

Universidad Católica de Santa María

Facultad de Ciencias e Ingenierías Físicas y Formales

Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica



DISEÑO, SIMULACIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE CONTROL PI DEL NIVEL EN UN TANQUE DE AGUA OSMONIZADA PARA EL TRATAMIENTO DE HEMODIÁLISIS

Tesis presentada por el Bachiller:

Castillo Amado, Edgar Raúl

Para optar por el Título Profesional de:

**Ingeniero Electrónico con Especialidad
en Automatización Y Control**

Asesor:

Mg. Sulla Torres, Raúl Ricardo

Arequipa – Perú

2023

UCSM-ERP

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA
INGENIERIA ELECTRONICA
CON ESPECIALIDAD EN AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL
TITULACIÓN CON TESIS
DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR

Arequipa, 09 de Junio del 2023

Dictamen: 004151-C-EPIE-2023

Visto el borrador del expediente 004151, presentado por:

2012224561 - CASTILLO AMADO EDGAR RAUL

Titulado:

**DISEÑO, SIMULACIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE CONTROL PI DEL NIVEL EN UN TANQUE DE
AGUA OSMONIZADA PARA EL TRATAMIENTO DE HEMODIÁLISIS**

Nuestro dictamen es:

APROBADO

**29278874 - DELGADO BARRA LUCY ANGELA
DICTAMINADOR**



**29267682 - RODRIGUEZ GONZALES PEDRO ALEX
DICTAMINADOR**



**29720651 - ZEGARRA GAGO HENRY CHRISTIAN
DICTAMINADOR**



DISEÑO, SIMULACIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE CONTROL PI DEL NIVEL EN UN TANQUE DE AGUA OSMONIZADA PARA EL TRATAMIENTO DE HEMODIÁLISIS

INFORME DE ORIGINALIDAD

23%

INDICE DE SIMILITUD

22%

FUENTES DE INTERNET

0%

PUBLICACIONES

15%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	Submitted to Universidad Católica de Santa María Trabajo del estudiante	14%
2	tesis.ucsm.edu.pe Fuente de Internet	3%
3	qdoc.tips Fuente de Internet	1%
4	www.slideshare.net Fuente de Internet	1%
5	tesis.ipn.mx Fuente de Internet	1%
6	repositorio.uta.edu.ec Fuente de Internet	1%
7	repositorio.unap.edu.pe Fuente de Internet	1%
8	www.scribd.com Fuente de Internet	1%



Excluir citas

Apagado

Excluir coincidencias < 1%

Excluir bibliografía

Apagado

DEDICATORIA

Esta tesis está dedicada a:

A mis padres Edgar y Patricia, por siempre estar a mi lado, jamás dejarme vencer y por ser los mejores padres del mundo. Este logro es de ustedes y para ustedes. Gracias Papás.

A mi amada esposa Jennifer, por su amor incondicional, por siempre estar a mi lado en buenas y malas. Te Amo

A mis hijas Belén y Kaela, por ser mi mayor fuente de inspiración y motivación en todo momento.

A mis hermanas Carmen y Danitza, por ser mi mejor ejemplo de superación y dedicación.

A mi Abuela Hermelinda, por ser un ejemplo de vida y por inmenso amor.

A mis tías Beatriz y Roxana, porque con sus oraciones, consejos y palabras de aliento hicieron de mí una mejor persona y de una u otra forma me acompañan en todos mis sueños y metas.

Finalmente quiero dedicar este trabajo a mis seres queridos en el cielo mis tíos Oswaldo y Rómulo por siempre brindarme sus buenos consejos y querer lo mejor para a mí, sé que ustedes también están felices y siempre los llevo en mi corazón.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por darme el don de la vida y nunca dejarme desamparado.

A mi familia y amigos, por ser mi fuente de motivación y apoyo constante en cada etapa de mi vida académica.

A mis profesores y mentores, por guiarme y enseñarme todo lo necesario para alcanzar este logro.

A la vida por permitirme pasar por días buenos y malos, pero aun así poder aprender de cada experiencia.



RESUMEN

En la presente tesis de investigación se realiza el modelamiento matemático y el control de nivel de agua osmonizada de un tanque de 1600 litros mediante algoritmo PI (proporcional-integral) basado en las reglas de sintonización de Ziegler – Nichols. En el modelamiento matemático de un tanque de agua para el tratamiento de hemodiálisis, se aplica la transformada de Laplace. El nivel de líquido de un tanque de agua se mide con un transmisor de nivel, la cual se compara con el nivel deseado (set-point), esta diferencia de error, es necesaria para que el controlador PI ajuste el nivel a la salida. Todo el sistema de control es de lazo cerrado. Previamente el controlador PI, se implementó en un PLC, se sintonizó con sus respectivos parámetros K_p , T_i y T_d mediante el método de la última ganancia de Ziegler-Nichols. Simultáneamente, se realizó la simulación de los parámetros mediante la sintonización utilizando Matlab. Para lograr esto, se implementó el sistema en una planta de tratamiento de agua para el tratamiento de hemodiálisis en una clínica especializada en pacientes nefrológicos, el sistema contiene el sensor de nivel, la válvula motorizada de acción proporcional, el ajuste del set-point y todo el circuito eléctrico necesario para comunicarse con el PLC. El trabajo se desarrolla usando un modelo matemático analítico de primer orden válido para un tanque de agua y el análisis de sistema lineal en tiempo continuo.

Palabras clave: Algoritmo PI, control PI, modelo nivel de tanque, sintonización PI simulink Matlab, Hemodiálisis, osmonizada, nefrológicos.

ABSTRACT

In the present research thesis, the Mathematical Modeling and control of the osmonized water level of a 1600-liter tank is carried out by means of a PI (proportional-integral) algorithm based on the Ziegler-Nichols tuning rules. In the Mathematical Modeling of a water tank, the Laplace transform is applied. The liquid level in a water tank is measured with a level transmitter, which is compared with the desired level (set-point). This difference in error is necessary for the P-I controller to adjust the level at the output. The entire control system is closed loop. Previously, the PI controller, implemented in a PLC, was tuned with its respective parameters K_p , T_i and T_d by means of the Ziegler-Nichols last gain method. Simultaneously, the simulation of the parameters was performed by tuning using Matlab. To achieve this, the system was implemented in a water treatment plant for hemodialysis treatment in a clinic specialized in nephrology patients, the system contains the level sensor, the motorized action proportional valve, the set-point adjustment and all the electrical circuit needed to communicate with the PLC. The work is developed using a first-order analytical mathematical model valid for a water tank and the analysis of a linear system in continuous time.

Keywords: PI Algorithm, PI control, tank level model, PI Simulink Matlab Tuning, osmonized, hemodialysis, nephrology.

INTRODUCCIÓN

El agua es fuente indispensable e irremplazable para la vida y la industria. Este vital elemento está presente en muchas aplicaciones de diferentes tipos, para ello requiere también de diferentes procesos o tratamientos de acuerdo con su aplicación o uso.

Las plantas de tratamiento de agua por ósmosis inversa comúnmente presentan cinco o más etapas, las cuales podrían ser: captación o almacenamiento, pretratamiento, tratamiento principal (por medio de membranas semipermeables), postratamiento y almacenamiento final.

Una de sus aplicaciones o usos de tratamiento de agua por osmosis inversas es el procesamiento de agua para uso hospitalario, en este caso para uso médico en el tratamiento de pacientes con insuficiencia renal aguda por medio de terapias invasivas llamadas hemodiálisis.

La mayoría de las plantas de agua por osmosis inversa utilizan sensores, indicadores y controladores convencionales, los cuales no siempre garantizan eficiencia, comunicación, monitoreo, registro y control de la planta en todas sus etapas de tratamiento.

Para que un sistema en su integridad funcione y opere correctamente se requieren de diferentes sensores, y controladores de uso altamente especializados los mismos que cumplan los requisitos y exigencias de acuerdo con su aplicación.

Las empresas hoy en día deben de modernizar sus diferentes procesos con el objetivo de garantizar la fiabilidad y eficiencia de sus trabajadores, materiales y recursos.

La instrumentación electrónica facilita la aplicación de estos sistemas aplicando la supervisión y control de etapas mediante sensores electrónicos y controladores digitales para así poder integrarlos a la industria moderna o 4.0

ÍNDICE

DEDICATORIA	iii
RESUMEN	v
ABSTRAC	vi
INTRODUCCIÓN	vii
CAPITULO I. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN	1
1.1. Antecedentes del problema.....	1
1.2. Descripción del problema.....	1
1.3. Justificación e importancia del problema	1
1.4. Hipótesis	2
1.5. Objetivos de la investigación.....	2
1.5.1. Objetivo general.....	2
1.5.2. Objetivos específico.....	2
1.6. Variables involucradas	3
1.6.1. Variables dependientes.....	3
1.6.2. Variables independientes	3
1.7. Metodología de la investigación.....	3
1.8. Alcances de la investigación	3
1.9. Antecedentes de la investigación.....	4
1.9.1. Antecedentes nacionales	4
1.9.2. Antecedentes internacionales	6
1.10. Marco metodológico.....	6
1.10.1. Tipo de investigación.	6
1.10.2. Población y muestra.....	7
1.10.3. Método y técnica de recolección de datos.....	7
1.10.4. Método de recolección de datos	7
1.10.5. Técnicas	8
1.10.6. Instrumentos y descripción	8
1.10.7. Métodos.....	8
CAPITULO II. FUNDAMENTOS DEL CONTROL PI ANALÓGICO	9
2.1 Introducción.....	9
2.2 Revisión de modelos	9

2.3	Modelado lineal de un tanque de nivel.....	10
2.3.1	Flujo uniforme en tuberías	10
2.3.2	Resistencia y capacitancia de sistemas de nivel de líquido.....	11
2.3.3	Resistencia de la válvula de carga.....	13
2.3.4	Coefficiente K	15
2.3.5	Capacitancia del tanque.....	16
2.4.	Modelo de primer orden.....	17
2.4.1.	Diagrama de bloques del sistema de nivel de líquido en lazo abierto.....	19
2.4.2.	Diagrama de bloques del sistema de nivel de líquido de tanque de agua osmonizada	20
2.5.	Controlador Proporcional del Sistema de nivel de tanque	22
2.5.1.	Función de transferencia	25
2.5.2.	Curva de respuesta	27
2.6.	Efectos de las acciones de control integral y derivativa en el comportamiento del sistema	28
2.6.1.	Acción de control integral (I).....	28
2.6.2.	Control integral de sistemas de nivel de agua osmonizada	29
2.6.3.	Acción de control derivativa (D).....	31
2.6.4.	Control proporcional de sistemas con carga inercial	32
2.6.5.	Control proporcional derivativo de un sistema con carga inercial.....	33
2.7.	Consideraciones a los Controladores PID	34
2.8.	Controladores PID avanzados	34
2.9.	Consideraciones Adicionales de los Controladores PID Comerciales	35
2.10.	Sintonía de controladores PID.....	35
2.10.1.	Reglas de Ziegler-Nichols para sintonización de controladores PI.....	37
2.10.2.	Método de lazo cerrado	37
2.11.	Análisis de equipos.....	39
2.11.1.	Sensores de nivel.....	39
2.11.2.	Electroválvula	40
2.11.3.	Controlador lógico programable (PLC)	40
2.12.	Transmisor de nivel de líquido.....	41
2.12.1.	Rango de aplicación	41
2.12.2.	Modelo y número del transmisor de nivel.....	42
2.12.3.	Características principales.....	42
2.12.4.	Diagrama de conexión.....	43

2.13. Controlador nano PLC Logo 12/24 RCE	45
2.13.1. Características principales.....	45
2.14. Módulo de suministro analógico	46
2.15. Válvula motorizada	47
2.15.1. Parámetros técnicos.....	47
2.15.2. Modo de conexión.....	48
2.15.3. Características estructurales	48
2.15.4. Instalación y puesta en marcha	48
2.15.5. Reparación y mantenimiento.....	49
2.16. Sensor de temperatura Pt100.....	51
CAPITULO III. DISEÑO DEL CONTROL DE NIVEL DE TANQUE DE AGUA OSMONIZADA	52
3.1 Introducción.....	52
3.2 Planta de tratamiento de aguas y sala CDS	52
3.3 Diagrama de bloques general del sistema	53
3.4 Diagrama en bloques del control de nivel del tanque de agua osmonizada	54
3.4.1 Componentes del control de nivel de la planta de tratamiento de agua osmonizada	55
3.4.2 Transmisor de nivel.....	55
3.4.3 Medición de corriente del transmisor de nivel	56
3.4.4 Válvula de control.....	62
3.4.5 Detectores de nivel.....	62
3.4.6 Conexionado al controlador PLC.....	63
3.4.7 Tarjeta de interface.....	65
3.5 Integración del sistema al PLC.....	68
3.6 Modelamiento, simulación y sintonía del control de nivel de tanque	69
3.7 Modelo de la planta	79
CAPITULO IV. PROGRAMACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL DE NIVEL.....	80
4.1 Introducción.....	80
4.2 Ambiente del LogoSoft Comfort ver8.....	80
4.3 Programación del PLC LOGO	81
4.3.1 Detectores de nivel alto y bajo.....	81
4.3.2 Lectura del transmisor de nivel de líquido	83
4.3.3 Regulador PI	86
4.4 Monitoreo de datos mediante Servidor WEB	88

4.5	Registro de datos del PLC LOGO.....	94
4.6.	Presentación de datos en Excel	97
CAPÍTULO V. COSTOS Y PRESUPUESTOS.....		100
5.1	Costo de componentes y desarrollo del programa para el PLC.	100
CAPÍTULO VI		101
6.1.	Resultados.....	101
6.2.	Curvas Reales obtenidas en la implementación.....	102
6.3.	Accionamiento de la válvula proporcional.	103
CONCLUSIONES.....		106
RECOMENDACIONES.....		107
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS		108
ANEXOS		110
Anexo I: Alarma de la pantalla LCD en color amarillo que indica que el tanque está lleno.....		110
Anexo II: Nivel de agua osmonizada a 1.03 m de altura con 20 °C		111
Anexo III: Programa del control de nivel de agua osmonizada del PLC LOGO		112
Anexo IV: Imagen del tanque de almacenamiento de agua tratada de la Clínica de Salud.....		113
Anexo V: Sistema de producción de agua tratada de la Clínica de Salud.		114
Anexo VI: Características del transductor de nivel de agua modelo HDL 300.....		115
Anexo VII: Manual del sistema de tratamiento de agua.....		116
Anexo VIII: Ensayo químico de Agua.....		117
Anexo IX: Ensayo microbiológico.		118
Anexo X: Características del módulo salida analógica.....		119
Anexo XI: Formato de registro de nivel y temperatura.		120

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Sistema de control de líquido.	12
Figura 2. Curva de nivel en función del gasto.	15
Figura 3. Diagrama de bloques de tanque.	19
Figura 4. Diagrama de bloque de la válvula.	19
Figura 5. Sistema de control de nivel de agua osmonizada.	20
Figura 6. Diagrama de bloques del sistema de control de nivel de agua osmonizada.	21
Figura 7. Sistema de control de nivel de tanque de agua osmonizada.	21
Figura 8. Diagrama de bloques reducido con realimentación.	23
Figura 9. Diagrama de bloques reducido trayectoria directa.	23
Figura 10. Reduciendo bloques de lazo directo.	24
Figura 11. Lazo realimentado unitario.	24
Figura 12. Diagrama de bloques simplificado.	25
Figura 13. Curva de $h_1(t)$ en función de t	28
Figura 14. (a) Curvas de $e(t)$ y $U(t)$ mostrando la señal de control no nula cuando el error actuante es nulo (control integral); (b) Curvas de $e(t)$ y $U(t)$ que muestran la señal de control nula cuando la señal de error actuante es nula (control proporcional).	29
Figura 15. Sistema de control de nivel de agua osmonizada.	30
Figura 16. Diagrama de bloques del sistema	30
Figura 17 (a) Control proporcional de un sistema con carga inercial; (b) Respuesta a una entrada escalón unitario.	32
Figura 18. Raíces conjugadas complejas en el plano S	33
Figura 19. Control proporcional-derivativo de un sistema con carga inercial y respuesta a una entrada escalón unitario.	34
Figura 20. Controlador PID de una planta.	37
Figura 21. Sistema de lazo cerrado con control proporcional.	38
Figura 22. Respuesta al sistema mostrando la oscilación de periodo PCR.	38
Figura 23. Vista del sensor de nivel integral.	42
Figura 24. Características del transmisor de nivel utilizado en la tesis.	42
Figura 25. Diferentes formas de realizar el conexionado del transmisor de nivel.	43

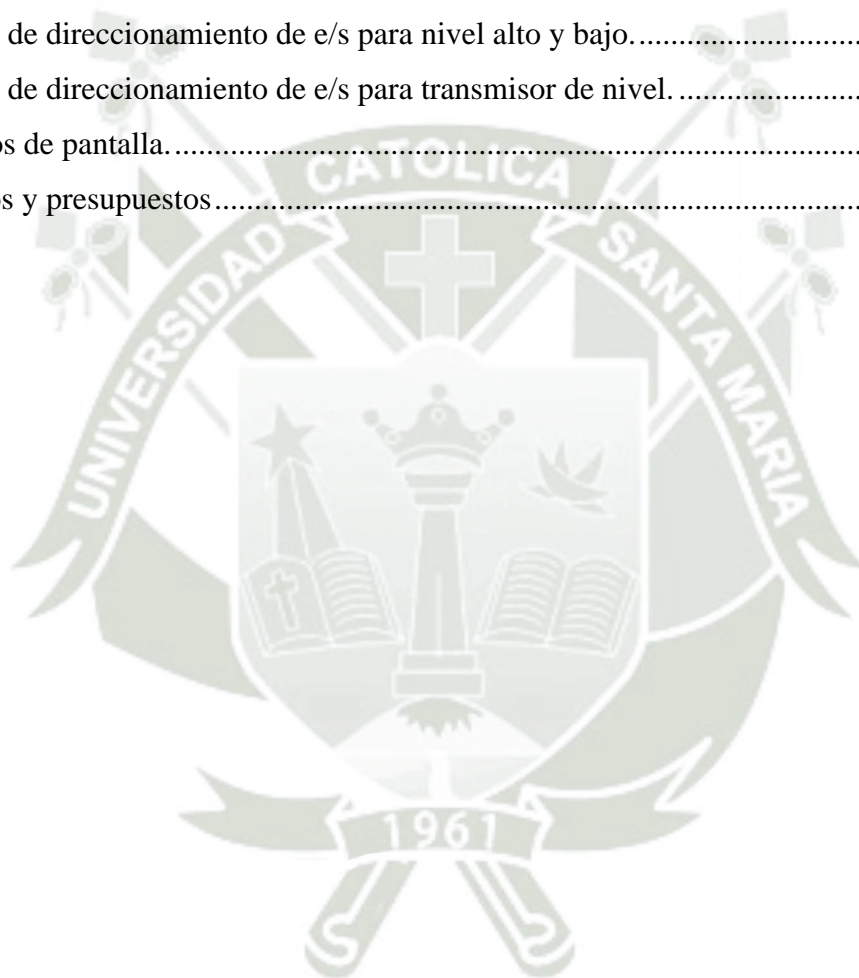
Figura 26. Detalle constructivo del sensor de presión.	44
Figura 27. Forma como se ha instalado el transductor de presión en el tanque y su interfaz hacia la DAQ USB.	45
Figura 28. Vista del PLC utilizado en la tesis.	45
Figura 29 Vista del suministro analógico utilizado en la tesis.	47
Figura 30. Vista frontal de válvula motorizada.	50
Figura 31. Diagrama de conexionado de la válvula de 24 VDC.	50
Figura 32. Sensor pt100 de 2 hilos con protección metálica.	51
Figura 33. Esquema general de planta de tratamiento de agua.	53
Figura 34 Diagrama de bloques general	53
Figura 35. Diagrama de control del nivel de agua osmonizada en la planta de tratamiento.	54
Figura 36. Transmisor de nivel antes de ser colocado dentro del tanque de agua osmonizada.	55
Figura 37. Diagrama eléctrico de conexión del sensor de corriente hacia la entrada analógica del PLC.	56
Figura 38. Relación lineal entre el nivel de tanque y la corriente.	57
Figura 39. Osmosis inversa, tablero de control de nivel y tanque de almacenamiento de agua osmonizada.	58
Figura 40. Recta de escalamiento del transmisor de nivel.	59
Figura 41. Conversión de señal de corriente I a señal de tensión.	60
Figura 42. Transmisor de nivel HDL300 dentro del tanque de agua osmonizada.	61
Figura 43 Ubicación de sensores en la parte baja del sistema.	61
Figura 44. Dirección del flujo de agua osmonizada controlado por la válvula motorizada.	62
Figura 45. Sensores en la pared externa del tanque de almacenamiento de agua osmonizada.	63
Figura 46. Descripción de los pines del detector de nivel xkc-y25 – t12v	64
Figura 47. Elaboración de la placa sistematizada para alimentación y señal de control para los detectores de nivel xkc-y25-t12v.	65
Figura 48. Descripción general de borneras de tarjeta de interface.	66
Figura 49. Ubicación de la tarjeta de interface dentro del lazo de control de nivel de tanque de agua osmonizada.	67
Figura 50. Tarjeta de interface PCB dentro de la caja de PVC.	67
Figura 51. Energizado del PLC mediante 220Vac.	68

Figura 52. Pantalla principal de control de nivel de agua osmonizada.....	69
Figura 53. Curva del nivel del tanque en función del caudal.....	73
Figura 54. Diagrama de bloques con las constantes del sistema dinámico.	74
Figura 55. Diagrama de bloques del sistema de control.	75
Figura 56. Parámetros del controlador de característica solo proporcional.....	75
Figura 57. Respuesta del controlador ante una entrada escalón unitario.....	76
Figura 58. Respuesta del controlador ante una entrada escalón unitario.....	76
Figura 59. Parametros de desempeño del controlador PID ante una entrada escalon unitario.....	77
Figura 60. Parametros de sintonia en lazo cerrado del controlador PID.	77
Figura 61. Respuesta temporal ante una entrada escalon unitario del controlador PID.	78
Figura 62. Parametros de sintonia en lazo cerrado del controlador PI.	78
Figura 63. Respuesta temporal ante una entrada escalon unitario del controlador PI.....	79
Figura 64. Aspecto del Logosoft Comfort en el modo diagrama.	80
Figura 65. Aspecto del Logosoft Comfort en el modo proyecto de red.	81
Figura 66. Programación de sensores de nivel bajo (LSDown) y nivel alto (LSUp).	82
Figura 67. Programación del transmisor de nivel, la comparación y escalamiento a corriente....	84
Figura 68. Programación del transmisor de nivel, la comparación y escalamiento de corriente..	84
Figura 69. Configuración de nivel y temperatura de agua osmonizada en el tanque.	85
Figura 70. Programación de los textos de aviso (pantalla LCD).....	86
Figura 71. Regulador PI.....	86
Figura 72. Parámetros regulador PI.....	87
Figura 73. Sistema logo web.....	88
Figura 74. Habilidad del servidor logo web.....	88
Figura 75. Proyecto de red.....	89
Figura 76. Configuración de la IP del PLC logo.	89
Figura 77 agregando un dispositivo nuevo.	90
Figura 78. Acceso al servidor web vía página web.	90
Figura 79. Acceso al logo maestro.....	91
Figura 80. El punto de ajuste esta entre 20 y 90 cm de rango de escala.....	91
Figura 81. Acceso al modo manual de control.	92
Figura 82. Apertura de la válvula.	92

Figura 83. Cerrado de la válvula.....	93
Figura 84. Direccionamiento de las teclas de navegación.	93
Figura 85. Slot donde se coloca la memoria micro SD estándar.	94
Figura 86. Carga del registro de datos del PLC logo en archivo Excel.	95
Figura 87. Interface PLC a computador.....	95
Figura 88. Modo de configuración en línea para acceder al registro de datos.....	96
Figura 89. Nombre del archivo por defecto de extensión CVS.	96
Figura 90. Validación de la descarga del registro de datos.....	97
Figura 91. Base de datos en Excel.	97
Figura 92. Representación de la fila de tiempo y el nivel de agua osmonizada en el tanque.	98
Figura 93. Gráfico del nivel de agua osmonizada vs tiempo.....	99
Figura 94. Gráfico del nivel de agua osmonizada vs el tiempo con PI.....	99
Figura 95. Curva set point 93.....	102
Figura 96. Curva set-point 73	103
Figura 97. Curva set- point 50	103
Figura 98. Válvula proporcional al 20%	104
Figura 99. Válvula proporcional al 40%	104
Figura 100. Valvula proporcional al 75%	105

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Valores propuestos por Ziegler - Nichols	38
Tabla 2 Comparación de sensores de nivel.....	39
Tabla 3 Análisis de electroválvulas	40
Tabla 4 Comparación de características de PLC	41
Tabla 5. Datos experimentales del dimensionamiento de la válvula de control Kv	72
Tabla 6. Tabla de direccionamiento de e/s para nivel alto y bajo.....	82
Tabla 7. Tabla de direccionamiento de e/s para transmisor de nivel.....	83
Tabla 8. Avisos de pantalla.....	85
Tabla 9. Costos y presupuestos.....	100



CAPITULO I. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. Antecedentes del problema

La producción de agua por osmosis inversa presenta muchas etapas las cuales son controladas y monitorizadas de diferentes maneras. Esta monitorización de las variables algunas críticas, son muy importantes al momento de verificar la operatividad de la planta, al realizar algún mantenimiento o cuando el sistema presenta alguna falla.

1.2. Descripción del problema

Las variables que llamamos críticas actualmente son medidas o detectadas por medio de dispositivos antiguos u obsoletos los cuales podrían generar lecturas erróneas hacia el operario de la planta o proceso. Algunas de estas como los medidores de flujo por flotadores o boyas.

