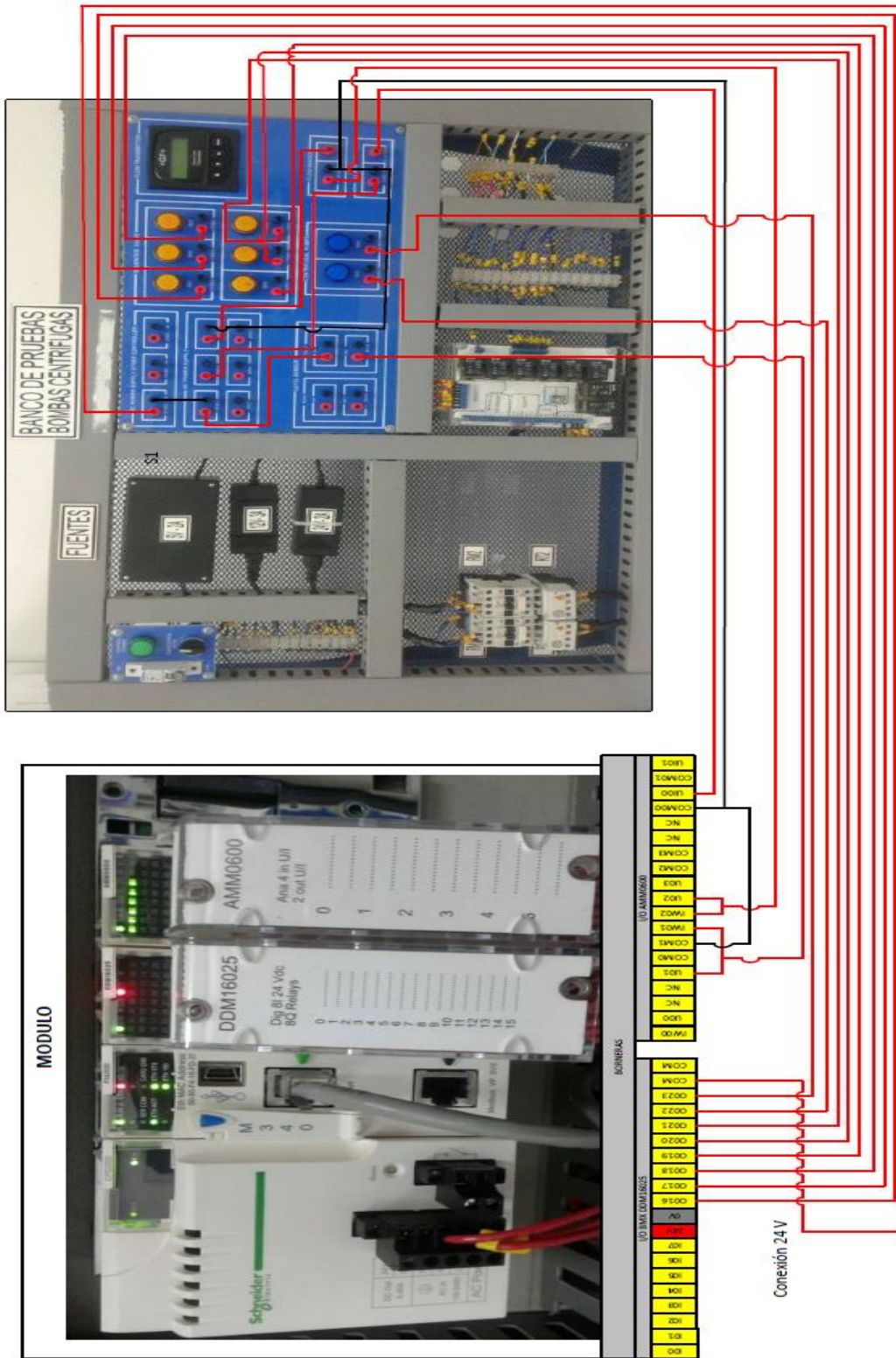


Figura 66 Conexión del PLC al panel eléctrico del banco de pruebas de bombas centrífugas. Fuente: Autor

CAPITULO IV. PRUEBAS Y RESULTADOS DEL BANCO DE PRUEBAS DE BOMBAS CENTRÍFUGAS

4.1 Flexibilidad de conexiones eléctricas panel banco de bombas

En este capítulo se muestra los resultados obtenidos del desarrollo del trabajo en el Banco de Pruebas de Bombas Centrífugas que se encuentra en el laboratorio de control de proceso.

En la implementación de la flexibilidad de conexiones eléctricas por medio de un panel que se encuentra conectado a la instrumentación en el banco de pruebas, como se muestra en la Figura 68 Y Figura 69.

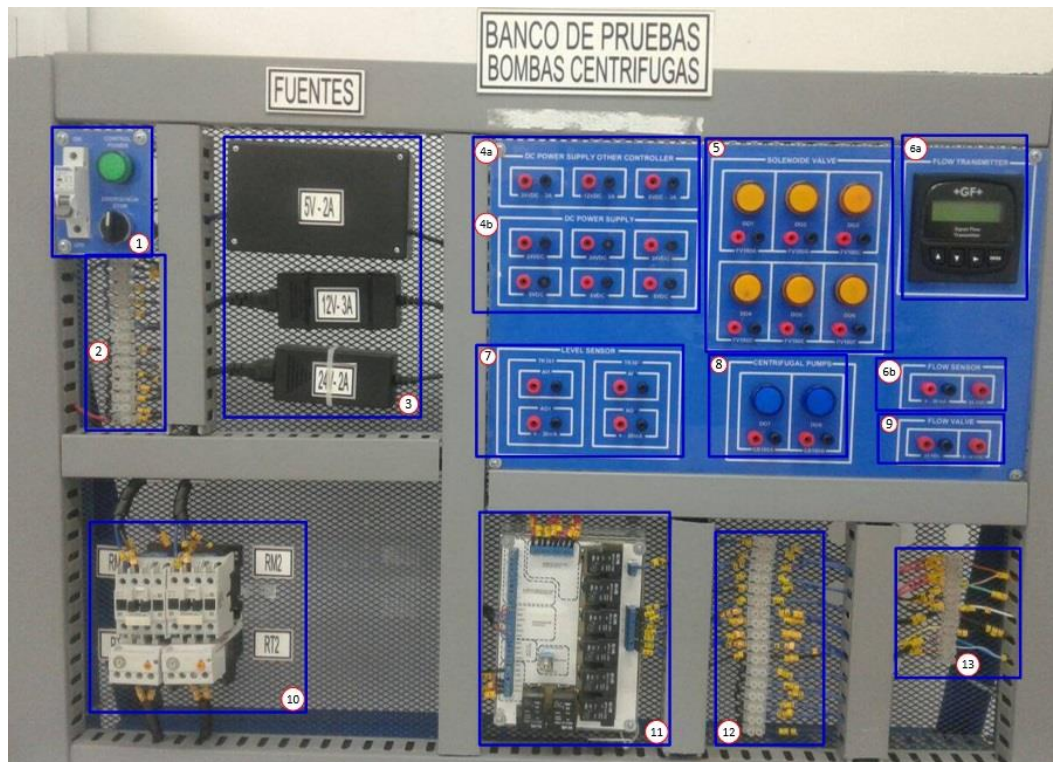


Figura 67 Descripción del panel de la planta de bombas centrífugas. Fuente: Autor

A continuación se describe cada uno de las secciones que tiene el panel del Banco de Pruebas de Bombas Centrífugas de la Figura 67, está dividido en 13 secciones:

1. Se encuentra el breaker, la perrilla de emergencia y el piloto indicador del proceso.

2. Bornera 1 en esta se encuentra lo relacionado a 110Vac del panel de la planta, tales como: fuente, switch de parada de emergencia y los contactores de las bombas centrífugas.
3. Fuentes de voltaje para el panel de conexiones de 5V-2A, 12V-3A y 24V-2A.
4. Conectores para la fuente de alimentación que se desea el usuario.
 - a. Fuentes voltaje conectados a la sección 3.
 - b. Sin conexión a ninguna fuente de voltaje, sirve como extensión de la 4a conectando desde los conectores de la 4a a la 4b, en este caso los más usados 24V y 5V independientes.
5. Conectores para un dispositivo externo con las válvulas solenoides y su respectivo indicador.
6. Transmisor indicador de flujo.
 - a. Visualización del transmisor de flujo.
 - b. Conexión del transmisor de flujo.
7. Conexión con el sensor de ultrasonido de cada tanque del banco de pruebas.
8. Conectores para un dispositivo externo con las bombas centrífugas y su respectivo indicador.
9. Conexión a la servoválvula del campo del banco de pruebas.
10. Conexión de los contactores y relés térmicos de las bombas centrífugas.
11. Es una tarjeta de relevos que se encarga de recibir los voltajes de las fuentes DC y redistribuirlos a los dispositivos de sensado (sensor ultrasonido) y el voltaje de 110VAC conmutado para la instrumentación de campo tales como: bombas centrífugas y válvulas solenoides. Además tiene una función de selección del controlador que permite controlar la tarjeta por medio del PLC seleccionado u otro controlador PLC, lo que permite una mayor flexibilidad en la selección del controlador que se emplea en el Banco de Pruebas de Bombas Centrífugas.
12. Bornera 2 en esta se encuentra lo relacionado a 110Vac en donde se realiza la conexión de la SY100 a los dispositivos del campo del banco de pruebas, los cuales se activan con los relés de la tarjeta de relevos, tales como: bombas centrífugas y válvulas solenoides.
13. Bornera 3 en esta se encuentra lo relacionado a la alimentación del transmisor de flujo, sensor ultrasonido y la servoválvula, además de las señales de sensado del transmisor de flujo (4 a 20 mA) y el sensor ultrasonido SRF06 (4 a 20 mA), por otra parte la señal de voltaje de la servoválvula de 0 a 10V.

