

# **UNIVERSIDAD NACIONAL SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA,  
INFORMÁTICA Y MECÁNICA**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA**



**“DISEÑO DE UN SISTEMA DE SEGURIDAD INSTRUMENTADO E INTEGRACIÓN A  
UN MODULO DCS MEDIANTE MODBUS TCP/IP Y PROFINET”**

**TESIS PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL DE:**

**INGENIERO ELECTRÓNICO**

**AUTOR:** Bach. Soto Cervantes Antonio Francisco

**ASESOR:** M. Sc. Ing. Coaquira Castillo Roger Jesús

**Cusco-Perú**

**2020**

## **DEDICATORIA**

A mamá Rosario, mi mamá Lourdes, mi tío Carlos y mi tío Edgar, por el constante apoyo durante cada etapa de mi vida, gracias a ellos por siempre.

**Antonio Francisco Soto Cervantes**

## **AGRADECIMIENTO**

A Dios por permitirme llegar acá.

A mi madre por darme la vida y estar presente en cada momento de la misma, apoyándome y cuidándome.

A mi familia por contagiarme su entusiasmo para nunca rendirme.

A Jessica por llegar a mi vida y por permitirme disfrutar de ella con sus actos.

A mis amigos de la infancia y universidad, especialmente a Jorge por demostrarme que la vida es cada instante y cada instante merece la pena reír por lo más mínimo.

A mi colegio José Pardo porque en sus ambientes reforcé lo que mi familia me enseñó: respeto y honradez.

A la UNSAAC y a mi asesor M. Sc. Ing. Roger Coaquira, por permitirme llegar hasta aquí en base a conocimientos y profesionalidad.

## ÍNDICE

NOMBRE DEL ITEM	PÁGINA
DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTO.....	iii
RESUMEN.....	xvii
ABSTRACT .....	xviii
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I: GENERALIDADES.....	4
1.1 Antecedentes bibliográficos .....	4
1.2 Descripción de la realidad problemática .....	5
1.3 Formulación del problema.....	6
1.4 Objetivos.....	6
1.4.1 Objetivo general .....	6
1.4.2 Objetivos específicos .....	6
1.5 Justificación .....	7
1.6 Metodología.....	8
1.6.1 Investigación de tipo descriptiva y experimental.....	8
1.6.2 Método de investigación de tipo deductivo .....	8
1.6.3 Periodo de análisis .....	8
1.6.4 Flujo de actividades.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
1.6.5 Fuentes de información e instrumentos utilizados .....	8

1.6.6 Técnicas de recolección y procesamiento de datos .....	9
1.7 Alcances .....	10
1.8 Limitaciones.....	10
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.....	11
2.1 Antecedentes .....	11
2.2 Tasa de flujo volumétrico en tuberías .....	14
2.3 Número de Reynolds.....	15
2.4 Flujo de salida de líquido que pasa a través de una válvula .....	16
2.5 Ingeniería del proyecto de tesis .....	16
2.5.1 Ingeniería conceptual .....	16
2.5.2 Ingeniería básica .....	17
2.5.3 Ingeniería de detalle.....	17
2.5.4 Procura y construcción.....	17
2.6 Estándar de ingeniería .....	17
2.7 Normas técnicas.....	18
2.8 Organismos internacionales relevantes .....	18
2.8.1 IEC.....	18
2.8.2 ISA.....	19
2.8.3 ISO .....	19
2.9 Sistemas de control basados en PLC .....	19

2.10 Sistemas de control distribuido – DCS.....	21
2.11 Supervisión, Control y Adquisición de Datos - SCADA .....	22
2.11 Redes industriales.....	22
2.11.1 Modbus.....	22
2.11.2 Profinet .....	23
2.12 Diferencias entre un DCS y un SCADA .....	23
2.12.1 DCS.....	24
2.12.2 SCADA .....	24
CAPÍTULO III: MODELAMIENTO MATEMÁTICO Y AUTOMATIZACIÓN DEL SISTEMA .....	26
3.1 Proceso de traslado de agua entre reservorios .....	26
3.2 Filosofía de control de nivel básica en el reservorio B del módulo de bombeo.....	27
3.2.1 Límite de batería .....	27
3.2.2 Instrumentos y equipos principales.....	27
3.2.4 Estrategia de control .....	27
3.3 Cálculo de valores de flujo nominales con respecto a las revoluciones de la bomba P1 .....	28
3.3.1 Cálculo experimental Nro. 1 .....	29
3.3.2 Cálculo experimental Nro. 2.....	31
3.4 Análisis del número de Reynolds en la tubería de descarga.....	33
3.5 Obtención del modelo matemático del sistema .....	35
3.5.1 Modelo matemático teórico .....	36

3.5.2 Obtención del modelo matemático haciendo uso de MATLAB - Simulink.....	39
3.6 Curvas de presión en la tubería de descarga de la bomba P-1 y representación matemática.....	49
3.7 Filosofía de control para automatizar el sistema.....	52
3.7.1 Funciones del sistema.....	52
3.7.2 Grado de automatización .....	52
3.7.3 Modos de control.....	53
3.7.4 Modos de operación.....	53
3.7.5 Modos de detención .....	53
3.8 Descripción del proceso .....	54
3.8.1 Traslado de agua al reservorio B y simulación de consumo mediante accionamiento manual de la válvula LV3 .....	54
3.8.2 Traslado de agua del reservorio B al reservorio C por acumulación excesiva de agua.....	55
3.9 Control del proceso .....	55
3.9.1 Áreas del proceso .....	55
3.9.2 Traslado de agua al reservorio B y simulación de consumo .....	55
3.9.3 Estrategias de control para el traslado de agua al reservorio B con simulación de consumo.....	55
3.9.4 Traslado de agua del reservorio B al reservorio C por acumulación excesiva de agua.....	56
3.9.5 Estrategias de control para el traslado de agua del reservorio B al reservorio C por acumulación excesiva de agua .....	56
3.10 Desarrollo de las lógicas y lazos de control.....	57

3.10.1 Lógicas de control para el área 1 .....	57
3.10.2 Sintonización del lazo de control de nivel .....	59
3.10.3 Lógicas de control para el área 2.....	66
CAPÍTULO IV: REQUERIMIENTOS Y ESPECIFICACIONES TECNICAS REFERENTES A LA SEGURIDAD DEL PROCESO .....	67
4.1 Descripción básica del sistema de bombeo de agua entre reservorios .....	67
4.2 IEC 61508 – Seguridad funcional de sistemas eléctricos, electrónicos y programables relacionados con seguridad .....	68
4.2.1 Objetivos del estándar IEC 61508 .....	69
4.2.2 Ciclo de vida de la seguridad .....	70
4.2.3 Niveles integrales de seguridad (SIL) .....	70
4.2.4 Sistema de seguridad instrumentado.....	72
4.2.5 Función instrumentada de seguridad (SIF).....	72
4.2.6 Partes de estándar .....	73
4.3 IEC 61511 – Seguridad funcional: Sistemas de seguridad instrumentados para el sector de la industria de procesos .....	74
4.3.1 Requerimientos generales .....	75
4.4 ISA 84.00.01 (IEC 61511-1 Mod) – Seguridad Funcional: Sistemas instrumentados de seguridad para el sector de industria de procesos .....	76
4.5 LEY 29783 – Ley de seguridad y salud en el trabajo .....	77
4.6 Selección de equipos e instrumentos. ....	78
CAPÍTULO V: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE SEGURIDAD E INTEGRACIÓN AL DCS.....	80

5.1 Fase 1: Requerimientos generales y análisis de riesgos del sistema de bombeo de agua ....	81
5.1.1 Análisis de riesgos y operatividad - HAZOP .....	82
5.2 Fase 2: Determinación del SIL de cada nodo .....	85
5.3 Fase 3: Realización de los SIF .....	91
5.3.1 Lógicas de control de los SIF .....	96
5.4 Fase 4: Operación, mantenimiento, reparación, modificaciones y decomisionamiento final de los sistemas orientados a la seguridad .....	98
5.5 Arquitectura de red .....	98
5.6 Direcciones de los equipos involucrados .....	100
5.7 Herramientas integradas al PCS 7 y SoMachine .....	101
5.8 Variables a integrar al DCS .....	105
5.9 Supervisión del proceso .....	106
5.10 Almacenamiento de datos e históricos .....	108
CAPÍTULO VI: VALIDACIÓN DEL SISTEMA DE SEGURIDAD Y DE LA INTEGRACIÓN.....	110
6.1 Validación de los niveles de seguridad de las funciones de seguridad del SIS .....	110
6.1.1 Validación del SIL correspondiente al lazo de control de nivel 400 .....	113
6.1.2 Validación del SIL correspondiente al lazo de control de presión 500 .....	115
6.2 Validación del funcionamiento de las funciones de seguridad .....	116
6.2.1 Pruebas de funcionamiento de la función de seguridad de nivel.....	117
6.2.2 Pruebas de funcionamiento de la función de seguridad de presión .....	120
CAPÍTULO VII: COSTOS Y PRESUPUESTOS.....	124

CONCLUSIONES.....	125
RECOMENDACIONES .....	127
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	128
ANEXOS.....	130

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>NOMBRE DEL ITEM</b>	<b>PÁGINA</b>
Tabla 1 - Estimación de flujo de entrada al reservorio B en el experimento 1. ....	29
Tabla 2 - Estimación de flujo de entrada al reservorio B en el experimento 2 .....	31
Tabla 3 - Cálculo de errores entre el experimento 1 y el experimento 2. ....	33
Tabla 4 - Cálculo para el nro. de Reynolds.....	34
Tabla 5 - Constantes para los diferentes valores de flujo de entrada y nivel. ....	37
Tabla 6 - Cálculo del porcentaje de error en estado estacionario .....	48
Tabla 7 - Datos obtenidos mediante el medidor PI-1 para las distintas revoluciones de P-1 para prueba 1 .....	50
Tabla 8 - Datos obtenidos mediante el medidor PI-1 para las distintas revoluciones de P1 para la prueba 2 .....	51
Tabla 9 - Descripción de las palabras claves usadas en la realización del HAZOP para este proyecto.....	83
Tabla 10 - Representación del análisis HAZOP realizado en el proceso de bombeo de agua entre reservorios.....	84
Tabla 11 - Representación del análisis cualitativo para la determinación del nivel integral de seguridad.....	86
Tabla 12 - Análisis de la severidad e impacto de los daños ocasionados por los riesgos .....	87
Tabla 13 - Análisis de eventualidad frente a los tipos de eventos peligrosos. ....	88
Tabla 14 - Determinación SIL mediante método cualitativo en el nodo 1. ....	90
Tabla 15 - Determinación SIL mediante método semi-cualitativo en el nodo 2.....	91
Tabla 16 - Instrumentos de medición propuestos para la implementación del SIS.....	92

Tabla 17 - Controladores propuestos para la implementación del SIS.....	92
Tabla 18 - Actuadores propuestos para la implementación del SIS. ....	92
Tabla 19 - Lista de precomisionamiento de equipos destinados a la función de seguridad SIF 1 lazo 400.....	93
Tabla 20 - Lista de precomisionamiento de equipos destinados a la función de seguridad SIF 2 lazo 500.....	94
Tabla 21 - Descripción de las direcciones IP configuradas en los equipos que usan este protocolo. ....	100
Tabla 22 - Direccionamiento de los dispositivos que no usan IP.....	101
Tabla 23 - Direccionamiento Modbus TCP/IP.....	105
Tabla 24 – Direccionamiento Modbus TCP/IP.....	106
Tabla 25 - Representación de los límites de las tasas de fallas no detectadas para el SIF 1 lazo 400.....	113
Tabla 26 - Resultados para la validación SIL en el NODO 1.....	113
Tabla 27 - Resultados para la validación SIL en el NODO 1.....	114
Tabla 28 - Determinación de límites para la tasa de fallas no detectadas para el SIF 2 lazo 500.....	115
Tabla 29 - Resultados para la validación SIL en el NODO 2.....	115
Tabla 30 - Resultados para la validación SIL en el NODO 1.....	116

## ÍNDICE DE FIGURAS

NOMBRE DEL ITEM	PÁGINA
Figura Nro. 1 - Sistema de bombeo de agua entre reservorios. Fuente: propia. ....	4
Figura Nro. 2 - Módulo Sistema De Control Distribuido Siemens PCS 7 – Fuente: propia. ....	13
Figura Nro. 3 - Tablero de control del sistema de bombeo de agua a escala - Fuente: propia. ..	14
Figura Nro. 4 - Diagrama básico - control de procesos - Fuente: elaboración propia .....	20
Figura Nro. 5 - PLC Siemens S7-1200 CPU 1212C – Fuente: propia.....	21
Figura Nro. 6 - Representación gráfica de las variables de proceso en el Reservorio B. Fuente: propia.....	28
Figura Nro. 7 - Curva de representación del flujo $Q_{in}$ en función de las revoluciones de la bomba P-1. ....	30
Figura Nro. 8 - Curva de representación del flujo $Q_{in}$ en función de las revoluciones de la bomba P-1. ....	32
Figura Nro. 10 - Curva de representación de Nivel vs. Flujo de entrada. Fuente: propia. ....	35
Figura Nro. 11 - Curva de representación de Nivel vs Flujo en estado estacionario. Fuente: Propia. ....	38
Figura Nro. 12 - Modelo equivalente a la ecuación diferencial implementado en Simulink. Fuente: Propia. ....	39
Figura Nro. 13 - Respuesta al escalón de magnitud 27.5, de la simulación de la ecuación diferencial. Fuente: propia.....	40
Figura Nro. 14 - Curva de respuesta del nivel a una entrada de 27.5 Hz. Fuente: Propia.....	40
Figura Nro. 15 - Entorno de trabajo para importar datos del MATLAB (mitad izquierda), entorno de trabajo Toolbox Ident MATLAB (mitad derecha). Fuente: propia. ....	42

Figura Nro. 16 - Curvas de respuesta: respuesta real (rojo) vs respuesta real filtrada (negro) vs respuesta simulada (azul). Fuente: propia .....	43
Figura Nro. 17 - Curvas de respuesta al estímulo para las diferentes funciones de transferencias obtenidas mediante simulación en Simulink. Fuente: Propia .....	44
Figura Nro. 18 - Representación gráfica de validación de las funciones de transferencia halladas usando como validación la curva respuesta real filtrada. Fuente: propia. ....	46
Figura Nro. 19 - Comparativa de la señal experimental vs. La señal generada a partir de la FT de la ecuación 21- Fuente: Propia. ....	47
Figura Nro. 20 – Representación gráfica de la presión en función de las revoluciones de la bomba P-1 para el experimento 1 .....	50
Figura Nro. 21 - Representación gráfica de la presión en función de las revoluciones de la bomba P-1 para el experimento .....	51
Figura Nro. 22 - Asistente para la configuración de lazos PID en el software SoMachine Basic. ....	58
Figura Nro. 23 - Diagrama de bloques correspondiente al control de nivel en el reservorio B. Fuente: propia. ....	59
Figura Nro. 24- Curva de representación de respuesta frente al escalón en el lazo de control de nivel. ....	60
Figura Nro. 25 - Representación gráfica de la obtención de las curvas para hallar los parámetros del regulador PID según Ziegler-Nichols .....	61
Figura Nro. 26 - Tendencia del lazo de control de nivel con un set point de 30 cm. Fuente: propia. ....	62
Figura Nro. 27 - Tendencia del lazo de control de nivel con un set point de 25 cm. Fuente: propia.....	63
Figura Nro. 28 - Tendencia del lazo de control de nivel con un set point de 20 cm. Fuente: propia.....	64
Figura Nro. 28 - Sistema de bombeo de agua a escala (vista posterior) - Fuente: propia. ....	68

Figura Nro. 29 - Ciclo de vida de la Seguridad – Fuente: EXIDA (2006). IEC 61508 Overview Report. [Figura]. Recuperado de <a href="https://www.win.tue.nl/~mvdbrand/courses/sse/1213/iec61508_overview.pdf">https://www.win.tue.nl/~mvdbrand/courses/sse/1213/iec61508_overview.pdf</a> . .....	70
<a href="https://www.win.tue.nl/~mvdbrand/courses/sse/1213/iec61508_overview.pdf">Figura Nro. 30 - Niveles integrales de seguridad, basado en demanda – Fuente: EXIDA (2006). IEC 61508 Overview Report. [Figura]. Recuperado de https://www.win.tue.nl/~mvdbrand/courses/sse/1213/iec61508_overview.pdf</a> . .....	71
<a href="https://www.win.tue.nl/~mvdbrand/courses/sse/1213/iec61508_overview.pdf">Figura Nro. 31 - Niveles integrales de seguridad, basados en continuidad – Fuente: EXIDA (2006). IEC 61508 Overview Report. [Figura]. Recuperado de https://www.win.tue.nl/~mvdbrand/courses/sse/1213/iec61508_overview.pdf</a> . .....	71
Figura Nro. 32 - Requerimientos generales de IEC 615011 – Fuente: IEC 61511- 1 Funcional Safety - Safety instrumented Systems for the process industry sector (2003). [Figura]. Recuperado de: Archivos personales. ....	76
Figura Nro. 33 – Definición gráfica de un sistema de seguridad instrumentado. Fuente: ISA.TR 84.00.02-2002-Part 1. [Figura]. Recuperado de: Archivos personales. ....	77
Figura Nro. 34 – Representación gráfica del método cualitativo para la determinación del nivel integral de seguridad SIL. Fuente: IEC 61508 - 1998 - part 5 pag. 47. ....	85
Figura Nro. 35 – representación gráfica del método de análisis por matrices de capas. Fuente: IEC 61508 1998. ....	89
Figura Nro. 36 - Diagrama de conexión del transmisor de nivel LH100 - LT-02 .....	94
Figura Nro. 37 - P&ID incluyendo las funciones de seguridad implementadas (trazadas de rojo). Fuente: propia. ....	95
Figura Nro. 38 - Lógica de adquisición de datos desde los instrumentos de seguridad implementada en el CFC Editor del SIMATIC MANAGER. Fuente: propia .....	96
Figura Nro. 39 - Lógica de enclavamiento de seguridad del nodo 1 implementada en el CFC Editor. Fuente: propia. ....	97
Figura Nro. 40 - - Lógica de enclavamiento de seguridad del nodo 2 implementada en el CFC Editor. Fuente: propia. ....	98

Figura Nro. 41 - Diagrama de redes del sistema en general. Fuente: propia.....	99
Figura Nro. 42 - Configuración en el software SoMachine para la habilitación de funcionalidad Modbus server en el PLC M221. Fuente: propia. ....	102
Figura Nro. 43 - Asistente para la configuración de la funcionalidad Modbus Client para el PLC Siemens S7-400. Fuente: propia.....	103
Figura Nro. 44 - Lógica de control de la comunicación MOBBUS Client implementada en el CFC Editor del Siemens SImatic Manager. Fuente: propia.....	104
Figura Nro. 45 - Pantalla SCADA de supervisión del proceso de bombeo de agua entre reservorios. Fuente: propia. ....	107
Figura Nro. 46 - Pantalla de supervisión de datos de proceso específica al Reservorio B .....	108
Figura Nro. 47 - Consola de control del HISTORIAN SERVER. Fuente: propia. ....	109
Figura Nro. 48 - Reportes en forma de tendencias obtenidos desde la aplicación I INFORMATION SERVER para la adquisición de datos archivados en el servidor HISTORIAN. Fuente: propia. ....	109
Figura Nro. 49 - Tendencias de lecturas de nivel de los transmisores de control LT-01 y de seguridad LT-02, cuando el proceso está en modo automático. Fuente: propia.....	118
Figura Nro. 50 - Tendencias de prueba del funcionamiento del lazo de seguridad 400 SIF 1. Fuente: propia. ....	119
Figura Nro. 51 - Funcionamiento normal del lazo de control de presión. Fuente: propia.....	121
Figura Nro. 52 - Tendencias de prueba del funcionamiento del lazo de seguridad 500 SIF 2. Fuente: propia. ....	122

## RESUMEN

El presente proyecto tiene como objetivo principal el diseño e implementación de un sistema de seguridad instrumentado (SIS) y la integración del mismo, en conjunto con un sistema de control ya existente, a un módulo DCS Siemens PCS 7. Actualmente el sistema de control mencionado, supervisa y controla (solo en modo manual) a un sistema de bombeo de agua entre reservorios.

Es así que en primera instancia se realizó un modelado matemático del sistema de bombeo, lo que contribuyó en identificar las variables de proceso y control más importantes y reconocer algunas variables de proceso que no se estudiaron hasta ese momento. Esto también fue de ayuda al momento de automatizar el sistema ya que la lógica y la filosofía de control se basaron en las variables de proceso estudiadas hasta ese momento.

Seguidamente se recolectó la documentación necesaria para el diseño del sistema de seguridad, esta documentación está compuesta por normas y estándares internacionales relacionados con la seguridad industrial. Los conceptos recolectados en este estudio son usados posteriormente para el diseño del sistema de seguridad instrumentado.

Posteriormente se desarrolló el sistema de seguridad instrumentado en base a los requerimientos generales obtenidos de los estándares antes estudiados. Estos requerimientos se determinaron específicamente para el sistema, en base al estudio del proceso de bombeo de agua entre reservorios dando a lugar a que los niveles integrales de seguridad SIL fueran determinados. Seguidamente se integró el sistema de control y el de seguridad al módulo DCS Siemens PCS 7 lo cual permitió concentrar toda la data del proceso en los servidores de operación y de históricos.

Finalmente se validaron las funciones de seguridad implementadas mediante las comprobaciones teóricas basadas en verificaciones SIL y en pruebas experimentales que permitieron conocer la robustez del sistema implementado a la hora de enfrentar peligros.

**Palabras clave:** Sistema de seguridad instrumentado, DCS, niveles de seguridad integral, protocolos de comunicación industrial.

## ABSTRACT

The main objective of this project is the design of an instrumented security system (SIS) and its integration, together with an existing control system, into a DCS Siemens PCS 7 module. All equipment and systems are located in the Professional School of Electronic Engineering, of the UNSAAC located in the city of Cusco. Currently the mentioned control system supervises and controls a water scale pumping system between reservoirs. The storage and pumping liquid is water, although it could be another liquid.

In this thesis in the first instance the necessary documentation for the design of the security system was collected, this documentation is composed of international norms and standards related to industrial safety. The concepts collected in this study are subsequently used for the design of the instrumented security system.

With the objective of knowing the process, a mathematical modeling was carried out, which contributed in knowing more the most important process variables and also in recognizing some process variables that were not taken into account so far. This was also very helpful when automating the system since control logic and philosophies were based on the process variables studied so far.

Next, the Instrumented Security System was developed based on the general requirements obtained from the standards previously studied. These requirements were induced to the process of pumping water between reservoirs giving rise to that the integral levels of SIL safety were determined. Next, the control system and the security system were integrated into the DCS Siemens PCS 7 module, which allowed to concentrate all the process data on the operation and historical servers.

Finally, the safety functions implemented were validated through theoretical checks based on SIL verifications and experimental tests that allowed us to know the robustness of the system implemented when facing hazards.

**Key words:** Safety instrumented systems, DCS, safety integrity level, industrial communication protocols.

## INTRODUCCIÓN

Desde la invención de la primera máquina a vapor hasta nuestros días, la industria en general no deja de crecer para satisfacer las necesidades de la humanidad, dicho crecimiento provoca necesidades de optimizar los procesos o hacer que los mismos sean más seguros en todo sentido. La optimización y seguridad no dejan de amoldarse a los distintos tipos de industria de tal manera que se vio necesario fundar entidades que puedan regular este desarrollo mediante la creación de técnicas y estándares que hoy en día deben seguirse para poder conllevar el desarrollo de la industria de la mejor manera posible.

Hoy en día nuestro país no es ajeno al desarrollo de la industria, ya sea desde el punto de vista del pequeño empresario hasta las grandes compañías mineras que ven nuestras riquezas territoriales como un motivo más para traer desarrollo al país. Ya sea en un proceso automático pequeño como la producción de suelas de caucho o en el tratamiento de aguas para la generación de energía eléctrica el ingenio humano nunca se detiene con tal de producir un poco más cada día para generar más beneficios. Ya sea con máquinas con un control manual mecánico hasta sistemas de control digital con capacidades de procesamiento de hasta 10000 variables de proceso por dispositivo controlador.

Como consecuencia de la complejidad de los procesos industriales modernos se vio la necesidad de implementar técnicas y procedimientos de seguridad que aseguren el correcto desarrollo de los procesos industriales y salvaguarden la integridad física y fisiológica de las personas que estén en contacto con estos procesos. Visto desde el punto de la Ingeniería Electrónica, estas técnicas y procedimientos están abocados al desarrollo de sistemas digitales que se encarguen de supervisar en todo momento el proceso industrial y elaborar estrategias de control de tal manera que este sistema supervisor pueda actuar acorde a cualquier imprevisto que se pueda suscitar, tratando en todo momento de llevar el proceso industrial a un estado que pueda asegurar la seguridad de las maquina involucradas y de las personas que las operan.

En el Laboratorio de Automatización Industrial de la escuela profesional de Ingeniería Electrónica de la UNSAAC, se pudieron implementar sistemas de control modernos y acorde a la realidad actual de la automatización; esto garantiza el aprendizaje del alumno de pregrado dándole un enfoque industrial actual. Sin embargo, estos módulos no cuentan con una aplicación real o al menos simulada de un proceso industrial en donde aplicar la capacidad de procesamiento digital de los mismos, es por esto que el presente trabajo se enfoca indirectamente en darles sentido a estos módulos mediante la integración de los mismos a un módulo de bombeo de agua implementado en un proyecto de tesis anterior.

En el primer capítulo se presenta toda la información relevante con la forma de la tesis, mediante la formulación del problema, el planteamiento de objetivos, definición de las variables, etc.

En el segundo capítulo se presenta el marco teórico referente al estado del arte de la automatización industrial en el Perú y el mundo así como de los conceptos relevantes al desarrollo de la presente tesis, estos conceptos están referidos a los sistemas de seguridad instrumentados y DCS.

En el tercer capítulo se desarrolla un modelo matemático del proceso de bombeo de agua y se automatiza dicho proceso mediante la implementación de filosofías y lógicas de control.

En el cuarto capítulo se identifican los estándares y normas pertinentes a los sistemas de seguridad instrumentados y en los cuales se basaran el diseño del SIS de esta tesis.

En el quinto capítulo se diseña e implementa el sistema de seguridad instrumentado basado en los estándares identificados previamente, para luego integrar el sistema de control y el de seguridad al DCS.

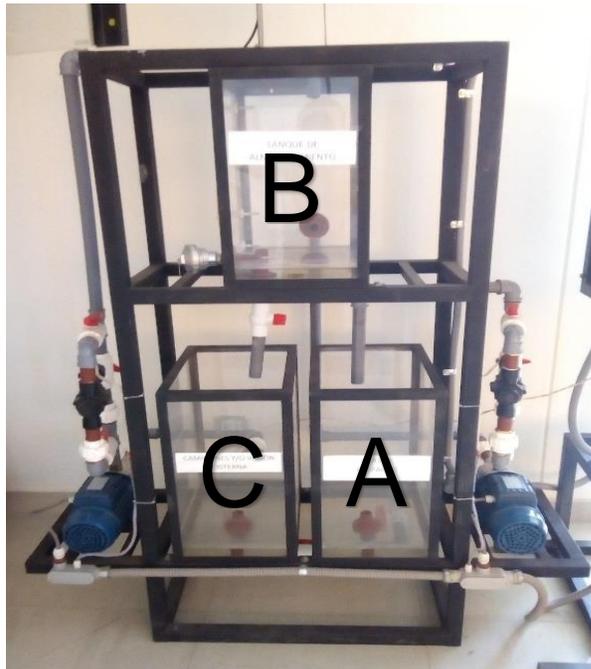
En el sexto capítulo se valida el diseño e implementación del SIS mediante la verificación de los niveles de seguridad integrales. Posteriormente se pone a prueba el SIS mediante la provocación experimental de eventos peligrosos en el sistema; el posterior análisis de los datos recolectados permitirá generar los resultados finales con respecto al SIS y a la integración en el DCS.

Finalmente las conclusiones y recomendaciones son determinadas en la parte final de este documento.

## CAPÍTULO I: GENERALIDADES

### 1.1 Antecedentes bibliográficos

En la tesis denominada: “Diseño de sistema SCADA para el área de recepción, almacenamiento y distribución de hidrocarburos líquidos en la planta PETROPERU - Cusco” (Quispe Gonzales, 2019) se diseñó un prototipo que incluye la instrumentación, control y supervisión para el sistema de control de tanques de almacenamiento de hidrocarburos. Dicho prototipo es usado en esta tesis y es denominado sistema de bombeo de agua entre reservorios.



*Figura nro. 1 - Sistema de bombeo de agua entre reservorios. Fuente: propia.*

De igual manera en la tesis: “Ingeniería detallada, modelado y simulación de un sistema de tanques interactuantes no lineales” (Albarracín Afanador & Arguelles Ramirez, 2010) se realiza en la identificación de un modelo matemático de un sistema de tanques interactuantes. Este modelo se desarrolla desde un caso muy básico basado en un sistema que consta de un solo tanque. Además de este documento describe las características no lineales que se tienen que estudiar para modelar otros sistemas.

Por otro lado en la tesis: “Aplicación del análisis de riesgo mediante el método LOPA para un proceso de embotellamiento de oxígeno líquido” (Arroyo Vazquez & Mendez Garcia, 2015) se detallan todos los requerimientos según los estándares respectivos que finalmente determinan los niveles integrales de seguridad SIL para el sistema en estudio en esa tesis. En este documento se hace una breve mención del análisis LOPA sin embargo no es usado y es reemplazado por análisis cualitativos y semi-cualitativos para la determinación de los niveles integrales de seguridad.

Finalmente en la tesis: “Propuesta para migración del sistema de control apacs+ Process suite v3.01 hacia Simatic PCS7 apacs+ os v7.0 en una planta industrial” (Sacalxot Lopez, 2012) se expone los conceptos primordiales para acerca de los DCS. Aunque el equipamiento usado es diferente al disponible en el laboratorio, las definiciones con respecto al DCS Siemens PCS 7, que es la plataforma usada en esta tesis, son las mismas.

## **1.2 Descripción de la realidad problemática**

El Laboratorio de Automatización Industrial está implementado con equipos de última generación, dichos equipos tienen por objetivo la enseñanza de la automatización industrial moderna. Sin embargo, dichos módulos no cuentan con un proceso para efectuar acciones de control y supervisión.

En la Figura Nro. 1 se puede apreciar el sistema de bombeo de agua entre reservorios, dicho sistema cuenta con un sistema de control basado en PLC, cuyo modo de operación es solo de tipo manual y no está automatizada. En resumen, los equipos implementados más importantes del proceso son:

- PLC Schneider Electric M221.
- HMI de supervisión de 7” Schneider Electric modelo STU885.
- Dos bombas con motores de 1 hp de potencia.
- Dos variadores de frecuencia para el control de los motores de las bombas, ATV320 1hp.
- Un sensor de nivel ultrasónico.
- Un transmisor de temperatura basado en sensor RTD.
- Dos electro-válvulas accionadas por solenoide.

Este sistema no cuenta con un sistema instrumentado de seguridad, por lo que el manejo y la seguridad del proceso se encuentran supeditados a la supervisión del operador humano y de las características de seguridad de los equipos implementados en el módulo de bombeo. Sin embargo, estas medidas de seguridad no son suficientes debido a que son los alumnos de pregrado de la escuela profesional lo que más interactúan con el módulo mencionado por lo que la seguridad de su operación debe estar garantizada en todo momento.

### **1.3 Formulación del problema**

La ausencia de un sistema de seguridad instrumentado para el módulo de bombeo de agua, limita la seguridad en la que el módulo puede ser operado. Además de esto el sistema de control y supervisión actual son insuficientes porque sus características de archivamiento de datos del proceso son limitados.

### **1.4 Objetivos**

#### **1.4.1 Objetivo general**

Diseñar e implementar un sistema de seguridad instrumentado para el módulo de bombeo de agua del Laboratorio de Automatización Industrial e integrar el sistema de control y seguridad al módulo DCS.

#### **1.4.2 Objetivos específicos**

- Identificar y seleccionar los estándares y normas de ingeniería actuales, como la IEC 61511, IEC 61508 y la norma técnica peruana NTP, que permitan un mejor entendimiento técnico con respecto al diseño y a la integración.
- Identificar las variables matemáticas más importantes del sistema mediante el modelado matemático del módulo de bombeo de agua del laboratorio.
- Automatizar el sistema de bombeo de agua, para que el sistema de control actual ejecute lógicas programadas y secuencias de control automáticas.
- Implementar el sistema de seguridad instrumentado autónomo basado en PLC y en los estándares identificados previamente.
- Integrar los sistemas de control y seguridad al DCS, mediante la implementación de redes Modbus TCP/IP y Profinet.

- Validar el funcionamiento del sistema de seguridad instrumentado y la integración con el DCS mediante la realización de pruebas de funcionamiento en base a eventos arbitrarios negativos provocados en el proceso en general.

## **1.5 Justificación**

Contar con un sistema de seguridad instrumentado ya implementado e integrado al sistema DCS del Laboratorio de Automatización Industrial permitirá a los estudiantes de pregrado llevar a la práctica de forma segura los conocimientos teóricos obtenidos previamente, tales como: reguladores de control, instrumentación industrial, SCADA, etc. La experimentación de los alumnos al momento de interactuar con los equipos permitirá que estos obtengan más confianza con respecto a sus habilidades que serán necesarias para su desenvolvimiento profesional.

Además, el documento final que sustente el proyecto de tesis aportará referencias de los sistemas industriales orientados a la seguridad, que aunque como teoría existe gran cantidad de información disponible, las referencias prácticas no son muy fáciles de encontrar en libros o en la web. Sumado a esto, en esta tesis se expone la importancia y el conocimientos necesario de los conceptos relacionados con protocolos de comunicación industrial al momento de realizar una integración entre dos sistemas de control diferentes que para este caso fueron un DCS y un PLC de marcas diferentes.

## **1.6 Metodología**

### **1.6.1 Investigación de tipo descriptiva**

La investigación realizada en la presente tesis se considera descriptiva debido a que en su desarrollo se plantea basarse en los estándares industriales ya definidos anteriormente por organismos pertinentes a la automatización industrial.

### **1.6.2 Método de investigación de tipo deductivo**

El método de investigación usado en esta tesis es deductivo por que se busca en todo momento la aplicación de estándares de seguridad industrial generales en un sistema particular: el sistema de bombeo de agua entre reservorios del Laboratorio de Automatización Industrial de la UNSAAC

### **1.6.3 Periodo de análisis**

El periodo en el cual se desarrolló el presente proyecto de tesis comprende tiempo transcurrido desde la aprobación del plan de tesis e inscripción del plan de tesis mediante la Resolución N° D-0178-2019-FIEEM-UNSAAC del 12 de febrero del 2019 hasta la aprobación del dictamen de tesis mediante la resolución respectiva.

### **1.6.4 Fuentes de información e instrumentos utilizados**

Las fuentes de información determinadas para la presente tesis son:

- Documentación oficial como estándares de índole industrial como el IEC 61511
- El desarrollo experimental realizado sobre el sistema de bombeo de agua del Laboratorio de Automatización Industrial y los equipos involucrados.

Los instrumentos para la recolección y archivamiento de los datos obtenidos de las fuentes de información son:

- Las herramientas de hardware y software que permitieron la recolección de información teórica relevante a la tesis como son laptops, buscadores web, memorias no volátiles, etc.

- Toda la instrumentación industrial como los transmisores de nivel, presión y temperatura que fueron usados para recolectar datos del proceso como tal para su posterior tratamiento.
- Los servidores industriales y servicios de “data-logging” que permitieron el archivo de los datos obtenidos experimentalmente para su posterior tratamiento.

#### **1.6.5 Técnicas de recolección y procesamiento de datos**

Se usaron transmisores de medición de nivel basados en ultrasonido y basados en presión hidrostática, así como transmisores de medición de presión basados en características de variación de resistencia eléctrica en sus etapas de censado de presión. Todos estos datos son colectados y procesados por los PLC presentes en las funciones de control y seguridad

Las técnicas de recolección de datos se basan en la adquisición de datos del proceso mediante sensores industriales, los cuales son conocidos como transmisores de proceso. Dichos transmisores convierten la información de proceso en señales de procesamiento eléctricos como señales de 4-20 mA o de protocolo como PROFIBUS, que son fácilmente procesadas por dispositivos como un PLC.

Con respecto al procesamiento de datos, casi todos los datos usados para el desarrollo de la tesis y obtención de resultados de la misma, son procesados computacionalmente, es decir se hace uso de herramientas de software como el MATLAB o el SIEMENS INFORMATION SERVER para hacer un tratamiento de los datos recolectados para su posterior análisis. Se tiene que mencionar que, en la parte final, para la validación de los niveles de seguridad del sistema de seguridad instrumentado solo se usaron técnicas de procesamiento aritméticas, que aunque desembocaron en resultados numéricos fueron analizados cualitativamente.

### **1.7 Alcances**

Se implementará el hardware y software de control y seguridad necesarios para un funcionamiento del módulo de bombeo de agua y se integrará lo implementado al módulo de control DCS del Laboratorio de Automatización Industrial. La integración entre el sistema de control, el sistema de seguridad y el módulo DCS se realizó mediante buses de campo Modbus TCP/IP y Profinet.

### **1.8 Limitaciones**

La implementación estuvo supeditada a los instrumentos y equipos disponibles en el Laboratorio de Automatización Industrial. Esto implicó que aunque el funcionamiento del sistema de seguridad instrumentado, el sistema de control y la integración de los mismos al DCS se concretó, no se podrán contar con las certificaciones que los estándares mencionados requieren en hardware.

## **CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO**

### **2.1 Antecedentes**

La industria en sus diferentes rubros está en constante evolución y mejora, desde los sistemas instrumentados de seguridad pasando por sistemas de control distribuido para industria masiva, hasta sistemas de control básicos en base a presostatos y termostatos. La industria se vale de técnicas de control acorde a su necesidad y economía, es así que los sistemas de control complejos son usados en minería y en refinación de petróleo, y los simples pueden tener hasta usos domésticos. Es por eso que el estudiante de Ingeniería Electrónica que quiera tener como especialidad el control industrial debe comenzar a reconocer estos sistemas y sus características desde antes de dejar las aulas de pregrado.

En tiempos recientes en la escuela profesional de Ingeniería Electrónica como consecuencia de la construcción del nuevo pabellón acorde a las necesidades didácticas de los alumnos de pregrado, también se implementó un Laboratorio de Automatización Industrial de última generación con el propósito de poder imbuir al alumnado con el conocimiento práctico necesario sobre control e instrumentación industrial. Dicho laboratorio cuenta con equipos de última generación que emulan los sistemas de control industrial actuales, estos equipos de marca Siemens, fueron implementados en módulos en el laboratorio de tal manera que faciliten el aprendizaje del control industrial. Siendo los módulos principales: el módulo de enseñanza básica en base al PLC Siemens S7-1500 y el módulo DCS Siemens PCS7. Es en este último que la presente tesis de pregrado toma lugar en su etapa final mediante la integración de un sistema de control independiente DCS mencionado.