Otras variables son muy importantes las cuales se tienen que medir constantemente al momento del funcionamiento o producción de la planta. Como sensores de temperatura, sensores de conductividad.

Estas últimas variables no se observan en todas las plantas por osmosis inversa siendo muy importantes su aplicación y uso debido a que podrían ayudar a la buena producción de agua y generar alguna alarma si se presentara errores.

El sistema de control de las plantas de tratamiento de agua no se desarrolla en base a dispositivos electrónicos digitales o controladores lógicos programables, esto podría generar fallas en el sistema eléctrico de los “contactores” o tableros eléctricos de potencia.

1.3. Justificación e importancia del problema

Trabajos relacionados con sistemas de estudio relacionados a la presente tesis, están enmarcados a sistemas experimentales o de laboratorio. El objetivo del presente trabajo de investigación es diseñar, simular e implementar un sistema y validar el control del nivel en un

tanque de agua osmonizada mediante la estrategia de control PID desarrollado por John G. Ziegler y Nathaniel B. Nichols (comúnmente denominado Ziegler – Nichols).

Su importancia radica en el modelado de la planta y del sistema de control en tiempo continuo de un sistema de control de nivel de un tanque de agua osmonizada. Además, la validación del sistema dinámico mediante la simulación y la sintonización en Simulink de Matlab; y los conocimientos de la teoría de control y de electrónica para desarrollar el sistema de control que tenga autonomía en condiciones ya sea el caso, favorables o desfavorables. Sin embargo, la finalidad de la tesis es, previamente elaborar un sistema de prueba de un modelo de planta (sistema de tanque con agua osmonizada), realizar el control PI y la validación respectiva del nivel del tanque.

1.4. Hipótesis

Hi: El diseño y simulación de control PI del nivel en un tanque de agua osmonizada ha mejorado gradualmente el proceso de tratamiento de agua para el tratamiento de hemodiálisis.

Ho: El diseño y simulación de control PI del nivel en un tanque de agua osmonizada no ha mejorado el proceso para el tratamiento de hemodiálisis.

1.5. Objetivos de la investigación

1.5.1. Objetivo general

Diseñar, simular e implementar el control PI del nivel en un tanque de agua osmonizada para el tratamiento de hemodiálisis.

1.5.2. Objetivos específico

a. Identificar y resumir planteamientos teóricos relacionados con el diseño de nivel de un tanque de agua osmonizada para hemodiálisis.

b. Simular en Matlab el modelo PI analógico de control del nivel de agua osmonizada.

c. Elaborar un sistema de control de nivel de tanque en lazo cerrado que valide el diseño de control PI mediante PLC.

d. Validar la temperatura del agua osmonizada en el tanque para evitar el aumento de la conductividad.

- e. Calcular el tiempo de vaciado y llenado del tanque de agua osmonizada.
- f. Monitorear los datos del tanque de agua osmonizada vía servidor Web integrado en el PLC.

1.6. Variables involucradas

Las variables comprometidas la podemos identificar como:

1.6.1. Variables dependientes

- Nivel del tanque – Variable controlada
- Señal de control – Variable de control
- Presión en el anillo de retorno de tanque – Variable controlada
- Parámetros de rendimiento: K_p , T_i y T_d .

1.6.2. Variables independientes

- Set-Point o punto de ajuste (SP) del nivel de tanque
- Perturbación externa. (condiciones de sanitización)

1.7. Metodología de la investigación

El texto hace referencia a una tesis de propósito básico aplicada, que tiene como objetivo realizar un estudio experimental. Para ello, se ha utilizado tanto fuentes de datos documentales como de campo. El enfoque es aplicado-experimental, lo que implica seguir un proceso de cinco fases para alcanzar los objetivos planteados.

- Modelamiento
- Diseño
- Simulación
- Implementación
- Sintonización y verificación

1.8. Alcances de la investigación

Los alcances que pretende abarcar la presente tesis podemos describirlas como:

- Está centrada en el comportamiento del nivel en un tanque de agua osmonizada, respecto a una entrada de referencia Set-Point.
- Comprenden un estudio explorativo vinculado al diseño del algoritmo de control PI para alcanzar a controlar el nivel de agua osmonizada en un tanque de material inerte para el tratamiento de hemodiálisis.
- Enmarcado en un estudio descriptivo, ya que se establecerá el modelo matemático dinámico de nivel en un tanque de agua osmonizada, el cual permite implementar el control de nivel en un tanque de agua osmonizada. Posteriormente se identificará las variables del modelo en un tanque de material inerte, para finalmente realizar escenarios de simulación.
- La implantación de un algoritmo de control PI en un PLC, finalmente, deberá controlar la variable en estudio (nivel) si se consume o no agua osmonizada por la red de distribución de hemodiálisis.

1.9. Antecedentes de la investigación

1.9.1. Antecedentes nacionales

Actualmente en la ciudad de Arequipa se cuenta con trece plantas de agua osmonizada para el tratamiento de Hemodiálisis, que brindan el tratamiento a pacientes de Essalud, Minsa, Fospoli, Fuerzas armadas y pacientes particulares.

En el Hospital Nacional Carlos Alberto Seguin Escobedo – ESSALUD, este cuenta con una planta de tratamiento de agua.

El Hospital Regional III Honorio Delgado Espinoza, en este hospital se cuenta con dos plantas de tratamiento de agua.

Clínica Sermedial Arequipa, esta clínica cuenta con tres plantas de tratamiento de agua.

Clínica CENA NIPRO MEDICAL PERU, esta cuenta con tres plantas de tratamiento de agua en la ciudad de Arequipa y una planta de tratamiento de agua en Mollendo.

Clínica NEFROSUR, esta cuenta con una planta de tratamiento de agua.

Clínica CAPREM, esta cuenta con una planta de tratamiento de agua

Clínica de Enfermedades Renales, esta cuenta con una planta de tratamiento. En la cual se probará el sistema.

Las UPS (Unidad prestadora de salud), nombradas ninguna cuenta con control de nivel de agua para su tanque de almacenamiento de agua osmonizada, generando en muchas ocasiones desbordamiento de agua que perjudica notablemente en el tratamiento del paciente nefrológico.

La tesis titulada “Diseño de un controlador PID-Difuso en la plataforma de LABView para el control de niveles de agua aplicados en el laboratorio de control y automatización de la EPIME” (Mayta y Tintaya, 2018). En este proyecto de tesis presenta dos tipos de control, basado en el monitoreo de una variable (altura o nivel de agua), en el laboratorio de control de la Escuela Profesional de Ing. Mecánica Eléctrica a de la Universidad de Puno, la investigación se llevó a cabo entre noviembre del año 2017 y noviembre del 2018 procediendo luego al análisis de cada tipo de control para luego deducir y encontrar un sistema de control más eficiente, con mejor respuesta ante perturbaciones y mejor desempeño en el proceso, los objetivos de esta tesis de investigación es de comparar un sistema de control PID simple y un controlador PID difuso, para el proceso de control de nivel de agua deseado en un tanque, realizar la instrumentación del proceso, realizar el control PID y PID difuso, simulación y obtención de resultados. La metodología utilizada para este trabajo fue experimental. El análisis realizado en el presente estudio se enfoca en los siguientes parámetros: el tiempo de las señales de salida, que se estudia a través de la medición en tiempo continuo del tiempo de respuesta, la elongación, el tiempo de subida y el tiempo de retardo. Además, se analiza el comportamiento de los controladores PID y PID difuso ante perturbaciones en el sistema. Para ello, se comparan las señales sin perturbación, las señales con perturbación y las señales con perturbación y referencia.

En la tesis de Pregrado “Automatización y modernización al sistema de sanitización de la planta de tratamiento de agua de la unidad de hemodiálisis hospital C.A.S. Essalud” recomienda para el control de nivel de tanque se debería usar otros elementos no convencionales como las boyas de nivel (Toro, 2020)

En la tesis de pregrado “Sistema Automático de Supervisión y Control de Nivel del Tanque Elevado para garantizar el abastecimiento de agua en la Universidad Nacional Pedro Ruíz Gallo” se señala que es posible llevar a cabo un control de nivel de forma tradicional con sistemas mecánicos, pero en sus recomendaciones indica cambiar las boyas por sensores de nivel e instalar

el sistema de supervisión para tener un mayor control sobre el abastecimiento de agua (Vela y MAz, 2018).

En la tesis de posgrado “Diseño de control no lineal por modo deslizante para regular el nivel del Proceso tanque con agua, Callao 2021” indica que, para controlar el nivel de líquido, se precisa tener el modelo lineal en un punto de operación o el sistema no lineal. Ambos sistemas que corresponden a la planta del sistema tanque de nivel (Cuzcano, 2021).

1.9.2. Antecedentes internacionales

Buscando información en repositorios digitales, se encuentra que, en el año 2010, se llevó a cabo un estudio en la Universidad Tecnológica de Pereira con el objetivo de controlar y medir el nivel de líquido en un sistema hidráulico mediante el uso de un sensor de presión diferencial. Para lograrlo, se utilizó el sensor mencionado y se controlaron los niveles de llenado y vaciado del sistema mediante un autómatas programable de Siemens.

Por otro lado, en la Escuela Politécnica Nacional se realizó el diseño y construcción de un sistema de control de nivel de líquidos tanto de manera analógica como digital, orientado a su utilización en prácticas de control automático sobre un sistema a escala que representa un sistema real, cuyo objetivo era entender de manera conveniente los problemas de control de nivel de líquidos en procesos industriales (Benitez, 2004).

En el año 2011, en la Universidad de Córdoba se diseñó un sistema de cuatro tanques interconectados, que forma parte de una matriz multivariable $[2 \times 2]$. El objetivo del sistema era controlar el nivel de dos depósitos mediante la tensión de dos bombas, que suministraban líquido a los tanques inferiores bajo control. Asimismo, había dos tanques superiores que se encargaban de acoplar las entradas y salidas de sistema.

1.10. Marco metodológico

1.10.1. Tipo de investigación

La presente investigación es básica – aplicada de tipo cualitativo, buscando adquirir conocimientos nuevos en el campo del control de procesos, al plantear una solución del control de

nivel de un tanque de agua osmonizada mediante algoritmo de control PI (proporcional-integral) analógico basado en PLC.

La técnica empleada para el propósito de la tesis ha sido: Modelamiento en el plano de Laplace, la simulación de modelo, sistema a escala y programación del controlador el diagrama de funciones (FUP).

Se ha planteado y formulado el algoritmo de control según los criterios planteados, así mismo se ha implementado el programa *ControlNivelPID.lsc*, el cual se carga en memoria de programa del PLC Logo, para lograr los objetivos planteados en la presente tesis.

1.10.2. Población y muestra

Las muestras recolectadas, para este caso, son los datos de nivel del tanque (cm) que se muestrean cada segundo en cada iteración del programa. Las muestras son capturadas por el sensor de nivel de alta precisión. La población está relacionada con el sistema de control de nivel de tanque de agua osmonizada el cual es el interés de la tesis.

1.10.3. Método y técnica de recolección de datos

Considerando la tasa de datos a procesar por cada 1 s, estos son procesados por el PLC Logo 12/24 RCE y almacenados en memoria interna para tomar la decisión de generar la señal de control que abre o cierra la válvula motorizada.

La recolección del dato está basada en el proceso de muestreo y retención (Sample/Hold) del Convertidor Analógico/Digital (A/D) de 10 bits del PLC Logo. Los datos son almacenados en memoria externa SD de 8 Gb.

1.10.4. Método de recolección de datos

Los datos del sistema de control de nivel de agua osmonizada, han sido obtenidos de forma sistemática a memoria externa SD en formato de texto (txt). Para recabar dicha información en forma gráfica se ha convertido a formato Excel de extensión CSV.

1.10.5. Técnicas

Los datos han sido copiados a archivo digital desde la fuente de origen, el PLC Logo. Los datos numéricos son visualizados desde la página web (http://192.168.1.177/logo_login.shtm?!App-Language=3) así mismo el monitoreo desde el software LogoSoft Comfort V8, IDE del PLC Logo.

1.10.6. Instrumentos y descripción

La información de las variables de nivel del líquido, temperatura del líquido, nivel máximo y nivel mínimo, la fecha y la hora ha sido procesada en la hoja electrónica MS EXCEL el cual permite conservar, consultarla y posteriormente recuperar la información. La simulación del modelo matemático, control de nivel de agua osmonizada, se ha desarrollado con Simulink de Matlab.

Asimismo, se han utilizado equipo e instrumentos de laboratorio, como el multímetro, osciloscopio digital, testeador de red, un computador y cámara digital para evidenciar la información del módulo de un sistema de control de nivel de tanque de agua osmonizada.

1.10.7. Métodos

En cuanto a la metodología empleada en la tesis, se trata de un enfoque cuantitativo. De acuerdo con Hernández-Sampieri (2014), este método se basa en un enfoque deductivo y lógico que se enfoca en la formulación de preguntas de investigación y la generación de hipótesis para, posteriormente, ponerlas a prueba. En la presente investigación, se emplea información numérica, gráfica y simbólica con el fin de obtener una mejor comprensión del problema.

El grupo poblacional y toda la información de datos ha sido procesada con el software LogoSoft Comfort del PLC, Versión 8.2, el controlador del sistema, la técnica de análisis de datos, es decir la data digital cuantificada se almacena en memoria externa SD y se presenta en forma de tabla y gráfico.

CAPITULO II. FUNDAMENTOS DEL CONTROL PI ANALÓGICO

2.1 Introducción

Para lograr el control y modelado del nivel de un tanque de agua osmonizada utilizando un algoritmo PI basado en las reglas de sintonización de Ziegler-Nichols, es necesario crear un modelo matemático del sistema que permita simular su funcionamiento antes de implementar un sistema de control de nivel en un tanque de agua con flujo laminar.

El modelo en cuestión posibilitará llevar a cabo evaluaciones de rendimiento en situaciones donde se presente una interferencia externa. No obstante, su mayor ventaja radica en la eliminación del peligro inherente a dañar los elementos debido a posibles fallos en la programación del controlador.

2.2 Revisión de modelos

El objetivo del modelamiento de sistemas dinámicos es obtener información sobre las características dinámicas del sistema, suponiendo que la salida actual del sistema en el tiempo $t=0$, depende de las entradas pasadas en el tiempo <0 , basándose en el principio de causalidad:

- Servir de banco de ensayos para la optimización de controladores.
- Comprender mejor el procedimiento de formación de estabilidad del sistema de control.

Así las fases en la creación del modelo son:

- Experimentación. Se realizará ensayos de dos tipos: en régimen estabilizado, con control de velocidad con perturbación, y transitorio, sin perturbación.
- Selección y definición del sistema del modelo.
- Ajuste de parámetros. Utilizando los resultados de los experimentos y reglas de sintonización de controladores.
- Validación del modelo. Mediante unos controles realizados en el sistema realista, comparando las variables obtenidas experimentalmente y las resultantes de simular el modelo con las mismas entradas.

Así, podemos definir el modelamiento como: “La dinámica de muchos sistemas, ya sean mecánicos, eléctricos, térmicos, económicos, biológicos, etc, se describe en términos de ecuaciones diferenciales. Las ecuaciones diferenciales mencionadas se obtienen a partiré leyes físicas que gobiernan un sistema determinado, como las leyes de Newton para sistemas mecánicos

y las leyes de Kirchhoff para sistemas eléctricos. Debemos siempre recordar que obtener un modelo matemático razonable es la parte más importante de todo el análisis” (Ogata, 2010).

2.3 Modelado lineal de un tanque de nivel

La fase inicial en el diseño de un proceso es la creación de un modelo que defina una representación matemática de la instalación. Se establecerá un modelo que explique el nivel de un tanque en función de la tensión de entrada.

2.3.1 Flujo uniforme en tuberías

Cuando se produce un flujo uniforme, las propiedades del flujo, como la presión y la velocidad promedio, se mantienen constantes en el espacio y en el tiempo. Debido a su naturaleza, este tipo de flujo se analiza fácilmente y sus ecuaciones se emplean para el diseño de sistemas de nivel de tanques. En este tipo de flujo, la velocidad del fluido no varía, lo que indica que el fluido no está acelerando, de acuerdo con la segunda ley de Newton:

$$\sum F_x = 0$$

Es decir, existe un equilibrio de fuerzas.

Ahora para analizar el flujo de fluidos, se hace necesario dividir los regímenes de flujo en dos:

- Régimen de flujo laminar, y
- Régimen de flujo turbulento

Osborne Reynolds, basado en experimentos en tuberías como fluidos, explicó numéricamente el cambio entre los diferentes regímenes de flujo de acuerdo con el número de Reynolds (Re) y encontró que:

- | | |
|--------------------------|---------------------|
| • $Re < 2\,000$ | Flujo Laminar |
| • $2\,000 < Re < 5\,000$ | Flujo en Transición |
| • $Re > 5\,000$ | Flujo Turbulento |

En el caso laminar, el flujo de fluido se produce en venas sin turbulencia. Los sistemas que implican flujo turbulento suelen requerir, para representarse, de ecuaciones diferenciales no

lineales, mientras que los sistemas que corresponden a flujo laminar pueden representarse por ecuaciones diferenciales ordinarias. Por lo común, en los procesos industriales frecuentemente se tienen flujos en tuberías y tanques; en esos procesos el flujo es frecuentemente turbulento y no laminar.

Para deducir los modelos matemáticos de sistemas de nivel de líquido, se introducen los conceptos de resistencia y capacitancia para tales sistemas de nivel de líquido. Así es posible describir las características dinámicas de esos sistemas en forma simple.

Todos los aspectos anteriores se resumen en un número adimensional, Reynolds. El número de Reynolds considera la geometría de la tubería y la turbulencia producida en ésta:

$$Re = \frac{v.d}{\nu_f}$$

Siendo v la velocidad de salida del líquido [m^2/s], d el diámetro característico de la tubería [m] y ν_f la viscosidad cinemática del líquido [m^2/s] o flujo.

2.3.2 Resistencia y capacitancia de sistemas de nivel de líquido

Considerando primero el sistema de control de la figura 1 como base de nuestro análisis. El objetivo es mantener constante el nivel a pesar de las variaciones de la demanda. Para esto, se debe encontrar una expresión matemática que describa el comportamiento de la válvula de carga; por analogía eléctrica es la resistencia. La expresión matemática que describe el volumen del tanque es la capacitancia eléctrica.

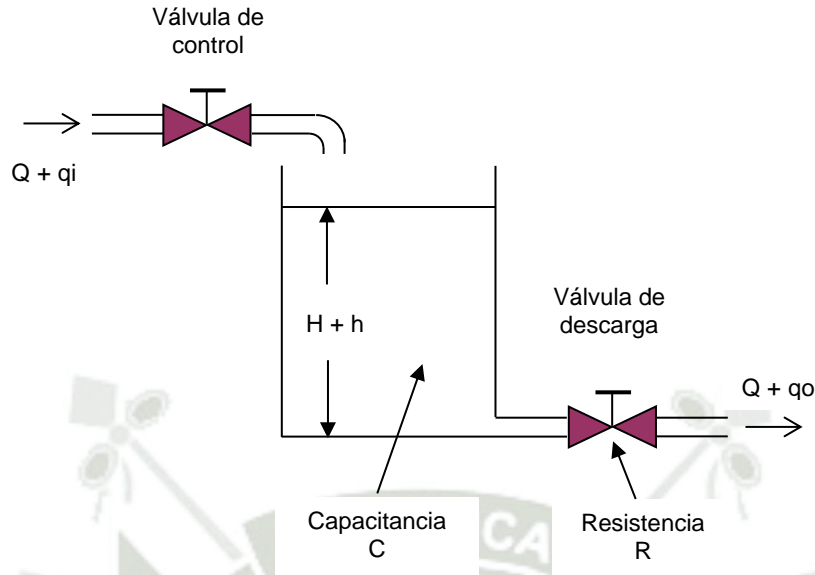


Figura 1. Sistema de control de líquido.

Fuente: Elaboración propia.

Donde:

Q = gasto en estado estacionario (antes de haber algún cambio), en m^3/s

qi = pequeña desviación en el gasto de entrada respecto a su valor en estado estacionario, en m^3/s

qo = pequeña desviación del gasto de salida respecto a su valor en estado estacionario, en m^3/s .

H = nivel de carga en estado estacionario (antes de haber algún cambio), en m

h = pequeña desviación del nivel respecto a su valor en estado estacionario, en m.

En este sistema el líquido fluye a través de la válvula de carga en el costado del tanque. Si el flujo a través de esta resistencia es *laminar*, la relación entre el gasto en estado estacionario y la presión hidrostática en estado estacionario al nivel de la restricción queda dado por:

$$Q = KH$$

Donde:

Q = gasto o flujo en estado estacionario, en m^3/s

K = coeficiente, en $m^{2.5}/s$

H = presión hidrostática en estado estacionario, en m.

Hay que notar que la ley que rige el flujo laminar es análoga a la ley de Coulomb, que establece que la corriente es directamente proporcional a la diferencia de potencial.

2.3.3 Resistencia de la válvula de carga

Sea el flujo a través de una tubería corta que conecta dos tanques. En este caso la resistencia al flujo de líquido se define como la variación de diferencia de nivel, esto es la diferencia de niveles de líquido entre los dos tanques necesaria para producir una variación unitaria en el gasto.

$$R = \frac{\text{cambio en la diferencia de niveles}}{\text{cambio en el gasto}} \quad \frac{[m]}{[m^3/s]}$$

Dicho en otro modo,

$$R = \frac{dH}{dq} \quad \frac{[m]}{[m^3/s]}$$

Como la relación entre el gasto y la diferencia de nivel difiere entre el caso de flujo laminar y el flujo turbulento, en lo que sigue se consideran ambos casos alternativos.

Del sistema de nivel de líquido que aparece en la figura 1 tenemos que encontrar expresiones analíticas que relacionen el nivel H del tanque, la capacitancia del tanque, la resistencia de la válvula de carga, el caudal de entrada y el caudal de salida.

Para el caso de flujo laminar, la resistencia R_l se obtiene como:

$$R_l = \frac{dH}{dQ} = \frac{H}{Q} \quad (1.1)$$

La resistencia al flujo laminar es constante y análoga a la resistencia eléctrica.

Si el flujo a través de la restricción es *turbulento*, el gasto en estado estacionario está dado por:

$$Q = K \cdot \sqrt{H} \quad (1.2)$$

La resistencia R_t para el flujo turbulento se obtiene de:

$$R_t = \frac{dH}{dQ}$$

Luego de la ecuación (1.2) se tiene que:

$$Q = K \cdot H^{1/2}$$

Derivando $Q(H)$ respecto a la presión hidrostática,

$$\frac{dQ}{dH} = \frac{d}{dH} \left(K \cdot H^{1/2} \right) = K \cdot \frac{1}{2} \cdot H^{-1/2} = \frac{K}{2 \cdot H^{1/2}}$$

$$dQ = \frac{K}{2\sqrt{H}} dH$$

Tomando la $\frac{dH}{dQ}$, y reemplazando $K = \frac{Q}{\sqrt{H}}$

$$\frac{dH}{dQ} = \frac{2\sqrt{H}}{K} = \frac{2\sqrt{H}}{\frac{Q}{\sqrt{H}}} = \frac{2\sqrt{H} \cdot \sqrt{H}}{Q} = \frac{2H}{Q}$$

Finalmente, la resistencia en flujo turbulento será:

$$R_t = \frac{2H}{Q} \quad (1.3)$$

La tangente a la curva en el punto P corta la ordenada en el punto $(0, -H)$. Así, la pendiente de esta línea tangente es:

$$m = \operatorname{tag} \alpha = \frac{2H}{Q}$$

$$m = R_t$$

Como en el punto de operación P la resistencia está dada por:

$$R_t = \frac{2H}{Q}$$

Así, la resistencia R_t es la pendiente de la curva en el punto operativo.

Ahora, considere la condición operativa en la cercanía del punto P . Defínase una desviación pequeña al inicio del valor constante como h y el cambio pequeño correspondiente de la tasa de flujo como q . En este caso la pendiente de la curva en el punto P está dada por:

$$\text{Pendiente de la curva en el punto } P = \frac{h}{Q} = \frac{2H}{Q} = R_t \quad (1.5)$$

Esta aproximación lineal se basa en el hecho de que la curva efectiva no difiere mucho de su tangente si las condiciones de operación no varían mucho.

2.3.5 Capacitancia del tanque

La capacitancia C de un tanque se define como la variación en la cantidad del líquido acumulado, necesaria para producir una variación unitaria en el potencial (presión hidrostática).

El potencial es la magnitud que indica el nivel de energía del sistema.

$$C = \frac{\text{cambio en la cantidad de líquido acumulado} \left[m^3 \right]}{\text{cambio en el nivel} \left[m \right]}$$

Dicho en otro modo,

$$C = \frac{dV}{dh} \quad [m^2] \quad (1.6)$$

La capacitancia del tanque es igual al área de la sección de corte. Si esta es constante, la capacitancia es constante para cualquier carga hidrostática.

2.4. Modelo de primer orden

Considere el sistema que aparece en la Figura 1. Como ya se indicó antes, un sistema puede considerarse lineal si el flujo es laminar. Aun cuando el flujo sea turbulento, el sistema puede linealizarse si se mantienen reducidos los cambios en las variables.