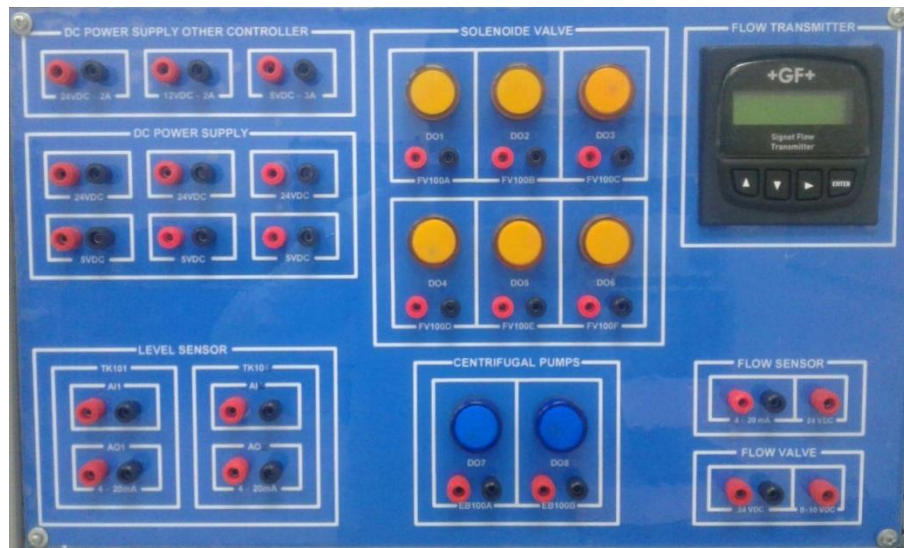


Figura 68 Panel eléctrico físico de la planta de bombas centrífugas. Fuente: Autor

4.2 Supervisión mediante HMI y el sistema SCADA

Para la planta del Banco de Pruebas de Bombas Centrífugas se realizaron las pantallas de supervisión en HMI y sistema Scada con el software de la empresa Schneider Electric.

4.2.1 Pantalla HMI

En la pantalla HMIGTO3510 se visualiza el estado de la instrumentación y el funcionamiento del Banco de Pruebas de Bombas Centrífugas, además se programa las pantallas que presentan los datos del proceso porque permiten visualizar y controlar el proceso, por otra parte, se indican los estados de los actuadores; el verde indica funcionamiento del instrumento y el rojo indica apagado del instrumento industrial.

Para este trabajo se diseñaron las pantallas de la supervisión y control para la HMIGTO3510 de Schneider Electric, por consiguiente permite mostrar los datos respectivos del proceso del banco por conectado al PLC Modicon M340, a continuación se describe cada una de ellas.

- **Pantalla de Inicio**

Esta es la primera pantalla que aparece cuando se enciende el Breaker del HMIGTO3510, porque se encuentra de esta manera predeterminada,

además en esta el usuario debe ingresar al proceso y realizar las diversas configuraciones que se requiere, ver Figura 69.

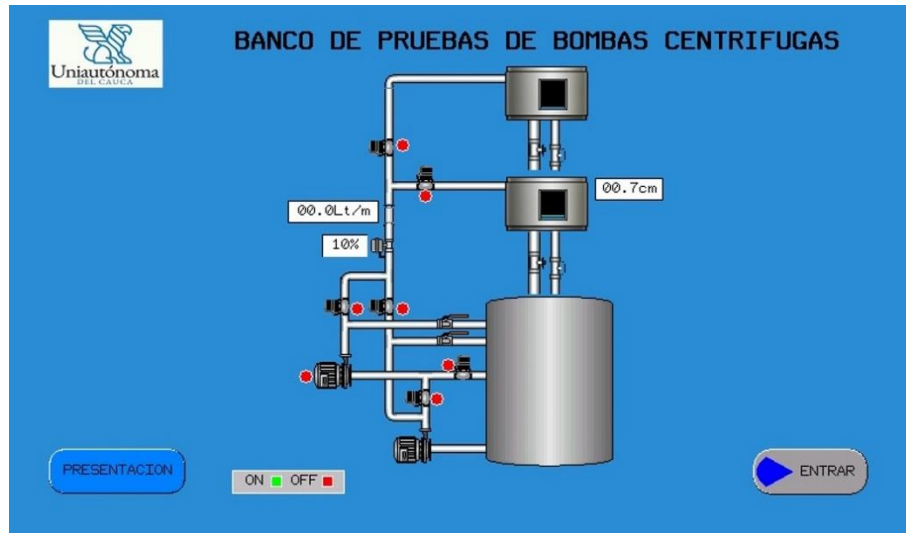


Figura 69 Pantalla de inicio de supervisión HMI. Fuente: Autor

- **Pantalla del Proceso**

La segunda pantalla permite visualizar el proceso y como se encuentra funcionando en la HMIGTO3510, es donde se inicia la respectiva configuración de la planta y el reseteo de toda la programación, además se puede ver el estado de la instrumentación y los valores de las variables de la planta, ver Figura 70.

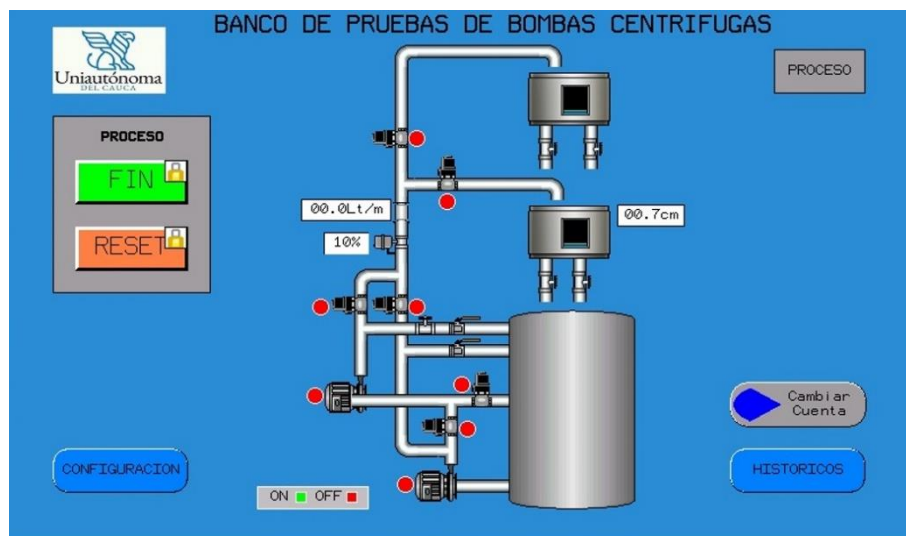


Figura 70 Pantalla del proceso del banco de pruebas de supervisión HMI. Fuente: Autor

- **Pantalla de configuración**

La tercera pantalla es donde se visualiza lo que el usuario debe configurar para su respectivo funcionamiento del proceso del banco, tales como; el tanque, la configuración de las bombas y el tipo de control a realizar, ver Figura 71.

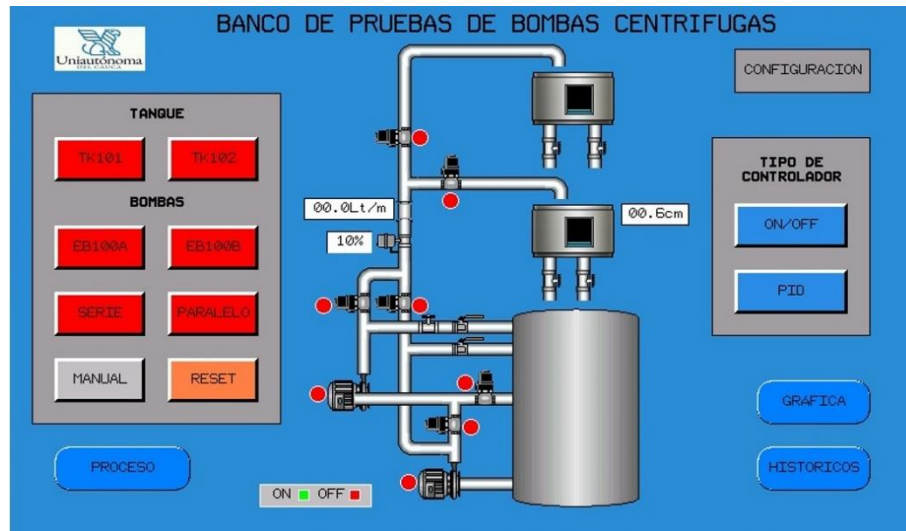


Figura 71 Pantalla de configuración del banco de pruebas en supervisión HMI. Fuente: Autor

- **Pantalla de configuración manual**

En la cuarta pantalla se visualiza lo que el usuario desee comprobar de manera manual el funcionamiento de los actuadores del Banco de Pruebas de Bombas Centrifugas tales como; las válvulas solenoides, las bombas centrífugas, la servoválvula, el botón de la pantalla de eventos, la graficas de las variables analógicas y el ingreso en porcentaje de la servoválvula, ver Figura 72.