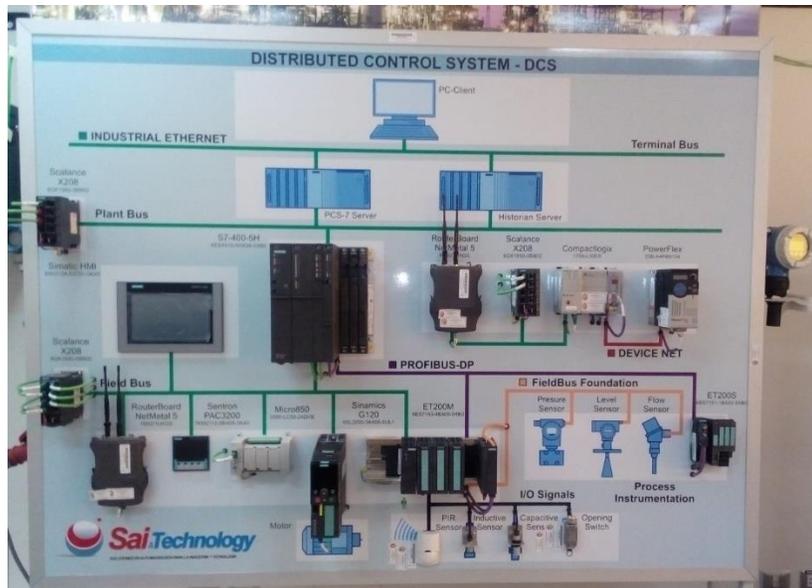


Figura nro. 1 - Módulo Sistema De Control Distribuido Siemens PCS 7 – Fuente: propia.

Sin embargo, un proceso industrial en el cual se puedan usar los dispositivos disponibles en el laboratorio no existe, haciendo que un completo aprendizaje, por medio de experiencias prácticas, por parte del alumno de pregrado no sea posible. Es por eso que el presente proyecto busca mediante su implementación, brindar una herramienta más en el aprendizaje de los alumnos que usen estos sistemas en el desarrollo de su vida de pregrado.



Figura nro. 2 - Tablero de control del sistema de bombeo de agua a escala - Fuente: propia.

## 2.2 Tasa de flujo volumétrico en tuberías

Definimos la tasa de flujo volumétrico de un fluido como el volumen de fluido que pasa a través de una sección transversal dada por unidad de tiempo. La ecuación matemática que describe esta variable física es:

$$Q_{in} = \frac{V}{t} \quad (1)$$

Donde:

$Q_{in}$ : Flujo de entrada al reservorio B

$V$ : Volumen trasladado (área transversal del reservorio x nivel de líquido)

$t$ : Tiempo de traslado del volumen calculado

### 2.3 Número de Reynolds

El número de Reynolds permite caracterizar la naturaleza del flujo, es decir, si se trata de un flujo laminar, flujo transicional o de un flujo turbulento, además indica la importancia relativa de la tendencia del flujo hacia un régimen turbulento respecto de uno laminar y la posición de este estado dentro de una longitud determinada.

Las características que condicionan el flujo laminar dependen de las propiedades del líquido y de las dimensiones del flujo. Mientras que aumenta el flujo másico aumenta las fuerzas del momento o inercia, las cuales son contrarrestadas por la por la fricción o fuerzas viscosas dentro del líquido que fluye. Cuando estas fuerzas opuestas alcanzan un cierto equilibrio se producen cambios en las características del flujo. En base a los experimentos realizados por Osborne Reynolds en 1874 se concluyó que las fuerzas del momento son función de la densidad, del diámetro de la tubería y de la velocidad media. Además, la fricción o fuerza viscosa depende de la viscosidad del líquido. Según dicho análisis, el número de Reynolds se definió como la relación existente entre las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas (o de rozamiento). La ecuación que permite hallar el número de Reynolds es la siguiente:

$$R = \frac{v \times D}{\gamma} \quad (2)$$

Donde:

R: Número de Reynolds.

v: Velocidad del fluido.

D: Diámetro interior de la tubería.

$\gamma$ : Viscosidad cinemática.

## 2.4 Flujo de salida de líquido que pasa a través de una válvula

Si se tiene un reservorio o tanque el cual cuenta con una válvula de desfogue manual, ubicada en la parte inferior del tanque, que permite el desfogue de líquido. El flujo de salida está relacionado con el nivel en estado estable en el que se encuentra el tanque en ese momento. La relación entre el flujo de salida con la altura es una consecuencia del teorema de Bernoulli. Siendo así la ecuación siguiente describe dicha relación.

$$Q_{out} = k\sqrt{h} \quad (3)$$

Donde:

Qout: Flujo de salida del liquido

h: Nivel de referencia con respecto al reservorio

k: Constante (será hallada posteriormente de manera experimental)

## 2.5 Ingeniería del proyecto de tesis

Los puntos mencionados en este ítem, describirán las etapas que se seguirán para poder diseñar e implementar el Sistema de Seguridad instrumentado así como la integración de los sistemas de control al DCS. Según las referencias dadas por “Desarrollo de la ingeniería de detalle en el área de instrumentación y control del patio de tanques” (Visconti Stopello, 2005) dichas etapas deben ser de la siguiente manera:

### 2.5.1 Ingeniería conceptual

En esta etapa donde se realiza el análisis del problema que origino la necesidad del proyecto describiendo las acciones que intervendrán en el diseño del proyecto. Cabe mencionar que en esta etapa se mencionan los métodos disponibles para resolver el problema, tomando como referencias filosofías y parámetros de control, con el fin de obtener un diseño sólido y adecuado.

### **2.5.2 Ingeniería básica**

Es en esta etapa donde se estudia el problema de manera general, sin tomar en cuenta detalles, se concretan las opciones y métodos propuestos en la etapa anterior eligiéndose los más adecuados para el proyecto. Se toman en cuenta las necesidades logísticas de manera más segura lo que tiene como propósito tener un costo aproximado del proyecto. Además es esta etapa donde se desarrollan los planos básicos de ingeniería como son: diagramas de flujo, diagramas básicos de instrumentación y tuberías básicos, etc.

### **2.5.3 Ingeniería de detalle**

En esta etapa ya se realiza el estudio del proyecto de manera más específica, tomando como referencias la documentación generada en las fases anteriores en conjunto con sus revisiones y versiones definitivas. Es aquí donde los errores más comunes tienden a aparecer por lo que son identificados y corregidos. Es en esta etapa donde las necesidades logísticas de equipos y materiales se concretan.

### **2.5.4 Procura y construcción**

Como última etapa, es aquí donde termina el desarrollo de la Ingeniería del Proyecto. Teniendo como principal característica que todas las necesidades administrativas como compras de equipos, realización de contratos, seguimiento del desarrollo del proyecto, etc. Se realizan en aquí, tomando como consigna supervisar todo el proyecto en su etapa de implementación.

## **2.6 Estándar de ingeniería**

Se define como estándar de ingeniería a la documentación formal y aprobada previamente que establece los métodos, criterios técnicos y practicas comunes para la ejecución de un proyecto de ingeniería. La documentación antes mencionada es elaborada por un grupo de profesionales asociados o reunidos en comités cuya experticia en el campo este comprobada previamente, generalmente estos profesionales están respaldados por grandes empresas y corporaciones cuya actividad económica tiene que ver con el campo en el cual se usa el estándar. Estos estándares promueven seguridad, confiabilidad, eficiencia y productividad. Cabe destacar que los estándares son documentos de apoyo y guía para lograr certificaciones

que ayudan a las empresas y corporaciones ganar peso en sus productos y servicios sin embargo debemos comprender que una empresa puede o no ceñirse completamente a un estándar sin ser sancionada por algún ente formal o de ley.

## **2.7 Normas técnicas**

Son documentos elaborados por organismos técnicos oficiales que establecen especificaciones técnicas basadas en estudios y experiencias que una vez aprobados se usan para regir algún proceso, producto o servicio. Esta documentación se usa para regir las MANERAS del como la empresa o corporación se desenvuelve para lograr los objetivos del producto o servicio que ofrezca en el rubro correspondiente. Esta documentación es el resultado de un proceso dentro de un organismo de normalización donde también participan agentes sociales y económicos interesados. Cabe destacar que el organismo nacional que se encarga de la regulación de las normativas técnicas nacionales es el INACAL (Instituto Nacional de la Calidad). El INACAL adopta normas internacionales elaboradas por entes como la ISO o ISA y las aplica a la realidad de la industria o proceso en la cual se requiera con el objetivo de mejorar el beneficio de toda la comunidad nacional.

## **2.8 Organismos internacionales relevantes**

Existen muchas organizaciones y entes internacionales encargados de desarrollar y publicar normas y estándares, para nuestro caso se especifican los más importantes a nivel mundial, otras organizaciones tales como DIN o ANSI forman parte de estos comités internacionales por lo que sus estándares se ven reflejados en gran manera por los estándares creados por las organizaciones internacionales.

### **2.8.1 IEC**

La Comisión Internacional Electrotécnica (International Electrotechnical Commission) es una organización internacional sin fines de lucro fundada en 1906, cuya oficina principal se encuentra en Suiza, encargada de preparar y publicar estándares internacionales relacionados con tecnologías de la electricidad y de la electrónica. La IEC provee de una plataforma en la que compañías, industrias y países en conjunto se puedan reunir, discutir y desarrollar los estándares que se requieran. Cuando se es necesario la IEC colabora y recibe colaboración de la ISO (Organización Internacional para la Estandarización) o la ITU (Unión Internacional

de Telecomunicaciones) para asegurarse que los estándares elaborados concuerden con sus pares de otras organizaciones internacionales y puedan guiar de manera unificada y complementarse entre las mismas.

### **2.8.2 ISA**

La Sociedad Internacional de Automatización (International Society of Automation) es una organización internacional sin fines de lucro fundada en 1945 con el objetivo primordial de crear un mundo mejor mediante el fortalecimiento de la Automatización. Esta organización desarrolla y publica estándares de ingeniería, certifica profesionales de la industria, provee educación relacionada con la automatización y publica libros y revistas con la finalidad de promover la automatización como herramienta para el desarrollo de la humanidad.

### **2.8.3 ISO**

La Organización Internacional para la Estandarización (International Organization for Standardization), es una organización internacional no gubernamental ubicada en Suiza creada con el objetivo unificar los estándares industriales de tal manera que con los mismos se pueda brindar especificaciones técnicas para productos de manufactura, asegurar la calidad de los mismos, además de seguridad y eficiencia. En la actualidad tiene formados comités en conjunto con la IEC para desarrollar estándares y terminologías para las tecnologías de la electricidad y electrónica. Estándares como la ISA 84.01 (posteriormente analizado en esta tesis) se han unificado con los estándares de la IEC para tener un solo documento que ofrezca precedentes respectivos a estas tecnologías.

## **2.9 Sistemas de control basados en PLC**

Los PLC o Controladores Lógicos Programables son dispositivos electrónicos muy usados en Automatización Industrial. Un PLC controla la lógica de funcionamiento de máquinas, plantas y procesos industriales. Procesan y reciben señales digitales y analógicas; manipulando esta información de tal manera que el proceso sea controlado y supervisado en todo momento teniendo en cuenta características muy importantes como la eficiencia para controlar el proceso de la manera más óptima posible.

Estos equipos electrónicos son diseñados para ser programados y controlar procesos secuenciales en tiempo real. Por lo general, es posible encontrar este tipo de equipos en ambientes industriales.



*Figura nro. 3 - Diagrama básico - control de procesos - Fuente: elaboración propia*

Estos fueron primeramente fabricados por MODICON en la década del 60 debido a la necesidad de tener un control de procesos más complejos y robustos, dado que el estado del arte de esa época se limitaba a tener circuitos de control CABLEADO que generaban dificultades de mantenimiento y expansión mientras más complejo se hacía el proceso los PLC tuvieron buena acogida debido a la facilidad de implementación y que los gastos de mantenimiento decrecieron en gran medida. Con el paso del tiempo muchas compañías fabricantes de equipos electrónicos como Siemens o Schneider Electric comenzaron a diseñar y fabricar sus propios PLC, con su propio software de programación y configuración. Lo cual hizo que la industria del control de procesos se diversificara ampliamente. Hoy en día su uso está completamente acentuado en la industria siendo la opción primigenia casi para cualquier desarrollador de este tipo de proyectos.



*Figura nro. 4 - PLC Siemens S7-1200 CPU 1212C – Fuente: propia.*

En conjunto con el PLC surgieron necesidades de supervisión más amigables a los operadores industriales, lo que conllevó a la fabricación de HMI y sistemas SCADA, de estos equipos y sistemas se comentará en capítulos posteriores con más profundidad.

## **2.10 Sistemas de control distribuido – DCS**

Un sistema de control distribuido (DCS) es una plataforma para el control automatizado y el funcionamiento de una planta o de un proceso industrial. Un DCS combina en un sistema automatizado único: interfaz hombre máquina (HMI), controladores lógicos (PLC, PAC, etc.), generador de históricos, base de datos común, administración de alarmas y una plataforma de ingeniería común.

Los controles distribuidos están destinados a solucionar esta preocupación teniendo múltiples computadores, cada uno responsable de un grupo de lazos PID, distribuidos por las instalaciones y enlazados para compartir información entre ellas y con las consolas de operación. La distribución de los computadores o controladores también ordena el cableado de señales, dado que ahora cientos o miles de cables de instrumentos solo tienen que llegar hasta los nodos distribuidos ubicados generalmente en campo.

## **2.11 Supervisión, Control y Adquisición de Datos - SCADA**

Es un sistema de elementos de software que permite a las industrias:

- Controlar los procesos industriales localmente o a distancia
- Monitorizar, recopilar y procesar datos en tiempo real
- Interactuar directamente con dispositivos como sensores, válvulas, bombas, motores, señales de tráfico, etc., a través del software de interfaz hombre-máquina (HMI)
- Grabar eventos en un archivo de registro

La arquitectura básica del sistema SCADA comienza con controladores lógicos programables (PLC) o unidades de terminal remotas (RTU). Los PLC y RTU son microordenadores que se comunican con una gran variedad de objetos, como máquinas, HMI, sensores y dispositivos, y luego redirigen la información desde esos objetos a los ordenadores con el software SCADA.

### **2.11 Redes industriales**

En principio una red se puede definir como una serie de estaciones (Nodos) o equipos interconectados entre sí, para tener información más común disponible en uno, varios o cada uno de los dispositivos de red. Por tanto, las redes industriales son redes conformadas por equipos de control, tales como:

- PC's Industriales.
- Controladores
- Sistemas de Control Distribuido.
- Transductores y Actuadores.
- Interfaces de Operador.

#### **2.11.1 Modbus**

Modbus fue desarrollado en 1979 para hacer posible la comunicación entre dispositivos de automatización. Originalmente implementado como un protocolo al nivel de la aplicación con

la finalidad de transferir datos por una capa serial, Modbus se ha expandido para incluir implementaciones a través de protocolo serial, TCP/IP y el User Datagram Protocol (UDP).

Modbus es un protocolo de solicitud-respuesta implementado usando una relación maestro-esclavo o cliente-servidor. En una relación maestro-esclavo, la comunicación siempre se produce en pares, un dispositivo debe iniciar una solicitud y luego esperar una respuesta y el dispositivo de inicio (el maestro) es responsable de iniciar cada interacción. Por lo general, el maestro es una interfaz humano-máquina (HMI) o sistema SCADA y el esclavo es un sensor, controlador lógico programable (PLC) o controlador de automatización programable (PAC). El contenido de estas solicitudes y respuestas, y las capas de la red a través de las cuales se envían estos mensajes, son definidos por las diferentes capas del protocolo. En una relación cliente-servidor, la comunicación es multidireccional, pero los procedimientos de solicitud y respuesta son similares al caso maestro-esclavo.

### **2.11.2 Profinet**

Profinet está basado en Ethernet Industrial, TCP/IP y algunos estándares de comunicación pertenecientes al mundo TI. Entre sus características destaca que es Ethernet en tiempo real, donde los dispositivos que se comunican por el bus de campo acuerdan cooperar en el procesamiento de solicitudes que se realizan dentro del bus.

Entre sus ventajas podemos mencionar:

- Mejora la escalabilidad en las infraestructuras.
- Acceso a los dispositivos de campo a través de la red. Profinet al ser un protocolo que utiliza Ethernet en su comunicación facilita acceder a dispositivos de campo desde otras redes de una forma más fácil.
- Ejecución de tareas de mantenimiento y prestación de servicio desde cualquier lugar. Es posible acceder a dispositivos de campo mediante conexiones seguras como por ejemplo VPN para realizar mantenimientos remotos.

### **2.12 Diferencias entre un DCS y un SCADA**

Finalmente en este capítulo se determina una comparación entre un sistema SCADA (control por supervisión y adquisición de datos) y un DCS (sistema de control distribuido).

Como se sabe ambos sistemas son usados en el control de procesos industriales y a continuación se explican sus principales características que los diferencian uno del otro.

### **2.12.1 DCS**

Es un sistema de control aplicado a procesos industriales complejos en las grandes industrias como petroquímicas, papeleras, metalúrgicas, centrales de generación, plantas de tratamiento de aguas, incineradoras o la industria farmacéutica. Los primeros DCS datan de 1975 y controlaban procesos de hasta 5000 señales. Las capacidades actuales de un DCS pueden llegar hasta las 250.000 señales.

- Los DCS están orientados al proceso, es decir, su funcionamiento está supeditado al estado en el que el proceso se encuentre. Dicho de otra manera el DCS ejecuta lógicas de control según las necesidades del proceso.
- Aunque los controladores están distribuidos (razón del nombre DCS), se intenta coleccionar todos los datos del proceso en una sola base de datos común de donde se pueda distribuir la información a las estaciones de operación.
- Un DCS son usados en procesos industriales masivos, es por eso que su costo es más elevado que un SCADA porque incluyen desde el software de programación y configuración hasta los equipos de instrumentación, control y supervisión.
- Son usados en aplicaciones de seguridad. Los DCS tienden a ser más seguros porque su equipamiento y software está orientado a cumplir con normas industriales orientadas a la seguridad como lo es el IEC 61508.
- Generalmente se ofrecen bajo una sola plataforma de configuración, programación y gestión de históricos.
- Ejemplos de plataformas DCS son: SIEMENS PCS 7, FOXBORO Control System, etc.

### **2.12.2 SCADA**

Es un concepto que se emplea para realizar un software para ordenadores que permite controlar y supervisar procesos industriales a distancia. Facilita retroalimentación en tiempo real con los dispositivos de campo (sensores y actuadores), y controla el proceso automáticamente. Provee de toda la información que se genera en el proceso productivo

(supervisión, control calidad, control de producción, almacenamiento de datos, etc.) y permite su gestión e intervención.

- Los SCADA están más orientados a la adquisición de datos, esto debido a que se usan generalmente para coleccionar los datos de los dispositivos de control como son los PLC. Un software SCADA puede realizar acciones de control sobre el proceso pero casi siempre teniendo a un PLC como intermediario.
- Los sistemas de control que usan SCADA también incluyen dispositivos de control como los PLC. Los dispositivos de campo que cuentan con capacidad de comunicación mediante protocolo pueden conectarse directamente al SCADA y realizar acciones de control. Es por estas razones que se considera que un SCADA es más flexible que un DCS.
- Debido a que generalmente los SCADA están orientados a la adquisición de datos se considera que son más rápidos que un DCS en lo que a supervisión del proceso se refiere.
- Ejemplos de plataformas SCADA son: WONDERWARE InTouch, WINCC V7.x, etc.

Como se detalla anteriormente, existen diferencias marcadas entre un sistema SCADA y un sistema DCS, en la presente tesis se hace uso de la plataforma DCS PCS 7 de la marca Siemens que incluye el software SCADA WINCC 7.3.

## **CAPÍTULO III: MODELAMIENTO MATEMÁTICO Y AUTOMATIZACIÓN DEL SISTEMA**

En este capítulo se modela matemáticamente el sistema de bombeo de agua, esto debido a que mediante este análisis, las variables de proceso y control que ameriten más cuidado serán estudiadas de manera más cuidadosa y dará mayor seguridad al momento de consolidar las variables de proceso más importantes para la implementación del SIS. Este análisis también permitió automatizar el sistema de bombeo de agua mediante la implementación de estrategias de control en este mismo capítulo. El modelado es el más simple posible debido a que no se necesita mucha complejidad matemática para cumplir con el objetivo específico de este capítulo ni con el objetivo general del proyecto de tesis. Desde ya se tienen algunas variables que recibieron especial tratamiento y desde estas mismas se partió para poder elaborar un modelo matemático simple pero concreto, esto debido a las características del mismo proceso que de manera general consiste en controlar nivel y temperatura en un reservorio de agua.

### **3.1 Proceso de traslado de agua entre reservorios**

El proceso consiste en el traslado de agua entre reservorios, el traslado se realiza mediante bombas centrifugas impulsadas por motores eléctricos trifásicos. También se cuenta con válvulas ON/OFF accionadas mediante solenoides para cortar o permitir el flujo desde las bombas. Tal como se pudo apreciar en figuras anteriores, el único reservorio que cuenta con instrumentos de medición es el reservorio B; las variables medidas son nivel de líquido y temperatura del mismo. Es así que se puede apreciar que el módulo no cuenta con un instrumento de medición de presión o de fluido por lo que el control y supervisión de estas variables se encuentran muy limitados hasta el momento.

Debido a la que consiste en que no se puede transportar líquidos desde del reservorio C al reservorio A, se tendrá que establecer una filosofía de control básica desde este momento lo que permitirá un mejor manejo de los procedimientos para cumplir con los objetivos del presente proyecto de tesis. Esta filosofía de control será concretada posteriormente de tal manera que se pueda obtener una filosofía que describa el funcionamiento del proceso una vez que el sistema de control ya se haya implementado.

## **3.2 Filosofía de control de nivel básica en el reservorio B del módulo de bombeo**

El módulo de bombeo de agua fue concebido para simular el transporte y almacenamiento de hidrocarburos, el módulo se encuentra ubicado en el Laboratorio de Automatización Industrial de la escuela profesional de Ingeniería Electrónica de la UNSAAC de la ciudad del Cusco. Por ser un sistema netamente académico y de prueba, el fluido a tratar siempre se tratará de agua, por ser un líquido seguro y no inflamable.

### **3.2.1 Límite de batería**

Los límites de batería para el reservorio B donde se controlará y supervisará el nivel de agua están comprendidos desde la tubería de descarga de la bomba P1 hasta la válvula de descarga manual LV-3 ubicada debajo del reservorio B. las tuberías conexas a la bomba P2 no están incluidas dentro de estos límites de batería.

### **3.2.2 Instrumentos y equipos principales**

- Electroválvula solenoide LV-1.
- Transmisor de nivel LT-1.
- Transmisor de temperatura TT-1.
- Válvula manual tipo globo para la descarga LV-3.
- Válvula manual tipo globo para uso como bypass LV-2.
- Bomba trifásica de velocidad variable P-1.

### **3.2.4 Estrategia de control**

El objetivo del sistema es controlar el nivel de agua en el reservorio B en un nivel establecido por el operador. El nivel se mantendrá estable en el valor establecido por el usuario frente a cualquier consumo de agua que pueda ser determinado por la abertura de la válvula manual LV-3.

El sistema de control está conformado por un PLC con todos los equipos necesarios para obtención de datos de los instrumentos de medición así como de los equipos necesarios para el accionamiento de actuadores de campo. En dicho PLC se programaran los permisos y enclavamientos del sistema así como la lógica de control principal.

El sistema deberá ser supervisado desde el tablero de control del PLC o desde la estación de operación del DCS al cual será integrado.

### 3.3 Cálculo de los valores de flujo nominales con respecto a las revoluciones de la bomba P1

Para el cálculo de flujo de entrada al reservorio B no se cuenta con un instrumento que pueda medir el flujo de manera directa además que es preciso modificar lo menos posible el módulo de pruebas con el fin de analizar el proceso sin hacer variaciones significativas en el funcionamiento del mismo. Debido a estas razones el análisis de flujo se realizara mediante la experimentación y toma de datos. Cabe mencionar que el flujo será de vital importancia para cumplir con el objetivo de la Filosofía de Control elaborada en el ítem 3.2 de este mismo capítulo debido a que la variación de nivel en el reservorio B está muy relacionado con el flujo de entrada y el flujo de consumo.

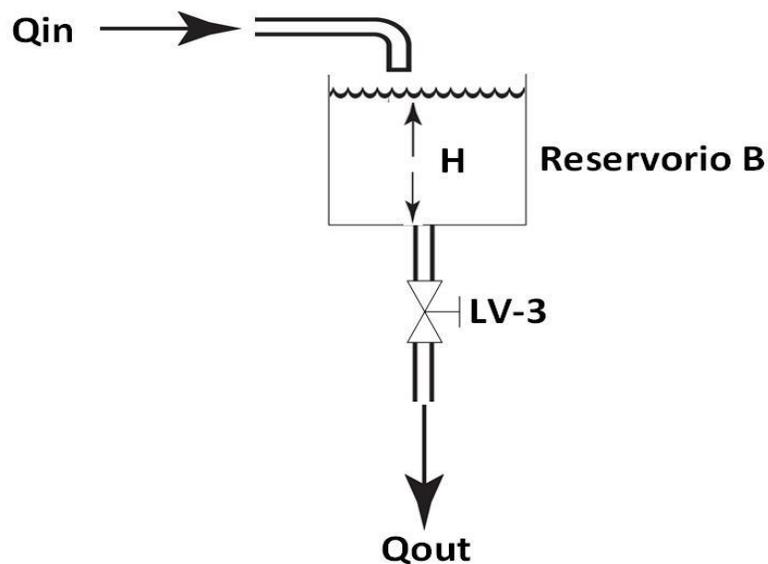


Figura nro. 5 - Representación gráfica de las variables de proceso en el Reservorio B. Fuente: propia.

Los experimentos realizados consisten en lo siguiente:

- Se realizó una prueba de llenado con un nivel inicial del tanque de 5 cm y cronometró el tiempo en el cual demora en llenar hasta 30 cm de nivel.
- Se realizó una prueba de llenado con un nivel inicial del tanque de 5 cm y se comenzaron a cronometrar desde el nivel de 10 cm esto para calcular el flujo en estado estacionario debido a que la bomba demora un tiempo en llegar a las revoluciones consignadas. El nivel donde se terminará de cronometrar será de 40 cm.

### 3.3.1 Cálculo experimental nro. 1

Para poder calcular el flujo se usó la ecuación 1 definida en el capítulo 2. De los datos obtenidos experimentalmente y haciendo uso de la ecuación 1 se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 1 - Estimación de flujo de entrada al reservorio B en el experimento 1.

Velocidad bomba P-1 [Hz]	t [seg]	Q <sub>in1</sub> [m <sup>3</sup> /s]
2	N/A	0
4	N/A	0
6	N/A	0
8	N/A	0
10	150	0.0002
12	90	0.00033333
14	70	0.00042857
16	55	0.00054545
18	46	0.00065217
20	40	0.00075
22	35	0.00085714
24	31	0.00096774
25	29.5	0.00101695
26	29	0.00103448
28	27	0.00111111
30	26	0.00115385
32	24	0.00125
34	22	0.00136364
36	21	0.00142857
38	20	0.0015
40	19	0.00157895

Fuente: Elaboración propia.

Cabe mencionar que el la bomba no logra trasladar líquido a revoluciones mejores a los 10 Hz. Se tiene aclarar de igual manera que el área transversal del reservorio B tiene las siguientes dimensiones:

$$A_t = 0.4m \times 0.3m \quad (4)$$

$$A_t = 0.12 m^2 \quad (5)$$

Como se mencionó antes el nivel de referencia va desde 0.05 m hasta los 0.3 m por lo que el volumen trasladado total en cada experimento fue de:

$$V_{tras 1} = 0.12 m^2 \times (0.3 - 0.05) m \quad (6)$$

$$V_{tras 1} = 0.03 m^3 \quad (7)$$

Con la ayuda del software Microsoft Excel se pudo graficar los resultados de “Hz vs Qin”:

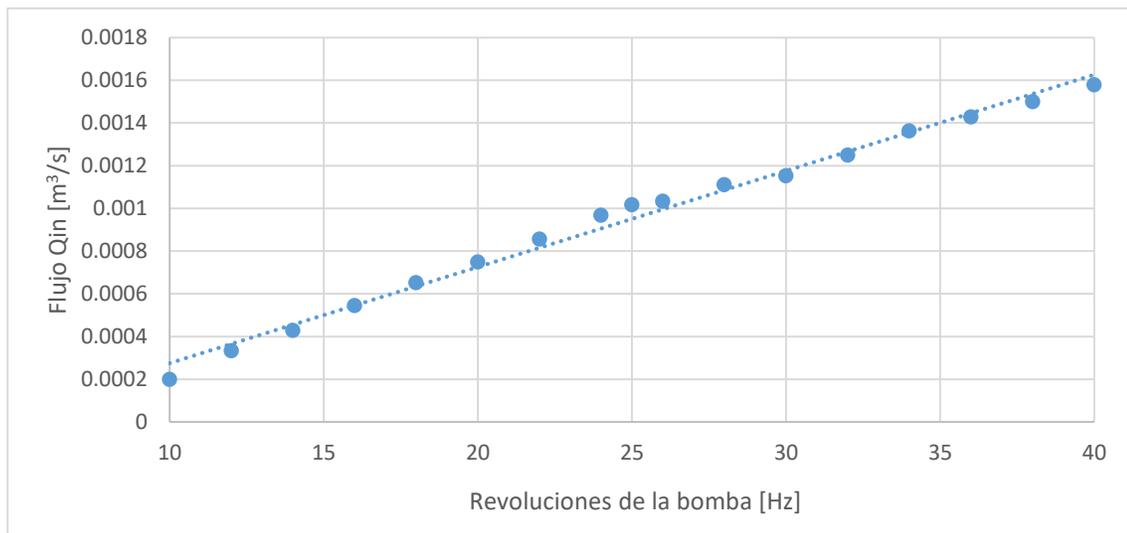


Figura nro. 6 - Curva de representación del flujo Qin en función de las revoluciones de la bomba P-1.

Como se aprecia la gráfica tiene una tendencia lineal. Se realizó un análisis de regresión lineal obteniéndose la ecuación de la recta representativa de los datos obtenidos, teniéndose:

$$Q_{in} = 0.0000450347x \text{ Hz} - 0.00017458 \quad (8)$$

Se debe mencionar que los datos relacionados al flujo con 1 Hz hasta 9 Hz no fueron considerados para este análisis experimental debido a que no generan flujo de entrada hacia el reservorio B.

### 3.3.2 Cálculo experimental nro. 2

Usando la misma fórmula que en el experimento nro. 1 se calcularon los flujos de entrada teniendo en cuenta las características explicadas en el ítem 4.3, para este caso solo se tomó en cuenta el flujo cuando la bomba está a plena velocidad y no se tomó en cuenta el flujo cuando la bomba está acelerando, los resultados son los siguientes:

Tabla 2 - Estimación de flujo de entrada al reservorio B en el experimento 2

Velocidad bomba P-1 [Hz]	t [seg]	Q <sub>in2</sub> [m <sup>3</sup> /s]
2	N/A	0
4	N/A	0
6	N/A	0
8	N/A	0
10	290	0.00012857
12	100	0.00036
14	78	0.00046154
16	60	0.0006
18	51.6	0.00069767
20	45.17	0.00079699
22	40.22	0.00089508
24	35.9	0.00100279
25	34.1	0.00105572
26	32	0.001125
28	29.3	0.00122867
30	27.5	0.00130909
32	25.8	0.00139535
34	23.6	0.00152542
36	22.1	0.00162896
38	20.9	0.00172249
40	19.9	0.00180905

Fuente: elaboración propia.

Para este experimento el volumen trasladado es:

$$V_{tras\ 2} = 0.12\ m^2 \times (0.4\ m - 0.1\ m) \quad (9)$$

$$V_{tras\ 2} = 0.036\ m^3 \quad (10)$$

Al igual q en el experimento anterior se obtuvo la siguiente gráfica de tendencias:

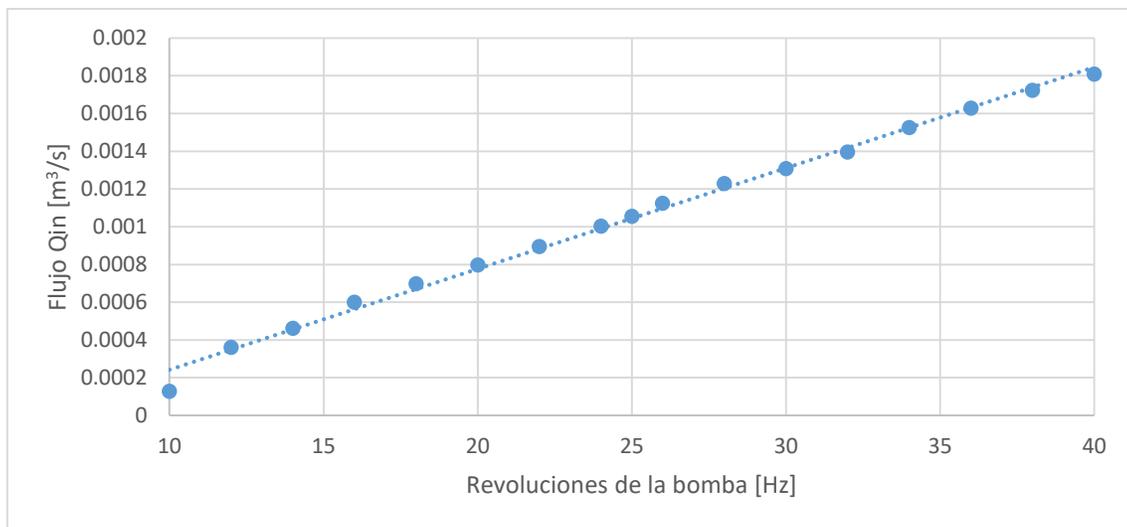


Figura nro. 7 - Curva de representación del flujo  $Q_{in}$  en función de las revoluciones de la bomba P-1.

Realizando el análisis de regresión lineal se obtuvo la ecuación de la recta representativa de la figura dos:

$$Q_{in} = 0.0000534243 \times Hz - 0.00029194 \quad (11)$$

Los resultados del análisis experimental arrojan que hay una ligera variación en los flujos, esto debido a que en el primer experimento se tomó en cuenta para el análisis el flujo que crea la bomba P1 mientras acelera y llega a la velocidad consignada y en el experimento 2 solo se consideró el flujo creado por la bomba P1 cuando ya llegó a la velocidad consignada. El error relativo con respecto al flujo experimental 2 se expresa en la siguiente tabla:

Tabla 3 - Cálculo de errores entre el experimento 1 y el experimento 2.

Hz	Qin1 [m <sup>3</sup> /s]	Qin2 [m <sup>3</sup> /s]	Error [%]
2	0	0	N/A
4	0	0	N/A
6	0	0	N/A
8	0	0	N/A
10	0.0002	0.000128571	55.55555556
12	0.000333333	0.00036	7.407407407
14	0.000428571	0.000461538	7.142857143
16	0.000545455	0.0006	9.090909091
18	0.000652174	0.000697674	6.52173913
20	0.00075	0.000796989	5.895833333
22	0.000857143	0.000895077	4.238095238
24	0.000967742	0.001002786	3.494623656
25	0.001016949	0.001055718	3.672316384
26	0.001034483	0.001125	8.045977011
28	0.001111111	0.001228669	9.567901235
30	0.001153846	0.001309091	11.85897436
32	0.00125	0.001395349	10.41666667
34	0.001363636	0.001525424	10.60606061
36	0.001428571	0.001628959	12.3015873
38	0.0015	0.001722488	12.91666667
40	0.001578947	0.001809045	12.71929825

Fuente: elaboración propia

De la tabla 3 se observa las diferencias entre los resultados obtenidos con respecto al flujo que podrían tener un efecto perjudicial en el estudio del proceso (en el primer experimento se incluyen los efectos de estado de transitorio y en el segundo no se incluyen) por lo que esta tabla será de ayuda más adelante en la elección de ciertas características para el modelado final del proceso.

### 3.4 Análisis del número de Reynolds en la tubería de descarga

Para comenzar con el modelado matemático tenemos que asumir ciertas características para con nuestro módulo, de tal manera que se facilite el análisis del mismo y la complejidad pueda minimizarse de la mejor manera posible. Las primeras características que tendremos en cuenta y que nos ayudaran a simplificar nuestro modelamiento están referidas al fluido que

usaremos para realizar las pruebas; el líquido a usar será el agua y asumiremos por lo tanto que este líquido tiene las siguientes características:

- Incomprensible.
- Irrotacional cuando se transporta en tuberías.

Para la determinación del número de Reynolds en la tubería de consumo, tendremos que calcular el flujo de líquido a través del mismo, del flujo es posible calcular la velocidad del fluido, dato que es parte de la fórmula para hallar el número de Reynolds. La fórmula para hallar el número de Reynolds fue dada en el capítulo 2 ecuación 2.

Para el análisis experimental se tomó en cuenta lo siguiente:

- La apertura de la válvula de descarga LV-3 estará completamente abierta de tal manera que el máximo flujo en todos los casos sea posible.
- Las pruebas serán en función a los niveles de líquido en el reservorio, es decir se llenará el reservorio hasta cierto nivel, luego se abrirá la válvula LV-3 al máximo y se cronometraré hasta que el nivel de líquido llegue a 10 cm.
- El diámetro de la tubería es de 1 pulgada que equivale a 0.0254 metros lo que conlleva a tener un área de sección transversal de la tubería de 0.00051 metros cuadrados
- La viscosidad cinemática será considerada a una temperatura de 15°C y su valor será de: 0.00000114 metros cuadrados sobre segundo [m<sup>2</sup>/s].
- Sabemos que la relación para encontrar el fluido que se descarga desde un reservorio o tanque puede ser expresado en función de la altura. La ecuación que describe dicha relación fue mostrada en el capítulo 2 ecuación 3.

Teniendo en cuentas estas consideraciones se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 4 - Cálculo para el nro. de Reynolds.

h [m]	h real [m]	Volumen traslad. [m <sup>3</sup> ]	tiempo [s]	Qout [m <sup>3</sup> /s]	Velocidad [m/s]	Nro. Reynolds
0.15	0.05	0.006	5.96	0.00100671	1.986772256	44034.91736
0.2	0.1	0.012	11.07	0.00108401	2.139324778	47416.09891
0.25	0.15	0.018	16.1	0.00111801	2.206427822	48903.37406
0.3	0.2	0.024	21.05	0.00114014	2.250102165	49871.37434

0.35	0.25	0.03	25.92	0.00115741	2.284174893	50626.56394
0.4	0.3	0.036	30.89	0.00116543	2.299999219	50977.29507

Fuente: elaboración propia.