Si se presumiera que el sistema fuera lineal o linealizable, la ecuación diferencial del sistema se puede obtener del siguiente modo: como el gasto de entrada menos el gasto de salida durante un pequeño intervalo de tiempo dt es igual a la cantidad de líquido acumulada en el tanque, es decir:

$$C \cdot dh = (q_i - q_o) \cdot dt$$

De la definición de resistencia, la relación entre q_o y h está dada por:

$$\text{De (1.1)} \quad R = \frac{h}{q_o}, \text{ despejando } q_o$$

$$q_o = \frac{h}{R}$$

La ecuación diferencial de este sistema para un valor constante de R es:

$$\begin{aligned} C \frac{dh}{dt} &= (q_i - q_o) = q_i - \frac{h}{R} = \frac{q_i R - h}{R} \\ RC \frac{dh}{dt} &= Rq_i - h \\ RC \frac{dh}{dt} + h &= Rq_i \end{aligned} \quad (1.7)$$

Note que RC es la constante de tiempo del sistema. Tomando la transformada de Laplace en ambos miembros de la ecuación (1.7) y suponiendo la condición inicial cero, se obtiene:

$$RC \mathcal{L}\left[\frac{dh}{dt}\right] + \mathcal{L}[h] = R\mathcal{L}[q_i]$$

$$RC [s H(s) - h(0)] + H(s) = R Q_i(s)$$

$$RC s H(s) + H(s) = R Q_i(s)$$

$$[RC s + 1] H(s) = R Q_i(s)$$

Si se considera a q_i como la entrada y h como la salida, la función de transferencia es:

$$\frac{H(s)}{Q_i(s)} = \frac{R}{RCs + 1} \quad (1.8)$$

A la salida, en la válvula de carga se tiene:

$$R_i = \frac{2H}{Q_0}$$

Luego, llevando al plano complejo s

$$Q_0(s) = \frac{1}{R} H(s)$$

Despejando $H(s)$

$$H(s) = R Q_0(s)$$

$$[RC s + 1] R Q_0(s) = R Q_i(s) \quad (1.9)$$

Por lo tanto, si se toma q_o como la salida, con la misma entrada (q_i), la función de transferencia $G(s)$ de la válvula de carga es:

$$\frac{Q_o(s)}{Q_i(s)} = \frac{1}{RCs + 1} \quad (1.10)$$

En ambos casos, la ecuación (1.7) y (1.9), son el modelo matemático del tanque y de la válvula de carga respectivamente. Ambos son sistemas de primer orden donde RC es la constante de tiempo τ del sistema.

2.4.1. Diagrama de bloques del sistema de nivel de líquido en lazo abierto

Tanque: En la figura 3, la variable a controlar es la presión hidrostática $H(s)$, que es el nivel del líquido respecto al gasto o caudal de entrada $Q_i(s)$ en flujo turbulento.

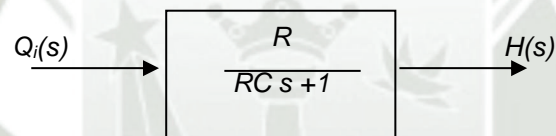


Figura 3. Diagrama de bloques de tanque.
Fuente: Elaboración propia

Válvula de carga: En la figura 4, aquí la variable a controlar es el gasto o caudal de salida $Q_o(s)$ del líquido respecto al gasto o caudal de entrada $Q_i(s)$ en flujo turbulento.

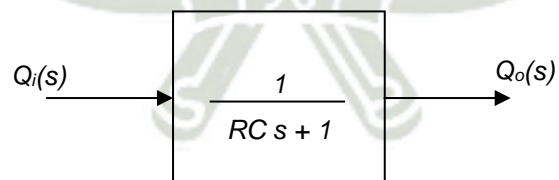


Figura 4. Diagrama de bloque de la válvula.
Fuente: Elaboración Propia

2.4.2. Diagrama de bloques del sistema de nivel de líquido de tanque de agua osmonizada

El modelo matemático en lazo abierto, visto en las secciones anteriores, nos sirve para tener el comportamiento dinámico del caudal (Q) y el nivel (H) del líquido del sistema de tanque en estudio. Ahora el siguiente paso es desarrollar el modelo matemático del sistema de control del nivel H del tanque de agua osmonizada, esto significa usar todas las herramientas de las que se dispone en ingeniería de control. Se debe obtener un modelo matemático que gobierne el sistema de control para luego someterlo ante una señal de prueba escalón unitario y obtener una respuesta estable de dicho sistema.

Consideremos tres nuevos elementos a nuestro sistema de nivel de líquido: un controlador, una válvula motorizada de acción proporcional y un sensor de nivel. Tal disposición de estos elementos se muestra en la figura 5.

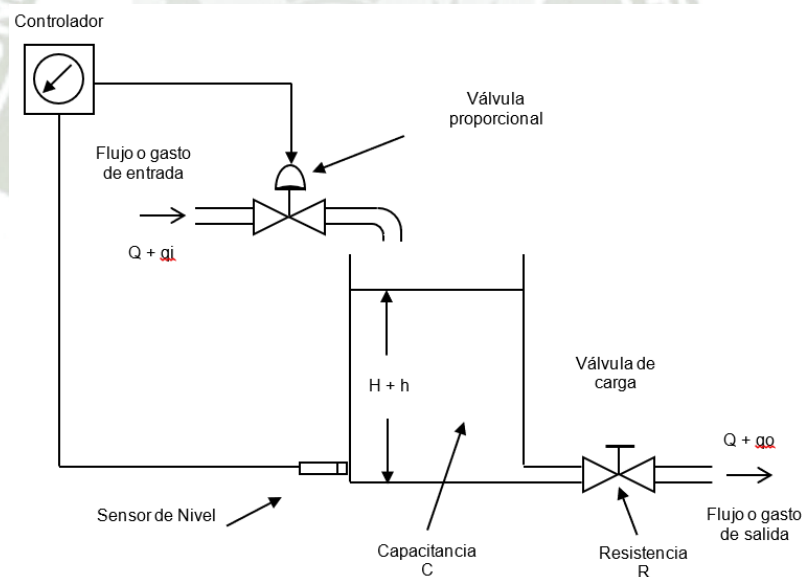


Figura 5. Sistema de control de nivel de agua osmonizada.

Fuente: Elaboración propia

Las variables a controlar del sistema de nivel de líquidos son dos: El flujo o gasto de salida (Q_o) y el nivel de líquido (H). Para el propósito de control de la presente tesis, se va a considerar solamente el control de nivel del líquido de agua osmonizada mediante controlador industrial PLC.

Con las consideraciones anteriores, el diagrama de bloques se muestra en la figura 6.

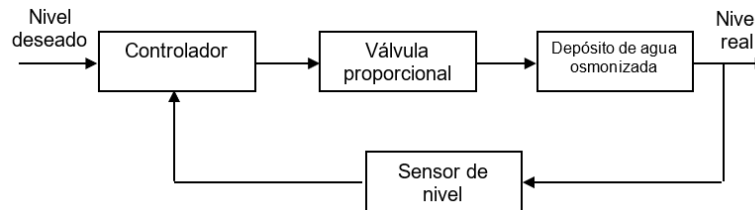


Figura 6. Diagrama de bloques del sistema de control de nivel de agua osmonizada.

Fuente: Ogata (2010)

Por analogía anterior es necesario llevar el sistema de control de nivel de líquido variables matemáticas conocidas. Por ejemplo, el controlador se representa por la variable de entrada o set-point $R(s)$, la válvula de carga por la resistencia R_t y el tanque por la capacitancia C . Note que el sistema es realimentado a través de la variable de salida $H(s)$.

La figura 7 muestra el esquema de control de nivel con dichas variables.

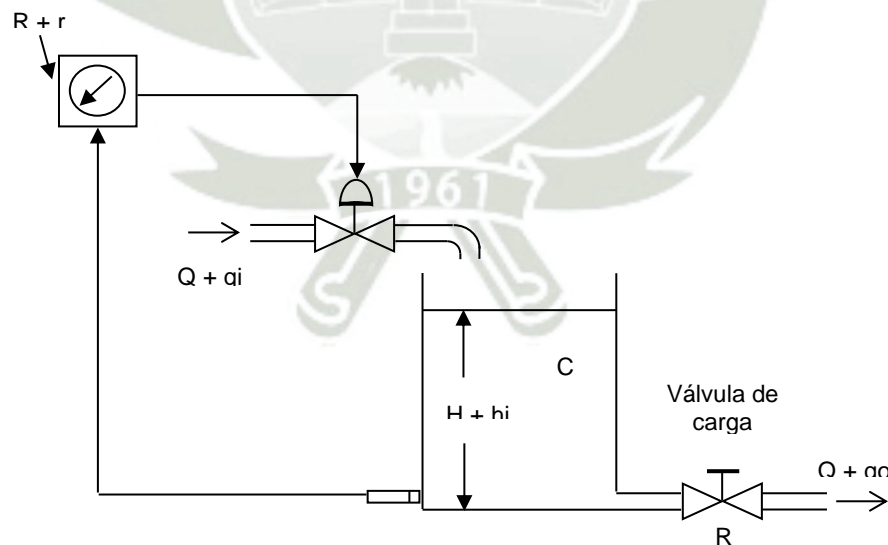


Figura 7. Sistema de control de nivel de tanque de agua osmonizada.

Fuente: Ogata (2010).

2.5. Controlador Proporcional del Sistema de nivel de tanque

Consideremos el siguiente sistema de control de nivel de a figura 8, conformado por un tanque de nivel con accionamiento por válvulas donde el objetivo es mantener constante el nivel a pesar de las variaciones de la demanda. Se supone que el controlador es del tipo proporcional. Se supone que todas las variables r , q_i , h_l y q_o están medidas desde sus valores de reposo respectivos R , Q_i , H y Q_o . Se supone también que las magnitudes de las variables r , q_i , h_l y q_o son suficientemente pequeños como para que se pueda aproximar al sistema con un modelo matemático lineal, es decir, una función de transferencia.

El diagrama de bloques del modelo de control de nivel es:

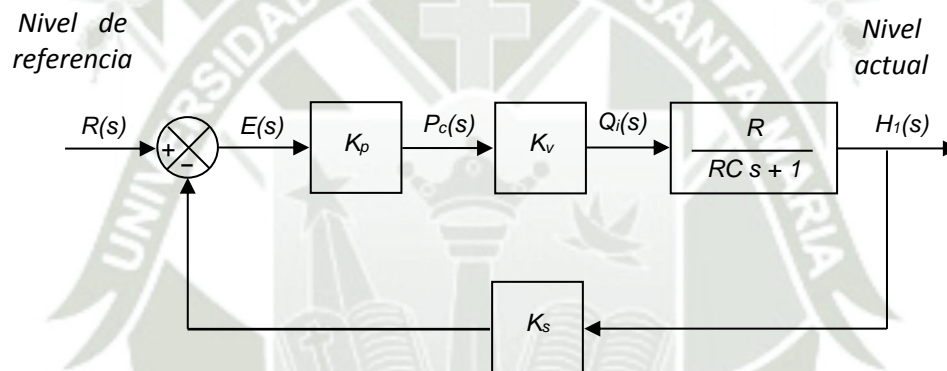


Figura 8. Diagrama de bloques del modelo en estudio realimentado.

Fuente: Ogata (2010)

Dónde:

K_p es la ganancia proporcional.

K_v es la ganancia de la válvula de control, y

K_s es la ganancia del sensor de nivel.

Con base a la relación de la figura 8 se obtiene la función de transferencia del sistema del tanque de nivel de líquido como:

$$\frac{H_1(s)}{Q_i(s)} = \frac{R}{RCs + 1}$$

Reduciendo el diagrama de bloques de la figura 8, obtenemos:

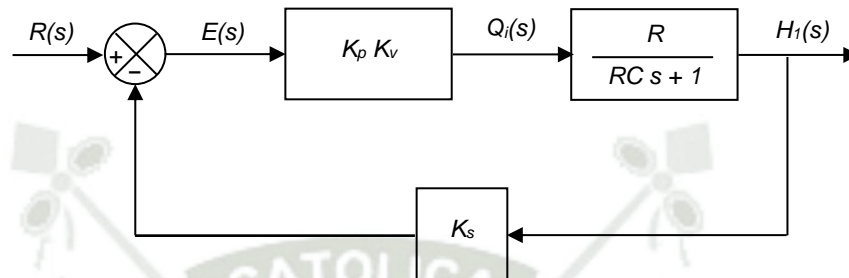


Figura 8. Diagrama de bloques reducido con realimentación.

Fuente: Elaboración Propia.

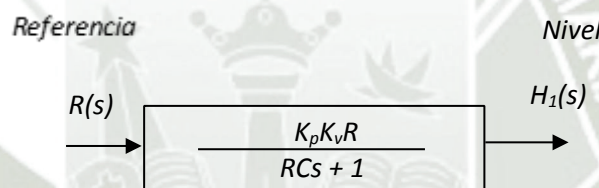


Figura 9. Diagrama de bloques reducido trayectoria directa.

Fuente: Ogata (2010)

Como el controlador es proporcional, la modificación en el flujo entrante q_i es proporcional al error actuante e de manera que:

$$q_i(t) = K_p K_v e(t)$$

En términos de la transformada de Laplace,

$$Q_i(s) = K_p K_v E(s)$$

Para facilidad de análisis, es necesario tener una realimentación unitaria del sistema, de esta forma se obtiene una respuesta ante una entrada de prueba escalón unitaria. Utilizando las reglas de reducción de diagramas de bloques de la figura 10 se tiene:

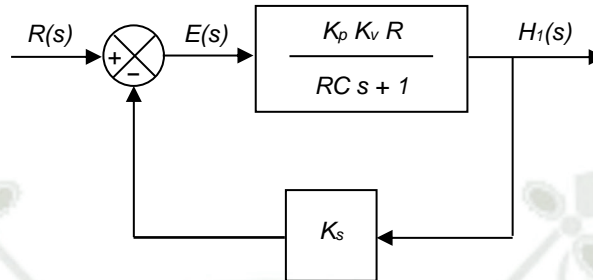


Figura 10. Reduciendo bloques de lazo directo.

Fuente: Elaboración propia

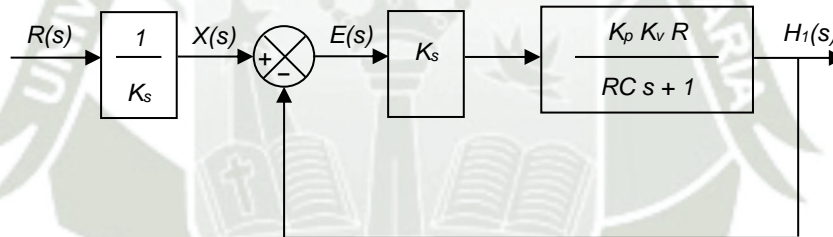


Figura 11. Lazo realimentado unitario.

Fuente: Elaboración propia

Como K_p , K_v , K_s , R y C son constantes, entonces:

$$K = K_p K_v K_s R, \quad y \quad \tau = RC$$

La figura 12 muestra el diagrama de bloques de este sistema con realimentación unitaria, donde

$$X(s) = \frac{1}{K_b} R(s)$$

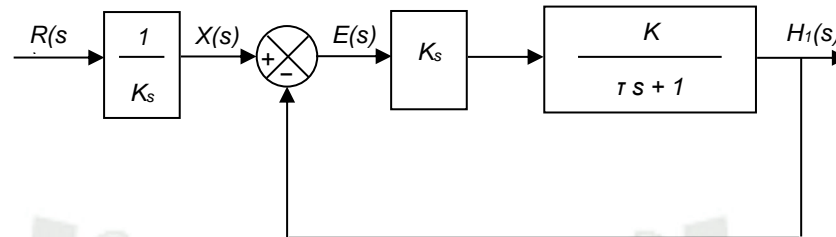


Figura 12. Diagrama de bloques simplificado.

Fuente: Elaboración propia.

2.5.1. Función de transferencia

La función de transferencia de lazo cerrado entre $H_1(s)$ y $X(s)$ está dada por:

$$\frac{H_1(s)}{X(s)} = \frac{\frac{K}{\tau s + 1}}{1 + \frac{K}{\tau s + 1}} = \frac{K}{\tau s + 1 + K}$$

Reemplazando $X(s)$

$$\frac{H_1(s)}{\frac{R(s)}{K_b}} = \frac{K}{\tau s + 1 + K} \quad (1.11)$$

$$\frac{H_1(s)}{R(s)} = \frac{K}{(\tau s + 1 + K)K_b}$$

A continuación, se estudiará la respuesta $h_1(t)$ a un cambio en la entrada de referencia. Considérese que se produce una modificación escalón unitario en $x(t)$.

$$x(t) = U(t)$$

$$\mathcal{L}[x(t)] = \mathcal{L}[U(t)]$$

$$X(s) = \frac{1}{s}$$

Como la transformada de Laplace de la función escalón unitario es $1/s$, sustituyendo en la ecuación (1.11)

$$H_1(s) = \frac{A}{(\tau s + 1 + K)} \cdot \frac{1}{s}$$

Expandiendo $H_1(s)$ en fracciones parciales resulta:

$$H_1(s) = \frac{A}{(\tau s + 1 + K)} + \frac{B}{s} = \frac{As + B(\tau s + 1 + K)}{(\tau s + 1 + K)s} = \frac{(A + \tau B)s + B + BK}{(\tau s + 1 + K)s}$$

Igualando numeradores:

$$K = (A + \tau B)s + (1 + K)B$$

$$0 = A + \tau B \quad ; \quad K = (1 + K)B$$

$$A = -\tau B \quad ; \quad B = \frac{K}{1 + K}$$

$$A = -\frac{\tau K}{1 + K}$$

$$\Rightarrow H_1(s) = -\frac{\tau K}{(1 + K)} \cdot \frac{1}{(\tau s + 1 + K)} + \frac{K}{(1 + K)} \cdot \frac{1}{s}$$

$$H_1(s) = \frac{K}{(1 + K)} \cdot \frac{1}{s} - \frac{\tau K}{(1 + K)} \cdot \frac{1}{(\tau s + 1 + K)}$$

Luego, tomando la transformada de Laplace inversa en ambos miembros de esta última ecuación se obtiene la solución temporal $h_1(t)$

$$h_1(t) = \frac{K}{(1+K)} \cdot \mathcal{E}^{-1} \left[\frac{1}{s} \right] - \frac{\tau K}{(1+K)} \mathcal{E}^{-1} \left[\frac{1/\tau}{s + (1+K)} \right]$$

$$h_1(t) = \frac{K}{(1+K)} \cdot 1 - \frac{\tau K}{(1+K)} \cdot \frac{1}{\tau} \cdot e^{-t(1+K)/\tau}$$

$$h_1(t) = \frac{K}{(1+K)} - \frac{K}{(1+K)} \cdot e^{-t(1+K)/\tau} \quad ; \text{ haciendo } \tau_1 = \frac{\tau}{1+K}$$

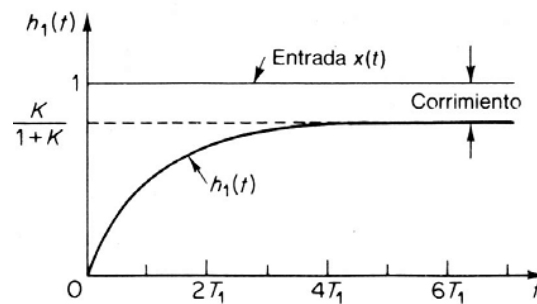
$$h_1(t) = \frac{K}{(1+K)} (1 - e^{-t(1+K)/\tau}) \quad ; t > 0 \quad (1.12)$$

2.5.2. Curva de respuesta

De la ecuación (1.12) se aprecia que la constante de tiempo τ_1 del sistema de lazo cerrado es diferente a la constante de tiempo τ del bloque en la línea recta. Para graficar la curva de respuesta $h_1(t)$ en el tiempo ante una entrada escalón unitaria, valoramos t :

$t=0,$	$h_1(0) = 0$
$t=\tau_1,$	$h_1(\tau_1) = 0,63$
$t=2\tau_1,$	$h_1(2\tau_1) = 0,86$
$t=3\tau_1,$	$h_1(3\tau_1) = 0,95$
$t=4\tau_1,$	$h_1(4\tau_1) = 0,98$
$t=5\tau_1,$	$h_1(5\tau_1) = 0,99$
...	
$t= \infty,$	$h_1(\infty) = \frac{K}{1+K}$

Aquí se muestra que, a medida que t tiende a infinito, el valor de $h_1(t)$ tiende a $K/(1+K)$. La curva de respuesta $h_1(t)$ se presenta en la figura 13.

Figura 13. Curva de $h_1(t)$ en función de t .

Fuente: Elaboración propia.

Como $x(\infty) = 1$, hay un error en estado estacionario de $1/(1+K)$. A este error se le denomina corrimiento. El valor del corrimiento disminuye a medida que la ganancia K se incrementa.

El corrimiento es una característica del control proporcional de una planta, cuya función de transferencia no posee un elemento integrador. (En este caso se requiere un error no cero para dar una salida no cero). Para eliminar este corrimiento, se debe añadir una acción de control integral.

2.6. Efectos de las acciones de control integral y derivativa en el comportamiento del sistema

Los controladores PI ofrecen muchos beneficios, en particular el controlador proporcional amplifica la señal de error. Es importante tener en cuenta cómo las acciones integral y derivativa del control afectan el comportamiento del sistema de control.

2.6.1. Acción de control integral (I)

En el control proporcional de una planta que no tiene una función de transferencia con un integrador $1/s$, se produce un error de estado estacionario o un desplazamiento en la respuesta a la entrada de escalón. Para resolver este problema, se puede agregar la acción de control integral al controlador para eliminar este desplazamiento. (García y Lobo, 2009).

En el control integral de una planta, la señal de salida del controlador se determina por el área bajo la curva del error acumulado hasta ese momento. A diferencia del controlador proporcional, en el control integral, la señal de control $U(t)$ puede tener un valor no nulo incluso

cuando la señal de error actuante $e(t)$ es cero, como se muestra en la figura 14. Esto se debe a que, en el control integral, la señal de control depende del historial acumulado de errores, mientras que, en el control proporcional, la señal de control solo depende del error actual. (Una señal actuante no nula en estado estacionario significa que hay un corrimiento). La figura 14 muestra una curva de $e(t)$ en función de t y la correspondiente curva de $U(t)$ en función de t cuando el controlador es del tipo proporcional. (Ogata, 2010)

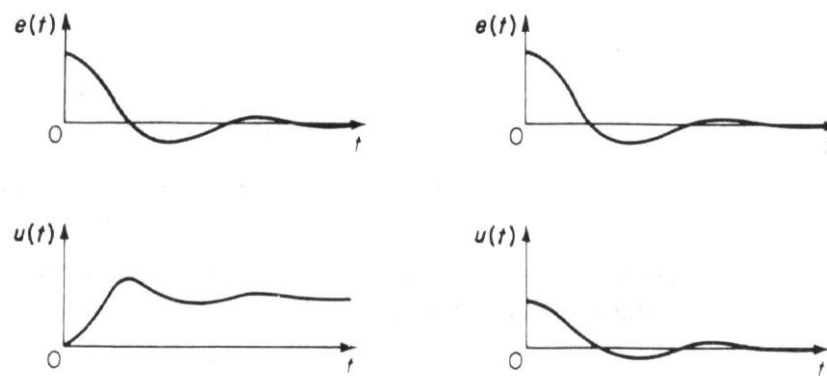


Figura 14. (a) Curvas de $e(t)$ y $U(t)$ mostrando la señal de control no nula cuando el error actuante es nulo (control integral); (b) Curvas de $e(t)$ y $U(t)$ que muestran la señal de control nula cuando la señal de error actuante es nula (control proporcional).

Fuente: Ogata (2010)

Es importante destacar que, aunque la función de control integral puede eliminar el error estacionario, puede producir una respuesta oscilatoria que disminuye lentamente en amplitud o incluso aumenta en magnitud, ambas situaciones por lo general son consideradas indeseables.

2.6.2. Control integral de sistemas de nivel de agua osmonizada

En la sección 2.5 se encontró que el control proporcional de un sistema de nivel de líquido resultaría en un error estacionario con una entrada escalón. Ahora se mostrará cómo se puede eliminar un error de este tipo si se incluye acción integral en el controlador.

En la figura 15 muestra un sistema de control de nivel de líquido. Supóngase que el controlador es un controlador integral. También supóngase que las variables x , q_i , h y q_o , se miden

desde sus respectivos valores de estado estacionario X , Q , H y Q_0 son magnitudes pequeñas, de manera que el sistema se pueda considerar lineal.

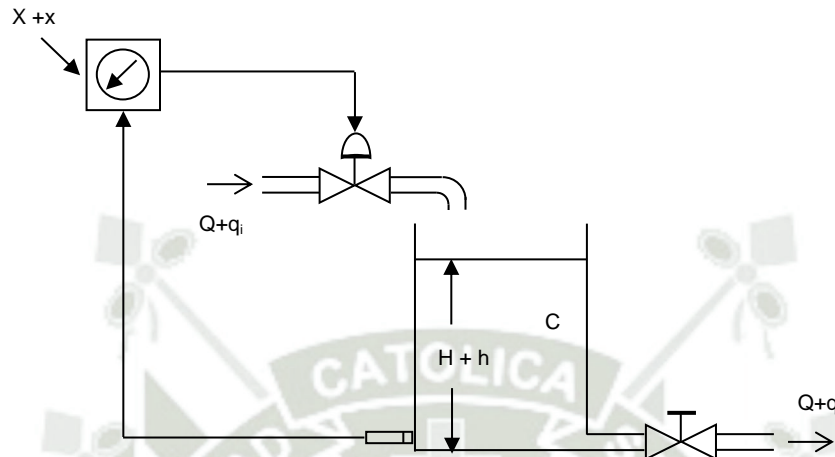


Figura 15. Sistema de control de nivel de agua osmonizada.

Fuente: Elaboración propia.

Tomando en cuenta estas suposiciones, el diagrama de bloques del sistema se puede obtener cómo se ve en la figura 16.