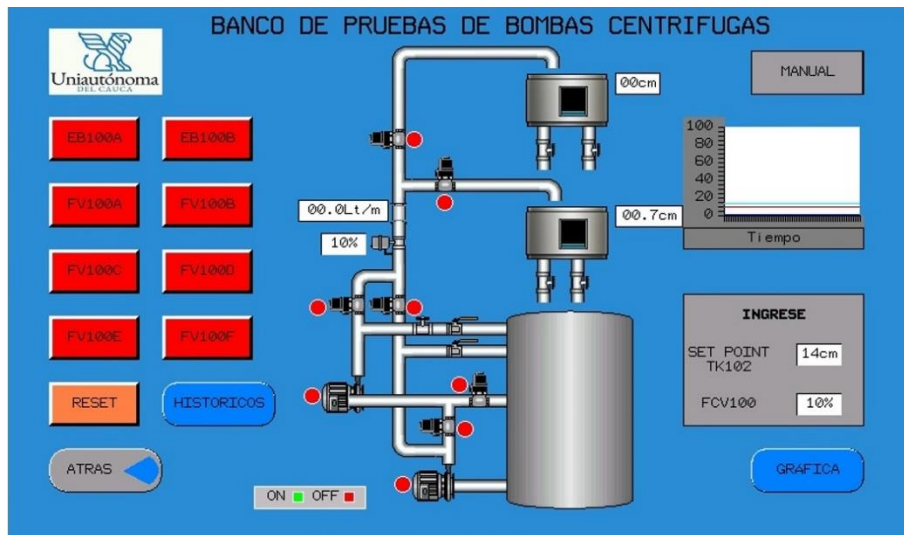


Figura 72 Pantalla de configuración del banco de pruebas en supervisión HMI. Fuente: Autor

- **Pantalla del control ON/OFF**

La quinta pantalla de supervisión se realiza el respectivo control ON/OFF de nivel del tanque seleccionado del banco de pruebas, por medio del ingreso del Set Point, además de ingresar el valor del SP determinado para el tanque TK102 y la activación de las bombas centrífugas, ver Figura 73.

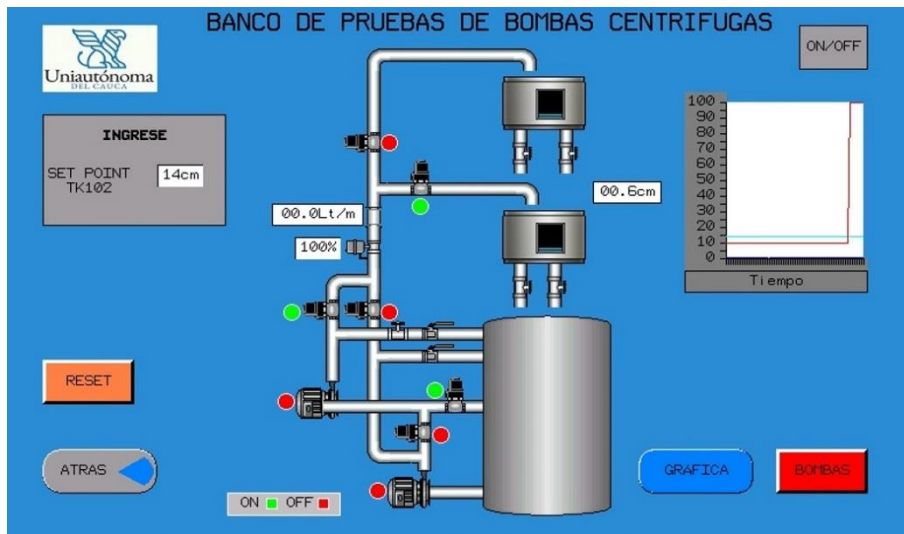


Figura 73 Pantalla del control ON/OFF de supervisión HMI del banco de pruebas. Fuente: Autor

- **Pantalla del controlador PID**

La sexta pantalla de supervisión es donde se configura el control PID que se desea implementar y el ingreso de sus respectivos parámetros K_p , T_i y T_d para su funcionamiento en el banco de pruebas, además de ingresar el valor del SP deseado por el usuario para el tanque TK102 y la activación de las bombas centrífugas, ver Figura 74.

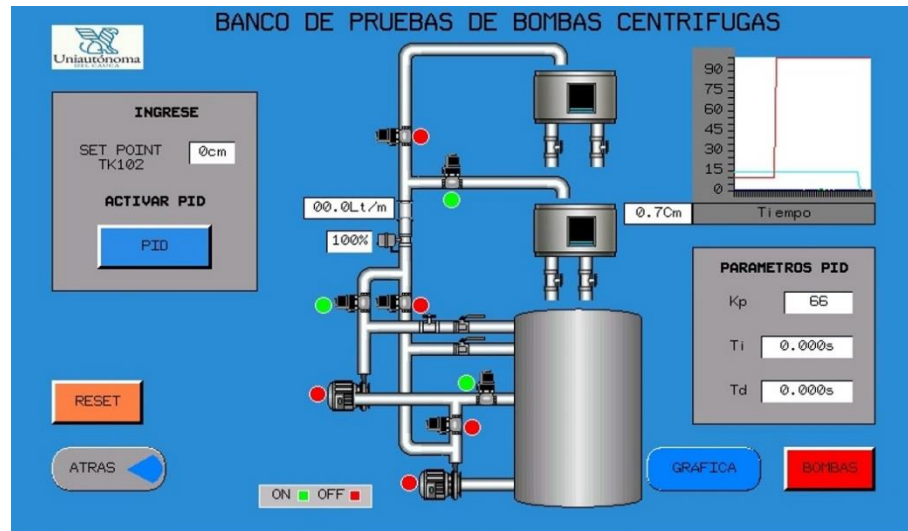


Figura 74 Pantalla del control PID del banco de pruebas en HMI. Fuente: Autor

- **Pantalla de tendencias del proceso**

La séptima pantalla permite visualizar el comportamiento de las variables del proceso del banco de pruebas y el esfuerzo de control, también permite el ingreso de SP y el porcentaje de las FCV100, ver Figura 75.

visualizar y controlar el proceso, por otra parte, se indican los estados de los actuadores; el verde indica funcionamiento del instrumento y el rojo indica apagado del instrumento industrial

Este software de Schneider Electric que permite la adquisición de datos del proceso que se encuentra ejecutando y poder guardarlos en un archivo excel, este sistema tiene las mismas pantallas de supervisión del HMI.

- **Pantalla de Inicio**

Esta pantalla es la de inicio del programa SCADA en el PC, además se puede visualizar el proceso completo y los diferentes estados de la instrumentación de supervisión del proceso del banco de pruebas y los valores de las variables de la planta, en donde se encuentra un botón de presentación una descripción de introducción del programa y el botón de ingreso del usuario a las demás pantallas del proceso, ver Figura 77.

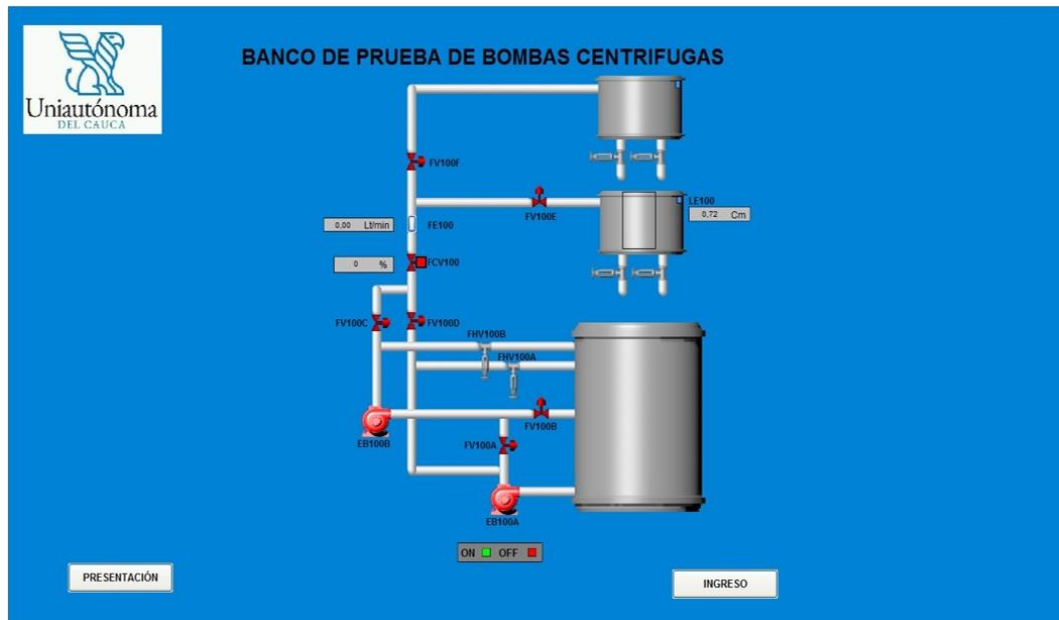


Figura 77 Pantalla de inicio sistema SCADA. Fuente: Autor

- **Pantalla del Proceso**

En esta pantalla se puede visualizar el proceso completo y los diferentes estados de la instrumentación de supervisión del proceso, además de dar inicio al proceso y su respectiva supervisión de visualizar el tipo de controlador que se encuentra ejecutando, como se observa en la Figura 78.

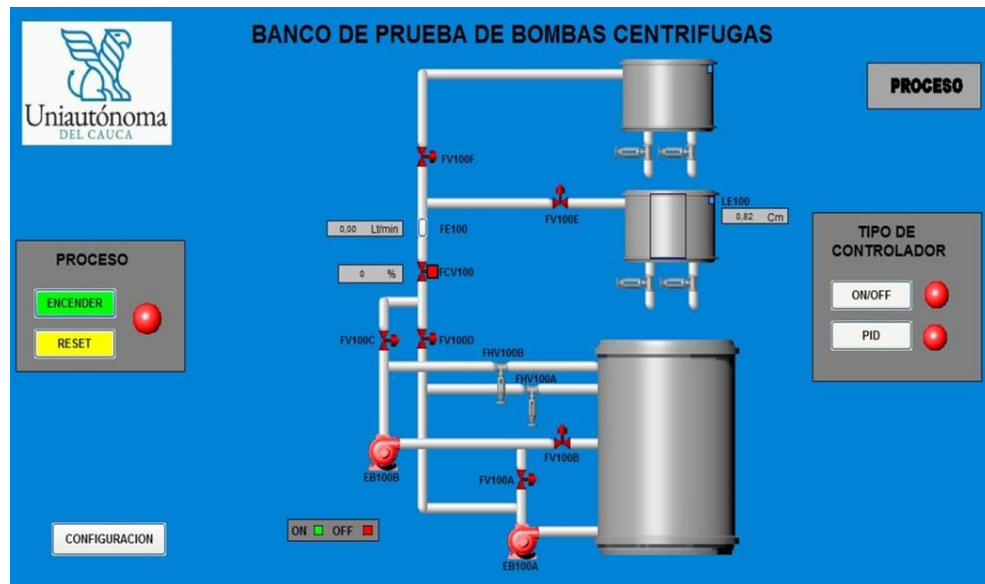


Figura 78 Pantalla del proceso del sistema SCADA del Banco de Pruebas de Bombas Centrífugas. Fuente: Autor

- **Pantalla de configuración**

Esta pantalla permite visualizar las configuraciones que se deben realizar al banco antes de iniciar el proceso, tales como; seleccionar el tanque, la configuración de las bombas, botón manual permite acceder a la pantalla Manual, botón Reset resetea toda la programación de supervisión y el tipo de control a realizar, se puede observar en la Figura 79.