Como se observa en la tabla 4 el número de Reynolds calculado describe que la dinámica del fluido en la tubería de descarga tiene un régimen turbulento, esta característica será de utilidad para tratamientos posteriores. Además de esto es preciso mostrar la tabla que muestra la tendencia del fluido en función de la altura. Cabe mencionar que esta tendencia no muestra un flujo constante, sino que muestra un fluido promedio ya que mientras el nivel desciende el flujo también lo hace.

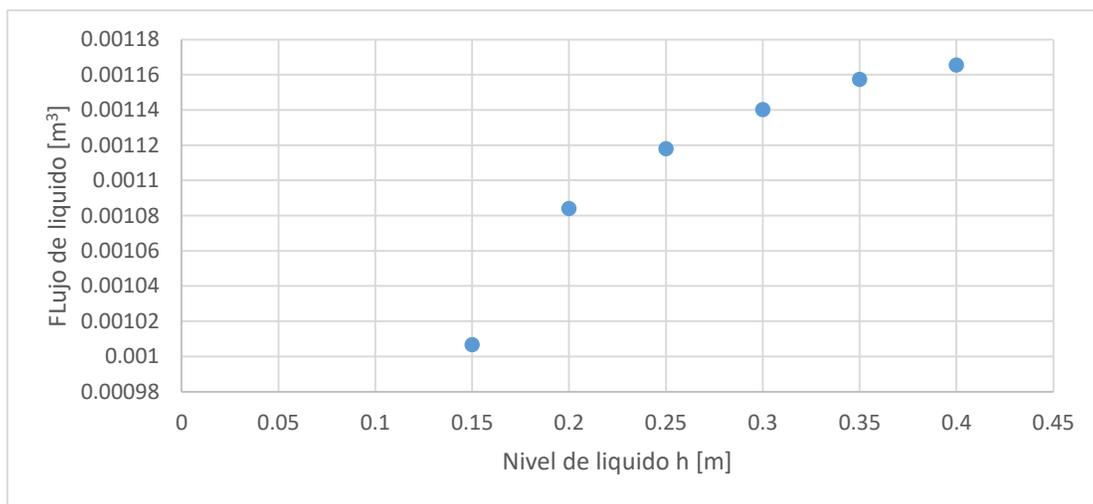


Figura nro. 8 - Curva de representación de Nivel vs. Flujo de entrada. Fuente: propia.

En esta grafica de tendencia se observa que la relación de flujo vs nivel es de naturaleza no lineal. Sin embargo la constante K no puede ser hallada por la variación del flujo en cada instante del experimento.

### 3.5 Obtención del modelo matemático del sistema

Habiendo obtenido los resultados para el número de Reynolds y de la relación de flujo y nivel en la tubería de descarga se afirma lo siguiente:

- El número de Reynolds para la tubería de descarga da a entender que el tipo de flujo en la misma tiene característica turbulenta, este detalle además confirma que la relación Nivel de líquido y flujo de descarga no es lineal.
- La relación entre el nivel de líquido y el flujo de descarga confirma además un comportamiento cuadrático por lo que posteriormente se deberá acotar las regiones de funcionamiento para obtener un modelo lo más lineal posible.
- Los datos obtenidos con respecto al flujo nos arrojan un estrecho rango de funcionamiento con relación a esta variable, por el motivo que hasta esta parte se está trabajando en el sistema métrico oficial en el Perú, se seguirá trabajando en valores estándar según el Sistema Internacional.

### 3.5.1 Modelo matemático teórico

A partir de aquí se comienza a elegir variables arbitrariamente con el objetivo de que el modelado se base en la filosofía de control. La filosofía de control hasta ahora elaborada afirma que la variable de proceso es el nivel, la variable de control es el flujo de líquido de entrada debido a que electrónicamente es la única variable que se puede controlar, el flujo de descarga será asumido como una perturbación debido a que hasta el momento de la elaboración de este modelo no existe manera de controlarla electrónicamente (solo se puede controlar de manera manual). Para comenzar a modelar se tendrá que encontrar una ecuación en la cual este incluida las variables arriba mencionadas; por lo cual usaremos el principio de conservación de la masa, usado dentro de la batería de nuestro sistema. Este principio usado en nuestro sistema nos dice que: la variación de volumen de líquido en función de tiempo es igual al flujo de entrada menos el flujo de descarga por lo cual se obtiene:

$$\frac{dV}{dt} = Q_{in} - Q_{out} \quad (12)$$

Dentro del volumen con respecto al reservorio B sabemos que el área de la base se mantiene constante, lo único que varía es el nivel  $h$ . Con respecto al flujo de entrada  $Q_{in}$  se puede controlar indirectamente con las revoluciones programadas a la bomba P-1 (la ecuación 11 describe esta relación) y con respecto al flujo  $Q_{out}$ , como se vio, la ecuación 3 se puede expresar en función al nivel. Con lo que la ecuación 13 quedaría.

$$A \frac{dh}{dt} = Q_{in} - k\sqrt{h} \quad (13)$$

La única incógnita que nos queda por hallar es la constante  $k$ , para lo cual usaremos la condición de estado estable del sistema que es cuando no existe variación de nivel por lo que “ $dh/dt=0$ ” que hace que el flujo de entrada sea igual al flujo de salida quedando:

$$Q_{in} = k\sqrt{h} \quad (14)$$

De los análisis experimentales anteriores se sabe que se puede expresar los valores de flujo en función de la velocidad en Hertz de la bomba P-1, sin embargo tenemos dos ecuaciones 8 y 11 que describen este proceso, debido a esto y como se mencionó en el análisis experimental nro. 2 se escogerá la ecuación 11 porque es la ecuación que describe el flujo una vez que la bomba alcanza la velocidad consignada y no incluye el flujo creado por la bomba cuando está acelerando. El experimento consiste en lo siguiente:

- Para cada prueba se vaciará lo máximo posible el reservorio B.
- Se establecerá la velocidad de referencia de la bomba P1 a una velocidad arbitraria y se aperturará la válvula LV3 al máximo.
- Se encenderá la bomba P1 y esperará a que se alcance el nivel en estado estable y mediante la el PLC del módulo de pruebas se hará un “data-logging” para hacer un historial del comportamiento del nivel en función de las revoluciones de la bomba P1.
- Se considera los valores de velocidad en Hertz de la bomba P-1 desde los cuales comienzan a existir valores de nivel en estado de equilibrio diferente de cero.

Después de realizar las pruebas se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 5 - Constantes para los diferentes valores de flujo de entrada y nivel.

Velocidad de la bomba P-1 [Hz]	$Q_{in}$ [m <sup>3</sup> /s]	$h$ [m]	$k$
22.5	0.000910107	0.08	0.00321771
23	0.000936821	0.1	0.00296249
24	0.001002786	0.13	0.00278123
25	0.001055718	0.165	0.002599
26	0.001034483	0.22	0.00220552

27	0.001150518	0.26	0.00225635
27.5	0.00117723	0.28	0.00222476
28	0.001228669	0.3	0.00224323
29	0.001257367	0.33	0.00218879
30	0.001309091	0.38	0.00212363
31	0.001364215	0.43	0.00208041
32.5	0.001444352	N/A	N/A
34	0.001525424	N/A	N/A
35	0.001577913	N/A	N/A

Fuente: elaboración propia.

Como se aprecia los valores en estado de equilibrio nos muestran valores de la constante  $k$  diferentes para cada caso. Los valores representados como N/A son puestos así debido a que a partir de una referencia de velocidad de 32.5 Hz el nivel de equilibrio superaba la capacidad del reservorio B, además que se encendía la alarma de sobrellenado instalada en el módulo.

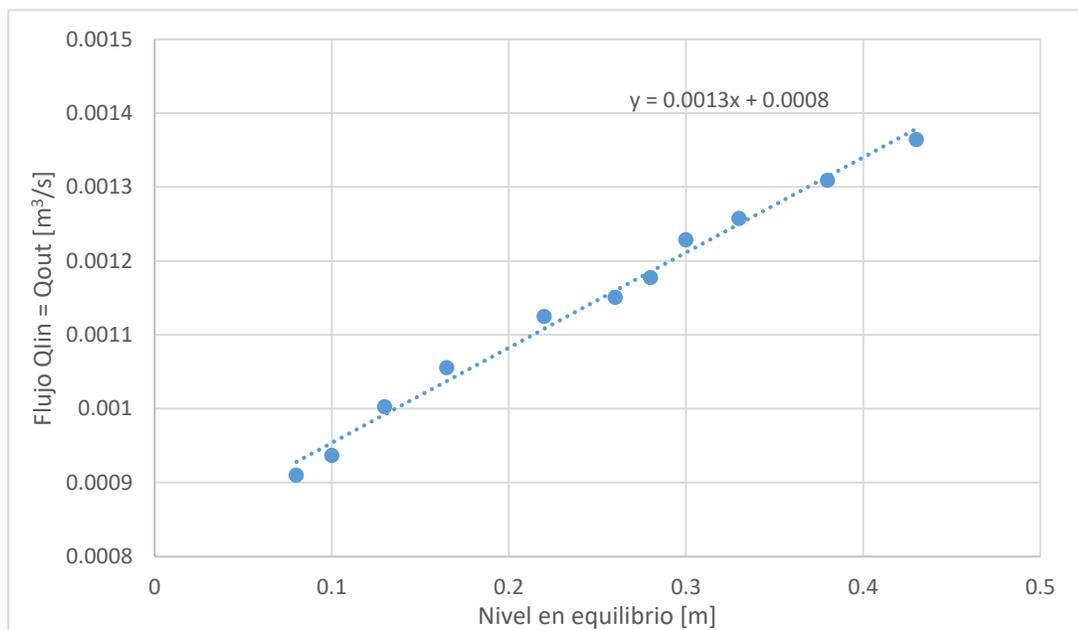


Figura nro. 9 - Curva de representación de Nivel vs Flujo en estado estacionario. Fuente: Propia.

La curva de regresión confirma el poco parecido dentro de la curva de regresión lineal con la función que describe el flujo de salida, esto debido a que la curva de regresión cuenta con

una constante de recta que tiene mucha influencia en la función matemática esto sumado a que la pendiente de la curva de regresión difiere a la constante  $k$  dentro de la región de análisis.

Todo esto causa que un análisis no computacional para una linealización que permita hallar una función de transferencia sea más complicado y menos preciso por lo que se hará uso del software computacional MATLAB para un análisis más exacto para hallar una función de transferencia lo más representativa posible.

### 3.5.2 Obtención del modelo matemático haciendo uso de MATLAB - Simulink

Para este análisis se escogerá un valor de  $k$  específico, calculado previamente de tal manera que sea representativo para los demás casos haciendo que el error en estado estacionario sea el mínimo posible esto quiere decir que los valores de proceso que sean calculados a partir de esta función de transferencia no difieran mucho de los valores de nivel hallados experimentalmente. El valor elegido será de  $k=0.00222476$  correspondiente a un flujo de  $0.00117723 \text{ m}^3/\text{s}$  debido a que se encuentra en la mitad del rango experimentado. El modelo de la ecuación diferencial implementado en Simulink es el siguiente:

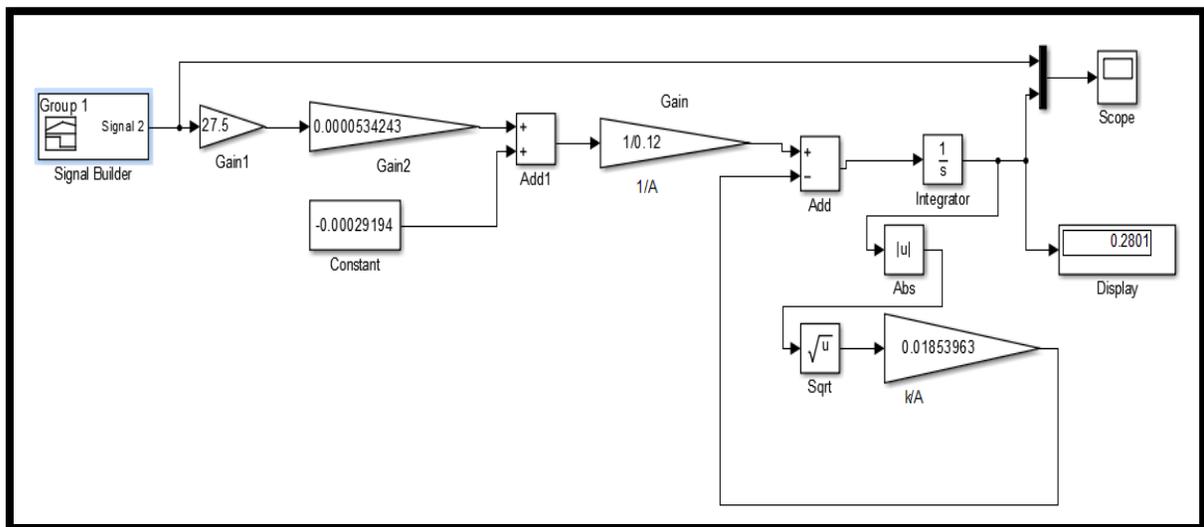


Figura nro. 10 - Modelo equivalente a la ecuación diferencial implementado en Simulink. Fuente: Propia.

En la figura nro. 12 se puede apreciar una simulación para una entrada de  $f = 27.5 \text{ Hz}$ . y tal como se puede apreciar en el bloque display de la derecha la salida final de estado estacionario para el segundo 500 es 0.28. Este número es la representación del nivel en el

sistema de ecuaciones diferenciales implementado en Simulink. Si ejecutamos el bloque “Scope” podremos ver la respuesta al escalón de magnitud mencionado.

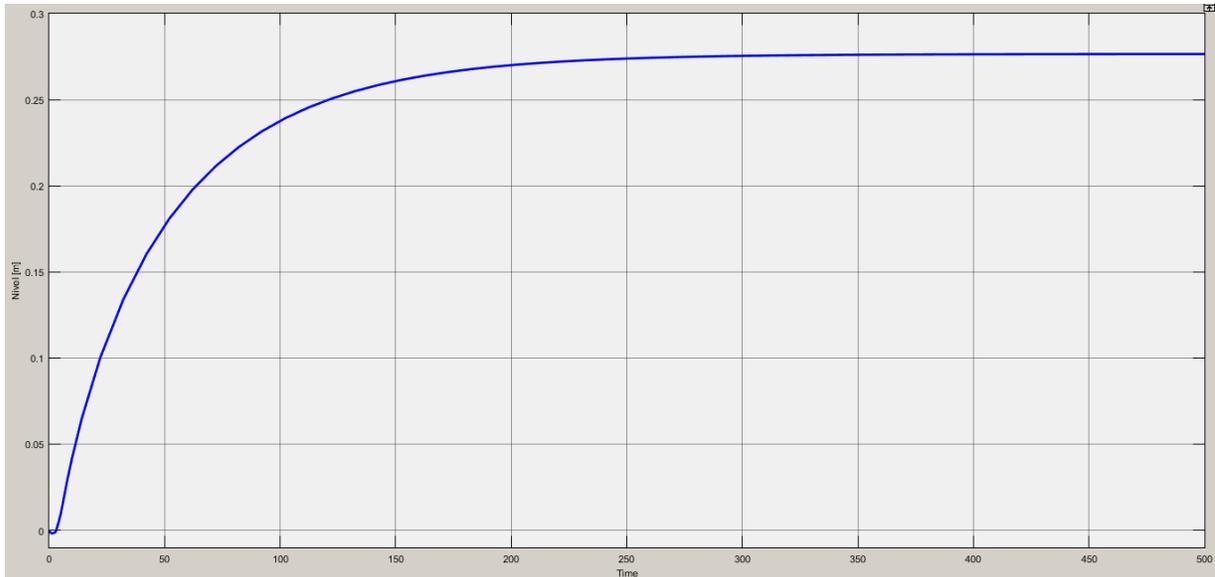


Figura nro. 11 - Respuesta al escalón de magnitud 27.5, de la simulación de la ecuación diferencial. Fuente: propia.

Por otro lado, mediante el uso de la herramienta “data logging” del software de programación SoMachine del PLC Schneider M221, se logró obtener una curva de representación real de la respuesta del sistema a una entrada de 27.5 Hz de revoluciones en la bomba de alimentación, la variable medida fue el nivel en metros.

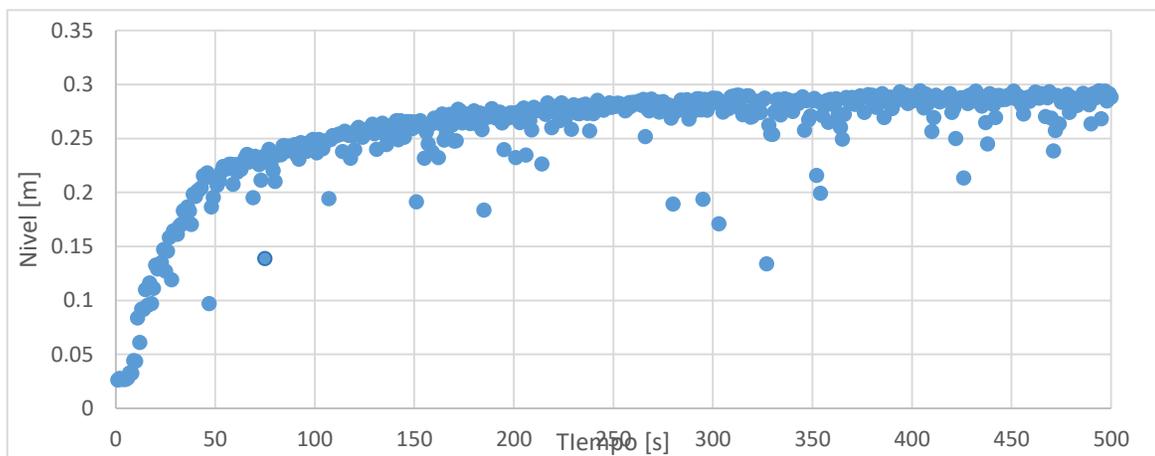


Figura nro. 12 - Curva de respuesta del nivel a una entrada de 27.5 Hz. Fuente: Propia.

En la figura nro. 14 se puede ver la respuesta real del sistema frente a un estímulo de 27.5 Hz, cabe señalar que dicho estímulo no es instantáneo y tiene una demora de aproximadamente 6 segundos hasta llegar a la frecuencia de consigna. Otro detalle que se puede apreciar es la inconsistencia de los datos obtenidos (no dibujan una tendencia suave), esto debido a que cuando el reservorio B comienza a llenarse el agua que cae en el reservorio comienza a agitar el agua que ya se encuentra en el mismo, teniendo como resultado variaciones en la medida y en algunos casos menos frecuentes medidas con mucho error. Sin embargo se puede notar que el gráfico forma una respuesta transitoria hasta el segundo 250 y una estacionaria desde este segundo con una medida que está alrededor de 0.28m (corroborable con el medidor de nivel físico presente en el reservorio). Dicha figura tiene una similitud fácilmente observable la cual servirá como punto de arranque para hallar la función de transferencia representativa del sistema.

Para obtener la función de transferencia que represente al sistema en estudio en variables de la transformada de Laplace se hará uso del toolbox IDENT de MATLAB, para lo cual se seguirá el siguiente procedimiento.

- Se importará los datos de la simulación realizada en Simulink al workspace de MATLAB en forma de datos tipo double en almacenados en un array. Estos datos serán importados al Toolbox Ident.
- Los datos del datalog obtenidos desde el PLC Schneider serán importados desde el archivo “.csv” creados por el mismo PLC al workspace del MATLAB. La herramienta de MATLAB para importar datos desde Microsoft Excel será usada para este propósito. La data importada se almacenará en el workspace de MATLAB en formato tipo double almacenado en un registro tipo array.
- Para el caso de los datos obtenidos desde el archivo “.csv” se hará un filtrado de tal manera que la forma de la curva tenga un aspecto más suave. El filtro será de tipo paso bajo y tendrá una frecuencia de corte de 10 Hz.
- Se obtendrá una función de transferencia correspondiente a los datos obtenidos de la simulación hecha en Simulink. Se considera solo un caso posible que es una función de transferencia de primer orden.

- Se obtendrá una función de transferencia correspondiente a los datos reales obtenidos desde el datalog del PLC, estos datos para esta etapa ya estarán con el tratamiento de filtrado. Se consideran el caso de una función de transferencia de primer orden.
- El toolbox Ident de Matlab permite hacer un análisis para ver que función de transferencia se ajusta más a los datos reales. Este será uno de los criterios para elegir la función de transferencia final.
- El otro criterio será la facilidad de tratamiento de la función de transferencia a posterior, ya que con la misma se planteará la automatización del módulo en general mediante un lazo de control cerrado con regulador PID.
- Se tratará la función de transferencia elegida con los demás datos de entrada de frecuencia de la bomba y se medirá el error en estado estacionario para calcular cualitativamente cuan exacta es la función de transferencia para describir el sistema.

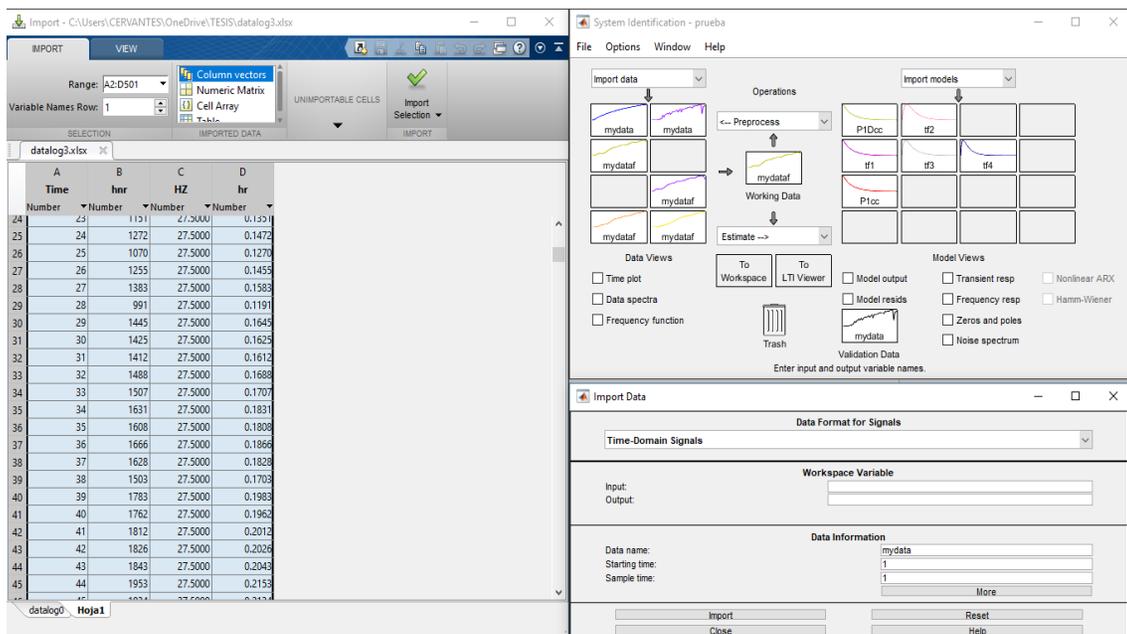


Figura nro. 13 - Entorno de trabajo para importar datos del MATLAB (mitad izquierda), entorno de trabajo Toolbox Ident MATLAB (mitad derecha). Fuente: propia.

Para el caso del filtrado de la data real se usó la herramienta “filter” del toolbox Ident. La intención de este procedimiento es quitar los cambios bruscos en lectura realizada por el datalog del PLC, de tal manera que la curva final tenga una forma más suave con respecto a la curva inicial.

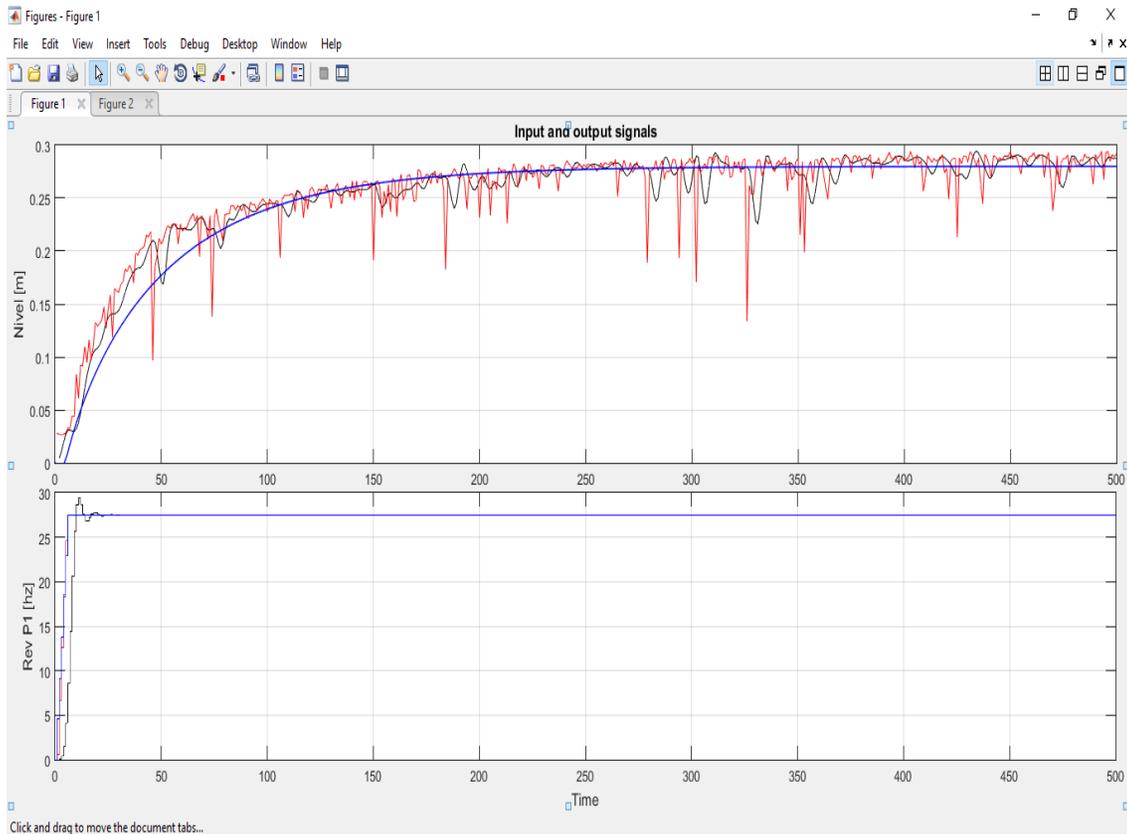


Figura nro. 14 - Curvas de respuesta: respuesta real (rojo) vs respuesta real filtrada (negro) vs respuesta simulada (azul). Fuente: propia.

Como se observa en la figura anterior, las respuestas: simulada, real y real filtrada tienen similitudes en su forma, sin embargo se puede observar también en la curva “Rev P1” que es la señal de entrada correspondiente al estímulo de la respuesta real filtrada tiene un retraso de aproximadamente 4 segundos con un sobre impulso de aproximadamente 2 Hz, esto debido que al quitar frecuencia altas mediante el filtrado la señal de escalón pierde componentes sinusoidales de alta frecuencia que permiten esa forma tipo escalón.

Seguidamente se analizan los resultados mediante herramienta de análisis de estimación de modelos llamado “Process Models” y la herramienta “Transfer Function Models” para los que se efectúa las estimaciones siguiendo los criterios antes mencionados. Mediante estas herramientas se obtuvo los siguientes modelos primeramente para la curva de simulación realizada en Simulink.

$$G(s) = \frac{0.010162}{46.181s + 1} \quad \text{Ecuación de orden 1 usando Process Models} \quad (15)$$

$$G(s) = \frac{0.010143816}{47.94s + 1} \quad \text{Ecuación de orden 1 usando Transfer Function Models} \quad (16)$$

Se observa que las ecuaciones de primer orden tienen cierta similitud en sus valores. Además de esto podemos hacer uso de la herramienta “Model output” para ver cuál ecuación se ajusta más eficientemente a la curva de muestra.

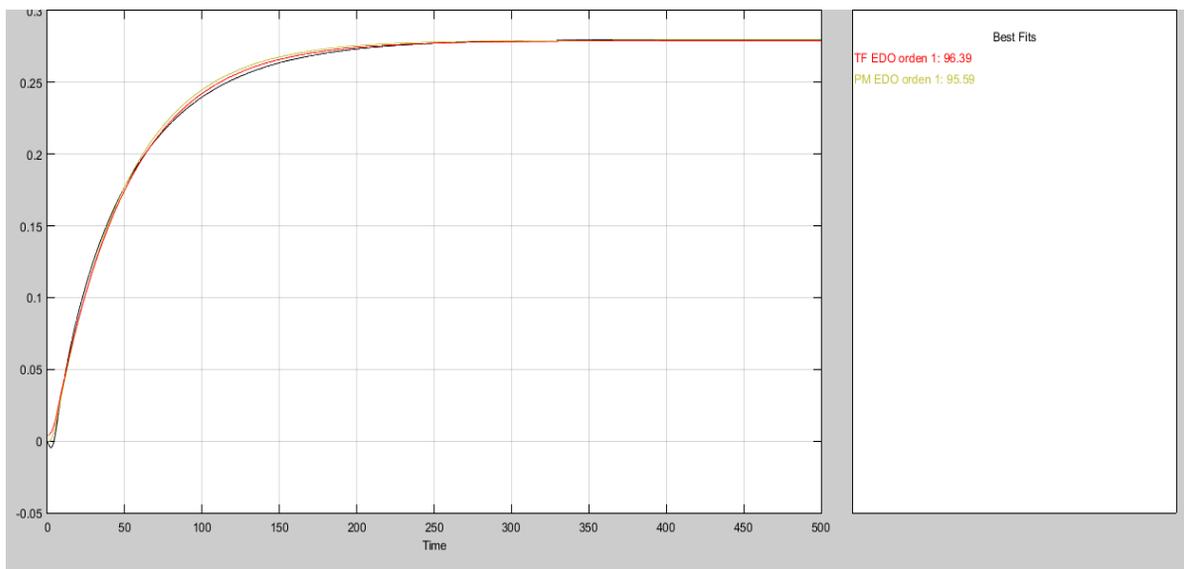


Figura nro. 15 - Curvas de respuesta al estímulo para las diferentes funciones de transferencias obtenidas mediante simulación en Simulink. Fuente: Propia

Se observa en el cuadro de la derecha de la figura anterior todas las curvas tienen un ajuste con respecto a la curva original mayor al 90%, esto da a conocer que las funciones de transferencia halladas se ajustan de manera óptima a los datos obtenidos de la simulación en Simulink. Se tienen que mencionar que la ecuación que mejor se ajusta es la ecuación (15) con un 96.39% de ajuste óptimo seguida de la ecuación (16) Con un 95.59% de ajuste óptimo a la curva de muestra.

Después de este análisis se realizó el mismo procedimiento para la curva de respuesta real filtrada, encontrándose los siguientes resultados.

$$G(s) = \frac{0.010015}{41.345s + 1} \quad \begin{array}{l} \text{Ecuación de orden 1 usando Process} \\ \text{Models} \end{array} \quad (17)$$

$$G(s) = \frac{0.00971}{32.98s + 1} \quad \begin{array}{l} \text{Ecuación de orden 1 usando Transfer} \\ \text{Function Models} \end{array} \quad (18)$$

Finalmente se realizó el mismo análisis para la curva de respuesta real sin filtrado, encontrándose los siguientes resultados.

$$G(s) = \frac{0.0099609}{33.814s + 1} \quad \begin{array}{l} \text{Ecuación de orden 1 usando Process} \\ \text{Models} \end{array} \quad (19)$$

$$G(s) = \frac{0.010034}{42.74s + 1} \quad \begin{array}{l} \text{Ecuación de orden 1 usando Transfer} \\ \text{Function Models} \end{array} \quad (20)$$

Para evaluar y escoger la función de transferencia más adecuada se usará la herramienta de "Model Output" incluida en el toolbox IDENT. Esta herramienta realiza permite conocer que función de transferencia se ajusta mejor a la curva de validación. Para este caso la curva de validación será la señal real sin filtrar ya que esta señal obtenida experimentalmente no fue manipulada en ningún caso.

De este análisis se obtiene:

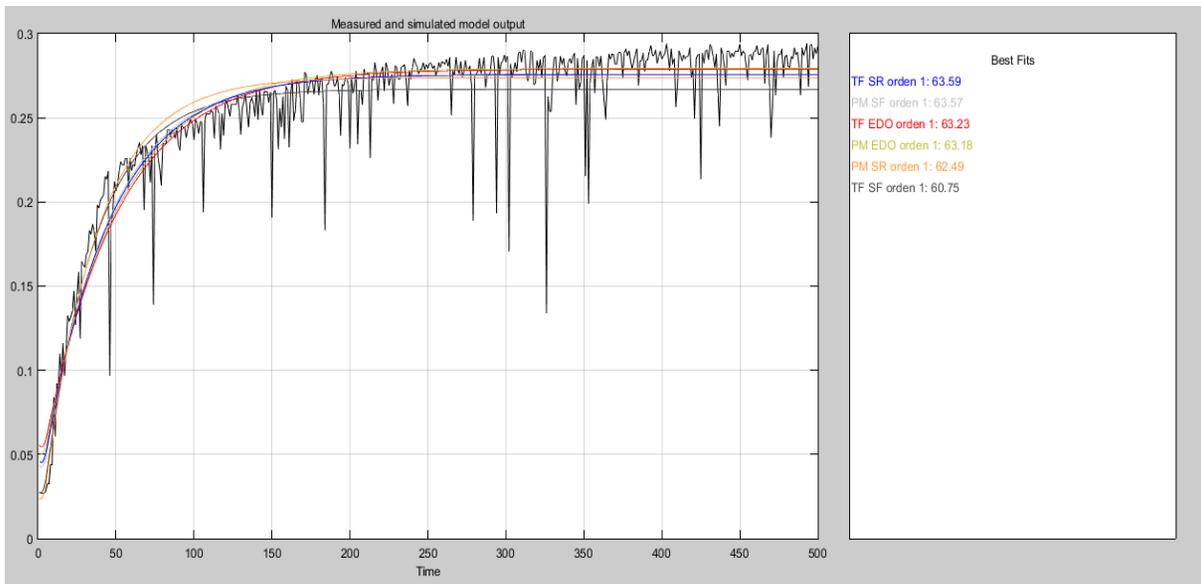


Figura nro. 16 - Representación gráfica de validación de las funciones de transferencia halladas usando como validación la curva respuesta real filtrada. Fuente: propia.

Como se observa en la figura anterior la curva que mejor se ajusta a la curva de señal real sin filtrar es la obtenida mediante la ecuación de orden 1 obtenida usando la herramienta "Transfer Function", con un ajuste de 63.59%. Cabe mencionar que el valor de ajuste se obtiene automáticamente mediante una función de ajuste promedio. El valor de validación es comparado con el valor de la función de transferencia en cada valor de "sample" que en este caso es un segundo.

Debido a esto se concluye que la función de transferencia de primer orden que mejor se ajusta a los datos obtenidos experimentalmente es:

$$G(s) = \frac{0.010034}{42.74s + 1} \quad (21)$$

Como se aprecia en la figura Nro. 23 la señal real (trazada de negro) tiene cambios muy bruscos (pulsos en forma de valle). Esto debido a las características del transmisor de nivel LT-01 que, debido a la salpicadura de agua ocasionada cuando la bomba P-1 mantiene un flujo de agua al reservorio B, hace que algunos en casos dichas salpicadura invadan la "zona muerta" del transmisor, lo que ocasiona los pulsos en forma de valle vistos en la figura

mencionada. Estos ocurren aleatoriamente y no pueden ser obviados por el PLC que los muestra como variable proceso obtenida desde el transmisor.

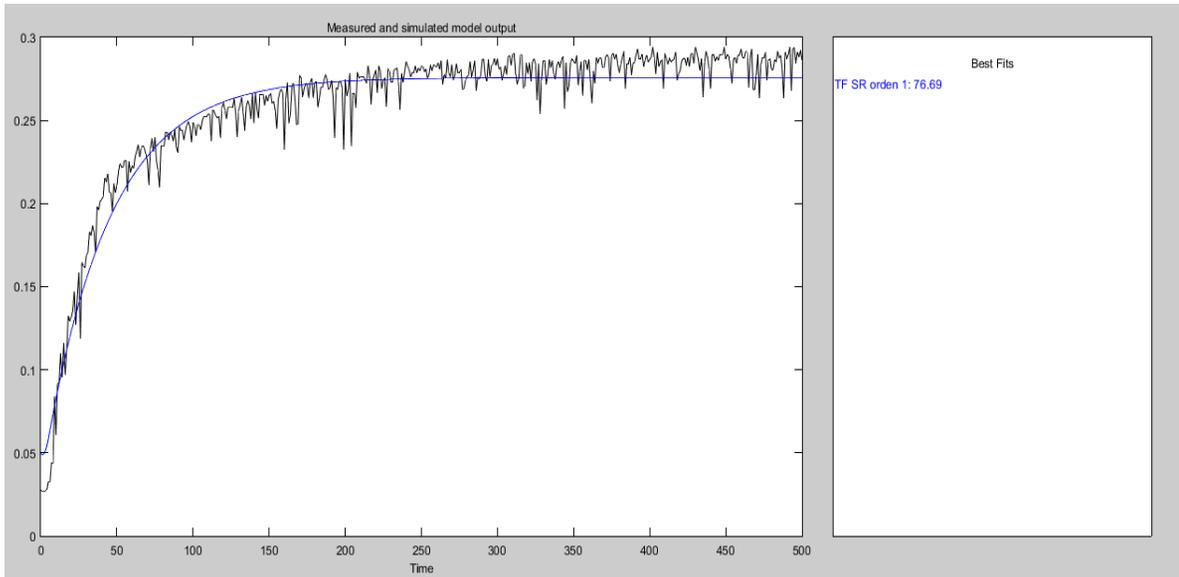


Figura nro. 17 - Comparativa de la señal experimental vs. La señal generada a partir de la FT de la ecuación 21- Fuente: Propia.

Con el objetivo de aumentar el porcentaje de ajuste de la FT, se modificó la señal real de tal manera que los cambios bruscos sean menos evidentes y la señal tenga una característica más “suave”. Es así que los valores de las mediciones de nivel erróneas fueron cambiados por el promedio entre las señales obtenidas un segundo antes y un segundo después. Como consecuencia el ajuste de la señal obtenida a partir de la FT con la señal experimental mejoró, obteniendo un ajuste del 76.69%.