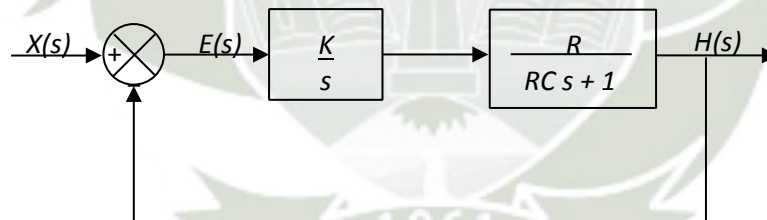


Figura 16. Diagrama de bloques del sistema

Fuente: Ogata (2010)

De la figura 16, la función de transferencia de lazo cerrado entre $H(s)$ y $X(s)$ es:

$$\frac{E(s)}{X(s)} = \frac{KR}{RCs^2 + s + KR}$$

Por lo que:

$$\frac{E(s)}{X(s)} = \frac{X(s) - H(s)}{X(s)} = 1 - \frac{H(s)}{X(s)}$$

$$\frac{E(s)}{X(s)} = \frac{RC s^2 + s}{RC s^2 + s + KR}$$

$$\frac{E(s)}{X(s)} = \frac{KR}{RC s^2 + s + KR}$$

Como el sistema es estable, el error en estado estacionario para la respuesta escalón unitario se obtiene aplicando el teorema del valor final, como sigue:

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} sE(s)$$

$$X(s) = 1/s$$

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{s(RC s^2 + s)}{RC s^2 + s + KR} \cdot \frac{1}{s}$$

$$e_{ss} = 0$$

Así, al aplicar la función de control integral al sistema de nivel de agua osmonizada, se logra eliminar el error en estado estacionario en respuesta al cambio abrupto en la entrada. Esto representa una mejora en el comportamiento en estado estacionario en comparación con el uso exclusivo de la acción proporcional, que solo produce corrimiento.

2.6.3. Acción de control derivativa (D)

La adición de la acción de control derivativa al control proporcional proporciona una forma de obtener un controlador altamente sensible. Una ventaja del uso de la acción de control derivativa es su capacidad para responder al ritmo de variación del error y corregir significativamente antes de que la magnitud del error se vuelva excesiva. En consecuencia, el control derivativo anticipa el

error actuante, inicia una acción correctiva temprana y tiende a aumentar la estabilidad del sistema. (Ogata, 2010).

El control derivativo actúa en la tasa de cambio del error y no en el error en sí mismo, por lo que nunca se utiliza de forma aislada, sino siempre en combinación con la acción de control proporcional o proporcional-integral. (Ogata, 2010).

2.6.4. Control proporcional de sistemas con carga inercial

Antes de estudiar el efecto de la acción de control derivativa en el comportamiento del sistema, se considera el control proporcional de una carga inercial.

Considere el sistema de la Figura 17. La función de transferencia en lazo cerrado será:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{K_p}{J s^2 + K_p}$$

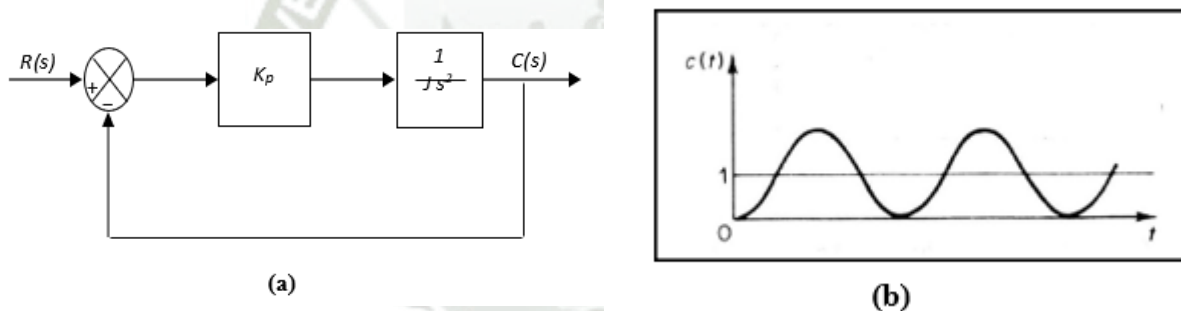


Figura 17 (a) Control proporcional de un sistema con carga inercial;
(b) Respuesta a una entrada escalón unitario.

Fuente: Ogata (2010)

Luego, las raíces de la ecuación característica son:

$$J s^2 + K_p = 0$$

$$s = \pm \sqrt{-\frac{K_p}{J}}$$

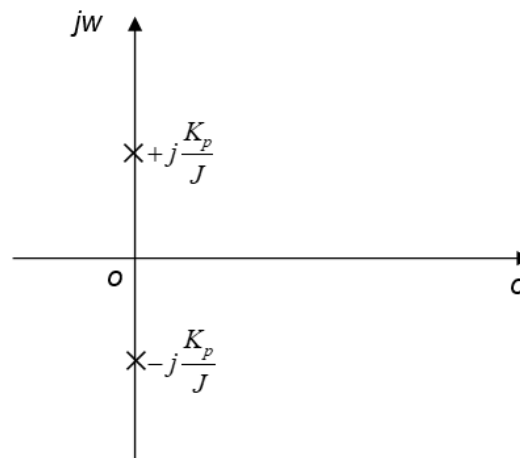


Figura 18. Raíces conjugadas complejas en el plano S.

Fuente: Ogata (2010)

Son magnitudes imaginarias, la respuesta a una entrada escalón unitario continúa oscilando indiferentemente. Los sistemas de control con esta característica no son deseables. Se verá que al agregar el control derivativo el sistema se estabiliza.

2.6.5. Control proporcional derivativo de un sistema con carga inercial

Se realiza una modificación al control proporcional, transformándolo en un control proporcional-derivativo con una función de transferencia designada como.: $K_p (1 + T_d s)$

El par desarrollado por el control es proporcional a $K_p (e + T_d \dot{e})$. El control derivativo es esencialmente anticipativo, mide la velocidad instantánea del error y predice los sobre impulsos grandes, brindando una compensación adecuada antes que se produzca un sobre impulso excesivo.

La función de transferencia de lazo cerrado está dada por:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{K_p (1 + T_d s)}{J s^2 + K_p T_d s + K_p}$$

La ecuación característica es:

$$J s^2 + K_p T_d s + K_p = 0$$

Tiene ahora dos raíces con partes reales negativas para valores positivos de J , K_p y T_d . Así, el control derivativo introduce un efecto de amortiguamiento.

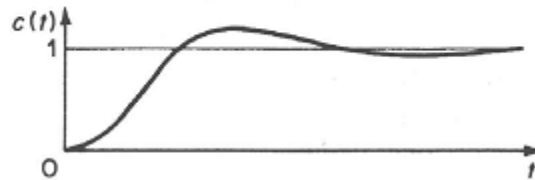


Figura 19. Control proporcional-derivativo de un sistema con carga inercial y respuesta a una entrada escalón unitario.
Fuente: Ogata (2010)

En la figura 19 se presenta la curva de respuesta $c(t)$ en respuesta a una entrada de escalón unitario. Al compararla con la curva de respuesta original mostrada en la figura 17(b), se observa una notable mejora en la curva de respuesta, lo que sugiere una clara estabilidad del sistema con el controlador PD.

2.7. Consideraciones a los Controladores PID

El análisis estático previo se fundamenta en la premisa de que el proceso puede ser descrito por un modelo estático. Sin embargo, cuando se considera la dinámica del sistema, se introducen otras características que influyen en el comportamiento del sistema en lazo cerrado. La más relevante es que el sistema en lazo cerrado generalmente se vuelve inestable al elegir ganancias de lazo altas. En la práctica, es la dinámica del sistema la que establece la ganancia máxima del lazo que puede ser aplicada. (Åström y Hägglund, 2009).

2.8. Controladores PID avanzados

La teoría convencional de control propone el uso de los controladores PID clásicos (Proporcional-Integral-Derivativo), que son lineales y presentan un rendimiento reducido en procesos no lineales. En investigaciones recientes se ha propuesto un controlador PID basado en una estructura de Control de Modelo Interno (IMC) que utiliza nuevas expresiones de sintonización. Además, se ha integrado un módulo de filtrado difuso variable (MFD) a este nuevo controlador. La combinación de IMC y la lógica difusa se ha evaluado en un reactor de agitación

continua. Los resultados obtenidos muestran una robustez marcada ante perturbaciones promovidas hacia el sistema. Estas tres nuevas ecuaciones de sintonización relacionan cada uno de los factores de escalamiento del MFD, en función de los parámetros que identifica la personalidad del proceso. La regresión lineal multivariable y análisis de varianzas fueron necesarios para la deducción de tales ecuaciones (García y Lobo, 2008).

2.9. Consideraciones Adicionales de los Controladores PID Comerciales

Además de las características mencionadas previamente sobre la implementación de los modos de control (PID), los controladores comerciales deben incorporar otras funciones. Estas pueden incluir un selector de acción directa o inversa, transferencias suaves del modo manual al modo automático, ajuste de la salida del controlador en modo manual, prevención de la saturación en el modo integral o "anti-reset-windup" en inglés, retroalimentación externa y un modo local o remoto para el valor deseado. (Alfaro, 2002).

Es posible que se incluya un filtro para la señal de entrada, el cual tendría como objetivo reducir el ruido de medición. Además, podría proporcionarse una lista de ganancias o una tabla de conjuntos de parámetros para el control de plantas no lineales, así como opciones para el control en adelante o prealimentado. Es importante mencionar que, dependiendo del fabricante, es posible que se ofrezcan otras características opcionales que en su mayoría no están directamente relacionadas con la selección de parámetros, por lo que no se incluyen dentro de las ecuaciones universales propuestas. (Alfaro, 2011).

2.10. Sintonía de controladores PID

Ajustar el controlador implica modificar los valores de los parámetros de control para que la respuesta de la planta sea estable, manteniendo estas variables dentro de un rango teórico aceptable. La sintonización del controlador PID se lleva a cabo mientras el sistema de control está en funcionamiento y en movimiento.

Los controladores PID se utilizan con mucha frecuencia en sistemas de control industrial. Sabemos que la función de transferencia $G_C(s)$ del controlador es:

$$G_c(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (2.01)$$

Donde:

K_p = Ganancia proporcional,

T_i = Tiempo integral, y

T_d = Tiempo derivativo

Si la entrada al controlador PID es $e(t)$, la salida $u(t)$ está dada por

$$g_c(t) = \frac{u(t)}{e(t)}$$
$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (2.02)$$

Las constantes K_p , T_i y T_d son los parámetros del controlador. La ecuación (2.02) también se puede escribir como

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (2.03)$$

Donde:

K_p = Ganancia proporcional

K_i = Ganancia integral y

K_d = Ganancia derivativa

K_p , K_i y K_d son los parámetros del controlador.

En el caso real de los controladores PID, en lugar de ajustar la ganancia proporcional se ajusta la banda proporcional. La banda proporcional es igual a $1/K_p$ y está expresada en porcentaje. (Por ejemplo, una banda proporcional de 25% corresponde a $K_p = 4$).

2.10.1. Reglas de Ziegler-Nichols para sintonización de controladores PI

En 1942, Ziegler y Nichols propusieron un conjunto de reglas para establecer los valores óptimos de la ganancia proporcional K_p , el tiempo integral T_i y el tiempo derivativo T_d , para un controlador PID, basándose en las características de respuesta transitoria de una planta específica. Este proceso, conocido como sintonización, permite ajustar el controlador para que funcione de manera óptima en una planta determinada. La sintonización se puede realizar en la propia planta mediante experimentos. Ziegler y Nichols presentaron dos métodos para llevar a cabo la sintonización.

- De lazo abierto (o método de la curva de reacción del proceso) y
- De lazo cerrado (o método de la última ganancia).

El método de lazo cerrado es el de uso más frecuente. Por tanto, en el presente trabajo de tesis, solo se presenta este método.

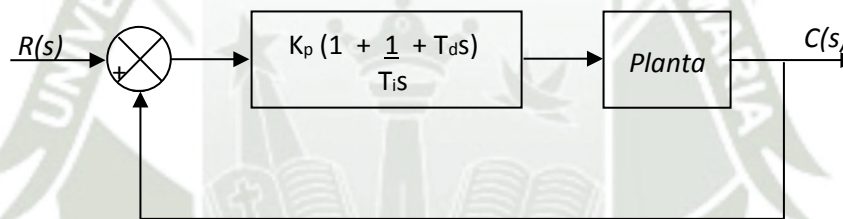


Figura 20. Controlador PID de una planta.

Fuente: Ogata (2010)

El concepto “sintonía de controladores” hace referencia a la tarea de hallar un grupo de valores para las acciones PI y PD, las cuales posibilitan a un controlador operar de manera eficiente y armoniosa con un dato particular del proceso. Si se utiliza el mismo controlador en un proceso diferente, su configuración previa puede ser válida, pero se requerirá ajustar nuevamente la sintonización para optimizar su desempeño en el nuevo contexto.

2.10.2. Método de lazo cerrado

Primero se hace $T_i = \infty$ y $T_d = 0$. Usando solamente la acción de control proporcional (Figura 21), incremente K_p desde 0 hasta un valor crítico K_{cr} en el cual la salida exhiba por primera

vez oscilaciones sostenidas. Si no se presentan oscilaciones sostenidas para cualquier valor que pueda tomar K_p , entonces no se puede aplicar este método. Así, se determina experimentalmente la ganancia crítica K_{cr} y el período correspondiente P_{cr} (Ogata, 2010)

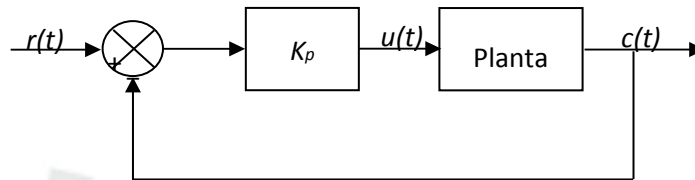


Figura 21. Sistema de lazo cerrado con control proporcional.

Fuente: Ogata (2010)

Al incrementar la ganancia se consigue una oscilación mantenida tal como la figura 22:

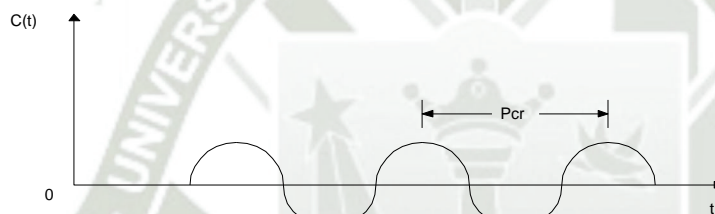


Figura 22. Respuesta al sistema mostrando la oscilación de periodo PCR.

Fuente: Ogata (2010).

Ziegler y Nichols sugirieron fijar los valores de K_p , T_i y T_d de acuerdo con la fórmula de la Tabla 1.

Controlador	K_p	T_i	T_d
P	$0,5 K_{cr}$	1	0
PI	$0,45 K_{cr}$	$P_{cr} / 1,2$	0
PID	$0,6 K_{cr}$	$0,5 P_{cr}$	$0,125 P_{cr}$

Tabla 1. Valores propuestos por Ziegler - Nichols

Fuente: Elaboración propia

La sintonización del controlador PID mediante el segundo método de Ziegler y Nichols se expresa como:

$$G_c(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right)$$

$$G_c(s) = 0,6K_{cr} \left(1 + \frac{1}{0,5P_{cr}s} + 0,125P_{cr}s \right)$$

$$G(s) = 0,075K_{cr} P_{cr} \frac{\left(s + \frac{4}{P_{cr}} \right)^2}{s}$$

De esta manera el controlador PID tiene un polo en el origen y un cero doble en $s = \frac{-4}{P_{cr}}$

2.11. Análisis de equipos

Sensores de nivel

Los sensores de nivel ayudan a obtener el volumen de agua que se utilizara en el tanque de agua osmonizada, En el mercado existe varios tipos de dispositivos, en la tabla 2 se describe algunos de ellos.

SENSORES			
Aspectos	Ultrasónico	Fotoeléctrico	Piezorresistivo
Modelo	IRU-5000	Sensor FS-IR02	HDL300
Señal de salida	4-20mA 0-2.5v	0.1-4.6 V	4-20Ma 1-5V
Material	Policarbonato	Policarbonato	de goma y núcleo
Distancia	0.1-2.0 m	0.2-6 m	0-5m
Protección (IP)	IP65	IP56	IP68
Costo	S/. 900.00	S/. 70.00	S/, 185.00

Tabla 2 Comparación de sensores de nivel.

Fuente: Elaboración propia

Se tomó en cuenta las características de la tabla 2, como son, el grado de protección, y el rango de medición, el sensor que se acoplan al presente proyecto es el tipo piezorresistivo HDL - 300 con un rango de medición entre 0 y 5 metros, un IP para entornos médicos, este tipo de sensor no requiere conocimientos avanzados para su manipulación.

2.11.1. Electroválvula

Una electroválvula permite cerrar el flujo de líquidos en un circuito o tubería, la apertura de dicha válvula se realiza por campo magnético, proporcionado por la bobina que atrae el embolo, en la tabla 3 se muestra diferentes opciones de electroválvulas.

Para la selección de esta debemos priorizar el diámetro de tubería que se viene utilizando en el sistema general de la planta de tratamiento de agua para hemodiálisis, por esto la electroválvula TF4-304 es la mejor opción, por su diámetro y su fácil acoplamiento al sistema, de igual forma el voltaje de trabajo de es de 24 Vdc.

ELECTROVALVULAS			
ASPECTOS	Electroválvula de diafragma VYR-615010	Electroválvula solenoide 251bm	Electroválvula motorizada TF4-304
Voltaje de operación	24 VAC	24 Vdc	24Vdc
Rango de Presión	2-12 bar	1-10 bar	1-10 bar
Diámetro	50 mm	65 mm	12 mm
Costo	S/. 360.00	S/.280.00	S/.350.00

Tabla 3 Análisis de electroválvulas

Fuente: Elaboración propia

2.11.2. Controlador lógico programable (PLC)

Encargado de recibir e interpretar todos los datos, para realizar el control del sistema de control de nivel de agua de tanque, Los PLC son usados en el ámbito industrial porque posees

muchas características que permiten que su sistema sea adecuado para todo tipo de trabajo. En la tabla 4 se presenta algunos dispositivos con las características necesarias.

Omron		Siemens	
Modelo	CJ2M- ethermet	S7-1200	Logo
Entradas/ salidas	Hasta 40	6 E y 4 S	8 E y 4 S
Capacidad del programa	20 kB	30Kb	400 bloques
Software	CX-one	Tia portal	Logosoft
Costo	S/.2100.00	S/. 1500.00	S/. 700.00

Tabla 4 Comparación de características de PLC

Fuente: Elaboración propia

2.12. Transmisor de nivel de líquido

El transmisor de nivel HDL300 de agua utiliza un chip de silicona de difusión para encapsular el núcleo relleno de aceite de silicona de difusión en una carcasa de acero inoxidable. La cubierta que protege el extremo frontal del sensor funciona como un diafragma protector y permite que el líquido entre en contacto suavemente con él. El cable y la carcasa están sellados y conectados, y el tubo de ventilación está conectado al exterior a través del cable. El diseño interno evita la formación de condensación, mientras que el circuito integrado de procesamiento de señales de micro puede ser utilizado para la transmisión a distancia. Además, este sensor ofrece una buena estabilidad y fiabilidad.

2.12.1. Rango de aplicación

Ampliamente utilizado y muy variado, abarcando mediciones en plantas de agua, plantas de tratamiento de aguas residuales, suministro de agua urbana, s, tanques de agua, piscinas de aceite, hidrogeología, embalses, ríos, construcción naval, océano y otros lugares. Así mismo es utilizado en modelos de plantas de tratamiento de nivel educativos a baja escala.



Figura 23. Vista del sensor de nivel integral.

Fuente: Adaptada de www.automaq.pe/

2.12.2. Modelo y numero del transmisor de nivel

La numeración y el modelo del transmisor de nivel está grabado en la carcasa metálica. El transmisor de nivel utilizado es de dos cables (también hay modelos de 3 y 4 cables). La distancia de trabajo es de 0 a 3 metros. Se alimenta con 24 VDC y la salida de información es de tipo corriente de 4 - 20 mA. Tales datos se muestran en la figura 24 siguiente:

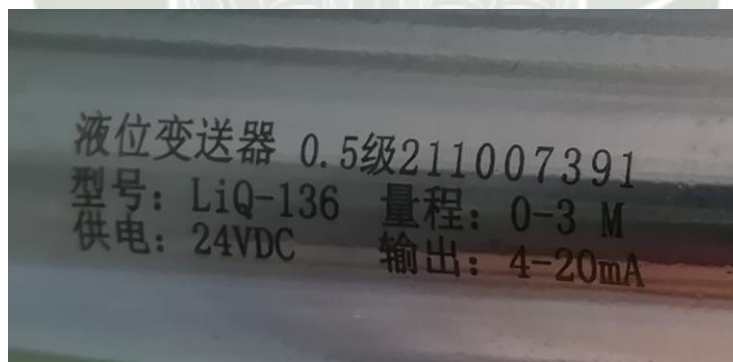


Figura 24. Características del transmisor de nivel utilizado en la tesis.

Fuente: Elaboración propia.

2.12.3. Características principales

Las especificaciones del fabricante del transmisor de nivel son:

- Voltaje de Operación: 3.3V - 5V DC

- Salidas: Analógica y Digital TTL
- Rango: 0 ~ 2000 metros
- Precisión: 0.5% FS
- El tamaño es de aproximadamente 145mm, diámetro 28mm
- Temperatura de trabajo-20 ~ 60 °.
- Compensación de temperatura-10 ~ 60 °C
- Temperatura de almacenamiento-40 ~ 80 °C
- Señal de salida 4-20mA
- Fuente de alimentación: Sensor de nivel estándar de 24V CC.
- Material de la carcasa acero inoxidable 304
- Cable impermeable transpirable

2.12.4. Diagrama de conexión

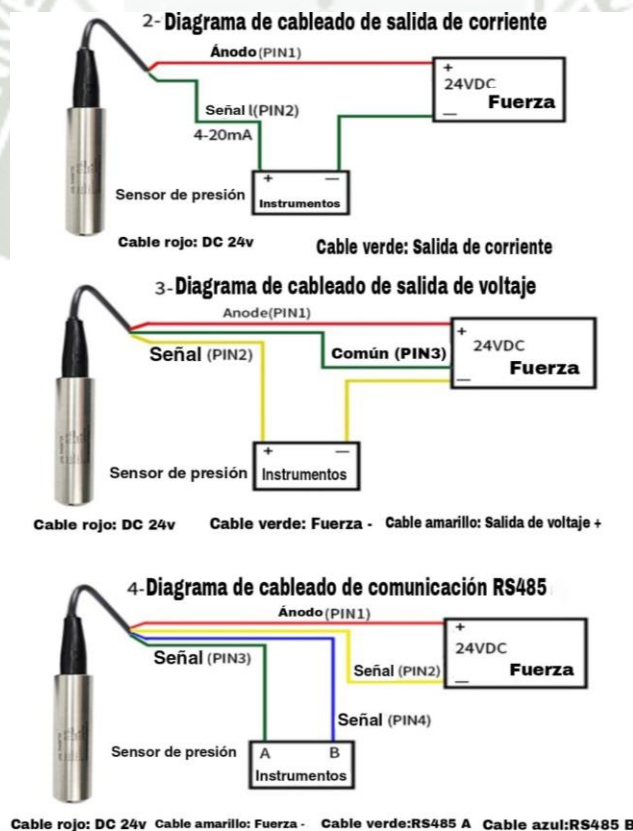


Figura 25. Diferentes formas de realizar el conexionado del transmisor de nivel.

Fuente: García (2014)

2.11.5 Principio de funcionamiento

El principio de medición de nivel de líquidos es por medición de nivel hidrostática. Esto quiere decir que una pequeña membrana de medición optimizada actúa como sensor que capta la presión del líquido en el tanque, el chip procesa la señal física y entrega en los terminales de salida una señal eléctrica de corriente (4-20 mA) proporcional a la presión captada. Los detalles constructivos se muestran en la figura 26. El transductor de presión como elemento activo del sistema de nivel está alimentando con 15 Vdc.



Figura 26. Detalle constructivo del sensor de presión.

Fuente: García (2014)

2.8.6 Instalación.

La instalación del transductor de nivel es en la parte inferior del tanque, como se aprecia en la figura 27. Tal disposición permite una mejor manipulación del tanque. Los 2 cables que salen del transductor están protegidos en una cubierta plástica que lo protege del ruido externo. Esta señal eléctrica de corriente se transmite y es acondicionada a voltaje mediante el circuito de conversión de corriente a voltaje y de allí se la envía hacia alguna entrada analógica de voltaje disponible en el PLC. En nuestro caso particular en la bornera I7 (AI1) del Logo 12/24 RCe.

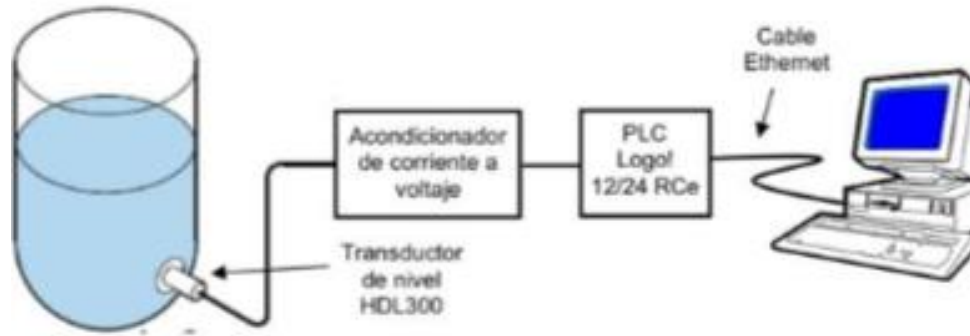


Figura 27. Forma como se ha instalado el transductor de presión en el tanque y su interfaz hacia la DAQ USB.

