

UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA
ELECTRÓNICA



TESIS

**“Diseño de un sistema automático HMI/SCADA para el control
del tanque desaireador del área de calderos de la empresa
Agroindustrial Tumán S.A.A.”**

INVESTIGADOR:

Bach. Gianmarco Ricardo Fuentes Campos

ASESOR:

Ing. Carlos Leonardo Oblitas Vera

Lambayeque, 2020

TESIS

“DISEÑO DE UN SISTEMA AUTOMÁTICO HMI/SCADA PARA EL CONTROL DEL TANQUE DESAIREADOR DEL ÁREA DE CALDEROS DE LA EMPRESA AGROINDUSTRIAL TUMÁN S.A.A.”

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO ELECTRÓNICO

ELABORADO POR:

Bach. Gianmarco Ricardo Fuentes Campos

ASESORADO POR:

Ing. Carlos Leonardo Oblitas Vera

TESIS

“DISEÑO DE UN SISTEMA AUTOMÁTICO HMI/SCADA PARA EL CONTROL DEL TANQUE DESAIREADOR DEL ÁREA DE CALDEROS DE LA EMPRESA AGROINDUSTRIAL TUMÁN S.A.A.”

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO ELECTRÓNICO

APROBADO POR EL SIGUIENTE JURADO:

Ing. Manuel Javier Ramírez Castro
Presidente

Mg. Ing. Martín Augusto Nombera Lossio
Secretario

Mg. Ing. Oscar Uchelly Romero Cortez
Vocal



UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DECANATO

Ciudad Universitaria - Lambayeque



ACTA DE SUSTENTACIÓN N°002-2020-D/FACFyM

(Sustentación Autorizada por Resolución N° 1683-2019-D/FACFyM)

En la ciudad de Lambayeque, siendo las 11:00 am del día 09 de Enero del 2020 se reunieron en la sala de sustentación del laboratorio de EPIE los miembros del Jurado designados mediante Resolución N° 782-2019-D/FACFyM, los docentes:

Ing. Manuel Javier Ramírez Castro	Presidente
Mg. Ing. Martín Augusto Nombera Lossio	Secretario
Mg. Ing. Oscar Uchelly Romero Cortez	Vocal

Para recibir la tesis titulada:

Desarrollo de un Sistema de Control Híbrido para el control de la temperatura del tanque de calentamiento del Área de Calderas de la Empresa Aguardos Industrial Tarma S.A.S.

desarrollada por el Bachiller en Ingeniería Electrónica, **Fuentes Campos Gianmarco Ricardo**.

Después de escuchar la exposición y las respuestas a las preguntas formuladas por los miembros del Jurado, se acordó APROBAR el trabajo por CONFORMIDAD con el calificativo de BUENO.

En consecuencia, el Bachiller en referencia queda apto para recibir el Título Profesional de **Ingeniero Electrónico**, de acuerdo a la Ley Universitaria, el Estatuto y Reglamento de la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo de Lambayeque.

Observaciones:

.....

.....

Para constancia del hecho firman.

Ing. Manuel Javier Ramírez Castro
Presidente

Mg. Ing. Martín Augusto Nombera Lossio
Secretario

Mg. Ing. Oscar Uchelly Romero Cortez
Vocal

DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD

Yo, Gianmarco Ricardo Fuentes Campos investigador principal, y Carlos Leonardo Oblitas Vera, asesor del trabajo de investigación “Diseño de un sistema automático HMI/SCADA para el control del tanque desaireador del área de calderos de la Empresa Agroindustrial Tumán s.a.a.” declaramos bajo juramento que este trabajo no ha sido plagiado, ni contiene datos falsos. En caso se demostrará lo contrario, asumo responsablemente la anulación de este informe y por ende el proceso administrativo a que hubiera lugar. Que puede conducir a la anulación del título o grado emitido como consecuencia de este informe.

Lambayeque, Enero 2020

Investigador:

Bach. Gianmarco Ricardo Fuentes Campos

Asesor:

Ing. Carlos Leonardo Oblitas Vera

DEDICATORIA

Dedico este proyecto de tesis a Dios, a mis padres y a la memoria de mis abuelos. A Dios porque ha estado conmigo a cada paso que doy, cuidándome y dándome fortaleza para continuar, a mis padres y abuelos quienes a lo largo de mi vida han velado por mi bienestar y educación siendo mi apoyo en todo momento. Depositando su entera confianza en cada reto que se me presentaba sin dudar ni un solo momento de mí. Es por ellos que soy lo que soy ahora. Los amo con todo mi corazón.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por bendecirme la vida, por guiarme a diario en mi existencia, por ser el apoyo y fortaleza en aquellos momentos de dificultad y de debilidad.

Gracias a mis padres por ser los principales promotores de mis sueños, por confiar y creer siempre en mí, por los consejos, valores y principios que me han inculcado.

Agradezco a mi jefe y compañeros de trabajo del área de instrumentación de la Empresa Agroindustrial Tumán, por las enseñanzas y el apoyo brindado, al Ing. Carlos Leonardo Oblitas Vera asesor del proyecto de investigación quien ha guiado con sus conocimientos y paciencia este trabajo de investigación.

RESUMEN

El presente trabajo de investigación tuvo como objetivo principal el diseño de un sistema automático HMI/SCADA para controlar el tanque desaireador del área de calderos de la Empresa Agroindustrial Tumán y poder restablecer su funcionamiento.

Se utilizó el método de respuesta en frecuencia para la sintonización del controlador PID (Proporcional Integral Derivativo) del nivel del tanque. Además, se utilizó el estudio de metodologías de desarrollo de interfaces, utilizando el PLC SIMATIC S7 300 CPU 314 C-2 PN/DP, HMI SIMATIC KTP 1000 BASIC COLOR PN y el software de programación TIA PORTAL V13 de SIEMENS. Requiriendo para su implementación los equipos e instrumentos siguientes: 1 PLC, 1 HMI, 1 transmisor de presión diferencial, 2 transmisores de presión relativa, 2 válvulas de globo, 2 válvulas de mariposa, 2 electrobombas, 2 electroválvulas 5/2; 1 sensor RTD PT-100 y 1 transmisor de temperatura.

Al complementar los resultados obtenidos teóricamente mediante el método de respuesta en frecuencia con MATLAB y LabVIEW podemos verificar la respuesta del sistema y asegurar el eficiente funcionamiento del controlador PID de nivel del tanque desaireador.

Finalmente se concluye, que el sistema automático HMI/SCADA para el control del tanque desaireador, permite mantener un nivel estable garantizando satisfacer la demanda de agua de la caldera, elimina los gases disueltos presentes en el agua de alimentación en un 90% reduciendo de esta manera la corrosión de tuberías y puede elevar la temperatura del agua desaireada hasta los 130°C mejorando el rendimiento térmico de la caldera.

ABSTRACT

The main objective of this research work was the design of an automatic HMI / SCADA system to control the deaerator tank in the boiler area of the Tumán Agroindustrial Company and to restore its operation.

The frequency response method was used for tuning the tank level PID controller. In addition, use the study of interface development methodologies, using the SIMATIC S7 300 CPU 314 C-2 PN / DP PLC, SIMATIC KTP 1000 BASIC COLOR PN HMI and SIEMENS TIA PORTAL V13 programming software. Requiring the following equipment and instruments for its implementation: 1 PLC, 1 HMI, 1 differential pressure transmitter, 2 relative pressure transmitters, 2 globe valves, 2 butterfly valves, 2 electric pumps, 2 5/2 solenoid valves; 1 RTD PT-100 sensor and 1 temperature transmitter.

By complementing the results theoretically obtained through the frequency response method with MATLAB and LabVIEW, we can verify the system response and guarantee the efficient operation of the PID controller of the deaerator tank level.

Finally, it is concluded that the automatic HMI / SCADA system for the control of the deaerator tank, allows to maintain a stable level guaranteeing to satisfy the boiler water demand, eliminates the dissolved gases present in the feed water by 90% reducing this Corrosion of pipes and can raise the temperature of deaerated water to 130 ° C, improving the thermal efficiency of the boiler.

INDICE

FIRMA DEL JURADO	iii
DEDICATORIA.....	vi
AGRADECIMIENTOS.....	vii
RESUMEN	viii
ABSTRACT	ix
INTRODUCCIÓN.....	18
CAPÍTULO I.....	20
1.1. Aspecto informativo	21
1.1.1. Título.....	21
1.1.2. Personal Investigador	21
1.1.3. Área de Investigación.....	21
1.1.4. Lugar de ejecución	21
1.1.5. Duración.....	21
1.2. Aspectos de la investigación.....	22
1.2.1. Situación problemática	22
1.2.2. Antecedentes Bibliográficos	22
1.2.3. Formulación del problema científico.....	25
1.2.4. Objetivos.....	25
1.2.5. Justificación e importancia de la investigación	25
1.2.6. Hipótesis	26
1.3. Marco Teórico.....	26
1.3.1. Aguas de alimentación de calderas	26
1.3.1.1. Definición.....	26
1.3.1.2. Procedencia.....	26
1.3.1.3. Impurezas del agua y sus efectos.....	26
1.3.1.4. Efectos generales de las impurezas	27
1.3.2. Desaireadores	28
1.3.2.1. Definición.....	28
1.3.2.2. Tipos de desaireadores	28
1.3.3. Automatización Industrial	31
1.3.4. Sistemas de Control.....	32
1.3.4.1. Definición.....	32
1.3.4.2. Clasificación de los sistemas de control.....	32
1.3.4.3. Estrategias de control más frecuentes	33
1.3.5. Regulador PID	33

1.3.6.	Elementos de lazo de control.....	34
1.3.6.1.	Elementos primarios de medida	35
1.3.6.2.	Elementos transmisores.....	35
1.3.6.3.	Elementos indicadores	35
1.3.6.4.	Elementos controladores	35
1.3.6.5.	Elementos convertidores	35
1.3.6.6.	Elementos finales de control	35
1.3.7.	Modelado matemático de los sistemas de control	35
1.3.7.1.	Definición.....	35
1.3.7.2.	Sistemas lineales	36
1.3.7.3.	Sistemas lineales invariantes.....	36
1.3.7.4.	Función de transferencia	36
1.3.8.	Método de respuesta en frecuencia.....	37
1.3.8.1.	Margen de ganancia y de fase	38
1.3.8.2.	Frecuencia de ancho de banda.....	39
1.3.9.	Instrumentación industrial.....	40
1.3.9.1.	Definición.....	40
1.3.9.2.	Medición de presión.....	40
1.3.9.3.	Medición de nivel.....	43
1.3.9.4.	Medición de temperatura.....	44
1.3.9.5.	Válvulas de control	45
1.3.9.6.	Controladores lógicos Programables (PLC).....	47
1.3.9.7.	Sistema SCADA.....	48
1.3.9.8.	Interfaz Humano Máquina (HMI).....	49
CAPÍTULO II.....		50
2.1.	Diagnóstico de la situación actual	51
2.2.	Sistema Actual	51
2.2.1.	Planta de control de agua calderas	51
2.2.2.	Electrobombas de transferencia	52
2.2.3.	Tanque desaireador	52
2.2.4.	Control de Nivel.....	53
2.2.5.	Medición y control de la temperatura.	55
2.2.6.	Turbobombas.....	55
2.2.7.	Transferencia al caldero 06.....	56
2.3.	Diseño del sistema	57
2.3.1.	Introducción	57
2.3.2.	Descripción del Sistema.....	57

2.3.3. Modelamiento matemático del sistema de control de nivel	57
2.3.3.1. Punto de equilibrio	60
2.3.2.2. Capacitancia del tanque	61
2.3.2.3. Ley de Balance de masas.....	61
2.4. Analisis del comportamiento dinámico del sistema de nivel del tanque desaireador	63
2.5. Diseño del controlador PID de nivel, método de respuesta en frecuencia	66
2.5.1. Análisis de la respuesta en frecuencia.....	67
2.5.2. Refinamiento	71
2.6. Materiales.....	73
2.6.1. Lista de instrumentos	73
2.6.2. Lista de equipos.....	73
2.7. Funcionamiento	73
2.7.1. Transmisor de Presión Diferencial.....	73
2.7.2. Transmisores de Presión Absoluta	74
2.7.3. Sensores y Transmisor de Temperatura	74
2.7.4. Controlador Lógico Programable PLC	74
2.7.5. Válvulas automáticas	74
2.7.5.1. Válvula de Nivel.....	74
2.7.5.2. Válvula de Temperatura	74
2.7.6. Lazos de Control	75
2.7.6.1. Lazo de control cerrado para el Nivel	75
2.7.6.2. Lazo de control abierto para la temperatura	75
2.8. Planos Industriales	76
2.8.1. Plano Mecánico.....	76
2.8.2. Plano P&ID	76
2.8.3. Planos Unifilares	76
2.9. Identificación de Señales de Control y Monitoreo	81
2.10. Especificación de la Instrumentación y software	81
2.10.1. Transmisores de presión SITRANS P de SIEMENS	82
2.10.2. Sensor RTD PT100	87
2.10.3. Transmisor de temperatura Yokogawa	88
2.10.4. PLC SIMATIC S7-314 C-2 PN/DP de SIEMENS	90
2.10.5. HMI KTP 1000 BASIC de SIEMENS.....	92
2.10.6. Válvula de globo con posicionador electro-neumático SAMSON	93
2.10.7. Válvula de mariposa ON/OFF Bray.....	95
2.10.8. Electrobomba	96

2.10.9. Software de programación TIA PORTAL V13	97
2.10.10. LabVIEW	98
2.11. Direccionamiento de Variables en el PLC	100
2.12. Programa para el PLC Siemens S7-314 C-2 PN/DP en TIA PORTAL V13 ..	100
2.12.1. Bloques de datos (DB)	101
2.12.1.1. BD_NIVEL_MAN	102
2.12.1.2. BD_PID_NIVEL	102
2.12.1.3. BD_PRESION	102
2.12.1.4. BD_PUMPS	103
2.12.1.5. BD_TEMPERATURA	103
2.12.1.6. LTI_SCALE, PIT_A_SCALE, PIT_V_SCALE, TIT_SCALE.	103
2.12.1.7 LCV_UNSCALE, TCV_UNSCALE.	103
2.12.2. Bloques de Funciones (FB)	104
2.12.2.1. ESCALE	105
2.12.2.2. UNSCALE.....	106
2.12.3. Función (FC)	106
2.12.3.1. CONTROL_NIVEL_MAN	107
2.12.3.2. CONTROL_TEMPERATURA.....	108
2.12.3.3. ENCENDIDO_BOMBAS	109
2.12.3.4. TX_PRESION	110
2.12.4. Bloque de organización (OB).....	110
2.12.4.1. PRINCIPAL	111
2.12.4.2. PID_NIVEL.....	112
2.13. Diseño del HMI SIEMENS KTP 1000 Basic color PN en TIA PORTAL V13	113
2.14. Diseño de control PID de nivel del tanque desaireador en LabVIEW.	114
2.14.1. Bloque de control	114
2.14.2. Bloque de diagramas	115
2.15. Evaluación económica	116
2.15.1. Costos de materiales para implementar.....	116
CAPÍTULO III	119
3.1. Resultados de la simulación.....	120
3.1.1. Simulación del control PID de nivel del tanque desaireador en LabVIEW	120
3.1.2. Simulación del sistema automático HMI/SCADA para el control del tanque desaireador en TIA PORTAL V13.	121
3.2. Discusión	122
CAPÍTULO IV	123

4.1. Conclusiones.....	124
CAPÍTULO V	126
5.1. Recomendaciones	127
APÉNDICE	128
BIBLIOGRAFÍA.....	136

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Unidades de presión.	41
Tabla 2: Lista de Instrumentos.	73
Tabla 3: Lista de equipos.....	73
Tabla 4: Señales de control y monitoreo.	81
Tabla 5: Datos técnicos valvula SAMSON 3241.	94
Tabla 6: Direccionamiento de variables PLC.....	100
Tabla 7: Costos de materiales para implementar.....	117
Tabla 8: Rentabilidad del proyecto.....	118

INDICES DE FIGURAS

Figura 1: Corrosión por oxígeno.....	27
Figura 2: Desaireador a vacío.....	28
Figura 3: Desaireador a presión.....	29
Figura 4: Elementos de lazo de control.....	34
Figura 5: Sistema con ganancia.....	38
Figura 6: Margen de ganancia y margen de fase.....	39
Figura 7: Válvula de control típica.....	45
Figura 8: Válvulas con obturador de movimiento lineal.....	46
Figura 9: Válvulas con obturador de movimiento rotativo.....	47
Figura 10: PLC compacto relé inteligente Zelio Logic.....	48
Figura 11: PLC modular europeo rx10.....	48
Figura 12: HMI.....	49
Figura 13: Foto planta de tratamiento de agua.....	51
Figura 14: Foto electrobombas de transferencia.....	52
Figura 15: Foto tanque desaireador.....	53
Figura 16: Foto 2 tanque desaireador.....	53
Figura 17: Foto miras de vidrio.....	54
Figura 18: Foto boya de nivel y controlador neumático.....	54
Figura 19: Foto bypass y válvula automática FISHER.....	54
Figura 20: Foto indicador de temperatura.....	55
Figura 21: Foto válvula manual de vapor.....	55
Figura 22: Foto turbobombas.....	56
Figura 23: Foto válvula automática de nivel del caldero 06.....	56
Figura 24: Diagrama de proceso control de nivel.....	58
Figura 25: Diagrama 2 de proceso control de nivel.....	59
Figura 26: Grafica del comportamiento dinámico del nivel del desaireador en MATLAB.....	63
Figura 27: Grafica 2 del comportamiento dinámico del nivel del desaireador en MATLAB.....	64
Figura 28: Grafica 3 del comportamiento dinámico del nivel del desaireador en MATLAB.....	64
Figura 29: Grafica 4 del comportamiento dinámico del nivel del desaireador en MATLAB.....	65
Figura 30: Grafica de la respuesta del sistema a la función escalón unitario en MATLAB.....	66
Figura 31: Grafica del comportamiento en frecuencia y fase del sistema en MATLAB.....	67
Figura 32: Grafica del valor de margen de fase del sistema en MATLAB.....	67
Figura 33: Grafica del comportamiento en frecuencia y fase del sistema con control PID en MATLAB.....	70
Figura 34: Grafica de la respuesta del sistema con control PID a la función escalón unitario en MATLAB.....	71
Figura 35: Grafica de la respuesta del sistema con control PID refinado a la función escalón unitario en MATLAB.....	72
Figura 36: Lazo de control cerrado.....	75
Figura 37: Lazo de control abierto.....	75
Figura 38: Transmisores de presión SITRANS P.....	82
Figura 39: Ubicación del transmisor de presión diferencial.....	85

Figura 40: Transmisor de presión de vapor, corriente vs presión.....	86
Figura 41: Transmisor de presión de agua, corriente vs presión.	86
Figura 42: Sensor RTD PT100.	87
Figura 43: Transmisor de temperatura Yokogawa YTA110.	88
Figura 44: Transmisor de temperatura, corriente vs presión.	90
Figura 45: PLC SIMATIC S7-314 C-2 PN/DP.....	90
Figura 46: HMI KTP 1000 BASIC COLOR PN.	92
Figura 47: Válvula de globo SAMSON 3241 con Posicionador electro-neumático.	93
Figura 48: Válvula de mariposa ON/OFF Bray con actuador neumático.	95
Figura 49: Electrobomba General electric worthington.	96
Figura 50: Logo TIA PORTAL V13 SIEMENS.....	97
Figura 51: Logo LabVIEW.....	98
Figura 52: Bloques de programa PLC.....	101
Figura 53: Bloque de datos de control manual de nivel.	102
Figura 54: Bloque de datos de control PID de nivel.	102
Figura 55: Bloque de datos de transmisores de presión.	102
Figura 56: Bloque de datos de bombas y válvulas ON/OFF.	103
Figura 57: Bloque de datos control de temperatura.	103
Figura 58: Bloque de escalamiento de entrada analógica de 4 a 20 mA.	104
Figura 59: Bloque de desescalamiento para salida analógica de 4 a 20 mA.....	104
Figura 60: Bloque de función SCALE.....	105
Figura 61: Bloque de función UNSCALE.	106
Figura 62: Función CONTROL_NIVEL_MAN.....	107
Figura 63: Función CONTROL_TEMPERATURA.	108
Figura 64: Función ENCENDIDO_BOMBAS.	109
Figura 65: Función TX_PRESION.	110
Figura 66: Bloque de organización PRINCIPAL.	111
Figura 67: Bloque de organización cyclic PID_NIVEL.....	112
Figura 68: Vista Imagen raíz HMI.....	113
Figura 69: Diseño HMI tanque desaireador.	113
Figura 70: Bloque de control de LabVIEW diseño PID NIVEL.	114
Figura 71: Bloque de diagramas de LabVIEW diseño PID NIVEL.....	115
Figura 72: Simulación en LabVIEW diseño PID NIVEL.	120
Figura 73: Simulación del sistema automático HMI/SCADA para el control tanque desaireador en TIA PORTAL.	121

INTRODUCCIÓN

Actualmente la Empresa Agroindustrial Tumán cuenta con un tanque desaireador de marca NATIL BOARD fabricado en 1981, ubicado en el área de calderos el cual solo se utiliza para almacenar agua y transferirla a la caldera número 06. Los instrumentos y sistema de control que presenta el tanque desaireador son antiguos y en la mayoría de casos ya están obsoletos, el tanque desaireador debería de cumplir tres funciones fundamentales; como son la eliminación de gases disueltos presentes en el agua de alimentación, elevación de la temperatura del agua cercana al punto de ebullición y mantener estable el nivel del tanque. Por lo que se pretende reactivar el funcionamiento del tanque desaireador, modernizando sus instrumentos y sistema de control para garantizar un trabajo eficiente.

El presente proyecto tiene como finalidad presentar el diseño de un sistema automático HMI/SCADA para controlar el tanque desaireador, el cual estará compuesto por un transmisor de presión diferencial que será el encargado de sensar el nivel, dos transmisores de presión relativa para verificar el caudal de agua y flujo de vapor que ingresa al tanque, dos válvulas de globo una para controlar el caudal de entrada de agua al tanque desaireador y otra para la entrada de flujo de vapor, un sensor de temperatura RTD con su respectivo transmisor, cuatro Electrobombas; dos encargadas de suministrar el agua al tanque desaireador y las otras de transferir el agua a la caldera 06, un PLC para controlar el proceso y una pantalla HMI donde el operador podrá observar en tiempo real el proceso de desaireación.

Por otro lado, utilizaremos programación en lenguaje LADDER (KOP) para programar el PLC donde realizará un control PID para el nivel del tanque desaireador, además usaremos el protocolo de comunicación HART (4-20 mA) para controlar los sensores e instrumentos finales de control. Dicho trabajo cuenta con las coordinaciones y el apoyo necesario de las autoridades pertinentes de la Empresa Agroindustrial Tumán s.a.a. para poder ser implementado

En el Capítulo I: DISEÑO TEÓRICO; se presentan los hechos preliminares del proyecto tal como la situación problemática, justificación e importancia de la investigación, objetivos y formulación de la hipótesis. Además de acuerdo con la revisión bibliográfica, se define la base teórica que servirá para el desarrollo y sustento de la investigación.

En el Capítulo II: MÉTODOS Y MATERIALES; se detalla el tipo de diseño utilizado para el modelamiento del sistema, además se describen los equipos y materiales utilizados.

En el Capítulo III: RESULTADOS Y DISCUSIÓN, se expone toda la información relevante que se encontró en la investigación. Además, se realiza una contrastación de los resultados y la hipótesis.

En el Capítulo IV: CONCLUSIONES, se mostrarán las razones fundamentales y concretas por las que, el desarrollo del proyecto de investigación es viable y correcto.

En el Capítulo V: RECOMENDACIONES, se da a conocer algunas recomendaciones para su futura implementación.

Finalmente se puede concluir que el trabajo de investigación permite obtener un diseño de sistema automático HMI/SCADA para controlar el tanque desaireador eficiente; que permite la eliminación de gases disueltos presentes en el agua de alimentación, la elevación de la temperatura cercana al punto de ebullición y garantiza mantener un nivel estable.

DISEÑO TEÓRICO

CAPÍTULO I

1.1. Aspecto informativo

1.1.1. Título

“Diseño de un sistema automático HMI/SCADA para controlar el tanque desaireador del área de calderos de la Empresa Agroindustrial Tumán s.a.a.”

1.1.2. Personal Investigador

Autor

Nombre: Gianmarco Ricardo Fuentes Campos

E – mail: gianmarkofuentes@hotmail.com

Teléfono: 942110272

Asesor

Nombre: Carlos Leonardo Oblitas Vera

E – mail: oblitas75@hotmail.com

Teléfono: 929958517

1.1.3. Área de Investigación

Ingeniería Electrónica – Automatización y Control

1.1.4. Lugar de ejecución

Área de calderos de la Empresa Agroindustrial Tumán s.a.a.

1.1.5. Duración

04 meses

1.2. Aspectos de la investigación

1.2.1. Situación problemática

Actualmente la Empresa Agroindustrial Tumán cuenta con un tanque desaireador marca NATIL BOARD fabricado en 1981 ubicado en el área de calderos el cual solo se utiliza para almacenar agua y transferirla al caldero 06; ya que sus instrumentos y sistema de control son antiguos y en algunos casos ya están obsoletos, el tanque desaireador debe cumplir tres funciones principales; como son la eliminación de gases disueltos (CO₂, O₂ y N₂), la elevación de la temperatura del agua cercana al punto de ebullición, y garantizar la estabilidad del nivel del tanque. Por lo que se pretende reactivar el funcionamiento del tanque desaireador, modernizando sus instrumentos y sistema de control neumático por un sistema de control electrónico (sistema automático HMI/SCADA).

1.2.2. Antecedentes Bibliográficos

Título: Control y medida de nivel de líquido por medio de un sensor de presión diferencial.

Autor: John Alexander Arias Lozada

Lugar: Pereira-Colombia

Institución donde se realizó la investigación: Universidad Tecnológica de Pereira-Facultad de Tecnología

Objetivo:

Utilizar un sensor de presión diferencial el cual ejerce un control de nivel de líquido en un sistema hidráulico y así poder controlar los niveles de un sistema de llenado vaciado mediante un autómata programable Siemens.

Conclusiones:

La acción de control a ser usada en un proceso depende directamente del tipo de respuesta del proceso o planta. La respuesta del módulo de control de nivel es la de un sistema de primer orden, por lo tanto, la acción proporcional implementada para el controlador es suficiente para obtener resultados satisfactorios.

La programación del PLC usado es sencilla y permite enfocarse en la lógica del programa. Se debe tener en cuenta los tiempos de conversión y la toma de los datos ya que se podrían tener lecturas incorrectas lo que implica acciones de control no deseadas.

Los errores determinados en las mediciones y adquisición de datos de las diferentes variables dependen en su gran parte del método y dispositivos utilizados. Además, cuando se trabaja con dispositivos no lineales, estos contribuyen a que el sistema presente márgenes de errores en la salida misma.

Título: Diseño de una Mini planta intercambiadora de calor controlada por un Sistema HMI/SCADA, para la capacitación de los alumnos de la Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica de la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo.

Autor: Flores Sandoval Marcos Prudencio

Lugar: Lambayeque-Perú

Institución donde se realizó la investigación: Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo- Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica

Objetivo:

Diseñar una Mini planta intercambiadora de calor controlada por un sistema HMI/SCADA, para el adiestramiento de los alumnos de la escuela profesional de ingeniería electrónica de la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo.

Conclusiones:

Los sistemas SCADA están evolucionando conjuntamente con las tecnologías de la información, esto implica que el hardware ya no es limitante del mismo. Es el software el que le da el mayor valor agregado al sistema.

Las tecnologías de código abierto son igual de competentes e incluso más competentes que algunas tecnologías de pago. Esto significa que las tecnologías de código libre son una tendencia para la industria del software en el futuro.

Actualmente, la mayor limitante de los sistemas SCADA no se encuentra alojado en alguna característica del hardware o en el software. Las comunicaciones son un tema

muy delicado pues se debe manejar de tal modo que la seguridad no sea baja, ni que baje las velocidades de transferencia de datos.

Título: Identificación y diseño del controlador para un sistema de control de temperatura de agua en un tanque.

Autor: Diego Andrés Ochoa Moreno y Brean Sthill León Rodríguez

Lugar: Guayaquil-Ecuador

Institución donde se realizó la investigación: Escuela Superior Politécnica del Litoral-
Facultad de Ingeniería Eléctrica y Computación

Objetivos:

Diseñar y Construir un prototipo para poder simular a un proceso real.

Conocer los distintos tipos de controladores que existen, ya que pueden ser ON/OFF, de tipo proporcional o controladores PID.

Realizar la identificación a través del método paramétrico y así obtener la función de transferencia que represente al sistema.

Diseñar el controlador que cumpla con los requerimientos que se desee.

Conclusiones:

Es muy importante diseñar la señal de entrada, ya que con ella se realiza el proceso de la identificación. Otro punto a considerar es el tiempo de muestreo, ya que si se tiene un tiempo de muestreo muy lento hace perder la efectividad de los sistemas de control y si el tiempo de muestreo es muy rápido se obtendrán demasiados datos innecesarios.

Para poder obtener un buen controlador es necesario que el proceso de identificación se lo haya realizado con éxito, ya que si la identificación no es la adecuada se va a obtener un controlador ineficiente al momento de ponerlo a prueba con el prototipo.

Para el diseño del controlador se utilizó la aplicación sisotool de matlab, la cual nos permite analizar la respuesta del sistema a través del lugar geométrico de las raíces, aquí

se decide en cuanto tiempo quiere que se establezca el sistema y cuanto sea el porcentaje de sobre nivel. Finalmente se observó que el controlador cumple con lo deseado.

1.2.3. Formulación del problema científico

¿Cómo diseñar un sistema automático HMI/SCADA para controlar el tanque desaireador del área de caldero de la Empresa Agroindustrial Tumán s.a.a?

1.2.4. Objetivos

Objetivo general

Diseñar un sistema automático HMI/SCADA para controlar el tanque desaireador del área de calderos de la Empresa Agroindustrial Tumán s.a.a.

Objetivos específicos

Estudiar la situación problemática del tanque desaireador.

Definir las especificaciones técnicas de los parámetros a controlar.

Diseñar los planos P&ID, Unifilar y Mecánico del sistema.

Realizar el modelamiento matemático del sistema.

Diseñar el sistema de control.

Simular el proceso.

1.2.5. Justificación e importancia de la investigación

El proyecto de diseño de un sistema automático HMI/SCADA es de gran importancia para la formación de competencias y habilidades de todo ingeniero electrónico ligado a la rama de la automatización y control, ya que los sistemas de control de nivel y temperatura son usados en diversos campos industriales, como control de procesos químicos y del petróleo, control de represas, control de procesos alimenticios e infinidad de procesos y servirá como aporte a futuros colegas que estén comenzando en la gran carrera de ser un ingeniero electrónico.

Pero la gran importancia de este proyecto es aportar al desarrollo del ingenio azucarero, para que algún día vuelva a estar entre las mejores empresas azucareras del país como lo fue en antaño y contribuir de esta manera con mi alma mater Tumán.

1.2.6. Hipótesis

Al diseñar el sistema automático HMI/SCADA que controle el tanque desaireador, mantendremos un nivel estable, eliminaremos los gases disueltos y elevaremos la temperatura del agua de alimentación cerca al punto de ebullición.

1.3. Marco Teórico

1.3.1. Aguas de alimentación de calderas

1.3.1.1. Definición

Son aquellas aguas de cualquier procedencia que pueden utilizarse con ventaja y seguridad para alimentar calderas. (Bahamondes, 2010)

1.3.1.2. Procedencia

El agua en general procede de los ríos, lagos, pozos y agua de lluvia. Para los efectos de alimentación de generadores de vapor y fines industriales en general tienen primordial importancia los ríos y pozos. Por la misma índole de su procedencia no se puede evitar que ella arrastre y disuelva impurezas que la hacen inapta para el consumo humano y también industrial.