De todo este análisis es que determina que la FT descrita en la ecuación 21 se usará de ahora en adelante para diseñar el control y la automatización para controlar nivel, que es uno de los objetivos de la filosofía de control hasta el momento. Para finalizar con este capítulo se probó la función de transferencia elegida con los demás valores de entrada posibles y se calculó el error dentro del rango de trabajo establecido.

Tabla 6 - Cálculo del porcentaje de error en estado estacionario

Velocidad de la bomba P-1 [Hz]	Q <sub>in</sub> [m <sup>3</sup> /s]	H <sub>r</sub> [m]	h <sub>ft</sub> [m]	Porcentaje de error en estado estacionario [%]
22.5	0.00091011	0.08	0.2258	182.25
23	0.00093682	0.1	0.2308	130.8
24	0.00100279	0.13	0.2408	85.23076923
25	0.00105572	0.165	0.2508	52
26	0.001125	0.22	0.2609	18.59090909
27	0.00115052	0.26	0.2709	4.192307692
27.5	0.00117723	0.28	0.2759	1.464285714
28	0.00122867	0.3	0.2809	6.366666667
29	0.00125737	0.33	0.291	11.81818182
30	0.00130909	0.38	0.301	20.78947368
31	0.00136422	0.43	0.3112	27.62790698
32.5	0.00144435	N/A	N/A	N/A
34	0.00152542	N/A	N/A	N/A
35	0.00157791	N/A	N/A	N/A

Fuente: elaboración propia

Para esta comprobación no se tomó en cuenta el análisis en estado transitorio porque para el caso del nivel, lo más importante es tener referencias óptimas en estado estacionario debido a que, como se pudo comprobar en este capítulo, el nivel tiende a comportarse como una variable lenta, es decir que demora un tiempo razonable en alcanzar el estado estacionario. Otro detalle importante es lo que se pudo obtener de la Tabla 6, que muestra la veracidad de la función de transferencia hallada para representar el sistema teniendo como referencia una entrada de 27.5 Hz. Eligiendo un porcentaje de error óptimo menor al 20% (elegido arbitrariamente) se afirma que el rango en el cual la función de transferencia no pierde representatividad en estado estacionario es de 26 Hz hasta 29 Hz. Toda esta información haría parecer que la función de transferencia hallada no tendría la representatividad contundente para modelar el sistema, sin embargo debemos recordar que todo el sistema en general tiene tendencia no lineal (como la gran mayoría de sistemas reales), lo que hace que el sistema sea muy trabajoso en modelar. Sin embargo también debemos recordar que la función de transferencia hallada servirá de referencia para la automatización a realizar. En dicha automatización se hará uso de un lazo PID con características fácilmente programables para hacer que el error decrezca.

### **3.6 Curvas de presión en la tubería de descarga de la bomba P-1 y representación matemática**

Durante el desarrollo de las pruebas experimentales anteriores se pudo comprobar que las electroválvulas LV-1 y LV-4 tienden a taparse si el agua no está limpia, lo que impide el paso de fluido, haciendo que si la válvula de by-pass no está abierta, las tuberías de descarga comiencen a presionarse, esto se pudo comprobar mediante el manómetro instalado en la tubería de descarga de la bomba P-1, que será bautizado como PI-1.

De este fenómeno surge la necesidad de estudiar la presión en la descarga de la tubería de la bomba P-1, para lo cual se propusieron dos experimentos para analizar dicha presión. Los experimentos son:

- Prueba 1: Se encendió la bomba P-1 y se midió las presiones en la tubería de descarga en función de las revoluciones en Hertz. Las mediciones de presión se realizaron con el manómetro PI-1 en unidades bar.
- Prueba 2: Se encendió la bomba P-1, pero para este caso ambas válvulas LV-1 y LV-2 estuvieron completamente cerradas lo que hizo que la presión tenga niveles más altos que en el experimento anterior por lo que se tuvo que realizar con más cautela. Las mediciones de presión se realizaron con el manómetro PI-1 en unidades bar.

Para la prueba 1 se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 7 - Datos obtenidos mediante el medidor PI-1 para las distintas revoluciones de P-1 para prueba 1

Velocidad de la bomba P-1 [Hz]	Presión [bar]
10	0.09
12	0.1
14	0.11
16	0.12
18	0.13
20	0.15
22	0.17
24	0.18
26	0.2
28	0.22
30	0.24
32	0.27
34	0.29
36	0.31

Cuya representación gráfica es la siguiente:

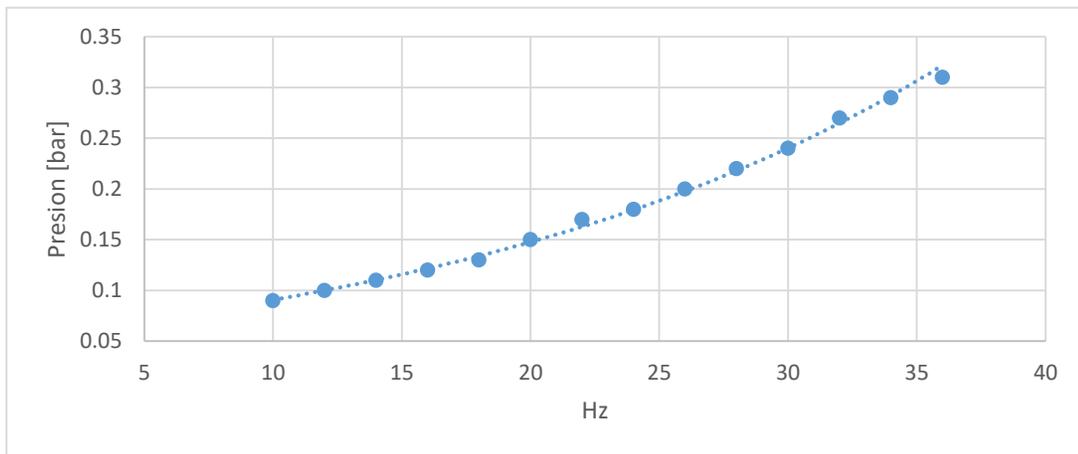


Figura nro. 18 – Representación gráfica de la presión en función de las revoluciones de la bomba P-1 para el experimento 1

Como se observa en la figura la tendencia de la gráfica es exponencial; haciendo una regresión no lineal se puede obtener una ecuación representativa de los datos:

$$Presion = 0.0001666hz^2 + 0.000954hz + 0.06341 \quad (22)$$

Para la prueba 2 se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 8 - Datos obtenidos mediante el medidor PI-1 para las distintas revoluciones de P1 para la prueba 2

Velocidad de la bomba P-1 [Hz]	Presión [bar]
10	0.14
12	0.2
14	0.27
16	0.35
18	0.45
20	0.55
22	0.67
24	0.79
26	0.9
28	1.05
30	1.25
32	1.42

Fuente: elaboración propia.

La representación gráfica para estos datos es la siguiente:

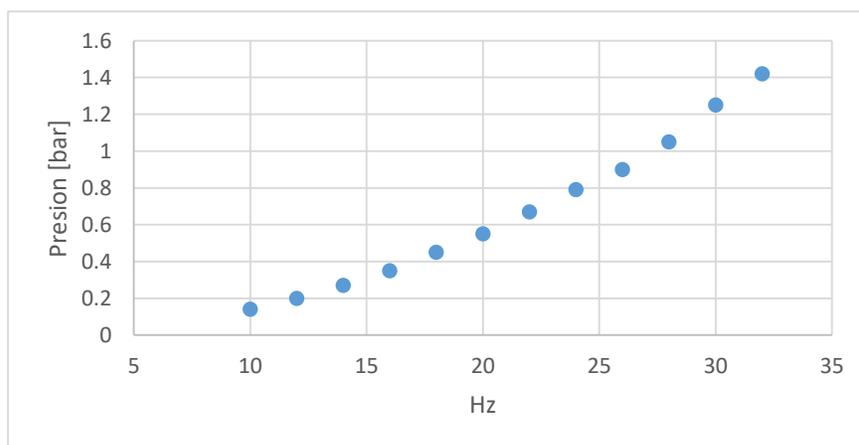


Figura nro. 19 - Representación gráfica de la presión en función de las revoluciones de la bomba P-1 para el experimento

Para este caso la mejor aproximación matemática es una función polinómica de orden dos:

$$Presion = 0.001369hz^2 + 0.000119hz + 0.00107 \quad (23)$$

Para el experimento número 2 se tiene que mencionar que solo se pudo hacer las mediciones hasta los 32 Hz de revoluciones en la bomba debido a que a partir de aquí la presión excesiva causaba fugas por los accesorios de las tuberías cercanas a la descarga de la bomba.

### **3.7 Filosofía de control para automatizar el sistema**

Esta sección describe la filosofía de control para la automatización referida al proyecto de tesis: “Diseño de un sistema de seguridad instrumentado e integración al DCS mediante Modbus TCP y Profinet”. Se describe la instrumentación y los algoritmos asociados que sustentan la configuración y permiten el entendimiento del proceso para su operación, estableciendo una descripción de la planta y de cómo esta será.

#### **3.7.1 Funciones del sistema**

El sistema de control debe satisfacer los siguientes objetivos.

- Asegurar la correcta operación del proceso de traslado de agua entre reservorios.
- Facilitar la toma de decisiones por parte de los operadores del proceso.
- Ofrecer supervisión y control apropiado al proceso.
- Brindar la capacidad de detección de alarmas.
- Ejecutar todas las funciones de control regulatorio y discreto requeridas por el proceso.

#### **3.7.2 Grado de automatización**

Se toma en consideración un grado de automatización que permita una operación automática y manual de proceso óptima segura y confiable. Por otra parte la instrumentación de campo permitirá un monitoreo y ejecución de lógicas de control sobre el proceso. Dichas lógicas de control serán implementadas en el PLC teniendo siempre tomando en cuenta los enclavamientos programados.

Cabe mencionar que la operación del proceso se realizará desde el HMI del tablero de control y desde las botoneras ubicadas en el mismo.

### **3.7.3 Modos de control**

El sistema de control en operación será controlado por el PLC Schneider M221 de forma remota cuando el sistema se encuentre en modo automático, por otra parte la operación será realizada desde las botoneras del tablero cuando sistema se encuentre en modo manual.

- Control local: el control local será implementado para labores de mantenimiento y pruebas. Los equipos pueden operar considerando los enclavamientos programados.
- Control Remoto: el control remoto está referido al control realizado por el PLC principal aunque las labores realizadas por el operador en el HMI también serán consideradas como labores de control remoto.

### **3.7.4 Modos de operación**

- Modo Automático: en este modo, el control de los equipos o el ajuste de los algoritmos de control PID serán realizados por el PLC mediante la ejecución de las lógicas programadas en el mismo. Este modo no será habilitado si existe algún enclavamiento activo detectado por el PLC. Considerando lo anterior si algún enclavamiento de proceso se activa durante el funcionamiento del modo automático, entonces el proceso será detenido y solicitara operación manual.
- Modo Manual: este modo está disponible mediante el accionamiento del switch de control ubicado en el tablero. Todas las acciones de este modo estará disponibles mediante el accionamiento de las botoneras de control de las bombas P1 y P2, el indicador lumínico de encendido de dichas bombas y el indicador lumínico de sobrellenado.

### **3.7.5 Modos de detención**

- Parada de emergencia: este modo de detención se describe el accionamiento de la botonera de emergencia ubicada en la parte inferior derecha del frente del tablero de control, se tiene que destacar que el cableado del sistema de control está configurado de tal manera que si se acciona esta botonera de emergencia el tablero y todo el

sistema de control pierden alimentación eléctrica completamente. Luego de esto una vez que se restablece la alimentación eléctrica mediante el des accionamiento de esta botonera el PLC de control pasa a estado stop.

- Detención no programada: este modo de detención esta principalmente relacionada cuando el sistema de control y supervisión pierden voltaje y por consiguiente el todo el sistema se apaga, dejando el proceso sin atención por parte del sistema de control. También se debe considerar este modo cuando el sistema comienza a perder el control sobre el proceso por lo que se procede a detener todo el proceso para encontrar la falla y proceder a repararla.
- Detención programada: este modo de detención está relacionada con los mantenimientos programados que se deben realizar en el sistema de control y supervisión.

### **3.8 Descripción del proceso**

El proceso incluye todas áreas necesarias para el transporte de agua entre reservorios de manera segura y confiable. El sistema de control de la planta está constituido por el PLC de control, el HMI de supervisión, y la instrumentación de campo los cuales proveerán la información necesaria para un control optimo del proceso efectuado en la planta.

#### **3.8.1 Traslado de agua al reservorio B y simulación de consumo mediante accionamiento manual de la válvula LV3**

El agua contenida en el reservorio A será trasladada al reservorio B mediante la tubería de transporte en conjunto con la bomba de alimentación al reservorio B. En el reservorio B se simulará un consumo mediante el accionamiento de la válvula manual ubicada en la parte inferior del reservorio B. El nivel del reservorio B será controlado de manera automática o manual según necesidad mediante el establecimiento de un nivel de referencia de agua en el reservorio B. La presión en la tubería de traslado será controlada de manera manual mediante el criterio del operador del proceso.

### **3.8.2 Traslado de agua del reservorio B al reservorio C por acumulación excesiva de agua**

Si el nivel de agua en el reservorio B excede los límites programados se activará el sistema de bombeo auxiliar de desfogue de tal manera que el sobre exceso de agua sea trasladado al reservorio C.

## **3.9 Control del proceso**

### **3.9.1 Áreas del proceso**

- Traslado de agua al reservorio B y simulación de consumo. (Área 1).
- Traslado de agua del reservorio B al reservorio C por exceso de agua. (Área 2).

### **3.9.2 Traslado de agua al reservorio B y simulación de consumo**

- Límite de batería: estos límites de batería están comprendidos desde el reservorio A hasta la válvula de acción manual LV-3.
- Equipos principales:
  1. Bomba de traslado P-1.
  2. Variador de velocidad ATV-1.
- Instrumentos principales:
  1. Electroválvula de control LV-1.
  2. Válvula manual de bypass LV-4.
  3. Transmisor de nivel LT-1.
  4. Transmisor de temperatura basado en RTD TT-1.
  5. Manómetro de descarga de bomba PI-1.
  6. Válvula de simulación de consumo LV-3.
  7. Switch de nivel alto LS-H1.

### **3.9.3 Estrategias de control para el traslado de agua al reservorio B con simulación de consumo**

El objetivo de esta área es proveer en todo instante de un flujo de agua regulado al reservorio B sea cual fuese el consumo simulado.

El control automático de esta área será realizado por PLC del sistema, esto incluye las funciones de arranque del sistema automático, enclavamientos y permisivos. La supervisión se realizará desde el panel HMI ubicado en el tablero de control esto quiere decir que todas las variables obtenidas mediante instrumentos digitales estarán disponibles desde el panel. El operador tendrá la capacidad de arrancar o detener el sistema de control en todo momento que se requiera.

Para esta área se contemplan dos lazos de control; para el control nivel se dispondrán de un controlador PID realimentado mediante el transmisor de nivel LT-1, por otro lado, para el control de presión se dispondrá de un control manual ON/OFF, es decir el operador tendrá que visualizar periódicamente los datos de presión desde el instrumento PI-1 y según criterios establecidos detendrá el sistema o lo dejara funcionar si la presión sobrepasa o se mantiene en valores normales.

#### **3.9.4 Traslado de agua del reservorio B al reservorio C por acumulación excesiva de agua.**

- Límite de batería: estos límites de batería están comprendidos desde la tubería de traslado de la bomba de desfogue hasta el reservorio C.
- Equipos principales:
  1. Bomba de traslado P2.
  2. Variador de velocidad ATV 2.
- Instrumentos principales:
  1. Electroválvula de control LV2.
  2. Válvula manual de bypass LV5.

#### **3.9.5 Estrategias de control para el traslado de agua del reservorio B al reservorio C por acumulación excesiva de agua**

El objetivo de esta área es auxiliar al área anterior cuando el nivel de agua se salga de control y almacenar el agua de exceso en el reservorio C.

El control automático de esta área será realizado por PLC del sistema, esto incluye las funciones de arranque del sistema automático, enclavamientos y permisivos. La supervisión se realizara desde el panel HMI ubicado en el tablero de control y las variables concernientes

a esta área como la velocidad del motor de la bomba P1 y el estado de la electroválvula LV2 estarán disponibles en todo momento desde este panel.

Las lógicas de control para este sistema estarán activas una vez que los niveles de agua excedan los valores determinados por el operador y se implementaran en el PLC y se ejecutaran desde el mismo.

### **3.10 Desarrollo de las lógicas y lazos de control**

Todas las lógicas de control serán implementadas en el PLC Schneider M221, y serán desarrolladas en lenguaje LADDER en su totalidad en el entorno de programación SoMachine Basic. Con respecto a la supervisión, por lo pronto, se implementará en el panel HMI del tablero principal, las configuraciones se realizaran usando el software Vijeo Designer.

#### **3.10.1 Lógicas de control para el área 1**

Como se mencionó anteriormente las variables de proceso son el nivel del reservorio B y la presión en la tubería de descarga de la bomba P1. Por otro lado, la disposición de instrumentos nos permite automatizar el proceso. Para tal objetivo el control de se logrará nivel mediante un regulador PID y el control de presión mediante un lazo ON/OFF donde el operador actuara de realimentación y de regulador a la vez, esto debido a que no se dispone de un instrumento que pueda conectarse con el PLC Schneider 221.

- Lazo de control del nivel del reservorio B: la característica más importante para este lazo es que la variable de control (referencia de velocidad de la bomba P1) tiene un rango muy reducido de funcionamiento. Actualmente ambos variadores están programados para girar a un máximo de 2/3 de la velocidad de referencia máxima (40 Hz), debido a las características de la bomba. Esto se puede comprobar muy fácilmente debido a que cuando se programa la velocidad al máximo la bomba comienza a hacer ruidos molestos y se puede notar que el variador se esfuerza para mantener la velocidad de referencia.

Para la implementación del lazo PID se usó la herramienta PID Software del software SoMachine Basic en la cual se habilitó la opción PID sin Auto-tuning debido a que la herramienta de Auto-tuning solo funciona si el proceso es lineal en el rango de

funcionamiento, sin embargo en el caso del proceso a controlar no es este el caso como se pudo comprobar en el capítulo anterior.

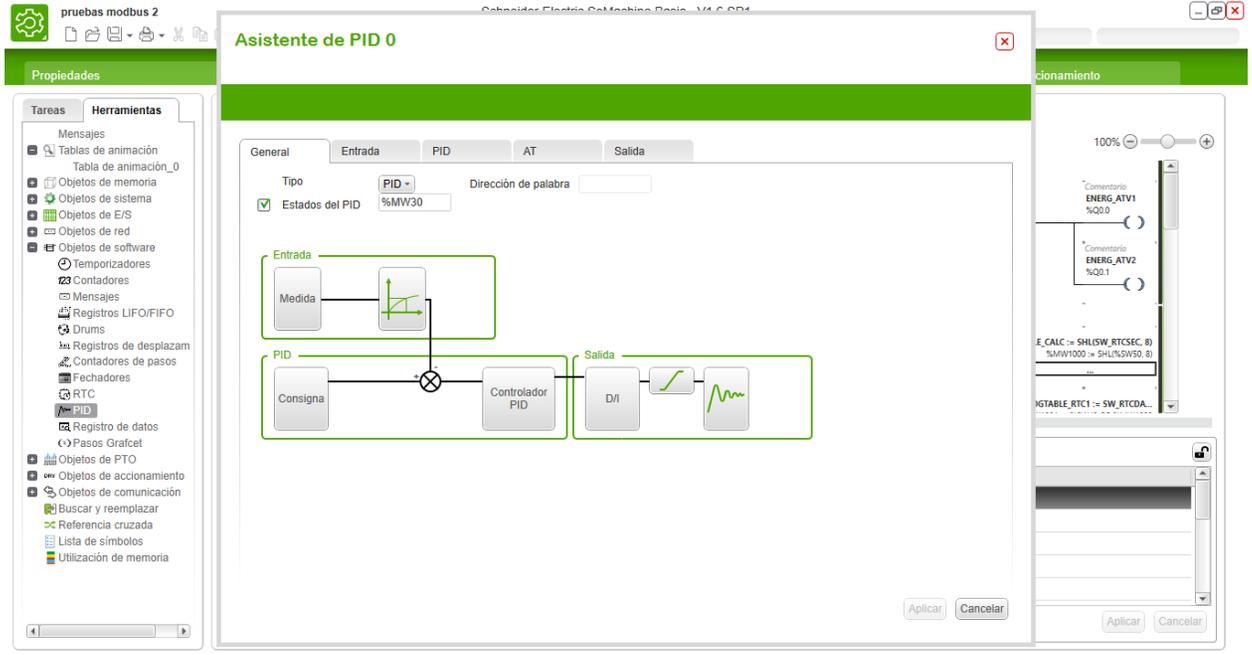


Figura nro. 20 - Asistente para la configuración de lazos PID en el software SoMachine Basic.

Los registros del PLC usados para la configuración del regulador se detallan a continuación:

- Consigna de control: %MW20 – Consigna\_de\_control.
- Medida: %MW11 – Nivel\_normalizado.
- Constante proporcional: %MW91 –  $K_p$ .
- Constante Integral: %MW92 –  $T_d$ .
- Acción: Directa (debido a la relación proporcional entre la variable de control y de proceso).
- Límites: Min: 0 – Max: 300 (se eligió estos valores para no esforzar a la bomba ni al variador, con el valor de 300 el valor máximo de referencia de velocidad es de 30 Hz).
- Salida analógica: %MW1 – Escribir Frecuencia de Referencia ATV 1
- Tipo de regulador: PI.

Se eligió el tipo de regulador como PI debido a que las perturbaciones en la medición de nivel son excesivas y pueden tener un comportamiento negativo si es que se agrega la

constante derivativa ya que esta misma amplifica estos cambios bruscos en el error de medición. Se tiene que mencionar de igual manera que la lógica de control incluye que la bomba P-1 se apague con la variable de control tenga una salida de referencia desde el regulador de menos de 10 Hz.

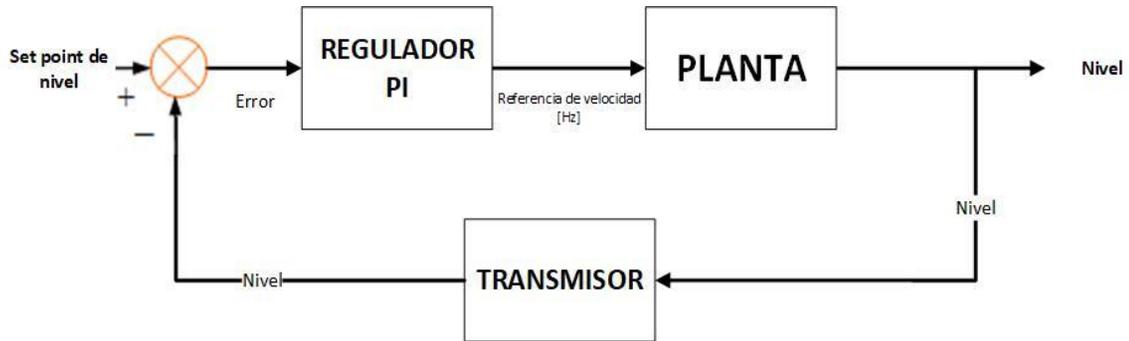


Figura nro. 21 - Diagrama de bloques correspondiente al control de nivel en el reservorio B. Fuente: propia.

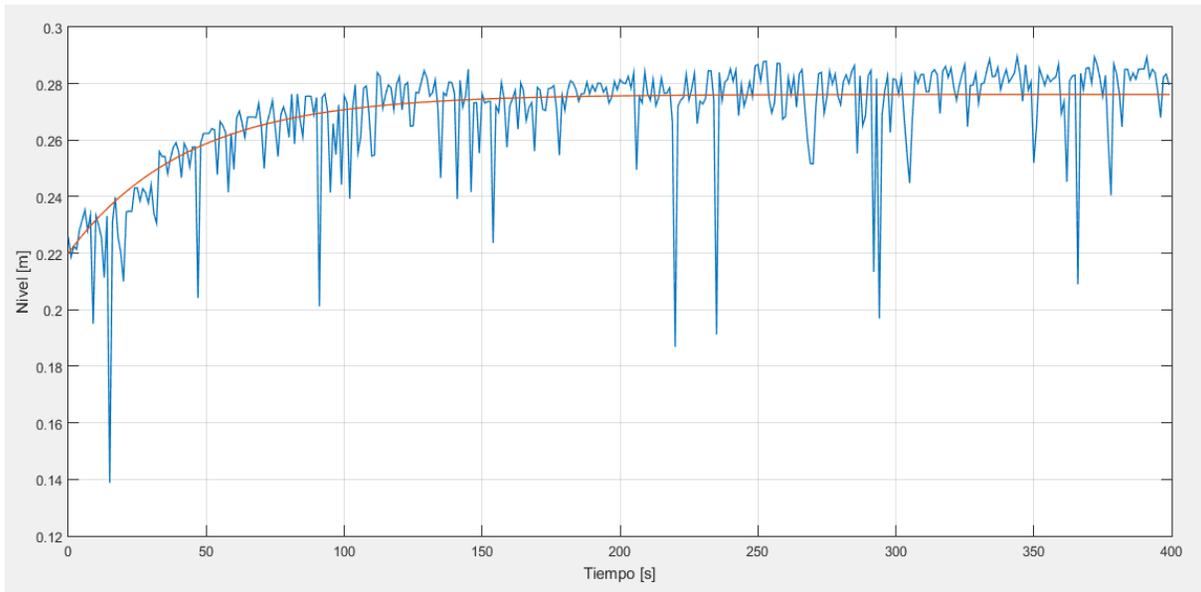
### 3.10.2 Sintonización del lazo de control de nivel

Para la sintonización del lazo PID que regula el lazo nivel se eligió el método en lazo abierto de Ziegler-Nichols debido a que la función de transferencia en lazo abierto fue hallada en el capítulo anterior. Sin embargo para poder aplicarlo en este capítulo necesitamos comprobar que el modelo matemático describa lo que sucede en la realidad cuando se experimenta en el proceso.

Para este experimento se tuvieron las siguientes consideraciones:

- Se estableció el nivel en el reservorio B a 22 cm.
- Se abrió la válvula LV3 y se encendió la bomba P1 a 27.5 Hz.
- Se hizo un data-log en el PLC de los datos de nivel hasta que alcanzó el valor de estado estable (28 cm). Esta data fue exportada al MATLAB desde las tablas de Microsoft Excel creadas por el data-log.
- En el MATLAB se graficó la función de transferencia con las mismas condiciones.

La gráfica de comparación experimental y la hallada mediante la función de transferencia es la siguiente:



*Figura nro. 22- Curva de representación de respuesta frente al escalón en el lazo de control de nivel.*

Como se puede apreciar en la gráfica la función de transferencia describe la trayectoria de la curva obtenida experimentalmente, por lo que podemos afirmar que en el rango de experimento (22 cm – 28 cm) la función de transferencia hallada en el capítulo anterior servirá de ayuda para calcular los parámetros del regulador PID.

Para el cálculo de los parámetros del regulador, según el método de lazo abierto de Ziegler-Nichols se tiene que graficar una recta tangente en la curva de respuesta y según a eso calcular los tiempos L y T. El parámetro L se describe como el retardo el sistema comienza a actuar frente a la entrada escalón y el parámetro T es el tiempo de la intersección de la tangente con la recta que describe el valor en estado estacionario menos el tiempo L.

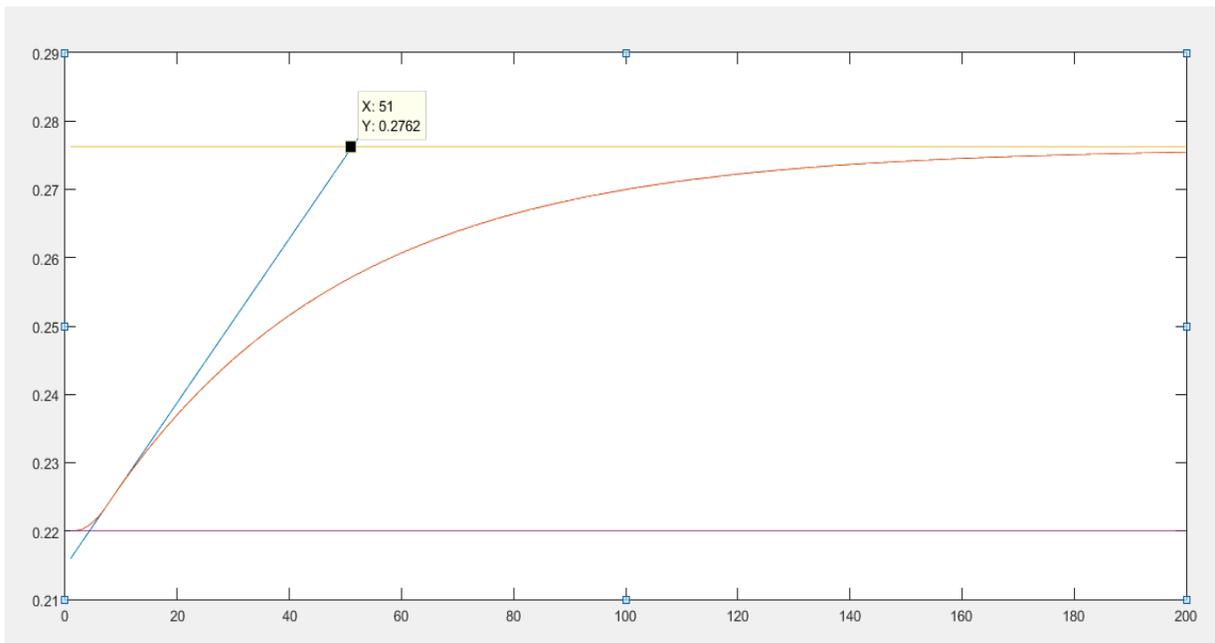


Figura nro. 23 - Representación gráfica de la obtención de las curvas para hallar los parámetros del regulador PID según Ziegler-Nichols

De la figura podemos obtener:

$$L = 4.5 \quad (24)$$

$$T = 46.5 \quad (25)$$

Por lo que, según la tabla 8.1 del libro "Ingeniería de Control Moderna" (Ogata, 2010) se desprende las constante  $K_p$  y  $T_i$ :

$$K_p = 10 \quad (26)$$

$$T_i = 15 \quad (27)$$

Los valores hallados anteriormente no son únicos y pueden ser modificados según sea necesidad. Para probar de control de nivel se realizaron los siguientes experimentos:

- Se configuró el Set Point de nivel en 30 cm y con la válvula de descarga LV-03 completamente abierta se habilitó la regulación PID. Durante la mitad de la duración del experimento se redujo el consumo mediante la manipulación de la válvula LV-03. Como se aprecia en la siguiente figura el nivel (trazado de azul) es controlado y mantenido en alrededor del set-point establecido. El valor de nivel en este caso está acotado dentro de un  $\pm 2.5$  (8%) del set-point. La variable de control (trazada de color plomo) muestra un comportamiento pulsante y no tiene un valor diferente de cero todo el tiempo debido a la programación del PLC.

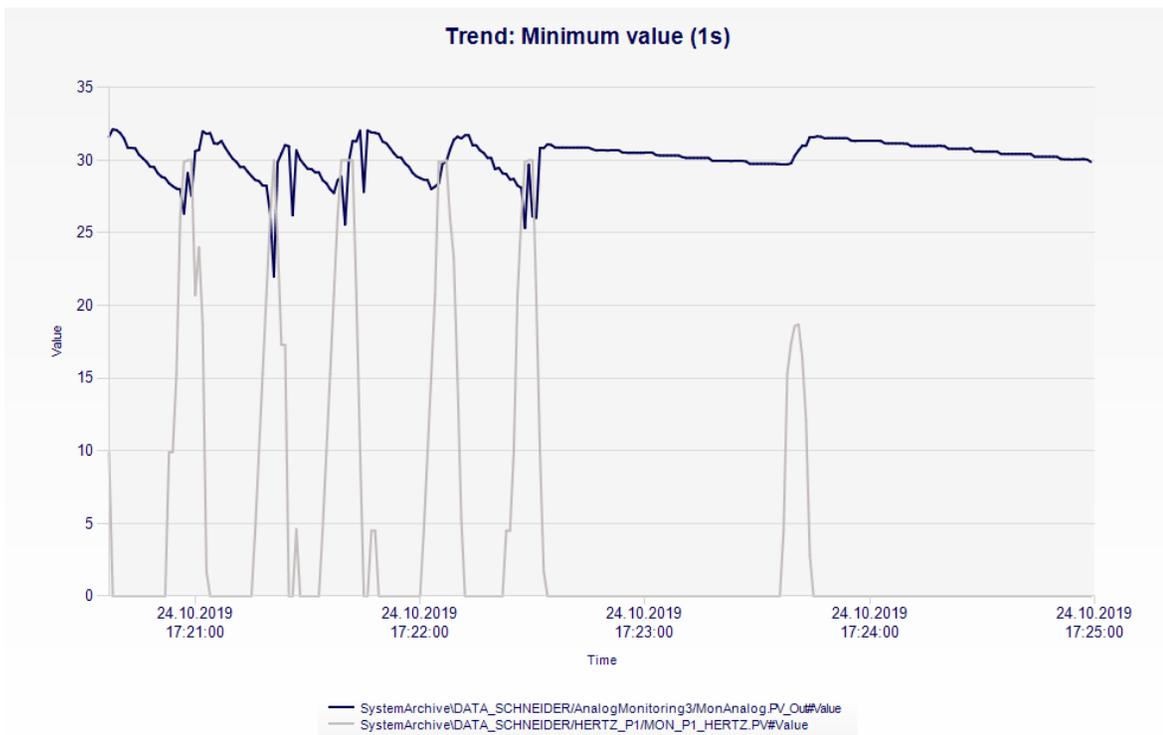
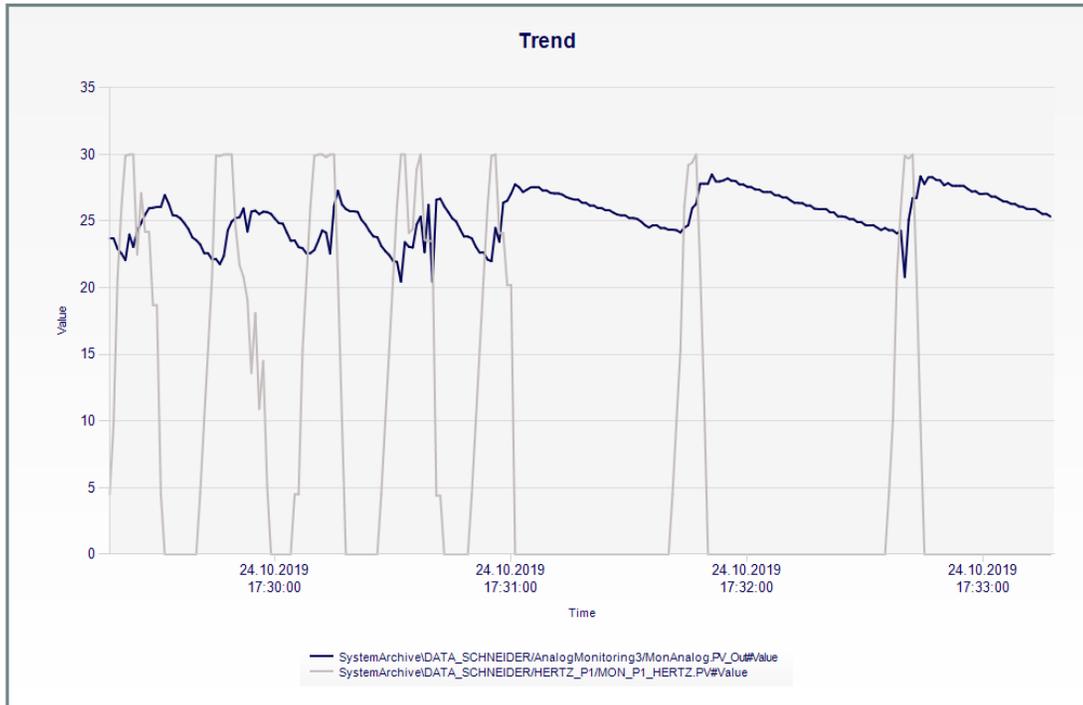


Figura nro. 24 - Tendencia del lazo de control de nivel con un set point de 30 cm. Fuente: propia.

- Se configuró el Set Point de nivel en 25 cm y con la válvula de descarga LV-03 completamente abierta se habilitó la regulación PID. Durante la mitad de la duración del experimento se redujo el consumo mediante el cerrado de la válvula LV-03.

Como se aprecia en la siguiente figura el nivel (trazado de azul) es controlado y mantenido en alrededor del set-point establecido. El valor de nivel en este caso está acotado dentro de un  $\pm 2$  del set-point. La variable de control (trazada de color plomo) muestra un comportamiento pulsante y no tiene un valor diferente de cero todo el tiempo debido a la programación del PLC.

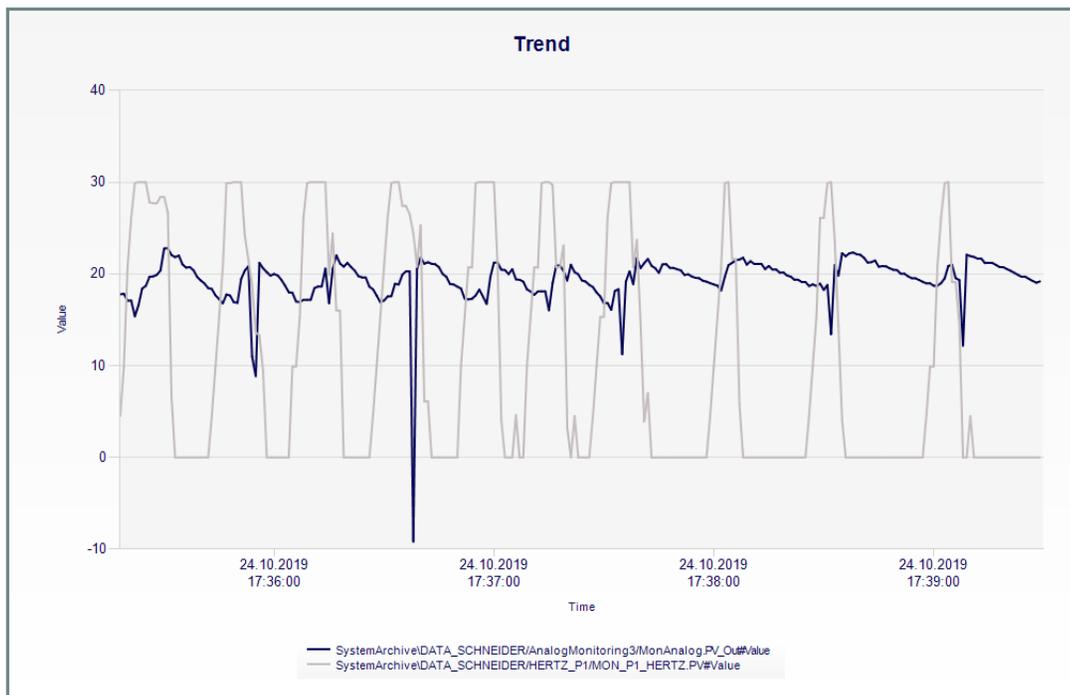


10/24/2019 5:31:25 PM

tesis\_MP

Figura nro. 25 - Tendencia del lazo de control de nivel con un set point de 25 cm. Fuente: propia

- Se configuró el Set Point de nivel en 20 cm y con la válvula de descarga LV-03 completamente abierta se habilitó la regulación PID. Durante la mitad de la duración del experimento se redujo el consumo mediante el cerrado de la válvula LV-03. Como se aprecia en la siguiente figura el nivel (trazado de azul) es controlado y mantenido en alrededor del set-point establecido. El valor de nivel en este caso está acotado dentro de un  $\pm 1.5$  del set-point. La variable de control (trazada de color plomo) muestra un comportamiento pulsante y no tiene un valor diferente de cero todo el tiempo debido a la programación del PLC.