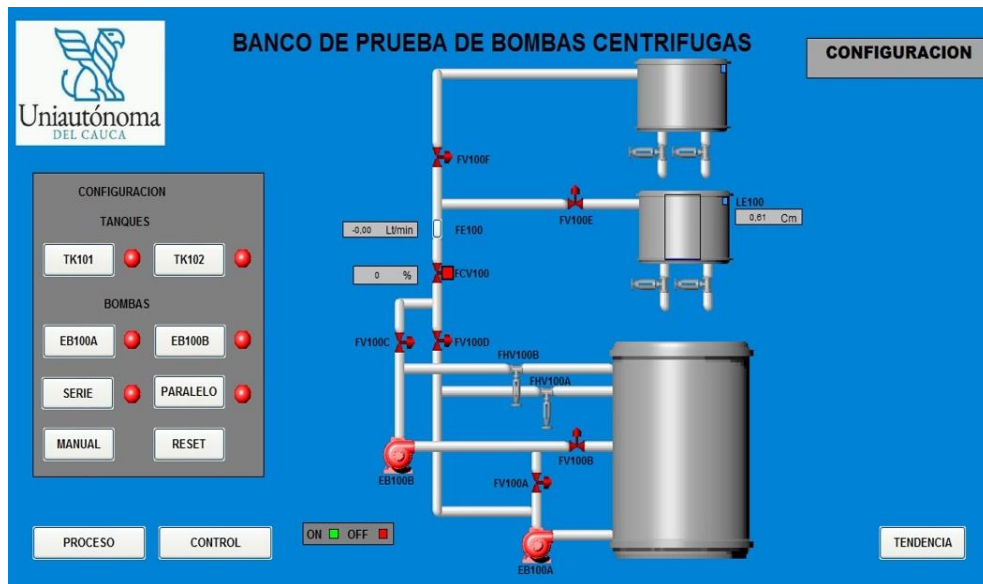


Figura 79 Pantalla de configuración del banco de bombas en el sistema SCADA. Fuente: Autor

- **Pantalla control Manual**

Esta pantalla muestra los actuadores, como las válvulas y las bombas para verificar su respectivo funcionamiento independiente, además del porcentaje de servoválvula que se desea como prueba y se puede visualizar las gráficas con los respectivos botones; Nivel, Flujo, FCV100, ver Figura 80.

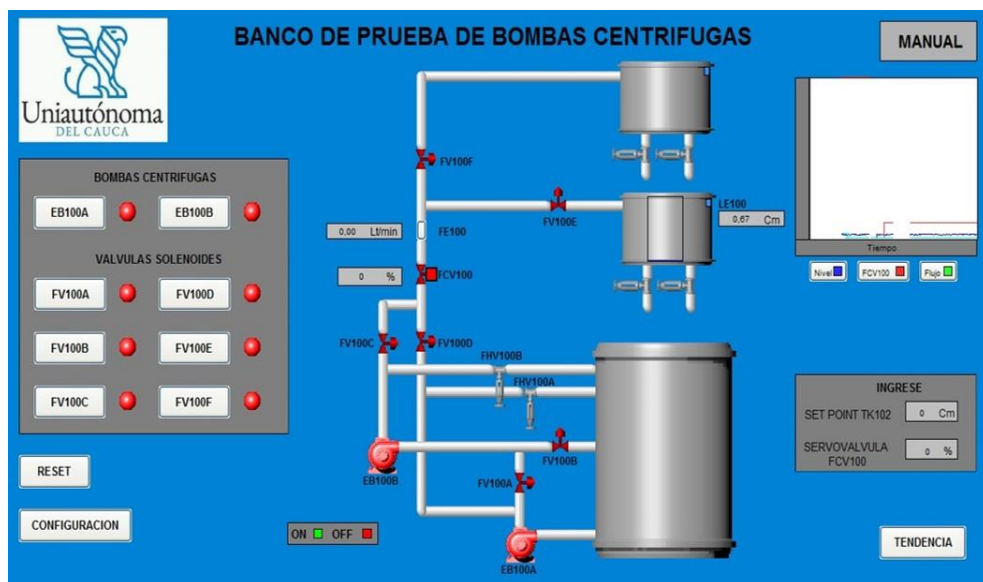


Figura 80 Pantalla de configuración manual del banco de bombas en el sistema SCADA. Fuente: Autor

- **Pantalla del Controlador ON/OFF y PID**

En esta pantalla de supervisión se realiza el respectivo control ON/OFF o PID que se desea implementar y el ingreso de sus respectivos parámetros K_p , T_i y T_d para su funcionamiento en el proceso, por otra parte se debe ingresar el valor del SP determinado para el tanque TK102 y la activación de las bombas, como se muestra en la Figura 81.

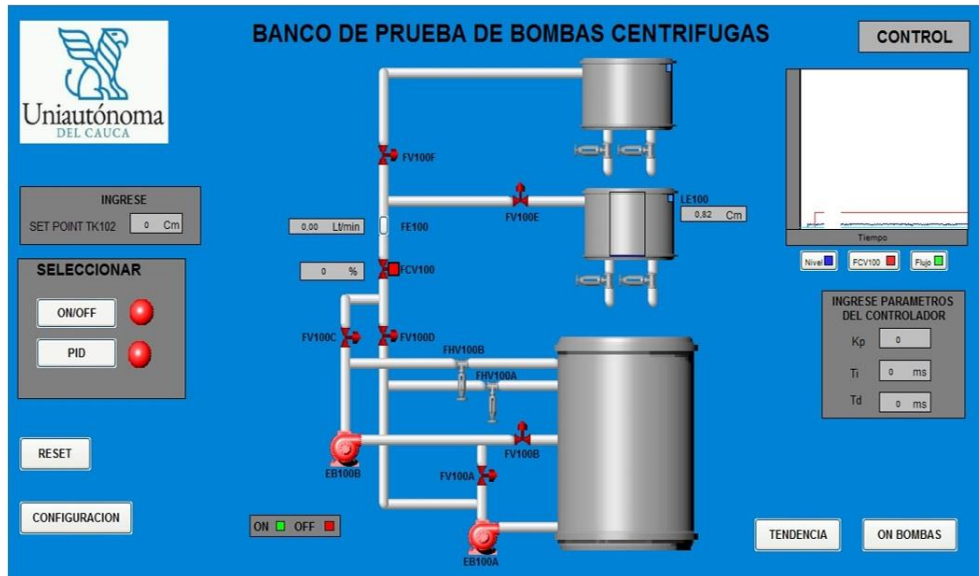


Figura 81 Pantalla de control del banco de pruebas en el sistema SCADA. Fuente: Autor

- **Pantalla de la tendencias**

La pantalla permite observar el comportamiento de las diferentes variables en tendencias; flujo, apertura de la servoválvula y el nivel del proceso del banco de pruebas y el esfuerzo de control, ver Figura 82.

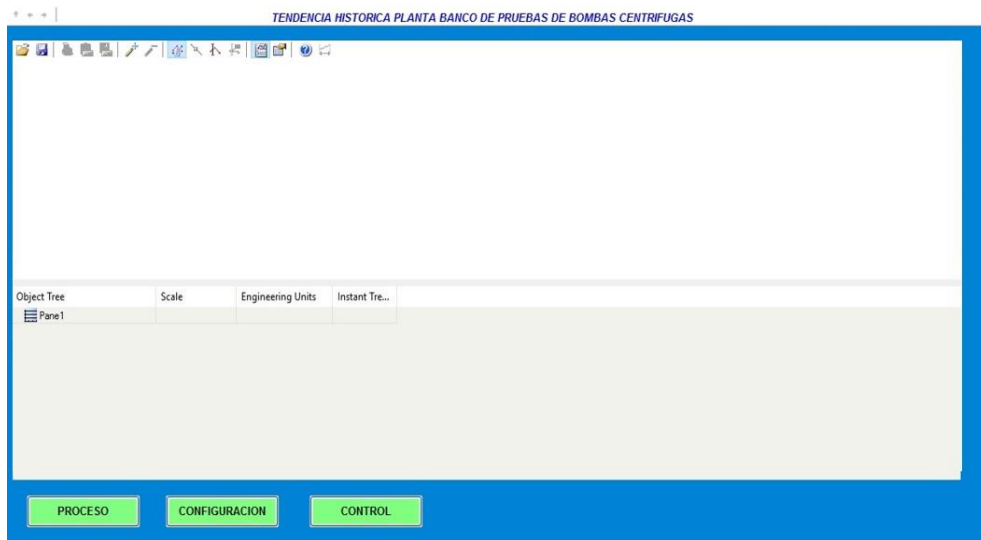


Figura 82 Pantalla de tendencias de las variables del banco de pruebas. Fuente: Autor

4.3 Control ON/OFF

En las Figura 83 - 85 se muestra los resultados del control ON/OFF al caudal de la planta, en donde se puede visualizar el comportamiento de dos variables: la variable de color rojo representa la apertura total de la servoválvula FCV100 garantizando el nivel en el tanque y la variable de color azul indica el nivel en el tanque TK102.