1.3.1.3. Impurezas del agua y sus efectos

Clasificación de las impurezas

Las impurezas que suele traer consigo el agua sin tratamiento proveniente de las fuentes descritas se pueden clasificar en la siguiente forma:

Sólidos en suspensión:

Barro (arcilla)

Materias orgánicas (madera y bacterias)

Arena (sílice)

Sales de calcio y magnesio

Cloruros de sulfatos alcalinos

Gases disueltos:

Aire (oxígeno-nitrógeno-dióxido de carbono)

Anhídrido carbónico

1.3.1.4. Efectos generales de las impurezas

El barro y otros sólidos se depositan en el fondo de la caldera, formando un depósito fangoso que facilita el sobre calentamiento de las planchas inferiores. Estos sobrecalentamientos provocan deformaciones que pueden ser altamente peligrosas.

Las sales de calcio y magnesio, disueltas en el agua con que se alimenta la caldera, se descomponen y se adhieren a las superficies más calientes de la caldera, especialmente en los tubos en forma de costras duras llamadas incrustaciones, lo que entorpece la transmisión de calor, permitiendo el sobrecalentamiento de estas superficies metálicas y posibles explosiones.

Los gases disueltos como el oxígeno nitrógeno y dióxido de carbono disueltos en el agua de alimentación de la caldera favorecen la corrosión de los componentes metálicos. La presión y la temperatura aumentan la velocidad con que se produce la corrosión. Este tipo de corrosión se manifiesta en forma de ranuras y tubérculos. (Bahamondes, 2010)

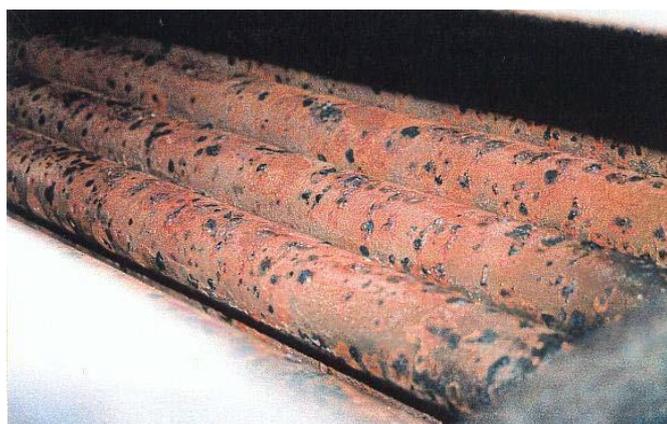


Figura 1: Corrosión por oxígeno

1.3.2. Desaireadores

1.3.2.1. Definición

Dispositivo mecánico diseñado para acondicionar el agua de alimentación de la caldera a concentraciones mínimas de oxígeno presentes en el agua, esto sumado al incremento de la temperatura del agua de alimentación a la caldera permitiendo maximizar el rendimiento térmico del generador de vapor. (Barreiro & Ghislieri, 2008)

1.3.2.2. Tipos de desaireadores

Desaireador a vacío

Un desaireador a vacío típico puede verse en la figura siguiente.

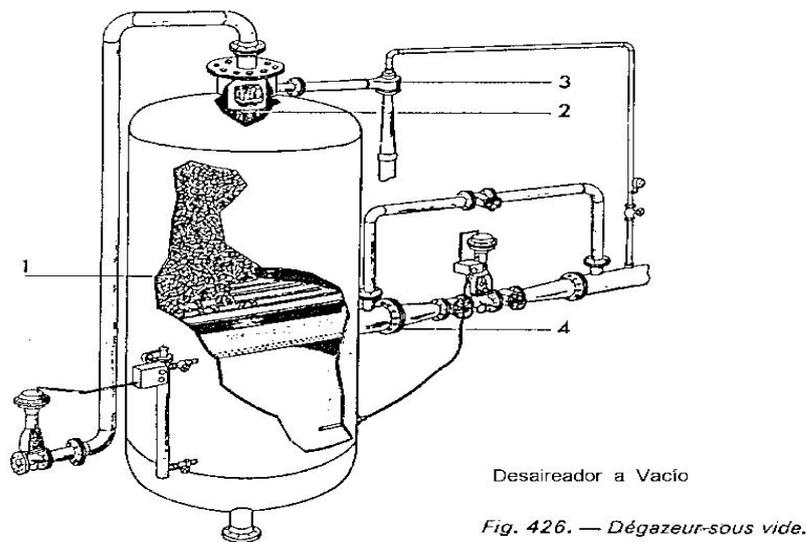


Figura 2: Desaireador a vacío.

Estos constan, básicamente de un recipiente cerrado, donde un relleno cerrado (1), sostenido por una parrilla y por encima de la cual una serie de pulverizadores (2) dispersan el agua, actúa como medio de intercambio líquido-vapor.

En el relleno se asegura el máximo contacto agua-vapor, favorecido, a su vez, por la dispersión que se logra en los pulverizadores.

Un eyector de vapor (3), o en algunos casos simplemente una bomba de vacío, mantienen el equipo a la presión correspondiente a la temperatura de ebullición del agua o muy próxima a esta.

El equipo debería funcionar a una presión total igual a la presión de vapor del agua más la suma de las presiones parciales de los gases que se están desprendiendo.

El eyector debe permitir que evacuen al exterior los incondensables que se están separando del agua más el vapor en equilibrio a esa presión.

Sin embargo, se inyecta vapor de agua a través de la cañería (4) ubicada debajo de la parrilla, para trabajar a mayor temperatura, lo que permite que el vacío no sea un tanto alto, y a su vez favorecer el desprendimiento de los incondensables.

El ingreso de vapor se regula a través de una válvula, por la medida de la temperatura del equipo.

A su vez, un control de nivel es el que regula el ingreso de agua a los pulverizadores. (Barreiro & Ghislieri, 2008)

Desaireador a presión

Un modelo de desaireador a presión puede apreciarse en la figura siguiente.

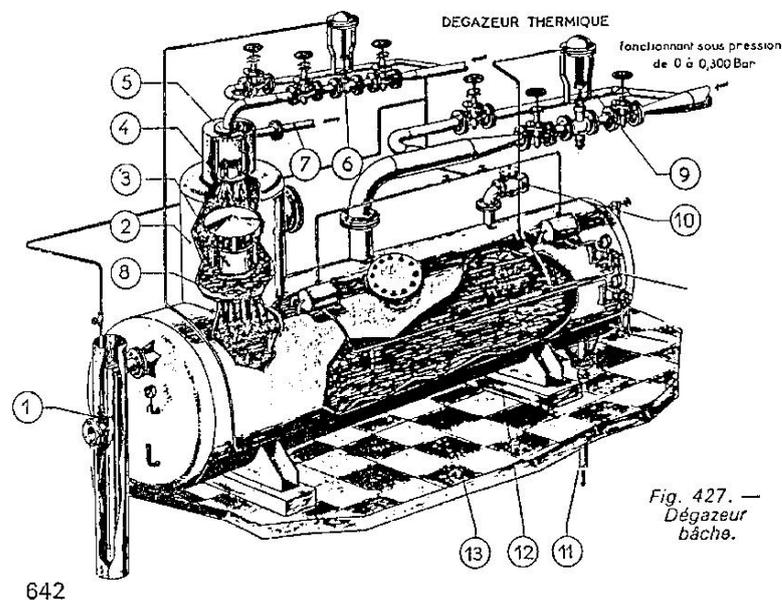


Figura 3: Desaireador a presión.

Este equipo consta de un domo o torre de desaireación (2), unido a un tanque desaireador o tanque de almacenamiento (12).

El proceso se efectúa prácticamente en dos etapas:

Intercambio liquido-gas en el domo o torre de desaireadora, entre el agua que ingresa a contracorriente con el vapor que abandona el tanque de almacenamiento.

Barboteo del vapor que ingresa al tanque de almacenamiento en el agua almacenada en este.

El agua ingresa a la torre a través de pulverizadores (4) y se encuentra, a contracorriente, con el vapor que abandona el tanque de almacenamiento, luego de recorrer los platos o relleno de la torre (3).

En este sector estamos prácticamente a la temperatura de ebullición del agua, en equilibrio a la presión de trabajo del equipo.

Se logra el máximo contacto agua-vapor a la temperatura más alta posible, para las condiciones de trabajo del equipo.

El máximo contacto se logra por la acción combinada de los pulverizadores y el relleno o platos. El último plato (8) está perforado de tal manera que el agua que abandona la torre entre al tanque de almacenamiento con un máximo contacto con el vapor que está ingresando.

En este momento ya se ha logrado más del 95% de desaireación, el resto se logrará en el barboteo de vapor en el agua almacenada en el tanque.

La salida del agua hacia el resto del proceso (generalmente alimentación al generador de vapor) se hace a través de la salida (11), en el extremo opuesto del ingreso, para evitar toda posibilidad de cortocircuitos.

Los incondensables (O_2 , N_2 , CO_2) ingresan junto a posibles restos de vapor a la cabeza del domo (5) donde precalientan el agua que va a ser pulverizada en (4).

En este punto los restos de vapor que pudieran escapar son condensados y devueltos como agua líquida al equipo, lográndose la máxima economía desde el punto de vista del uso del vapor.

Los incondensables salen por un pequeño orificio en la cañería (7).

Este orificio debe ser tal que permita la salida de los gases, pero mantenga la presión interna del equipo.

Un equipo funcionando correctamente puede ser controlado cuando se siente que el equipo sopla por ese orificio y no se aprecia escape de vapor.

El ingreso de agua está dado por el instrumento que controla el nivel del tanque de almacenamiento que comanda la válvula de alimentación (6).

Este instrumento de nivel es que puede fallar y provocar la inundación de la torre disminuyendo notoriamente la eficiencia del equipo. La presión interna del equipo se controla con el ingreso de vapor en la válvula (9). Puede darse el caso de que por una parada brusca haya una condensación repentina de todo el vapor en el equipo, lo que provocaría un súbito vacío.

En este caso actuaría el sistema de seguridad (10) al romperse una membrana.

En el caso de aumento brusco de presión, salta el sello de agua del sifón (1), que a su vez, y en función de su altura de agua, es el que regula la presión interna del equipo. (Barreiro & Ghislieri, 2008)

1.3.3. Automatización Industrial

En la actualidad la mayoría de las industrias poseen un proceso automático, que les permite mejorar la calidad de sus productos, la automatización industrial es el uso de sistemas o elementos computarizados y electromecánicos para fines industriales. Como una disciplina de la ingeniería más amplia que un sistema de control, abarca la instrumentación industrial, que incluye los sensores, los transmisores de campo, los sistemas de control y supervisión, los sistemas de transmisión y recolección de datos y las aplicaciones de software en tiempo real para supervisar y controlar las operaciones de plantas o procesos industriales. (Carlos A. Smith & Armando B. Corripio, 1991)

1.3.4. Sistemas de Control

1.3.4.1. Definición

Un sistema de control es una interconexión de componentes que forman una configuración del sistema que proporciona una respuesta deseada. Para representar esquemáticamente un sistema se utilizan los diagramas de bloques, en los que cada elemento o conjunto de elementos se simboliza con un bloque o rectángulo. Unas flechas indican el sentido de la información, que es único.

El control automático siempre está integrado por tres operaciones básicas:

Medida: la medida de la variable a controlar se realiza mediante un sensor, a veces, combinado con un transmisor o un convertidor para adaptar la señal.

Decisión: basándose en la medida, el controlador debe decidir qué hacer, para mantener la variable en el valor deseado.

Acción: como resultado de la decisión del controlador, el sistema debe emprender alguna acción. Normalmente la realiza el elemento final u órgano de control. (Ogata, 2010)

1.3.4.2. Clasificación de los sistemas de control

Los sistemas de control se clasifican en sistemas de lazo abierto y de lazo cerrado. La distinción la determina la acción de control, que es la que activa al sistema para producir la salida. (Ogata, 2010)

Sistema de control de lazo abierto

Un sistema de control de lazo abierto es aquel en el cual la salida no tiene efecto sobre la acción de control.

La habilidad que éstos tienen para ejecutar una acción con exactitud está determinada por su calibración. Calibrar significa establecer o restablecer una relación entre la entrada y la salida con el fin de obtener del sistema la exactitud deseada.

Estos sistemas no tienen el problema de la inestabilidad, que presentan los de lazo cerrado.

Sistema de control de lazo cerrado

Un sistema de control de lazo cerrado es aquel en el que la acción de control es en cierto modo dependiente de la salida.

Denominados sistemas de control realimentados o retroalimentados, se alimenta al controlador la señal de error de actuación, que es la diferencia entre la señal de entrada y la señal de realimentación; con el fin de reducir el error y llevar la salida a un valor deseado.

1.3.4.3. Estrategias de control más frecuentes

Cada sistema de control debe garantizar en primer lugar la estabilidad del comportamiento en lazo cerrado. En los sistemas lineales, esto se puede conseguir directamente mediante asignación de los polos. En los sistemas no lineales hay que recurrir a teorías específicas, habitualmente basadas en la Teoría de Aleksandr Lyapunov para asegurar la estabilidad sin tener en cuenta la dinámica interna del sistema. En función de la especificación de requisitos del sistema (es decir, de las condiciones que deseamos imponer a la salida) se debe escoger una estrategia de control u otra. A continuación, se presenta una lista de las técnicas de control más habituales:

De dos posiciones (todo-nada)

Proporcional de tiempo variable (anticipatoria)

Proporcional (P)

Proporcional-integral (PI)

Proporcional derivada (PD)

Proporcional-integral-derivada (PID)

1.3.5. Regulador PID

El regulador PID probablemente sea el diseño de control más empleado. "PID" son las siglas de Proporcional-Integral-Derivativo, y se refiere a los tres términos que operan sobre la señal de error para producir una señal de control.

Si $u(t)$ es la señal de control que se envía al sistema, $y(t)$ es la medición que se hace de la señal de salida y $r(t)$ es la salida deseada, el error se define como $e(t)=r(t) - y(t)$ y un regulador PID toma el aspecto

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t)dt + K_d \dot{e}(t)$$

El primer sumando aplica una señal proporcional al error. El segundo evalúa cual ha sido la evolución del error, y cobra más importancia cuando el error cometido es pequeño pero constante. El tercer término evalúa cual será la tendencia, y cobra más importancia cuando el error cometido se produce por instantes.

La dinámica deseada en lazo cerrado se obtiene ajustando los tres parámetros K_p , K_i y K_d . Este ajuste a menudo se hace iterando de manera empírica y sin conocimiento previo del modelo del sistema. A menudo se puede asegurar la estabilidad usando únicamente el término proporcional. Los reguladores PID son la clase más usada de sistemas de control: sin embargo, no se pueden usar en varios casos más complicados, especialmente si se consideran sistemas MIMO (Múltiple Input Múltiple Output, múltiples entradas y salidas). (Chuk, 2012)

1.3.6. Elementos de lazo de control

Todos los lazos de control poseen una cantidad de elementos, los cuales se clasifican en función de su ubicación en el proceso, así como en cuanto al trabajo que realizan.

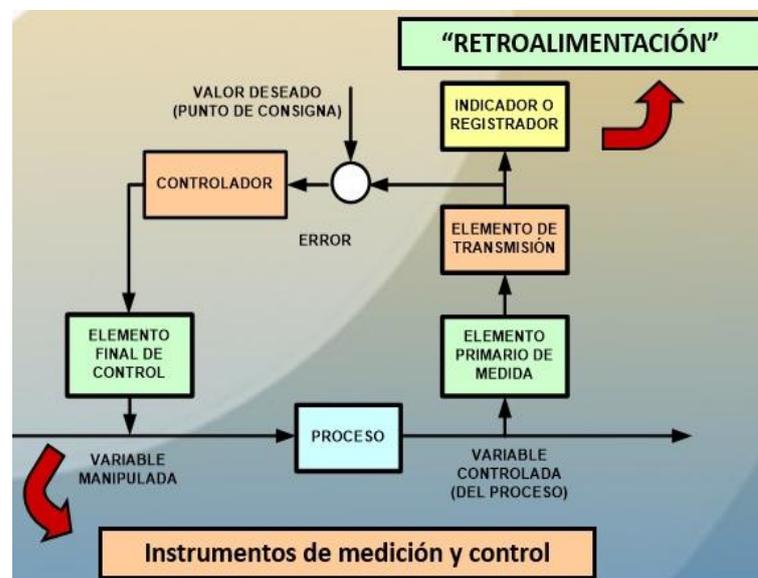


Figura 4: Elementos de lazo de control.

1.3.6.1. Elementos primarios de medida

Están en contacto con la variable y utilizan o absorben energía del medio controlado para dar al sistema de medición una indicación en respuesta a la variación de la variable controlada.

1.3.6.2. Elementos transmisores

Captan la variable del proceso a través del elemento primario y la transmiten a distancia en forma de señal neumática o electrónica.

1.3.6.3. Elementos indicadores

Los instrumentos indicadores disponen de un índice y de una escala graduada en la que puede leerse el valor de la variable.

1.3.6.4. Elementos controladores

Comparan la variable controlada (presión, nivel, temperatura) con un valor deseado y ejercen una acción correctiva de acuerdo con la desviación.

1.3.6.5. Elementos convertidores

Convierten el tipo de una señal de entrada en otro tipo como señal de salida

1.3.6.6. Elementos finales de control

Recibe la señal del controlador y modifica el agente de control, es decir, el estado de la variable manipulada. (Carlos A. Smith & Armando B. Corripio, 1991)

1.3.7. Modelado matemático de los sistemas de control

1.3.7.1. Definición

Un modelo matemático de un sistema dinámico se define como un conjunto de ecuaciones que representan la dinámica del sistema con precisión o, al menos, bastante bien. Téngase presente que un modelo matemático no es único para un sistema determinado. Un sistema puede representarse de muchas formas diferentes, por lo que

puede tener muchos modelos matemáticos, dependiendo de cada perspectiva. (Ogata, 2010)

1.3.7.2. Sistemas lineales

Un sistema se denomina lineal si se aplica el principio de superposición. Este principio establece que la respuesta producida por la aplicación simultánea de dos funciones de entradas diferentes es la suma de las dos respuestas individuales. Por tanto, para el sistema lineal, la respuesta a varias entradas se calcula tratando una entrada cada vez y sumando los resultados. Este principio permite desarrollar soluciones complicadas para la ecuación diferencial lineal a partir de soluciones simples.

1.3.7.3. Sistemas lineales invariantes

Una ecuación diferencial es lineal si sus coeficientes son constantes o son funciones sólo de la variable independiente. Los sistemas dinámicos formados por componentes de parámetros concentrados lineales invariantes con el tiempo se describen mediante ecuaciones diferenciales lineales invariantes en el tiempo, de coeficientes constantes. Tales sistemas se denominan sistemas lineales invariantes en el tiempo.

1.3.7.4. Función de transferencia

La función de transferencia de un sistema descrito mediante una ecuación diferencial lineal e invariante en el tiempo se define como el cociente entre la transformada de Laplace de la salida (función de respuesta) y la transformada de Laplace de la entrada (función de excitación) bajo la suposición de que todas las condiciones iniciales son cero. (Ogata, 2010)

Considérese el sistema lineal e invariante en el tiempo descrito mediante la siguiente ecuación diferencial:

$$a_0 y^{(n)} + a_1 y^{(n-1)} + \dots + a_{n-1} \dot{y} + a_n y = b_0 x^{(m)} + b_1 x^{(m-1)} + \dots + b_{m-1} \dot{x} + b_m x$$
$$(n \geq m)$$

Donde y es la salida del sistema y x es la entrada. La función de transferencia de este sistema es el cociente de la transformada de Laplace de la salida y la transformada de Laplace de la entrada cuando todas las condiciones iniciales son cero, o

Función de transferencia = $G(s) = \frac{\mathcal{L}[\text{salida}]}{\mathcal{L}[\text{entrada}]}$ | condiciones iniciales cero

$$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{b_0 s^m + b_1 s^{m-1} + \dots + b_{m-1} s + b_m}{a_0 s^n + a_1 s^{n-1} + \dots + a_{n-1} s + a_n}$$

A partir del concepto de función de transferencia, es posible representar la dinámica de un sistema mediante ecuaciones algebraicas en s . Si la potencia más alta de s en el denominador de la función de transferencia es igual a n , el sistema se denomina sistema de orden n -ésimo.

1.3.8. Método de respuesta en frecuencia

La respuesta de frecuencia de un sistema puede ser visto de dos maneras diferentes: a través del diagrama de Bode o través del diagrama de Nyquist. Ambos métodos deben mostrar la misma información, pero la diferencia radica en la manera en que la información se presenta. Vamos a estudiar para nuestro caso el de bode.

La respuesta de frecuencia es una representación de la respuesta del sistema a entradas sinusoidales a frecuencias diferentes. La salida de un sistema lineal a una entrada sinusoidal es una senoide de la misma frecuencia, pero con diferente magnitud y fase. La respuesta de frecuencia se define como la magnitud y las diferencias de fase entre las sinusoides de entrada y de salida. Con la respuesta en frecuencia de lazo abierto de un sistema, podemos predecir su comportamiento en circuito cerrado. (Gutierrez & Monasterio, 2019)

Para trazar la respuesta de frecuencia, creamos un vector de frecuencias (que varía entre cero o "DC" y el infinito) y calcular el valor de la función de transferencia de la planta en esas frecuencias. Si $G(s)$ es la función de transferencia de lazo abierto de un sistema y W es el vector de frecuencias, podemos graficar entonces, $G(j * w)$ vs W . Como $G(j * w)$ es un número complejo, podemos representar tanto en su magnitud y fase (el diagrama de Bode)

Los diagramas de Bode

Como se señaló anteriormente, el diagrama de Bode es la representación de la magnitud y fase de $G(j * w)$ (donde el vector w frecuencia contiene únicamente frecuencias positivas). (Gutierrez & Monasterio, 2019)

1.3.8.1. Margen de ganancia y de fase

Digamos que tenemos el siguiente sistema, donde K es una variable (constante) y la ganancia $G(s)$ es la planta en cuestión.

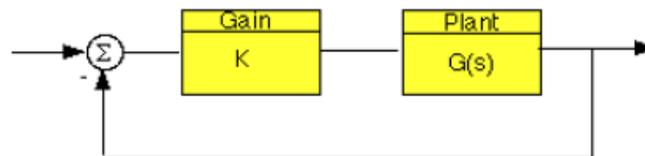


Figura 5: Sistema con ganancia.

Margen de ganancia

El margen de ganancia se define como el cambio en la ganancia de lazo abierto para que el sistema sea inestable. Los sistemas con mayores márgenes de ganancia pueden soportar mayores cambios en los parámetros del sistema antes de ser inestable en lazo cerrado. Una ganancia unitaria en magnitud es igual a ganancia de cero en decibeles.

$$GAN = 0\text{dB}$$

Margen de fase

El margen de fase se define como el cambio de fase de lazo abierto; paso necesario para hacer un sistema de circuito cerrado inestable.

$$MP = 180 - 0\text{dB}$$

El margen de fase también mide la tolerancia del sistema al tiempo de retardo. Si hay un intervalo de tiempo mayor que $180/W_{pc}$ en el lazo (donde W_{pc} es la frecuencia donde el cambio de fase es de 180 grados), el sistema se vuelve inestable en lazo cerrado. El tiempo de retraso se puede considerar como un componente adicional en la ruta de avance del diagrama de bloques que se añade a la fase del sistema, pero no tiene efecto en el incremento. Es decir, un retardo de tiempo puede ser representado como un bloque con una magnitud de 1 y fase $w * \text{time_delay}$ (en radianes / segundo).

El margen de fase es la diferencia de fase entre la curva de la fase y -180 grados en el punto correspondiente a la frecuencia que nos da una ganancia de 0 dB (ganancia de la cruz sobre la frecuencia, W_{gC}). Asimismo, el margen de ganancia es la diferencia entre la curva de magnitud y 0 dB en el punto correspondiente a la frecuencia que nos da una fase de -180 grados (la cruz de fase en la frecuencia, W_{pC}).

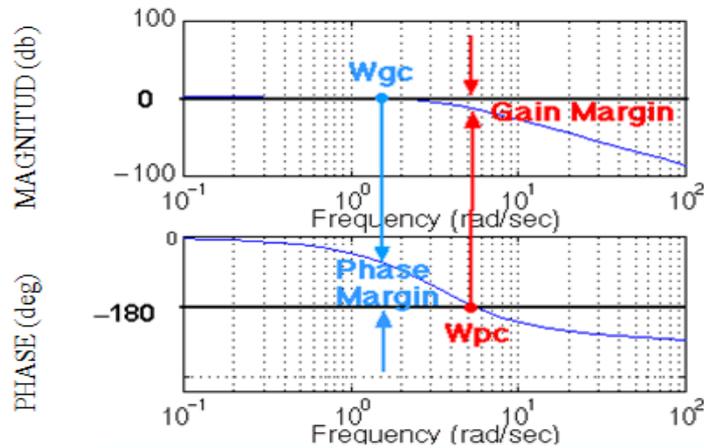


Figura 6: Margen de ganancia y margen de fase.

1.3.8.2. Frecuencia de ancho de banda

La frecuencia de ancho de banda se define como la frecuencia en donde la respuesta en lazo cerrado alcanza una magnitud igual a -3 dB. El ancho de banda de un sistema se encuentra matemáticamente a partir de la relación de circuito cerrado de amortiguamiento y la frecuencia natural del sistema.

Podemos relacionar la frecuencia de ancho de banda con la frecuencia natural de circuito cerrado y el factor de amortiguamiento. Así, podemos relacionar la frecuencia de ancho de banda para el factor de amortiguamiento y el aumento del tiempo de establecimiento con las siguientes ecuaciones.

$$W_{bw} = W_n \sqrt{(1 - 2\zeta^2) + \sqrt{\zeta^4 - 4\zeta^2 + 2}}$$

Rendimiento del lazo cerrado

Con el fin de predecir el rendimiento de lazo cerrado a partir de la respuesta de frecuencia en lazo abierto, tenemos que tener claro varios conceptos

El sistema debe ser estable a lazo abierto si vamos a diseñar a través de diagramas de Bode.

Si la frecuencia de cruce de ganancia es menor que la frecuencia de cruce de fase (es decir, $W_{gC} < W_{pC}$), entonces el sistema de circuito cerrado será estable.

Para los sistemas de segundo orden, la relación de lazo cerrado de amortiguamiento es aproximadamente igual al margen de fase dividido por 100, si el margen de fase es de entre 0 y 60 grados. Podemos utilizar este concepto con precaución si el margen de fase es superior a 60 grados.

Para los sistemas de segundo orden, una relación entre el coeficiente de amortiguamiento, la frecuencia de ancho de banda y tiempo de establecimiento es dada por una ecuación que se describe en el tema del ancho de banda.

Una primera estimación que puede utilizar es que el ancho de banda es aproximadamente igual a la frecuencia natural.

1.3.9. Instrumentación industrial

1.3.9.1. Definición

Un sistema de instrumentación es una estructura compleja que agrupa un conjunto de instrumentos, un dispositivo o sistema en el que se mide, unas conexiones entre estos elementos y, por último, y no menos importante, unos programas que se encargan de automatizar el proceso y de garantizar la repetibilidad de las medidas. (Creus, 2011)

1.3.9.2. Medición de presión

La presión es una fuerza por unidad de superficie y puede expresarse en unidades tales como pascal, bar, atmósferas, kilogramos por centímetro cuadrado y psi (libras por pulgada cuadrada). En el Sistema Internacional (S.I.) está normalizada en pascal de acuerdo con las Conferencias Generales de Pesas y Medidas. El pascal es 1 newton por metro cuadrado (1 N/m²), siendo el newton la fuerza que aplicada a un cuerpo de masa 1 kg le comunica una aceleración de 1 m/s². Como el pascal es una unidad muy pequeña, se emplean también el kilopascal (1 kPa = 10⁻² bar). (Creus, 2011)

	psi	inH2O	kg/cm2	cmH2O	bar	Pa
psi	1	27.68	0.0703	70.31	0.0689	6894.76
inH2O	0.0361	1	0.0025	2.54	0.0024	249
kg/cm2	14.22	393.7	1	1000	0.98	98066
cmH2O	0.0142	0.3937	0.001	1	0.0009	98.06
bar	14.5	401	1.02	1020	1	100 000
Pa	0.00014	0.0040	0.000 0102	0.01	0.000 01	1

Tabla 1: Unidades de presión.

Tipos de presiones

Presión absoluta

Se mide con relación al cero absoluto de presión

Presión atmosférica

Es la presión ejercida por la atmósfera terrestre medida mediante un barómetro. A nivel del mar, esta presión es próxima a 760 mm (29,9 pulgadas) de mercurio absolutos o 14,7 psia (libras por pulgada cuadrada absolutas) o bien 1,01325 bar o 1,03322 Kg/cm² y estos valores definen la presión ejercida por la atmósfera estándar.

Presión relativa

Es la diferencia entre la presión absoluta y la atmosférica del lugar donde se realiza la medición. Hay que señalar que al aumentar o disminuir la presión atmosférica, disminuye o aumenta respectivamente la presión leída, si bien ello es despreciable al medir presiones elevadas.

Presión diferencial

Es la diferencia entre dos presiones.

Vacío

Es la diferencia de presiones entre la presión atmosférica existente y la presión absoluta, es decir, es la presión medida por debajo de la atmosférica. Viene expresado en mm columna de mercurio, mm columna de agua o pulgadas de columna de agua. Las variaciones de la presión atmosférica influyen considerablemente en las lecturas del vacío.

Elementos de medición de presión

Elementos mecánicos

Podemos dividirlos en elementos primarios de medida directa que miden la presión comparándola con la ejercida por un líquido de densidad y altura conocidas (barómetro cubeta, manómetro de tubo en U, manómetro de tubo inclinado, manómetro de toro pendular, manómetro de campana) y en elementos primarios elásticos que se deforman con la presión interna del fluido que contienen. (Creus, 2011)

Elementos electromecánicos

Los elementos electromecánicos de presión utilizan un elemento mecánico combinado con un transductor eléctrico, que genera la correspondiente señal eléctrica. El elemento mecánico consiste en un tubo Bourdon, espiral, hélice, diafragma, fuelle o una combinación de los mismos que a través de un sistema de palancas convierte la presión en una fuerza o en un desplazamiento mecánico.

Los elementos electromecánicos se clasifican según el principio de funcionamiento en los siguientes tipos: resistivos, magnéticos, capacitivos, extensométricos y piezoeléctricos.

Elementos electrónicos de vacío

Los elementos electrónicos de vacío se emplean para la medida de alto vacío, son muy sensibles y se clasifican en los siguientes tipos:

Medidor McLeod.

Mecánicos – Tubo Bourdon, fuelle y diafragma.

Propiedades de un gas – Conductividad térmica.

Térmicos – Termopar, Pirani, bimetal.

Ionización – Filamento caliente, cátodo frío.

1.3.9.3. Medición de nivel

En la industria, la medición de nivel es muy importante, tanto desde el punto de vista del funcionamiento correcto del proceso como de la consideración del balance adecuado de materias primas o de productos finales.

La utilización de instrumentos electrónicos con microprocesador en la medida de otras variables, tales como la presión y la temperatura, permite añadir "inteligencia" en la medida del nivel, y obtener exactitudes en la lectura altas, del orden del $\pm 0,2\%$, en el inventario de materias primas o finales o en transformación en los tanques del proceso.

El transmisor de nivel "inteligente" hace posible la interpretación del nivel real (puede eliminar o compensar la influencia de la espuma en flotación del tanque, en la lectura), la eliminación de las falsas alarmas (tanques con olas en la superficie debido al agitador de paletas en movimiento), y la fácil calibración del aparato en cualquier punto de la línea de transmisión. (Creus, 2011)

Medidores de nivel de líquidos

Los medidores de nivel de líquidos trabajan midiendo, bien directamente la altura de líquido sobre una línea de referencia, bien la presión hidrostática, bien el desplazamiento producido en un flotador por el propio líquido contenido en el tanque del proceso, bien aprovechando características eléctricas del líquido o bien utilizando otros fenómenos.

Los primeros instrumentos de medida directa se dividen en: sonda, cinta y plomada, nivel de cristal, nivel de flotador, magnético, palpador, servooperado y magnetoestrictivo.

Los aparatos que miden el nivel aprovechando la presión hidrostática son:

Medidor manométrico

Medidor de tipo burbujeo

Medidor de presión diferencial de diafragma

El empuje producido por el propio líquido lo aprovecha el medidor de desplazamiento.

Los instrumentos que utilizan las características eléctricas del líquido son:

Medidor resistivo/conductivo

Medidor capacitivo

Medidor ultrasónico

Medidor de radar o microondas

Medidor de radiación

Medidor de láser

1.3.9.4. Medición de temperatura

La medida de la temperatura es una de las más comunes y de las más importantes que se efectúan en los procesos industriales. Casi todos los fenómenos físicos están afectados por ella. La temperatura se utiliza, frecuentemente, para inferir el valor de otras variables del proceso.