Fuente: Elaboración propia

2.13. Controlador nano PLC Logo 12/24 RCE

El controlador del sistema de nivel de agua osmonizada es el PLC Logo OBA1 de procedencia alemana. ¡LOGO! 8 de Siemens constituye la solución idónea para tareas de automatización básicas de baja y media escala. Destacable por su capacidad de integración en buses estándares industriales, así como en KNX, bus específico para automatización de edificios, entre otras.



Figura 28. Vista del PLC utilizado en la tesis.

Fuente: Adaptada de www.siemens.com

2.13.1. Características principales

Según la página web ceyesa.com.pe, sostiene que las características principales del nano PLC LOGO son:

- Modelo LOGO! 24/12 RCE 6ED1052-1MD08-0BA1

- Módulo lógico con display
- Fuente de alimentación: 24 V AC / DC / relé
- 8 entradas digitales (4 utilizables como entradas analógicas)
- 4 salidas digitales de conmutación rápida
- Memoria de programa: 400 bloques
- Ampliable modularmente: hasta 32 entradas digitales y 16 salidas analógicas.
- Puerto de comunicación Ethernet
- Servidor web integrado
- Interfaz en la nube
- Páginas web definidas por el usuario
- Registro de datos en memoria interna y en memoria externa micro SD
- Tarjeta micro SD estándar de programa de usuario

2.14. Módulo de suministro analógico

Para nuestro control necesitaremos un suministro de salidas analógicas ya que nuestro controlador lógico programable solo cuenta con salidas relé.

Para poder manejar salidas analógicas se ha adquirido una extensión de salida analógica como se aprecia en la figura 29 y que tiene las características:

- Modelo 6ed1055-1mm00-0ba2
- Alimentación nominal 24vdc
- 2 salidas analógicas
- Rangos de salida, tensión 0-10 v
- Rangos de salida, intensidad 4mA – 20mA
- Desarrollado conforme a IEC 61131



Figura 29 Vista del suministro analógico utilizado en la tesis.

Fuente: Adaptada de www.siemens.com.

2.15. Válvula motorizada

La válvula de bola eléctrica se compone de un cuerpo de válvula y un controlador. El modelo de utilidad tiene las ventajas de una estructura simple, un funcionamiento fiable, una fuerte capacidad al paso del fluido, ahorro de energía, etc. Puede ser ampliamente utilizado en el control de encendido-apagado de la calefacción, el aire acondicionado central, el sistema de agua caliente solar y el sistema de tratamiento de agua.

2.15.1. Parámetros técnicos

- Voltaje de conducción: 24Vdc
- Consumo de energía: 3VA (solo cuando la válvula está abierta y cerrada)
- Tiempo de acción: ≥ 15 s
- Presión Nominal: 1,6mpa
- Medio aplicable: agua fría, caliente o vapor de baja presión ($\leq 0,4$ mpa).
- Temperatura media: 1-90 °C

2.15.2. Modo de conexión

La válvula de bola eléctrica de la bobina del ventilador roscado del tubo interno ZG tiene un interruptor de contacto incorporado. Después de abrir y cerrar la válvula, el motor no funciona, por lo que tiene una larga vida útil, ahorro de energía y seguridad especial. El cuerpo de la válvula está separado del controlador y se puede desmontar rápidamente. El cuerpo de la válvula tiene una estructura única, gran flujo, sin tapón de escoria y gran presión diferencial de cierre. El actuador adopta una estructura excéntrica, que se puede instalar después de instalar el equipo y la tubería. Es fácil de desmontar e instalar, lo que favorece la mejora de la eficiencia de la instalación. El actuador se puede adaptar a cuerpos de válvulas de 1/2", 3/4" y 1". Se aplica al encendido-apagado de la bobina del ventilador del aire acondicionado central, agua fría/agua caliente del sistema de energía solar y otros sistemas de fluidos.

2.15.3. Características estructurales

- a. Cuerpo de forjado de latón, varilla y resorte de acero inoxidable, pequeño volumen, resistencia a la corrosión.
- b. La estructura del núcleo de la válvula está optimizada y la diferencia de presión permitida es grande sin reducir el valor Kv.
- c. El controlador está separado del cuerpo de la válvula y se puede desmontar rápidamente.
- d. El controlador tiene una palanca de funcionamiento manual que se puede utilizar para la depuración y el mantenimiento del sistema.
- e. Cuatro cables, dos controles, dos cables vivos. Las líneas negro y marrón son de alimentación, la línea amarilla acepta señal de control de 0-10V para controlar el ángulo abierto de las válvulas.

2.15.4. Instalación y puesta en marcha

- a. Lea este manual cuidadosamente antes de la instalación, corte la fuente de alimentación e instálelo por técnicos profesionales.
- b. La dirección del flujo debe ser la misma que la flecha del cuerpo de la válvula.
- c. El cuerpo de la válvula debe estar ubicado sobre la bandeja de drenaje de la bobina para garantizar que el agua caiga en la bandeja de drenaje.

d. El cuerpo de la válvula y el controlador deben instalarse en la dirección vertical $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, y debe haber al menos 30mm de espacio encima para el desmontaje y montaje. Se debe mantener suficiente espacio de mantenimiento y operación con tuberías circundantes, equipos y edificios, y se debe instalar en el lugar accesible al personal de mantenimiento a través de la alcantarilla.

e. Dos o más válvulas eléctricas no se conectarán en paralelo. Si es necesario conectar en paralelo, el relé se utilizará para el aislamiento

f. El controlador no se instalará hasta que el cuerpo de la válvula se haya instalado y la tubería haya pasado la prueba de presión.

g. Si el controlador se ha instalado en el cuerpo de la válvula, el controlador no será forzado durante la instalación y puesta en marcha, de lo contrario el conductor se dañará.

h. El conductor no se envolverá con material de aislamiento térmico, de lo contrario su disipación de calor se verá afectada.

i. El controlador debe estar conectado a tierra de forma fiable a través de un conductor de no menos de $1,5\text{ mm}^2$, y otras líneas deben cumplir con los estándares eléctricos pertinentes.

j. Después de completar la instalación y comprobar que es correcta, Encienda para la depuración. Observe al menos tres ciclos completos de funcionamiento del actuador de conducción hasta que todos los componentes sean correctos.

k. Tras la puesta en marcha sin agua, se realizará una prueba de agua. La diferencia de presión entre el agua superior e inferior del sistema debe controlarse estrictamente dentro de 0,15 MPa para garantizar la eficacia de la válvula eléctrica al interruptor de flujo de agua.

2.15.5. Reparación y mantenimiento

a. Si la válvula tiene fugas, aísla inmediatamente del sistema y reemplaza todo el conjunto del cuerpo de la válvula, la válvula se puede apreciar en la figura 30.

b. Advertencia importante: antes de la instalación, reparación y mantenimiento, la energía debe cortarse para evitar el equipo y lesiones personales el conexionado se muestra en la figura 31.

Si el sistema está funcionando, limpie la superficie del diente del engranaje del sector interno de la válvula y luego lubrique.



Figura 30. Vista frontal de válvula motorizada.

Fuente Adaptada de www.ceyesa.com.pe

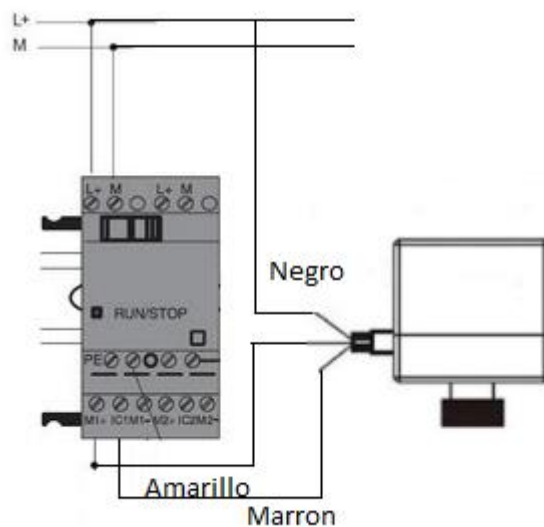


Figura 31. Diagrama de conexionado de la válvula de 24 VDC.

Fuente: Adaptada de www.Siemens.com

2.16. Sensor de temperatura Pt100

El sensor de temperatura Pt100, muy utilizado en procesos industriales, es de tipo resistivo dependiente de la temperatura (RTD, Resistance Temperature Detector).

Su funcionamiento se basa en la variación de la resistencia eléctrica de los metales con la temperatura, es decir, aprovecha el efecto que tiene la temperatura en la conducción de los electrones para que, ante un aumento de temperatura, haya un aumento de la resistencia eléctrica que presentan. Con frecuencia, este fenómeno se aproxima a un sistema que puede ser de primer o segundo orden, a fin de simplificar las operaciones de cálculo. Los sensores de resistencia térmica (RTD) se vinculan habitualmente con dispositivos eléctricos conocidos como puentes de Wheatstone, los cuales reaccionan ante los cambios de la resistencia eléctrica que surgen por efecto de la temperatura, y producen como resultado una señal analógica de 4-20 mA que se utilizará en esta tesis como medio de medición. Existen ciertos tipos de RTD que se denominan Pt100 o Pt1000, los cuales reciben su nombre debido a que se elaboran a partir de platino (Pt) y presentan una resistencia de 100 ohmios o 1000 ohmios, respectivamente, a una temperatura de 0°C. Estos sensores se caracterizan por su comportamiento lineal, el cual se extiende a lo largo de un amplio intervalo de temperaturas. Una RTD típica está formada por un devanado de hilo encapsulado tal como se puede observar en la figura 32.



Figura 32. Sensor pt100 de 2 hilos con protección metálica.

Fuente: Adaptado de www.contrial.pe

CAPITULO III. DISEÑO DEL CONTROL DE NIVEL DE TANQUE DE AGUA OSMONIZADA

3.1 Introducción

El control de nivel de agua osmonizada en un depósito y el flujo en él son problemas comunes en los procesos biomédicos e industriales.

Asegurar la calidad del agua de osmosis producida en la Unidad de Nefrológica de los Hospitales y Clínicas utilizada para hemodiálisis de pacientes crónicos y agudos, y la preparación de ácido concentrado (sala CDS) son factores de gran importancia para asegurar un tratamiento positivo en los pacientes.

En este capítulo se realiza el diseño de ingeniería, es decir se realiza el modelamiento y se implementa un sistema de control del nivel de un tanque de agua osmonizada para fines biomédicos. Un tanque de agua osmonizada de 1600 litros es la planta del sistema, un transmisor de nivel mide continuamente el nivel del tanque con respecto a una entrada de referencia (setpoint). Una válvula de acción motorizada se abre o se cierra, según el nivel de agua osmonizada deseado. Así mismo un sensor resistivo mide la temperatura del agua.

Todo el sistema de control está integrado a un nano PLC modelo Logo de Siemens. Se realiza el programa de control para tener el dominio total del ajuste de nivel del tanque en cualquier limite (entre 20 a 220 cm), para este caso se tomó el nivel de referencia a 1.8 metros.

El algoritmo de control PI calcula la desviación o error entre un valor medido (salida de nivel) y un valor deseado (entrada de referencia o Set-Point, SP) utilizando esta comparación genera una señal eléctrica para forzar la salida a seguir dicho valor de la entrada de referencia (lazo cerrado de control).

3.2 Planta de tratamiento de aguas y sala CDS

Para asegurar una adecuada presión a la salida del tanque, es prescindible mantener el nivel al 80% de su capacidad. Un esquema general de la ubicación de la planta de tratamiento se muestra en la figura 33.

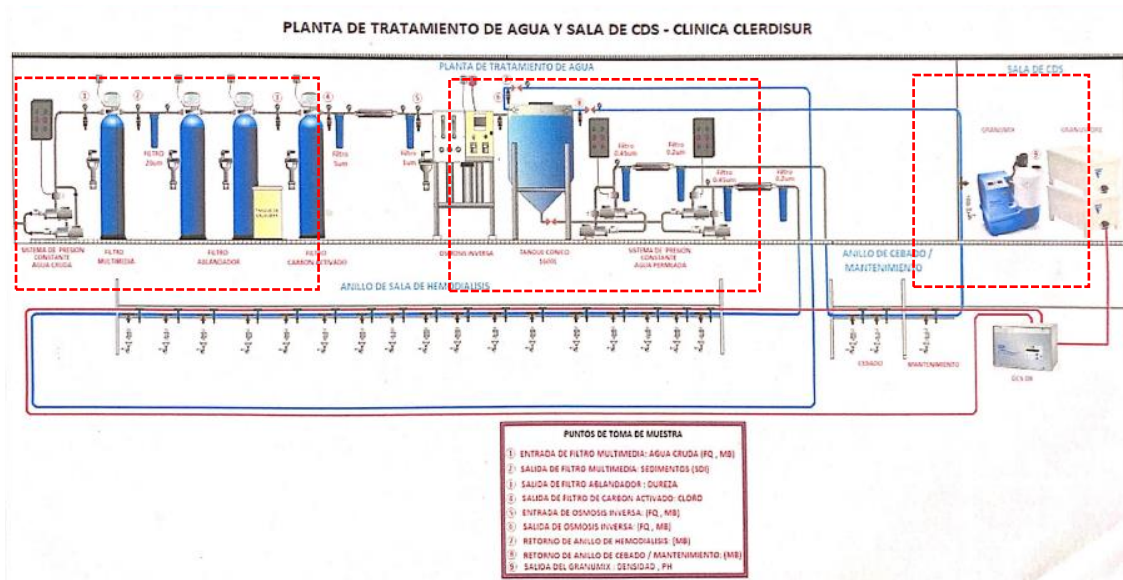


Figura 33. Esquema general de planta de tratamiento de agua.

Fuente: Clínica de enfermedades renales y diálisis del sur.

Se debe notar que el sistema de tratamiento de Hemodiálisis lo podemos dividir en 3 bloques: El pretratamiento, el tanque de tratamiento de agua y el CDS. Para el caso del control del nivel de agua osmonizada, la planta a controlar en el tanque de agua.

3.3 Diagrama de bloques general del sistema

El esquema de bloques general es el que se muestra a continuación:

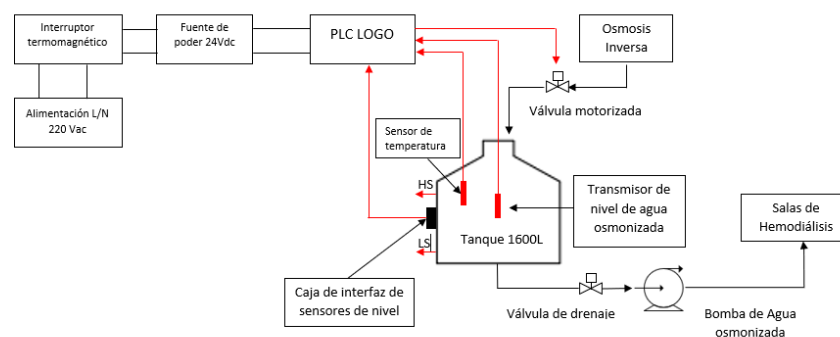


Figura 34 Diagrama de bloques general

Elaboración: propia

3.4 Diagrama en bloques del control de nivel del tanque de agua osmonizada

Los elementos importantes que intervienen para el control del nivel de agua osmonizada en lazo cerrado, se aprecia en la figura 35. El controlador (PLC), la válvula de control y el sensor de nivel.

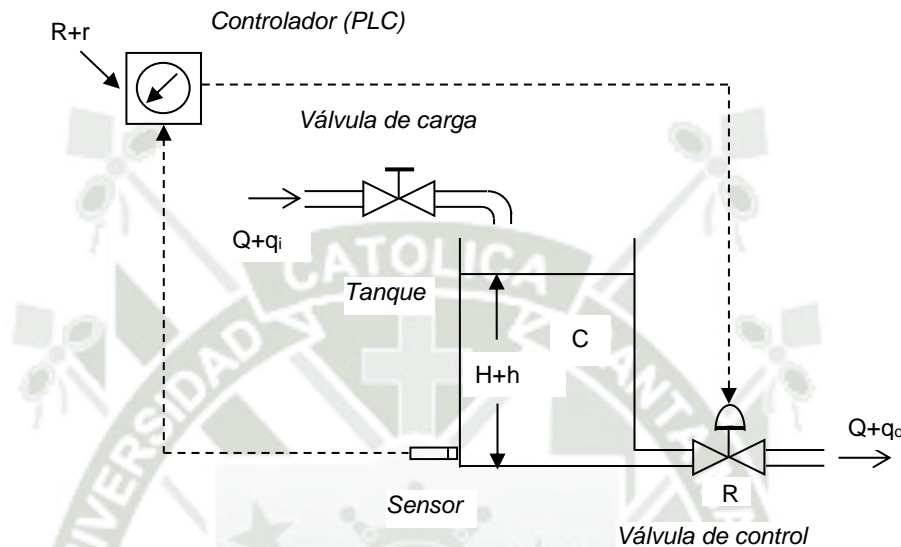


Figura 35. Diagrama de control del nivel de agua osmonizada en la planta de tratamiento.

Fuente: Elaboración propia

El controlador continuamente compara el nivel de líquido (H) con la referencia de entrada (R). El error de la comparación, que es la diferencia entre el valor de referencia y el valor medible (H), indica la relación de variación en la salida. El error es necesario para que el controlador pueda generar la señal correctora del error $e(t)$, es decir la señal de control el cual fuerza a la válvula de control a seguir el valor preestablecido por el Set-Point (referencia de entrada). La señal de control es variable desde 0 a 10 V_{DC}.

El controlador a emplear será el nano PLC Logo 12/24 RCE versión OBA8 conectado a un computador vía puerto de comunicación Ethernet. El desarrollo del programa de aplicación será elaborado en el Software LOGO Soft Comfort V8.2 en Diagrama de Funciones (FUP). Al combinar las funciones de control PI con las funciones lógicas y matemáticas en el PLC se logra el control de nivel de agua estable en tiempo estacionario.

3.4.1 Componentes del control de nivel de la planta de tratamiento de agua osmonizada

El sistema está conformado por seis partes principales que mencionamos:

- Transmisor de nivel
- Válvula de control motorizada
- Detectores de nivel
- Sensor de Temperatura
- Controlador PLC Logo 12/24RCe con suministro de salidas analógicas AM2 AQ
- Tanque de almacenamiento (1600 l, diámetro 1.2mx 2.20m)

3.4.2 Transmisor de nivel

El sensor escogido para el propósito de la tesis es un transductor y transmisor de presión de alto rendimiento. Un pequeño circuito chip de formato ASIC en el transductor entrega en sus terminales de salida señal lineal de corriente entre 4 a 20 mA. Se debe escalar la señal para que lo pueda leer el PLC adecuadamente y determinar a qué altura está el agua osmonizada. Asimismo el escalamiento se debe programar en el programa LOGO!Soft Comfort.



Figura 36. Transmisor de nivel antes de ser colocado dentro del tanque de agua osmonizada.

Fuente: Elaboración propia.

El PLC mediante sus entradas analógicas lee señal de voltaje de 0 a 10 V_{DC}, por lo que se debe transformar la señal de corriente a nivel de voltaje mediante la relación de conversión.

3.4.3 Medición de corriente del transmisor de nivel

Una característica importante del transductor de nivel es que éste entrega una corriente (mA) proporcional al nivel de líquido del tanque, esto quiere decir que se comporta como una fuente de corriente continua proporcional a la altura de una columna de agua sobre el. Normalmente 4 a 20 mA de corriente usan los transductores electrónicos industriales en los sistemas de medición. La corriente de salida varía en un rango dinámico desde 4 - 20 mA; con una señal de nivel de 0 m su salida será de 4 mA. A 3m de columna de agua, el sensor transmite 20 mA.

El propósito de 4 - 20 mA es porque de esta manera se logra transmitir la información a más de 500 metros de distancia. En la figura 37, el sensor de nivel y el sensor electrónico remoto se construyen típicamente en la misma unidad. Una fuente externa de 24 V_{DC} proporciona energía al sensor. El sensor regula la corriente, que representa el valor de lo que el sensor mide; en este caso, el nivel de líquido en un tanque.

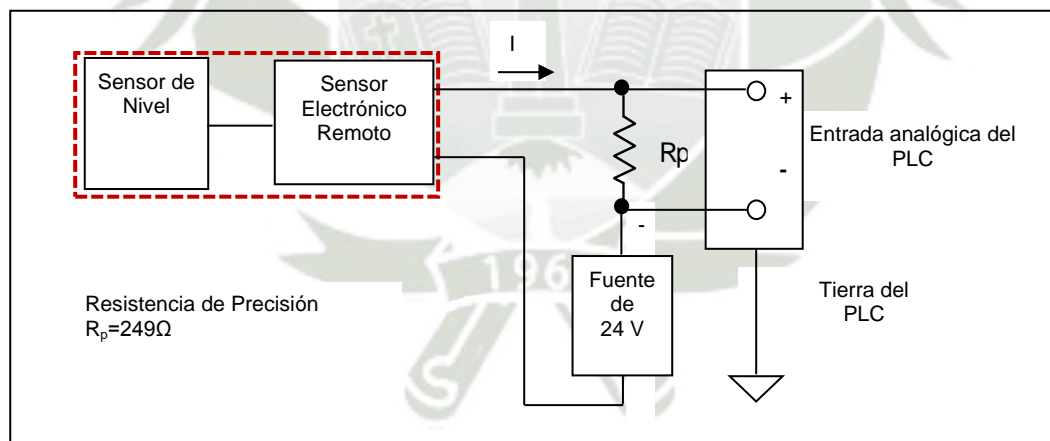


Figura 37. Diagrama eléctrico de conexión del sensor de corriente hacia la entrada analógica del PLC.

Fuente: Elaboración propia.

El PLC lee la caída de voltaje a través de la resistencia de precisión R_p de 249 Ω . La ley de Ohm's deduce la corriente:

$$I_{(mA)} = \frac{V_{(Volts)}}{R_{p(Kohms)}} \quad (4.06)$$

Debido a que la corriente varía de 4 - 20 mA y R_p es 249Ω , el rango del voltaje V cambia desde 0,996 V a 4,98 V. Valor que está dentro del rango que el PLC puede leer. Aunque la ecuación es útil para calcular la corriente, la corriente típicamente representa una cantidad física que se quiere medir.

La figura 38 muestra una respuesta lineal de un tanque de cuyo nivel de líquido varía entre 0 y 50 pies. Los 4 mA representan 0 pies y 20 mA representan 50 pies. L es el nivel del tanque e I es la corriente.

La ecuación de la longitud L en función de corriente I está dada por:

$$L = \frac{25 * I}{8} - \frac{25}{2} \quad (4.07)$$

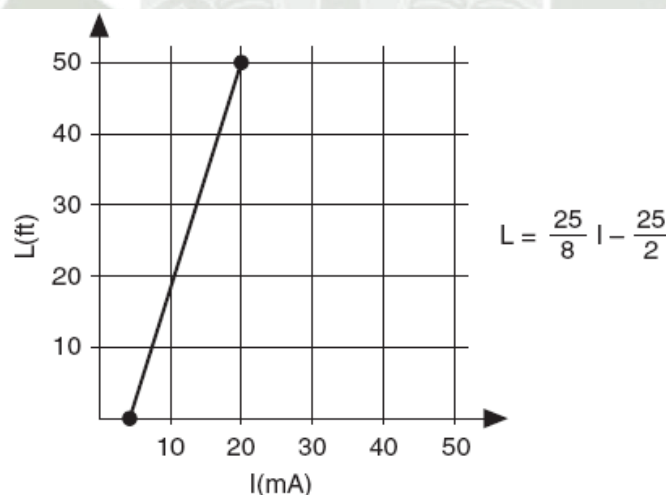


Figura 38. Relación lineal entre el nivel de tanque y la corriente.

Fuente: Ogata (2010)

Sustituyendo $0,249 \Omega$ para el valor de R_p , en la ecuación 4.06, se deduce L en términos al voltaje medido como:

$$L = \frac{25 * V}{8 * R_p} - \frac{25}{2}$$

$$L = \frac{25 * V}{8 * 0,249} - \frac{25}{2} \quad (4.08)$$

El tanque de agua tratada (osmonizada) de la unidad de hemodiálisis es de 1600 litros y una altura de 2.20 m desde la base hasta el cuello del tanque. Se debe hacer un escalamiento del transmisor de nivel con respecto a la altura L del tanque.

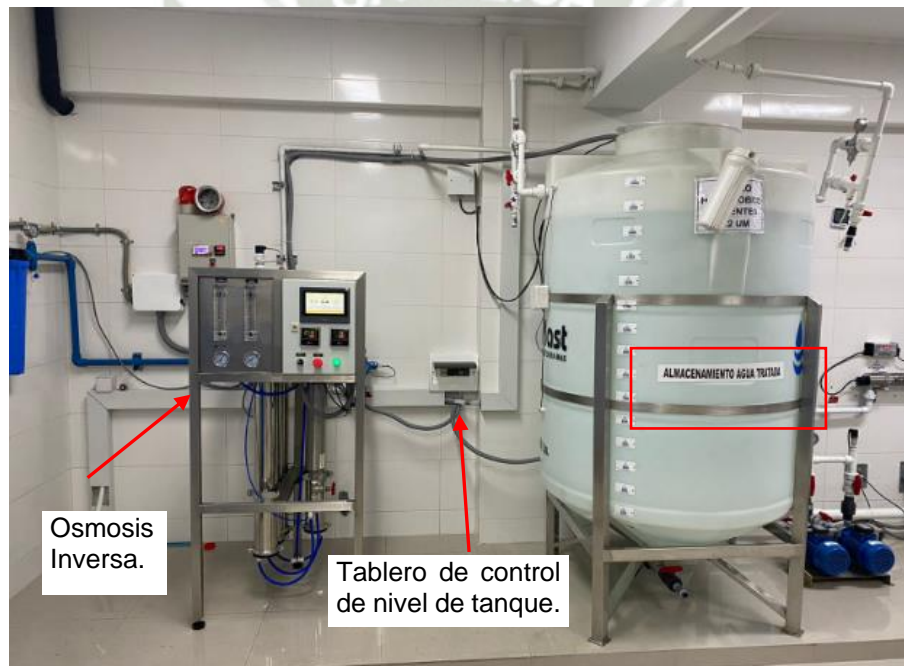


Figura 39. Osmosis inversa, tablero de control de nivel y tanque de almacenamiento de agua osmonizada.