Este controlador se prueba para la configuración de las bombas centrifugas:

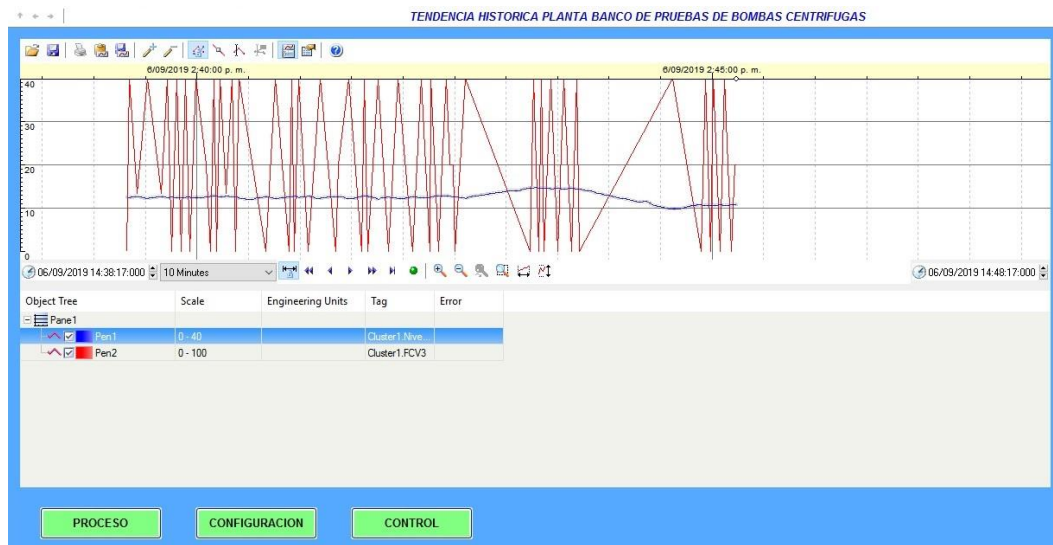


Figura 83 Resultado control ON/OFF del nivel del tanque TK102 configuración EB100A. Fuente: Autor

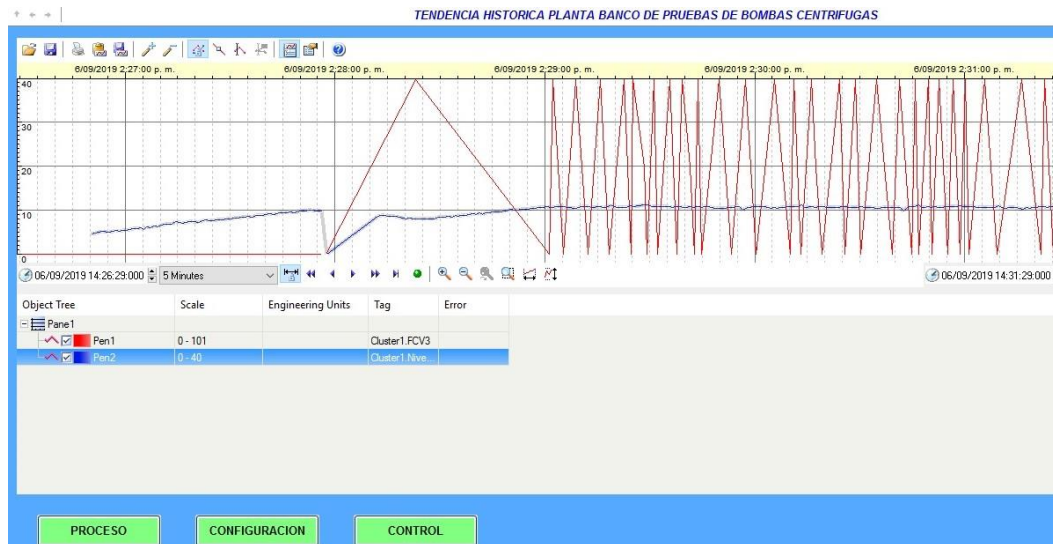


Figura 84 Resultado control ON/OFF del nivel del tanque TK102 configuración EB100B. Fuente: Autor

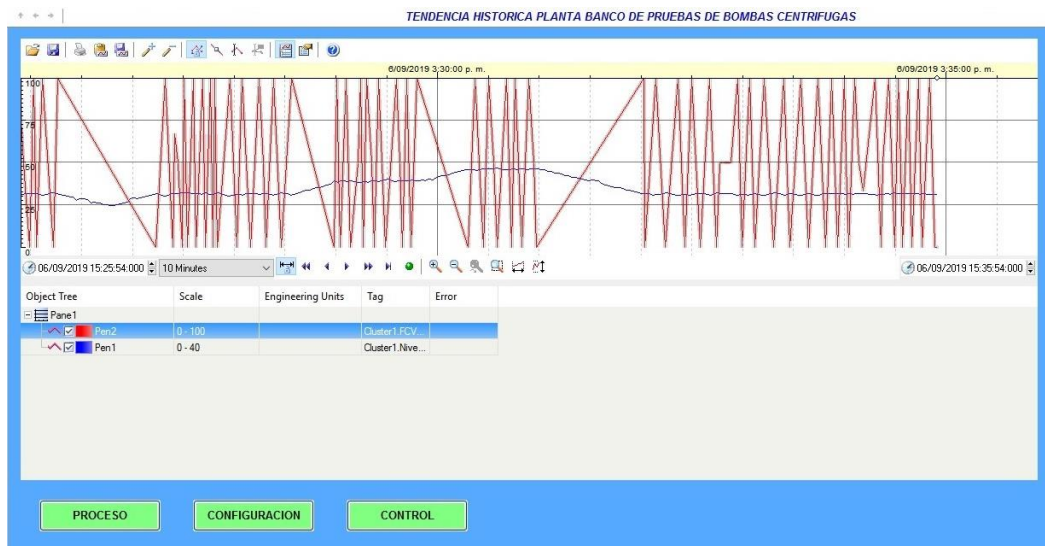


Figura 85 Resultado control ON/OFF del nivel del tanque TK102 configuración serie. Fuente: Autor

El control ON/OFF en la configuración en paralelo es demasiado rápido con la servoválvula FCV100 y puede dañar este instrumento, por tal motivo no se implementó el control para este.

4.4 Control PID

Para la sintonización del controlador PID se realizó mediante el método de lazo abierto, donde se obtuvo la curva de reacción del proceso, por consiguiente se identificó el modelo, que para este caso fue el primer orden más tiempo muerto.

4.4.1 Curva reacción

Es una forma experimental en donde se toma la planta en lazo abierto, quitando la acción de control y se realiza un cambio a la señal de entrada escalón y dejando estabilizar. Para hallar la curva de reacción de la configuración serie es necesario tener la planta estabilizada, por lo tanto, la válvula manual FHV100A y FHV100B, tienen una salida de Flujo de 8 – 9 Lt/min aproximadamente, el flujo es generado que se genera por la interrupción de la servoválvula es variante, se trabajó de un valor de estabilización de 40% en la servoválvula a una altura de 10 cm, además la válvula FHV100E debe estar cerrada por completo, luego se ingresa el valor de la servoválvula a 50% aplicando una entrada de tipo escalón con el porcentaje y un punto máximo de estabilización al 50% es de 22 cm en un tiempo mayor a una hora.

Después de obtener la curva de reacción se procede a visualizar en la pantalla de históricos del sistema SCADA en Vijeo Citect, se ingresa un porcentaje para la válvula de control de caudal, hasta que el nivel este estabilizado y se aplica una entrada de tipo escalón en porcentaje en la servoválvula FCV100, como se observa en la Figura 86.

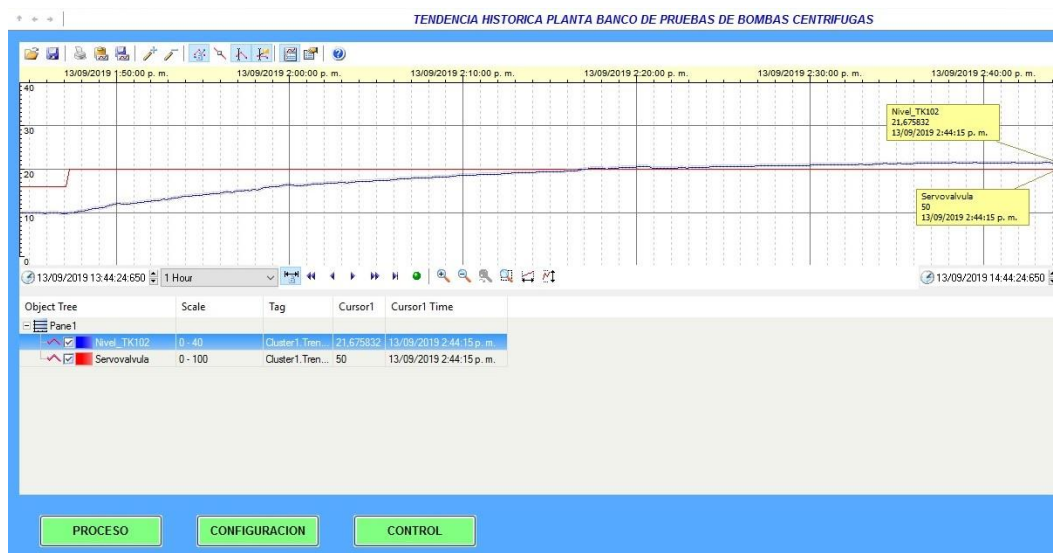


Figura 86 Curva de reacción de las bombas centrífugas en serie. Fuente: Autor

Luego de obtener la curva de reacción del proceso se realiza la extracción de los datos de un archivo excel generado por los históricos, para graficarlos en Matlab como se muestra en la Figura 87 configuración bombas en paralelo, de esta manera se puede tener los tiempos de los porcentajes que requieren cada uno de los modelos de primer orden más tiempo muerto del método de dos puntos para cada una de las configuraciones del Banco de Pruebas de Bombas Centrifugas.