Existen diversos fenómenos que son influidos por la temperatura y que son utilizados para medirla:

Variaciones en volumen o en estado de los cuerpos (sólidos, líquidos o gases).

Variación de resistencia de un conductor (sondas de resistencia).

Variación de resistencia de un semiconductor (termistores).

La f.e.m. creada en la unión de dos metales distintos (termopares).

Intensidad de la radiación total emitida por el cuerpo (pirómetros de radiación).

Otros fenómenos utilizados en laboratorio (velocidad del sonido en un gas, frecuencia de resonancia de un cristal, etc.).

De este modo, se emplean los siguientes instrumentos: termómetros de vidrio, termómetros bimetálicos, elementos primarios de bulbo y capilar rellenos de líquido, gas

o vapor, termómetros de resistencia, termopares, pirómetros de radiación, termómetros ultrasónicos y termómetros de cristal de cuarzo.

1.3.9.5. Válvulas de control

En el control automático de los procesos industriales, la válvula de control juega un papel muy importante en el bucle de regulación. Realiza la función de variar el caudal de fluido de control que modifica, a su vez, el valor de la variable medida, comportándose como un orificio de área continuamente variable.

Dentro del bucle de control tiene tanta importancia como el elemento primario, el transmisor y el controlador. En la figura puede verse una válvula de control típica.

Se compone básicamente del cuerpo y del servomotor.

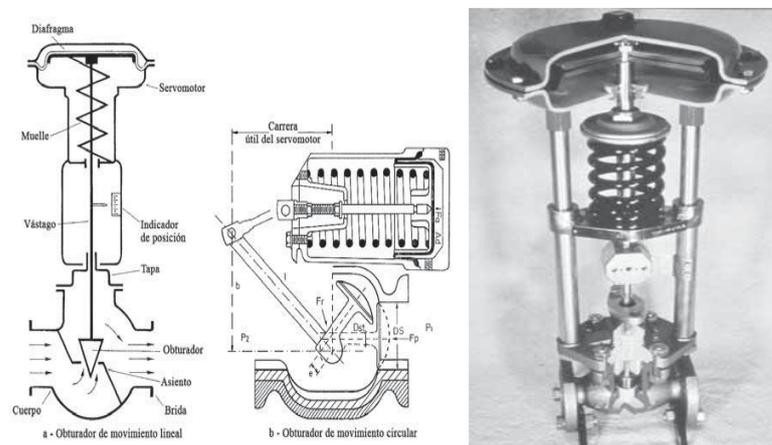


Figura 7: Válvula de control típica.

La válvula de control neumática consiste en un servomotor accionado por la señal neumática de 3-15 psi (0,2-1 Kg/cm²). El servomotor está conectado directamente a un vástago que posiciona el obturador con relación al asiento. La posición relativa entre el obturador y el asiento permite pasar el fluido desde un caudal nulo (o casi nulo) hasta el caudal máximo, y con una relación entre el caudal y la carrera que viene dada por las curvas características de la válvula.

Tipos de válvulas

Las válvulas pueden ser de varios tipos según sea el diseño del cuerpo y el movimiento del obturador. Básicamente, se clasifican en dos grandes grupos: válvulas con obturador de movimiento lineal y válvulas con obturador de movimiento rotativo.

Válvulas con obturador de movimiento lineal

Las válvulas de movimiento lineal, en las que el obturador se mueve en la dirección de su propio eje, se clasifican en válvula de globo, válvula en ángulo, válvula de tres vías mezcladora o diversora, válvula de jaula, válvula de compuerta, válvula en Y, válvula de cuerpo partido, válvula Saunders y válvula de compresión.

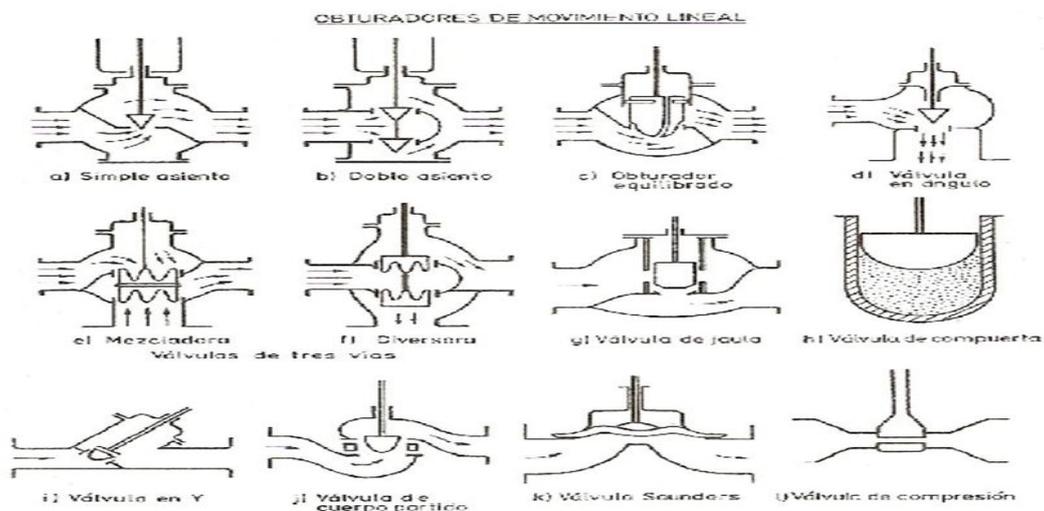


Figura 8: Válvulas con obturador de movimiento lineal.

Válvulas con obturador de movimiento rotativo

Las válvulas en las que el obturador tiene un movimiento rotativo se clasifican en: válvula de disco excéntrico rotativo (camflex), válvula de obturador cilíndrico excéntrico, válvula de mariposa, válvula de bola, válvula de macho, válvula de orificio ajustable y válvula de flujo axial.

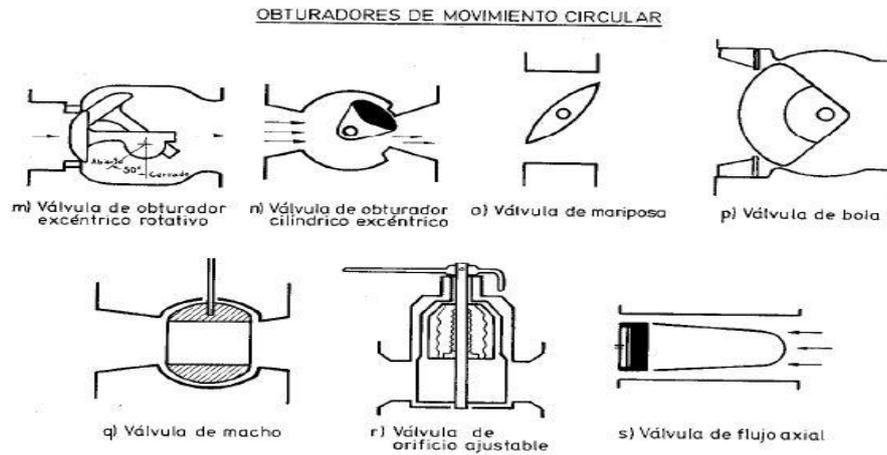


Figura 9: Válvulas con obturador de movimiento rotativo.

1.3.9.6. Controladores lógicos Programables (PLC)

Controlador Lógico Programable Es un dispositivo electrónico de control de procesos y se basa en una lógica, definida a través de un programa de computación. (Villajulca, 2012)

Clases de PLC

Debido a la gran variedad de tipos distintos de PLC, tanto en sus funciones, en su capacidad, en el número de I/O, en su tamaño de memoria, en su aspecto físico y otros, es que es posible clasificar los distintos tipos en varias categorías.

PLC Compacto

Son aquellos PLCs que utilizan poco espacio en su construcción y reúnen en la estructura básica del hardware todas las tarjetas electrónicas que describimos anteriormente, tal como la fuente de alimentación, la CPU, la memoria y las interfaces de E/S.

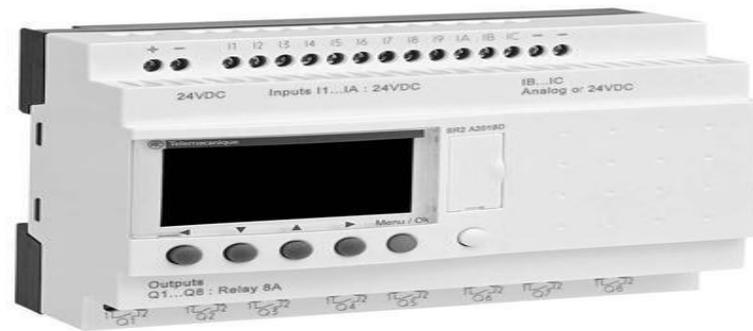


Figura 10: PLC compacto relé inteligente Zelio Logic.

PLC Modular

Son aquellos PLCs que pueden ser configurados (armados) de acuerdo con las necesidades, para “armar” al PLC utilizamos las tarjetas (o módulos) electrónicos, logrando mayor flexibilidad.



Figura 11: PLC modular europlc rx10.

1.3.9.7. Sistema SCADA

Del acrónimo Supervisory Control and Data Acquisition (Supervisión de Control y Adquisición de Datos).

Un sistema SCADA tipo consiste en múltiples dispositivos como Unidades Terminales Remotas (Remote Terminal Unit o simplemente RTU) enlazados con transmisores de proceso y elementos finales de control, implementando funciones de control básica como Start/Stop de motores y lazos de control PID. Estos dispositivos RTU se comunican

digitalmente con una Unidad Terminal Maestra (Master Terminal Unit o MTU) en una ubicación central donde operadores pueden monitorear los procesos y enviar comandos. (Villajulca, 2012)

1.3.9.8. Interfaz Humano Máquina (HMI)

Actúan como puerta de entrada para que los usuarios puedan controlar y monitorear los procesos industriales. A través de diseño personalizado de interfaces HMI se pueden utilizar para analizar las tendencias, generar informes, control sistemas y abordar cualquier alarma que puedan surgir durante el funcionamiento de la planta. (Creus, 2011)

Funciones principales

Adquisición de datos, para recoger, procesar y almacenar la información recibida.

Supervisión, para observar desde una pantalla la evolución de las variables de control.

Control, para modificar la evolución del proceso, actuando bien sobre los reguladores autónomos básicos (consignas, alarmas, menús, etc.) bien directamente sobre el proceso mediante las salidas conectadas.



Figura 12: HMI.

MÉTODOS Y MATERIALES

CAPÍTULO II

2.1. Diagnóstico de la situación actual

En la actualidad la Empresa Agroindustrial Tumán presenta múltiples daños y rupturas de las tuberías pirotubulares del caldero 06, debido a la corrosión que las aqueja y constantemente tienen que ser reemplazadas; esto debido a la falta de desaireación del agua de alimentación de la caldera. Por otro lado, el ingenio cuenta con un tanque desaireador de marca NATIL BOARD, ubicado en el área de calderos el cual solo se utiliza para almacenar agua y transferirla al caldero número 06. Los instrumentos y sistema de control que presenta el tanque desaireador son antiguos y en la mayoría de casos ya están obsoletos, el tanque desaireador debería de cumplir tres funciones fundamentales; como son la eliminación de gases disueltos presentes en el agua de alimentación, elevación de la temperatura del agua cercana al punto de ebullición y debe mantener el nivel del tanque desaireador estable.

2.2. Sistema Actual

2.2.1. Planta de control de agua calderas

El agua que se utiliza para alimentar al tanque desaireador proviene del río y pozos tubulares, esta agua se procesa en la planta de tratamiento donde se eliminan residuos sólidos e impurezas, pero esta agua aun contiene gases disueltos que deberían ser eliminados en el desaireador; el agua que llega al tanque desaireador oscila entre los 70 °C y 90 °C.



Figura 13: Foto planta de tratamiento de agua.

2.2.2. Electrobombas de transferencia

El agua que entra al desaireador llega con una presión de 10 bar (145 psi) aproximadamente y es impulsada por una de las dos las bombas de transferencia con las que cuenta el ingenio.

Marca: Hidrostral

Cantidad: 2

Capacidad: 65 l/s – 234 m³/h

Presión de descarga: 70 m columna de agua

Motor: eléctrico 75 HP, 1849 RPM 220/440 v.



Figura 14: Foto electrobombas de transferencia.

2.2.3. Tanque desaireador

El agua llega al tanque desaireador proveniente de la planta de tratamiento, donde solo se almacena y posteriormente se transfiere al caldero 06.

Marca: Natil Board #475

Año de fabricación: 1981

Vapor de trabajo: 30 psi (vapor de escape de turbo bombas temperatura 200°C)

Temperatura máxima que puede alcanzar el agua: 135 °C

Capacidad del tanque desaireador: 70 m³

Dimensiones: 12' x 23' (diámetro x longitud)



Figura 15: Foto tanque desaireador.

Una vez que el agua llega al tanque desaireador ingresa por la parte superior de la torre de desaireación y se dispersa a través de unos pulverizadores, donde debería ser puesta en contracorriente con vapor de escape de 30 psi que entra por la parte horizontal de la torre de desaireación con el fin de eliminar los gases disueltos que esta agua contiene.



Figura 16: Foto 2 tanque desaireador.

Luego de haberse eliminado los gases disueltos en la torre de desaireación el agua cae al tanque de almacenamiento del desaireador, donde debería ser calentado por el mismo vapor de escape (30 psi y 200 °C) a través de un intercambio de calor directo, por medio de inyección de vapor por toberas ubicadas en la parte inferior del tanque, donde en las condiciones ideales el agua debe alcanzar los 135 °C.

2.2.4. Control de Nivel

Actualmente el control de nivel del tanque desaireador es poco eficiente; lo realiza un controlador neumático antiguo y muchas veces requiere de la intervención del operador,

quien tiene que estar permanentemente pendiente del nivel que se puede apreciar a través de unas miras de vidrio y quien tiene que manipular con regularidad una válvula bypass para mantener el nivel estable.



Figura 17: Foto miras de vidrio.

El nivel se mide a través de una boya que se encuentra dentro de una tubería conectada al tanque de almacenamiento del desaireador y que a su vez este está conectado a un controlador neumático que se descilibra constantemente y que se encarga de accionar una válvula neumática marca FISHER con actuador de diafragma y válvula mariposa.



Figura 18: Foto boya de nivel y controlador neumático.



Figura 19: Foto bypass y válvula automática FISHER.

2.2.5. Medición y control de la temperatura.

La temperatura se mide con un sensor RTD (PT-100) y se muestra en un indicador de temperatura de marca ONROM ubicado al lado del tanque, que para ser visualizado el operador tiene que subir hasta la ubicación del tanque desaireador.

Por otro lado, la válvula que regula la entrada de vapor al tanque desaireador es manual y se encuentra ubicada al lado de éste se pretende controlar esta válvula a través de la pantalla HMI abriéndola y cerrando porcentualmente.



Figura 20: Foto indicador de temperatura.



Figura 21: Foto válvula manual de vapor.

2.2.6. Turbobombas

El agua que debería estar cerca al punto de ebullición es bombeada del tanque desaireador al domo superior de la caldera 06 por una de las 3 turbobombas del ingenio.

Marca: Ingersoll rand co

Turbina de vapor: Terry

Capacidad: 220.3 m³/h

Presión vapor de trabajo: 300 psi

Temperatura vapor de trabajo: 540 °F

Altura dinámica total: 289.5 m

Velocidad: 3550 rpm

Año de instalación: 1969



Figura 22: Foto turbobombas.

2.2.7. Transferencia al caldero 06

EL agua bombeada pasa por una válvula automática que controla el nivel del domo de la caldera, la demanda de agua en la caldera es de $129.28 \text{ m}^3/\text{h}$ en condiciones ideales, donde el agua es 10% más del vapor que produce la caldera.



Figura 23: Foto válvula automática de nivel del caldero 06.

2.3. Diseño del sistema

2.3.1. Introducción

A continuación, se describirá el funcionamiento del sistema de control automático HMI/SCADA para controlar el tanque desaireador y monitorizarlo. Posteriormente se realizará el modelamiento matemático del sistema de control de nivel calculando su función de transferencia y analizándola para determinar los valores de las constantes del controlador PID. Además, se ilustrarán:

Plano mecánico del tanque, Plano P&ID (plano de tuberías e instrumentación), Planos unifilar (planos eléctricos), Arquitectura de Control del Sistema, Identificación de Señales de Control y Monitoreo. Asimismo, se realizará una descripción del software y datos de análisis.

2.3.2. Descripción del Sistema

Para el siguiente proyecto se utilizará para el control automático del tanque desaireador un PLC SIMATIC S7-300 CPU 314C-2 PN/DP y un HMI SIMATIC KTP 1000 BASIC COLOR PN; ambos de SIEMENS, los cuales se encargarán de controlar y monitorizar las variables que intervendrán en el proceso.

Las variables por monitorear y controlar son las siguientes:

Nivel del Tanque desaireador (nivel en 70%).

Temperatura del tanque desaireador (superior a los 110°C).

2.3.3. Modelamiento matemático del sistema de control de nivel

Diagrama del proceso para el control de nivel.

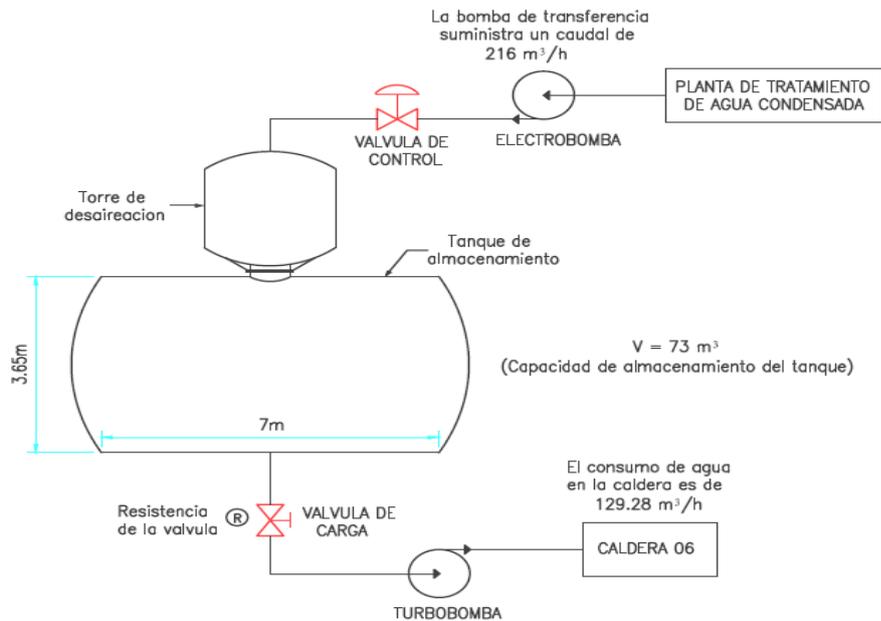


Figura 24: Diagrama de proceso control de nivel.

Para el caso del sistema se requiere que el nivel permanezca estable en el 70 % del volumen total para maximizar el rendimiento del tanque desaireador.

Entonces el 70% de 73m^3 es 51.1m^3

Determinamos la altura en la cual el volumen será 51.1m^3 y en donde el sistema estará en estado estacionario, donde habrá un punto de equilibrio entre el caudal de entrada y el caudal de salida.

Como se trata de un cilindro tenemos que:

$$V = A \times h$$

$$73\text{m}^3 = A \times 3.65\text{m}$$

$$A = 20\text{m}^2$$

V: Volumen del tanque

A: Área transversal del tanque

h: altura del tanque

Conociendo el área transversal del cilindro podemos calcular la altura para 51.1m^3

$$51.1\text{m}^3$$

$$51.1\text{m}^3 = 20\text{m}^2 \times h_e$$

$$h_e = 2.55\text{m}$$

h_e : altura en estado estacionario

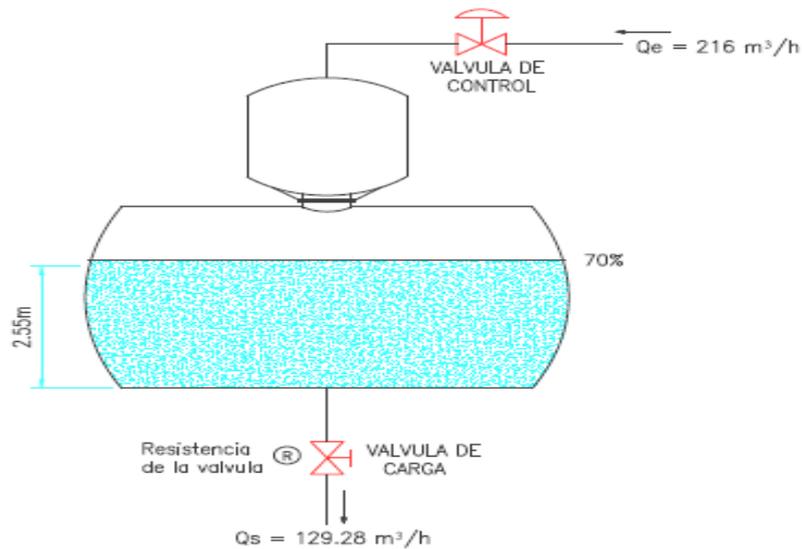


Figura 25: Diagrama 2 de proceso control de nivel.

Caudal por una válvula

$$Q_v = K_v A_s \sqrt{\Delta P}$$

Q_v : Flujo a través de la válvula

K_v : Constante de válvula

A_s : Área de paso

ΔP : Diferencia de presión a través de la válvula

Para el caso del sistema consideramos lo siguiente:

$$Q_s = K_s A_s \sqrt{2gh}$$

Q_s : Caudal de salida

K_s : Constante de válvula de salida

A_s : Área de paso

g : Gravedad

h : Altura del nivel

Para el caso del sistema la válvula de salida estará totalmente abierta.

$$Q_s = K_s A_s \sqrt{2gh} = 129.28 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$K_s \cdot 1 \sqrt{2(9.8)(2.55)} = 129.28 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$K_s = 0.005 \text{ m}^3/\text{s}$$

$Q_e = K_e A_e$ Consideramos un suministro constante para el caudal de entrada

Q_e : Caudal de entrada

K_e : Constante de válvula de entrada

A_e : Área de paso

Para el caso del sistema al comienzo del llenado del tanque la válvula de entrada estará totalmente abierta.

$$Q_e = K_e A_e = 216 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$K_e \cdot 1 = 216 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$K_e = 0.06 \text{ m}^3/\text{s}$$

2.3.3.1. Punto de equilibrio

El sistema presenta infinitos puntos de equilibrio, pero para el caso del problema el requerimiento es mantener el nivel al 70%, como calculamos anteriormente la altura para conseguir este nivel debe ser de $H_0 = 2.55\text{m}$; y para conseguir esto el área de paso de la válvula de entrada tiene que reducirse a un porcentaje que se calculara a continuación.

$$Q_e = Q_s$$

$$K_e A_e = K_s A_s \sqrt{2gh}$$

$$(0.06)A_e = (0.005)(1)\sqrt{2(9.8)(2.55)}$$

$$A_e = 0.59$$

Por lo tanto, la apertura de la válvula de entrada para el punto de equilibrio debe ser del 59%. Donde el punto de equilibrio está determinado por la siguiente ecuación.

$$H_0 = \frac{K_e^2 A_e^2}{2gK_s^2 A_s^2}$$

2.3.2.2. Capacitancia del tanque

Se define como el cambio necesario en la cantidad de líquido almacenado para producir un cambio de una unidad en el potencial (altura), la capacitancia también es igual al área transversal, si esta es constante para cualquier altura.

$$C = \frac{\text{cambio en el liquido almacenado, m}^3}{\text{cambio en la altura, m}}$$

$$C = \frac{73 \text{ m}^3}{3.65 \text{ m}}$$

$$C = 20 \text{ m}^2$$

2.3.2.3. Ley de Balance de masas

$$Q_e - Q_s = C \frac{dh}{dt}$$

$$C \frac{dh}{dt} = K_e A_e - K_s A_s \sqrt{2gh} \quad \dots \text{ Ecuación no lineal}$$

Linealizamos por Taylor para A_s constante

$$f(A_e, h) = C \frac{dh}{dt} \quad \dots \text{ ecuación 1}$$

$$f(A_e, h) \approx f(\bar{A}_e, \bar{h}) + \frac{\partial f}{\partial A_e} \Delta A_e \Big|_{(\bar{A}_e, \bar{h})} + \frac{\partial f}{\partial h} \Delta h \Big|_{(\bar{A}_e, \bar{h})}$$

$$\Delta A_s = A_e - \bar{A}_e$$

$$\Delta h = h - \bar{h}$$

$$C \frac{dh}{dt} = K_e A_e - K_s A_s \sqrt{2gh}$$

$$f(A_e, h) \approx K_e \bar{A}_e - K_s A_s \sqrt{2g\bar{h}} + K_e \Delta A_e - \frac{K_s A_s \sqrt{2g}}{2\sqrt{\bar{h}}} \Delta h$$

$$f(A_e, h) \approx C \frac{dh}{dt} \Big|_{(\bar{A}_e, \bar{h})} + K_e \Delta A_e - \frac{K_s A_s \sqrt{2g}}{2\sqrt{\bar{h}}} \Delta h$$

reemplazando la ecuacion 1

$$C \frac{dh}{dt} \approx C \frac{dh}{dt} \Big|_{(\bar{A}_e, \bar{h})} + K_e \Delta A_e - \frac{K_s A_s \sqrt{2g}}{2\sqrt{\bar{h}}} \Delta h$$

$$C \frac{dh}{dt} - C \frac{dh}{dt} \Big|_{(\bar{A}_e, \bar{h})} \approx K_e \Delta A_e - \frac{K_s A_s \sqrt{2g}}{2\sqrt{\bar{h}}} \Delta h$$

$$C \frac{d\Delta h}{dt} \approx K_e \Delta A_e - \frac{K_s A_s \sqrt{2g}}{2\sqrt{\bar{h}}} \Delta h$$

Aplicamos la transformada de laplace

$$\mathcal{L} \left\{ C \frac{d\Delta h}{dt} \right\} = \mathcal{L} \left\{ K_e \Delta A_e - \frac{K_s A_s \sqrt{2g}}{2\sqrt{\bar{h}}} \Delta h \right\}$$

$$CSH(S) = K_e A_e(S) - \frac{K_s A_s \sqrt{2g}}{2\sqrt{\bar{h}}} H(S)$$

$$\frac{H(S)}{A_e(S)} = \frac{K_e}{CS + \frac{K_s A_s \sqrt{2g}}{2\sqrt{\bar{h}}}}$$

Al reemplazar los valores de las constantes ya conocidos obtenemos la funcion de transferencia que representa una aproximacion lineal.

$$\frac{H(S)}{A_e(S)} = \frac{0.06}{20S + 0.007}$$

Convirtiendo a su forma canonica para un sistema de primer orden tenemos:

$$\frac{H(S)}{A_e(S)} = \frac{8.57}{2857.14S + 1}$$

2.4. Analisis del comportamiento dinámico del sistema de nivel del tanque desaireador

Utilizando la herramienta MATLAB podemos ver el comportamiento dinámico del nivel del tanque al variar la apertura de la válvula de entrada y mantener constante la válvula de salida constante y viceversa.

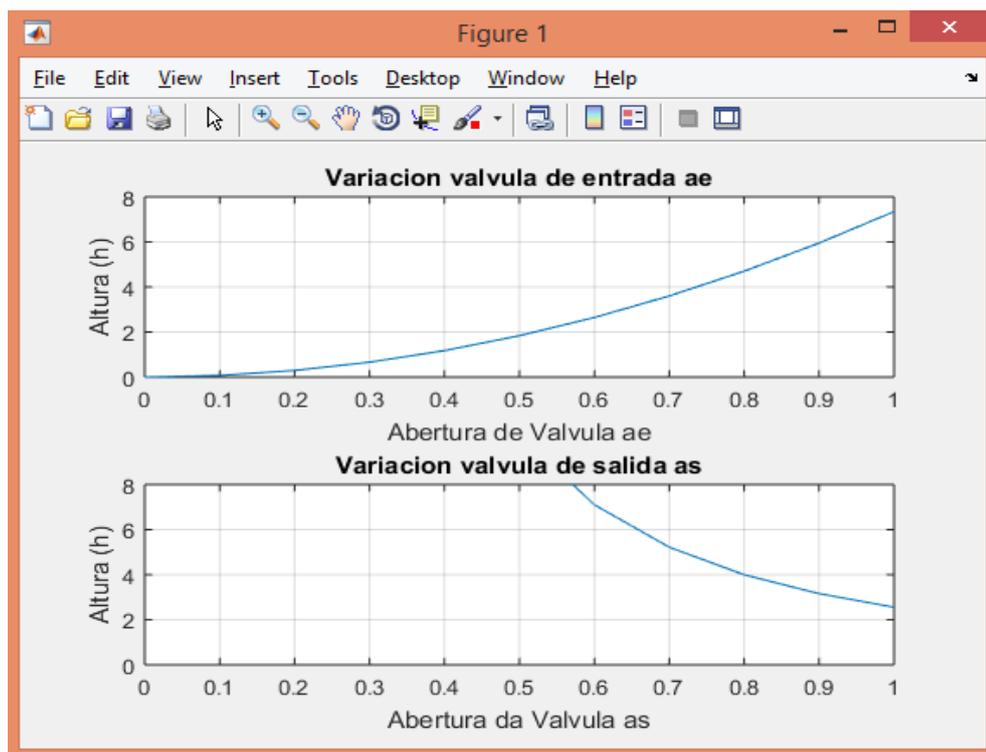


Figura 26: Grafica del comportamiento dinámico del nivel del desaireador en MATLAB.

Simulación en MATLAB del comportamiento del nivel del tanque, al variar la apertura de la válvula de entrada del 59% al 75% y manteniendo la apertura de la válvula de salida en 100%, que es donde trabajara.

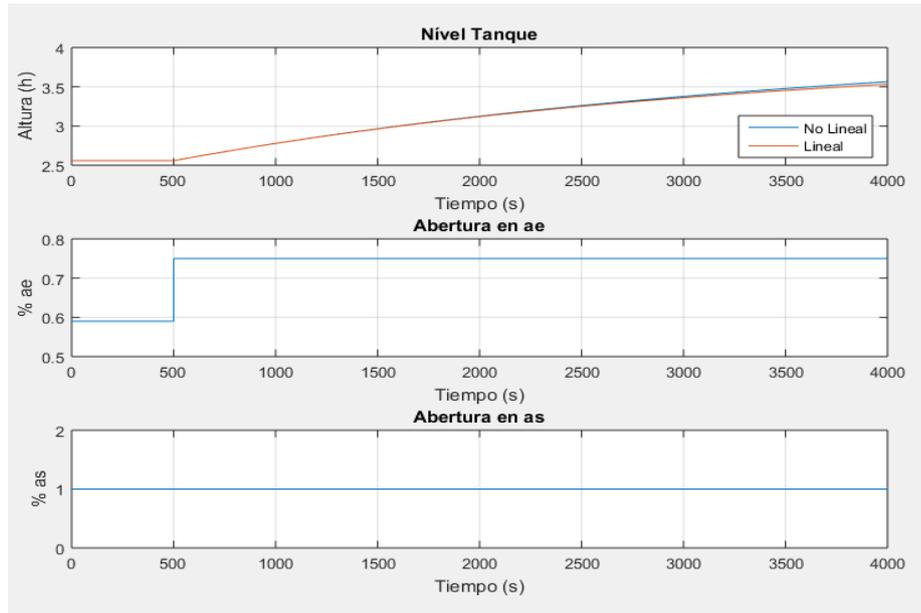


Figura 27: Grafica 2 del comportamiento dinámico del nivel del desaireador en MATLAB.

En la gráfica podemos apreciar una ganancia de nivel cuando se aumenta la apertura de la válvula de entrada y observamos una ligera la variación para el sistema lineal y no lineal.

Simulación en MATLAB del comportamiento del nivel del tanque, al variar la apertura de la válvula de entrada del 59% al 50% y manteniendo la apertura de la válvula de salida en 100%.