Fuente: Elaboración propia.

Escalamiento: Los valores del transmisor de nivel son:

- Nivel máximo 3 m @ 20 mA
- Nivel mínimo 0 m @ 4 mA

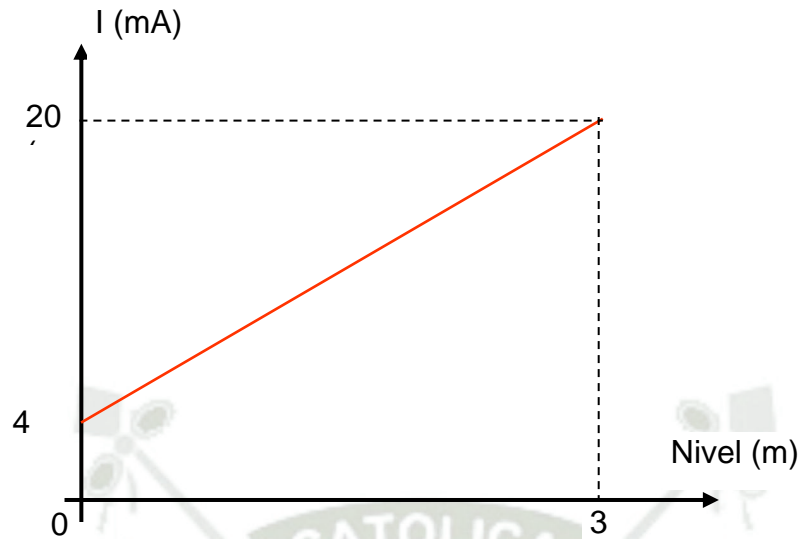


Figura 40. Recta de escalamiento del transmisor de nivel.

Fuente: Elaboración propia

La resolución del sensor es dada por:

$$Resolución = \left(\frac{Vsal(max) - Vsal(min)}{Vent(max) - Vent(min)} * VentActual \right) + K$$

Donde:

$$Vsal(max) = 20 \text{ mA}; Vsal(min) = 4 \text{ mA}$$

$$Vent(max) = 3 \text{ m}; Vent(min) = 0 \text{ m}$$

$$K = 4 \text{ mA}$$

Luego:

$$I(L) = \left(\frac{20 \text{ mA} - 4 \text{ mA}}{3 \text{ m} - 0 \text{ m}} * L \right) + 4 \text{ mA}$$

$$I(L) = \left(\frac{16 \text{ mA}}{3 \text{ m}} * L \right) + 4 \text{ mA}$$

Como el PLC LOGO sus entradas analógicas leen en nivel de tensión, es necesario convertir la corriente proveniente del sensor de nivel a valor de tensión, para que pueda ser procesado por el PLC. Por lo común se debe agregar una resistencia de precisión de $240 \Omega \times \frac{1}{4} \text{ W}$, es decir:

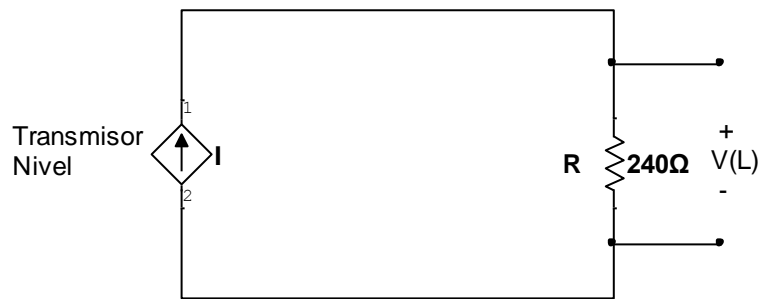


Figura 41. Conversión de señal de corriente I a señal de tensión.

Fuente: Elaboración Propia

$$I(L) = \frac{V(L)}{R}$$

$$V(L) = R \cdot I(L)$$

$$V(L) = 240\Omega \left[\left(\frac{16 \text{ mA}}{3 \text{ m}} * L \right) + 4 \text{ mA} \right]$$

$$V(L) = 1.28v(L) + 0.96v$$

Luego despejando en nivel L :

$$L = [0.78 \times V - 0.75] \text{ m}$$

Llevando el nivel L a centímetros:

$$L = [78 \times V - 75] \text{ cm} \quad (4.09)$$

La ecuación 4.09 representa la característica del nivel en cm dentro del tanque al variar la tensión del transmisor de nivel.

El transmisor de nivel se coloca directamente dentro del tanque de agua osmonizada como en la figura 42. Esta se debe colocar en la parte más baja del tanque. Se debe tener en cuenta que para una medida del nivel no debe tocar la parte del fondo del tanque.



Figura 42. Transmisor de nivel HDL300 dentro del tanque de agua osmonizada.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 43 Ubicación de sensores en la parte baja del sistema.

Fuente: Elaboración propia.

3.4.4 *Válvula de control*

La válvula motorizada es el elemento final de control que deja pasar el flujo de agua osmonizada hacia el tanque mientras esta se va llenando a un set-point o nivel de ajuste. Así mismo corta el flujo de agua osmonizada al tanque cuando este alcanza al set-point. La señal de control, hacia la válvula de control, es proveniente del PLC.

El actuador es controlado por un sistema de control proporcional, la válvula tipo bola tiene su ángulo de rotación proporcional de 90° el cual se mueve proporcionalmente por la señal dada por el control.



Figura 44. Dirección del flujo de agua osmonizada controlado por la válvula motorizada.

Fuente: Elaboración propia.

3.4.5 *Detectores de nivel*

Se trata del detector de nivel capacitivo sin contacto XKC-Y25-T12V. La elección de este sensor es debido a que puede detectar la presencia de líquido a través de contenedores de plástico donde la higiene del agua es importante. Se ha instalado dos detectores de nivel para detectar el

límite bajo y el límite alto de agua osmonizada en el tanque. Estos detectores son de tipo sin contacto y se colocan en las paredes externas del tanque de almacenamiento. Posee un ajuste para el grosor de la pared del tanque y detectar el nivel de agua en el caso que la pared del tanque sea demasiado gruesa. Típicamente puede discriminar espesores de plástico de hasta 5 mm.

Para nuestro caso se colocaron dos detectores de nivel XKC-Y25-T12V una de nivel bajo (Low Level = LL) a 20 cm de la base y otro de nivel alto (High Level = HL) a 1.40 m de la base tal como en la figura 45.

Estos sensores permiten que el agua osmonizada dentro del tanque se mantenga dentro de estos parámetros. La diferencia entre el nivel máximo y mínimo (Max-Min) se conoce como banda diferencial.

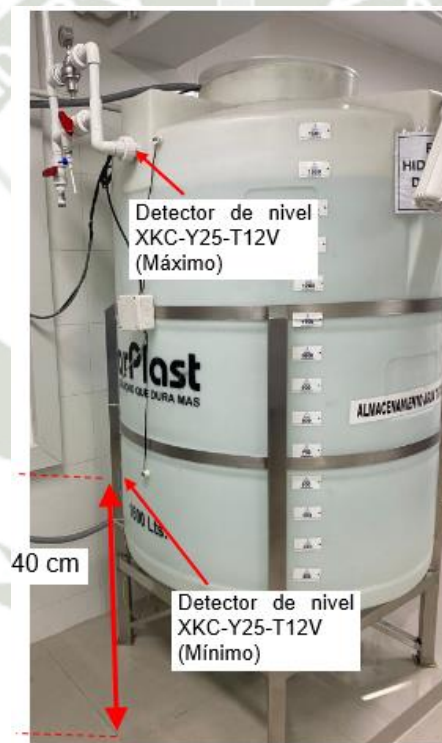
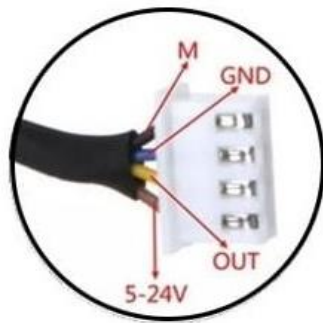


Figura 45. Sensores en la pared externa del tanque de almacenamiento de agua osmonizada.

Fuente: Elaboración propia.

3.4.6 Conexión al controlador PLC

Los detectores de nivel XKC-Y25-T12V traen un cable de 4 hilos con un conector Header TH hembra de 4 pines a 2,54 mm. La especificación de cada pin esta descrita en la figura 46.



MARRON: 5V –24 V DC
AMARILLO: OUT
NEGRO: Sentido de salida. Conectar a Vcc o deje sin conectar para salida "Vcc" cuando detecte líquido, conectar a Tierra ó 0V para salida "Gnd" cuando detecte líquido.
AZUL: GND

Figura 46. Descripción de los pines del detector de nivel xkc-y25 – t12v

Fuente: Adaptado de www.ceyesa.com.pe

Para enviar la señal de los detectores de nivel al PLC se diseñó una pequeña placa de PCB que alimentaba a los detectores de nivel (LL y HL) con 24 V DC. También permita enviar la señal del Nivel máximo y mínimo al PLC.

La placa del sistema consiste de:

- Dos conectores header JST XH para PCB de 4 pines rectos de 2.54mm
- Un jumper
- Un diodo LED de estado On/Off
- Un diodo semiconductor.
- Una resistencia de 2.2 K Ω .
- Borneras de conexión TH de 2.54 mm
- PCB formato de 4 x 10 cm

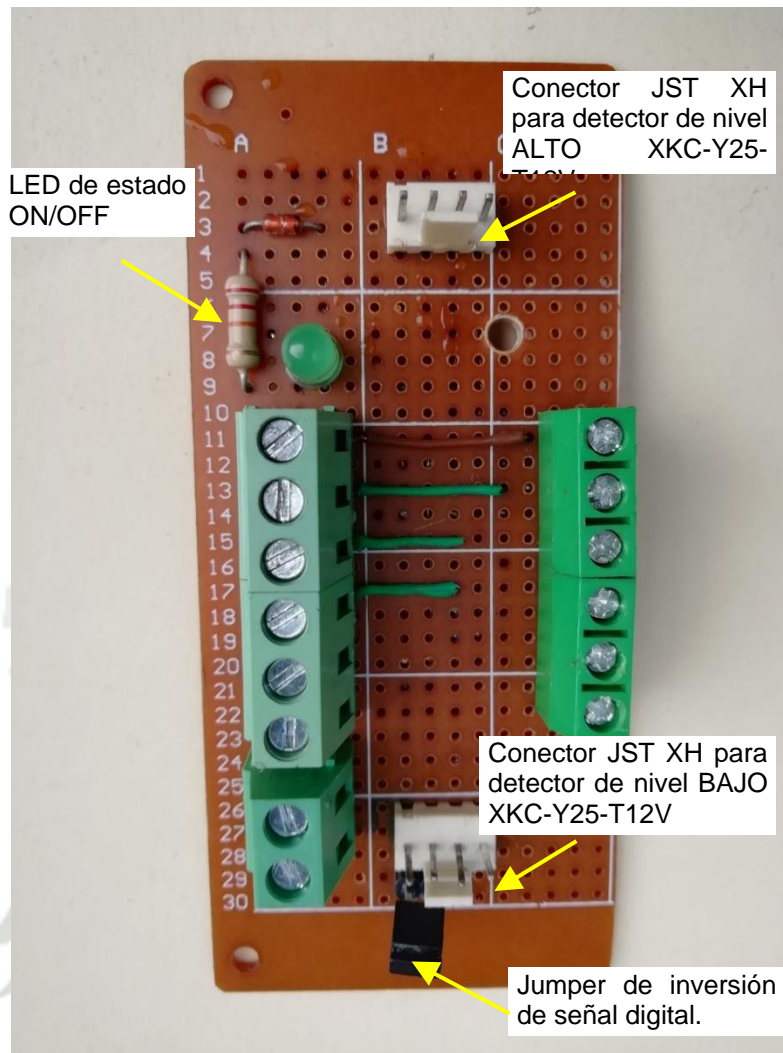


Figura 47. Elaboración de la placa sistematizada para alimentación y señal de control para los detectores de nivel xkc-y25-t12v.

Fuente: Elaboración propia.

El Jumper es necesario para invertir la lógica binaria, es decir, al detectar la ausencia de agua osmonizada el sensor enviara una señal de “1” lógico al PLC. Sin Jumper el sensor trabaja de modo normal, al detectar presencia de agua envía “1” lógico al PLC y se enciende el LED rojo.

3.4.7 Tarjeta de interface

El conexionado general de los sensores y actuadores al PLC es mediante la tarjeta de interface la cual está dentro de una caja de PVC de formato 10 x 10 x 5 cm que protege de la

humedad y del polvo ambiental. La tarjeta del sistema es una PCB flexible cuyas medidas son: 4 x 9.5 cm. En la figura 48 se muestra la descripción de las borneras:

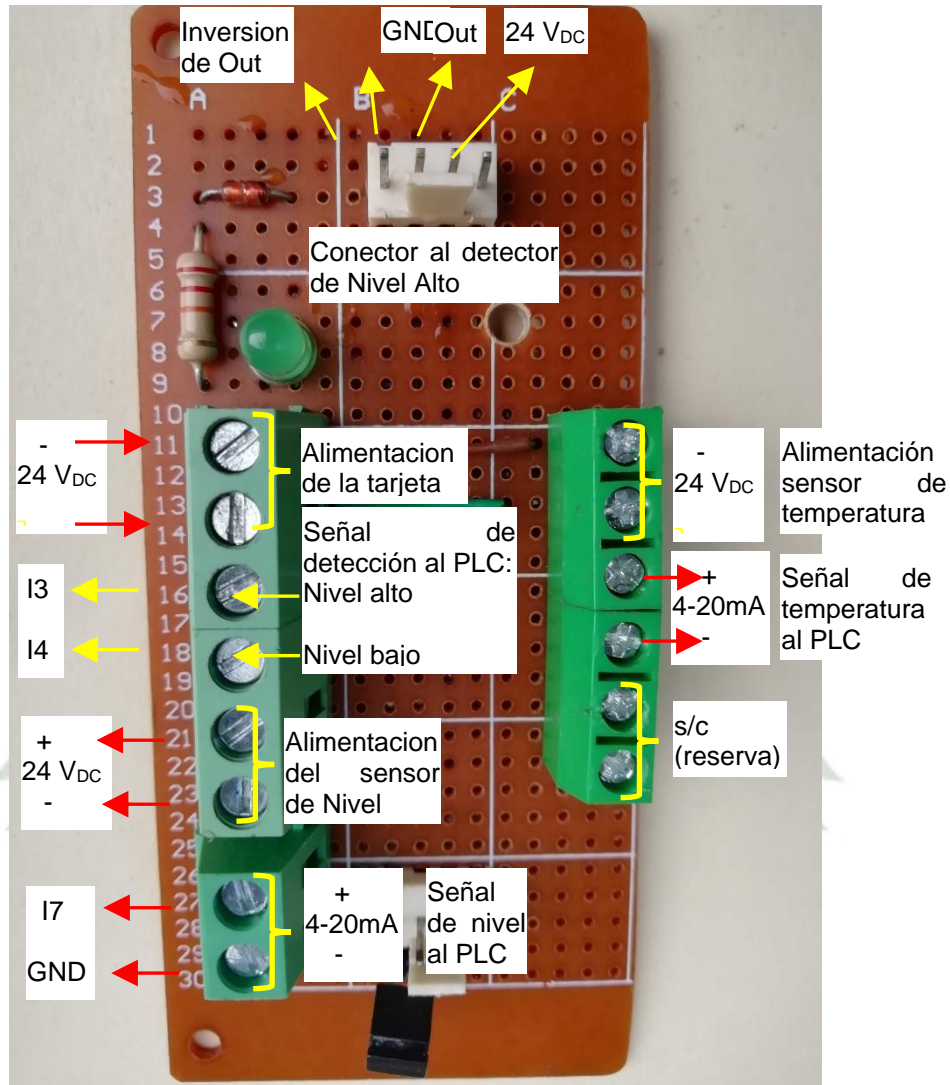


Figura 48. Descripción general de borneras de tarjeta de interface.

Fuente: Elaboración propia.

La señal de los detectores de nivel, señal de temperatura y señal del transmisor de nivel son enviadas a través de un cable UTP 5e Outdoor para exteriores de blindaje para el fuego (recubrimiento tipo CMX).

La posición de la tarjeta interface dentro del lazo de control se muestra en el esquema de la figura 49.

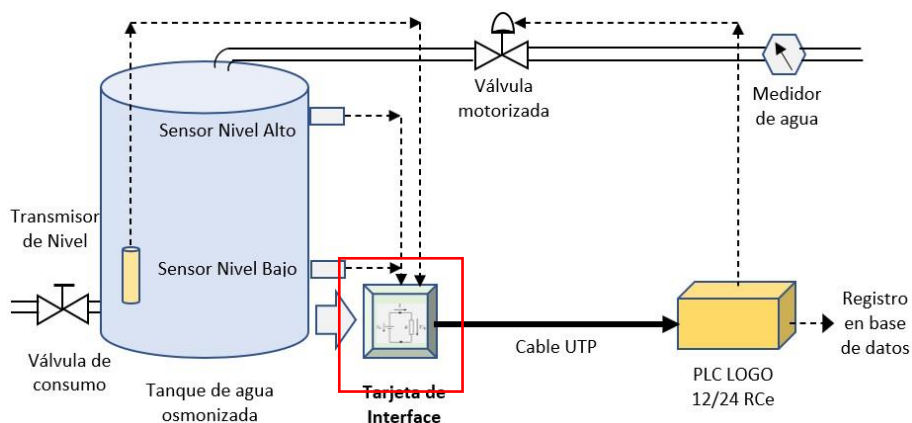


Figura 49. Ubicación de la tarjeta de interface dentro del lazo de control de nivel de tanque de agua osmonizada.

Fuente: Elaboración propia.

El conexionado de la tarjeta de interface describe el conexionado físico de las señales de información al PLC. La figura siguiente muestra la forma como se realizó el conexionado respectivo según la descripción.

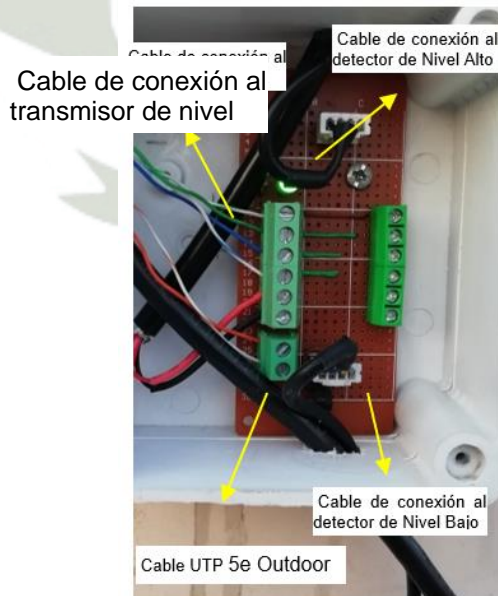


Figura 50. Tarjeta de interface PCB dentro de la caja de PVC.

Fuente: Elaboración propia

3.5 Integración del sistema al PLC

El PLC LOGO 12/24 RCe se ubicará dentro de una caja de PVC similar al tablero de distribución de energía domiciliaria.

El PLC se alimenta con tensión continua variable desde 12 V_{DC} hasta 24 V_{DC}. Se utilizó una fuente de poder estabilizada de 24 V_{DC} llamado LOGOPower que suministra hasta 2 A de corriente suficiente para alimentar a todo el sistema de control de nivel de agua osmonizada.

Dos llaves termomagnéticas de 220 V_{AC} suministran el voltaje alterno a la fuente de poder LOGOPower. La llave principal es que proviene de la red eléctrica de la clínica de allí se distribuye a la llave secundaria que alimenta a la fuente de poder LOGOPower. La fuente de poder LOGOPower entrega tensión continua de 24 V_{DC} al PLC, a los detectores de nivel, al transmisor de nivel y al sensor de temperatura.



Figura 51. Energizado del PLC mediante 220Vac.

Fuente: Elaboración propia.

Se realizó la programación en lenguaje de funciones (FUP) de acuerdo al requerimiento del personal del hospital, para esto la pantalla LCD del PLC debe mostrar en cada instante el nivel de agua osmonizada en el tanque, así como la temperatura del mismo.



Figura 52. Pantalla principal de control de nivel de agua osmonizada.

Fuente: Elaboración propia.

Las teclas de navegación (Izquierda, derecha, arriba y abajo) se programó para acceder al menú de pantallas.

3.6 Modelamiento, simulación y sintonía del control de nivel de tanque

- a. Obtención experimental de parámetros del modelo matemático
 - Capacitancia C del tanque, está dado por la ecuación (1.6):

$$C = \frac{dV}{dh} \frac{[m^3]}{[m]} ; dV = \pi r^2 dh$$

$$C = \frac{\pi r^2 dh}{dh} \frac{[m^3]}{[m]}$$

$$C = \pi r^2 [m^2]$$

∴ La capacitancia es el área del tanque, $C = A$

Entonces, si el incremento diferencia dh es pequeño, la capacitancia C va a ser igual al área A de la sección transversal del tanque.

Al medir el diámetro interno (D_i) del tanque nos da 1,6 m.,

$$D_i = 1,6 \text{ m}$$

Luego el área de la circunferencia es dada por

$$A = \pi r^2 = \pi \left(\frac{D_i}{2}\right)^2 = \pi \left(\frac{D_i^2}{4}\right)$$

$$A = \pi \left(\frac{1,6^2}{4}\right) \text{ m}^2$$

$$A = 2,01 \text{ m}^2$$

Por lo tanto:

$$\therefore C = 2,01 \text{ m}^2$$

- Constante K_s del sensor

Tomemos la ecuación (4.09) del Capítulo III, para obtener la constante K_s del sensor de presión.

$$V(L) = 1.28v(L) + 0.96v$$

En esta ecuación la tensión V está en función de la longitud L de nivel o altura de agua en el tanque, es decir, la función que relaciona la tensión del sensor con respecto a la altura de agua es dado por:

$$V(h) = 1.28(h) + 0.96, \text{ voltios} \quad (4.11)$$

Luego la constante K_s del sensor va ser la derivada del voltaje V respecto a la altura h , es decir:

$$K_s = \frac{\partial V}{\partial h}$$

Derivando:

$$K_s = 1,28 \text{ volts/m}$$

$$\therefore K_s = 1,28 \frac{v}{m}$$

- Constante de válvula:

El dimensionamiento de la válvula de control es el procedimiento mediante el cual se calcula el coeficiente de flujo de la válvula, K_v , el “método C_v ” tiene bastante aceptación entre los fabricantes de válvulas. El coeficiente K_v se define como “la cantidad de agua en galones que fluye por minuto a través de una válvula completamente abierta, con una caída de presión de 1 psi en la sección transversal de la válvula”¹.

Experimentalmente, el método C_v quiere decir: en condición de operación el sistema dinámico de nivel de líquido, se hace variar el flujo Q_i que fluye por la válvula completamente abierta y se va tomando datos de lectura de la variación de altura Δh en el tanque

En general el flujo que pasa por una válvula de control en estado estacionario es dado por:

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

Donde:

Q_v : Flujo a través de la válvula

K_v : Constante de válvula

A_s : Área de paso

ΔP : Presión diferencial a través de la válvula. $P_2 - P_1$

Se concluye que el flujo que pasa por la válvula es proporcional al área de abertura de la válvula en el caso que la diferencia de presión sea constante.

De modo práctico tomamos una válvula con un comportamiento donde sea posible hacer una aproximación lineal entre el flujo Q_v y la abertura de la válvula.

Debido a que los cambios de Δh son demasiados pequeños en este tipo de válvula, la caracterización se realizó en un Banco de Flujo de Fluidos. El flujo de entrada Q_i es medido con un rotámetro, el incremento de altura Δh se mide por diferencia de presión atmosférica entre dos capilares equidistantes a cada extremo de la válvula. Estos valores de medición son mostrados en la tabla 5.

Tipo de válvula: Bola

Apertura de válvula: 100%

Caudal de entrada		Variación de nivel	
Q (L/min)	Q (m ³ /s)	ΔH (mm)	ΔH (m)
6	0,000100	1	0,001
8	0,000133	2	0,002
10	0,000167	3	0,003
12	0,000200	4	0,004
14	0,000233	5,3	0,0053
16	0,000267	7	0,007
18	0,000300	10	0,01
20	0,000333	14	0,014

Tabla 5. Datos experimentales del dimensionamiento de la válvula de control K_v

Fuente: Elaboración propia.

La representación gráfica de la altura H en función del caudal Q_i se muestra en la figura 53.