10/24/2019 5:37:42 PM

tesis\_MP

Figura nro. 26 - Tendencia del lazo de control de nivel con un set point de 20 cm. Fuente: propia

Como se puede ver en las tres graficas anteriores para los distintos Set Points configurados el lazo de control tienen un comportamiento óptimo, controlando en todo momento la variable de proceso.

La secuencia de control para este lazo es la siguiente:

- El operador programa en centímetros, el nivel de referencia deseado que debe mantenerse en el reservorio B sea cual fuese el consumo del mismo. De igual manera el operador debe programar las constantes proporcional e integral antes de poner en automático el sistema. Los valores para estas constantes fueron calculados anteriormente y pueden ser modificadas según necesidad por un personal autorizado y calificado.
- El PLC manipula este valor y lo convierte en la consigna de control. Según el nivel actual del reservorio existen dos posibles casos:
  - El nivel está por encima de la consigna: si este es el caso el PLC enciende bomba P2 a una velocidad constante de 25 Hz y activa la electroválvula LV4 y mantiene este estado hasta que el nivel este dentro del rango de  $\pm 10\%$  de la consigna.
  - El nivel está por debajo de la consigna: si este es el caso el PLC enciende la bomba P1 a una velocidad constante de 30 Hz y activa la electroválvula LV1 y mantiene este estado hasta que el nivel este dentro del rango de  $\pm 10\%$  de la consigna.
- Una vez que la variable de proceso se encuentra dentro del  $\pm 10\%$  de la consigna se apaga todas las bombas. Se espera 2 segundos y el lazo PID toma control de la variable de control (referencia de velocidad de la bomba P1). Como se sabe que el flujo comienza a los 10 Hz por lo que el PLC solo arrancará la bomba si el valor de la variable de control que el regulador comunica al variador supera los 10 Hz. Es decir si el regulador solicita menos de 10 Hz en la bomba P1 el motor de dicha bomba no arrancara.
- El lazo de control se deshabilita si algún enclavamiento o parada de emergencia se activa durante su funcionamiento.
- Enclavamientos:
  1. Sobrellenado del reservorio B.
  2. Valores de presión superiores a 1 bar en la tubería de descarga de la bomba P1 (este valor de presión es explicado en el capítulo siguiente y por el momento es tomado como arbitrario). Siendo activados cualquiera de estos enclavamientos el sistema entrega la alarma mediante el panel HMI y apaga las bombas P1 y P2.

### 3.10.3 Lógicas de control para el área 2

Las lógicas de control para el área 2 son netamente auxiliares, es decir están implementadas solo para contrarrestar un posible evento de exceso de nivel en el reservorio B o nivel de exceso durante el arranque del proceso; estas lógicas tienen la siguiente secuencia de control:

- El nivel de líquido en el reservorio B excede los 0.45m, el switch de nivel alto se engancha o ambos, se activa un enclavamiento en el PLC.
- El enclavamiento apaga la bomba P1 pero no cierra la electroválvula LV1.
- El enclavamiento activa la bomba P2 con una velocidad constante de 30 Hz y apertura la electroválvula LV4.
- El enclavamiento deja una alarma en el historial del panel de control y solo se desactiva si el switch de nivel se desengancha.

## **CAPÍTULO IV: REQUERIMIENTOS Y ESPECIFICACIONES TECNICAS REFERENTES A LA SEGURIDAD DEL PROCESO**

En el presente capítulo se identificaron, seleccionaron y resumieron las principales normas y estándares necesarios para la implementación de este proyecto de tesis, se tiene que entender que estos documentos solo son referenciales, debido a las limitaciones descritas previamente y a que la documentación mencionada no es libre. Sin embargo el basarse en documentación internacional otorgará al proyecto de tesis más sustento a sus objetivos y conclusiones razón por la cual se presta énfasis en identificar las normas y estándares pertinentes, no tomando en cuenta ciertas normas como por ejemplo las elaboradas por API, aunque el módulo de bombeo de agua fuera concebido para simular el proceso de despacho y almacenamiento de hidrocarburos, esto debido a que el entorno en donde se encuentra ubicado el proceso no cuenta con características de producción o venta de hidrocarburos.

Previamente se realizó una descripción básica del funcionamiento del sistema de bombeo. Cabe resaltar que el proceso de bombeo como tal ya fue automatizado en el capítulo anterior y sus estrategias fueron explicadas en el mismo capítulo. El motivo de la descripción básica es simplemente dar un alcance de las capacidades del sistema en general.

### **4.1 Descripción básica del sistema de bombeo de agua entre reservorios**

El sistema de tuberías del sistema de bombeo tiene la principal función de llevar el líquido almacenado de un reservorio a otro, en resumen el sentido de flujo de las tuberías va de la siguiente manera: El líquido almacenado en el reservorio inferior izquierdo (reservorio A) mediante comandos de control habilita la bomba izquierda (bomba P-1) que transporta el fluido almacenado al reservorio superior (reservorio B), este líquido puede ser transportado a su vez, mediante el accionamiento de la bomba derecha (bomba P-2) hacia el reservorio inferior derecho (reservorio C). El sistema no cuenta con actuadores de tal manera que se pueda transportar el fluido almacenado en el reservorio C hacia el reservorio A, aunque los reservorios se encuentran interconectados por una tubería de 1" ubicada en parte inferior de los mismos, por lo que si se abre las válvulas manuales en estas tuberías el nivel de fluido entre reservorios podría igualarse mediante presión hidrostática.



*Figura nro. 27 - Sistema de bombeo de agua a escala (vista posterior) - Fuente: propia.*

Además de esto existe la válvula LV-03 puede ser accionada manualmente para transferir el líquido del reservorio B al reservorio A. Como se pudo concluir en el capítulo anterior, es esta válvula la que simula el consumo de líquido en el reservorio B.

Acorde a lo desarrollado en el capítulo anterior, la automatización implementada en el sistema actual permite un control automático de nivel en el reservorio B, así como un control básico, realizado por parte del operador en la presión de descarga de la bomba P-1

#### **4.2 IEC 61508 – Seguridad funcional de sistemas eléctricos, electrónicos y programables relacionados con seguridad**

Es un estándar internacional publicado por IEC que brinda los métodos de aplicación, diseño, implementación y mantenimiento para los sistemas eléctricos, electrónicos y programables (a partir de ahora E/E/EPS) relacionados con la seguridad. El campo de aplicación de este estándar puede ser para cualquier tipo de industria. La premisa principal de este estándar es el siguiente: *“Cualquier sistema orientado a la seguridad debe trabajar correctamente o fallar de una manera predecible”*.

Como características principales del estándar podemos mencionar:

- Considerar todas las fases relevantes del ciclo de vida de seguridad de los E/E/EPS y el software incluido en los mismos, como tales fases se puede mencionar, conceptualización inicial, implementación, operación y mantenimiento cuando estos sistemas son usados para realizar funciones de seguridad.
- Fue concebido pensando en el desarrollo acelerado de la tecnología por lo tanto es lo suficientemente robusto y comprehensivo para asimilar futuros desarrollos tecnológicos.
- Facilita el método para el desarrollo de los requerimientos de seguridad específicos para lograr la seguridad funcional de los E/E/EPS relacionados con seguridad.
- Hace uso de los Niveles de Seguridad Integral (SIL) para determinar el nivel de integridad de seguridad para la Función de Seguridad (SIF) que será implementada mediante los E/E/EPS relacionados con seguridad. Estos SIL's son determinados mediante métodos basados en el análisis de riesgos.
- Otorga valores numéricos predeterminados para caracterizar los SIL.
- Adopta una amplia variedad de técnicas, principios y métodos para lograr SEGURIDAD FUNCIONAL para E/E/EPS pero no se relaciona en ninguna circunstancia con el concepto de a PRUEBA DE FALLAS que puede ser de valor cuando los modos de falla son bien definidos y el nivel de complejidad del proceso es relativamente bajo. El concepto de A PRUEBA DE FALLAS es considerado inapropiado por la gran complejidad de los E/E/EPS relacionados con seguridad que están bajo tutela de este estándar.

#### **4.2.1 Objetivos del estándar IEC 61508**

- Cubrir los aspectos y características que tienen que ser considerados cuando los E/E/EPS son usados para conformar sistemas que realizan funciones de seguridad. Como consecuencia de este objetivo se debe facilitar el desarrollo e implementación de E/E/EPS en sectores industriales donde no exista estándares similares.
- Normalizar sistemas orientados a la seguridad cuando dichos sistemas incorporen E/E/EPS. Al ser un estándar general algunos requisitos pueden ser obviados, dichos requisitos son detallados en el mismo estándar. El factor HUMANO no es tomado en cuenta en este estándar.
- Usar el modelo basado en el ciclo de vida de la seguridad para lograr un acercamiento óptimo con las actividades necesarias para lograr seguridad funcional.
- Proveer los requerimientos generales para los E/E/EPS relacionados con seguridad en los sectores industriales donde todavía no existe un estándar definido.

## 4.2.2 Ciclo de vida de la seguridad

Es el proceso de ingeniería en el cual se incluyen todos los procedimientos para lograr seguridad funcional. Se debe tener en cuenta que, aunque el estándar ISA 84.01 tiene similares objetivos que el IEC 61508 el ciclo de vida de la seguridad descrito en el ISA 84.01 es diferente al de la figura siguiente, sin embargo estos convergen en sus funciones.

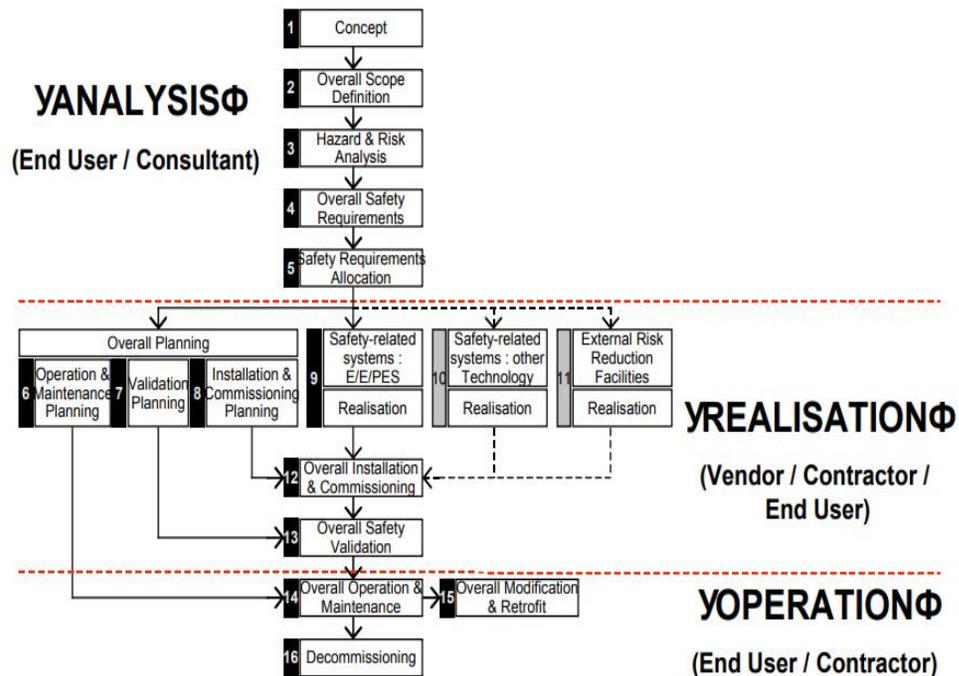


Figura nro. 28 - Ciclo de vida de la Seguridad – Fuente: EXIDA (2006). IEC 61508 Overview Report. [Figura]. Recuperado de [https://www.win.tue.nl/~mvdbrand/courses/sse/1213/iec61508\\_overview.pdf](https://www.win.tue.nl/~mvdbrand/courses/sse/1213/iec61508_overview.pdf).

La filosofía básica de este concepto consiste en desarrollar y documentar el plan arriba descrito, documentar su ejecución, continuar y ceñirse a dicho plan hasta el decomisionamiento, todas las fases del plan deben ser documentadas. Cambios en el plan durante la ejecución son permitidos y deben seguir el patrón mostrado en la figura anterior.

## 4.2.3 Niveles integrales de seguridad (SIL)

Son conceptualizados como la magnitud del nivel de reducción de riesgos. En el estándar IEC 61508 existen 4 niveles específicos. Siendo SIL 1 el nivel más bajo de reducción de riesgos y SIL 4 el más alto.

Safety Integrity Level	Probability of failure on demand, average (Low Demand mode of operation)	Risk Reduction Factor
SIL 4	$\geq 10^{-5}$ to $< 10^{-4}$	100000 to 10000
SIL 3	$\geq 10^{-4}$ to $< 10^{-3}$	10000 to 1000
SIL 2	$\geq 10^{-3}$ to $< 10^{-2}$	1000 to 100
SIL 1	$\geq 10^{-2}$ to $< 10^{-1}$	100 to 10

Figura nro. 29 – Niveles integrales de seguridad basados en demanda – Fuente: EXIDA (2006). IEC 61508 Overview Report. [Figura]. Recuperado de [https://www.win.tue.nl/~mvdbrand/courses/sse/1213/iec61508\\_overview.pdf](https://www.win.tue.nl/~mvdbrand/courses/sse/1213/iec61508_overview.pdf).

Safety Integrity Level	Probability of dangerous failure per hour (Continuous mode of operation)
SIL 4	$\geq 10^{-9}$ to $< 10^{-8}$
SIL 3	$\geq 10^{-8}$ to $< 10^{-7}$
SIL 2	$\geq 10^{-7}$ to $< 10^{-6}$
SIL 1	$\geq 10^{-6}$ to $< 10^{-5}$

Figura nro. 30 - Niveles integrales de seguridad, basados en continuidad – Fuente: EXIDA (2006). IEC 61508 Overview Report. [Figura]. Recuperado de [https://www.win.tue.nl/~mvdbrand/courses/sse/1213/iec61508\\_overview.pdf](https://www.win.tue.nl/~mvdbrand/courses/sse/1213/iec61508_overview.pdf).

Ambos cuadros son usados para describir el SIL de un sistema de seguridad instrumentado, aunque estos mismos son usados de manera diferente, estos usos se basan en la frecuencia de demanda de operación del SIS y la frecuencia de testeo integral del SIS. Siendo así que el primer cuadro se usa cuando la frecuencia de demanda del SIS es menor que el doble de la frecuencia de testeo del mismo y el último, y el segundo cuadro cuando la frecuencia de demanda es mayor que el doble de la frecuencia de testeo del SIS.

Todos estos conceptos conllevan a la siguiente premisa que será de gran utilidad para el desarrollo de este proyecto: La seguridad funcional es lograda mediante el desarrollo de un sistema instrumentado de seguridad (SIS) que llevara a cabo una o varias funciones instrumentadas de seguridad (SIF) con una confiabilidad establecida por el nivel de seguridad integral del sistema (SIL).

#### **4.2.4 Sistema de seguridad instrumentado**

Un sistema de seguridad instrumentado (de ahora en adelante llamado SIS por sus siglas en inglés) ejecuta lógicas de control programadas para mantener una planta en un estado seguro, o para llevarla a un estado seguro cuando una situación anormal se presente. Entre sus componentes más importantes podemos destacar.

- Un sensor que sigue el proceso para detectar una alteración o condición anormal.
- Un dispositivo lógico programable que recibe constantemente la información del sensor y determina si alguna condición es peligrosa, si esta condición peligrosa aparece ejecuta lógicas de control y envía señales a actuadores para efectuar una acción.
- El actuador de seguridad que recibe la señal del dispositivo lógico programable ejecuta la acción determinada.

#### **4.2.5 Función instrumentada de seguridad (SIF)**

Es una función de seguridad (de ahora en adelante llamada SIF por sus siglas en inglés) que será llevada a cabo mediante la implementación de un SIS. Su principal función será mantener en un estado seguro el proceso con respecto a un evento peligroso específico. El estado seguro será definido cualitativamente teniendo en cuenta la seguridad de las personas involucradas y de los equipos operados por las mismas. Los factores más influyentes en el correcto funcionamiento de un SIF pueden ser la calidad de los equipos usados para implementar la SIF, la redundancia de los equipos, los tiempos de respuesta (reparación y restablecimiento) y las distintas actividades relacionadas con el sistema en general que tienen que ver con el ciclo de vida de la seguridad como los testeos periódicos, mantenimientos, etc.

## 4.2.6 Partes de estándar

### *Parte 1*

Expone los requerimientos más importantes del estándar dando a conocer los conceptos más importantes del mismo tales como el concepto del Ciclo de Vida de la Seguridad. Esta sección es la más importante por cuanto detallas los requerimientos, documentación, etc. Para lograr conformidad de acuerdo al estándar.

### *Parte 2*

Expone los requerimientos del sistema de seguridad con respecto al HARDWARE.

### *Parte 3*

Expone los requerimientos del sistema de seguridad con respecto al SOFTWARE.

### *Parte 4*

Contiene las definiciones y abreviaciones más usadas en el estándar. Es muy útil durante el desarrollo de la documentación por facilitar conceptos que otra manera serían muy engorrosos buscar.

### *Parte 5*

Contiene ejemplos y guías de cómo elaborar y realizar los análisis de riesgos y la selección del SIL.

### *Parte 6*

Contiene guías de cómo llevar a cabo los procedimientos para cumplir con los requisitos descritos en las partes 2 y 3.

## *Parte 7*

Contiene información dirigida para los entes relacionados con el diseño y desarrollo de productos y equipamiento que quiera cumplir y certificarse con el estándar IEC 61508.

### **4.3 IEC 61511 – Seguridad funcional: Sistemas de seguridad instrumentados para el sector de la industria de procesos**

Es el estándar orientado a la seguridad desarrollada para la industria de procesos, que en conjunto con los estándares IEC 61513 (Industria nuclear) y el IEC 62061 (producción de maquinarias) fueron publicados para diferentes rubros industriales. Todos los estándares antes mencionados son una derivación del IEC 61508 dado que el mismo al ser de naturaleza general necesitaba de elaboraciones más específicas. El ISA 84.01 es un estándar americano considerado el reflejo del IEC 61511 ya que conllevan a los mismos objetivos y conclusiones.

Uno de los objetivos principales de este estándar es proveer de un marco de referencia para la elaboración de sistemas orientados a la seguridad para la industria de procesos de esta manera se asegura consistencia con normas relacionadas como la IEC 61508. Este estándar está específicamente dirigido para las personas, empresas e integradores que trabajen con funciones instrumentadas de seguridad SIF como por ejemplo las personas y/o empresas que se dediquen a labores de determinación de niveles integrales de seguridad SIL, empresas de procura y construcción, etc.

Otro objetivo principal del estándar es que todos los equipos y sistemas involucrados cumplan con el estándar IEC 61508 o que por defecto estén enfocados en cumplir las necesidades del ciclo de vida de la seguridad de tal manera que consigan o mantengan los requerimientos funcionales de seguridad.

El estándar, similar al IEC 61508, cuenta con 3 partes que son importantes para su comprensión:

## *Parte 1*

Contiene el marco referencia del estándar, definiciones importantes y los requerimientos de hardware y software.

## *Parte 2*

Contiene las guías de cómo aplicar los conceptos descritos en la parte 1.

## *Parte 3*

Contiene guías para la determinación de los requerimientos SIL.

El estándar como tal, está más orientado al análisis de resultados, estando su diseño supeditado al análisis de riesgos y a los requerimientos de reducción de riesgos derivados del mismo.

### **4.3.1 Requerimientos generales**

Los requerimientos generales, así como en el estándar IEC 61508, se definen en cada fase del Ciclo de Vida de la Seguridad y son específicamente detallados en el mismo estándar, para nuestro caso una visión general del Ciclo de Vida de la Seguridad es más que suficiente. El Ciclo de vida de la Seguridad en la IEC 61511 es el mismo que en el IEC 61508; sin embargo se debe destacar que el Ciclo de Vida de la Seguridad descrito en el IEC 61511 está elaborado con un enfoque orientado a la industria de procesos.

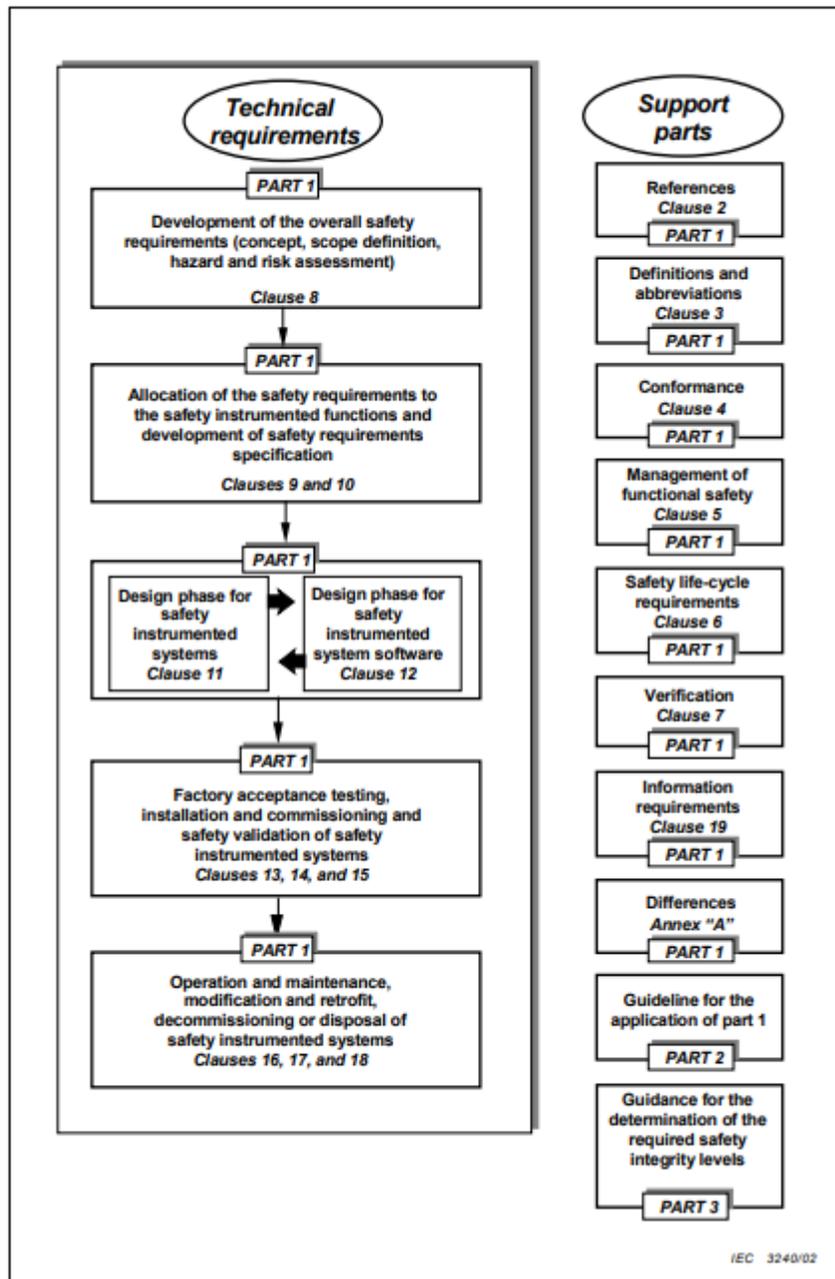


Figura nro. 31 - Requerimientos generales de IEC 615011 – Fuente: IEC 61511- 1 Funcional Safety - Safety instrumented Systems for the process industry sector (2003). [Figura]. Recuperado de: Archivos personales.

#### 4.4 ISA 84.00.01 (IEC 61511-1 Mod) – Seguridad Funcional: Sistemas instrumentados de seguridad para el sector de industria de procesos

Es el estándar americano orientado a la seguridad funcional, surgió debido a la actualización europea de la normal IEC 61511 orientada a la industria de procesos. En EEUU

el estándar de referencia para los SIS fue el ANSI/ISA 84.01 que fue publicado en 1996 sin embargo ISA, mediante reuniones y análisis de la nueva norma publicada por la IEC decidió apoyar la elaboración de normas específicas basadas en la IEC 61508. En septiembre del 2004 ISA adopto la norma IEC 61511 publicándola como ISA 84.00.01 (IEC 61511 Mod); esta norma es un “espejo” de la norma IEC 61511, con algunas modificaciones siendo la más importante la “Cláusula de Padrinaje” que define lo siguiente: Para los Sistemas de Seguridad Instrumentados diseñados e implementados de acuerdo a códigos, normas, estándares o practicas anteriores a la publicación del estándar, el dueño/operador debe determinar y documentar que el equipamiento fue diseñado, inspeccionado, mantenido, probado y operado de una manera segura. Esta definición dada en la cláusula de padrinaje es algo vaga sin embargo se debe rescatar que: si el proceso industrial ya cuenta con un SIS entonces el usuario u operador debe migrar las características del SIS conforme al estándar u en su defecto continuar operándolo de acuerdo al estándar vigente.

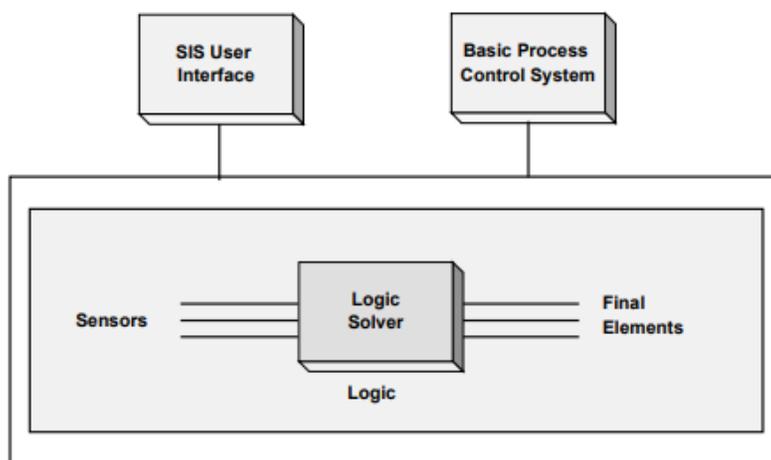


Figura nro. 32 – Definición grafica de un sistema de seguridad instrumentado. Fuente: ISA. TR 84.00.02-2002-Part 1. [Figura]. Recuperado de: Archivos personales.

#### 4.5 LEY 29783 – Ley de seguridad y salud en el trabajo

Esta ley fue promulgada por el ejecutivo el 20 de agosto del 2011. La premisa de la ley es: *“el empleador garantiza en el centro de trabajo, el establecimiento de los medios y condiciones que protejan la vida, la salud y el bienestar de los trabajadores, y de aquellos que, no teniendo*

*vínculo laboral, prestan servicios o se encuentran dentro del ámbito del centro de labores...*"  
Ley 29783. Diario Oficial El Peruano, Lima, Perú, 20 de agosto del 2011.

De esta ley se comprende que las políticas de salud y seguridad en el trabajo ya están comenzando a implementarse en el territorio peruano y no solo se usan en el sector industrial, esta ley está basada en la ISO 18001 y las ISO 45001 que dan detalles de cómo el trabajador goza de derechos que salvaguardan su vida e integridad. Esta ley no solo se delimita al trabajador sino también a las personas que rodean la actividad laboral directa e indirectamente y les otorga ciertas concesiones para de igual manera salvaguardar su integridad.

#### **4.6 Selección de equipos e instrumentos.**

Tal como se menciona en la figura Nro. 33, para el diseño y posterior implementación del SIS hace falta una selección de equipos e instrumentos. Sin embargo como hasta el momento no se realizó un estudio detallado de peligros y riesgos en el sistema, solo se hará mención genérica de los equipos e instrumentos necesarios para cumplir con la definición de un SIS como tal.

- Como equipo de procesamiento de datos: PLC de gama alta, con posibilidad de ejecución de lógicas de seguridad y certificación SIL.
- Como instrumentos de medición: transmisores de proceso con señal de salida adaptada como señal de proceso con lazo de 4-20 mA o transmisores de proceso con capacidad de comunicación mediante protocolos de comunicación industrial como Profibus DP o Hart. Dichos instrumentos de medición deberán contar con certificación SIL.
- Como actuadores de campo: equipos con la capacidad de manipular las variables de control. Como actuadores de campo podemos mencionar a: válvulas electrónicamente controladas, bombas, variadores, contactores, etc. Dichos equipos deberán contar con funcionalidad SIL.
- Como interfaz de usuario: el SIS a implementar deberá tener capacidad de integración a un sistema supervisor como un SCADA o un HMI. Lo que permitirá su manipulación y configuración por parte del usuario operador.

- Como sistema de control básico de procesos: el SIS tiene que contar con un sistema de control ya implementado. Para nuestro caso dicho sistema fue implementado en el capítulo anterior.

## **CAPÍTULO V: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE SEGURIDAD E INTEGRACIÓN AL DCS**

En este capítulo se implementó el SIS, esto se logró mediante las referencias y características de diseño brindadas por los estándares identificados en el capítulo 4. Por lo que se hizo un análisis de riesgos y peligros en los lazos de control más importantes identificados en el capítulo 3, estos análisis permitirán conocer si se necesitan funciones de seguridad instrumentadas en estos lazos. Existen análisis de riesgos de tipo cuantitativo y cualitativo por lo que para cada lazo se realizará un análisis diferente. Finalmente se diseñará e implementará las funciones de seguridad que luego serán validadas para comprobar si cumplen con los requerimientos de seguridad establecidos.

También se integrará el sistema de control (PLC Schneider) y el sistema de seguridad instrumentado al DCS PCS 7 presente en el Laboratorio de Automatización Industrial. La integración deberá ser completa, lo que quiere decir que desde el DCS se puedan monitorear todas las señales de proceso comprendidas en los dos sistemas mencionados además que se puedan ejecutar ciertas acciones de control desde el mismo.

Acorde al ciclo de vida de la seguridad de la IEC 61508 se tienen que cumplir con los siguientes requerimientos técnicos con la intención de implementar los SIF que conformarán el SIS. Estos requerimientos son los siguientes.

1. Desarrollo general de todos los requerimientos de seguridad en base a los lazos de control estudiados y los equipos involucrados con la intención de tener un entendimiento general del sistema. También se definen los límites de los equipos bajo control en donde el SIF será implementado con la intención de realizar el análisis de riesgos del sistema bajo estudio.
2. Asignación de los requerimientos de seguridad (SIL) a los nodos determinados en la fase anterior y determinar de manera genérica el equipamiento necesario para diseñar las funciones de seguridad.
3. Realización de las funciones de seguridad conformantes del sistema de seguridad instrumentado, mediante la instalación, comisionamiento y validación de los sistemas orientados a la seguridad determinados en el paso anterior.

4. Operación, mantenimiento, reparación, modificaciones y decomisionamiento final de los sistemas orientados a la seguridad.

Se tiene que mencionar que los requerimientos están resumidos debido a que el proyecto de tesis está basándose en el estándar y no sometiéndose totalmente a este. Esto debido a la complejidad que tendría seguir al pie de la letra los requerimientos del estándar. Sin embargo esto no resta la importancia en el diseño e implementación del SIS debido a que las fases más importantes están siendo tomadas en cuenta por el proyecto.

### **5.1 Fase 1: Requerimientos generales y análisis de riesgos del sistema de bombeo de agua**

Para la implementación del sistema de seguridad instrumentado se tienen que conocer el proceso y los equipos bajo control relacionados con este. Todo este equipamiento ya fue analizado en el capítulo 3 y 4 por lo que con el desarrollo y estudio de esos capítulos se tiene una idea muy específica del estado actual del sistema de bombeo de agua y de los equipos involucrados, sin embargo se tienen que hacer mención los lazos de control que se consideran importantes y que fueron analizados en el capítulo 4, es así que se nombra los lazos de control estudiados en este capítulo, obteniendo.

- Lazo de control de nivel en el reservorio B número 100.
- Lazo de control de presión en tubería de descarga de bomba P1 número 200.

En el capítulo 4 no se estudió el consumo de potencia de los equipos involucrados debido a que se considera que dicha característica no tiene un impacto cualitativamente fuerte en el proceso en sí, sin embargo para la implementación del SIS se tomará en cuenta esta característica con la intención de hacer el sistema más seguro por lo que también se asignara un nombre a este lazo.

- Lazo de supervisión de potencias consumida por el sistema número 300.

Se tiene que mencionar que este lazo está asignado como de “*Supervisión*” debido a que se pretende implementar la función de seguridad sobre una variable de supervisión de proceso que no cuenta con una variable de control correspondiente.

### 5.1.1 Análisis de riesgos y operatividad - HAZOP

- Área de estudio: es el sistema de bombeo de agua entre reservorios ubicado en el Laboratorio de Automatización Industrial de la Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica de la UNSAAC y comprende todos los equipos involucrados en su funcionamiento, la lista de equipamiento fue mencionada en la filosofía de control elaborada en el capítulo 3. Los 3 lazos de control y supervisión fueron definidos en el ítem anterior por lo que a partir de ahora solo se mencionara su número asignado.
- Nodos del sistema en los cuales se determinara el HAZOP: los nodos del sistema son los puntos claramente localizados en donde se realizara el HAZOP, para nuestro caso son:
  - Reservorio B – lazo de control de nivel 100.
  - Tubería de descarga de la bomba P1 – lazo de control de presión 200.
  - Punto de alimentación eléctrica del módulo DCS – PCS 7 – lazo de supervisión de potencia 300.

La elaboración del informe final que tiene forma de tabla de datos, tiene relativa facilidad debido a que los lazos de control no son numerosos y los equipos involucrados tampoco lo son. El proceso como tal se considera de tipo continuo porque una vez configurado y arrancado el traslado de agua entre reservorios no se detiene si es que no hay algún enclavamiento activo. Sin embargo antes de realizar el informe final se tiene que determinar las palabras guía, que serán usadas en conjunto con la variable de proceso para determinar las variaciones o desviaciones de estas variables, lo cual será el punto de arranque para la elaboración del informe final.

Tabla 9 - Descripción de las palabras claves usadas en la realización del HAZOP para este proyecto

Palabra Guía	Significado	Aplicación	Observaciones
No.	Ausencia de la variable con la cual esta conjugada	Flujo Presión Nivel	
Alta	Aumento cuantitativo de la variable con la cual se conjuga	Nivel Presión	
Baja	Disminución cualitativa de la variable con la cual se conjuga	Flujo	Muchas veces el efecto de este ítem se desprecia por su similitud a la palabra guía "No"
Anormal	Comportamiento no optimo o anormal de la variable con la cual se conjuga	Corriente	

Fuente: elaboración propia.

Una vez definidas las palabras clave se procede a la elaboración del informe final. Normalmente en esta etapa se pretende coleccionar y elaborar documentación que permita un resultado óptimo del HAZOP. Un ejemplo de esta documentación son los esquemas simplificados de los nudos de cada subsistema que para nuestro proyecto se asumen que están disponibles en el capítulo 3 donde se estudió el sistema de bombeo de agua.

Finalmente se elabora la tabla de recogida de datos mencionada anteriormente donde se analiza los eventos determinados y sus causas. En esta tabla también se menciona las medidas a tener en cuenta así como comentarios importantes acerca de cada evento.

Tabla 10 - Representación del análisis HAZOP realizado en el proceso de bombeo de agua entre reservorios

Nodo	Desviación	Causas	Consecuencias	Respuesta de control	Señalización	Acciones a tomar	Comentarios
100	Nivel alto	Falla de control automático  Operación Manual deficiente	Daño en los equipos cercanos.  Daño a las instalaciones y personal	PLC apagara bomba P1 y enciende sistema de desfogue	Alarma en HMI	Implementar SIS	Existe un sistema de protección lógico programable sin embargo se considera insuficiente
200	Presión alta	Falla en la válvula LV1	Ruptura de tubería con daño a equipos y personal  Daño de instrumentación cercana al nodo	Operario identifica presión alta y apaga lazo de control y bomba P1	Manómetro PI1	Implementar SIS	El sistema de protección actual es básico y podría fallar
300	Corriente anormal	Condiciones en los bombas P1 y P2 anormales	Daño de los equipos involucrados	Detención de todas las acciones por parte de variador. Seguridades del variador activadas	Display del variador que indica comportamiento anormal.	Mostrar los valores instantáneos en SCADA	No es necesario implementar otra capa de protección. (*)

Fuente: elaboración propia.

(\*): Acción debida a que el variador actual otorga las funciones de seguridad necesarias para evitar daños a equipos y personal, estos sumado al sistema de aterramiento presente y funcionando en las instalaciones del laboratorio.

## 5.2 Fase 2: Determinación del SIL de cada nodo

Para la determinación de las especificaciones SIL se usaron métodos cualitativos debido a la facilidad a la hora del desarrollo y la mejor manipulación de datos característicos al proceso. Los métodos cualitativos elegidos será el de grafico de riesgos y el matriz de seguridad por capas, estos métodos son explicados y desarrollados en los estándares IEC 61508 e IEC 61511 y son tomados en consideración debido a su amplio uso en la industria debido a su facilidad de aplicación.