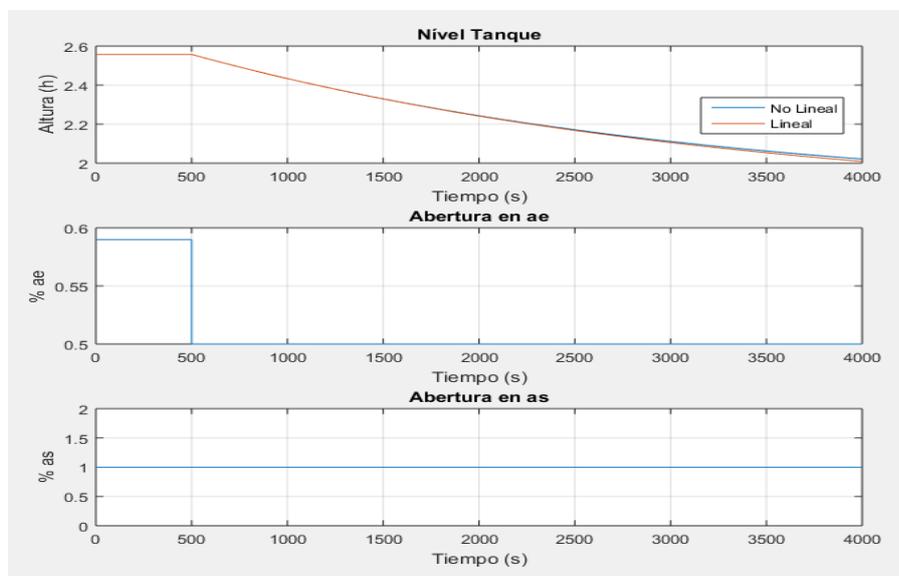


Figura 28: Grafica 3 del comportamiento dinámico del nivel del desaireador en MATLAB.

En la gráfica podemos apreciar una disminución en el nivel al reducir la apertura de la válvula de entrada, también observamos una ligera variación para el sistema lineal y no lineal

Ahora para el punto de equilibrio en 2.55m del nivel del tanque, pero con la apertura de válvula de entrada en 50% y la apertura de la válvula de salida en 85% vamos a variar la abertura de la válvula de salida de modo que quede completamente abierta 100 % y luego de un tiempo vamos a variar la apertura de la válvula de entrada para observar el comportamiento dinámico del sistema.

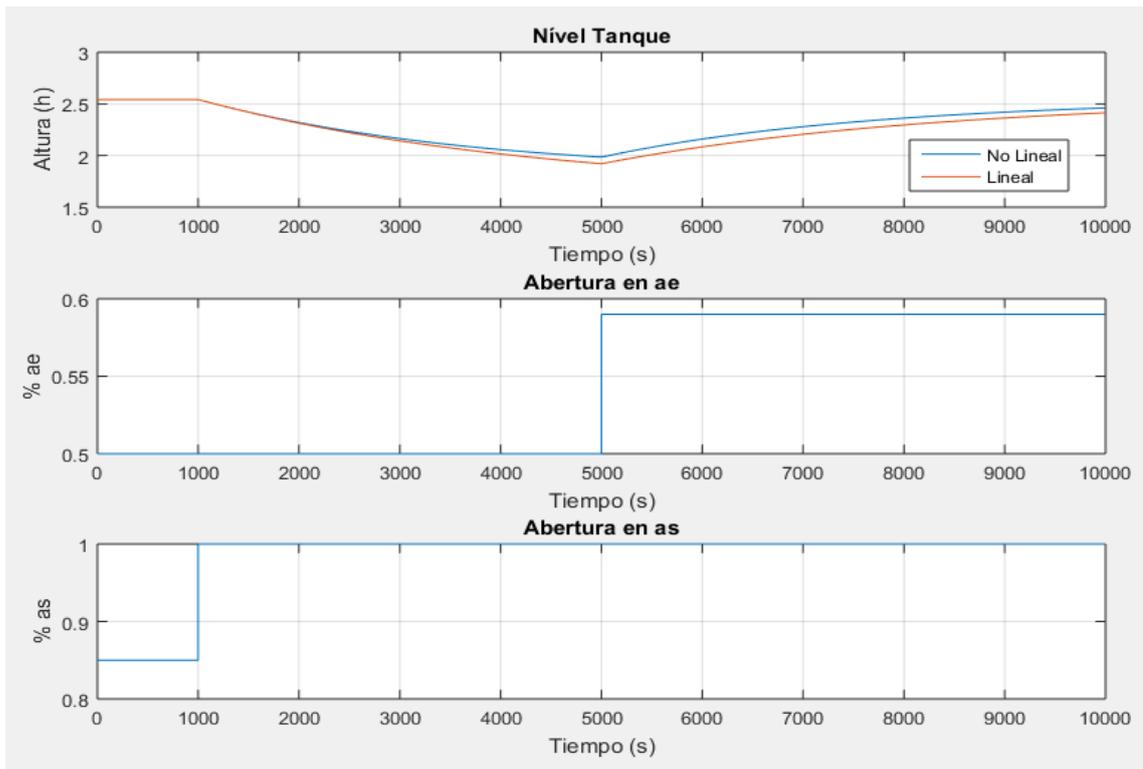


Figura 29: Grafica 4 del comportamiento dinámico del nivel del desaireador en MATLAB.

Se puede apreciar como el sistema tiende a perder nivel, cuando variamos la válvula de salida del 85% al 100% en el segundo 1000 y tiende a recuperar su nivel cuando abrimos la válvula de entrada del 50 % al 59% en el segundo 5000, manteniendo su punto de equilibrio en una altura aproximada de 2.55 m.

2.5. Diseño del controlador PID de nivel, método de respuesta en frecuencia

Función de transferencia del sistema de nivel del tanque desairador

$$G(s) = \frac{8.57}{2857.14s + 1}$$

Comparándolo con la forma canónica de un sistema de primer orden tenemos:

$$G(s) = \frac{K}{\tau s + 1}$$

Donde:

K: ganancia del sistema: 8.57

τ : constante de tiempo del sistema : 2857.14

Respuesta del sistema a la función escalón unitario utilizando MATLAB

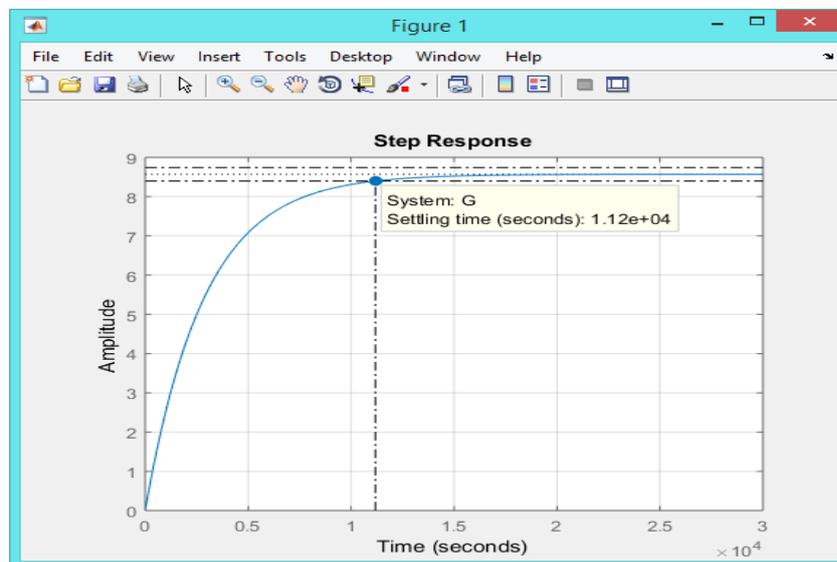


Figura 30: Grafica de la respuesta del sistema a la función escalón unitario en MATLAB.

El tiempo de establecimiento del sistema es de 11200 segundos

El error en estado estacionario está determinado por:

$$\%Ess = \frac{1}{1+k} ; \text{ Donde } k \text{ es la ganancia propia del sistema}$$

$$\%Ess = 10.44\%$$

2.5.1. Análisis de la respuesta en frecuencia

Utilizando MATLAB podemos observar el comportamiento en frecuencia y fase del sistema.

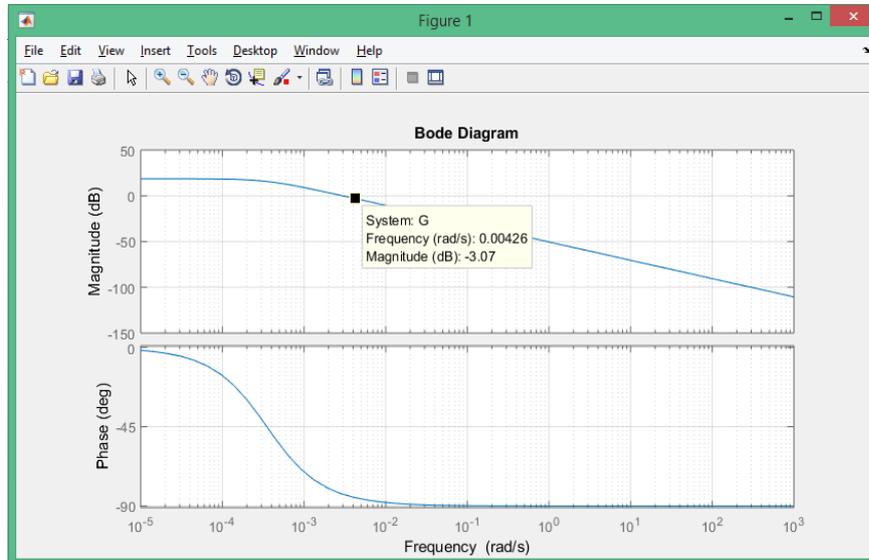


Figura 31: Grafica del comportamiento en frecuencia y fase del sistema en MATLAB.

En la figura se puede observar que a -3dB (mínimo margen de estabilidad) obtenemos un ancho de banda BW de 0.00426rad/s

Ahora podemos utilizar la función de MATLAB **margin** que nos muestra el valor de margen de fase PM.

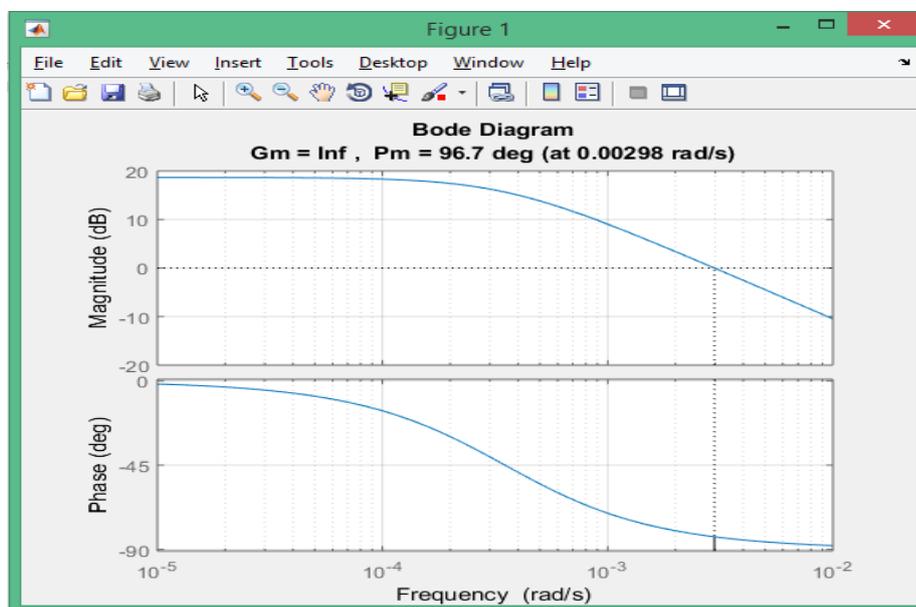


Figura 32: Grafica del valor de margen de fase del sistema en MATLAB.

En la figura se observa que el margen de fase es de 96.7 grados y el margen de ganancia es infinito. Estos valores son del sistema sin aplicar ningún tipo de control.

Para diseñar el controlador de nuestro sistema se tuvieron en cuenta las siguientes condiciones:

Error en estado estacionario lo mínimo posible

Sobrepaso entre 0 y 5 %

Bajar el tiempo de subida

El tiempo de establecimiento lo menor posible

El tiempo de establecimiento que deseamos para el sistema es de 828s, para lo cual tomamos un sobrepaso del 5% para encontrar un valor de coeficiente de amortiguamiento y ancho de banda necesario, en donde utilizaremos las siguientes formulas:

$$\zeta = PM/100$$

El valor del coeficiente de amortiguamiento en función del sobre paso es:

$$\zeta = -\frac{\ln\left(\frac{\%OS}{100}\right)}{\sqrt{\ln^2\left(\frac{\%OS}{100}\right) + \pi^2}}$$

La ecuación que relaciona el sobre paso y el coeficiente de amortiguamiento

$$\%OS = 100e^{\frac{-\zeta\pi}{\sqrt{1-2\zeta^2}}}$$

La ecuación que relaciona el ancho de banda en función del coeficiente de amortiguamiento es:

$$W_{BW} = W_n \sqrt{(1 - 2\zeta^2) + \sqrt{\zeta^4 - 4\zeta^2 + 2}}$$

$$W_n = \frac{4}{T_s \zeta^2}$$

Donde:

ζ : coeficiente de amortiguamiento

OS: sobre paso

W_{BW} : ancho de banda

W_n : ancho de banda natural

T_s : tiempo de establecimiento

Con las anteriores ecuaciones se encontraron los siguientes valores:

ζ : 0.6901

W_{BW} : 0.0080

PM: 69.01

Los datos encontrados son necesarios para encontrar la estabilidad que queremos para nuestro sistema, variando los valores de las constantes K_p (constante proporcional), K_d (constante derivativa) y K_i (constante integral) lo que sea necesario hasta que se encuentre el margen de fase deseado.

Con los valores de:

K_p : 2.67

K_i : 0.01

K_d : 0.02

Podemos calcular utilizando MATLAB el nuevo ancho de banda que tendrá el controlador, el margen de ganancia y de fase:

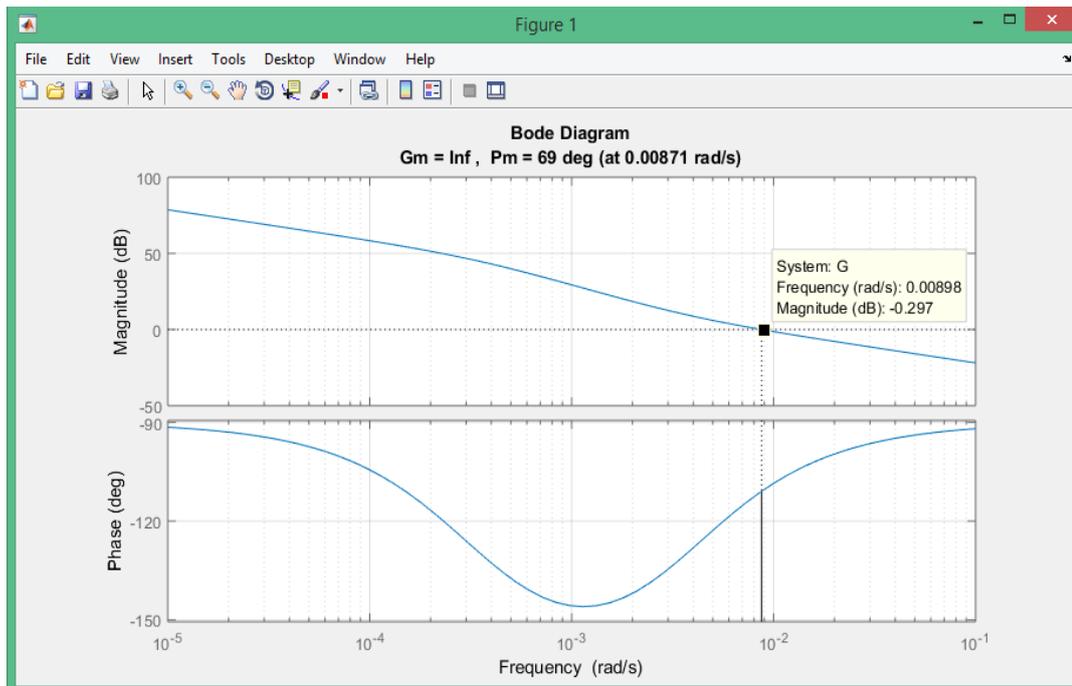


Figura 33: Grafica del comportamiento en frecuencia y fase del sistema con control PID en MATLAB.

En esta grafica se puede ver que el ancho de banda (BW) 0.00871 rad/s se encuentra cerca al valor requerido, con lo que se mejora nuestro tiempo de subida.

El valor de PM es 69 deg que es adecuado para un sobre paso del 5%, de acuerdo a la relación mostrada antes donde el coeficiente de amortiguamiento se relaciona con el sobre paso y el margen de fase.

Entonces la función de transferencia con el controlador PID y la del sistema en lazo cerrado quedarían como sigue:

$$G_{PID}(S) = \frac{0.1714s^2 + 22.88s + 0.0857}{2857s^2 + s}$$

$$G_{lc}(S)_{PID} = \frac{0.1714s^2 + 22.88s + 0.0857}{2857s^2 + 23.88s + 0.0857}$$

Ahora observemos la respuesta del sistema en lazo cerrado con el controlador PID.

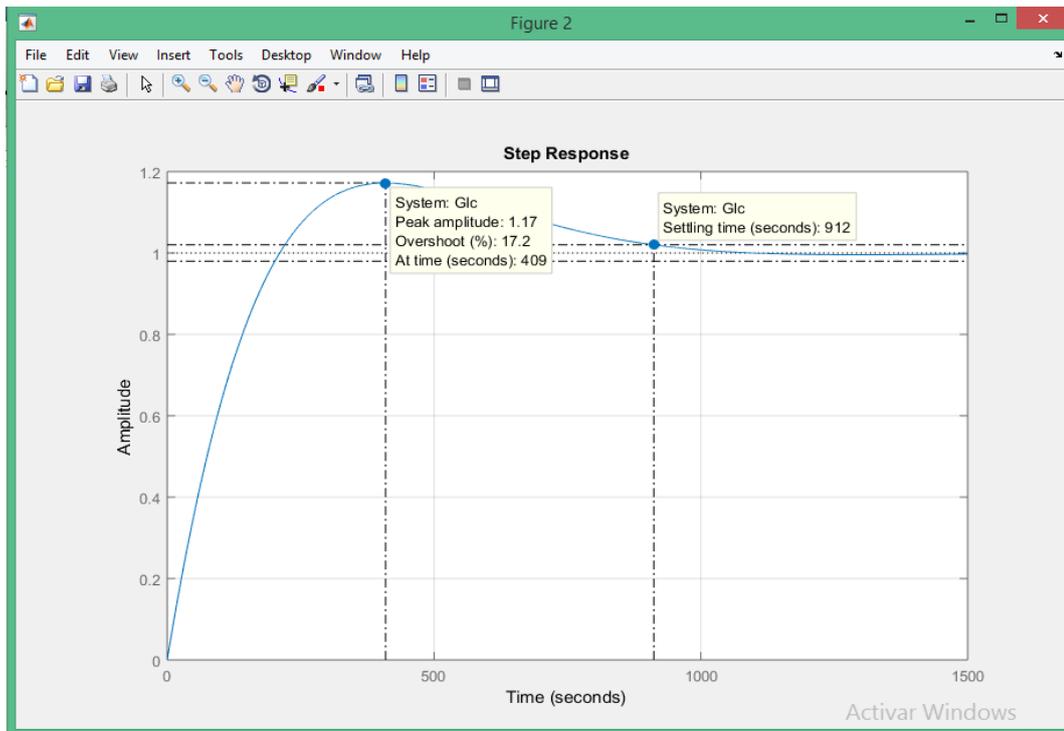


Figura 34: Grafica de la respuesta del sistema con control PID a la función escalón unitario en MATLAB.

Vemos que el tiempo de establecimiento para el sistema es de 912 segundos muy cercano al tiempo de establecimiento que deseamos con anterioridad que era de 828 segundos. Además, se observa una respuesta pico de amplitud 1.17 con un sobrepaso de 17.2% lo ideal es que el sistema tenga un sobrepaso no mayor al 5% para garantizar estabilidad al sistema, por lo que se procederá a realizar un refinamiento.

2.5.2. Refinamiento

Con nuevos valores de las constantes:

K_p1 : 5.073

K_i1 : 0.005

K_d1 : 0.01

Utilizamos MATALAB para observar la nueva respuesta del sistema en lazo cerrado con el controlador PID Refinado.

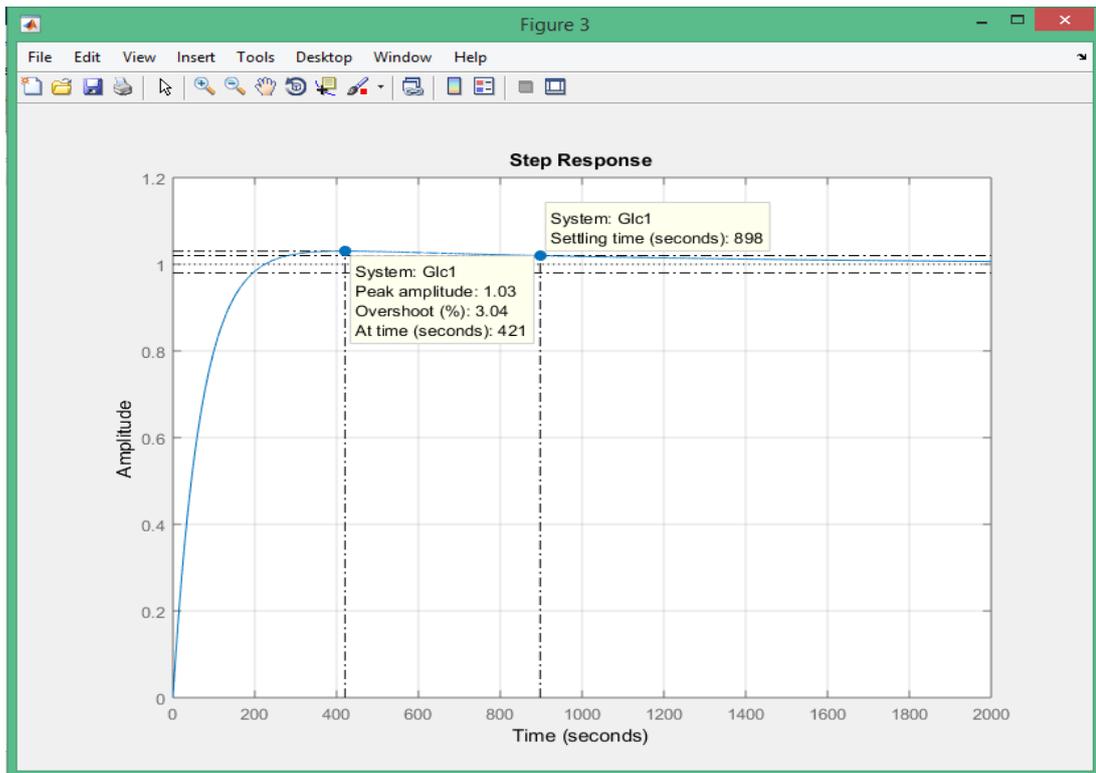


Figura 35: Grafica de la respuesta del sistema con control PID refinado a la función escalón unitario en MATLAB.

Podemos observar que el tiempo de establecimiento para el sistema es de 898 segundos ahora más cercano al tiempo de establecimiento que deseamos con anterioridad que era de 828 segundos. Además, se observa que la nueva respuesta pico tiene una amplitud de 1.03, con un sobrepaso de 3.04% menor al 5 % y que es ideal para que el sistema se mantenga estable y no oscile ante diferentes perturbaciones.

Por lo tanto, se concluye que estos valores de las constantes K_p , K_i y K_d son las ideales para el controlador PID.

Entonces la Función de transferencia con el controlador PID quedaría como sigue:

$$G_{PID}(S) = \frac{0.0857s^2 + 43.48s + 0.04285}{2857s^2 + s}$$

Y la Función de transferencia con el controlador PID en lazo cerrado quedaría como sigue:

$$Glc(S)_{PID} = \frac{0.0857s^2 + 43.48s + 0.04285}{2857s^2 + 44.48s + 0.04285}$$

2.6. Materiales

2.6.1. Lista de instrumentos

Instrumento	Ubicación
Transmisor de Presión Diferencial (Nivel)	Tanque de almacenamiento del desaireador.
Sensor y Transmisor de Temperatura	Tanque de almacenamiento del desaireador
Transmisor de Presión Relativa	Tubería de entrada de agua
Transmisor de Presión Relativa	Tubería de entrada de vapor

Tabla 2: Lista de Instrumentos.

2.6.2. Lista de equipos

Equipos	Marca	HP	Tipo	Caudal	Presión
Electrobomba	Hidrostal	75	Centrifuga	234 m ³ /h	70 mca
Electrobomba	Hidrostal	75	Centrifuga	234 m ³ /h	70 mca
Electrobomba	General electric worthington	400	Centrifuga	149.88 m ³ /h	439 mca
Electrobomba	General electric worthington	400	Centrifuga	149.88 m ³ /h	439 mca

Tabla 3: Lista de equipos.

2.7. Funcionamiento

2.7.1. Transmisor de Presión Diferencial

Sera el encargado de sensar el nivel continuamente del tanque desaireador. El cual será monitorizado por el sistema SCADA a través de una pantalla HMI, esta señal nos servirá para visualizar en porcentaje el volumen de agua dentro del tanque desaireador.

2.7.2. Transmisores de Presión Absoluta

Serán dos y estarán encargados de medir la presión con la que ingresan el agua de transferencia y el vapor de calentamiento al tanque desaireador, estos valores serán monitorizados en la pantalla HMI y servirán para verificar un funcionamiento eficiente.

Los valores estándar de las presiones deben estar cercanas a 30 psi para el caso del vapor y 80 psi para el caso del agua.

2.7.3. Sensores y Transmisor de Temperatura

Encargados de sensar la temperatura del agua desaireada dentro del tanque de almacenamiento y transmitirla al controlador; dicha temperatura será mostrada en la pantalla HMI.

2.7.4. Controlador Lógico Programable PLC

Encargado de adquirir las señales de los sensores, así como los parámetros de instrucción del operador a través del HMI y procesarlas para realizar una acción de control sobre las válvulas de nivel y temperatura, electrobombas y válvulas ON/OFF.

2.7.5. Válvulas automáticas

2.7.5.1. Válvula de Nivel

Será la encargada de regular el caudal de entrada de agua al tanque desaireador, para mantener un nivel estable según se establezca en el Set Point; se requiere que el nivel se mantenga estable en el 70 % del volumen total del tanque de almacenamiento del desaireador.

Además de ser controlada automáticamente; se podrá controlar de forma manual para abrirla y cerrarla porcentualmente desde la pantalla HMI.

2.7.5.2. Válvula de Temperatura

Encargada de regular el flujo de vapor que entrara al tanque desaireador, para calentar el agua y para realizar el proceso de desaireación. Se requiere que la temperatura del agua sea cercana al punto de ebullición 120 °C aproximadamente.

Sera controlada desde el HMI de forma manual, abriéndola y cerrándola porcentualmente.

2.7.6. Lazos de Control

2.7.6.1. Lazo de control cerrado para el Nivel

Se presenta el Lazo de control cerrado para el nivel del tanque desaireador, donde se censa el nivel y se compara con un valor de consigna a través de un controlador PID que toma una acción de control, para corregir el nivel regulando la abertura de la válvula.

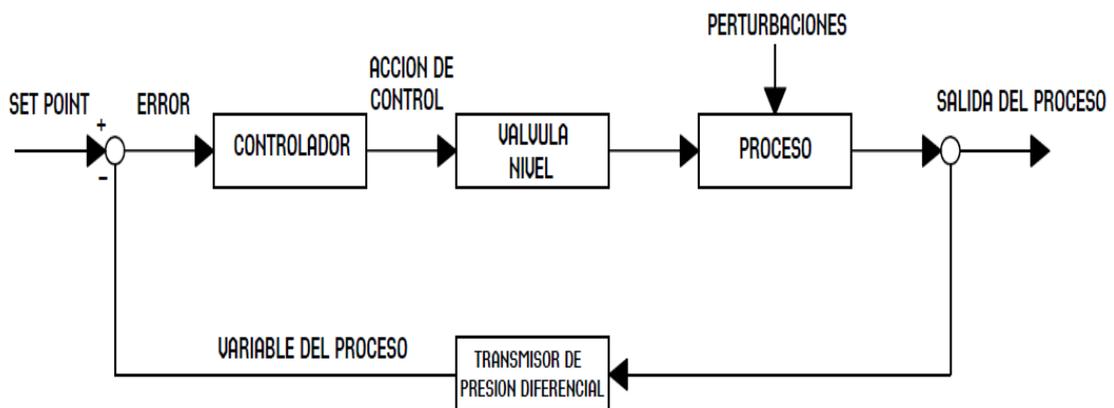


Figura 36: Lazo de control cerrado.

2.7.6.2. Lazo de control abierto para la temperatura

Se presenta el Lazo de control abierto para la temperatura del agua del tanque desaireador, donde a través del HMI se asigna un valor porcentual que será escalado y normalizado en el PLC el cual procederá a regular la abertura de la válvula según lo establecido.

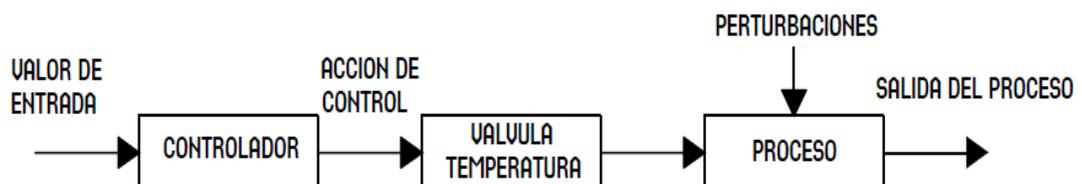


Figura 37: Lazo de control abierto.

2.8. Planos Industriales

A continuación, se presentan los planos para la implementación del sistema automático HMI/SCADA para el control del tanque desaireador.