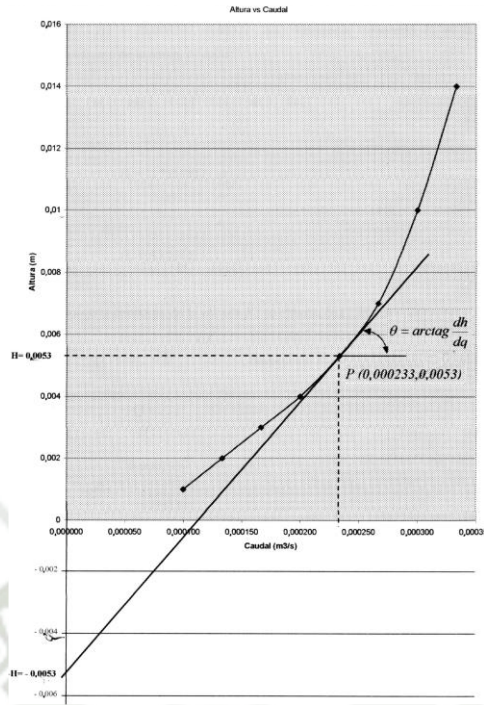


Figura 53. Curva del nivel del tanque en función del caudal
Fuente: Elaboración propia.

La tangente a la curva en el punto P corta la ordenada en el punto $(0, -H) = (0,000233, 0,0053)$. Así, resistencia turbulenta R_t es la pendiente de la curva, es decir:

$$m = \operatorname{tag} \alpha = \frac{2H}{Q} \quad ; \quad m = R_t$$

$$m = R_t = \frac{2 * 0,0053}{0,000233} \frac{\frac{m}{m^3}}{\frac{s}{s}}$$

$$\therefore R_t = 45,5 \frac{s}{m^2} \quad (5.09)$$

Luego la constante de la válvula K_v se obtiene de (1.2):

$$Q_i = K_v \sqrt{H} \quad , \quad \text{despejando } K_v$$

$$K_v = \frac{Q_i}{\sqrt{H}}$$

$$K_v = \frac{0,000233 \frac{m^3}{s}}{\sqrt{0,0053} \frac{1}{m^2}}$$

$$\therefore K_v = 0,0032 \frac{m^3}{s} \quad (5.10)$$

Las constantes evaluadas son las siguientes:

$$K_v = 0,0032 \frac{m^3}{s}$$

$$R_t = 45,5 \frac{s}{m^2}$$

$$C = 2,01 m^2$$

$$K_s = 1,28 \frac{V}{m}$$

Luego el diagrama en bloques en lazo cerrado es:

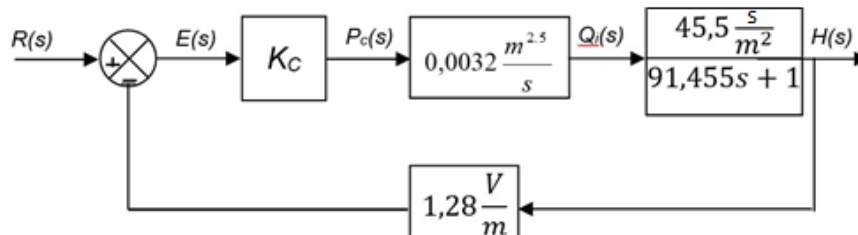


Figura 54. Diagrama de bloques con las constantes del sistema dinámico.

Fuente: Elaboración propia.

Ya obtenidas las constantes que iniciarán la modelación en el sistema de tanque, se debe sintonizar el controlador para obtener los parámetros K_P , K_I y K_D . La manera de sintonizar el controlador se detalla en la siguiente sección.

b. Simulación y sintonía con Simulink

Para visualizar la respuesta temporal del sistema de control en tiempo continuo, primeramente, se realiza el diagrama de bloques:

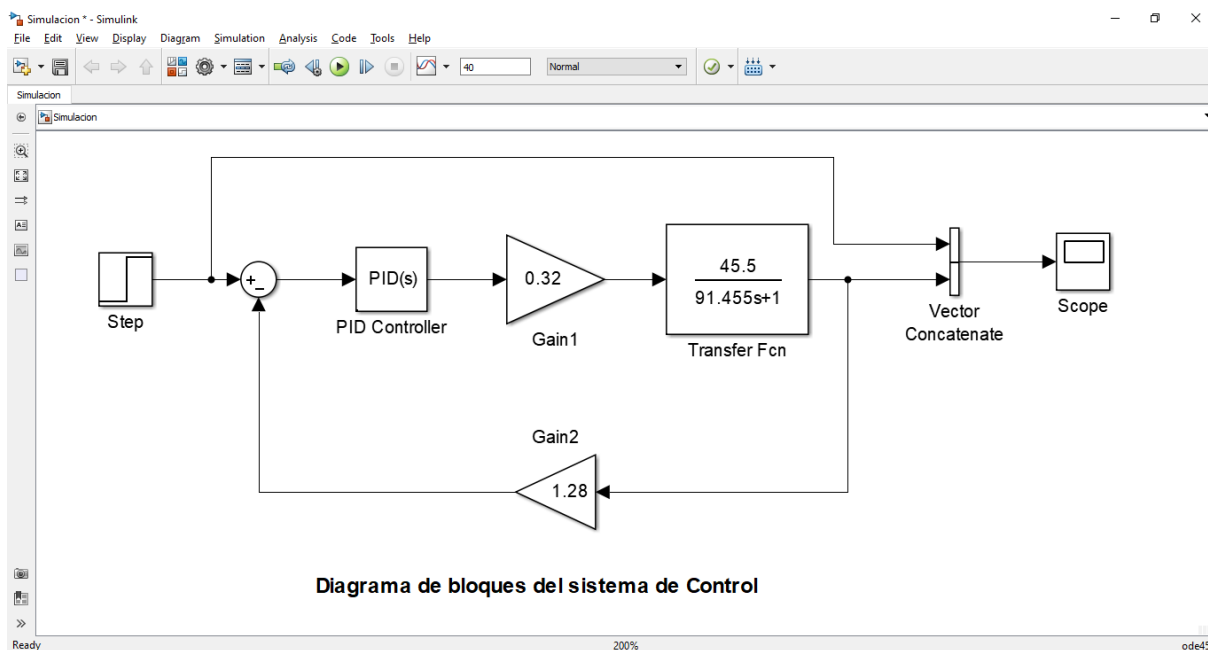


Figura 55. Diagrama de bloques del sistema de control.

Fuente: Elaboración propia.

Una primera respuesta, sin controlador PID, para parámetros $P=1$, $I=1$ y $D=0$ es oscilatoria:

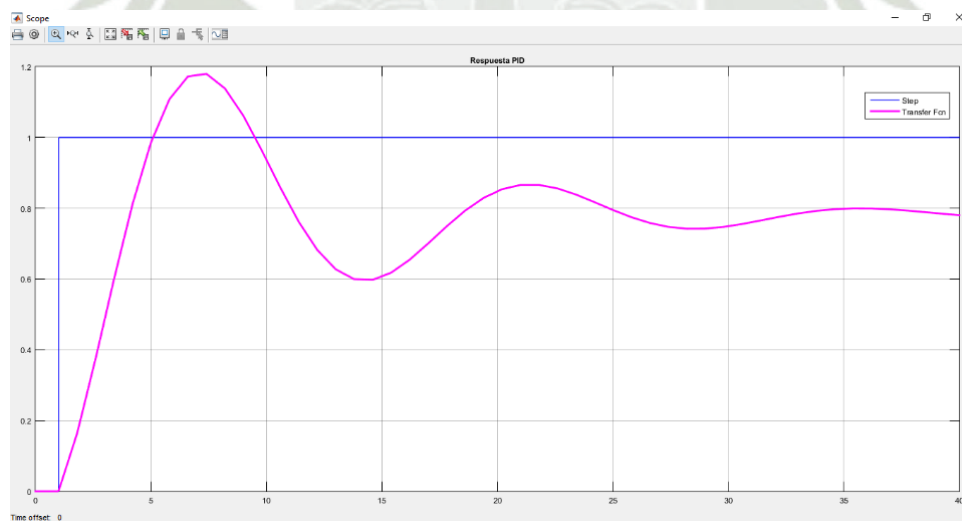


Figura 56. Parámetros del controlador de característica solo proporcional.

Fuente: Elaboración propia.

Ahora sintonizamos de manera automática en Simulink, nos da los siguientes parámetros:

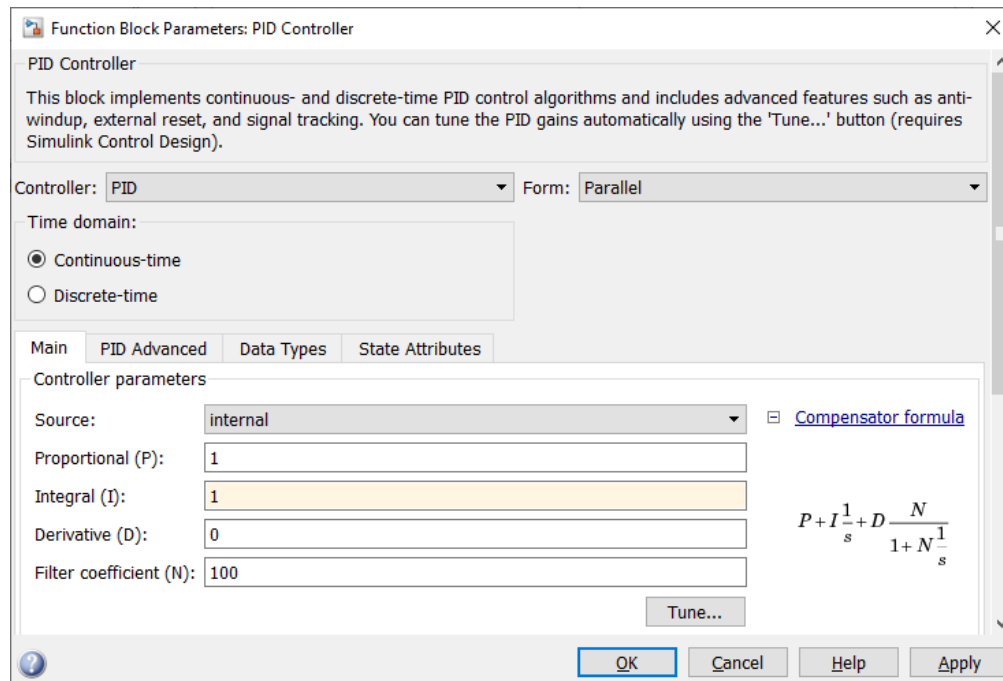


Figura 57. Respuesta del controlador ante una entrada escalón unitario.

Fuente: Elaboración propia.

Ajustamos un rise time de 10 seg y un tiempo de establecimiento de 40 seg.

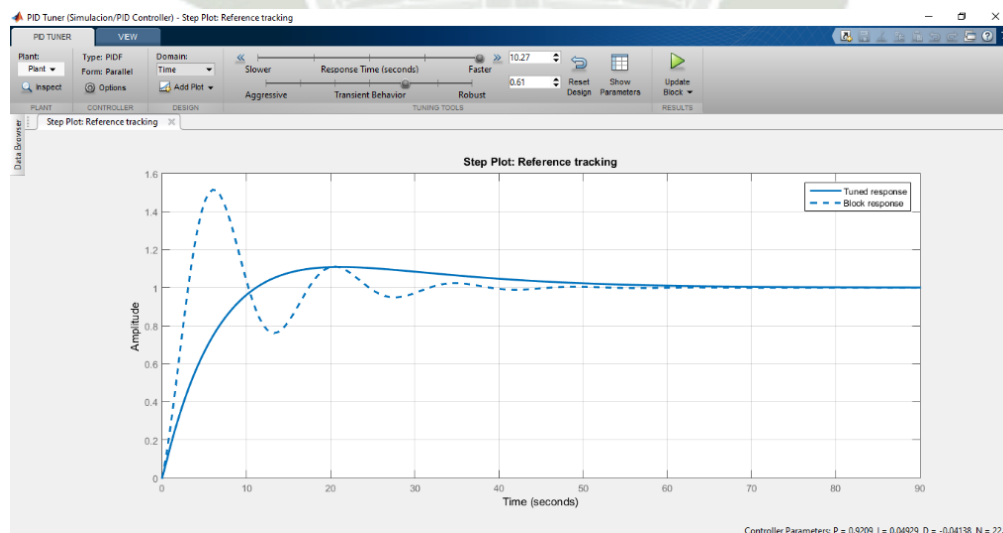


Figura 58. Respuesta del controlador ante una entrada escalón unitario.

Fuente: Elaboración propia.

Nos da los siguientes parámetros PID:

Controller Parameters		
	Tuned	Block
P	0.9209	1
I	0.049295	1
D	-0.041378	0
N	22.2557	100

Performance and Robustness		
	Tuned	Block
Rise time	7.97 seconds	2.37 seconds
Settling time	51.8 seconds	36.1 seconds
Overshoot	10.9 %	51.5 %
Peak	1.11	1.51
Gain margin	Inf dB @ Inf rad/s	Inf dB @ NaN rad/s
Phase margin	77.4 deg @ 0.195 rad/s	26.7 deg @ 0.475 rad/s
Closed-loop stability	Stable	Stable

Figura 59. Parámetros de desempeño del controlador PID ante una entrada escalon unitario

Fuente: Elaboración propia.

Notamos que el nuevo rise time es 7.97 s y el tiempo de establecimiento ocurre en 51.8 s. Luego cargamos estos parámetros sintonizados al bloque de controlador PID

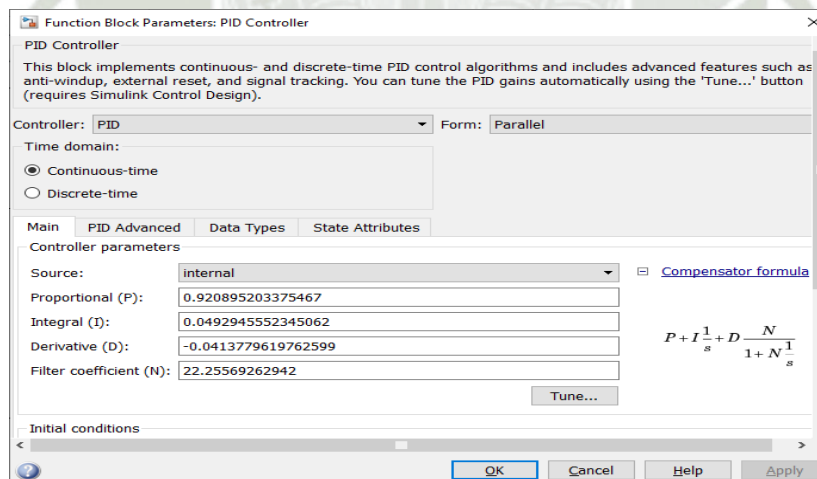


Figura 60. Parámetros de sintonía en lazo cerrado del controlador PID.

Fuente: Elaboración propia.

La respuesta en tiempo continuo ante una entrada escalón unitario será:

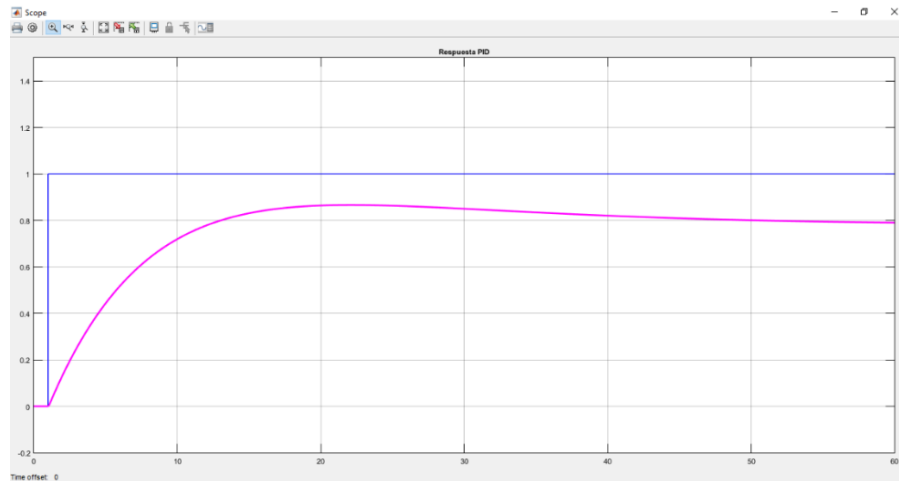


Figura 61. Respuesta temporal ante una entrada escalon unitario del controlador PID.

Fuente: Elaboración propia

Notamos que la respuesta, al escalón unitario, presenta una subida rápida, pero sin sobre impulsos con un tiempo de asentamiento (t_s) de 50 s aproximadamente.

En condición transitoria y de estado estacionario el sistema se mantiene estable, esto era de suponer ya que un controlador PID bien sintonizado da buena estabilidad ante perturbaciones externas que se le presente a la planta.

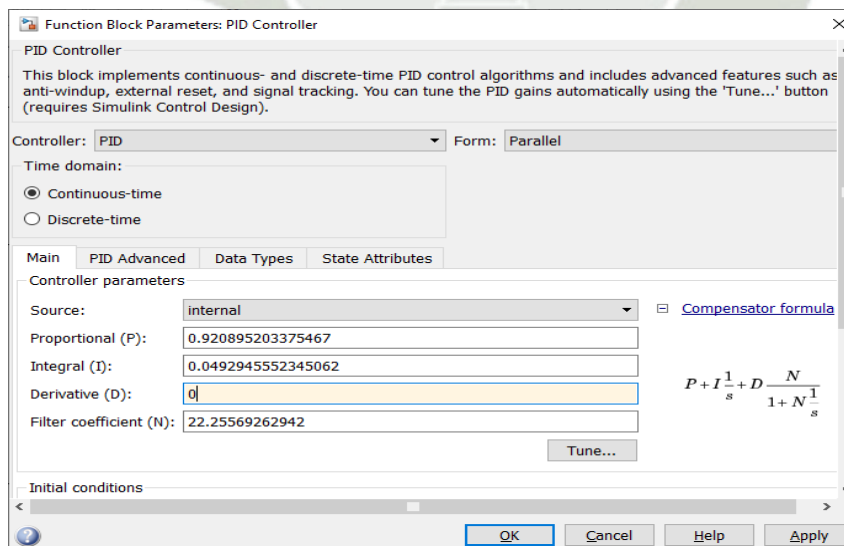


Figura 62. Parametros de sintonia en lazo cerrado del controlador PI.

Fuente: Elaboración propia

La respuesta temporal con controlador PI es:

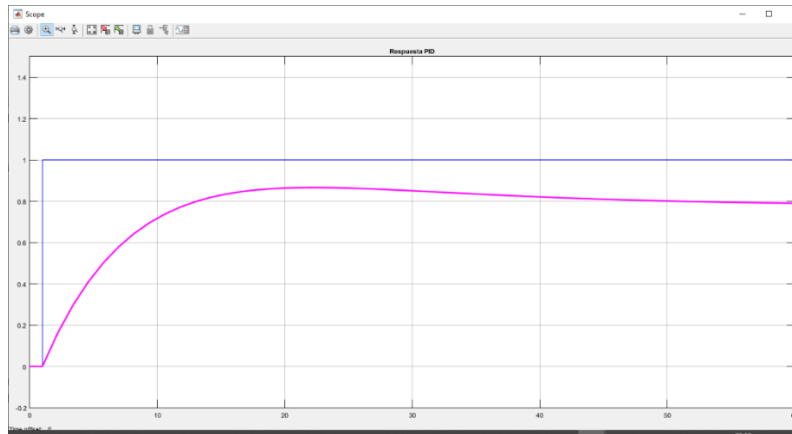


Figura 63. Respuesta temporal ante una entrada escalon unitario del controlador PI

Fuente: Elaboración propia

3.7 Modelo de la planta

El modelo de la planta se asemeja a un sistema de primer orden:

$$\frac{H_1(s)}{Q_i(s)} = \frac{45,5}{91,455s + 1}$$

CAPITULO IV. PROGRAMACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL DE NIVEL

4.1 Introducción

En este capítulo se realizan la programación del sistema mediante el programa LogoSoft Comfort ver8. Este programa permite programar los PLC de la familia LOGO de Siemens. Así mismo la manera con se transfiere el programa elaborado a la memoria de programa del PLC LOGO.

Se conoce que el lenguaje de programación de los PLC's es el esquema de contactos conocido también por Ladder o escalera. Para la presente tesis se utilizó el lenguaje grafico de diagrama de funciones debido a que permite coordinar grandes tareas a través de procesos más pequeños y su flexibilidad a diferencia del Ladder.

4.2 Ambiente del LogoSoft Comfort ver8

LogoSoft Comfort presenta dos ambientes de programación: Modo de Diagrama y Modo de proyecto de red.

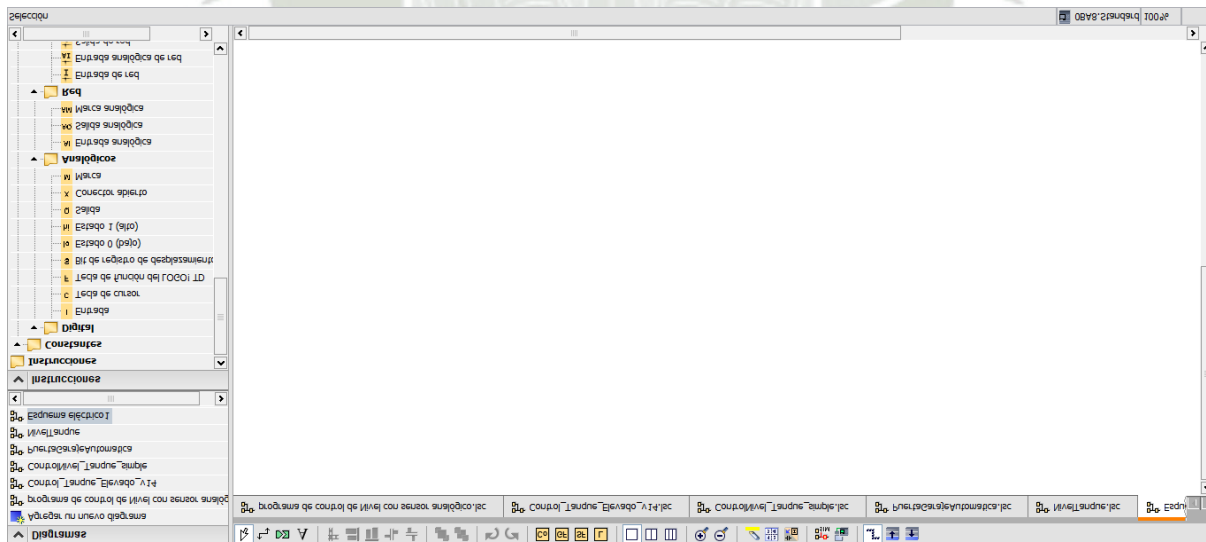


Figura 64. Aspecto del Logosoft Comfort en el modo diagrama.

Fuente: Elaboración propia

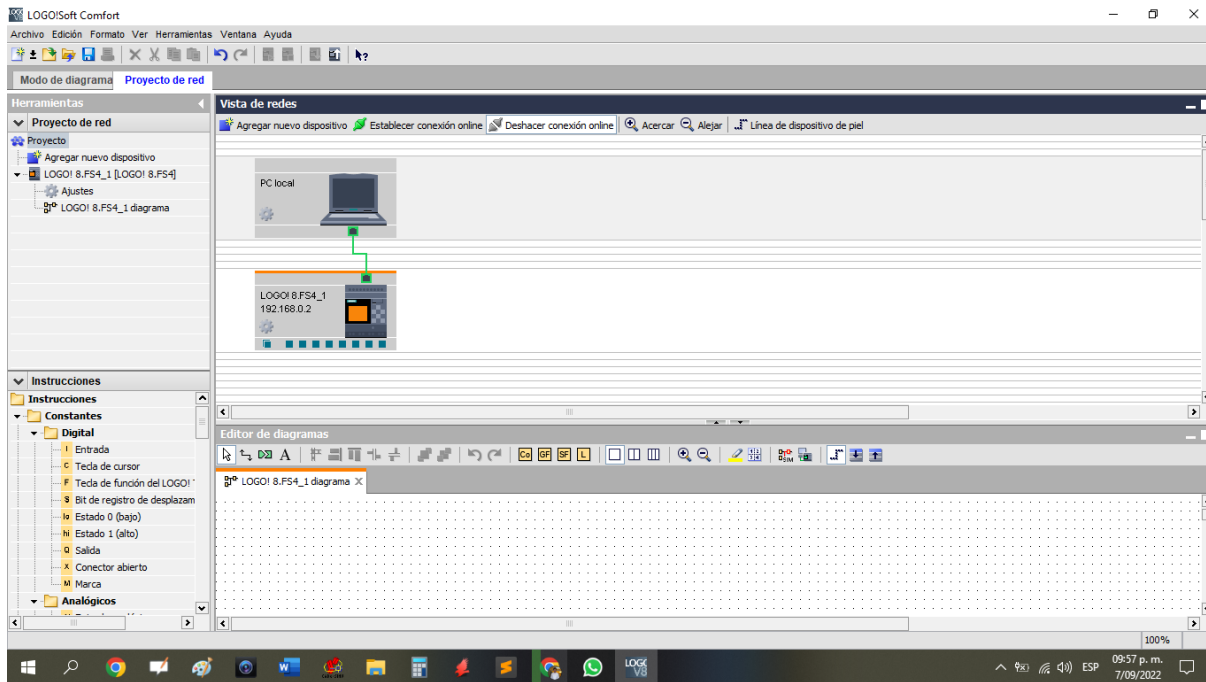


Figura 65. Aspecto del Logosoft Comfort en el modo proyecto de red.

Fuente: Elaboración propia.

4.3 Programación del PLC LOGO

El programa en general se realizó en diagrama de funciones, llamado también FUP, debido a que se puede ver agrupados por bloques las diferentes lógicas y fácil de ver el segmento completo.