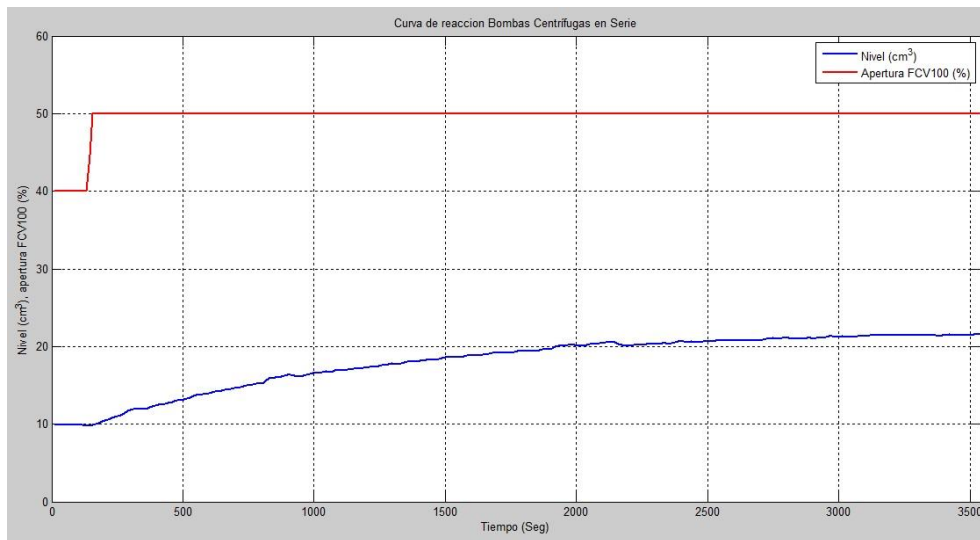


Figura 87 Curva de reacción en matlab con un cambio en la FCV100 de %. Fuente: Autor

4.4.2 Método de Ziegler y Nichols

Se realizó el método de dos puntos generalizado para hacer coincidir como mínimo en dos puntos el modelo con la curva real del proceso de la Figura 87,

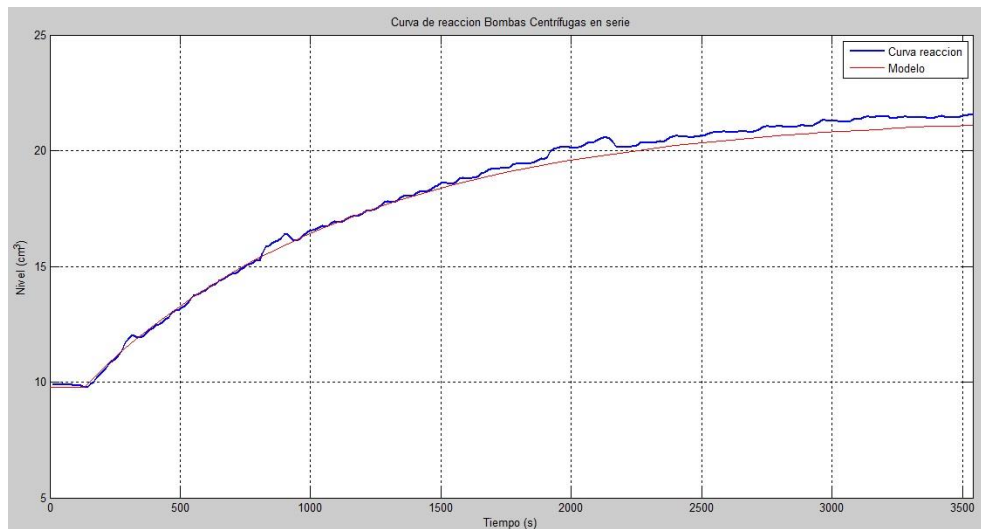


Figura 88 Curva de reacción de nivel y el modelo de la planta. Fuente: Autor.

Luego, se hallaron las constantes mediante las ecuaciones propuestas por Ziegler y Nichols en respuesta de razón de asentamiento de un cuarto para aplicárselas al controlador.

Para obtener los tiempos t_m , τ , t_1 y t_2 se realiza con la Tabla 19 de dos puntos y las ecuaciones para cada uno de los modelos del método de dos puntos:

| Método | t_1 (s) | t_2 (s) | t_m (s) | τ (s) |
|-------------|-----------|-----------|-----------|------------|
| Alfaro | 316 | 1214 | 80.7 | 817.2 |
| Broida | 347 | 537 | 5 | 1045 |
| Chen y Yang | 417 | 1142 | 25.5 | 1015 |
| Ho et al | 455 | 1777 | 76.2 | 885.7 |
| Smith | 361 | 1055 | 14 | 1041 |
| Viteckova | 417 | 1224 | 15.1 | 1004.7 |

Tabla 19 Datos obtenidos de los métodos de dos puntos. Fuente: Autor

Para visualizar las gráficas de los modelos de la Tabla 19 se realiza en matlab y se comparan con la curva real como se muestra en la siguiente Figura 89.

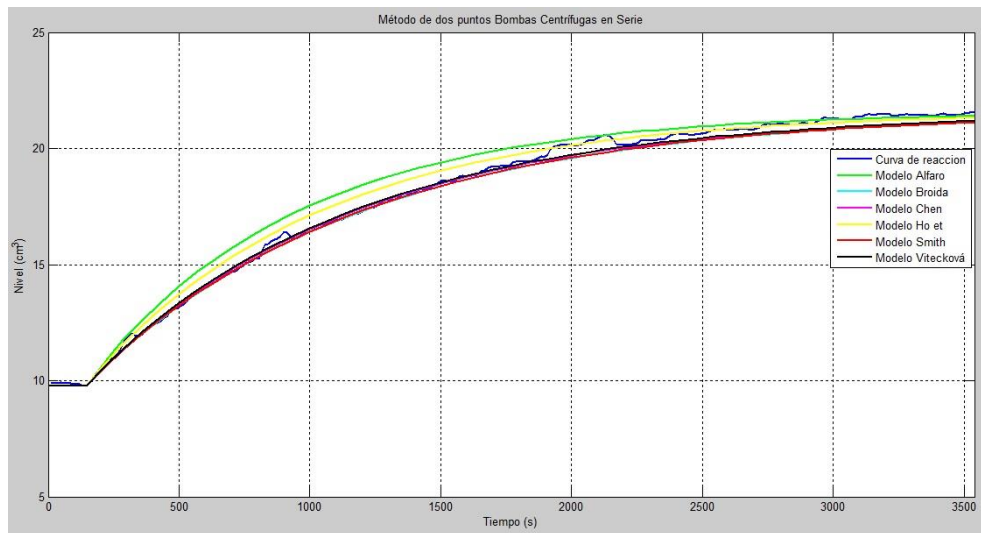


Figura 89 Comparación métodos de dos puntos vs curva real. Fuente: Autor

En la anterior Figura 89 se muestra los modelos que más se aproximan a la curva real del proceso, para este caso son el modelo Chen y Yang, y Viteckova, para este caso se escogió el modelo de Viteckova.

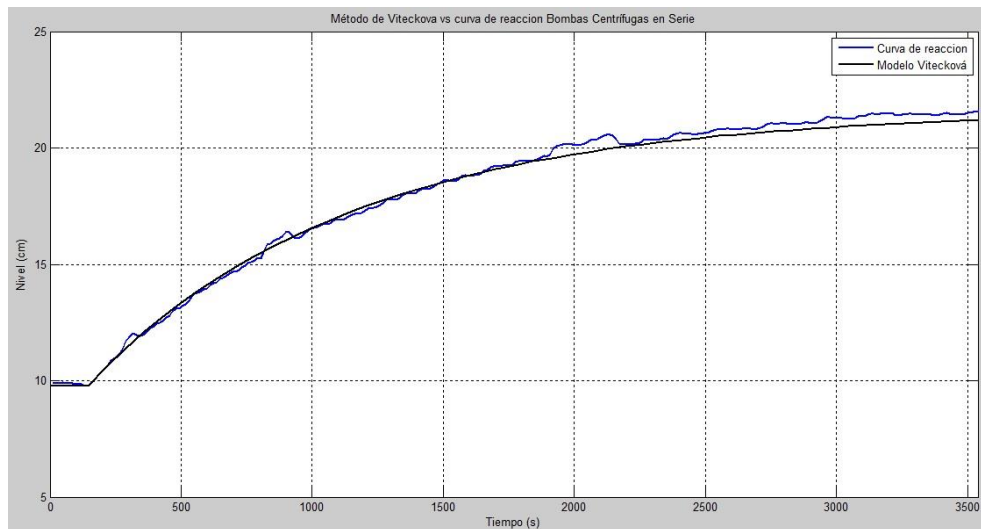


Figura 90 Modelo de Viteckova vs curva real. Fuente: Autor

Para determinar los parámetros de sintonización del controlador PID se realiza a partir del modelo de Viteckova utilizando el método de respuesta de razón de asentamiento de un cuarto de Ziegler y Nichols, para el cálculo de las constantes K_c , T_i y T_d se utilizó las formulas de la Tabla 4.

$$K_c = 1.2 \frac{\tau}{K_p t_m} = 67,6$$

$$T_i = 2t_m = 30,2$$

$$T_d = 2t_m = 7,55$$

Luego de tener los parámetros del controlador PID se realizó el esquema de control que se observa en la Figura 91.