2.8.1. Plano Mecánico

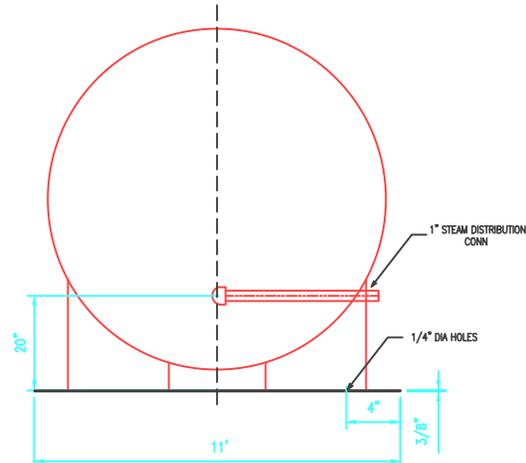
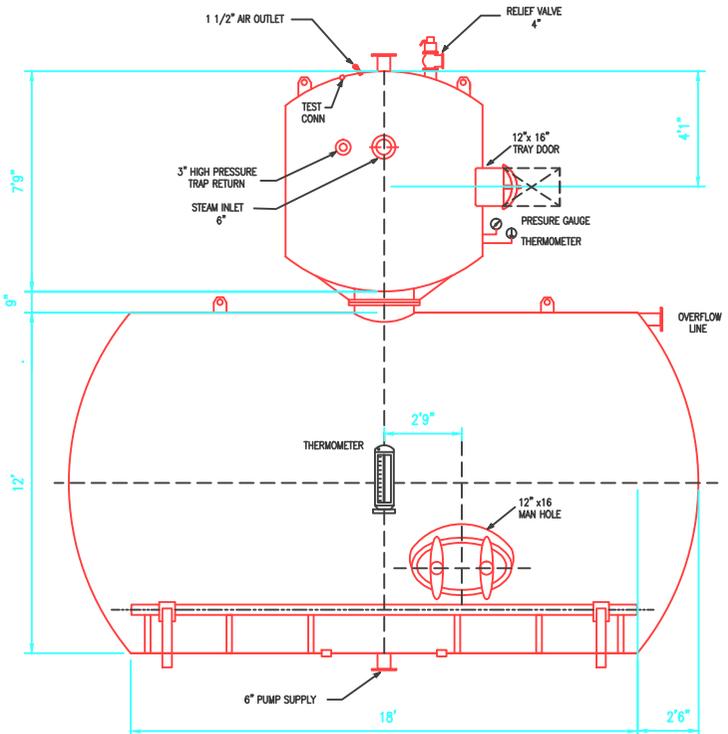
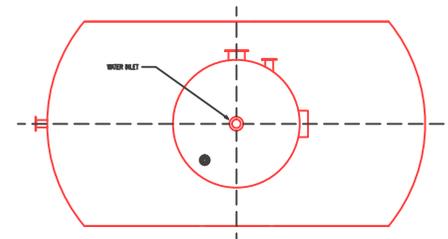
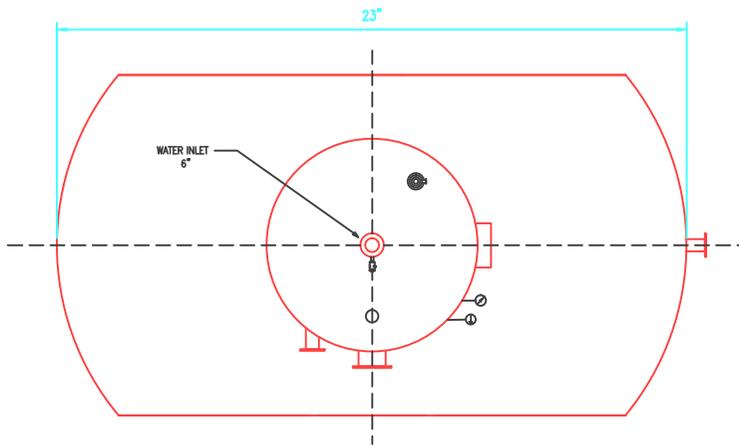
Describe en detalle la dimensión del tanque desaireador, así como los equipos que presenta. (Página 76)

2.8.2. Plano P&ID

Describe la ubicación y conexión de instrumentos y tuberías. (Página 77)

2.8.3. Planos Unifilares

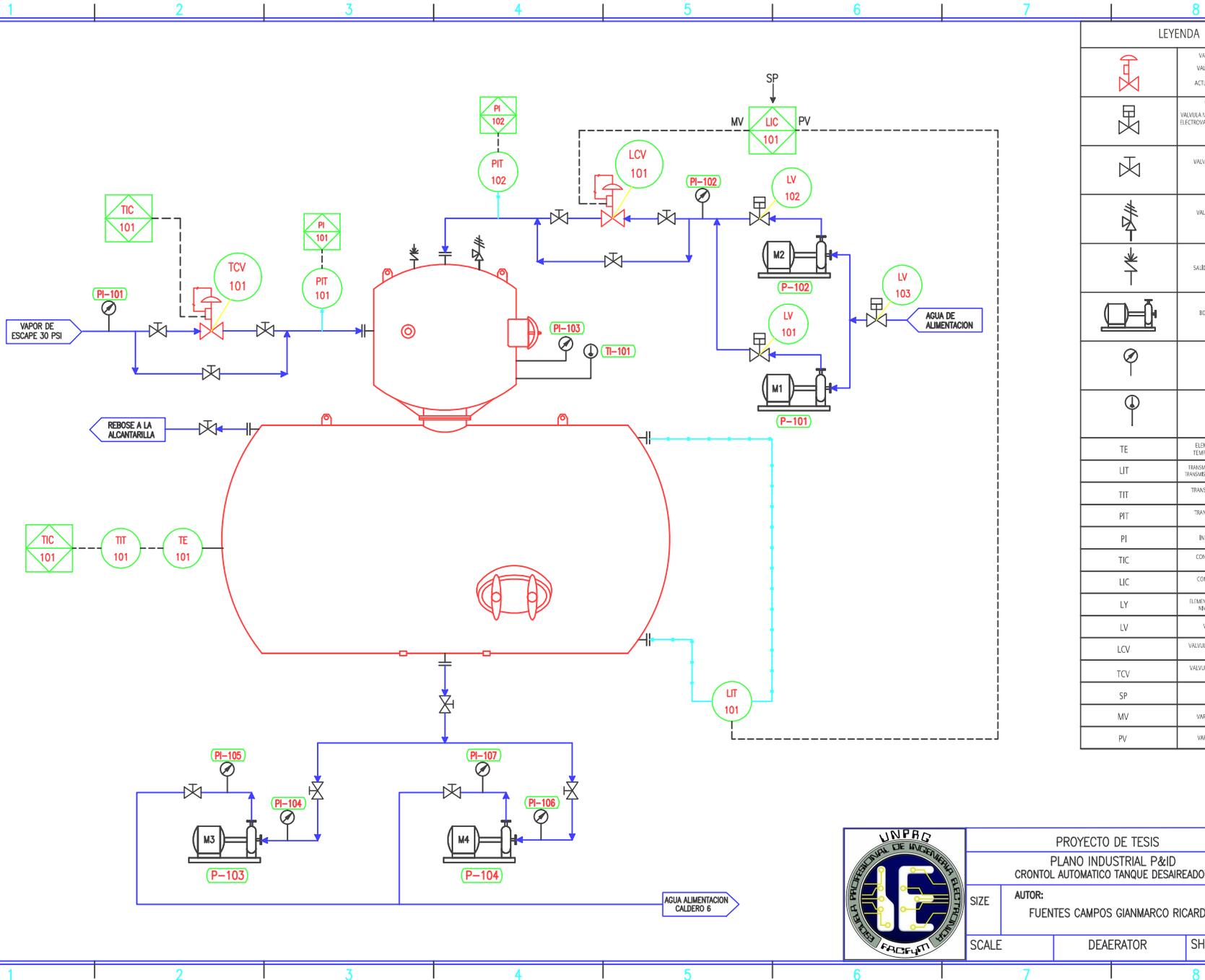
Se divide en 2 planos, un plano eléctrico de fuerza y un plano eléctrico de mando, donde se describen los equipos eléctricos, su ubicación y conexión. (Páginas 78 y 79)



DESAIREADOR		
PESO	VACIO	6 100 LBS
	INUNDADO	20 600 LBS
DISEÑO	TEMPERATURA	275 °F
	PRESION	30 PSIG
	TEST DE PRESION	45 PSIG
TANQUE DE ALMACENAMIENTO		
PESO	VACIO	25 000 LBS
	INUNDADO	187 500 LBS
ALMACENAMIENTO	2 600 Cu FT	



PROYECTO DE TESIS		
PLANO INDUSTRIAL MECANICO		
CRONTOL AUTOMATICO TANQUE DESAIREADOR		
SIZE	AUTOR:	REV
SCALE 1:2	FUENTES CAMPOS GIANMARCO RICARDO	1
DEAERATOR	SHEET	1



LEYENDA	
	VALVULA AUTOMATICA
	VALVULA DE GLOBO CON POSICIONADOR Y ACTUADOR DE TIENFRAGUA
	VALVULA ON/OFF
	VALVULA MANSOSA ACCIONADA POR ELECTROVALVULA CON ACTUADOR DE DOBLE EFECTO
	VALVULA DE ACCIONAMIENTO MANUAL
	VALVULA DE SEGURIDAD Y ALARMA
	SAIDA DE GASES O2 Y CO2
	BOMBA CENTRIFUGA
	MANOMETRO
	TERMOMETRO
TE	ELEMENTO PRIMARIO DE TEMPERATURA- FTD FT100
LIT	TRANSMISOR INDICADOR DE NIVEL- TRANSMISOR DE PRESION DIFERENCIAL
TIT	TRANSMISOR INDICADOR DE TEMPERATURA
PIT	TRANSMISOR INDICADOR DE PRESION
PI	INDICADOR DE PRESION
TIC	CONTROLADOR INDICADOR DE TEMPERATURA
LIC	CONTROLADOR INDICADOR DE NIVEL
LV	ELEMENTO FINAL DE CONTROL DE NIVEL ELECTROVALVULA
LV	VALVULA DE NIVEL
LCV	VALVULA CONTROLADORA DE NIVEL
TCV	VALVULA CONTROLADORA DE TEMPERATURA
SP	SET POINT
MV	VARIABLE MANIPULADA
PV	VARIABLE DEL PROCESO

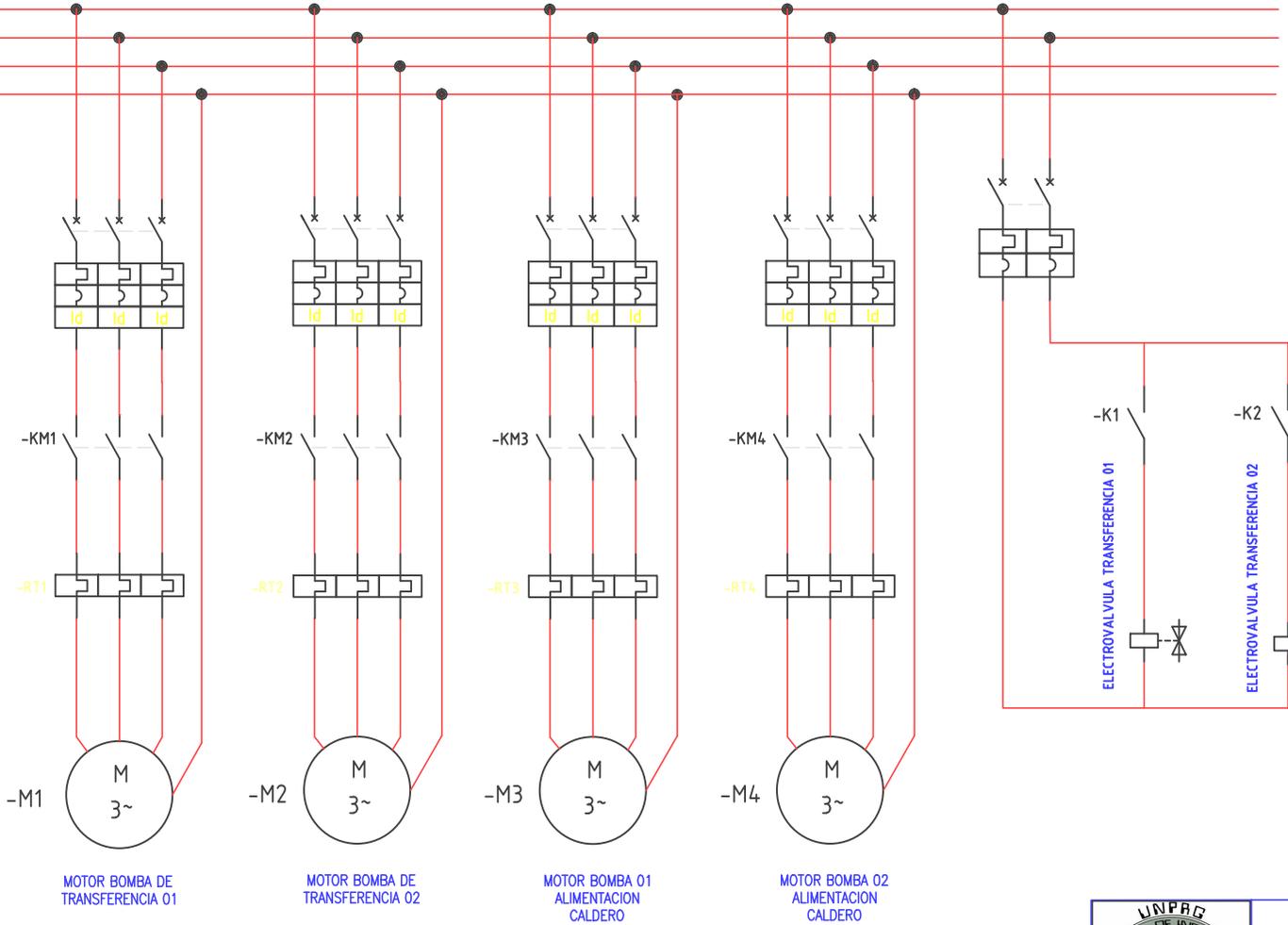


PROYECTO DE TESIS		
PLANO INDUSTRIAL P&ID		
CRONTOL AUTOMATICO TANQUE DESAIREADOR		
SIZE	AUTOR:	REV
	FUENTES CAMPOS GIANMARCO RICARDO	
SCALE	DEAERATOR	SHEET 1

1 2 3 4 5 6 7 8

A
B
C
D
E
F

L1
L2
L3
N



LEYENDA	
	LLAVE TERMOMAGNETICA MONOFASICA 220VAC
	LLAVE TERMOMAGNETICA DIFERENCIAL TRIFASICA 440 VAC
	CONTACTO DE POTENCIA CONTACTOR
	CONTACTO NORMALMENTE ABIERTO BOBINA DE RELAY
	RELE TERMICO
	MOTOR TRIFASICO DE 440 VAC DE BOMBA CENTRIFUGA
	ELECTROVALVULA 5/2 BOBINA DE 220 VAC

-M1
M
3~
MOTOR BOMBA DE TRANSFERENCIA 01

-M2
M
3~
MOTOR BOMBA DE TRANSFERENCIA 02

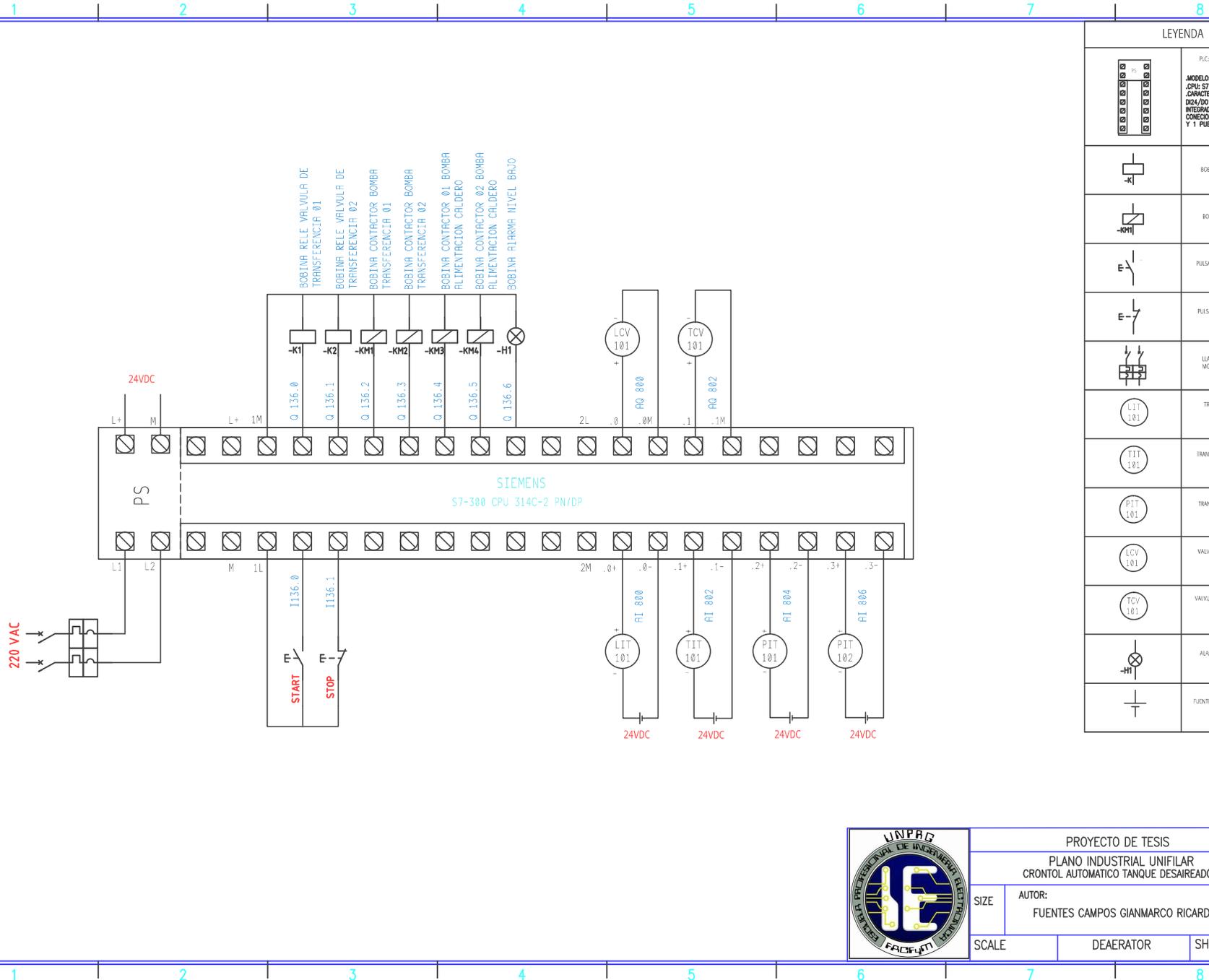
-M3
M
3~
MOTOR BOMBA 01 ALIMENTACION CALDERO

-M4
M
3~
MOTOR BOMBA 02 ALIMENTACION CALDERO



PROYECTO DE TESIS		
PLANO INDUSTRIAL UNIFILAR		
CRONTOL AUTOMATICO TANQUE DESAIREADOR		
SIZE	AUTOR: FUENTES CAMPOS GIANMARCO RICARDO	REV
SCALE	DEAERATOR	SHEET 1

1 2 3 4 5 6 7 8



LEYENDA

	PLC: CONTROLADOR LOGICO PROGRAMABLE MODELO: S7-300 CPU: S7 314C-2 PN/DP CARACTERISTICAS: DI24/DO16; AI5/AO2 INTEGRADAS: 2 PUERTOS DE CONEXION PROFIBET Y 1 PUERTO DE CONEXION MPI
	BOBINA DE RELE 24VDC
	BOBINA DE CONTACTOR 24VDC
	PULSADOR NORMALMENTE ABIERTO
	PULSADOR NORMALMENTE CERRADO
	LLAVE TERMOMAGNETICA MONOFASICA 220 VAC
	TRANSMISOR INDICADOR DE NIVEL
	TRANSMISOR INDICADOR DE TEMPERATURA
	TRANSMISOR INDICADOR DE PRESION
	VALVULA CONTROLADORA DE NIVEL
	VALVULA CONTROLADORA DE TEMPERATURA
	ALARMA DE SEÑALACION SONORA 24VDC
	FUENTE DE ALIMENTACION VDC



PROYECTO DE TESIS		
PLANO INDUSTRIAL UNIFILAR CRONTOL AUTOMATICO TANQUE DESAIREADOR		
SIZE	AUTOR: FUENTES CAMPOS GIANMARCO RICARDO	REV
SCALE	DEAERATOR	SHEET 1

2.9. Identificación de Señales de Control y Monitoreo

DESCRIPCIÓN	TIPO DE SEÑAL
Start sistema	Discreta
Stop sistema	Discreta
Sistema automático	Discreta
Sistema manual	Discreta
válvula de transferencia 1	Discreta
válvula de transferencia 2	Discreta
Electrobomba transferencia 1	Discreta
Electrobomba transferencia 2	Discreta
Electrobomba alimentación caldero 1	Discreta
Electrobomba alimentación caldero 2	Discreta
Alarma Nivel bajo	Discreta
Transmisor de nivel	Analógica
Transmisor de temperatura	Analógica
Transmisor de presión relativa agua	Analógica
Transmisor de presión relativa vapor	Analógica

Tabla 4: Señales de control y monitoreo.

2.10. Especificación de la Instrumentación y software

A continuación, se describen las características de los instrumentos y equipos que se requieren para implementarse en el proceso de desaireación; donde la mayoría de éstos, ya se utilizan en otros procesos dentro de la fábrica. Garantizando así la confiabilidad y eficiencia de las marcas recomendadas.

2.10.1. Transmisores de presión SITRANS P de SIEMENS



Figura 38: Transmisores de presión SITRANS P.

Descripción

El SITRANS P de la serie DS III es un transmisor de presión digital diseñado para medir la presión relativa, la presión absoluta, la presión diferencial, el caudal y el nivel de llenado.

El equipo ofrece ya unas completas funciones de diagnóstico y simulación de gran fiabilidad. Institutos de ensayos independientes se han encargado de certificar que es apto para el empleo en circuitos de medición SIL2.

Para el caso de la medición del nivel del tanque desaireador se utilizará el transmisor de presión diferencial SITRANS P 7MF4433-1EA22-2AC6-Z.

Para los casos de medición de presión relativa de agua y vapor que ingresan al tanque desaireador se utilizará el modelo SITRANS P 7MF4033-1EB10-1DA1.

Ámbito de aplicación

Según el modelo, el transmisor mide gases, vapores y líquidos que pueden ser agresivos, no agresivos y peligrosos.

El transmisor SITRANS se puede emplear para los siguientes tipos de medición:

Presión relativa

Presión absoluta

Presión diferencial

Con la parametrización correspondiente y los accesorios necesarios (p.ej. diafragmas de caudal y separadores), el transmisor también se puede emplear para los siguientes tipos de medición adicionales:

Nivel

Volumen

Masa

Caudal volumétrico

Caudal másico

Tienen comunicación HART, PROFIBUS o Fundación Field bus.

Características y especificaciones

Datos técnicos transmisor de presión diferencial SITRANS P 7MF4433-1EA22-2AC6-Z.

Gama de productos: SITRANS P

Tipo de transmisor: Presión diferencial

Tipo de señal de salida: Analógica

Técnica de cableado: 2 hilos

Función de salida analógica: 4 a 20 mA

Tensión de alimentación nominal: 10.5 a 45 VDC

Protocolo de comunicación: HART

Rango de medición: 6 a 600 mbar

Presión nominal: PN 160

Estándares: DIN 2638

Datos técnicos transmisor de presión relativa SITRANS P 7MF4033-1EB10-1DA1.

Gama de productos:	SITRANS P
Tipo de transmisor:	Presión relativa
Tipo de señal de salida:	Analógica
Técnica de cableado:	2 hilos
Función de salida analógica:	4 a 20 mA
Tensión de alimentación nominal:	10.5 a 45 VDC
Protocolo de comunicación:	HART
Rango de medición:	0.63 a 63 bar
Presión nominal:	PN 600
Estándares:	DIN 2638

Calibración de transmisor de presión diferencial

Para calibrar el transmisor se necesitan saber algunos conceptos:

Rango: Banda de medición, desde la presión mínima a la máxima que el transmisor puede medir.

Zero: Es la menor presión en la cual el transmisor fue calibrado.

Span: Banda de trabajo donde se hace la calibración.

URL (upper range limit): Presión más alta ajustada al transmisor.

LRL (lower range limit): Presión más baja ajustada al transmisor.

La calibración del transmisor de presión diferencial para un tanque cerrado consiste en:

Ajuste del Zero: Se debe colocar el instrumento con cero presión en ambas cámaras.

Ajuste LRL TRIM: Aplicar el valor mínimo de nivel 4mA.

Ajuste URL TRIM: Aplicar el valor para el 100 % del nivel 20mA.

Ahora debemos determinar los valores URL y LRL, estos valores en el transmisor SITRANS P de Siemens corresponde a los parámetros 5 y 6.

Para determinar los valores URL Y LRL debemos determinar la ubicación y altura donde el transmisor será instalado. A continuación, se ilustran la ubicación del transmisor respecto al tanque desaireador.

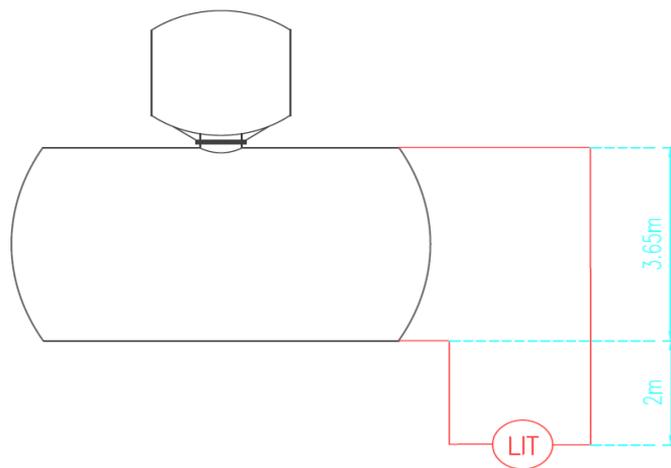


Figura 39: Ubicación del transmisor de presión diferencial.

Para calcular los valores LRL Y URV utilizaremos las siguientes formulas, que son las que se utilizan cuando se trabaja en un tanque cerrado que poseen una presión estática sobre el nivel a medir.

$$\text{LRL: } -h \rho_{\text{sello}}$$

$$\text{URL: } h (\rho_{\text{producto}} - \rho_{\text{sello}})$$

Donde:

h: altura entre la toma de alta y baja del transmisor, en este caso 3.65m

ρ_{producto} : densidad del líquido dentro del tanque, 958.05 kg/m^3

ρ_{sello} : densidad del líquido dentro de las tomas del transmisor, 998.29 kg/m^3

LRL: -3.65m (998.29 kg/m^3)

LRL: $-143.45 \text{ inH}_2\text{O}$

URL: 3.65m ($958.05 \text{ kg/m}^3 - 998.29 \text{ kg/m}^3$)

URL: $-5.78 \text{ inH}_2\text{O}$

Calibración de transmisores de presión relativa

Para el caso del transmisor de presión de agua

LRL: $0 \text{ inH}_2\text{O} / 0 \text{ psi}$

URL: $4151.98 \text{ inH}_2\text{O} / 150 \text{ psi}$

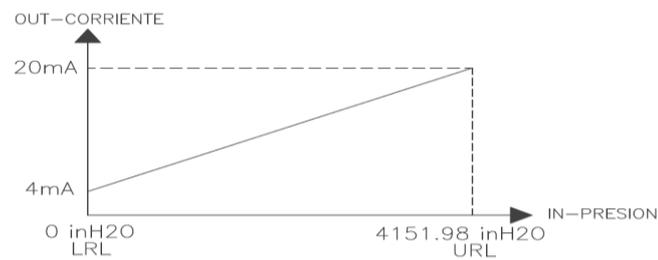


Figura 40: Transmisor de presión de vapor, corriente vs presión.

Para el caso del transmisor de presión de agua

LRL: $0 \text{ inH}_2\text{O} / 0 \text{ psi}$

URL: $968.79 \text{ inH}_2\text{O} / 25 \text{ psi}$

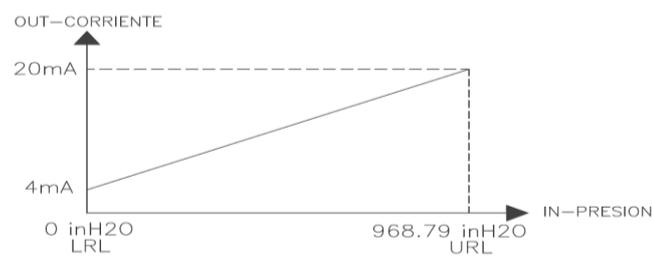


Figura 41: Transmisor de presión de agua, corriente vs presión.

2.10.2. Sensor RTD PT100



Figura 42: Sensor RTD PT100.

Descripción

El PT100 es un sensor de temperatura que a 0 °C tiene 100 ohms y que al aumentar la temperatura aumenta su resistencia eléctrica. Este sensor PT100 es el corazón sensible a la temperatura de cualquier termómetro de resistencia. Aparte de la forma de montaje, son sus características las que básicamente determinan las propiedades técnicas de medida del sensor. El incremento de la resistencia de la PT100 no es lineal, pero si creciente y característico del platino de tal forma que mediante tablas es posible encontrar la temperatura exacta a la que corresponde. Normalmente las sondas PT100 industriales se fabrican encapsuladas en la misma forma que los termopares, es decir dentro de un tubo de acero inoxidable u otro material (vaina). En un extremo está el elemento sensible (Sensor RTD) y en el otro está el terminal eléctrico de los cables protegido dentro de una caja redonda de aluminio (cabezal).

Ámbito de aplicaciones

Los RTD son los instrumentos más utilizados en los procesos industriales donde se requiere medir la temperatura con precisión; así tenemos:

Temperatura de un horno de fundición

Temperatura de una caldera

Temperatura de los calentadores en la industria azucarera, etc.

Características y especificaciones

Datos técnicos sensor PT100.

Gama de productos:	SITRON
Tipo de sensor:	Temperatura
Tipo de señal de salida:	Analógica
Técnica de cableado:	3 hilos
Función de salida analógica:	100 a 175 Ω
Rango de medición:	-100 a 200 $^{\circ}\text{C}$
Estándares:	IEC 571

2.10.3. Transmisor de temperatura Yokogawa



Figura 43: Transmisor de temperatura Yokogawa YTA110.

Descripción

El transmisor de temperatura YTA110 de Yokogawa es un transmisor de temperatura de alto rendimiento que acepta termopares, RTD, ohm, o entrada en milivolt DC y convierte

una señal de 4 a 20 mA DC para la transmisión. Soporta tanto el protocolo de comunicación BRAIN o HART.

Ámbito de aplicaciones

Utilizados en los procesos industriales donde se requiere transmitir la temperatura a distancias mayores a los 10 metros o a PLC's sin entrada de ohmiaje; así tenemos:

Temperatura de un horno de fundición

Temperatura de una caldera

Temperatura de los calentadores en la industria azucarera, etc.

Características y especificaciones

Datos técnicos transmisor de temperatura Yokogawa YTA110.

Gama de productos: YOKOGAWA

Tipo de transmisor: Temperatura

Tipo de señal de salida: Analógica

Técnica de cableado: 2 hilos

Función de salida analógica: 4 a 20 mA

Tensión de alimentación nominal: 24 a 48 VDC

Protocolo de comunicación: HART

Rango de medición: -150 a 400 °C

Estándares: IEC 61508

Calibración

Para este modelo la calibración se realiza exclusivamente utilizando un comunicador HART llamado también HAND HELD.

LRL: 0 °C

URL: 140 °C

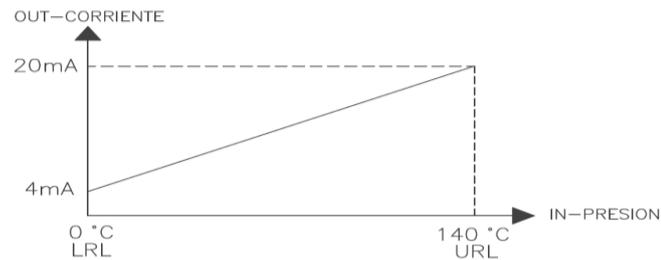


Figura 44: Transmisor de temperatura, corriente vs presión.

2.10.4. PLC SIMATIC S7-314 C-2 PN/DP de SIEMENS



Figura 45: PLC SIMATIC S7-314 C-2 PN/DP.

Descripción

El sistema SIMATIC S7-300 es objeto de continuas innovaciones, especialmente en el ámbito de las CPU. La CPU compacta 314 C-2 PN/DP compatible con PROFINET es totalmente nueva; se trata de una CPU con 192 Kbytes de memoria, 0.06 microsegundos por operación de bits y las conocidas funciones tecnológicas y E/S integradas.

Características del sistema:

Ingeniería: eficiencia durante el ciclo de vida

Comunicaciones para la transferencia de datos

Diagnóstico para minimizar tiempos

Seguridad para protección de personal

Seguridad para la integración de datos

Robustez para el entorno industrial

Ámbito de aplicaciones

SIMATIC S7- 300 es el controlador más vendido de la plataforma Totally Integrated Automation y cuenta con numerosas aplicaciones de referencia satisfactorias en los más diversos sectores industriales de todo el mundo, por ejemplo:

Industria del automóvil

Industria de alimentos y bebidas

Industria de procesos

Tecnología de fabricación, etc.