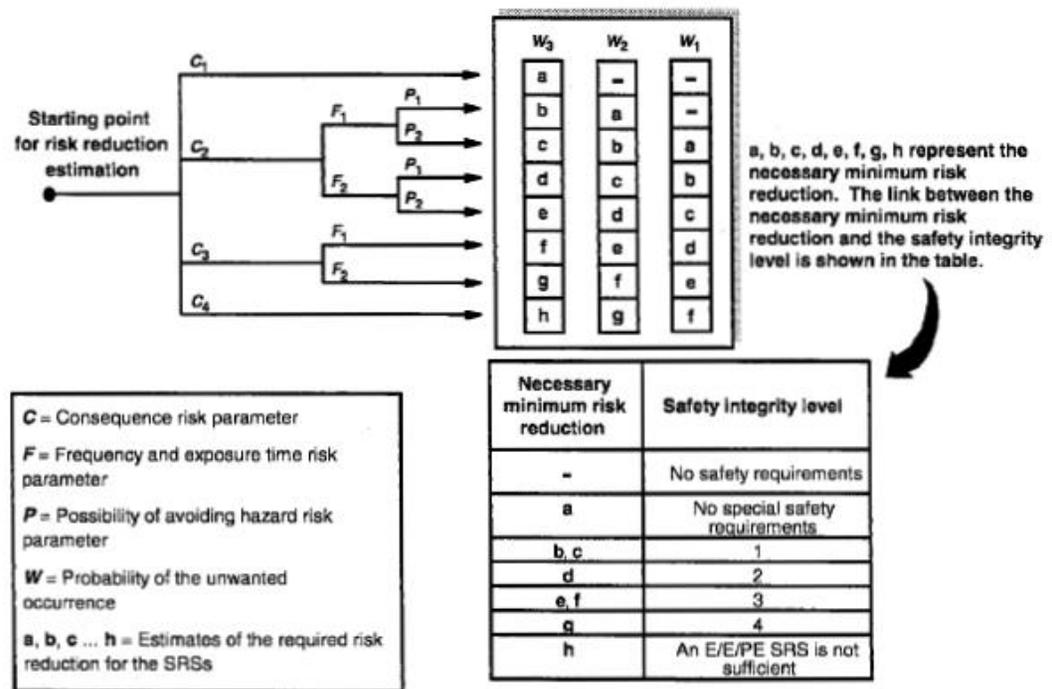


Figura nro. 33 – Representación gráfica del método cualitativo para la determinación del nivel integral de seguridad SIL. Fuente: IEC 61508 - 1998 - part 5 pag. 47.

En la figura nro. 34 se muestra el ejemplo de grafico de riesgos en el estándar IEC 61508, este grafico contiene variables a tomar en cuenta y que deben conocerse para desarrollar el método. Se tiene que mencionar también que este grafico de riesgos no está calibrado y es mostrado en sus parámetros generales. Para este proyecto de tesis se hará uso del grafico de riesgos sin calibrar para el nodo 1.

Tabla 11 - Representación del análisis cualitativo para la determinación del nivel integral de seguridad

Parámetro de Riesgo		Clasificación	Comentarios
Consecuencias (C)	1. C1 2. C2 3. C3 4. C4	1. Daños menores 2. Daños permanentes a una o más personas, muerte de una persona 3. Muerte de más de 1 persona 4. Muerte de Muchas personas	Esta clasificación fue desarrollada con respecto al daño que pueda causar en una o varias persona el evento peligroso. Otras clasificaciones pueden ser elaboradas según la necesidad del proceso.
Frecuencia de exposición a la zona peligrosa (F)	1. F1 2. F2	1. Exposición de personal rara a no muy frecuente a la zona peligrosa 2. Exposición de personal Frecuente a muy frecuente a la zona peligrosa	Ver comentarios mencionados en el ítem anterior
Posibilidad de evitar el evento peligroso (P)	1. P1 2. P2	1. Posible bajo ciertas circunstancias 2. Ocurrencia casi imposible	Para este parámetro se toman en cuenta características como: la experiencia de los operadores, la rapidez de desarrollo del evento peligroso, facilidad de reconocimiento del peligro por parte del operador, etc.
Probabilidad de ocurrencia del evento peligros (W)	1. W1 2. W2 3. W3	1. Muy poca probabilidad que la ocurrencia pueda pasar. 2. Poca probabilidad que la ocurrencia pueda pasar 3. Relativa alta probabilidad que la ocurrencia pueda pasar	El propósito del parámetro W es estimar la frecuencia del evento peligro sin tener en cuenta alguna función de seguridad.  Si es que no se tiene mucha experiencia con el proceso o con los equipos involucrados entonces el peor escenario debe ser tomado como posible (W3)

Fuente: elaboración propia.

El otro método semi-cualitativo denominado: Matriz de seguridad por capas será usado en el nodo dos, este método toma en cuenta las capas de protección disponibles en el nodo antes de determinar el SIL. Estas capas de protección (Protection Layers PL en inglés) deben caracterizarse por:

- Ser específicas: la capa de protección está diseñada para mitigar las consecuencias de un evento peligroso. Muchas causas pueden tener como consecuencia este evento peligroso, por lo que muchas causas pueden activar la capa de protección
- Ser independientes: una capa de protección es independiente de otras capas de protección, esto se puede comprobar asumiendo que una causa de falla en la capa de protección no hará que las demás capas de protección fallen.
- Ser confiables: se puede confiar en la capa de protección para mitigar las consecuencias del evento peligroso aun así tenga fallas durante su diseño.
- Ser auditable: la capa de protección está diseñada de tal manera que puede ser validada regularmente.

Además, para el uso de este método se tienen que establecer los niveles de riesgos tolerables, esto se logra mediante la implementación de matrices en forma de tablas, esto se logra tomando en cuenta las características del proceso y asignando en estas matrices las características cualitativas las consecuencias y frecuencias de los eventos peligrosos.

Tabla 12 - Análisis de la severidad e impacto de los daños ocasionados por los riesgos

Severidad	Impacto
Menor	Daño moderado al equipamiento involucrado sin embargo el proceso seguiría en funcionamiento. Pueden darse casos de daños moderados al personal involucrado.
Seria	Daño considerable a los equipos involucrados, el proceso podría sufrir averías que lo detengan por cortos periodos. Daños moderados al personal involucrado
Extensa	Daño catastrófico a los equipos involucrados, avería del proceso critica. El proceso debe ser detenido por un buen tiempo. Daños severos al personal, posibles muertes

Fuente: elaboración propia.

En la tabla anterior se describen la severidad de los riesgos que serán asignados en la matriz posteriormente. Esta tabla es una adaptación, según las características del proceso, de los criterios para asignar severidades mostradas en el estándar IEC 61511.

Tabla 13 - Análisis de eventualidad frente a los tipos de eventos peligrosos.

Eventualidad (aproximación cualitativa)	Tipos de eventos
Baja	Falla del manómetro de medición PI1, falla de la electroválvula LV4, errores humanos múltiples relacionados con la NO detección del peligro.
Media	Falla de la electroválvula LV1 y error humano con respecto al tiempo de respuesta frente al peligro
Alta	Falla de la electroválvula LV1

Fuente: elaboración propia.

Como último detalle se tiene que especificar las capas de protección disponibles, para nuestro caso se determina que existe una capa de protección implementada en el sistema de control cuyo funcionamiento se describió en el capítulo 3. Esta capa de protección consiste básicamente en una lazo de supervisión donde el operador está monitoreando constantemente el manómetro PI1 y si encuentra condiciones anormales mayores a 1 bar en este instrumento entonces habilita el enclavamiento de presión que apaga la P1 he inhabilita el lazo de control automático. No se cuentan con otras capas de protección para este nodo.

Number of PL's	SIL level required								
	3							c)	<u>1</u>
2	c)	c)	1	c)	1	2	1	2	b)
1	c)	1	2	1	2	3	b)	b)	a)
Hazardous event likelihood	L o w	M e d	H i g h	L o w	M e d	H i g h	L o w	M e d	H i g h
	Minor			Serious			Extensive		
Hazardous event severity rating									

Figura nro. 34 – representación gráfica del método de análisis por matrices de capas. Fuente: IEC 61508 1998.

- a) Determinación de SIL Nodo 1: Para la determinación del SIL correspondiente al nodo 1 se obtuvieron los resultados descritos en la siguiente tabla.

Tabla 14 - Determinación SIL mediante método cualitativo en el nodo 1.

Parámetro	Consecuencia	Frecuencia de exposición	Probabilidad de evitar evento peligroso	Probabilidad de ocurrencia de evento peligroso	Resultado
Elección	C2	F2	P1	W1	<b>SIL 1</b>
Comentario	El evento peligroso podría causar accidentes en personal por instalaciones y equipamiento mojado.	El personal involucrado está en los alrededores del proceso cuando este está en funcionamiento	Es posible que por descuido del personal o falla del BPCS el evento pueda ocurrir	Debido a las seguridades programadas en el PLC es muy poco probable que el evento negativo ocurra	

Fuente: elaboración propia.

Para la determinación SIL en el nodo 1 se usa el método cualitativo debido a su facilidad de aplicación y que generalmente es este método el que se utiliza en determinaciones SIL para otros casos más complejos, esto debido a su sencillez de aplicación y a que se puede CALIBRAR según la necesidad del proceso. La calibración solo es necesaria cuando el proceso como tal es muy complejo.

b) Determinación de SIL Nodo 2:

Tabla 15 - Determinación SIL mediante método semi-cualitativo en el nodo 2.

Parámetro	Severidad	Eventualidad	Número de capas de protección	Resultado
Elección	Menor	Media	1	<b>SIL 1</b>
Comentario	Por la experiencia en el uso del módulo se sabe que la electroválvula LV1 tiende a bloquearse con el tiempo.	La capa de protección puede mitigar las consecuencias de este riesgo, sin embargo al no contar con supervisión digital tiene más posibilidades de fallar	Se determinó este número en el ítem anterior	

Fuente: elaboración propia.

Para la determinación del SIL en el nodo 2 se usó el método semi-cualitativo debido a que es en este nodo donde se encuentra mayor severidad de riesgos, es decir, cualitativamente es más peligroso un exceso de presión en tuberías que un sobrellenado de agua en reservorios.

### 5.3 Fase 3: Realización de los SIF

Para la realización de los SIF se tiene que comenzar a pre-comisionar los equipos necesarios para la implementación. Del análisis HAZOP se determinó que existen dos nodos que necesitan SIF's por lo que es necesario proponer que equipos pueden cumplir las necesidades de medición de variables de proceso y ejecución de lógicas de seguridad. La tabla siguiente define que equipos pueden conformar los SIF.

Tabla 16 - Instrumentos de medición propuestos para la implementación del SIS.

Nodo	Instrumento de medición	Equipo específico	Comentario
100	Transmisor de nivel	FOXBORO IDP10	Existen modelos disponibles para conformar un SIS. Certificados con SIL 2
200	Transmisor de presión	FOXBORO IGP10	Existen modelos disponibles para conformar un SIS. Certificados con SIL 2

Fuente: elaboración propia.

Tabla 17 - Controladores propuestos para la implementación del SIS.

Nodo	Controlador Lógico	Equipo específico	Comentario
100	PLC de seguridad	SIEMENS S7-400 CPU 410H	Certificación TÜV, cumple con todos los requerimientos para alcanzar un SIL 3
200	PLC de seguridad	SIEMENS S7-400 CPU 410H	Certificación TÜV, cumple con todos los requerimientos para alcanzar un SIL 3

Fuente: elaboración propia.

Tabla 18 - Actuadores propuestos para la implementación del SIS.

Nodo	Actuador	Equipo específico	Comentario
100	Interruptor de seguridad	Allen-Bradley Bulletin 100S. Contactador de seguridad certificado	Contactares orientados a la seguridad
200	Variador con funciones de seguridad	SCHNEIDER ALTIVAR 320	Funciones de seguridad para requerimientos hasta SIL 2

Fuente: elaboración propia.

Según los resultados obtenidos del HAZOP, ambos nodos necesitan de un SIF que cuente con SIL 1 por lo que se tendrá que determinar el equipamiento que conforme estos SIF's. En la tabla siguiente se hará mención genérica de los equipos elegidos y de la función dentro del SIF.

Nodo 1:

Tabla 19 - Lista de precomisionamiento de equipos destinados a la función de seguridad SIF 1 lazo 400.

	Sensor	Controlador Lógico	Actuador
Equipo específico	Transmisor de Nivel	PLC	Relé + Contactor
Modelo	SIEMENS SITRANS LH100 Level Transmitter	S7 400 CPU 410 5H	OMRON MK 2PI + SCHNEIDER LC1E09
Comentarios	Censará el nivel en el reservorio B y enviara datos al PLC	Ejecutará las lógicas de seguridad para mitigar las consecuencias de los peligros respectivos	Desenergizará la bomba de alimentación de líquido al reservorio B

Fuente: elaboración propia.

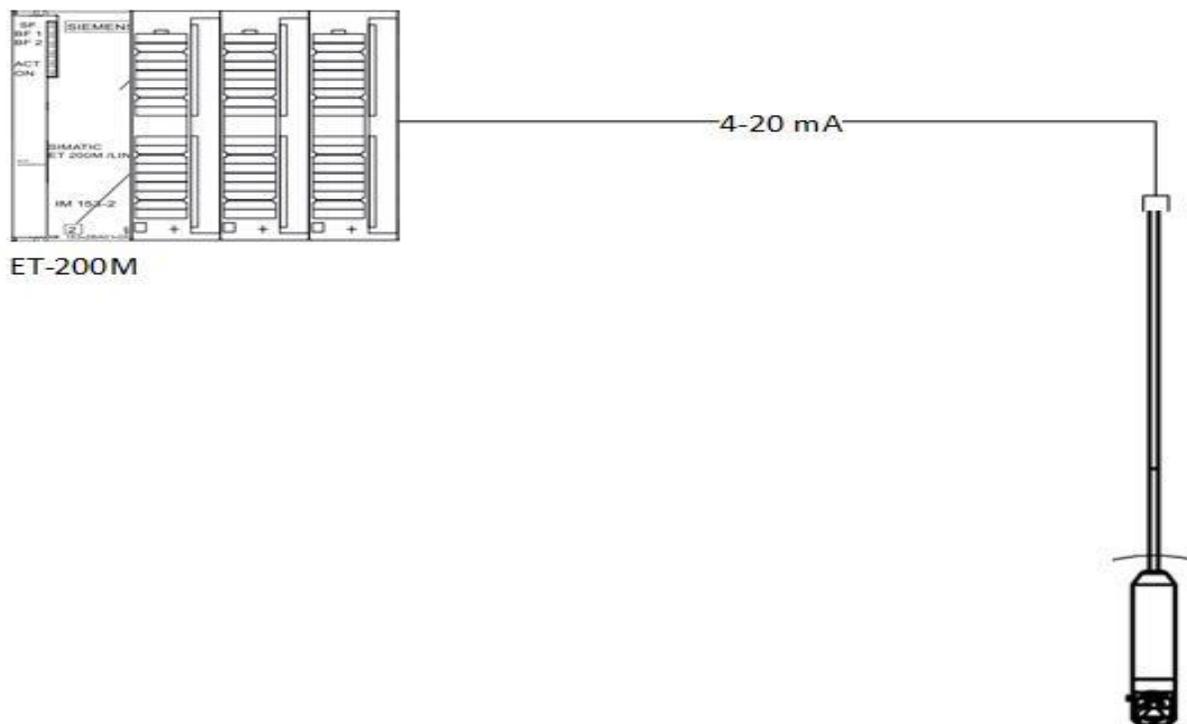


Figura nro. 35 - Diagrama de conexión del transmisor de nivel LH100 - LT-02

Nodo 2:

Tabla 20 - Lista de precomisionamiento de equipos destinados a la función de seguridad SIF 2 lazo 500.

	Sensor	Controlador Lógico	Actuador
Equipo	Transmisor de Presión	PLC	Variador de velocidad
Modelo	NCS-PT105 II Profibus Transmitter	S7 400 CPU 410 5H	SCHNEIDER ALTIVAR 320
Comentarios	Censará la presión en la línea de descarga y enviara datos al PLC	Ejecutará las lógicas de seguridad para mitigar las consecuencias de los peligros respectivos	Ejecutará un paro rápido en la bomba

Fuente: elaboración propia.

Se ve en las tablas anteriores los dispositivos necesarios para implementar el SIF, estos equipos fueron seleccionados por su disponibilidad en el laboratorio y debido a que son de uso industrial por lo cual si pueden trabajar en funciones orientadas a la seguridad, se tiene que recordar que estos equipos no están certificados según las normas de IEC 61508 sin embargo esto no quiere decir que no puedan cumplir funciones de seguridad, esto se validara cuando se analice el SIF y se compruebe si cumple con el requerimiento SIL que se determinó anteriormente.

Es así que se propone los SIF descritos en la siguiente figura:

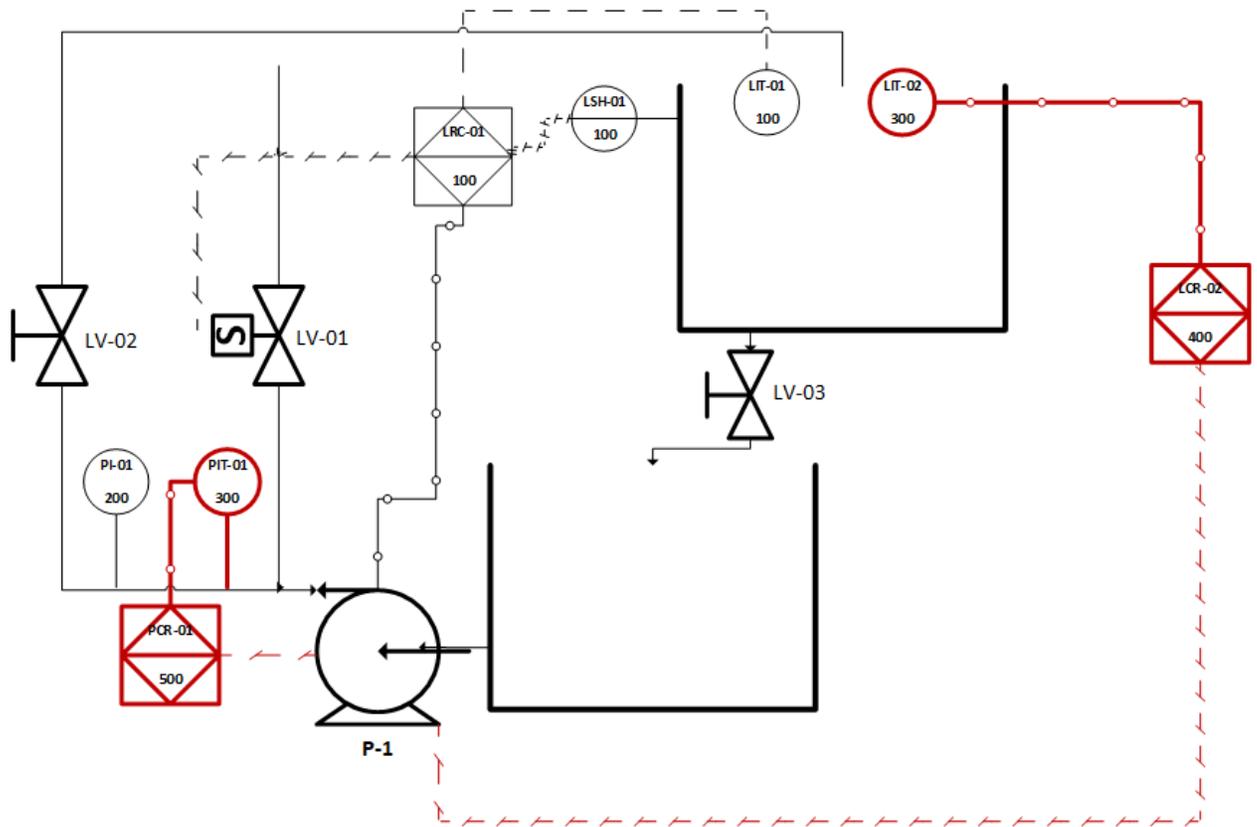


Figura nro. 36 - P&ID incluyendo las funciones de seguridad implementadas (trazadas de rojo). Fuente: propia.

Los instrumentos conformantes de los SIF están coloreados de rojo oscuro además que se establecen dos lazos de control más, el lazo 400 correspondiente al lazo de control de seguridad de nivel y el lazo 500 correspondiente al lazo de control de seguridad de presión.

Cabe destacar que los actuadores para estos lazos no son visibles en el P&ID (diagrama de instrumentación y tuberías) sin embargo están implícitos en los lazos.

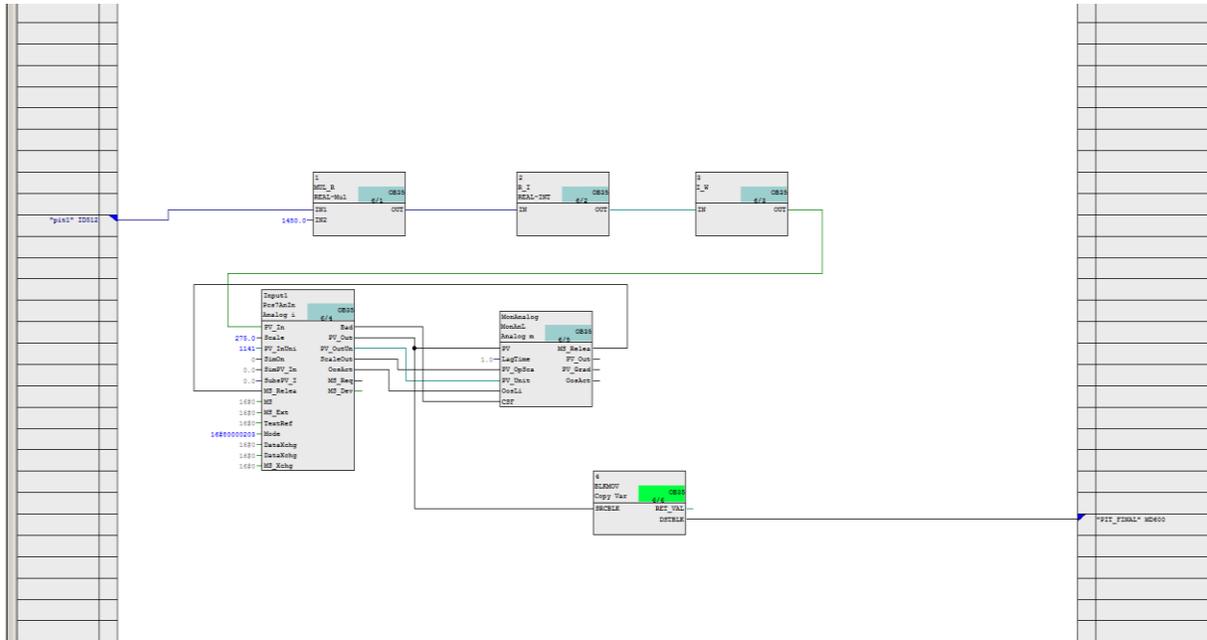


Figura nro. 37 - Lógica de adquisición de datos desde los instrumentos de seguridad implementada en el CFC Editor del SIMATIC MANAGER. Fuente: propia

### 5.3.1 Lógicas de control de los SIF

Las lógicas de control de los lazos 400 y 500 son explicadas a continuación.

- Lógica de control de seguridad del lazo 400: Consiste en el desenergizado de la bomba P1 cuando se detecten niveles de líquido en el reservorio B superiores a 0.48 m, este nivel es elegido debido a que se cuenta con un enclavamiento relacionado con el exceso de líquido en el reservorio B cuyo valor de enclavamiento es 0.45 m. Este sistema debe reaccionar primero al peligro de sobrellenado, sin embargo si falla es entonces que el SIF toma control para mitigar las consecuencias del peligro. El transmisor LT-02 detecta el nivel de 0.48 m entonces se ejecuta la lógica programada en el PLC que consiste en desenergizar el contactor que conecta las borneras de la bomba P-1 y el variador, de tal manera que el motor de la bomba se apaga inmediatamente y se mantiene así hasta que el nivel vuelva a niveles aceptables (menores a 0.45 m). Una vez que se normaliza el nivel el operador debe dar conocimiento del evento peligroso en el PLC de seguridad

y el contactor volverá a activarse permitiendo al variador tomar el control una vez más sobre la bomba P-1 y continuar con el proceso. Se debe mencionar que esto causara el variador una alarma debido a la desconexión repentina con el motor de la bomba por lo que el variador también deberá ser reiniciado para continuar con el proceso.

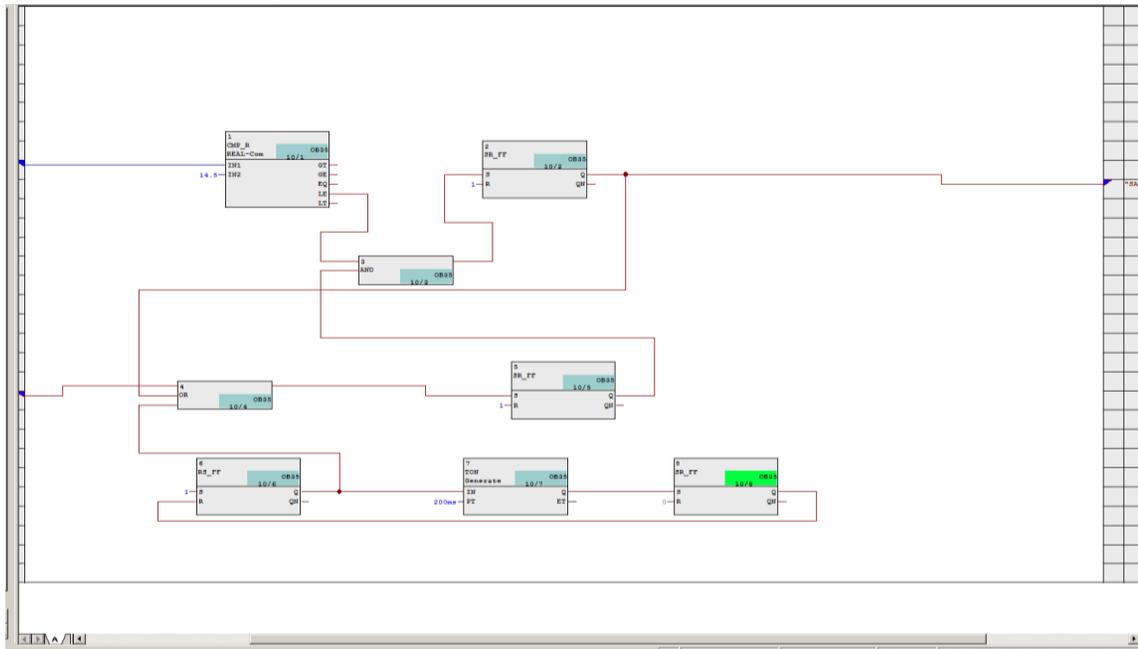


Figura nro. 38 - Lógica de enclavamiento de seguridad del nodo 1 implementada en el CFC Editor. Fuente: propia.

- Lógica de control de seguridad del lazo 500: Esta lógica consiste en el desenergizado rápido pero no repentino del motor de la bomba P-1 cuando se detecten valores de presión peligrosos en la tubería de descarga de la bomba P-1, Se hará uso de la función FAST STOP del variador, esta función se habilitará mediante una entrada digital disponible en el variador, cuando el estado de esta entrada pase de 1 lógico a 0 lógico entonces la función FAST STOP detendrá la bomba y se mantendrá en este estado no permitiendo arrancarla hasta que se mitigue las consecuencias del evento peligroso. El transmisor de presión PIT-01 estará censando constantemente la presión de descarga de la bomba P-1, si la presión supera los 14.5 psi entonces el PLC de seguridad pasara de 1 lógico a 0 lógico la entrada digital del variador correspondiente a la función FAST STOP lo que ocasionara que la bomba P-1 se apague rápidamente. Este valor (14.5 psi o 1 bar) es definido así debido a que si la presión en la tubería supera los 20.6 psi en la



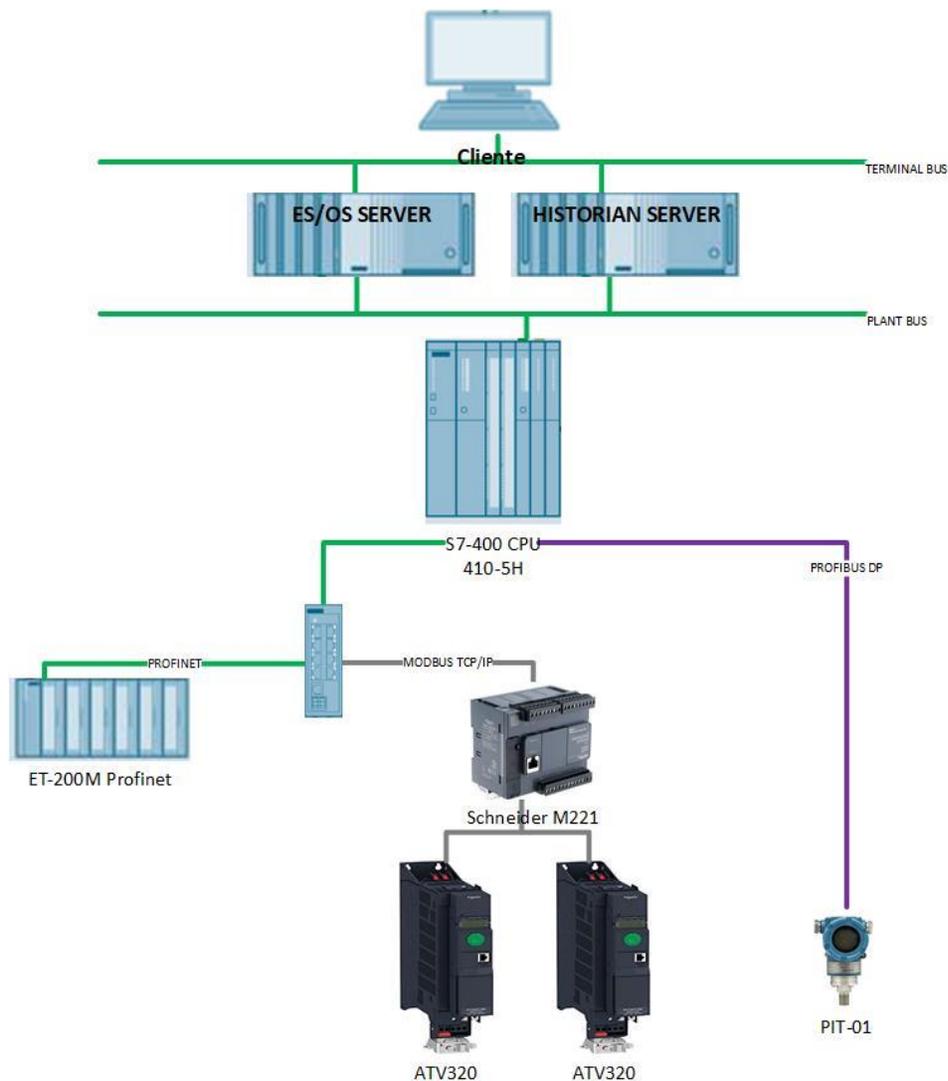


Figura nro. 40 - Diagrama de redes del sistema en general. Fuente: propia.

Se aprecia en la figura anterior una arquitectura de red de este proyecto, solo se incluyeron los protocolos más importantes para este sistema como lo son PROFINET y Modbus. Los estándares definidos como son señales eléctricas de 24 V o lazos de corriente de 4-20 mA no fueron incluidos por que se consideran señales de campo y aunque son estándares industriales la intención de la figura es representar los protocolos de comunicación que están ubicados en el nivel de control y de supervisión del sistema.

## 5.6 Direcciones de los equipos involucrados

En este apartado se describirán las direcciones que identifican a cada equipo según el protocolo de comunicación que manejen. La tabla siguiente muestra una descripción específica para este propósito.

Tabla 21 - Descripción de las direcciones IP configuradas en los equipos que usan este protocolo.

EQUIPO	DIRECCION IP	COMENTARIO
ES/OS SERVER	CP1623: 192.168.10.7 Intel 210: 192.168.10.102	La estación de ingeniería/operación cuenta con do tarjetas de red la primera para el bus de planta y la segunda para el bus de terminales
HISTORIAN SERVER	192.168.10.3	
SIEMENS S7-400 CPU 410 5H	Plant bus: 192.168.11.10 Field bus: 192.168.10.10	La primera dirección es usada para la comunicación con equipos de campo y la segunda con los servidores y terminales
SCHNEIDER M221	192.168.11.12	
ET200M Profinet	192.168.11.14	
HMI	192.168.11.9	

Fuente: elaboración propia.

Con respecto a los equipos que usan Modbus RTU y PROFIBUS sus direcciones de bus están descritas en la tabla siguiente, se tiene que mencionar que todos estos equipos están en funcionalidad de esclavo, su respectivo maestro es mencionado en la columna "comentario".

Tabla 22 - Direccionamiento de los dispositivos que no usan IP.

EQUIPO	Protocolo/Dirección	Comentario
NCS105PTII Pressure Transmitter – MicroCyber	Profibus/3	El Maestro de este dispositivo es el PLC S7-400
Variador ATV 320 Nro. 1	Modbus RTU/10	El maestro de este dispositivo es el PLC M221
Variador ATV 320 Nro. 2	Modbus RTU/11	El maestro de este dispositivo es el PLC M221

Fuente: elaboración propia.

### 5.7 Herramientas integradas al PCS 7 y SoMachine

Para la integración de las variables al DCS se usó las herramientas integradas a los softwares para la programación de los PLC de cada marca (SCHNEIDER y SIEMENS) para el caso del PLC S7-400 se dio uso a una herramienta integrada al PCS 7 llamada MODBUS COMMISSIONING WIZARD y para el caso del M221 se usó la herramienta incluida en el software SoMachine Basic que consiste en activar la funcionalidad MODBUS en el dispositivo.

Según el manual de funcionamiento el PLC M221 solo puede funcionar en modo servidor cuando la funcionalidad Modbus sea activada, lo que quiere decir es que si se requiriesen extraer datos de este dispositivo configurado como cliente, se tendría que realizar la solicitud de lectura o escritura de registros y el dispositivo servidor tendrá que acceder a la solicitud y realizar la acción solicitada.

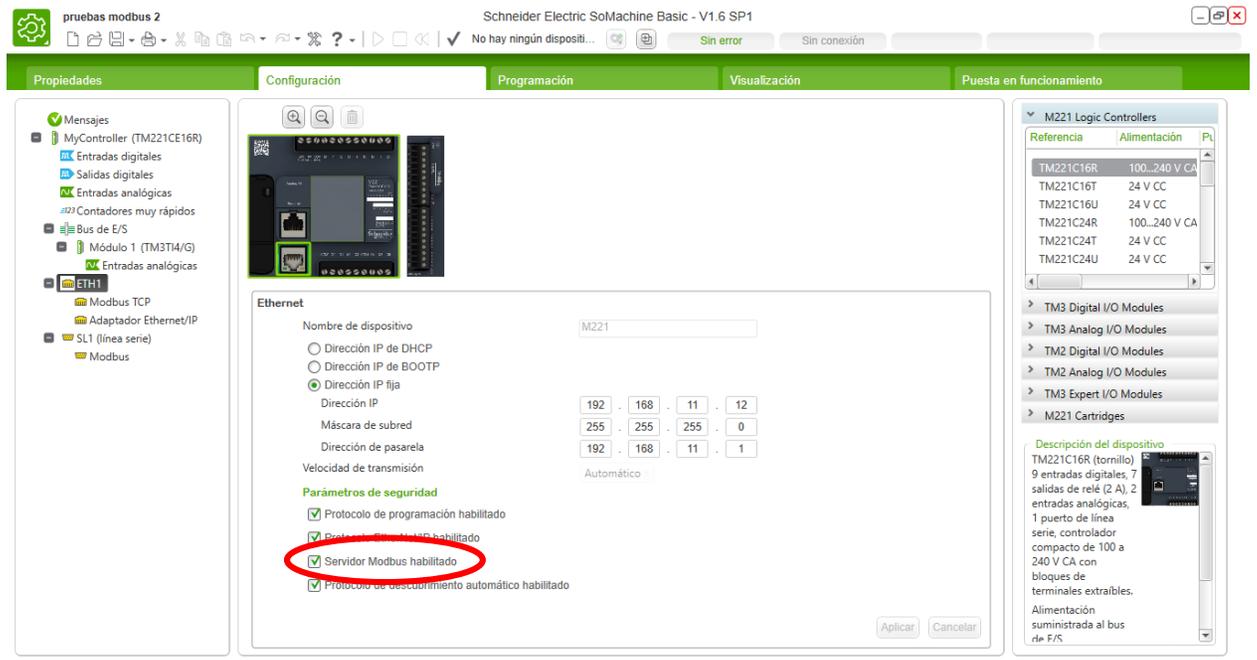


Figura nro. 41 - Configuración en el software SoMachine para la habilitación de funcionalidad Modbus server en el PLC M221. Fuente: propia.

Como se aprecia en la figura anterior, la facilidad de activar la funcionalidad Modbus TCP/IP se manifiesta en la activación de la misma en la pestaña de configuración de dispositivo en el software SoMachine. De esta manera la funcionalidad Modbus TCP/IP tipo SERVER está disponible una vez que se descargue esta configuración en el dispositivo M221.

Para integrar los datos necesarios en el DCS se configuro el PLC S7-400 para que actué como CLIENTE de tal manera que este dispositivo solicite la data de variables al M221 y publique los datos recolectados en el SCADA del DCS, para configurar esta opción en el S7-400 se usó la herramienta Modbus WIZARD 2.2, cuya función es comisionar el PLC y configurar los puertos y direcciones de tal manera que los datos recolectados estén disponibles en los registros del PLC.

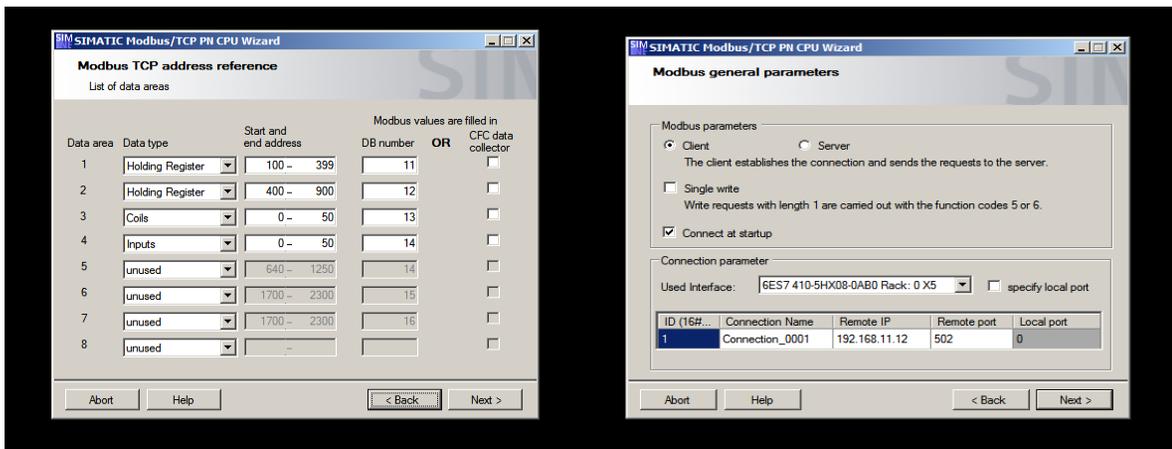


Figura nro. 42 - Asistente para la configuración de la funcionalidad Modbus Client para el PLC Siemens S7-400. Fuente: propia.