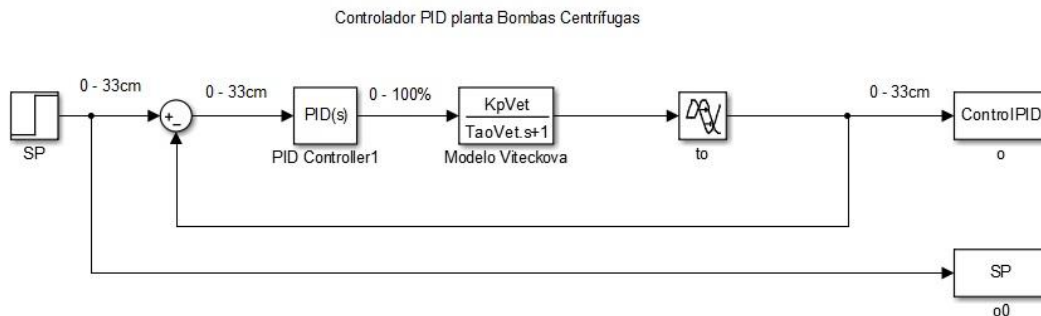


Figura 91 Esquema de control Simulink de Matlab de la planta de Bombas Centrífugas. Fuente: Autor.

A continuación se muestra en la Figura 92, el seguimiento que realiza el controlador PID a la consigna.

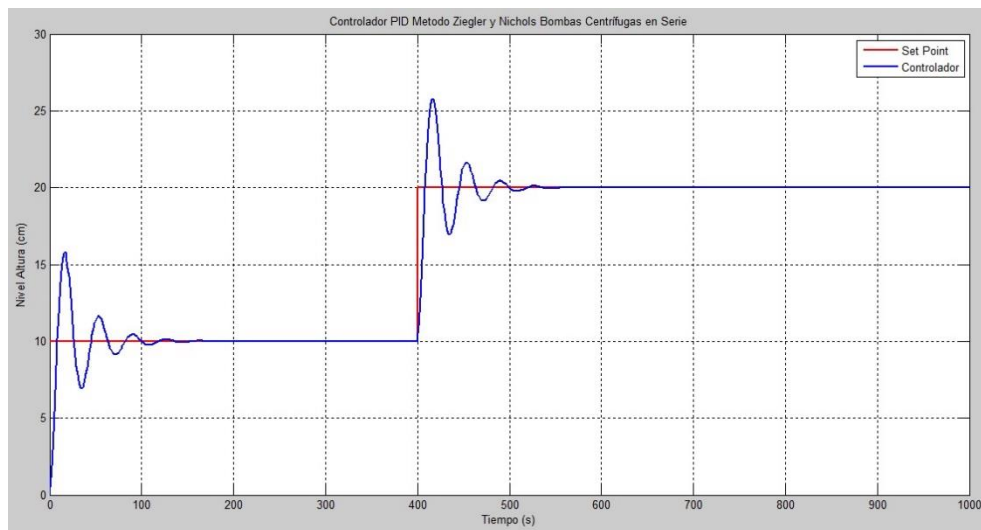


Figura 92 Seguimiento de consigna del controlador PID. Fuente: Autor

Después, los parámetros del controlador PID se realizó el esquema de control con un disturbio a los 10 minutos que se observa en la Figura 93.

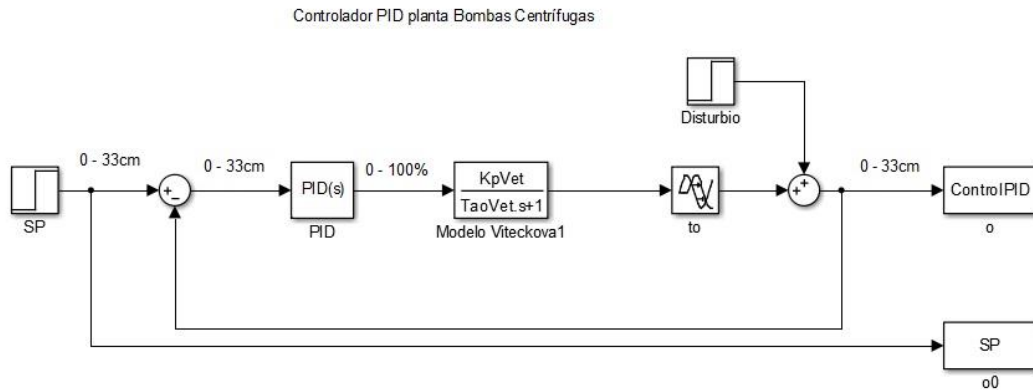


Figura 93 Esquema de control con disturbio en Simulink de Matlab de la panta de Bombas Centrifugas. Fuente: Autor.

En la Figura 92, se muestra el seguimiento que realiza el controlador PID a la consigna y luego se le aplica un disturbio.

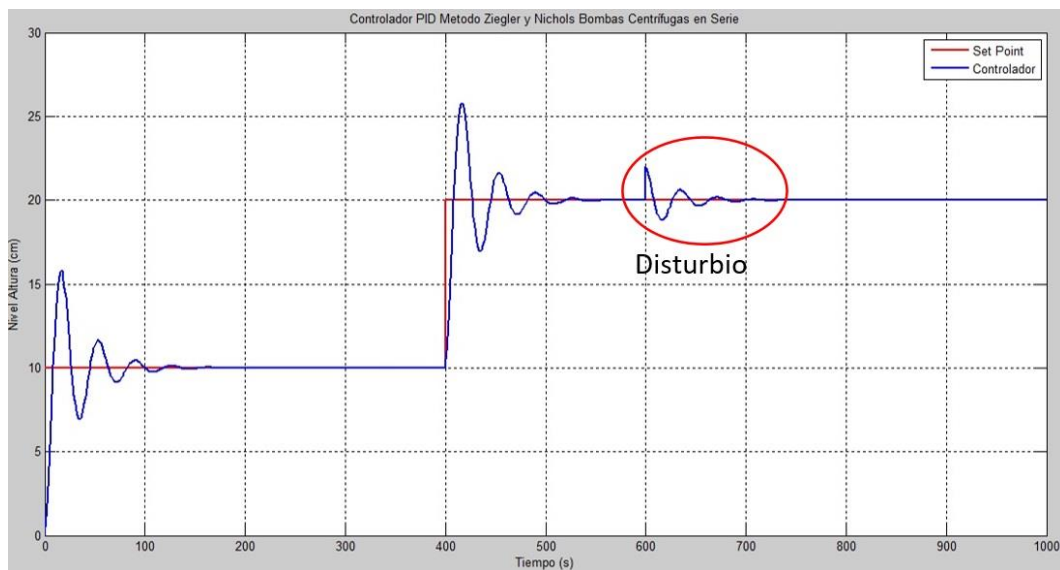


Figura 94 Seguimiento de consigna del controlador PID con disturbio. Fuente: Autor

4.5 Validación del Banco de Pruebas de Bombas Centrifugas

La validación del Banco de Pruebas de Bombas Centrifugas fue realizar prácticas y mejoras de la guías con los estudiantes de control de procesos y estudiantes, que ya hubieran cursado la asignatura de HMI y Scada para una opinión de esta.

CAPÍTULO V CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

5.1 Conclusiones

1. Se realizó un rediseño para las conexiones eléctricas del Banco de Pruebas de Bombas Centrífugas, colocando un tablero de conexiones externas para los diferentes equipos programables que se desee utilizar, debido a que este se encuentra conectado a la instrumentación del banco.
2. Se entregaron 3 guías para los estudiantes de instrumentación, sistemas de control, control de procesos, HMI y Scada realicen pruebas, por consiguiente le permiten la identificación y supervisión del Banco de Pruebas de Bombas Centrífugas.
3. Este trabajo se entrega un manual de usuario, en donde se encuentra las recomendaciones y el procedimiento para su funcionamiento del Banco de Pruebas de Bombas Centrífugas, lo que garantiza evitar algún accidente y la correcta manipulación.
4. Este trabajo desarrollado alcanzo el propósito de brindar una herramienta académica que permite probar los conceptos de las asignaturas enfocadas a los sistemas de control industrial, por ejemplo, el sistema de control y supervisión que permite tomar la señal del sensor de nivel y el controlador va a permitir un sistema controlado dependido si es ON/OFF o PID, instrumentación industrial, PLC, HMI y sistema SCADA.
5. Este trabajo logra las expectativas de la flexibilidad de las conexiones eléctricas externas con la instrumentación del Banco de Pruebas de Bombas Centrífugas, además del diseño del sistema SCADA y la pantalla HMI, el cual permite el control y supervisión de la planta.

5.2 Recomendaciones

1. Para el usuario del Banco de Pruebas de Bombas Centrífugas debe tener conocimiento del manual de usuario, teniendo en cuenta las recomendaciones y las conexiones que debe realizar para su respectivo funcionamiento.

2. Se recomienda que para el uso de estudiante, este tenga conocimientos de programación PLC, Vijeo Designer para el HMI y de los sistemas SCADA.
3. Se debe tener en cuenta antes de encender el Banco de Pruebas de Bombas Centrífugas y el PLC se encuentren bien conectados para evitar daños con el PLC.
4. Si se presenta algún inconveniente con la instrumentación de campo de la planta, se debe pedir a una persona capacitada para que corrijan esta situación para que determina la acción a realizar, debido a que esto puede afectar el funcionamiento del Banco de Pruebas de Bombas Centrífugas.

5.3 Trabajos futuros

1. Implementar un cambio del tanque reservorio, a un tanque en acrílico, colocar válvulas solenoides en la salida de la tubería en la parte inferior de los tanques, colocar un sensor en el TK101, para poder implementar otro tipo de control utilizando los dos tanques superiores del Banco de Pruebas de Bombas Centrífugas.
2. Implementar un sistema SCADA con Siemens para el Banco de Pruebas de Bombas Centrifugas con Texto Estructurado.
3. Implementar un sistema SCADA con Ignition que permita al estudiante interactuar con las 4 plantas que se encuentra en el laboratorio de procesos de la Uniautónoma del Cauca, desde una aplicación móvil y web.