Características y especificaciones

Datos técnicos PLC SIMATIC S7-314 C-2 PN/DP

Gama de productos:	SIMATIC
Tipo de PLC:	Controlador Modular
Número de entradas digitales:	24 x 24 VDC
Número de salidas digitales:	16 x 24 VDC, 0.5 A
Número de entradas analógicas	4 x 0/4 - 20 mA ó 0 - 10V
Número de salidas analógicas	2 x 0/4 – 20 mA ó 0 – 10V
Tensión de alimentación nominal:	220 VAC
Memoria principal	192 kbyte
Protocolo de comunicación:	HART
Dimensiones:	120 x 125 x 130 mm

2.10.5. HMI KTP 1000 BASIC de SIEMENS

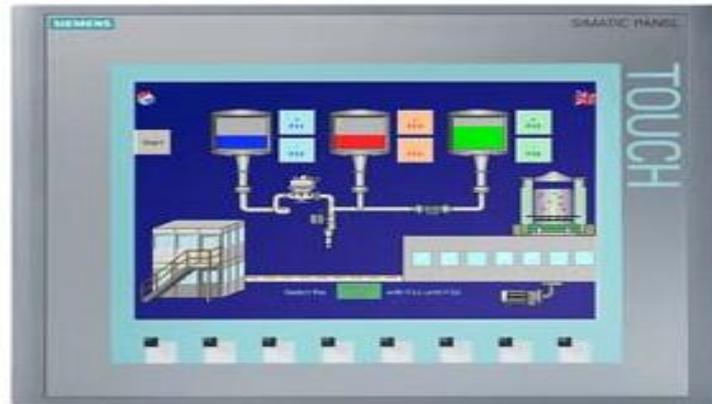


Figura 46: HMI KTP 1000 BASIC COLOR PN.

Descripción

SIMATIC HMI KTP 1000 COLOR BASIC PN, es un panel de operación tecla/táctil configurable desde wincc flexible 2008 hasta el TIA PORTAL V15, contiene SW OPEN SOURCE.

Ámbito de aplicaciones

Utilizado en la Industria en general para supervisar y controlar procesos que requieran de monitorización, por ejemplo:

Supervisión de nivel de líquido de una caldera.

Supervisión y control de centrifugas

Supervisión de procesos de mezcla de pinturas, etc.

Características y especificaciones

Datos técnicos SIMATIC KTP 1000 COLOR BASIC PN

Gama de productos:	SIMATIC
Tamaño Display:	10 inch TFT
Número de colores:	256
Tensión de alimentación nominal:	24 VDC
Protocolo de comunicación:	PROFINET
Dimensiones:	211.2 x 158.4 mm

2.10.6. Válvula de globo con posicionador electro-neumático SAMSON



Figura 47: Válvula de globo SAMSON 3241 con Posicionador electro-neumático.

Descripción

Se requieren 2 válvulas de globo de 6 pulgadas de diámetro; una para el control de caudal de agua de alimentación al tanque desaireador de 100 °C y otra para controlar el flujo de vapor que ingresa al tanque desaireador 150 °C. La válvula SAMSON tipo 3241 DN 6 clase 125 son ideales tanto para el control de flujo de vapor como para el control caudal de agua ya que resisten las temperaturas máximas de dichos fluidos.

Ámbito de aplicaciones

Válvulas de control para procesos industriales, suministrable según normas DIN, ANSI y JIS Diámetro nominal DN 15 a 300 • ½” a 12” Presión nominal PN 10 a 40 ANSI Class 125 a 300 Temperaturas de –196 a +450 °C • de –320 a +800 °F.

Características y especificaciones

Datos técnicos Válvula de globo SAMSON con posicionador electro-neumático.

Gama de productos:	SAMSON 3241
Tipo de Válvula:	Globo
Tipo de accionamiento	Electro-Neumático

Tamaño de Brida	DN 6
Presión Nominal	PN 10
Material del cuerpo	Acero al carbono forjado
Rango de Temperatura	-10 – 220 °C
Señal de control posicionador	4 – 20 mA
Protocolo de comunicación:	HART
Estándares	DIN, ANSI y JIS

Datos técnicos Tipo 3241

Diámetro nominal		DN 15 ... 300 · ½" ... 12"			
Material del cuerpo	DIN	fundición gris EN-JL1040	fundición esferoidal EN-JS1049	acero al carbono WN 1.0619 WN 1.0460*	acero inoxidable WN 1.4581 WN 1.4571*
	ANSI	A 126 B	–	A 216 WCC A 105*	A 351 CF8M A 182 F316*
Presión nominal	PN	10, 16	16, 25	10 ... 40	
	Class	125/250	–	150/300	
Conexiones	DIN ANSI	bridas · extremos para soldar según EN 12627 ANSI B16.25/ bridas FF, RF · rosca NPT			
Cierre asiento-obturador y clase de fuga según DIN EN 1349		cierre metálico: IV cierre junta blanda: VI cierre metálico lapeado: IV-S2; a partir DN 100: IV-S1			
Característica		isoporcentual · lineal			
Relación de regulación		50:1 hasta DN 50 (2") · 30:1 a partir de DN 65 (2½")			
Margen de temperatura		–10 ... 220 °C · 14 ... 430 °F			
con p. aislamiento, max		–196 ... 450 °C · –325 ... 800 °F			
Hojas técnicas		DIN/ANSI: T 8015/8012 · accionamiento: T 8310, 8311			

Tabla 5: Datos técnicos valvula SAMSON 3241.

2.10.7. Válvula de mariposa ON/OFF Bray



Figura 48: Válvula de mariposa ON/OFF Bray con actuador neumático.

Descripción

Se requieren 2 válvulas de mariposa ON/OFF de 6 pulgadas de diámetro; para permitir o restringir el paso de caudal de las bombas de transferencia al tanque desaireador y que soporten temperaturas de 100 °C máxima.

Ámbito de aplicaciones

Válvulas de control ON/OFF para procesos industriales, suministrable según normas ISO, Gamas de tamaño de 2" a 24".

Características y especificaciones

Datos técnicos VALVULA DE MARIPOSA BRAY ON/OFF con actuador neumático.

Gama de productos:	BRAY serie 30
Tipo de Válvula:	Mariposa
Tipo de accionamiento	Neumático
Tamaño de Brida	DN 6
Presión Nominal	PN 10

Material del cuerpo	Acero al carbono e inoxidable
Rango de Temperatura	-18 – 200 °C
Señal de control	30 – 90 psi
Estándares	ISO 9001

2.10.8. Electrobomba



Figura 49: Electrobomba General electric worthington.

Descripción

Dos Electrobombas de la marca general electric worthington de 3550 rpm, para poder suplir y satisfacer la demanda de la caldera a una presión de trabajo de 300 PSI.

Ámbito de aplicaciones

Para procesos industriales en general con cualquier tipo de fluido.

Características y especificaciones

Datos técnicos Electrobomba General electric worthington.

Gama de productos:	General electric worthington
Capacidad:	149.88 m ³ /h
Potencia	400 HP

Motor	Delcrosa
Tensión de trabajo	440 VAC
Altura dinámica total	439.83 m
Velocidad	3550 rpm
Material del cuerpo	Acero al carbono
Rango de Temperatura	-10 – 250 °C

2.10.9. Software de programación TIA PORTAL V13



Figura 50: Logo TIA PORTAL V13 SIEMENS.

Descripción

TIA PORTAL V13 es un innovador sistema de ingeniería que permite configurar de forma intuitiva y eficiente todos los procesos de planificación y producción. Conviene por su funcionalidad probada y por ofrecer un entorno de ingeniería unificado para todas las tareas de control, visualización y accionamiento.

Ámbito de aplicaciones

Para desarrollo de control y supervisión de procesos industriales.

Características y especificaciones

Los requisitos mínimos del sistema para el TIA PORTAL V13 son:

Procesador Intel Core i3 3.3 GHz o superior

4 GB de RAM o más.

Microsoft Windows 7 a más.

Ventajas del TIA PORTAL V13

Team Engineering. Varias personas pueden trabajar simultáneamente sobre una misma tarea.

Búsqueda automática de actualización de software.

Consistente desarrollo de lenguajes de programación (LAD, FBD, STL, SCL y Graph).

Carga de la configuración hardware y el programa de usuario incluyendo valores para servicios.

PLCSim para S7-300 / S7-400 y ahora S7-1500.

Programación del HMI, con graficas propias que se pueden exportar e importar.

2.10.10. LabVIEW

Para este proyecto se propone utilizar el software LabVIEW para simular el comportamiento de control de nivel, verificando la eficiencia de los parámetros calculados para el controlador PID.



Figura 51: Logo LabVIEW.

Descripción

LabVIEW (acrónimo de Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) es una plataforma y entorno de desarrollo para diseñar sistemas, con un lenguaje de programación visual gráfico pensado para sistemas hardware y software de pruebas, control y diseño, simulado o real y embebido.

Ámbito de aplicaciones

Procesos industriales en general.

Características y especificaciones

Su principal característica es la facilidad de uso, válido para programadores profesionales como para personas con pocos conocimientos en programación pueden hacer programas relativamente complejos, imposibles para ellos de hacer con lenguajes tradicionales. También es muy rápido hacer programas con LabVIEW y cualquier programador, por experimentado que sea, puede beneficiarse de él.

Presenta facilidades para el manejo de:

Interfaces de comunicaciones:

Puerto serie

Puerto paralelo

TCP/IP, UDP, DataSocket

USB

OPC...

Capacidad de interactuar con otros lenguajes y aplicaciones.

Herramientas gráficas y textuales para el procesado digital de señales.

Visualización y manejo de gráficas con datos dinámicos.

Adquisición y tratamiento de imágenes.

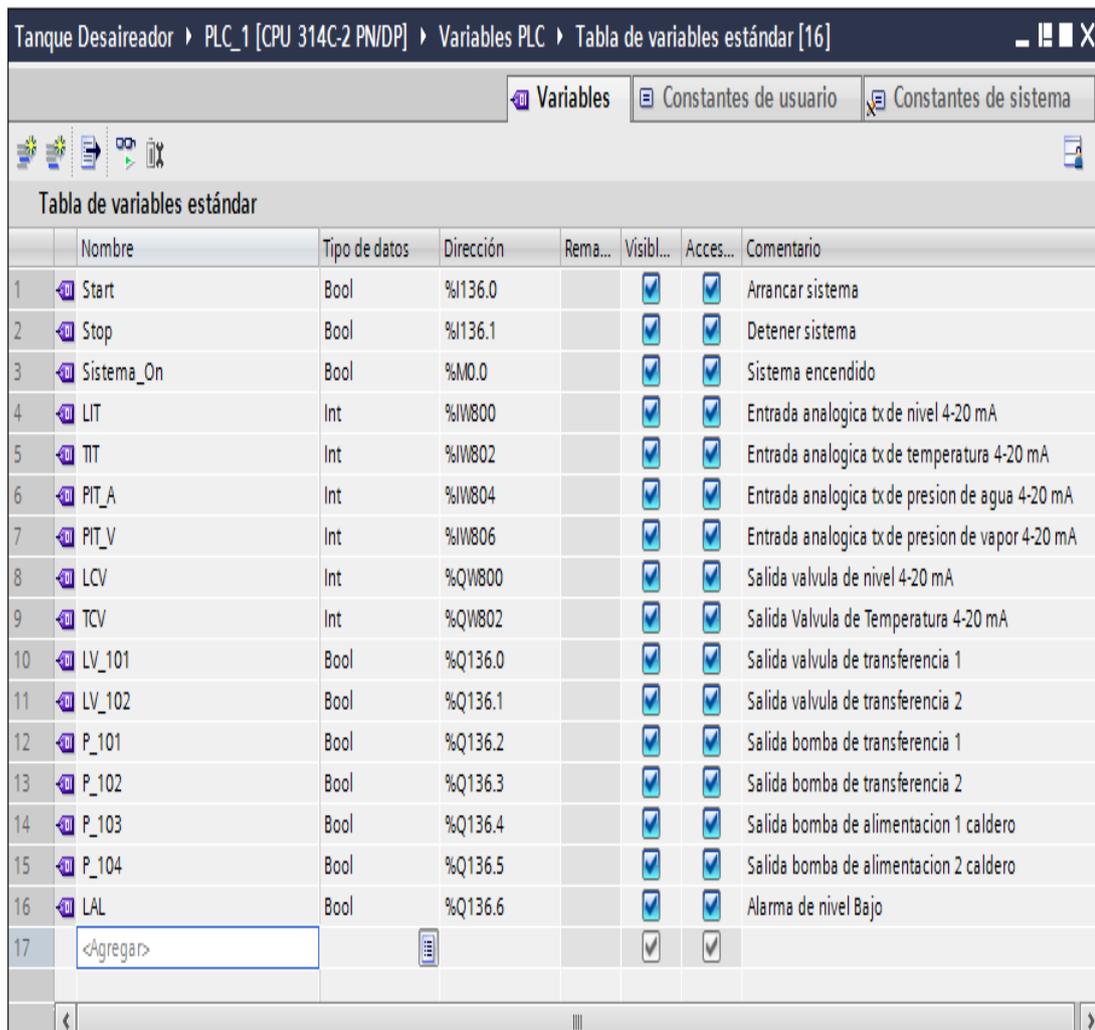
Control de movimiento (combinado incluso con todo lo anterior).

Tiempo Real estrictamente hablando.

Programación de FPGAs para control o validación.

Sincronización entre dispositivos.

2.11. Direccionamiento de Variables en el PLC



	Nombre	Tipo de datos	Dirección	Rema...	Visibl...	Acces...	Comentario
1	Start	Bool	%I136.0		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Arrancar sistema
2	Stop	Bool	%I136.1		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Detener sistema
3	Sistema_On	Bool	%M0.0		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Sistema encendido
4	LIT	Int	%IW800		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Entrada analogica tx de nivel 4-20 mA
5	TTT	Int	%IW802		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Entrada analogica tx de temperatura 4-20 mA
6	PIT_A	Int	%IW804		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Entrada analogica tx de presion de agua 4-20 mA
7	PIT_V	Int	%IW806		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Entrada analogica tx de presion de vapor 4-20 mA
8	LCV	Int	%QW800		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Salida valvula de nivel 4-20 mA
9	TCV	Int	%QW802		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Salida Valvula de Temperatura 4-20 mA
10	LV_101	Bool	%Q136.0		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Salida valvula de transferencia 1
11	LV_102	Bool	%Q136.1		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Salida valvula de transferencia 2
12	P_101	Bool	%Q136.2		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Salida bomba de transferencia 1
13	P_102	Bool	%Q136.3		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Salida bomba de transferencia 2
14	P_103	Bool	%Q136.4		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Salida bomba de alimentacion 1 caldero
15	P_104	Bool	%Q136.5		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Salida bomba de alimentacion 2 caldero
16	LAL	Bool	%Q136.6		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Alarma de nivel Bajo
17	<Agregar>				<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	

Tabla 6: Direccionamiento de variables PLC.

2.12. Programa para el PLC Siemens S7-314 C-2 PN/DP en TIA PORTAL V13

EL programa está dividido en 8 bloques de programación (1 bloque principal, 1 bloque cyclic, 2 bloques de funciones y 4 funciones) y 11 bloques de datos.

La programación esta realizada en lenguaje LADDER (KOP).

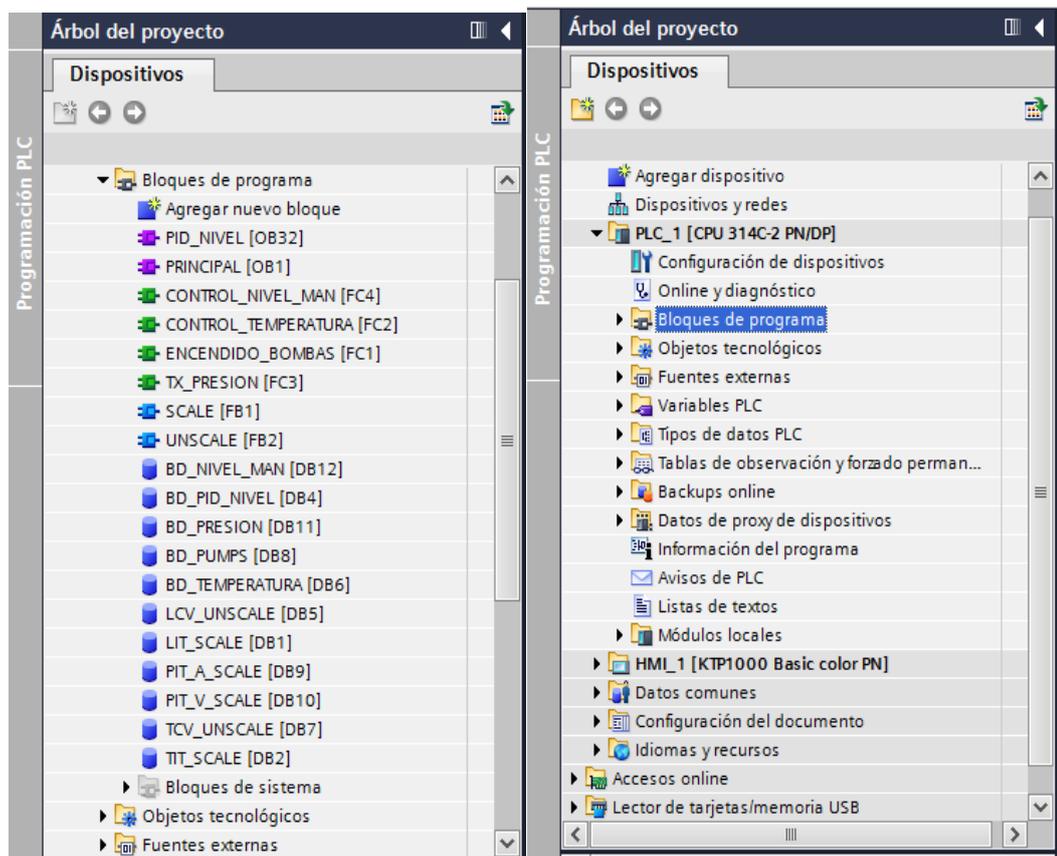


Figura 52: Bloques de programa PLC.

2.12.1. Bloques de datos (DB)

Son bloques globales donde se almacenan datos del programa de tipo entero, real, doble entero, booleano, palabra; y que pueden ser llamado desde cualquier bloque de programación.

Se utilizaron con la intención de tener los datos ordenados y hacer de su búsqueda más fácil.

2.12.1.1. BD_NIVEL_MAN

Bloque donde se guardaron los datos para el control manual de nivel.

Nombre	Tipo de datos	Offset	Valor de arranq...	Remanen...	Visible en ..	Valor de a..	Comentario
Static							
LIT_SCALE	Real	0.0	0.0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Escalamiento tx de Nivel
LCV_%	Real	4.0	0.0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Valor manual % de entrada Valvula de nivel
MIN_LIM	Real	8.0	0.0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	valor minimo de limite de LCV_%
MAX_LIM	Real	12.0	100.0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	valor minimo de limite de LCV_%
LCV_LIM	Real	16.0	0.0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Salida limitada de LCV_%

Figura 53: Bloque de datos de control manual de nivel.

2.12.1.2. BD_PID_NIVEL

Bloque donde se guardaron los datos para el control PID de nivel.

Nombre	Tipo de datos	Offset	Valor de arranq...	Remanen...	Visible en ..	Valor de a..	Comentario
Static							
Set Point	Real	0.0	70.0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Punto de consigna
LIT_SCALE	Real	4.0	0.0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Valor real escalado del tx de nivel
Error	Real	8.0	0.0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Captura error
PV	Real	12.0	0.0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Variable del proceso Visualizacion
MV	Real	16.0	0.0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Variable manipulada salida PID
AUTO-HAND	Bool	20.0	false	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Modo manual automatico

Figura 54: Bloque de datos de control PID de nivel.

2.12.1.3. BD_PRESION

Bloque donde se guardaron los datos de los transmisores de presión.

Nombre	Tipo de datos	Offset	Valor de arranq...	Remanen...	Visible en ..	Valor de a..	Comentario
Static							
PIT_A_SCALE	Real	0.0	0.0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Valor escalado de tx de presion de agua
PIT_V_SCALE	Real	4.0	0.0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Valor escalado de tx de presion de vapor

Figura 55: Bloque de datos de transmisores de presión.

2.12.1.4. BD_PUMPS

Bloque donde se guardaron los datos de las memorias para arrancar las bombas y activar las válvulas ON/OFF.

Nombre	Tipo de datos	Offset	Valor de arranq...	Remanen...	Visible en ..	Valor de a..	Comentario
Static							
LV101_ON/OFF	Bool	0.0	false	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Valvula de transferencia 1 ON/OFF
LV102_ON/OFF	Bool	0.1	false	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Valvula de transferencia 2 ON/OFF
P101_ON/OFF	Bool	0.2	false	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Bomba de transferencia 1 ON/OFF
P102_ON/OFF	Bool	0.3	false	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Bomba de transferencia 2 ON/OFF
P103_ON/OFF	Bool	0.4	false	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Bomba alimentacion 1 caldero ON/OFF
P104_ON/OFF	Bool	0.5	false	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Bomba alimentacion 2 caldero ON/OFF

Figura 56: Bloque de datos de bombas y válvulas ON/OFF.

2.12.1.5. BD_TEMPERATURA

Bloque donde se guardaron los datos para el control de temperatura.

Nombre	Tipo de datos	Offset	Valor de arranq...	Remanen...	Visible en ..	Valor de a..	Comentario
Static							
TIT_SCALE	Real	0.0	0.0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Escalamiento tx de temperatura
TCV_%	Real	4.0	0.0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Valor manual % de entrada valvula temperatur
MIN_LIM	Real	8.0	0.0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Valor minimo de limite TCV_%
MAX_LIM	Real	12.0	100.0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Valor maximo de limite TCV_%
TCV_LIM	Real	16.0	0.0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Salida limitada de TCV_%

Figura 57: Bloque de datos control de temperatura.

2.12.1.6. LTI_SCALE, PIT_A_SCALE, PIT_V_SCALE, TIT_SCALE.

Son bloques de datos para escalar una entrada analógica de 4 a 20 mA. Los bloques presentan las mismas variables para cada transmisor escalado.

2.12.1.7 LCV_UNSCALE, TCV_UNSCALE.

Son bloques de datos para desescalar un valor real a una salida analógica de 4 a 20 mA. Los bloques presentan las mismas variables para cada valor desescalado.

Tanque Desaireador > PLC_1 [CPU 314C-2 PN/DP] > Bloques de programa > LIT_SCALE [DB1]							
LIT_SCALE							
	Nombre	Tipo de datos	Offset	Valor de arranq...	Remanen...	Visible en ..	Valor de a..
1	Input						
2	IN1	Real	0.0	0.0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3	IN2	Real	4.0	0.0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4	IN3	Int	8.0	0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5	IN4	Real	10.0	0.0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
6	IN5	Real	14.0	0.0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
7	Output						
8	Out	Real	18.0	0.0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
9	InOut						
10	Static						
11	Conv_Dint	Dint	22.0	0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
12	IN3_Real	Real	26.0	0.0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
13	IN2-IN1	Real	30.0	0.0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
14	IN3-IN4	Real	34.0	0.0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
15	IN5-IN4	Real	38.0	0.0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
16	Div	Real	42.0	0.0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
17	Mul	Real	46.0	0.0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
18	Add	Real	50.0	0.0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Figura 58: Bloque de escalamiento de entrada analógica de 4 a 20 mA.

Tanque Desaireador > PLC_1 [CPU 314C-2 PN/DP] > Bloques de programa > LCV_UNSCALE [DB5]							
LCV_UNSCALE							
	Nombre	Tipo de datos	Offset	Valor de arranq...	Remanen...	Visible en ..	Valor de a..
1	Input						
2	IN1	Real	0.0	0.0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3	IN2	Real	4.0	0.0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4	IN3	Real	8.0	0.0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5	IN4	Real	12.0	0.0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
6	IN5	Real	16.0	0.0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
7	Output						
8	Out	Int	20.0	0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
9	InOut						
10	Static						
11	IN5-IN4	Real	22.0	0.0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
12	IN3-IN1	Real	26.0	0.0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
13	IN2-IN1	Real	30.0	0.0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
14	Div	Real	34.0	0.0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
15	Mul	Real	38.0	0.0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
16	Add	Real	42.0	0.0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
17	Trunc_Dint	Dint	46.0	0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Figura 59: Bloque de desescalamiento para salida analógica de 4 a 20 mA.

2.12.2. Bloques de Funciones (FB)

Son bloques lógicos que depositan sus valores de forma permanente en bloques de instancia, dichos valores solo son disponibles para estos bloques.

2.12.2.1. ESCALE

Bloque de función creado para escalar un valor de entrada analógico de 4 a 20 mA y convertirlo en un valor real.

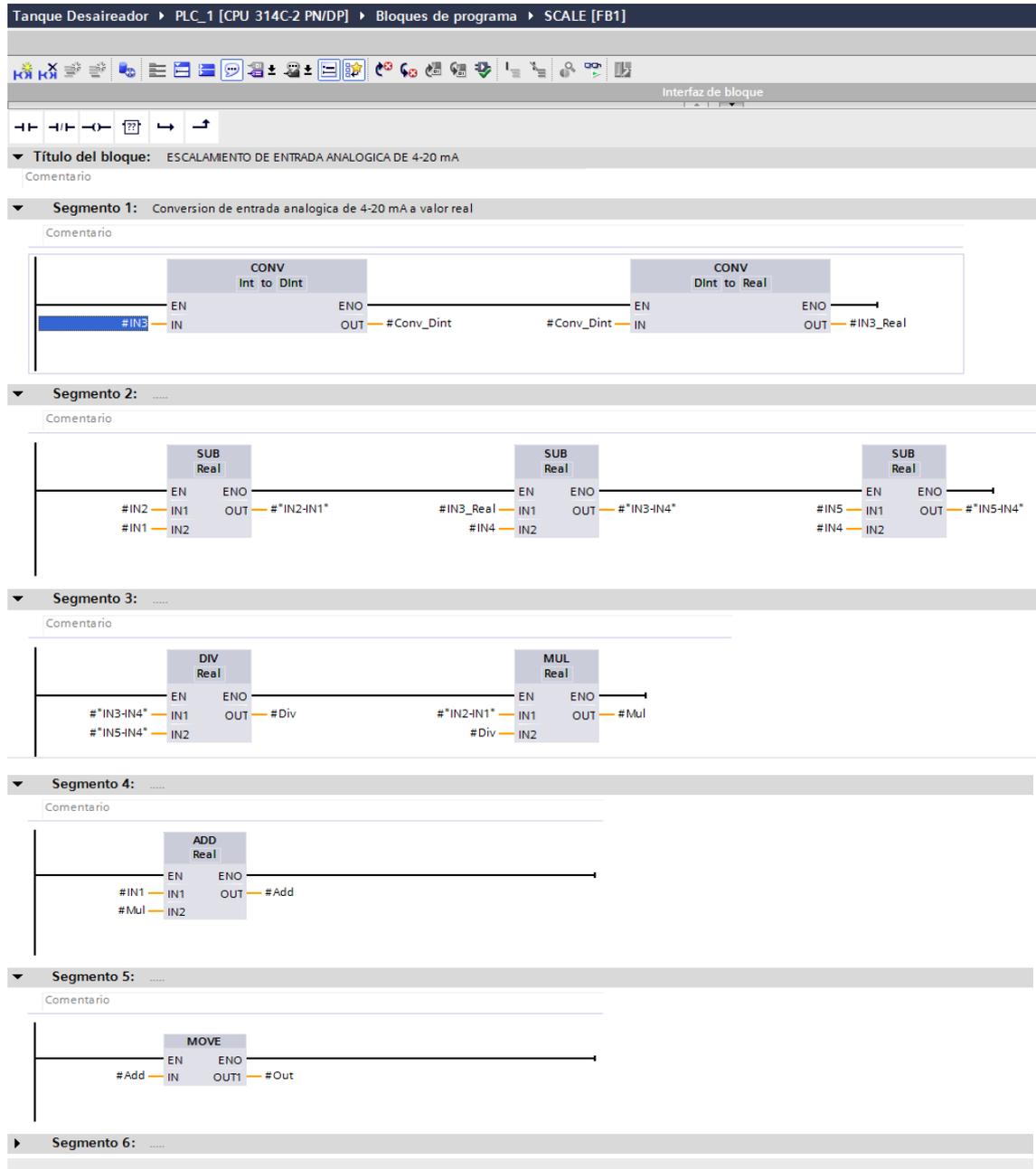


Figura 60: Bloque de función SCALE.

2.12.2.2. UNSCALE

Bloque de función creado para desescalar un real y convertirlo en un valor de salida analógico de 4 a 20 mA.

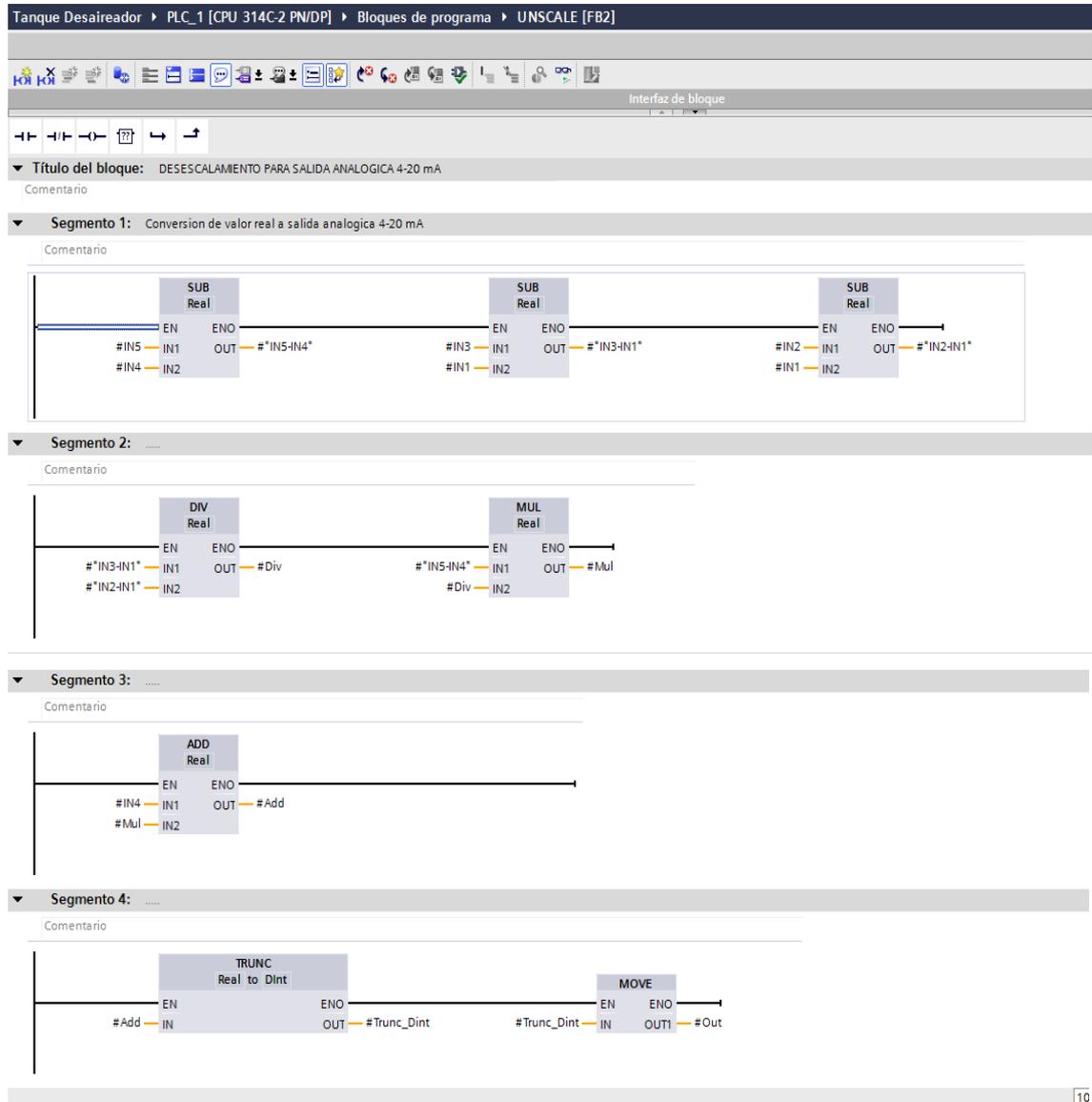


Figura 61: Bloque de función UNSCALE.

2.12.3. Función (FC)

Las funciones son bloques lógicos sin memoria, trabajan con los valores de los bloques de datos (DB) y para funcionar tienen que estar dentro de un bloque de organización (OB).

2.12.3.1. CONTROL_NIVEL_MAN

Función para controlar de forma manual el nivel del tanque desaireador.