En la configuración realizada en el Modbus WIZARD se eligió las siguientes opciones:

- Como tipo de bloque Modbus se eligió Modbus/TCP PN CPU lo que quiere decir que el dispositivo comunicador será el CPU del PLC, se puede elegir las tarjetas de comunicación del mismo.
- Se crean los nombres de las conexiones y se muestra la ubicación del proyecto y de los bloques de programa. Para nuestro caso el nombre de la conexión es "aa".
- En la siguiente interfaz se elige la modalidad del PLC que en este caso será CLIENTE, además de las direcciones del mismo (descritas en la tabla anterior) y los puertos a usar por parte del PLC que en nuestro caso será 5002.
- Finalmente se eligen los registros Modbus, en nuestro caso habrá dos Data Blocks de registros para datos de tipo palabra. Un data block para las salidas digitales y otro para las entradas digitales. Las direcciones de lectura y/o escritura se describen en la figura anterior.

Con esta configuración, los bloques Modbus fueron creados en el dispositivo, estos bloques solo son de almacenamiento de datos, posteriormente se tiene que crear las lógicas de recolección de datos, esto se logró haciendo uso de las plantillas Modbus disponibles en las librerías de sistema. Se hizo uso de dos bloques de comunicación Modbus (uno para registros tipo palabra y otro para datos booleanos).

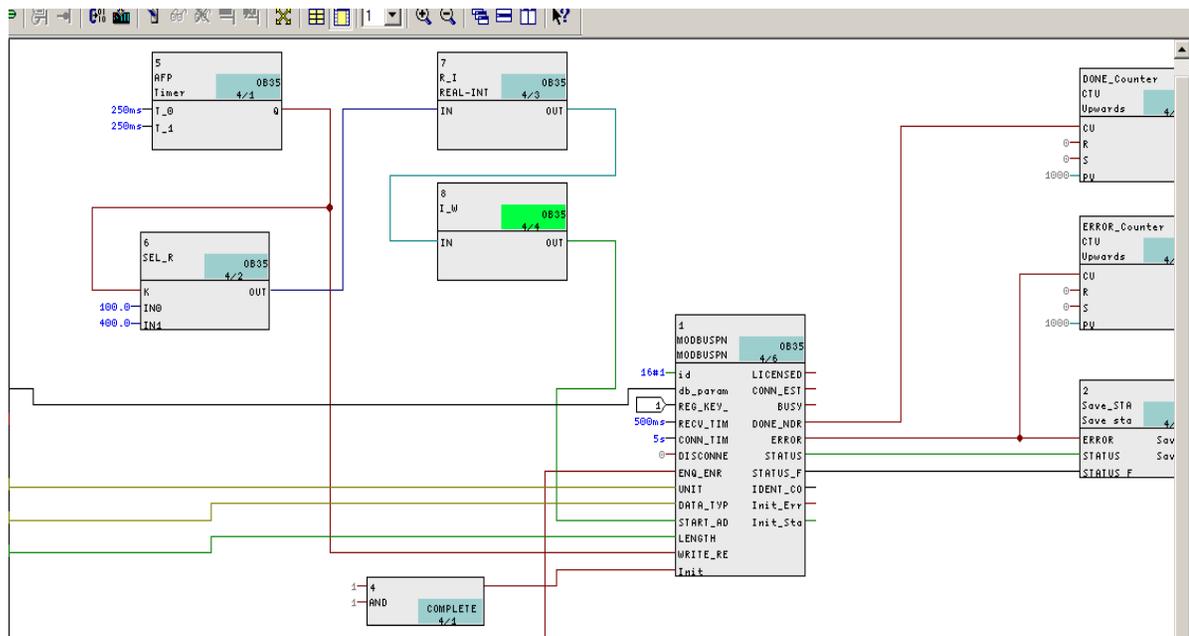


Figura nro. 43 - Lógica de control de la comunicación MODBUS Client implementada en el CFC Editor del Siemens SImatic Manager. Fuente: propia.

En la figura anterior se describe la lógica de recolección de datos del servidor Modbus, tal lógica consiste en lo siguiente:

- Se habilitan el funcionamiento del bloque para la ejecución de la función determinada (lectura o escritura) durante 250ms un pulso de activación habilita el bloque principal en modo lectura de datos los cuales se copian en el DB 12; estos datos son recolectados del servidor desde la dirección tipo palabra número 400. Durante los siguientes 250 ms el bit de lectura/escritura cambia y se activa una vez más el bloque Modbus y se escriben los datos almacenados en el DB 11 en los registros tipo palabra que comiencen con la dirección 100 en el dispositivo servidor. De estos tiempos se obtiene que el ciclo completo de escritura y lectura es de 500 ms. Este tiempo se considera óptimo para la presente aplicación, sin embargo si es que se requiriese disminuir el tiempo de intercambio de datos, se tendría que modificar el tiempo de ciclo del bloque de objetos número 35 donde todas estas lógicas están funcionando.
- Para los datos de tipo BOOL se repite la misma lógica de lectura y escritura de registros.
- Todas las lógicas están funcionando en el bloque OB35 con ciclo de ejecución de 100ms y fueron programadas usando el compilador CFC editor.

## 5.8 Variables a integrar al DCS

Con respecto a las variables que se recolectan desde el M221, la siguiente tabla describe estas mismas y sus características más importantes.

Tabla 23 - Direccionamiento Modbus TCP/IP.

NOMBRE	SIMBOLO	M221	S7-400
Temperatura Reservorio B	TT-01	%MW400	DB12 DBW0
Nivel Reservorio B	LT-01	%MW401	DB12 DBW2
Velocidad P1	ATV_REF1	%MW402	DB12 DBW4
Velocidad P2	ATV_REF2	%MW403	DB12 DBW6
STATUS_LV1	LV-01	%MW404	DB12 DBW8
STATUS_LV4	LV-04	%MW405	DB12 DBW10
STATUS_P1	P1	%MW406	DB12 DBW12
STATUS_P2	P2	%MW407	DB12 DBW14
STATUS_ATV1	STATUS_1	%MW408	DB12 DBW16
OUT_FREQ_ATV1	FREQ_P1	%MW409	DB12 DBW18
FREQ_AFTER_RAMP	AFT_RAMP1	%MW410	DB12 DBW20
MOTOR CURRENT 1	I_P1	%MW411	DB12 DBW22
MOTOR TORQUE 1	T_P1	%MW412	DB12 DBW24
PALABRA DE ESTATUS EXTEND.	STATUS_EXT_1	%MW413	DB12 DBW26
VOLTAJE DE ALIMENTACION ATV1	MAINS_ATV1	%MW414	DB12 DBW28
VOLTAJE MOTOR 1	VOLT_P1	%MW415	DB12 DBW30
DRIVE THERMAL STATE	THERM_DRIVE_1	%MW416	DB12 DBW32
POTENCIA ENTREGADA AL MOTOR	POWER_P1	%MW418	DB12 DBW36
CONSUMO DE ENERGIA	ENERGY_P1	%MW419	DB12 DBW38
TIEMPO DE OPERACIÓN DEL MOTOR	OPER_TIME_1	%MW420	DB12 DBW40
TIEMPO DE OPERACIÓN DEL DRIVE	OPER_TME_ATV1	%MW422	DB12 DBW44

Fuente: elaboración propia.

En la tabla anterior se muestran las variables recolectadas desde el PLC M221 al PLC principal S7-400, estas variables solo tienen atributo de lectura, lo que quiere decir que el PLC S7-400 solo puede monitorear dichas variables pero no puede modificar las mismas. Esto debido a que el control del proceso como tal se realiza desde el PLC 221. En la siguiente tabla se implementó las variables que pueden modificarse desde la estación de operación del DCS, estas variables solo serán usadas para la operación manual desde la estación de operación del DCS.

Tabla 24 – Direccionamiento Modbus TCP/IP.

NOMBRE	SIMBOLO	M221	S7-400
Velocidad P1	ATV_REF1	%MW100	DB11 DBW0
Velocidad P2	ATV_REF2	%MW101	DB11 DBW2
STATUS_LV1	LV-01	%MW102	DB11 DBW4
STATUS_LV4	LV-04	%MW103	DB11 DBW6
STATUS_P1	P1	%MW104	DB11 DBW8
STATUS_P2	P2	%MW105	DB11 DBW10

Fuente: elaboración propia.

Con el uso de estas variables solo de escritura se podrá implementar un control manual desde la estación de operación del DCS. Se tiene que saber que los comandos efectuados por el M221 tendrán más jerarquía que los efectuados por el S7-400.

## 5.9 Supervisión del proceso

Con respecto a la supervisión del proceso, esta fue implementada usando el software WINCC 7.3 que se configura desde la plataforma del SIMATIC MANAGER y se desarrolla desde el mismo WINCC. Para nuestro caso el desarrollo del aplicativo de supervisión consistirá en tres pantallas, la primera una pantalla general que describirá el sistema en general. Dicha pantalla se muestra a continuación.

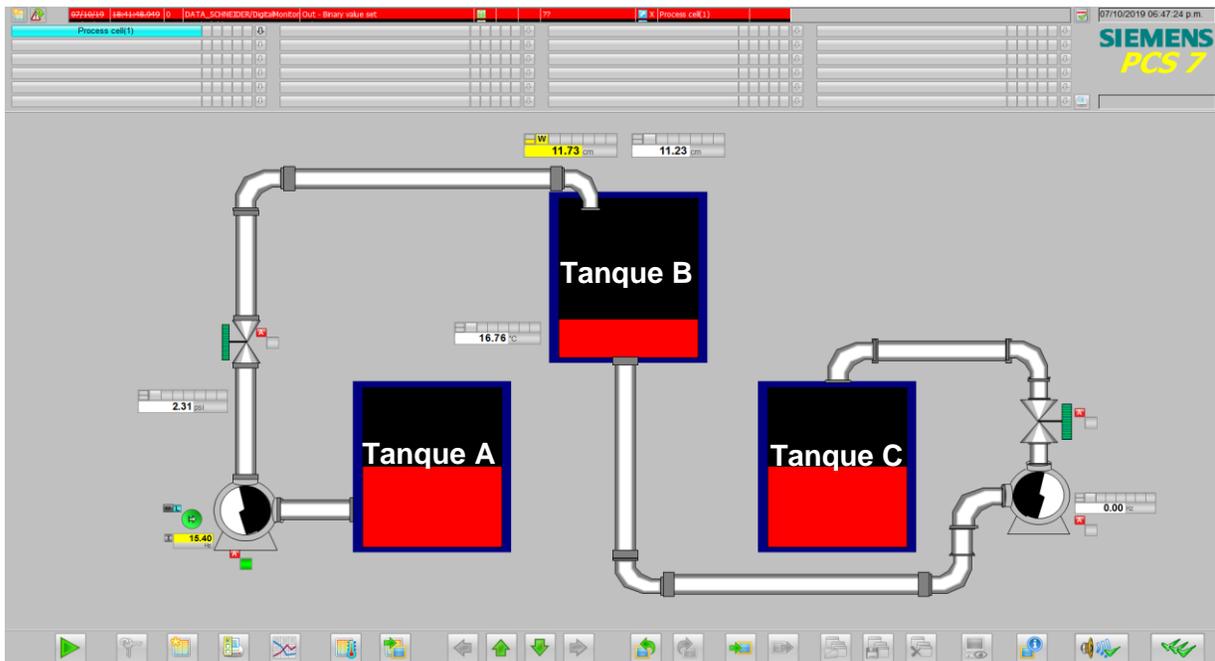


Figura nro. 44 - Pantalla SCADA de supervisión del proceso de bombeo de agua entre reservorios. Fuente: propia.

Otra pantalla será usada para la supervisión más específica del proceso. Esta supervisión se centrará en el reservorio B. Los datos de nivel y de presión que están orientados a la seguridad serán más visibles en esta página aunque tendrán las mismas prerrogativas que en la pantalla anterior. Cabe descartar que cada dato disponible en cada pantalla cuenta con un faceplate que se activa cuando se hace click en el dato. En este faceplate se puede efectuar operaciones básicas y avanzadas como:

- Elegir entre los diferentes métodos de control: automático, manual y local.
- Verificar el funcionamiento del sistema mediante la visualización de tendencias de funcionamiento que se pueden descargar en formatos como “.xls”.
- Verificar los estados de alarma y/o error según sea el caso, y efectuar operaciones de acuse.

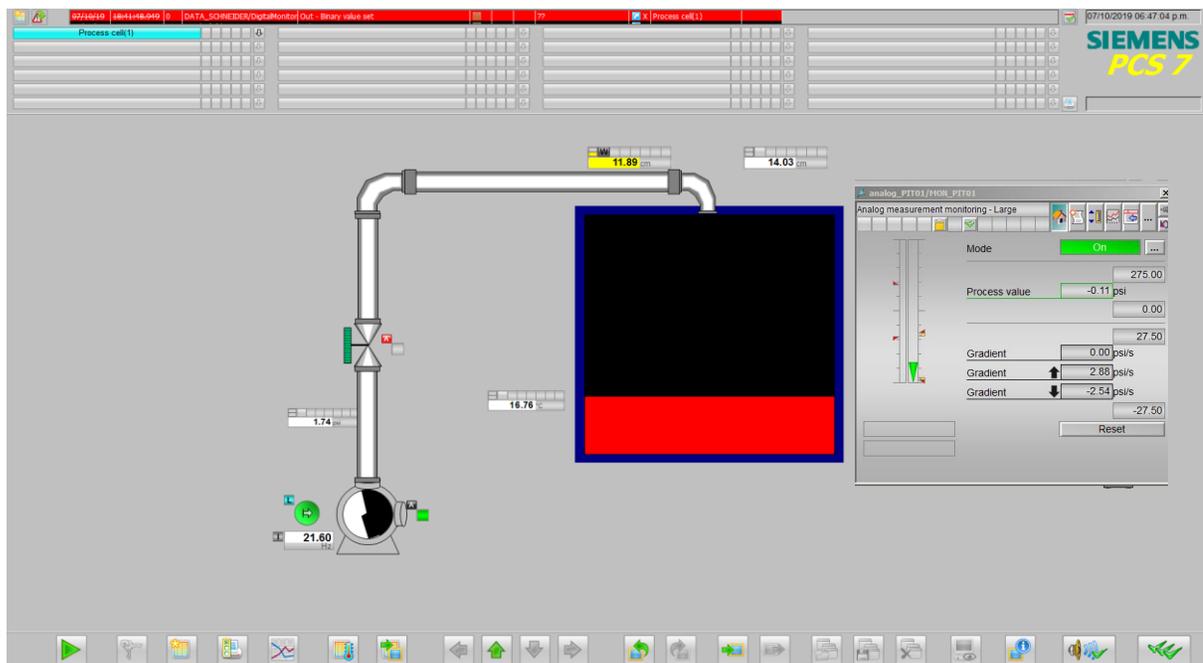


Figura nro. 45 - Pantalla de supervisión de datos de proceso específica al Reservorio B. Fuente: propia.

Finalmente la última pantalla será de supervisión de los datos de potencia desde el variador que controla la bomba P-1. Dichos datos son actualizados cada segundo y pueden ser verificados y monitoreados en todo momento mediante el uso de un faceplate.

### 5.10 Almacenamiento de datos e históricos

El sistema de DCS PCS 7 cuenta con un sistema de almacenamiento masivo de datos, que posteriormente se puede visualizar y manipular para el uso que se crea conveniente. El sistema que almacena los datos se llama PROCESS HISTORIAN, que es un paquete de software que se instala en un servidor alternativo a la estación de operación/ingeniería. En este mismo servidor está instalado el INFORMATION SERVER que es un software que manipula y presenta los datos almacenados en el Process Historian. En la siguiente figura se muestra la consola del Process Historian y se verifica que el software está conectado con un servidor externo y está recibiendo datos de este. Para el presente proyecto se eligieron en total 23 variables correspondientes al proceso. Estas variables fueron configuradas desde el SIMATIC MANAGER.

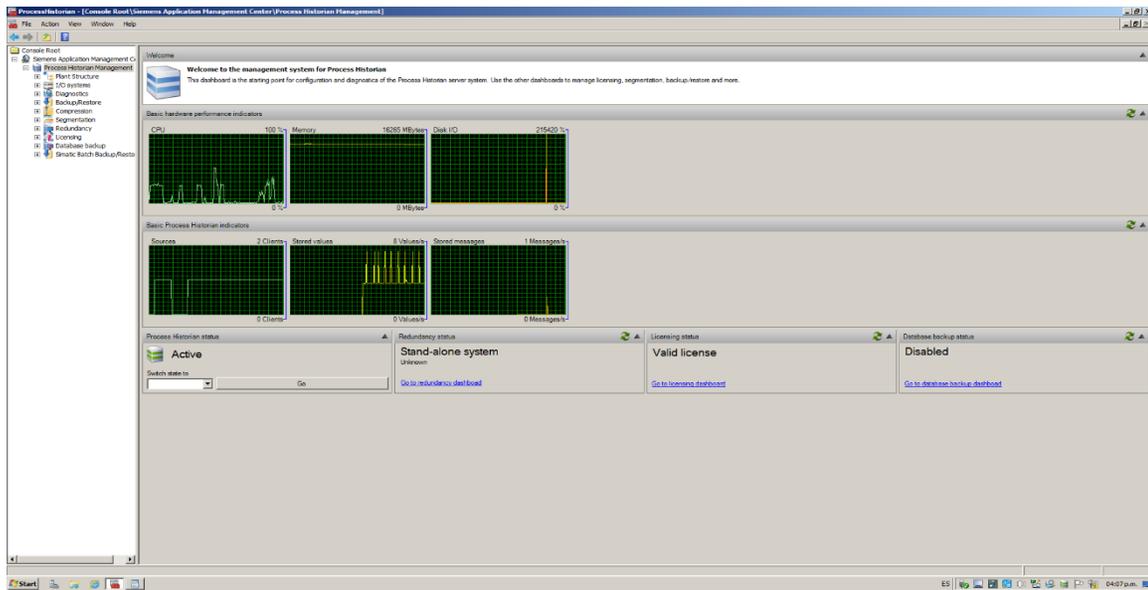


Figura nro. 46 - Consola de control del HISTORIAN SERVER. Fuente: propia.

Se tiene que mencionar que el software de HISTORIAN solo almacena datos si el aplicativo de WINCC está ejecutándose, debido a que desde aquí los datos son almacenados en el servidor de históricos y no desde el PLC S7-400. Por otro lado, el INFORMATION SERVER sirve para acceder a los datos almacenados en el PROCESS HISTORIAN y disponer de estos para su visualización y tratamiento posterior.

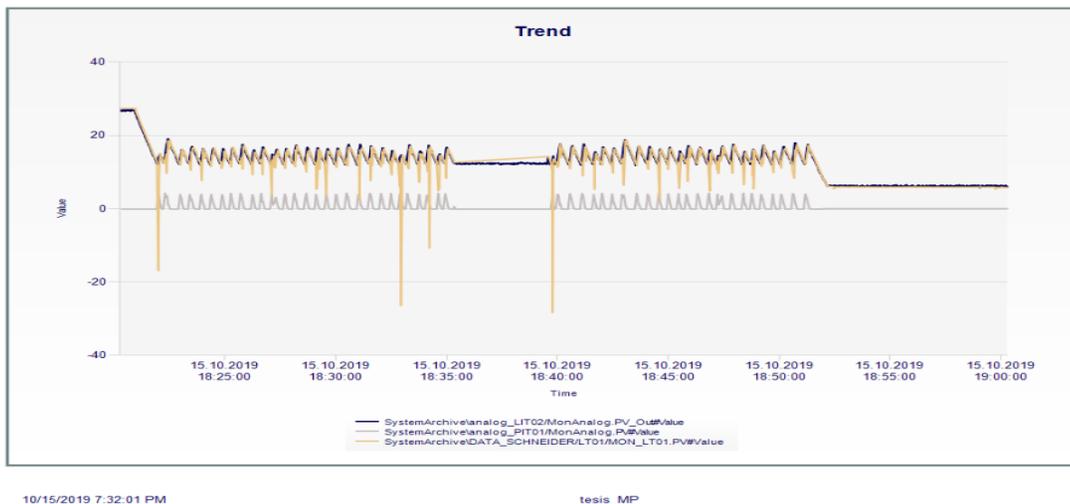


Figura nro. 47 – Reportes en forma de tendencias obtenidos desde la aplicación INFORMATION SERVER para la adquisición de datos archivados en el servidor HISTORIAN. Fuente: propia.

## **CAPÍTULO VI: VALIDACIÓN DEL SISTEMA DE SEGURIDAD Y DE LA INTEGRACIÓN**

En este capítulo se validó el diseño del sistema de seguridad así como de la funcionalidad del sistema de seguridad implementado. La primera validación se logra mediante los datos obtenibles de diferentes sitios web relacionados con la seguridad, cabe destacar que estos sitios pertenecen a organizaciones relacionadas con la seguridad industrial por lo que la información que proporcionan está comprobada.

La validación del funcionamiento del sistema se logró mediante pruebas arbitrarias, de tal manera que se comprobó lo programado en las lógicas de seguridad que tendrán como resultado que el sistema sea llevado a un estado seguro en todo sentido. La manipulación de históricos desde el INFORMATION SERVER permitió esta validación.

### **6.1 Validación de los niveles de seguridad de las funciones de seguridad del SIS**

En capítulos anteriores se diseñó el SIS para el Módulo de Bombeo de Agua del laboratorio, este SIS consiste en funciones en 2 funciones de seguridad, una que mantiene seguro el nivel de reservorio B y el otro para mantener en niveles seguros los niveles de presión en la descarga de la bomba P-1, estas funciones de seguridad fueron implementadas de igual manera y fueron probadas cualitativamente en su funcionamiento. En este apartado se validara las funciones de seguridad mediante la verificación de los niveles de seguridad SIL. En otras palabras se verificará que los SIL determinados en el capítulo 6 estén realmente plasmados en las funciones de seguridad implementadas.

Para dicha validación se tienen que recordar términos pasados como son el PFD (probabilidad de falla a la demanda) y se tienen que introducir nuevos términos como la Taza de fallas no detectadas " $\lambda_{du}$ ". En los estándares IEC 61508 y IEC 61511 no se encuentra explícitamente como verificar los SIF una vez que estos están implementados, sin embargo los métodos de verificación se resumen en fórmulas aritméticas que tienen una gran precisión para este propósito. Estas fórmulas fueron derivadas de un análisis probabilístico que no se comprobará en este proyecto debido a que actualmente se usan estas fórmulas para la validación de SIS implementados en industria masiva por lo que no es necesaria su comprobación.

Las fórmulas para la validación de los SIL correspondientes a cada SIF son:

$$PFD_{avg} = \lambda du \times \frac{TI}{2} \quad (28)$$

Donde:

- PFD<sub>avg</sub>: Probabilidad de falla en demanda
- $\lambda du$ : Taza de fallas no detectadas
- TI: Intervalo de tiempo entre test de pruebas

Si es que se cuenta con el dato de la duración de los test de pruebas la fórmula se reescribe de la siguiente manera:

$$PFD_{avg} = \lambda du \times \frac{TI}{2} + \frac{TD}{TI} \quad (29)$$

Donde:

- TD: Tiempo de duración de los test de pruebas

Se puede modificar la fórmula si es que existieran datos como la efectividad en porcentaje para revelar fallas peligrosas y el tiempo de vida del sistema como tal que puede representarse como el tiempo de vida de toda la planta.

$$PFD_{avg} = \left( Et \times \frac{\lambda du}{2} \right) + \frac{TD}{TI} + [(1 - Et) \times \lambda du \times \frac{SL}{2}] \quad (30)$$

Donde:

- Et: Efectividad de los test de prueba para encontrar fallas peligrosas
- SL: Tiempo de vida de la planta

Como en el caso del presente proyecto no se cuentan con los datos de efectividad debido a que el primero es determinado después de un análisis estadístico en el cual se analiza dicho dato durante los mantenimientos y su funcionamiento en general y el segundo debido a que no se sabe cuánto tiempo estará presente el módulo en el laboratorio. Debido a esto se usaron

las dos primeras fórmulas y se comparan los resultados para verificar los niveles de seguridad de los SIF.

Para nuestro caso el tiempo de intervalo entre test de pruebas será asumido arbitrariamente como 1 año debido a que normalmente los tiempos entre mantenimientos (donde se realiza estos test de pruebas) en la mayoría de industrias no supera el año. Otro dato importante es la duración de estos test de pruebas que será de 8 horas debido a que este es el tiempo en el cual el instrumento o actuador se saca de funcionamiento y se realizan los mantenimientos. Cabe resaltar que en la mayoría de validaciones se asume este dato como 8 horas.

Sin embargo la tasa de fallas no detectadas " $\lambda_{du}$ " es un dato muy difícil de encontrar si es que el equipo no está orientado a la seguridad, como en nuestro caso ninguno de los instrumentos, actuadores o equipos es orientado a la seguridad no se puede determinar o encontrar dicho dato en los manuales o data-sheet de los equipos mencionados. Por lo que se acudirá a la página web [www.silsafedata.com](http://www.silsafedata.com) que tiene como función proporcionar estos datos para situaciones en las cuales dicha tasa no se encuentre disponible. Esta página web elaborada por EXIDA (Corporación dedicada a la seguridad industrial) proporciona los límites superiores e inferiores en los cuales se encuentra la tasa de fallas no detectadas para cada instrumento, equipo o actuador, clasificados por tipo y método de funcionamiento. Estos límites son derivados de un análisis estadístico que se realizaron a distintos equipos mediante los análisis FMEDA (Failure modes, effects, and diagnostic analysis por sus siglas en inglés) realizados por EXIDA a lo largo de su trayectoria en base a datos obtenidos en campo cuando los equipos bajo análisis están funcionando o cuando buscan certificaciones dadas por EXIDA. EXIDA llama a este método en general "Análisis Predictivo".

### 6.1.1 Validación del SIL correspondiente al lazo de control de nivel 400

Para el lazo de seguridad 400 se tienen los datos:

Tabla 25 - Representación de los límites de las tasas de fallas no detectadas para el SIF 1 lazo 400.

Equipo	$\lambda_{du}$ (FIT) límite inferior	$\lambda_{du}$ (FIT) límite superior	$\lambda_{du}$ (años) límite inferior	$\lambda_{du}$ (años) límite superior
TX	160	750	0.0014016	0.00657
MODULO AI	100	250	0.000876	0.00219
PLC	500	200	0.00438	0.001752
MODULO DO	50	150	0.000438	0.001314
RELAY	100	400	0.000876	0.003504
CONTACTOR	100	500	0.000876	0.00438

Fuente: elaboración propia.

Se tiene q mencionar que 1 FIT per hour =  $10^{-9}$  per hour, además que 1 año = 8760 horas.

Con los datos de la tabla anterior se obtiene la siguiente tabla haciendo uso de la ecuación simplificada 27.

Tabla 26 - Resultados para la validación SIL en el NODO 1.

Equipo	PFDavg límite inferior	PFDavg2 límite superior	RRF límite inferior	RRF límite superior	SIL límite inferior	SIL límite superior	%PFDavg límite inferior	%PFDavg límite superior
TX	0.0007008	0.003285	-	-	SIL 3	SIL 2	15.84	33.33
MODULO AI	0.000438	0.001095	-	-	SIL 3	SIL 2	9.90	11.11
PLC	0.00219	0.000876	-	-	SIL 2	SIL 3	49.50	8.89
MODULO DO	0.000219	0.000657	-	-	SIL 3	SIL 3	4.95	6.67
RELAY	0.000438	0.001752	-	-	SIL 3	SIL 2	9.90	17.78
CONTACTOR	0.000438	0.00219	-	-	SIL 3	SIL 2	9.90	22.22
FINAL	0.0044238	0.009855	226.05	101.47	SIL 2	SIL 2	100.00	100.00

Fuente: elaboración propia.

De igual manera con los datos de la tabla 21 se determina la siguiente tabla haciendo uso de la ecuación 28.

Tabla 27 - Resultados para la validación SIL en el NODO 1.

Equipo	PFDavg límite inferior	PFDavg2 límite superior	RRF límite inferior	RRF límite superior	SIL límite inferior	SIL límite superior	%PFDa vg límite inferior	%PFDavg límite superior
TX	0.001614042	0.004198242	-	-	SIL 2	SIL 2	16.30	27.38
MODULO AI	0.001351242	0.002008242	-	-	SIL 2	SIL 2	13.64	13.10
PLC	0.003103242	0.001789242	-	-	SIL 2	SIL 2	31.34	11.67
MODULO DO	0.001132242	0.001570242	-	-	SIL 2	SIL 2	11.43	10.24
RELAY	0.001351242	0.002665242	-	-	SIL 2	SIL 2	13.64	17.38
CONTACTOR	0.001351242	0.003103242	-	-	SIL 2	SIL 2	13.64	20.24
FINAL	0.009903252	0.015334452	100.98	65.21	SIL 2	SIL 1	100.00	100.00

Fuente: elaboración propia.

De las tablas anteriores se puede afirmar que:

- Para la primera tabla determinada a partir de la ecuación simplificada 27, la SIF diseñada e implementada cumple con los requerimientos SIL determinados en el capítulo 5. Como se observa al usar ambos límites con respecto a la tasa de fallas no detectadas los resultados indican un nivel de seguridad SIL 2 que es más que suficiente para cubrir las necesidades de seguridad del lazo de control. Esto debido a que el SIL requerido es SIL 1.
- Para la segunda tabla determinada a partir de la ecuación 28, la SIF implementada cumple con los requerimientos SIL determinados en el capítulo 5 sin embargo como se aprecia en esta misma tabla para el límite superior con respecto a la tasa de fallas no detectadas el SIL alcanzado para la SIF es de SIL 1, esto no perjudica por ningún motivo a la función de seguridad implementada sin embargo nos da a conocer que el tiempo de duración de test de pruebas "TD" tiene un impacto relativo cuando se toma en cuenta en esta validación.

### 6.1.2 Validación del SIL correspondiente al lazo de control de presión 500

Para el lazo de seguridad 500 se tienen los datos:

Tabla 28 - Determinación de límites para la tasa de fallas no detectadas para el SIF 2 lazo 500.

Equipo	$\lambda_{du}$ (FIT) límite inferior	$\lambda_{du}$ (FIT) límite superior	$\lambda_{du}$ (años) límite inferior	$\lambda_{du}$ (años) límite superior
TX	160	750	0.0014016	0.00657
PLC	500	200	0.00438	0.001752
DO MODULE	50	150	0.000438	0.001314
VFD	400	1000	0.003504	0.00876

Fuente: elaboración propia.

Con los datos de la tabla anterior se puede obtener la siguiente tabla usando la ecuación simplificada 27

Tabla 29 - Resultados para la validación SIL en el NODO 2.

Equipo	PFDavg límite inferior	PFDavg2 límite superior	RRF límite inferior	RRF límite superior	SIL límite inferior	SIL límite superior	%PFDavg límite inferior	%PFDavg límite superior
TX	0.0007008	0.003285	-	-	SIL 3	SIL 2	14.41	35.71
PLC	0.00219	0.000876	-	-	SIL 2	SIL 3	45.05	9.52
MODULO DO	0.000219	0.000657	-	-	SIL 3	SIL 3	4.50	7.14
VFD	0.001752	0.00438	-	-	SIL 2	SIL 2	36.04	47.62
FINAL	0.0048618	0.009198	205.69	108.72	SIL 2	SIL 2	100.00	100.00

Fuente: elaboración propia.

De igual manera con los datos de la tabla 24 se determina la siguiente tabla haciendo uso de la ecuación

Tabla 30 - Resultados para la validación SIL en el NODO 1.

Equipo	PFDavg límite inferior	PFDavg2 límite superior	RRF límite inferior	RRF límite superior	SIL límite inferior	SIL límite superior	%PFDavg límite inferior	%PFDavg límite superior
TX	0.001614042	0.004198242	-	-	SIL 2	SIL 2	18.96	32.67
PLC	0.003103242	0.001789242	-	-	SIL 2	SIL 2	36.45	13.92
MODULO DO	0.001132242	0.001570242	-	-	SIL 2	SIL 2	13.30	12.22
VFD	0.002665242	0.005293242	-	-	SIL 2	SIL 2	31.30	41.19
FINAL	0.008514768	0.012850968	117.44	77.82	SIL 2	SIL 1	100.00	100.00

Fuente: elaboración propia.

De las tablas anteriores se puede afirmar que:

- Para la primera tabla determinada a partir de la ecuación simplificada 27, la SIF diseñada e implementada cumple con los requerimientos SIL determinados en el capítulo 5. Como se observa al usar ambos límites con respecto a la tasa de fallas no detectadas los resultados indican un nivel de seguridad SIL 2 que es más que suficiente para cubrir las necesidades de seguridad del lazo de control. Esto debido a que el SIL requerido es SIL 1.
- Para la segunda tabla determinada a partir de la ecuación 28, la SIF implementada cumple con los requerimientos SIL determinados en el capítulo 5 sin embargo como se aprecia en esta misma tabla para el límite superior con respecto a la tasa de fallas no detectadas el SIL alcanzado para la SIF es de SIL 1, esto no perjudica por ningún motivo a la función de seguridad implementada sin embargo nos da a conocer que el tiempo de duración de test de pruebas “TD” tiene un impacto relativo cuando se toma en cuenta en esta validación.

## 6.2 Validación del funcionamiento de las funciones de seguridad

En este ítem se valida el funcionamiento de las funciones de seguridad implementadas de tal manera que, cuando se provoquen eventos que afecten negativamente las variables de proceso el SIS lleve al mismo a un estado seguro. Como se advirtió en capítulos anteriores los

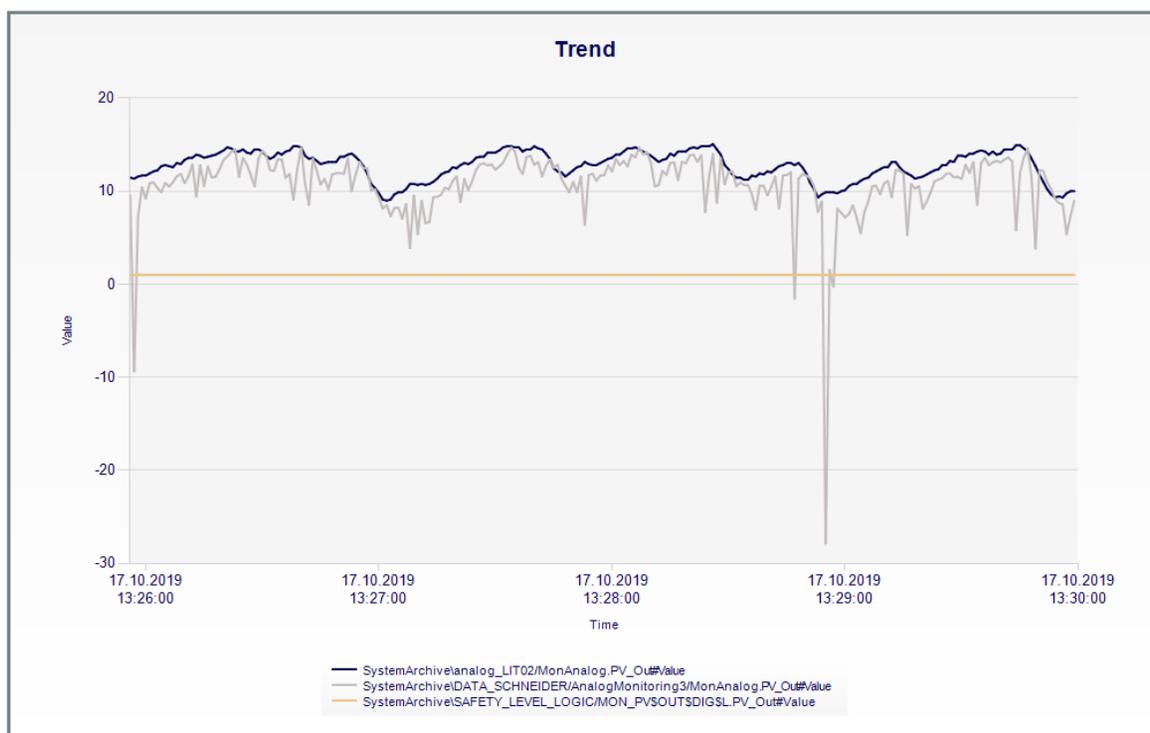
eventos negativos están relacionados con las variables de proceso: presión y nivel del reservorio B. El consumo de potencia del sistema como tal no será visto en esta validación, por cuanto se considera que las previsiones de seguridad con respecto a este ítem son lo bastante seguras como para garantizar la seguridad del sistema. Esto además debido a que es muy difícil provocar un evento negativo respecto a esta variable sin poner en peligro la integridad del operador o de los equipos involucrados.

### **6.2.1 Pruebas de funcionamiento de la función de seguridad de nivel**

Los eventos peligrosos relacionados con la función de seguridad de nivel fueron causados arbitrariamente en el proceso como tal. Ya que fortuitamente es poco probable que el evento se pueda originar de por sí durante el funcionamiento del proceso. Siendo así que se establecen condiciones sobre el proceso, las cuales servirán para poner a prueba la función de seguridad. Se tiene que mencionar que las pruebas deben tener en cuenta el estado del control del sistema (manual o automático) y que en ambos casos el sistema de seguridad actué según lo establecido. Las condiciones y parámetros que se establecen son:

- Con el sistema de control en automático se establecerá el Set Point de nivel en 15 cm y el nivel de enclavamiento de seguridad en 16 cm.
- Con el sistema de control en automático se establecerá el Set Point de nivel en 25 cm y el nivel de enclavamiento de seguridad en 27 cm.
- Con el sistema de control en automático se establecerá el Set Point de nivel en 25 cm y el nivel de enclavamiento de seguridad en 26 cm.
- Con el sistema de control en manual se establecerá el nivel de enclavamiento de seguridad en 26 cm.
- Con el sistema de control en manual se establecerá el nivel de enclavamiento de seguridad en 26 cm. En esta ocasión la válvula de desfogue LV-03 estará cerrada es decir que no habrá flujo de consumo.

Se tiene que mencionar que el proceso se encontraba en automático y funcionando cuando se establecieron los parámetros de las 3 primeras pruebas. Ambos niveles (de control y de seguridad) se muestran en la siguiente figura.