CAPITULO VI BIBLIOGRAFÍA

- [1] I. R. E. Núñez, «Perspectivas en torno a la Ingeniería en el siglo XXI,» *intercambio*, nº 50, pp. 5 - 6, 2016.
- [2] Hernandez Sampieri R. y Fernandez Collado C. y Baptista Lucio P., *Metodología de la investigación*, 6 ed., México D.F., Santa Fe: Mc Graw Hill Education, 2014, p. 4.
- [3] C. Antonio, *Instrumentación Industrial*, 8 ed., Mexico D.F., Mexico: Alfaomega, 2011, p. 21.
- [4] O. P. S. Saul, «Profe Saul,» [En línea]. Available: <http://www.profesaulosuna.com/data/files/ELECTRONICA/INSTRUMENTACION/CUAD%20INSTRUM%20COMPLETO%20.pdf>. [Último acceso: 20 Octubre 2018].
- [5] ASHCROFT, «ASHCROFT,» ASHCROFT, [En línea]. Available: http://ashcroft.com/products/pressure_gauges/. [Último acceso: 09 Agosto 2018].
- [6] C. G. A., «Instrumentacion Industrial,» 14 Marzo 2014. [En línea]. Available: <http://gacv92.blogspot.com/2014/03/que-es-la-instrumentacion-industrial.html>. [Último acceso: 01 Septiembre 2018].
- [7] «ROBOT ELECTRONICS,» [En línea]. Available: <http://www.robot-electronics.co.uk/hm/srf06tech.htm>. [Último acceso: 10 01 2019].
- [8] «Medición y Control,» [En línea]. Available: <http://www.medicionycontrol.com.co/oll/Productos/m/21.pdf>. [Último acceso: 14 10 2018].
- [9] «ROHDE&SCHWARZ,» [En línea]. Available: https://www.rohde-schwarz.com/es/producto/eb200-pagina-de-inicio-producto_63493-9476.html. [Último acceso: 5 Septiembre 2018].
- [10] G. E. M. Ibarra, «Repositorio Institucional de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo,» 2013. [En línea]. Available: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/3345/1/108T0093.pdf>. [Último acceso: 11 10 2017].
- [11] Eliecer Barrera Ariza, Sandra Milena Santoyo Castañeda, «Electrónica UTS,» 2013. [En línea]. Available: <https://electronikuts.files.wordpress.com/2014/09/tesis-sandra-y-eliecer-corregidos.pdf>. [Último acceso: 17 10 2017].

- [12] J. Wilhite, «Wiki AVANCTECH,» [En línea]. Available: http://wiki.advantech.com/images/d/d7/The_Benefits_of_PAC-Solutions_whitepaper.pdf. [Último acceso: 12 03 2019].
- [13] «OPTO22,» [En línea]. Available: http://www.opto22.com/site/pr_details.aspx?cid=4&item=SNAP-PAC-R1. [Último acceso: 17 01 2019].
- [14] Schneider, «schneider-electric,» Schneider, 2017. [En línea]. Available: <http://www.schneider-electric.com/products/cl/ls/3900-pac-plc-y-controladores-dedicados/3950-pacs/1468-modicon-m340/>. [Último acceso: 15 04 2017].
- [15] «BARNES,» [En línea]. Available: <http://www.barnes.com.co/qb-60-qb-80/>. [Último acceso: 27 01 2019].
- [16] K. Ogata, Ingeniería de control moderna, 5 ed., Madrid: Pearson, 2010.
- [17] S. A. Ibañez Avalos, «Slideshare,» Universidad Nacional de Trujillo, 2016. [En línea]. Available: <https://es.slideshare.net/Jxno/tesis-prueba-80778433>. [Último acceso: 20 03 2019].
- [18] E. Stalin, «Repositorio Institucional UTPL,» Universidad Católica de Loja, 2017. [En línea]. Available: <http://dspace.utpl.edu.ec/bitstream/123456789/18021/1/MACAS%20PE%C3%91A-%20%20SARANGO%20CHAMBA.pdf>. [Último acceso: 14 10 2018].
- [19] V. M. Alfaro, «Identificación de procesos sobreamortiguados utilizando técnicas de lazo abierto,» *Revista de la Costa Rica*, vol. 11, nº 1 y 2, pp. 11 - 25, 2001.
- [20] R. F. T. Martínez, «Evaluación del desempeño de métodos experimentales de identificación a lazo abierto,» *RIELAC*, vol. XXXII, nº 2, pp. 50 - 64, 2011.
- [21] V. M. A. Ruiz, «Actualización del método de sintonización de controladores de Ziegler y Nichols,» *Ingeniería*, vol. 15, nº 1,2, pp. 39 - 52, 2005.
- [22] Carlos A. Smith, Armando B. Corripio, Control Automático de procesos Teoría y Práctica, Mexico: Limusa, 1991.
- [23] «INTERNATIONAL TRAINING,» [En línea]. Available: <https://www.smctraining.com/webpage/indexpage/311/>. [Último acceso: 1 03 2019].
- [24] «Grupo cmr,» 29 07 2016. [En línea]. Available: <https://www.mcr.es/ventajas-y-desventajas-de-la-automatizacion-industrial/>. [Último acceso: 15 03 2019].

- [25] Felipe, «Universidad de Oviedo,» [En línea]. Available: <http://isa.uniovi.es/~felipe/files/infindII/documentos/Ejemplo%20Automatizaci%F3n%20Mezcla.pdf>. [Último acceso: 10 03 2019].
- [26] «Scribd,» [En línea]. Available: <https://es.scribd.com/doc/192625889/Sistema-de-Control-Distribuido-y-Scada>. [Último acceso: 14 03 2019].
- [27] «International Electrotechnical Commission,» 2003. [En línea]. Available: <https://webstore.iec.ch/publication/4552>. [Último acceso: 25 02 2019].
- [28] R. D. Skog, «WIKIMEDIA COMMONS,» 01 2012. [En línea]. Available: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/65/Programacion_de_con_troladores_logicos_%28PLC%29.pdf. [Último acceso: 10 04 2019].
- [29] «UNIVERSITAT DE VALENCIA,» [En línea]. Available: https://www.uv.es/rosado/courses/sid/Capitulo3_rev0.pdf. [Último acceso: 15 03 2019].
- [30] S. Electric, «Schneider Electric,» 07 2018. [En línea]. Available: https://www.schneider-electric.com/resources/sites/SCHNEIDER_ELECTRIC/content/live/FAQS/28000/FA28444/es_ES/Unity_v4.1_M340_Procesadores_Bastidores_y_Fuentes_de_Alimentacion.pdf. [Último acceso: 10 03 2019].
- [31] Maurici Santis Chavez, Emerso Paolo Villa Plazas, «Repositorio Institucional de la Universidad Pontificia Bolivariana,» 2009. [En línea]. Available: https://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/523/digital_17957.pdf?sequence=1. [Último acceso: 29 01 2019].
- [32] G. E. M. Ibarra, 2013. [En línea]. [Último acceso: 11 10 2017].
- [33] A. S. Menezo, 04 2015. [En línea]. Available: <https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/6368/374765.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. [Último acceso: 7 10 2017].
- [34] P. A. W. Cornejo, 04 2011. [En línea]. Available: http://repositorio.uchile.cl/tesis/uchile/2011/cf-weber_pc/pdfAmont/cf-weber_pc.pdf. [Último acceso: 10 10 2017].
- [35] A. Salcines Menezo, Monografía Automatización y supervisión del sistema de calefacción IFCA, Santander, 2016 .
- [36] A. Vaca Nieto, Diseño y configuración de un Scada para una Planta de Laboratorio, Valladolid España, 2015.

- [37] C. F. Balanta Lasso, R. Sepulveda Salazar, *Propuesta para la automatización de la red de distribución de agua potable en la planta de tratamiento de puerto tejada*, Puerto Tejada, 2011.
- [38] D. A. E. Masache, *Diseño e implementación de un sistema SCADA, para el equipo de ensayo con bomba centrífuga del laboratorio de fluidos de la facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional*, Quito, 2011.
- [39] D. F. Q. Peña, *Propuesta de modelamiento de un sistema de manufactura flexible mediante instrumentos virtuales y software HMI/SCADA como herramienta de supervisión y control*, Bogota DC, 2013.
- [40] S. Electric, «Schneider Electric,» 07 2018. [En línea]. Available: https://download.schneider-electric.com/files?p_enDocType=User+guide&p_File_Name=35013353_K01_000_12.pdf&p_Doc_Ref=35013353K01000. [Último acceso: 26 04 2019].
- [41] Schneider Electric, «Schneider Electric,» 04 2016. [En línea]. Available: https://download.schneider-electric.com/files?p_enDocType=User+guide&p_File_Name=EIO0000001136.05.pdf&p_Doc_Ref=EIO0000001136. [Último acceso: 15 03 2019].
- [42] S. Electric, «Schneider Electric,» [En línea]. Available: https://www.schneider-electric.com/library/SCHNEIDER_ELECTRIC/SE_LOCAL/APS/210056_3A2A/BMXDDM16025.pdf. [Último acceso: 15 02 2019].
- [43] «Schneider Electric,» 12 2018. [En línea]. Available: https://download.schneider-electric.com/files?p_enDocType=User+guide&p_File_Name=35011981_K01_000_16.pdf&p_Doc_Ref=35011981K01000. [Último acceso: 4 30 2019].
- [44] G. E. Maldonado Ibarra, *Automatización de un ascensor para discapacitados del mirador del parque Guayaquil (Parque Infantil) de la ciudad de Riobamba*, Riobamba, Ecuador, 2013.