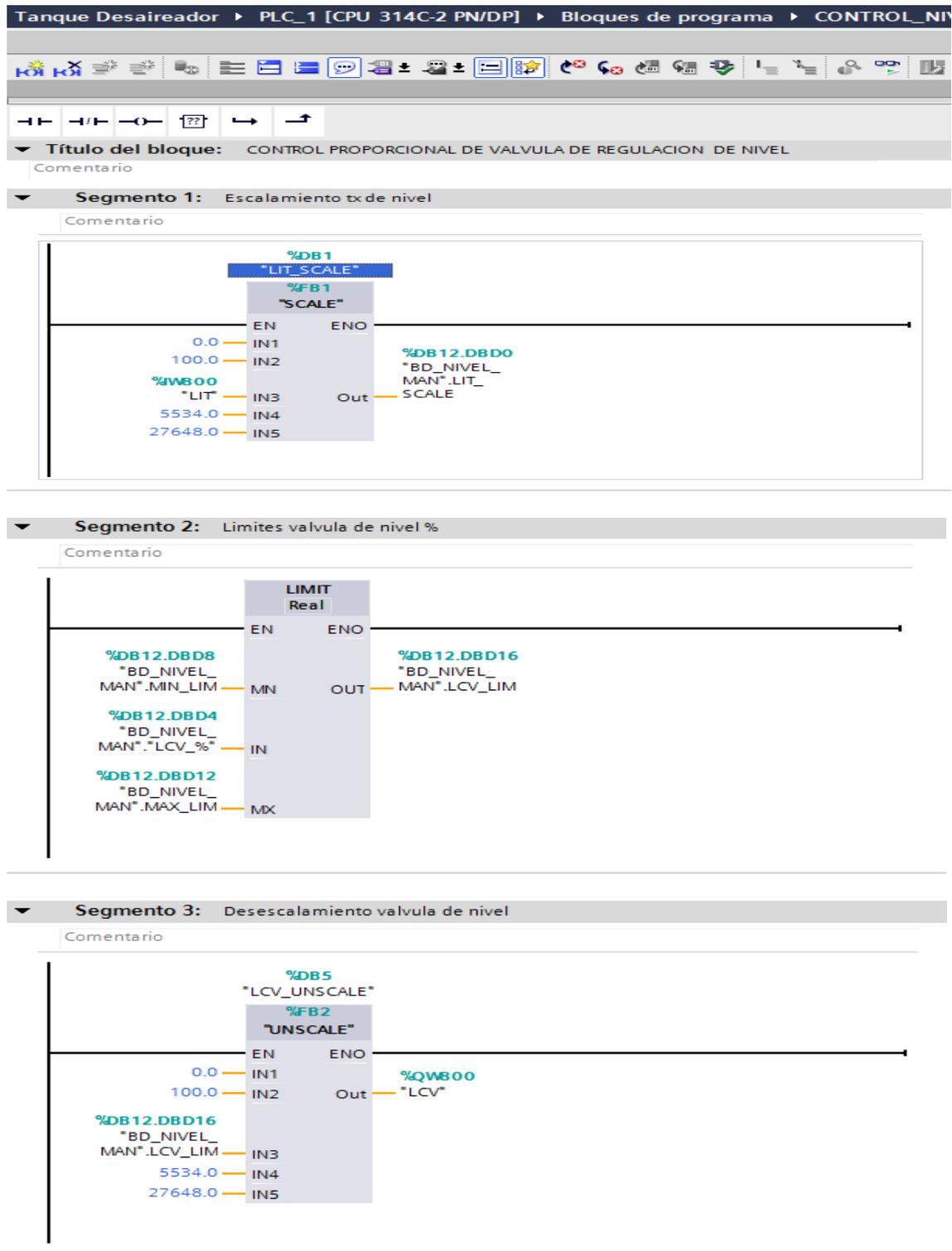


Figura 62: Función CONTROL_NIVEL_MAN.

2.12.3.2. CONTROL_TEMPERATURA

Función para controlar de forma manual la temperatura del tanque desaireador.

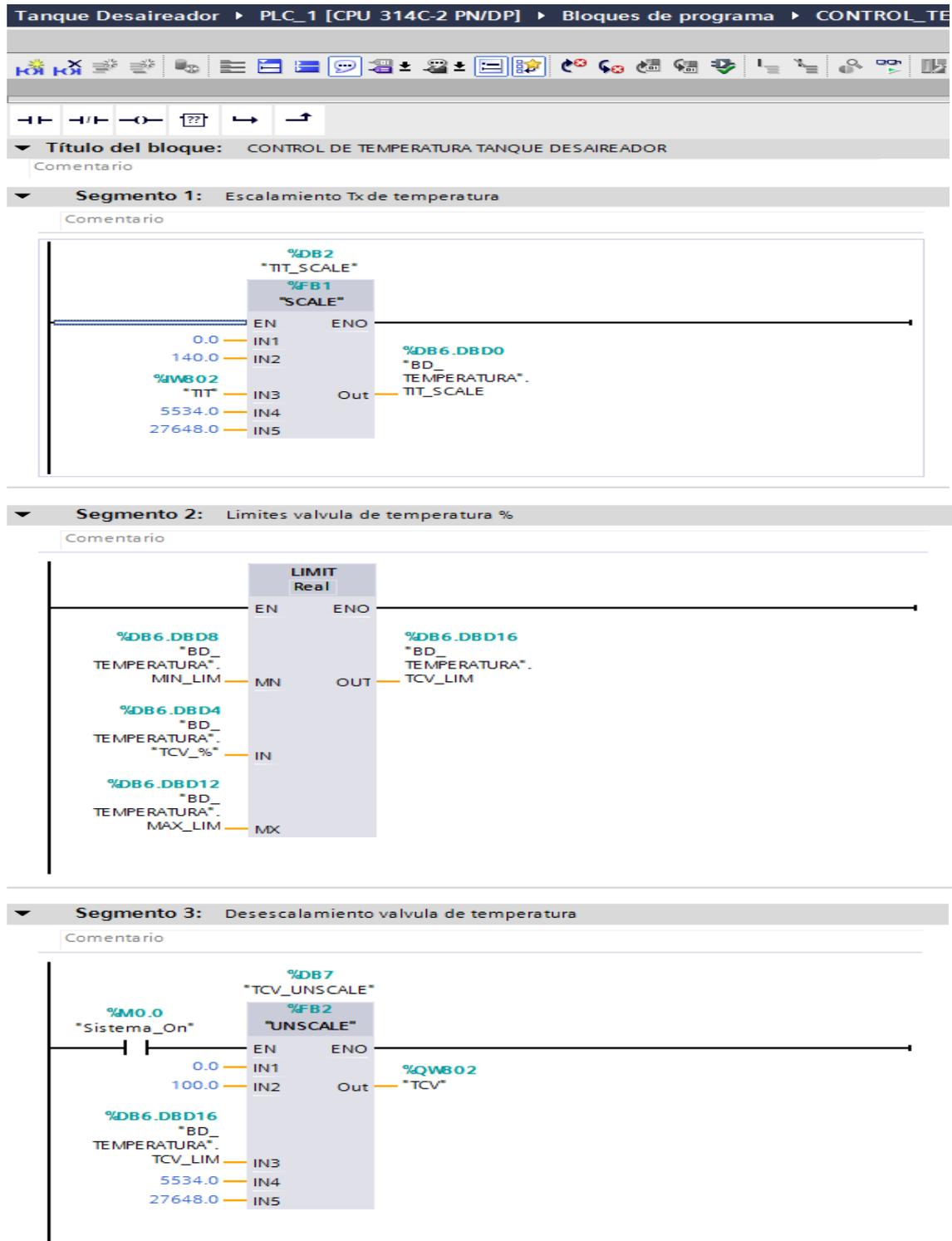


Figura 63: Función CONTROL_TEMPERATURA.

2.12.3.3. ENCENDIDO_BOMBAS

Función para encender bombas y activar las válvulas ON/OFF.

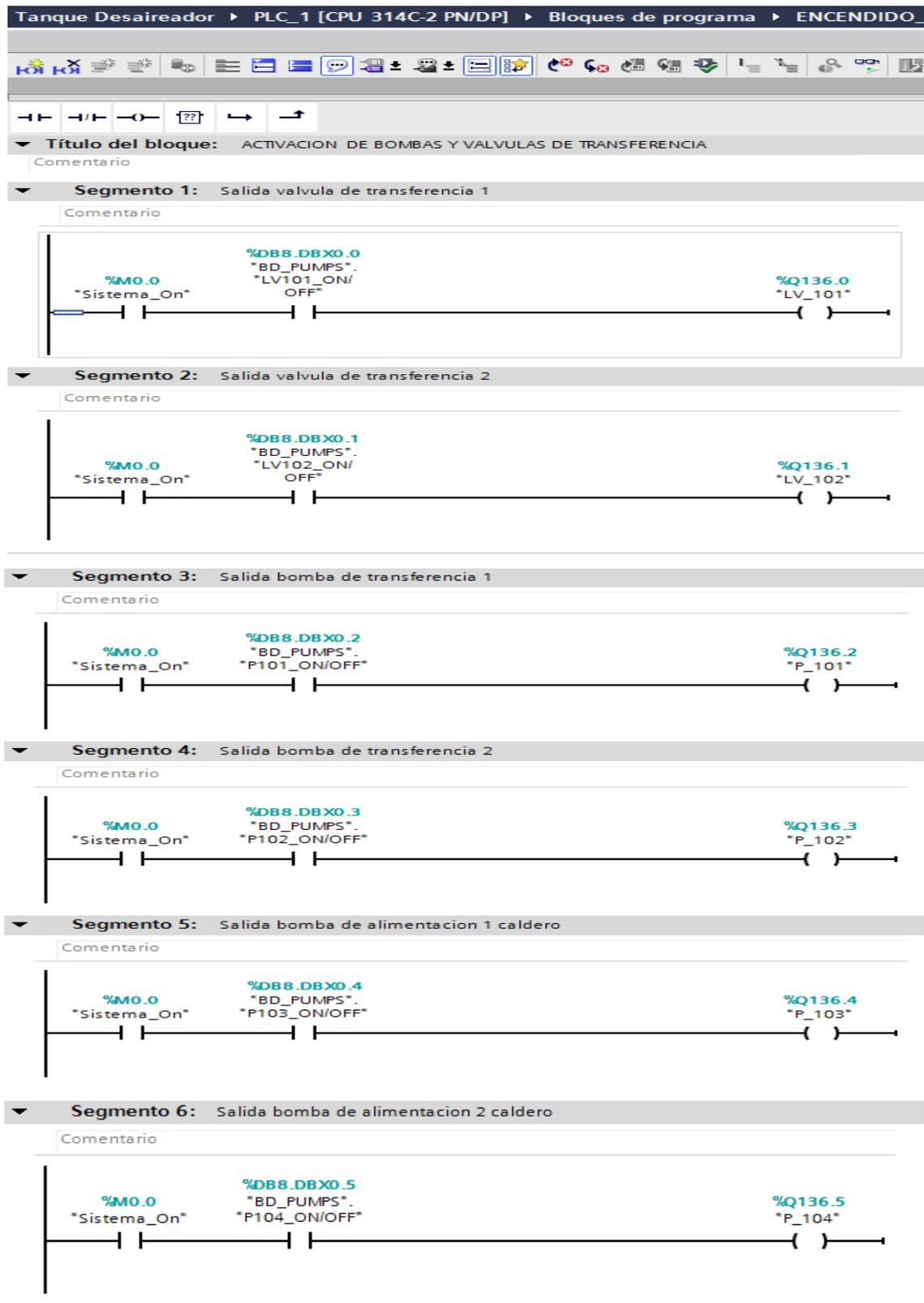


Figura 64: Función ENCENDIDO_BOMBAS.

2.12.3.4. TX_PRESION

Función para escalar los valores de entradas analógicas de 4 a 20 mA de los transmisores de presión.

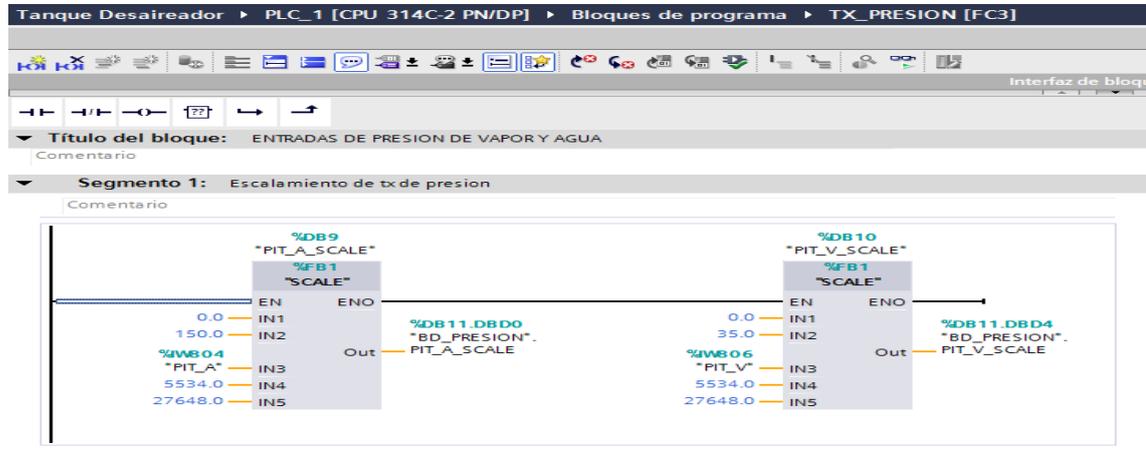


Figura 65: Función TX_PRESION.

2.12.4. Bloque de organización (OB)

Los bloques de organización controlan la ejecución del programa. Mediante OB se puede reaccionar a eventos cíclicos, eventos controlados por tiempo o eventos controlados por alarmas.

2.12.4.1. PRINCIPAL

Es el bloque donde se ejecuta el programa, dentro de este bloque se encuentran las funciones.

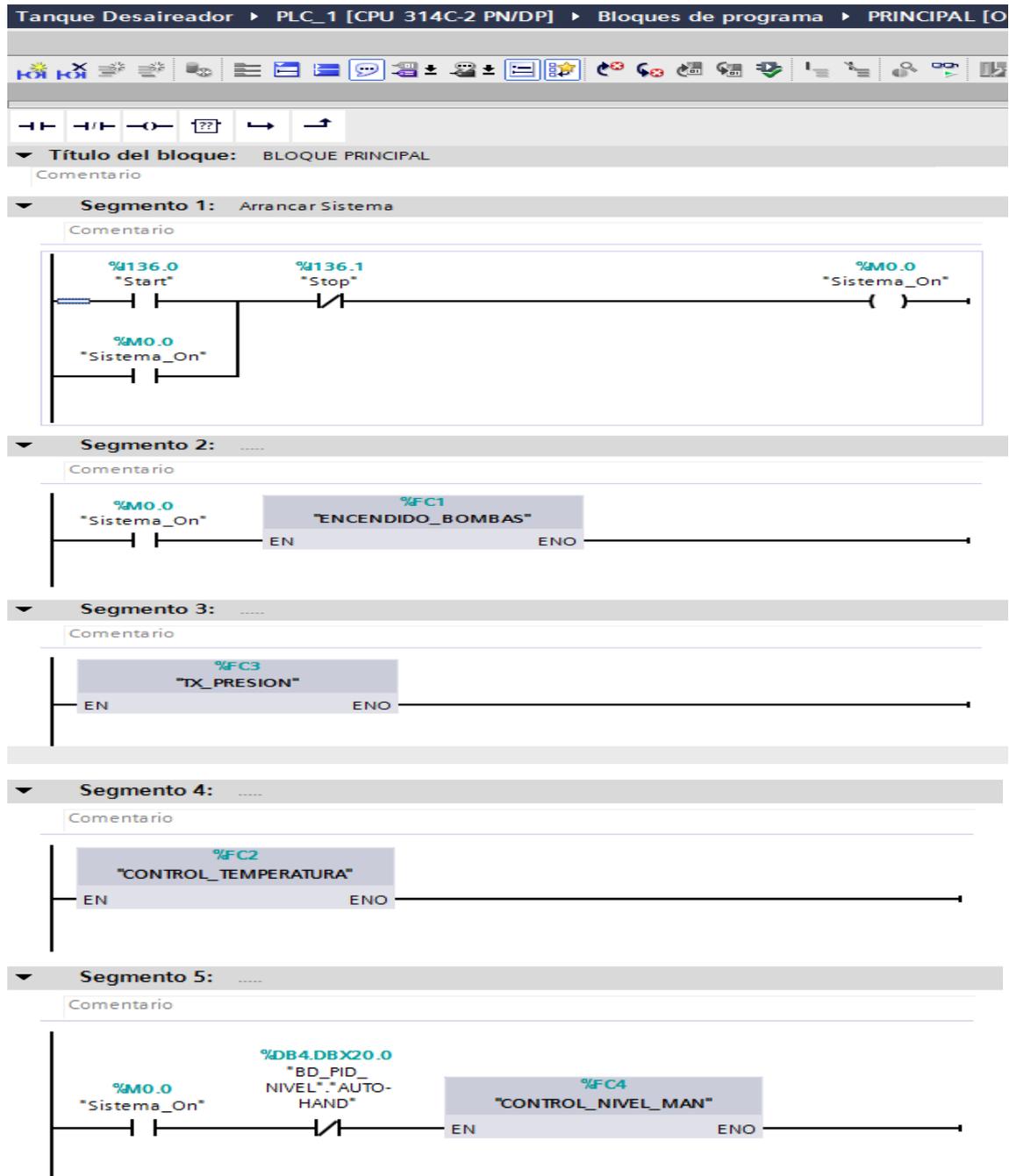


Figura 66: Bloque de organización PRINCIPAL.

2.12.4.2. PID_NIVEL

Bloque donde se realiza el control PID para el nivel del tanque desaireador. Este bloque de organización es de tipo cíclico (cyclic) y es el único bloque donde se ejecuta el bloque PID.

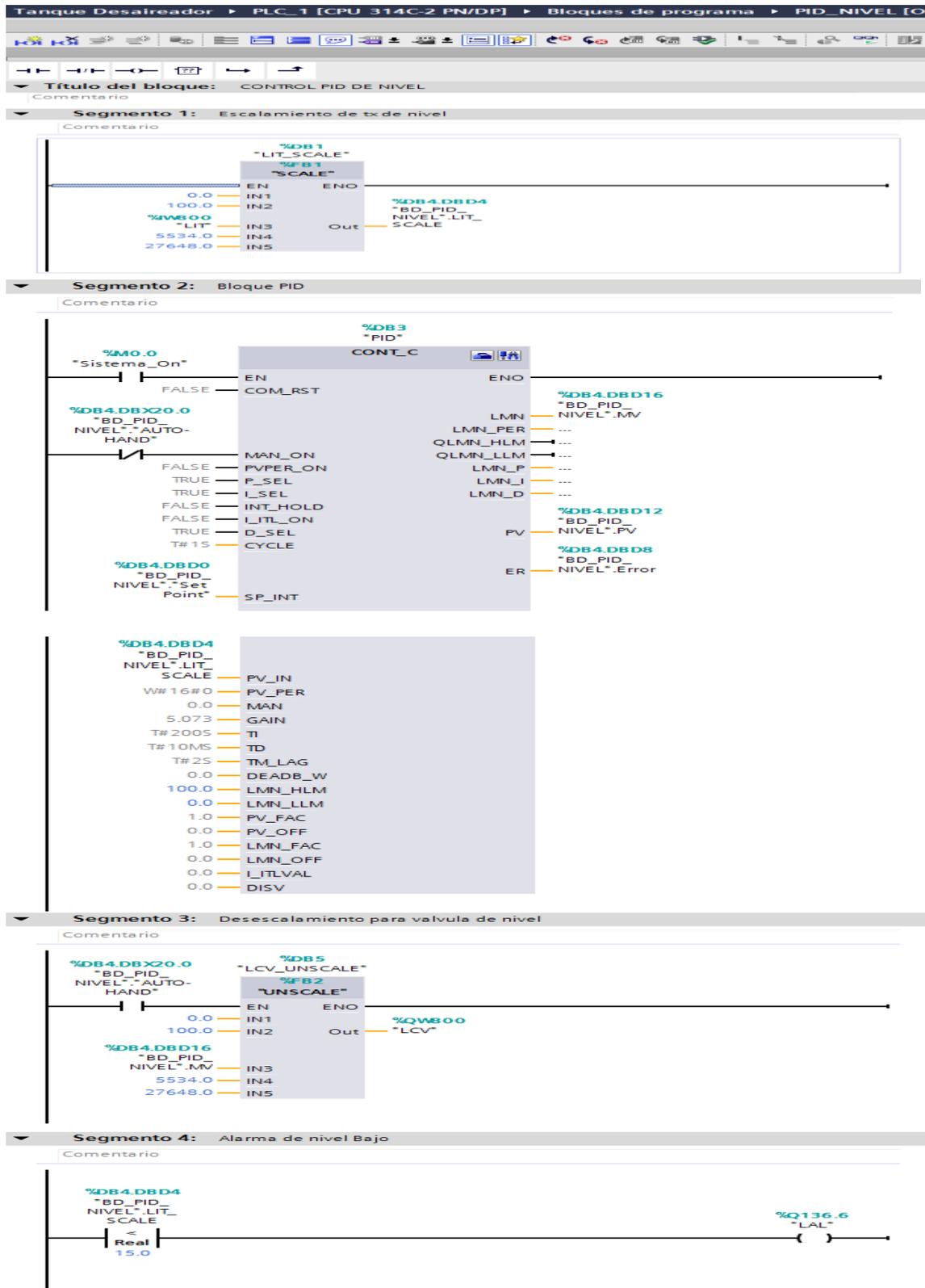


Figura 67: Bloque de organización cyclic PID_NIVEL.

2.13. Diseño del HMI SIEMENS KTP 1000 Basic color PN en TIA PORTAL V13

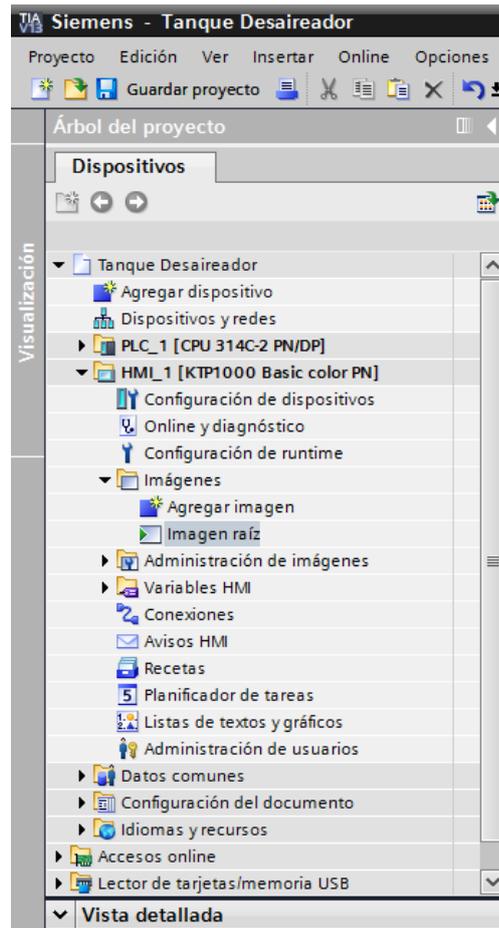


Figura 68: Vista Imagen raíz HMI.

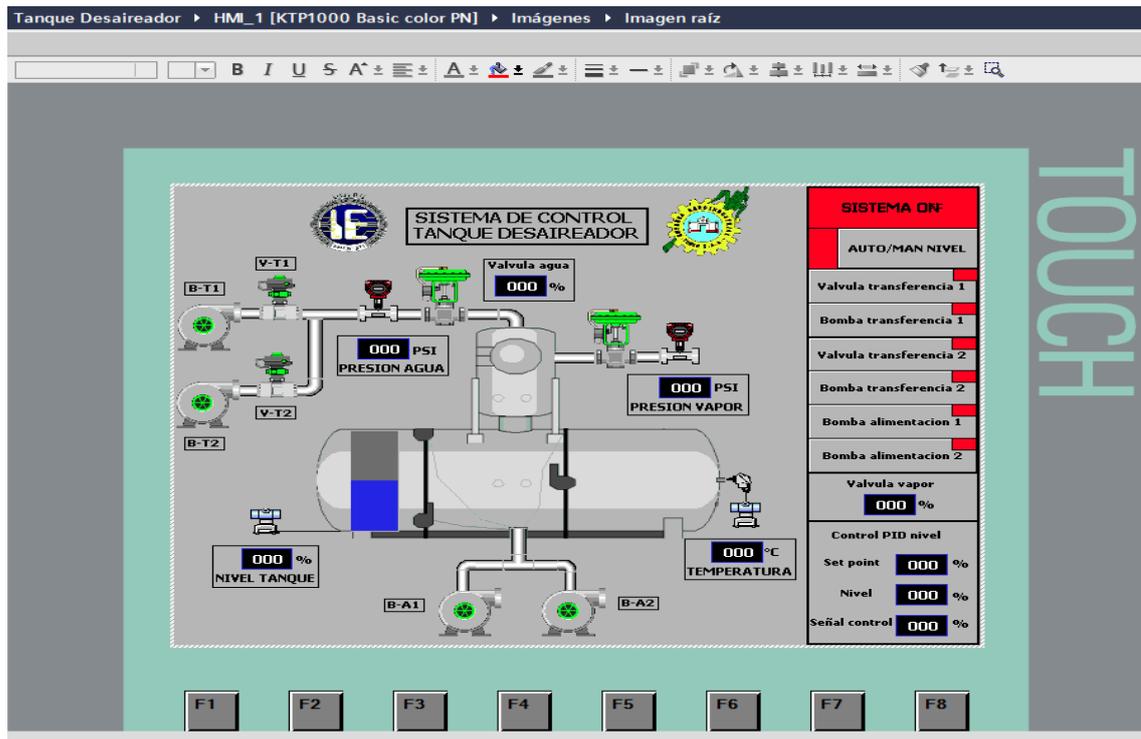


Figura 69: Diseño HMI tanque desaireador.

2.14. Diseño de control PID de nivel del tanque desaireador en LabVIEW.

Este programa esta creado con el objetivo de verificar el comportamiento de control PID con los parámetros de las constantes del regulador calculadas anteriormente.

2.14.1. Bloque de control

En este bloque se visualiza el funcionamiento del sistema con gráficos y controles de entrada para manipular variables.

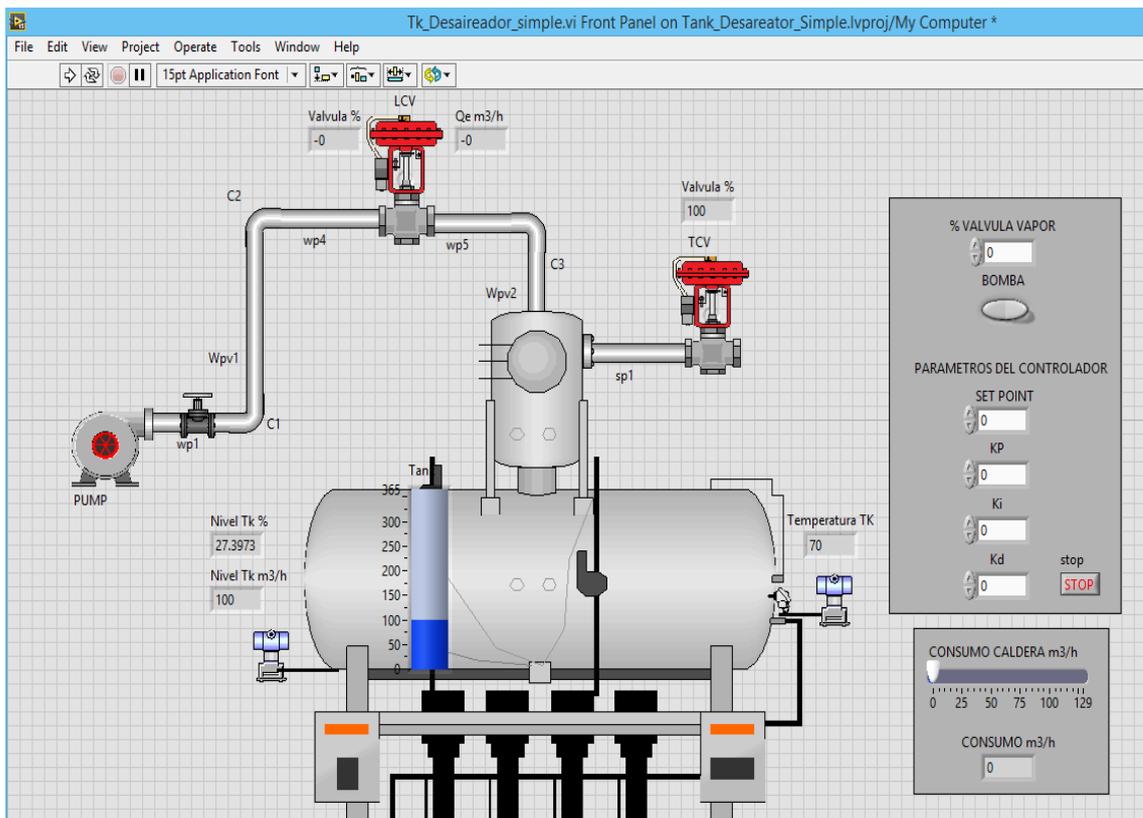


Figura 70: Bloque de control de LabVIEW diseño PID NIVEL.

2.14.2. Bloque de diagramas

En este bloque se realiza la programación del sistema, mediante lenguaje gráfico.

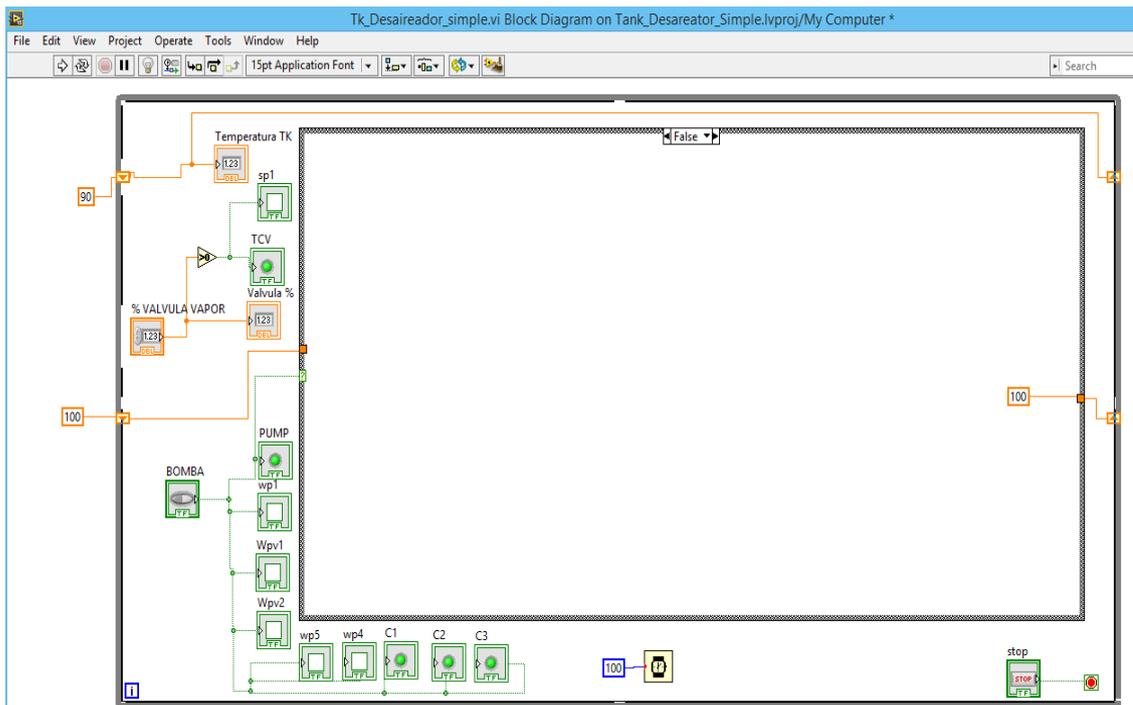
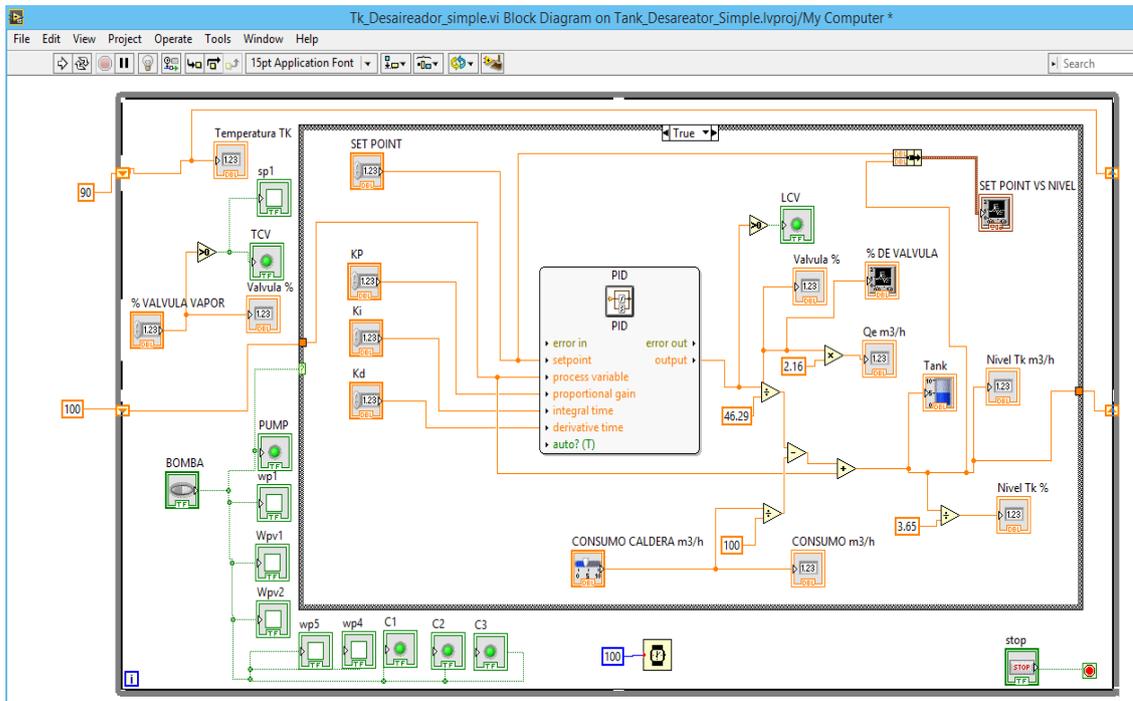


Figura 71: Bloque de diagramas de LabVIEW diseño PID NIVEL.