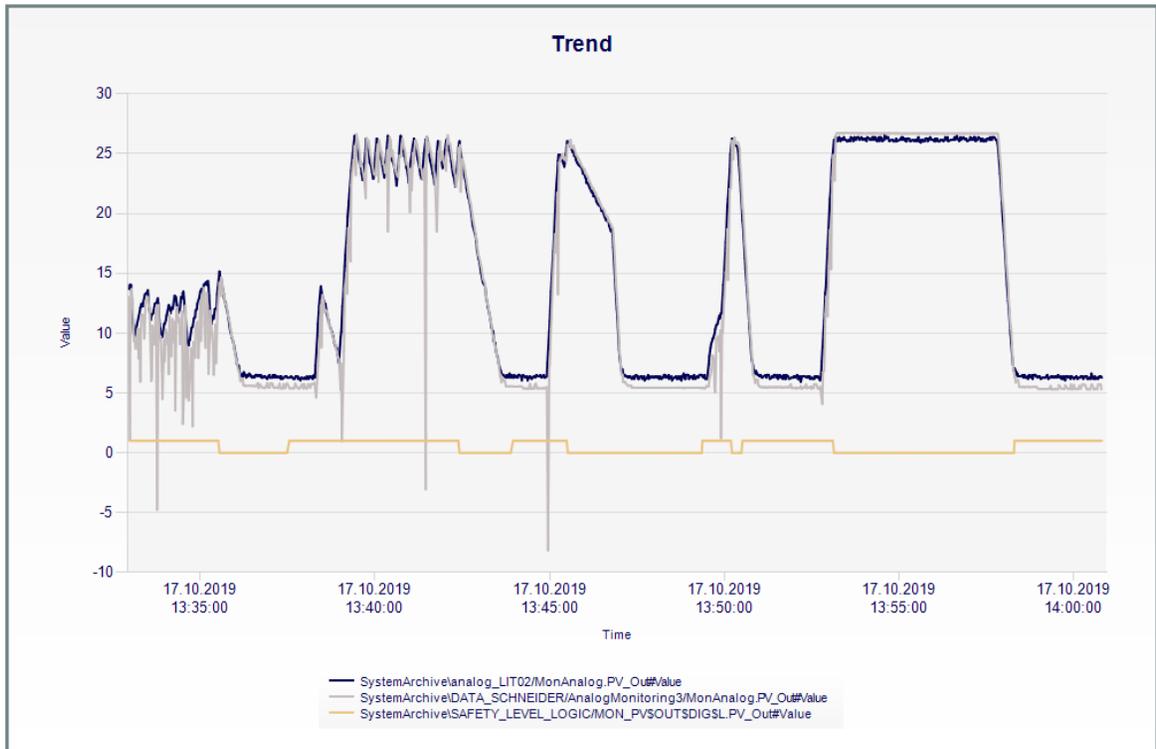


10/17/2019 2:00:27 PM

tesis\_MP

Figura nro. 48 - Tendencias de lecturas de nivel de los transmisores de control LT-01 y de seguridad LT-02, cuando el proceso está en modo automático. Fuente: propia.

Los resultados de las pruebas realizadas se pueden observar en la siguiente figura, donde el nivel de control es la gráfica de color plomo, el de seguridad es la de azul y el estado de contactor de seguridad se encuentra trazado de color naranja claro.



10/17/2019 1:59:13 PM

tesis\_MP

Figura nro. 49 - Tendencias de prueba del funcionamiento del lazo de seguridad 400 SIF 1. Fuente: propia.

- Como se observa en la figura anterior, aproximadamente a las 13:25:00 el nivel de seguridad es establecido en 16 cm y una vez que el sistema alcanza este nivel el contactor (trazado de naranja claro) se deshabilita lo que desenergiza la bomba P-1 y por consiguiente interrumpe el flujo de líquido hacia el reservorio B, haciendo que este mismo se quede sin líquido después de unos segundos.
- Luego, aproximadamente a las 13:40:00 el nuevo set point de control es establecido en 25cm y el nivel de enclavamiento de seguridad es establecido en 27cm. Tiempo después el sistema en su afán de controlar el nivel hace que esta misma variable oscile entre este nivel (25 cm). Pasado un tiempo aleatorio el nivel alcanza 27 cm. Lo que una vez más desenergiza la bomba P-1 y por consiguiente interrumpe el flujo de alimentación hacia el reservorio B, haciendo que este mismo se quede sin líquido después de unos segundos.

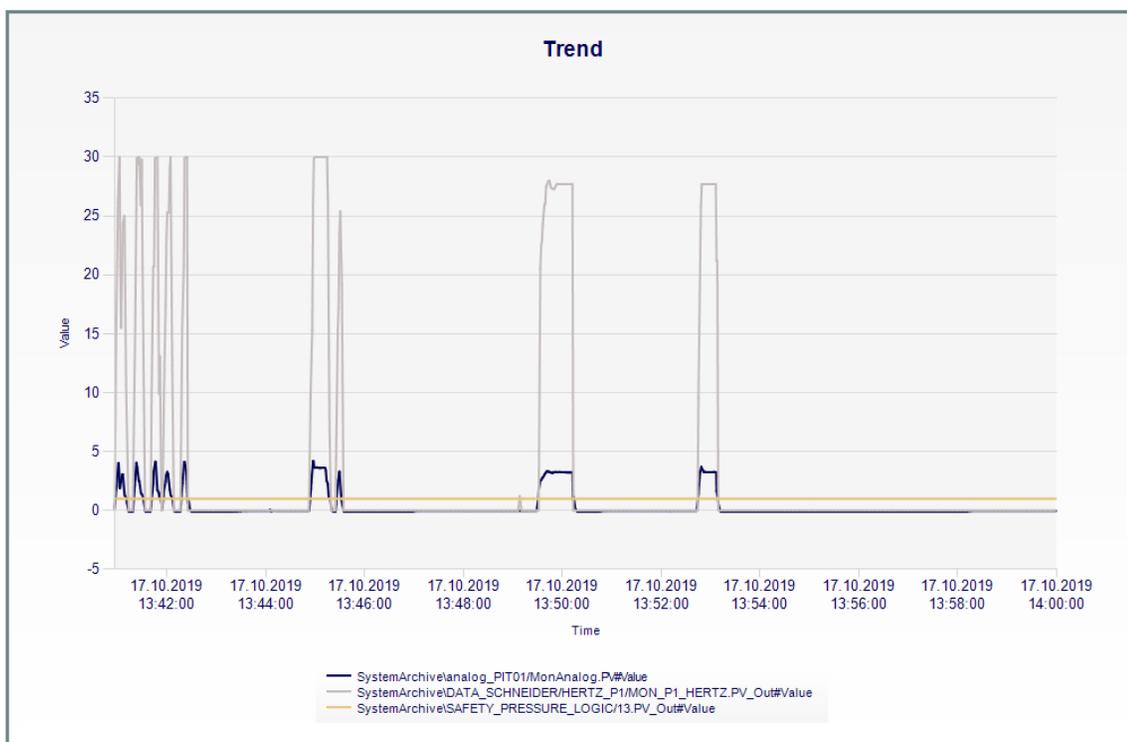
- Luego, aproximadamente a las 13:45:00 el nuevo set point de control es establecido en 25cm y el nivel de enclavamiento de seguridad es establecido en 26 cm. Tiempo después el sistema en su afán de controlar el nivel hace que esta misma variable oscile entre este nivel (25 cm). Pasado un tiempo aleatorio el nivel alcanza 26 cm. Lo que una vez más desenergiza la bomba P-1 y por consiguiente interrumpe el flujo de líquido hacia el reservorio B, haciendo que este mismo se quede sin líquido después de unos segundos. Cabe destacar que en esta oportunidad el sistema se enclava en menos tiempo debido a que el nivel de enclavamiento de seguridad es más cercano al set point de control.
- Para esta y la siguiente prueba se pone el modo de control del proceso en MANUAL y se establece el nivel de enclavamiento de seguridad en 26 cm y las revoluciones de la bomba P-1 en 32 Hz. Aproximadamente a las 13:50:00 el sistema alcanza el nivel de enclavamiento de seguridad lo que una vez más desenergiza la bomba P-1 y por consiguiente interrumpe el flujo de alimentación hacia el reservorio B, haciendo que este mismo se quede sin líquido después de unos segundos.
- Para la última prueba se pone el modo de control del proceso en MANUAL y se establece el nivel de enclavamiento de seguridad en 26 cm y las revoluciones de la bomba P-1 en 32 Hz. Aproximadamente a las 13:53:00 el sistema alcanza el nivel de enclavamiento de seguridad lo que una vez más desenergiza la bomba P-1 y por consiguiente interrumpe el flujo de alimentación hacia el reservorio B, haciendo que este mismo se quede sin líquido después de unos segundos. Como se mencionó antes en esta prueba la válvula LV-03 se encuentra cerrada por lo que el nivel, una vez desenergizada la bomba P-1 se mantiene.

El tiempo en el cual el sistema de seguridad detecta el nivel peligroso y el enclavamiento se ejecuta es menor a un segundo.

### **6.2.2 Pruebas de funcionamiento de la función de seguridad de presión**

Los eventos peligrosos relacionados con la función de seguridad de presión en la tubería de descarga de la bomba P-1, fueron causados arbitrariamente en el proceso como tal. Esto debido a que fortuitamente es poco probable que el evento se pueda originar de por sí durante el funcionamiento del proceso. Siendo así que se establecen condiciones sobre el proceso, las cuales servirán para poner a prueba la función de seguridad. Se tiene que mencionar que

las pruebas deben tener en cuenta el estado del control del sistema (manual o automático) y que en ambos casos el sistema de seguridad actué según lo establecido. El sistema cuando funciona normalmente tiene la siguiente tendencia donde las referencia de velocidad de la bomba P-1 se encuentra trazada de color plomo, presión en psi en la tubería de descarga se encuentra trazada de color azul y la salida de seguridad para el enclavamiento del variador de frecuencia se encuentra trazada de color naranja claro.



10/17/2019 2:06:36 PM

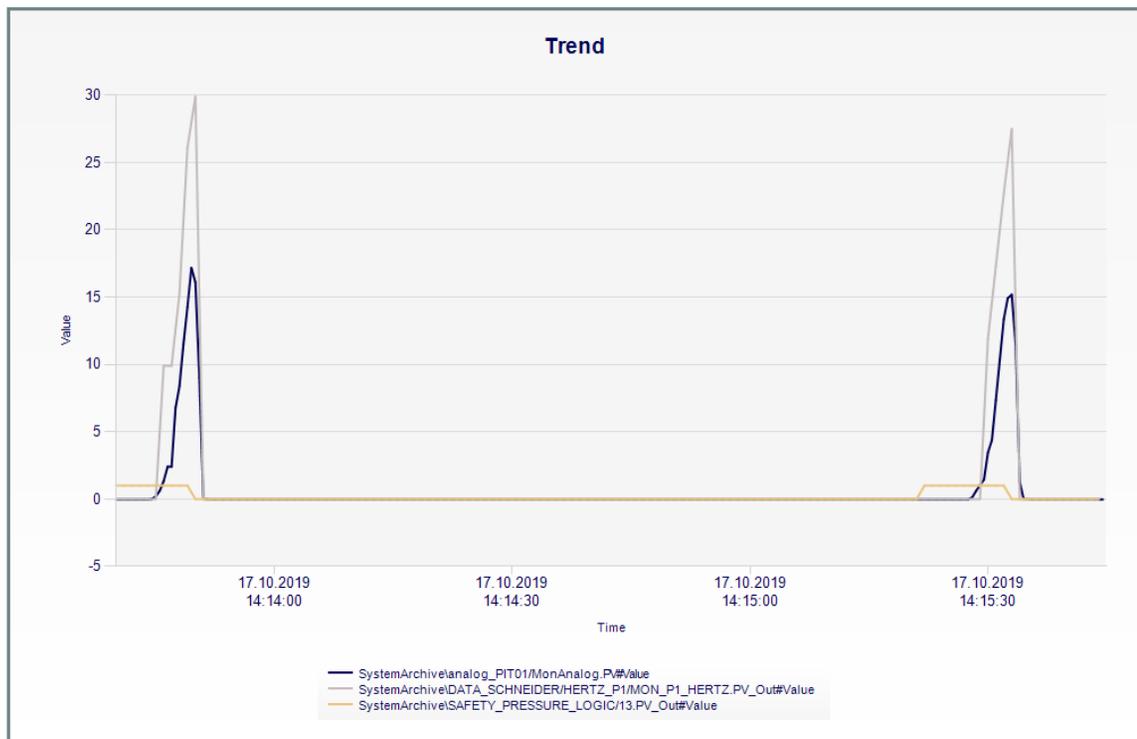
tesis\_MP

Figura nro. 50 - Funcionamiento normal del lazo de control de presión. Fuente: propia.

Como se aprecia en la figura anterior y se comprobó en el capítulo 3, la presión en la tubería de descarga está relacionada con la referencia de velocidad de la bomba P-1 y esta se mantiene en niveles normales si es que las válvulas LV-01 y LV-02 se encuentran funcionando óptimamente.

Descrito lo anterior se establecen las condiciones y parámetros que permitirán probar la función de seguridad de presión:

- Se forzará el cerrado de la válvula LV-01 y la válvula de by-pass LV-02 también se encontrará cerrada. Se establecerá el set point de control de nivel en 25 cm y el modo de control estará en automático. Una vez establecidos estos parámetros, se encenderá el sistema de control. La presión de enclavamiento es de 14.5 psi o un 1 bar.
- Se forzará el cerrado de la válvula LV-01 y la válvula de by-pass LV-02 también se encontrará cerrada. El modo de control estará en manual y la referencia de revoluciones de la bomba P-1 será de 32 Hz. La presión de enclavamiento es de 14.5 psi o un 1 bar.



10/17/2019 2:14:49 PM

tesis\_MP

Figura nro. 51 - Tendencias de prueba del funcionamiento del lazo de seguridad 500 SIF 2. Fuente: propia.

De la figura anterior se determina:

- Para la primera prueba el nivel supera ligeramente los 15 psi debido a que la salida de seguridad de enclavamiento usa una función del variador (parado rápido) que,

aunque detiene la bomba muy rápidamente no lo hace de golpe (para salvaguardar la integridad de la bomba y del drive). Esto origina que la presión regrese a valores normales y no peligrosos muy rápidamente.

- Para la segunda prueba se repite el mismo comportamiento por lo que lo único importante que acotar es que el sistema de seguridad deshabilita el drive antes que la bomba llegue a la velocidad de referencia (32 Hz).

## CAPÍTULO VII: COSTOS Y PRESUPUESTOS

En este capítulo se elaborará una tabla de costos netamente asumidos por el tesista durante la implementación del proyecto de tesis, esto debido a que buena parte de los equipos usados en el proyecto de tesis estuvieron disponibles en el Laboratorio de Automatización Industrial y que además los costos de estos equipos podrían diferir del costo del mercado al costo asumido por la universidad al momento de su compra.

N°	Descripción	Cantidad (UN)	Precio unidad (S/)	Total (S/)
<b>EQUIPOS Y COMPONENTES</b>				
1	Manómetro 0-60 psi	1	60	60
<b>MATERIALES Y HERRAMIENTAS MECANICAS Y ELECTRICAS</b>				
2	tubería de 1" de PVC - 10m	1	25	25
3	Accesorios de tubería (codos, uniones, boss, etc.)	1	100	100
4	Pegamento para tuberías, teflón , etc.	1	25	25
5	Herramientas mecánicas como: llave Stilson, llave inglesa, etc.	1	150	150
6	Herramientas variadas como alicates de corte, strippers de cable, etc.	1	150	150
7	Cinta aislante 3M super 33 x paquete	1	35	35
8	Rollos de cable AWG 16 x 100m	1	120	120
<b>MATERIALES DE OFICINA</b>				
16	Papel bond (paquete)	2	12	24
17	Impresora Epson L220	1	250	250
18	Útiles de escritorio (Lapiceros, plumones, etc.)	1	60	60
<b>EQUIPOS DE LABORATORIO</b>				
21	Laptop de servicio - ref. Acer 5750	1	1800	1800
			<b>Costo Total (S/)</b>	<b>2799</b>

## CONCLUSIONES

1. Se diseñó e implementó un SIS para el sistema de bombeo de agua entre reservorios basado en los estándares internacionales IEC 61508 e IEC 61511. Además el SIS implementado, en conjunto con el sistema de control, fue integrado al módulo DCS, usando protocolos de comunicación industriales como Modbus TCP/IP y Profinet.
2. De la identificación, selección y recopilación de los estándares más importantes relacionados con la seguridad industrial se eligieron como base para esta tesis los estándares IEC 61508 y el IEC 61511 debido a su uso extendido en el territorio peruano. Los estándares alemanes DIN están orientados al mismo tema sin embargo tienen una manera un tanto diferente en la determinación de los niveles de seguridad, en este documento son mencionados únicamente.
3. Del modelamiento matemático obtenido del sistema se pudo identificar las variables matemáticas más importantes que se relacionan con las variables de proceso y control como son el nivel, flujo de agua y velocidad de la bomba P-1. Como consecuencia del análisis experimental y computacional se lograron obtener funciones de transferencia de primer orden, que después de un procedimiento de validación se comprobó que la FT descrita en la ecuación 21 se ajusta en un porcentaje del 76.69% a la curva de respuesta de nivel descrita en la figura 18. Los experimentos también permitieron identificar la presión de descarga de la bomba P-1 como variable de proceso relevante para la seguridad. Para este caso se obtuvieron las ecuaciones 22 y 23 cuya representación gráfica se ajusta a los datos obtenidos experimentalmente.
4. Se logró una automatización del sistema cumpliendo los requisitos establecidos en la filosofía de control. Los lazos de control son de tipo cerrado y se logró cumplir con los requisitos establecidos como son: la regulación de nivel en el reservorio B que se realiza mediante un controlador PID y el control de presión se realiza mediante un control ON/OFF. El lazo de control de nivel logró validarse mediante 3 pruebas de funcionamiento concretas desarrolladas en el capítulo III (páginas 62, 63 y 64) en las que el regulador PID logro mantener 3 set point's de nivel diferentes. De esta validación se comprobó que el lazo de control mantiene una regulación de nivel en un rango de  $\pm 8\%$  para el primer caso de validación; siendo los rangos de regulación muchos menores para los dos casos siguientes.

5. En el diseño del SIS se tuvieron en cuenta conceptos como los niveles de seguridad funcional SIL y los análisis HAZOP. Respecto a la implementación se establecieron los niveles SIL requeridos para los nodos de seguridad de nivel y presión tal como se desarrolla en el capítulo V acápite 2, es así que en el acápite 3 del mismo capítulo se implementa las funciones de seguridad. Los niveles de seguridad requeridos para cada función de seguridad son SIL 1 para cada nodo analizado.
6. Se logró una integración total del sistema de control y de seguridad al DCS PCS 7 mediante la implementación de redes Modbus TCP/IP y PROFINET que permitieron centralizar los datos de control y seguridad en el PLC S7-400 para que puedan ser mostrados y supervisados desde el SCADA del DCS PCS 7. Algunos datos de proceso y así como las pantallas de supervisión son mostrados en las figuras 45 y 46. Todos los datos de proceso y control son registrados en el servidor PROCESS HISTORIAN que ayudó en la validación posterior del sistema en su totalidad. La gran mayoría de tendencias que fueron usadas para mostrar o comprobar el funcionamiento del sistema en general fueron obtenidas desde el servidor HISTORIAN.
7. El sistema de seguridad fue validado usando las ecuaciones de verificación de funciones de seguridad (ecuaciones 28 y 29). La validación se logró mediante la verificación de los SIL de cada lazo de seguridad (realizado en el capítulo 6 página 113). Los niveles de seguridad alcanzados por cada función de seguridad se especifican en las tablas 26, 27, 29 y 30. Estas tablas establecen que los niveles de seguridad son en la mayoría de casos de SIL 2, siendo SIL 1 en menor cantidad de casos, verificando y validando así el sistema de seguridad instrumentado ya que el requerimiento de seguridad fue solo de SIL 1. El funcionamiento del sistema de seguridad fue validado en base a pruebas arbitrarias (descritas en el capítulo VI página 119) realizadas en el proceso. Se provocaron condiciones peligrosas arbitrarias, que tuvieron como consecuencia la aparición de peligros que fueron detectados por el sistema de seguridad el cual ejecuto lógicas programadas para llevar al proceso a un estado seguro. Las tendencias de proceso que describen el comportamiento del sistema de seguridad durante las pruebas de funcionamiento mencionadas son descritas por las figuras 49, 50, 51 y 52.

## RECOMENDACIONES

1. Debido a que las electroválvulas se obstruyeron al menos una vez durante el desarrollo de esta tesis se recomienda un mantenimiento preventivo que consiste en el desarmado de la electroválvula cada año para limpiar los accionamientos mecánicos de la válvula. El periodo entre mantenimientos debe ser anual para garantizar el funcionamiento óptimo de la válvula.
2. El Sistema de Seguridad Instrumentado implementado en este proyecto de tesis debe ser probado anualmente, esta prueba consiste en la comprobación del funcionamiento de las funciones de seguridad implementadas. Esto tendrá como consecuencia que el sistema de seguridad instrumentado sea más eficiente en su función además que los niveles de seguridad integral no decaerán con el pasar del tiempo. Esto debido a que una de las características de validación de las funciones de seguridad es la periodicidad de pruebas de dichas funciones.
3. Se recomienda cambiar las baterías de apoyo del PLC S7-400 debido a que con el tiempo estas baterías dejan de funcionar lo que provocan que una vez deterioradas, el PLC de seguridad perderá la funcionalidad de retener su programación en ausencia de energía de alimentación.
4. Se recomienda explorar las capacidades del sistema DCS con procesadores en redundancia debido a que esta característica aunque no es definitiva para los sistemas de control distribuido, hoy en día la mayoría de marcas de DCS ofrecen esta característica de funcionamiento.
5. Se recomienda implementar instrumentos de medición en los reservorios A y C debido a que en este momento no cuentan con transmisores de proceso que puedan medir variables de nivel en los mismos o datos de presión en las tuberías circundantes a estos reservorios.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Albarracín Afanador, J. A., & Arguelles Ramirez, A. F. (2010). Ingeniería detallada, modelado y simulación de un sistema de tanques interactuantes no lineales. (*Tesis de pregrado*). Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá.

Arroyo Vazquez, E., & Mendez Garcia, S. D. (2015). Aplicación del análisis de riesgo mediante el método LOPA para un proceso de embotellamiento de oxígeno líquido. (*Tesis de pregrado*). Instituto Politécnico Nacional, México D.F.

Basilio, A., Landrini, G., & Vande Capelle, T. (2017). *Safety Instrumented Systems - Manual for Plant Engineering and Maintenance* (4ta ed.). Villasanta, Italia: GMI Technology for Safety.

Dorf, R. C., & Bishop, R. H. (2008). *Modern Control Systems* (3th ed.). Singapore: Pearson Education, INC.

Gulland, W. G. (2004). *Methods of Determining Safety Integrity Level (SIL) Requirements - Pros and Cons*. London: Springer-Verlag.

Hughes, T. A. (2002). *Measurement and Control Basics*. ISA Press.

Jaramillo Patiño, D. F. (2014). *Filosofía de la Ingeniería: Una disciplina profesional de la construcción*. Quindío: INGE CUC.

LeBlanc, S. E., & Coughanowr, D. R. (2009). *Process systems analysis and control*. New York: McGraw Hill.

Ogata, K. (2010). *Ingeniería de Control Moderna*. (5ta, Ed.) Madrid: Pearson.

Quispe Gonzales, R. A. (2019). Diseño del sistema scada para el área de recepción, almacenamiento y distribución de hidrocarburos líquidos en la planta Petro Peru - Cusco. (*Tesis de pregrado*). Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, Cusco.

Sacalxot Lopez, W. O. (2012). Propuesta para migración del sistema de control apacs+ processsuite v3.01 hacia Simatic PCS7 APACS+ OS V7.0 en una planta industrial. (*Tesis de pregrado*). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.

Smith, C. A., & Corripio, A. B. (1991). *Control automatico de procesos teoria y practica*. Mexico D.F.: LImusa S.A.

Timms , C. R. (2006). *Achieving alarp with safety instrumented systems*. United Kingdom.

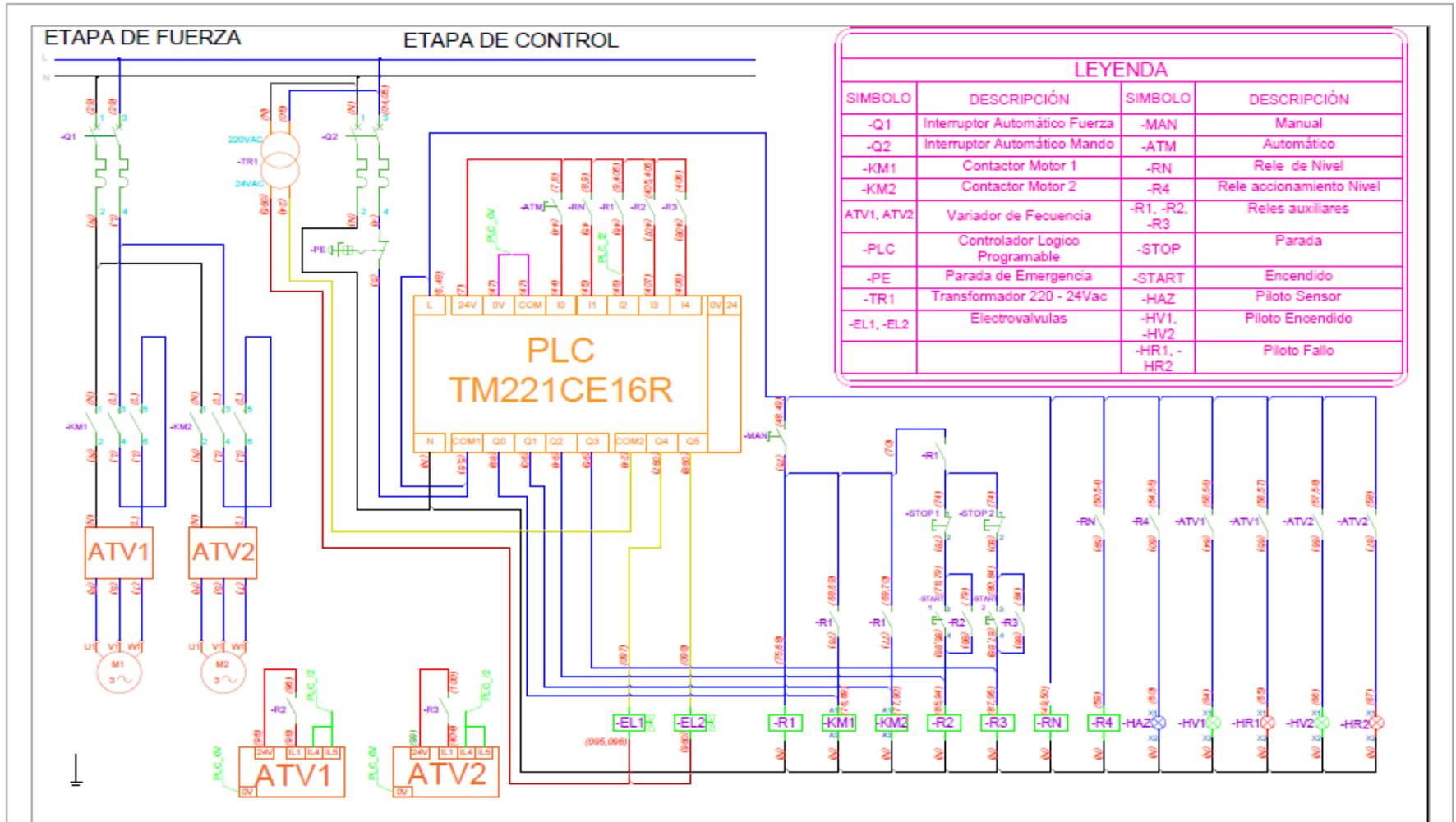
Venegas Riera, K. F., & Barreto Jijon, R. A. (2014). *La seguridad funcional en la industria de procesos*.

Visconti Stopello, G. V. (2005). Desarrollode la ingenieria de detalle en el area de instrumentacion y control del patio de tanques del proyecto "Tanques de almacenamiento de ORIMULSION" ubicado en el "complejo petrolero y petroquimico Jose Antonio Anzoategui". Caracas.

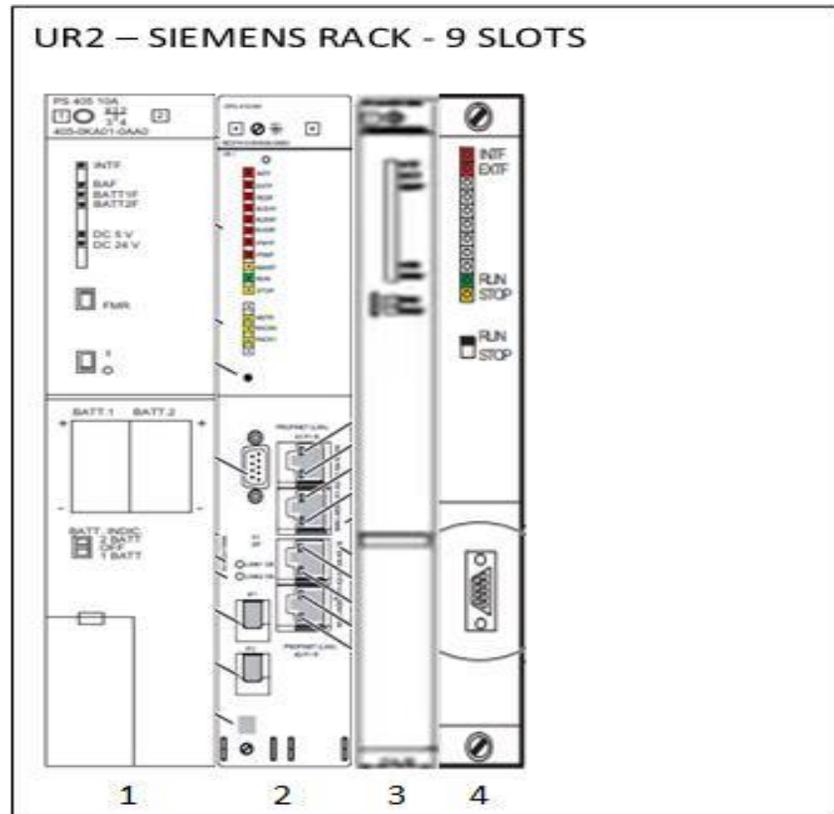
Vojtesek, J., Dostal, P., & Maslan, M. (s.f.). *Modelling and simulation of water tank*. Republica Checa: Faculty of Applied Informatics.

## **ANEXOS**

ANEXO A - Diagrama eléctrico del sistema de control previo a la implementación del sistema de seguridad instrumentado

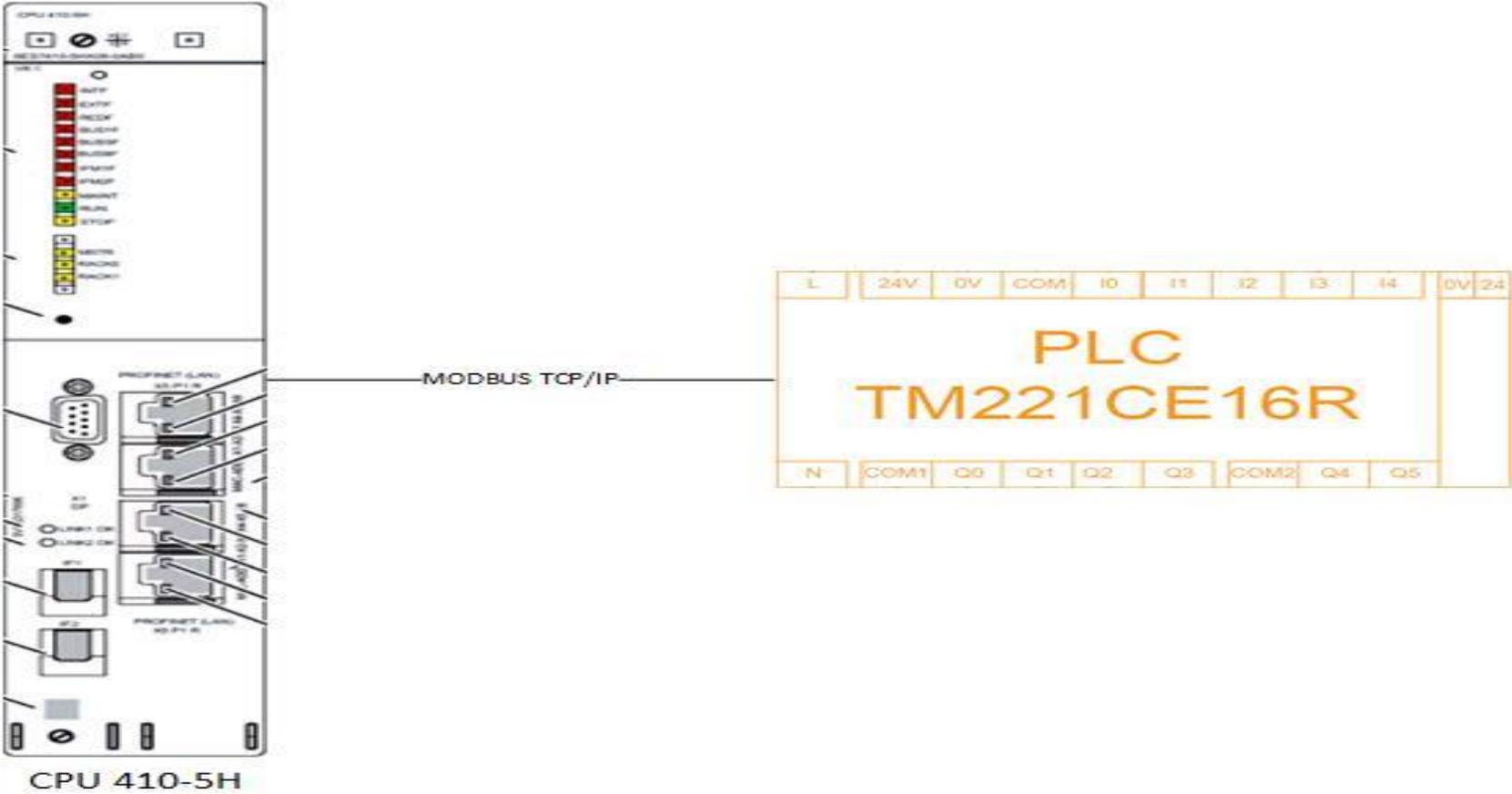


ANEXO B - Configuración del RACK del módulo de control principal del DCS PCS 7

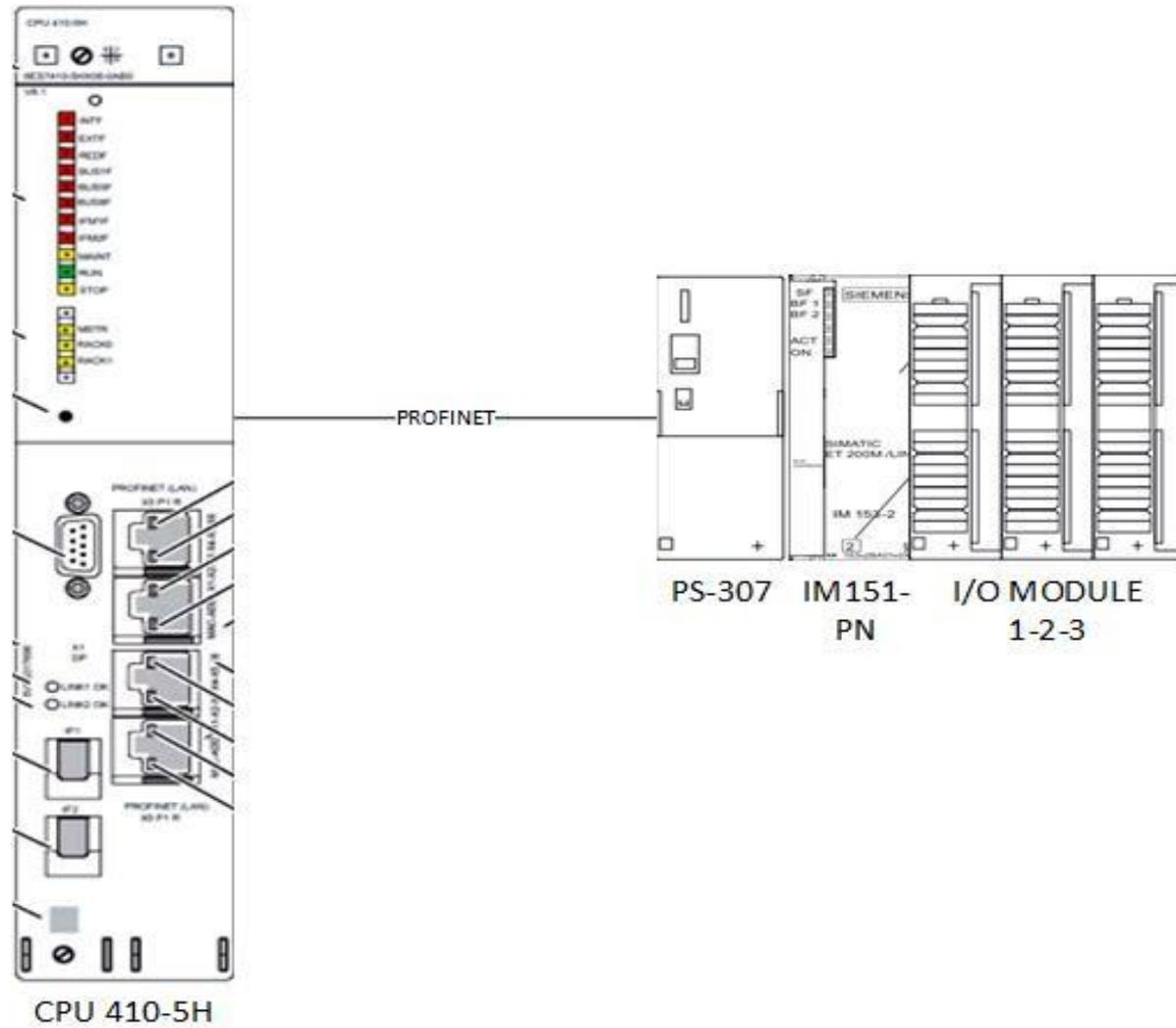


- LEYENDA:**
- 1: SIEMENS PS405 10A**
  - 2: S7-400 CPU 410-5H**
  - 3: CP443-1**
  - 4: CP443-5 EXT**

ANEXO C - Arquitectura de red en el sistema de control del módulo de bombeo de agua y el sistema de control del DCs



ANEXO D - Arquitectura de red entre el sistema de control del DCS y el módulo de I/O



- LEYENDA:**
- 1: DI x 32**
  - 2: DO x 32**
  - 3: AI x 8**

ANEXO E - Diagrama electrico simplificado del sistema de seguridad instrumentado implementado.