2.15. Evaluación económica

2.15.1. Costos de materiales para implementar

Materiales	Cantidad	Referencia	Unidad	Precio S/. S/. (Unidad)	Precio S/. (Cantidad)
PLC	1	Siemens SIMATIC S7- 314 C-2 PN/DP	Unidad	S/. 3500	S/. 3500
HMI	1	Siemens SIMATIC KTP 1000 calor Basic PN	Unidad	S/. 3800	S/. 3800
Fuente de alimentación 24VDC	1	Siemens SITOP (PSU100S)	Unidad	S/. 300	S/. 300
Válvula de globo 6"	1	SAMSON serie 3241	Unidad	S/. 35250	S/. 35250
Válvula mariposa 6" ON/OFF	2	BRAY serie 30	Unidad	S/. 15500	S/. 31000
Electrobomba	1	General electric worthingt	Unidad	S/. 9300	S/. 9300
Tx de presión diferencial	1	Siemens SITRANS P 7MF4433- 1EA22-2AC6-Z	Unidad	S/. 2800	S/. 2800
Tx de presión relativa	2	Siemens SITRANS P 7MF4033- 1EB10-1DA1	Unidad	S/. 2300	S/. 4600
Tx de temperatura	1	Yokogawa YTA110	Unidad	S/. 1500	S/. 1500
Sensor RTD	1	PT-100 de 3 hilos	Unidad	S/. 220	S/. 220
Electroválvula Namur 5/2 de 220 VAC	2	Bray (Serie 63 - Monoestable 5/2)	Unidad	S/. 250	S/. 500
Contactador	4	Schneider Electric (LC1D18M7)	Unidad	S/. 180	S/. 720
Llave de Fuerza	1	Schneider Electric (NSX 100 F)	Unidad	S/. 1200	S/. 1200
Llave termomagnética	4	Schneider Electric (EZ9F56363)	Unidad	S/. 109	S/. 436

trifásica 440 VAC					
Llave termomagnética monofásica 220 VAC	2	Schneider Electric (EZ9F56216)	Unidad	S/. 69	S/. 138
Relé térmico 440 VAC	4	Schneider Electric (LRD21)	Unidad	S/. 160	S/. 640
Relé 220 VAC con bobina de 24 VDC	2	Schneider Electric (RSLZVA1 CON RSL1B4BD)	Unidad	S/. 35	S/. 70
Alarma señalización sonora 24 VDC	1	Schneider Electric	Unidad	S/. 45	S/. 45
Pulsador NA	1	Schneider Electric (XB5AA31)	Unidad	S/. 39	S/. 39
Pulsador NC	1	Schneider Electric (XB5AA42)	Unidad	S/. 39	S/. 39
Cable N° 10 AWG	1	Indeco	Rollo x 100 m	S/. 200	S/. 200
Cable N° 12 AWG	1	Indeco	Rollo x 100 m	S/. 170	S/. 170
Cable N° 14 AWG	1	Indeco	Rollo x 100 m	S/. 100	S/. 100
Tablero	1	NSYCRN86300	Unidad	S/. 557	S/. 557
Riel Din	2	DXN10072	Unidad x 2 m	S/. 14	S/. 28
Tubo corrugado flexible	1	Bticino	Rollo x 100 m	S/. 80	S/. 80
Tubo conduit	20	EMT	Unidad x 5 m	S/. 45	S/. 900
Caja conduit + conectores	12	EMT	Docena	S/. 5	S/. 60
Canaleta ranurada	4	NSYSR200BD	Unidad x 3 m	S/. 18	S/. 72
Manguera flexible 1/8	1	Festo (PAN-4X0,75-BL)	Rollo x 50 m	S/. 180	S/. 180
Racores 1/8	1	Festo (QS - 1/4 - 6)	Bolsa x 24	S/. 120	S/. 120
TOTAL					S/. 98064

Tabla 7: Costos de materiales para implementar.

2.15.2. Rentabilidad del proyecto

Costo total de materiales	Ahorro de bagazo 5%	Ahorro en tuberías
S/. 98064	2.5 T /h S/. 200 x hora	S/. 1800 x 12 tubos

Rentabilidad diaria	Recuperación de inversión
S/. 4800	21 días
Tanque desaireador nuevo	Ahorro
S/. 282700	S/. 184636

Tabla 8: Rentabilidad del proyecto

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

CAPÍTULO III

3.1. Resultados de la simulación

3.1.1. Simulación del control PID de nivel del tanque desaireador en LabVIEW

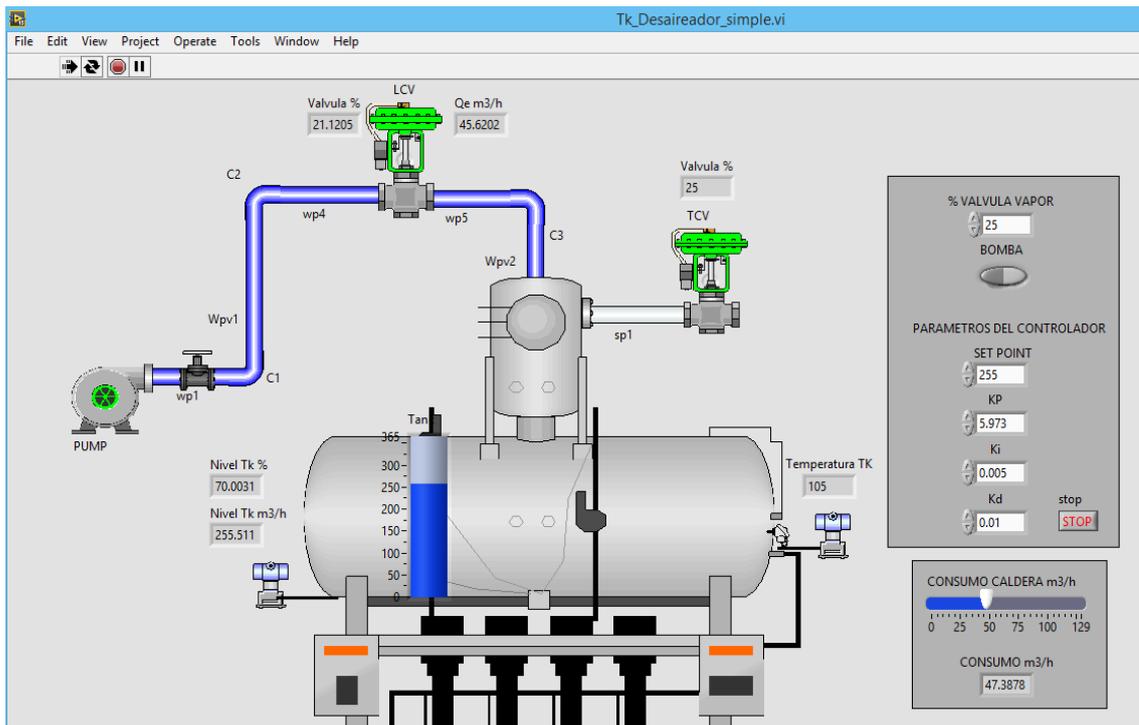


Figura 72: Simulación en LabVIEW diseño PID NIVEL.

La simulación con los parámetros de las constantes K_p : 5.073, K_i : 0.005 y K_d : 0.01 del bloque PID, nos brinda buenos resultados, donde no se observan oscilaciones bruscas de la válvula de control de nivel, permitiendo tener un nivel estable en el valor del set point.

De esta forma se puede corroborar que estos valores de las constantes del PID calculados mediante el método de respuesta en frecuencia y complementados con Matlab son óptimos y serán implementadas dentro del bloque PID que se desarrollara en programa del TIA PORTAL para el PLC.

3.1.2. Simulación del sistema automático HMI/SCADA para el control del tanque desaireador en TIA PORTAL V13.

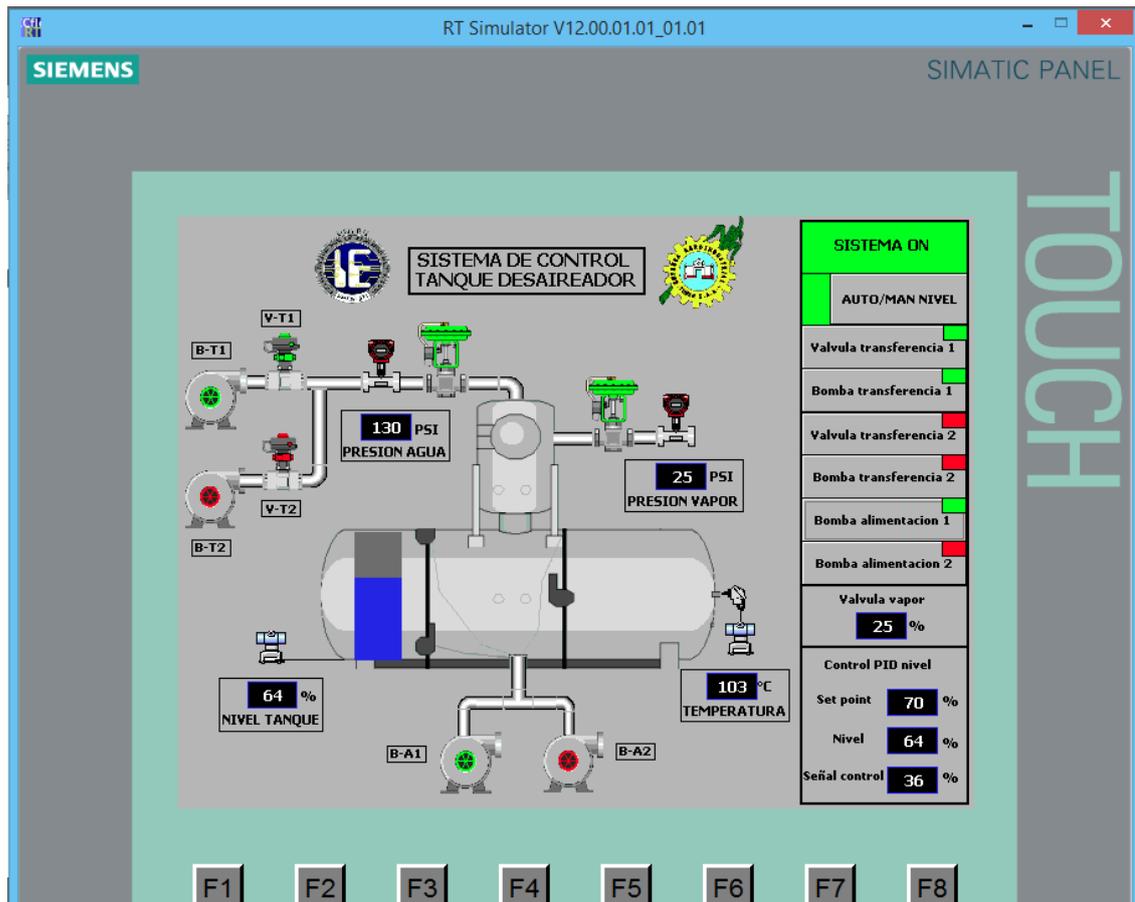


Figura 73: Simulación del sistema automático HMI/SCADA para el control tanque desaireador en TIA PORTAL.

La simulación realizada utilizando la plataforma de simulación PLCSIM y WINCC RUNTIME del TIA PORTAL, nos permite visualizar el comportamiento del sistema automático de control, así como verificar que la programación del PLC y el HMI sean correctos. De esta forma se garantiza que el sistema funcione correctamente al momento de ser implementado.

Además, podemos determinar que los valores de los sensores y actuadores están correctamente escalados para trabajar con el protocolo de comunicación HART de 4-20 mA.

3.2. Discusión

Se puede discutir el hecho de que los valores de las constantes del controlador PID al momento de ser implementados en el sistema real, puedan variar o en su defecto se utilice la opción de auto tuning del bloque PID del TIA PORTAL, para obtener valores de las constantes que garanticen un correcto funcionamiento. Todo dependerá del desempeño del sistema automático en el campo.

La implementación de los transmisores de presión de entrada de agua y vapor no son necesariamente indispensables, pero son de gran ayuda para la verificación de que el sistema este funcionando correctamente.

También se pone en discusión si es necesario la opción manual para controlar la válvula de nivel ya que, de no ser manipulada correctamente, puede ocasionar inundaciones en la planta o en su defecto dejar sin agua el tanque desaireador y por ende la caldera.

CONCLUSIONES

CAPÍTULO IV

4.1. Conclusiones

1. Al utilizar las normas ANSI ISA s5.1, s5.3 y s5.4 para la elaboración de los planos eléctricos y de instrumentos del sistema de desaireación, se logró tener una perspectiva global para proceder a desarrollar el diseño del sistema de control automático del tanque desaireador, ya que nos brinda información detallada de cada instrumento como la ubicación, nombre, numeración y tipo de conexión, ayudando de esta manera a reducir el tiempo de diseño y programación.
2. El método de respuesta en frecuencia utilizado para determinar los valores de las constantes del controlador PID para el nivel del tanque desaireador, nos dio un tiempo de establecimiento de 898 segundos cercano al tiempo de establecimiento ideal que es de 828 segundos, además se observó una respuesta pico de amplitud de 1.03 con un sobrepaso de 3.04%, menor al 5% que es el valor máximo para garantizar que el sistema se mantenga estable y no oscile ante diferentes perturbaciones. Con lo cual se determina que los valores de las constantes PID calculados mediante el método de respuesta en frecuencia garantizaran un control estable y eficiente.
3. La utilización del PLC S7 300 CPU 314 C-2 PN/DP que reemplaza al controlador neumático del tanque desaireador, es el apropiado ya que además de poseer 24 entradas digitales y 16 salidas digitales, posee 4 entradas analógicas y 2 salidas analógicas, que se ajustan a los requerimientos de los instrumentos de medición que se necesitan para lograr retomar el funcionamiento completo del tanque desaireador.
4. Al simular el sistema de control automático HMI/SCADA se comprobó que los valores analógicos que ingresan y salen del PLC están correctamente escalados para trabajar con el protocolo de comunicación HART de 4-20 mA. Además, al variar el valor de consigna del control de nivel del tanque desaireador del 70% a otro valor superior al 10%, se comprobó que el sistema sigue funcionando eficientemente sin presentar grandes oscilaciones.

Así también al regular la válvula de control de entrada de vapor al tanque desaireador, podemos obtener una temperatura máxima de 130°C sin que el agua alcance el punto de ebullición, mejorando el rendimiento térmico en la caldera.

RECOMENDACIONES

CAPÍTULO V

5.1. Recomendaciones

1. Al trabajar con sistemas de primero orden a los cuales no se les puede aplicar el método de Zigler y nichols para determinar los valores de las constantes del controlador PID, se recomienda utilizar el método de respuesta en frecuencia que es eficiente y garantiza la estabilidad del sistema.
2. La instalación de los transmisores de nivel y temperatura se recomienda que se realicen en el segundo piso de la caldera por debajo del nivel del tanque desaireador, ya que dicho nivel es un espacio despejado donde no hay perturbaciones fuertes como por ejemplo la liberación de vapor del domo de la caldera ante la activación de su válvula de alivio, lo que podría dañar o perjudicar el funcionamiento de los transmisores y por ende tener una mala lectura de las variables sensadas en el tanque desaireador.
3. Se recomienda que los diámetros de las válvulas de control de nivel y entrada de vapor sean los precisados en el capítulo 2 o en su defecto no menores a 4 pulgadas, para no afectar la desaireación del tanque, la temperatura del agua desaireada y el tiempo de establecimiento del control de nivel.
4. Antes de implementar el sistema se debe realizar una limpieza interna del tanque desaireador, verificando principalmente la torre de desaireación.
5. Después de ser implementado y probado el sistema se recomienda trabajar siempre en modo automático.

APÉNDICE

Apéndice A

Programa en MATLAB del comportamiento dinámico del sistema

```
% Dinamica del Nivel del Tanque Desaireador

clc

clear all

close all

%Variable del tanque

k1=0.06;k2=0.005;g=9.8;

A=20;

a1=0:0.1:1; %Abertura de válvula de entrada

a2=0:0.1:1; %Abertura de válvula de Salida

k=1;

A1o=0.5; %Abertura de Válvula de entrada en pto de Equilibrio

A2o=0.85; %Abertura de válvula de salida en pto de Equilibrio

%Pto de Equilibrio del Tanque

Ho=(k1^2*A1o^2)/(k2^2*A2o^2*g);

%Grafico no lineal del comportamiento del Nivel manipulando la válvula
de entrada y manteniendo la válvula de salida constante y viceversa

for i=1:11

hA1(i)=(k1^2*a1(i)^2)/(k2^2*A2o^2*g);

hA2(i)=(k1^2*A1o^2)/(k2^2*a2(i)^2*g);

k=k+1;

end

figure
```

```

t=0:0.1:1;

subplot(2,1,1);

plot(t,hA1),grid

axis([0 1 0 8]);

title('Variacion valvula de entrada ae');

ylabel('Altura (h)');

xlabel('Abertura de Valvula ae');

subplot(2,1,2);

plot(t,hA2),grid

axis([0 1 0 8]);

title('Variacion valvula de salida as');

ylabel('Altura (h)');

xlabel('Abertura da Valvula as');

%% Proceso de Simulación

tsim=10000;      %Tiempo de simulación

tA1=5000;       %Tiempo para que varíe la constante a1

tA2=1000;       %Tiempo para que varíe la constante a2

dA1=0.1;        %variación en a1

dA2=0.15;       %Variación en a2

%Simulación

sim('tanquel');

%Grafica de los dos resultados

figure

subplot(3,1,1);

```

```

plot(t,rY(:,1),t,rY(:,3)),grid

title('Nivel Tanque');

ylabel('Altura (h)');

xlabel('Tiempo (s)');

legend('No Lineal','Lineal');

subplot(3,1,2);

plot(t,rY(:,2)),grid

title('Abertura en ae');

ylabel('% ae');

xlabel('Tiempo (s)');

subplot(3,1,3);

plot(t,rY(:,4)),grid

title('Abertura en as');

ylabel('% as');

xlabel('Tiempo (s)');

clc

```

Programa en MATLAB de la respuesta del sistema a la función escalón unitario

```

%Respuesta al escalon unitario

clc

G=tf([8.57],[2857.14 1]);

step(G)

grid on

```

Programa en MATLAB comportamiento en frecuencia y fase del sistema

```

%Frecuencia y fase del sistema

```

```

clc

G=tf([8.57],[2857.14 1]);

bode(G,logspace(-5,3))

grid on

```

Programa en MATLAB valor de margen de fase PM

```

% Margen de Fase

clc

G=tf([8.57],[2857.14 1]);

margin(G)

grid on

```

Programa en MATLAB ancho de banda, margen de ganancia y fase del controlador PID

```

% BW, Margen de Fase y ganancia del controlador PID

clc

kp=2.67

ki=0.01

Kd=0.02

num=[8.57];

dem= [2857.14 1];

numpid=[Kd kp ki];

dempid=[1 0];

newnum= conv(num,numpid);

newdem= conv(dem,dempid);

G = tf (newnum,newdem);

```

```

figure (1)

margin (G)

grid on

figure(2)

Glc= feedback (G,1);

t= 0:0.1:1500;

step(Glc,t);

grid on

```

Programa en MATLAB respuesta del sistema en lazo cerrado con el controlador PID refinado

```

%Refinamiento

Kp1=1.9*Kp;

Kd1=0.5*Kd;

Ki1=0.5*Ki;

numpid1=[Kd1 Kp1 Ki1];

dempid1=[1 0];

newnum1= conv(num,numpid1);

newdem1= conv(dem,dempid1);

G1 = tf (newnum1,newdem1);

figure(3)

Glc1= feedback (G1,1);

t= 0:0.1:2000;

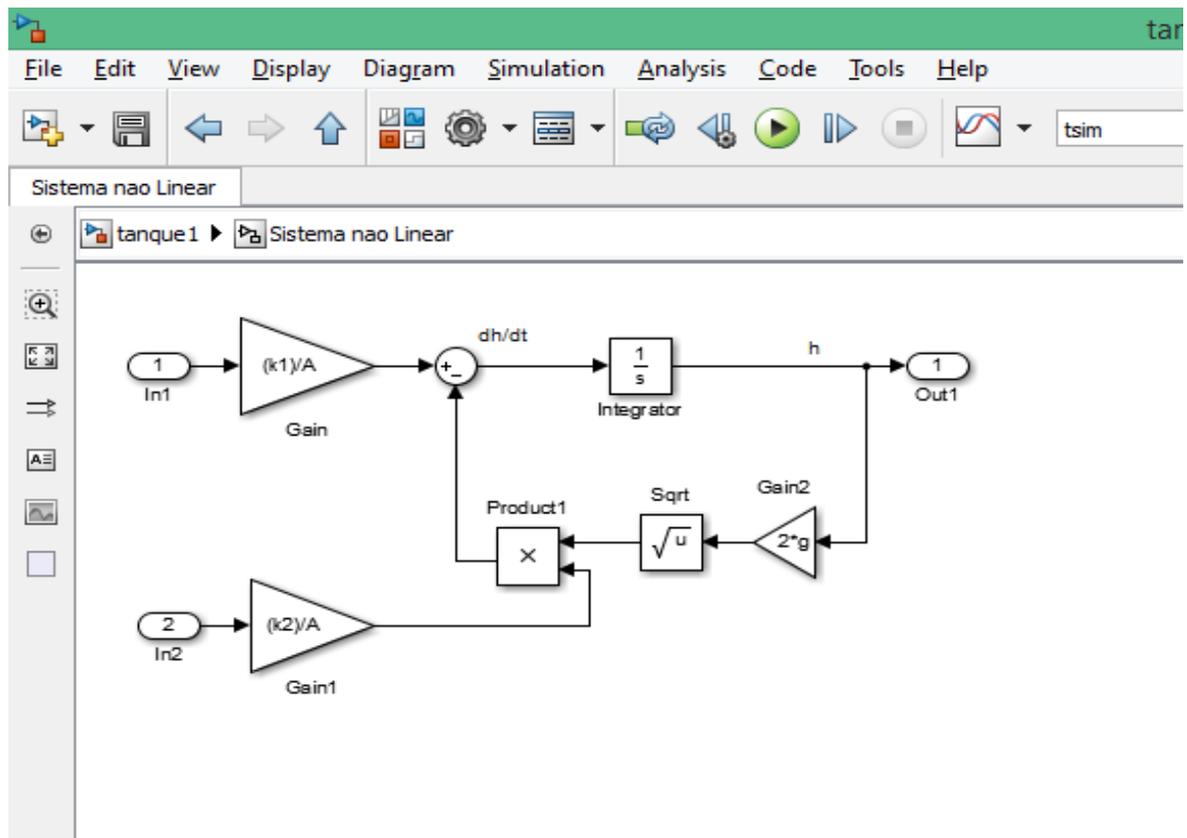
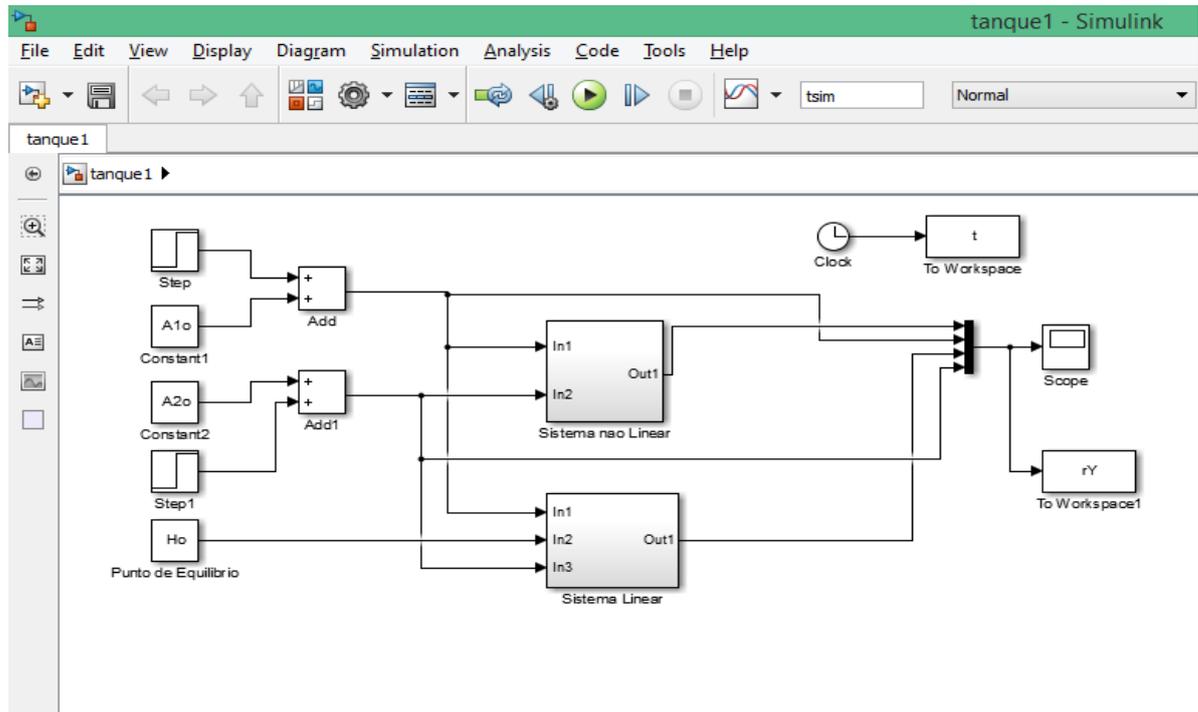
step(Glc1,t);

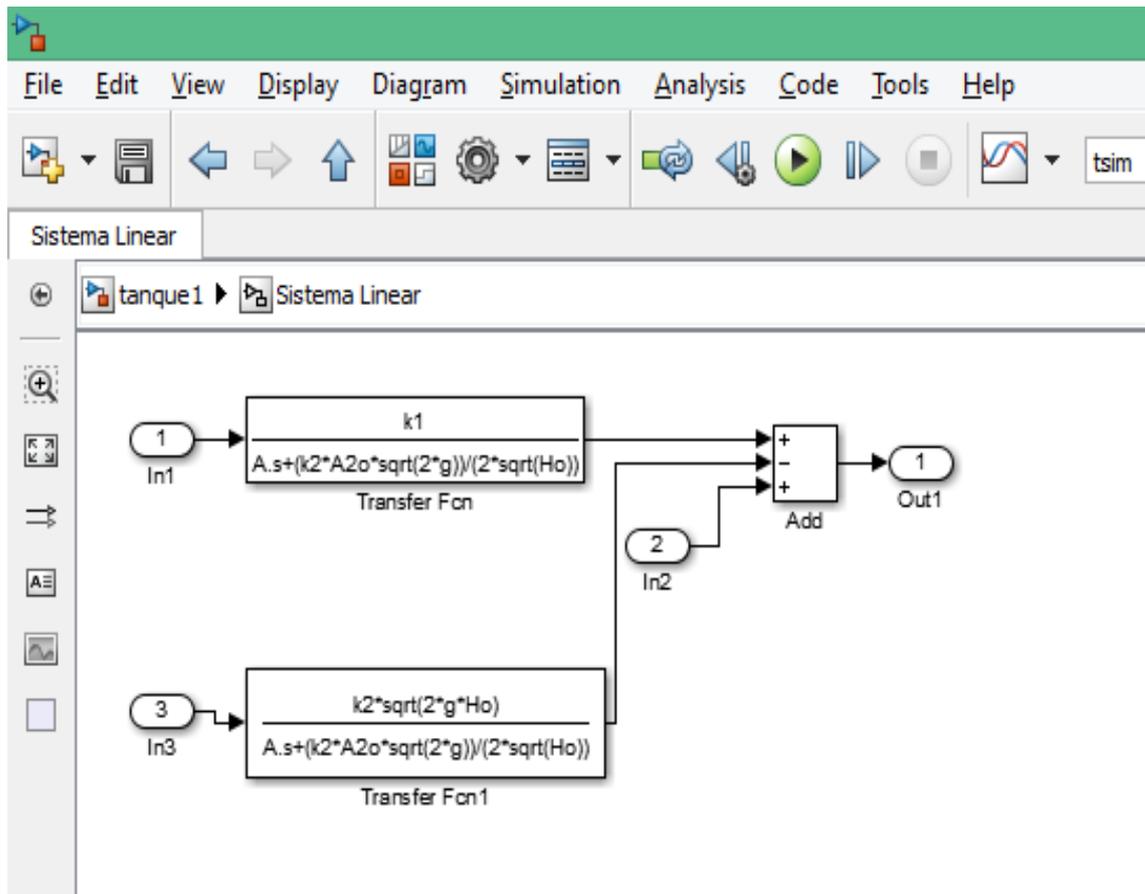
grid on

```

Apéndice B

Programa en SIMULINK del comportamiento dinámico del sistema.





BIBLIOGRAFÍA

- Ángulo, J. M. (1996). *Fundamentos, Diseños y Aplicaciones en la Industria y en las Microcomputadoras*. España: Editorial Paraninfo.
- Bahamondes, P. A. (2010). *Aguas de alimentacion de calderas*. ACHS.
- Barreiro, E., & Ghislieri, D. (2008). *Eliminacion de gases disuelto Desaireadores*. Mexico DF: Departamento de tecnologias y servicios industriales.
- Carlos A. Smith, & Armando B. Corripio. (1991). *Control Automático de Procesos*. Editorial Limusa.
- Chuk, D. (2012). *Controladores PID*. Mexico.
- Creus, A. (2011). *Instrumentacion Industrial*. Mexico DF: Alfaomega Grupo Editor .
- Dorf, R., & Bishop, R. (2005). *Sistemas de control moderno*. Madrid: Pearson Educacion S.A.
- engineering, T. (2007). *Tratamiento de agua para calderas*. santiago de chile.
- Gutierrez, A., & Monasterio, F. (2019). *Dominio de la frecuencia*. Mexico DF.
- Ogata, K. (2010). *Ingenieria de Control Moderna*. Madrid: Pearson educacion s.a.
- Villajulca, J. C. (22 de Septiembre de 2012). *Instrumentacion y Control.net*. Obtenido de Instrumentacion y Control.net: <http://instrumentacionycontrol.net/configuraciones-de-plc-compactos-y-modulares/>