Se utilizó dos modos de trabajo: Manual y Automático. Para facilitar la programación se dividió en 5 segmentos:

- a) Detectores de nivel alto y bajo
- b) Lectura del transmisor de nivel de tanque
- c) Visualización de pantallas LCD (textos de avisos)
- d) Regulador PI
- e) Registro de datos en memoria microSD

4.3.1 Detectores de nivel alto y bajo

La tabla de direccionamiento de E/S es la que se muestra a continuación:

Entrada	Salida	Descripción	Dirección
LSDown		Detector nivel bajo	I4
C1		Tecla arriba abre	Función C1
C2		Tecla abajo cierra	Función C2
LSUp		Detector nivel alto	I3
	Abierto	Válvula abierta	Q1
	Cerrado	Válvula cerrada	Q2

Tabla 6. Tabla de direccionamiento de e/s para nivel alto y bajo.

Fuente: Elaboración Propia

Este segmento está programado la brecha diferencia (BD), en el caso que el regulador PI este deshabilitado o salga de funcionamiento accidentalmente.

Para la presente tesis la brecha diferencial esta entre 20 cm y 100 cm, es decir 80 cm. Esto quiere decir que el detector LSDown está a 20 cm de nivel y el detector LSUp está a 100 cm de nivel de agua osmonizada respectivamente.

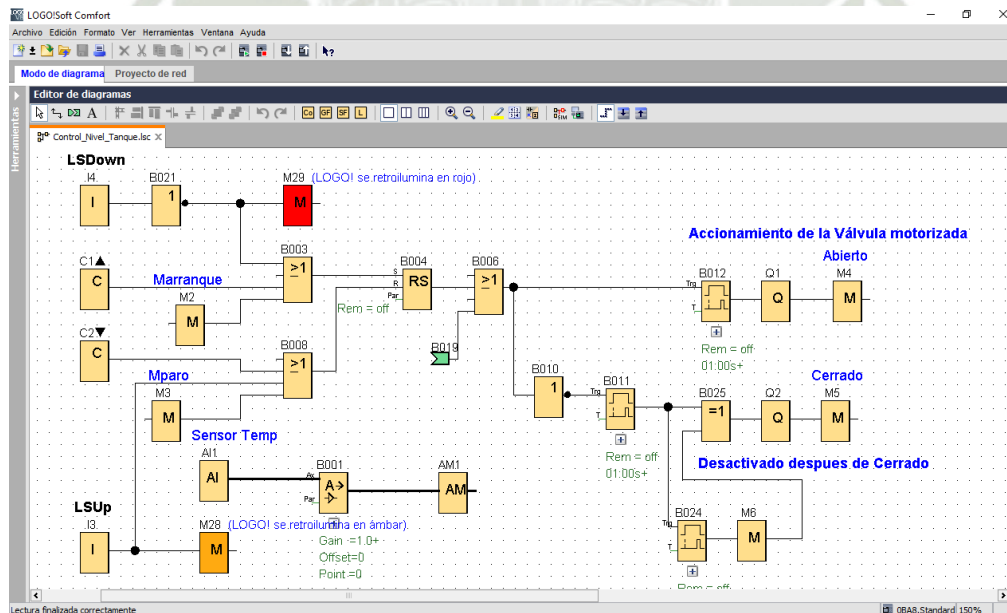


Figura 66. Programación de sensores de nivel bajo (LSDown) y nivel alto (LSUp).

Fuente: Elaboración propia.

Ante presencia de agua osmonizada en el tanque, el detector LSDown enclava RS y se abre la válvula a través de Q1, de modo automático. Cuando el tanque de agua osmonizada está lleno, lo detecta el sensor LSUp, desenclava RS y cierra la válvula a través de Q2.

Las teclas de función C1 y C2 realizan la maniobra de modo manual. La tecla C1 abre la válvula a través de Q1, y la tecla C2 cierra la válvula a través de Q2 respectivamente.

Cuando el agua osmonizada en el tanque este vacío o por debajo del nivel preestablecido, se enciende la pantalla del LCD color rojo. Caso contrario cuando el agua osmonizada en el tanque está lleno o por encima del valor preestablecido, se acciona la pantalla del LCD color ámbar como aviso de alarma visual.

Todo el proceso de las variables de salida se visualiza en el texto de aviso 1.

4.3.2 *Lectura del transmisor de nivel de líquido*

La tabla de direccionamiento de E/S, para este caso, se muestra a continuación:

Entrada	Salida	Descripción	Dirección
Sensor Nivel		Señal analógica, modo de corriente (mA)	AI2
High		Constante de nivel alto para habilitar los bloques de texto de aviso, instrucción aritmética, comparador y data logger.	Hi
	Data Logger	Registrador de altura del nivel de tanque	L1

Tabla 7. Tabla de direccionamiento de e/s para transmisor de nivel.

Fuente: Elaboración propia.

La señal del transmisor de nivel es de tipo analógica en mA.

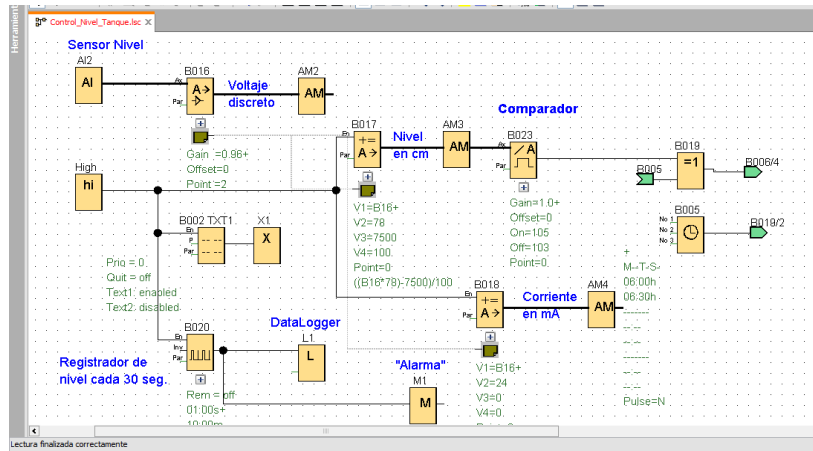


Figura 67. Programación del transmisor de nivel, la comparación y escalamiento a corriente.

Fuente: Elaboración propia.

La señal analógica del transmisor de nivel se cuantifica a nivel discreto en unidades de centímetros (cm) mediante la relación de conversión (4.09).

$$L = [78 \times V - 75] \text{ cm}$$

El nivel de agua osmonizada dentro del tanque, así como la temperatura se visualizan y se registran en los textos de aviso. La configuración nivel de agua, se muestra en la figura 68.

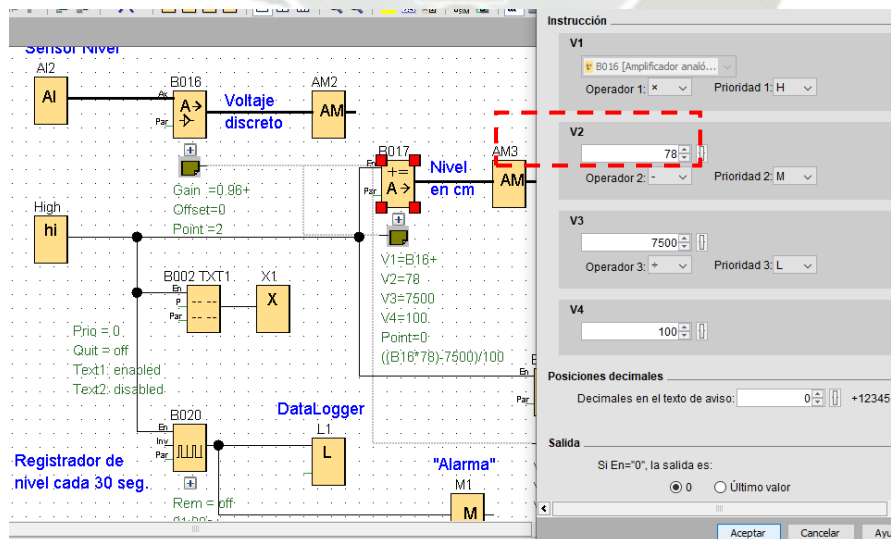


Figura 68. Programación del transmisor de nivel, la comparación y escalamiento de corriente.

Fuente: Elaboración propia.

Los valores del texto de aviso TXT3 a visualizar en la pantalla LCD es según la figura siguiente:

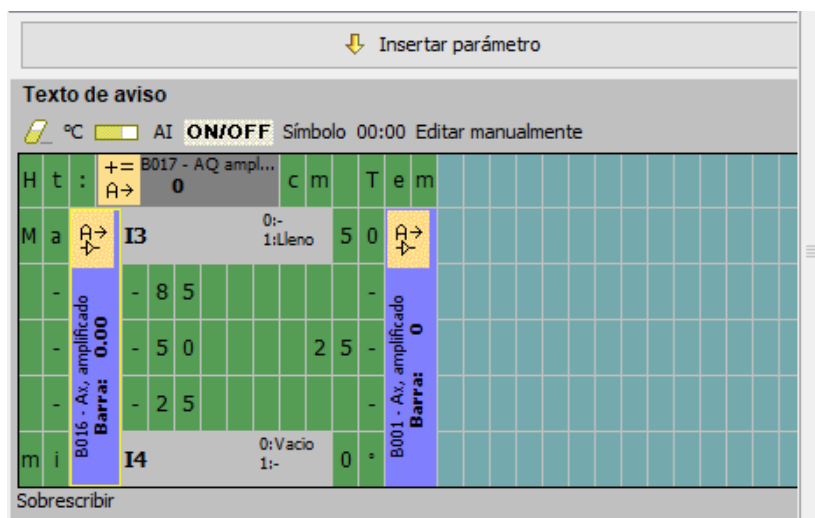


Figura 69. Configuración de nivel y temperatura de agua osmonizada en el tanque.

Fuente: Elaboración propia.

Son 4 textos de aviso que es posible seleccionar mediante las teclas de función C3 y C4 para ver el proceso del control de nivel de agua osmonizada.

Entrada	Salida	Descripción	Dirección
C3		Tecla izquierda	función C3
C4		Tecla derecha	función C4
	Texto aviso2	Pantalla de aviso2 en el LCD	TXT2
	Texto aviso3	Pantalla de aviso3 en el LCD	TXT3
	Texto aviso4	Pantalla de aviso4 en el LCD	TXT4
	Texto aviso1	Pantalla de aviso1 en el LCD	TXT1

Tabla 8. Avisos de pantalla.

Fuente: Elaboración propia.

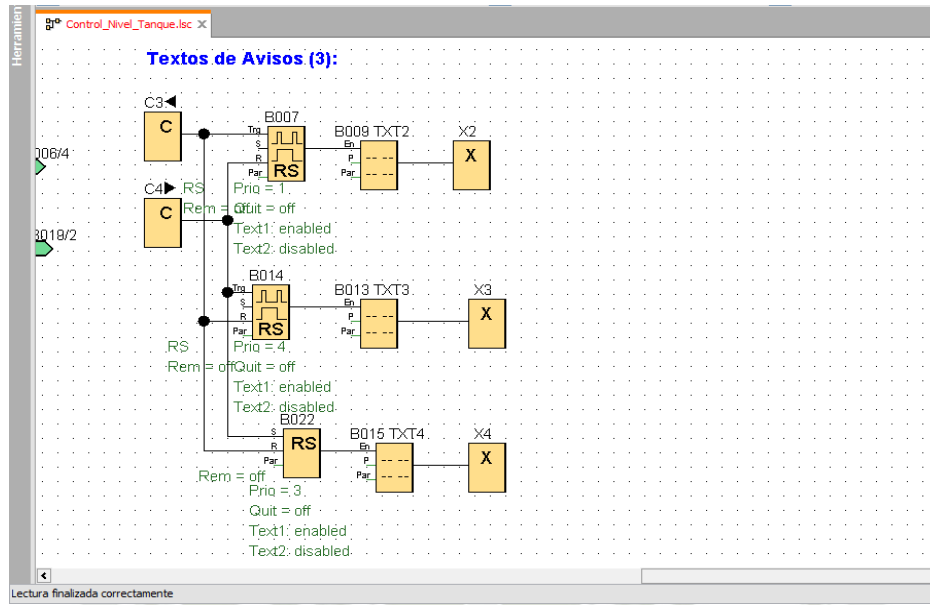


Figura 70. Programación de los textos de aviso (pantalla LCD)

Fuente: Elaboración propia.

Mediante la tecla C3 las pantallas del LCD se desplazan hacia la izquierda, y mediante la tecla C4 se desplazan hacia la derecha. Solo una tecla es válida, no hay prioridad por las teclas C3 y C4, al presionarse a la vez solo una de ellas tiene validez.

4.3.3 Regulador PI

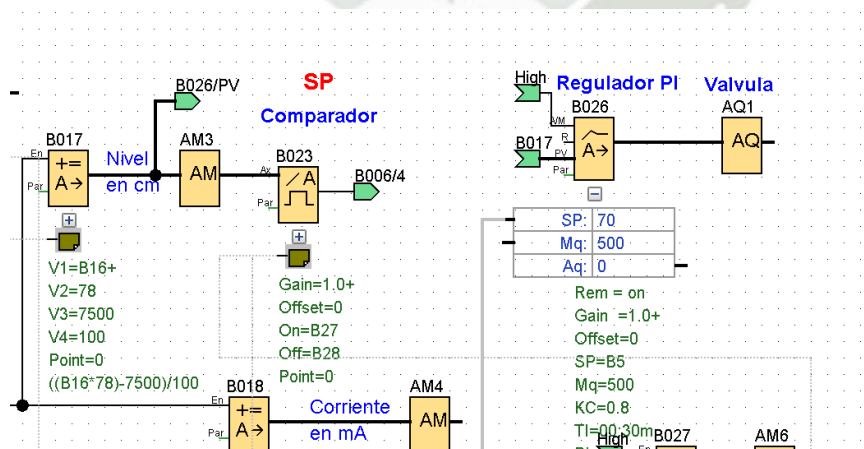


Figura 71 regulador PI

Fuente: Elaboración: propia

Los ajustes del regulador PI:

El regulador PI trae ya parámetros definidos para control de temperatura, presión y nivel. Para la presente tesis se optó por definir parámetros definidos por el usuario. Para este caso los ajustes realizados son de la constante proporcional $K_p = 0.8$ y la constante integral $K_i = 0.3$ tal como muestra en la figura 72.

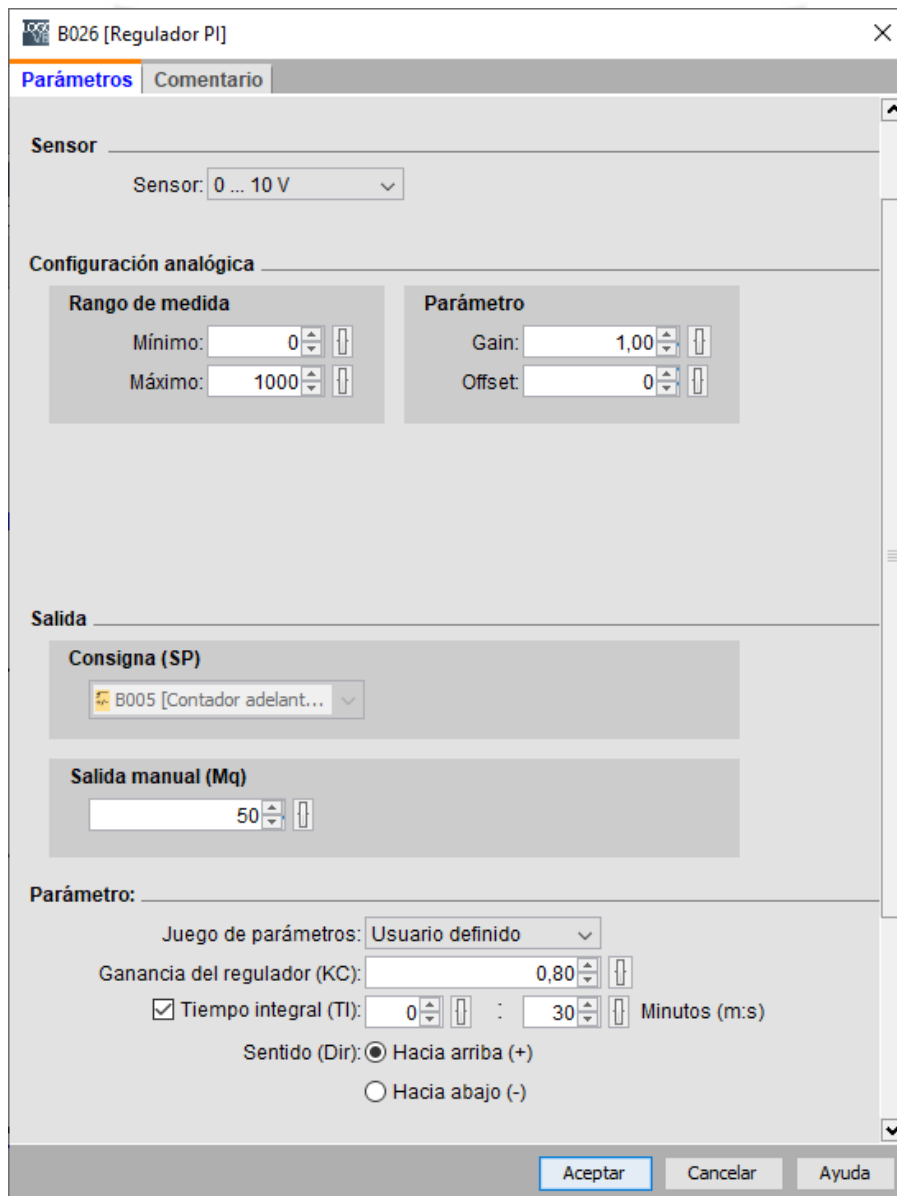


Figura 72 parámetros regulador PI

Fuente: Elaboración propia

4.4 Monitoreo de datos mediante Servidor WEB

La versión del PLC LOGO OBA8, posee un servidor Web integrado que permite el acceso remoto y el monitoreo de los datos vía Web. Esto quiere decir que el PLC LOGO posee una dirección física MAC y se debe asignar una dirección lógica IP para el control y monitoreo de datos de forma remota.



Figura 73. Sistema logo web.

Fuente: Elaboración propia.

Para habilitar el Servidor Web integrado se realiza en la configuración de los textos de avisos. La imagen siguiente muestra la activación

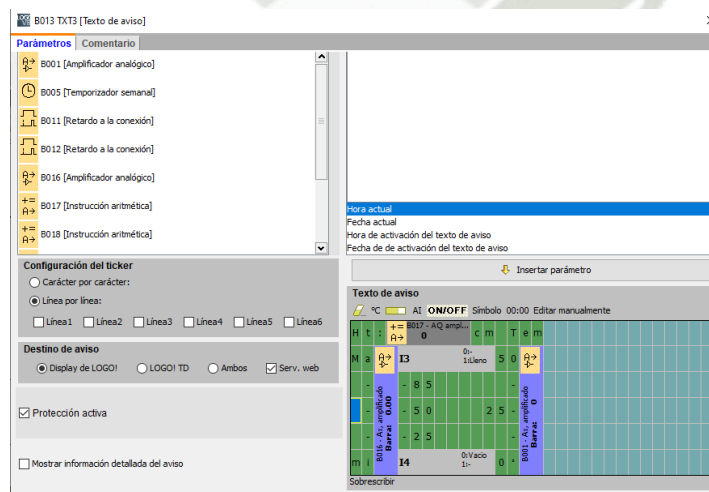


Figura 74. Habilitación del servidor logo web.

Fuente: Elaboración propia.

En proyecto de red agregamos un nuevo dispositivo:

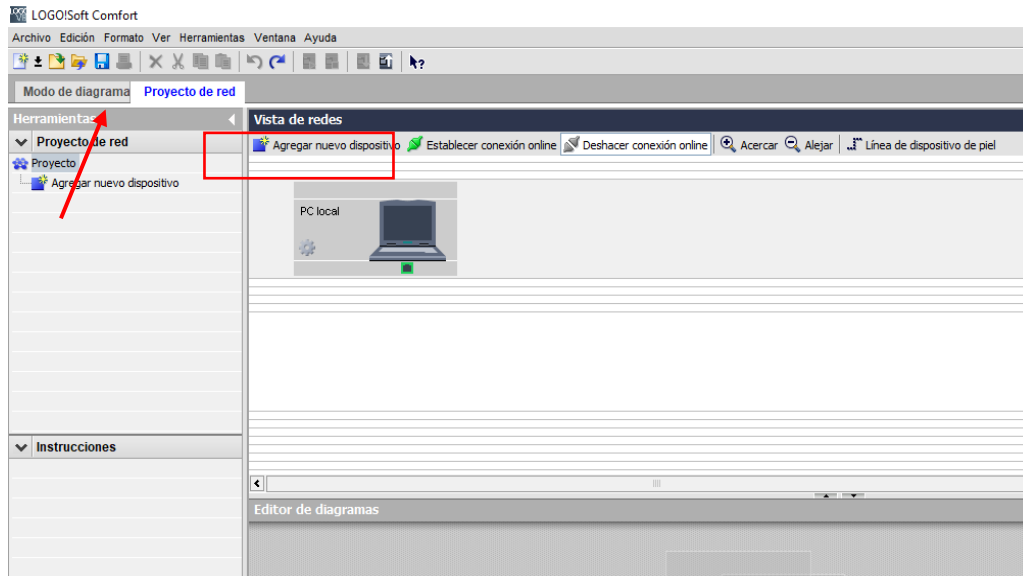


Figura 75. Proyecto de red.

Fuente: Elaboración propia.

Luego le asignamos la dirección IP, la máscara de red y la puerta de enlace del router.

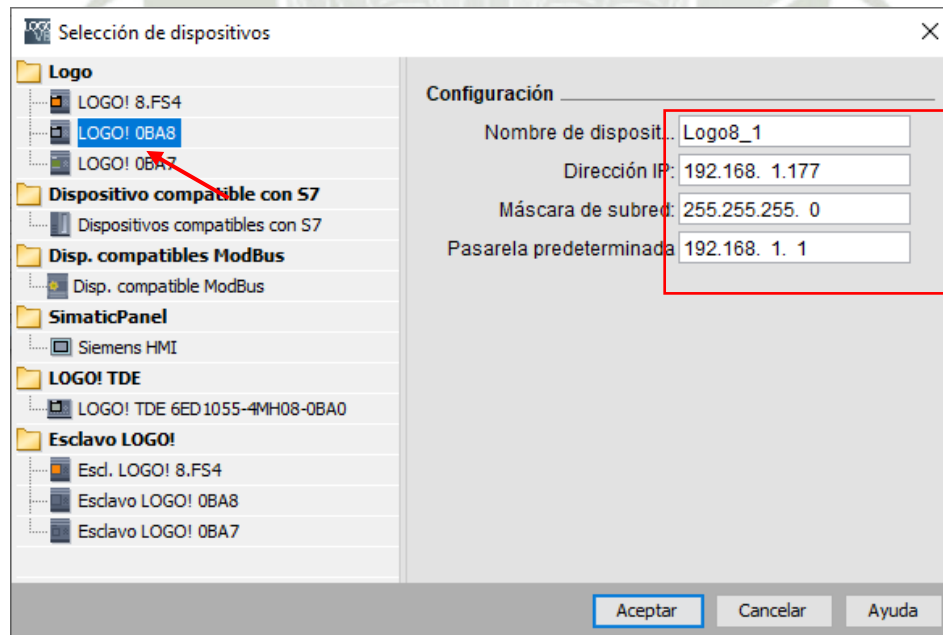


Figura 76. Configuración de la IP del PLC logo.

Fuente: Elaboración propia.

Luego se agregará el dispositivo LOGO y podemos empezamos a programar el PLC.

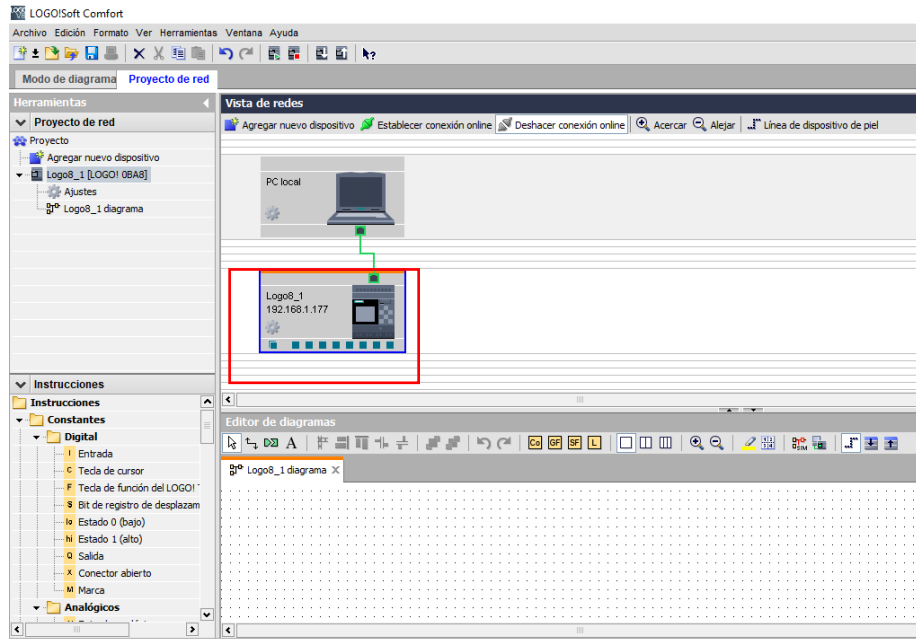


Figura 77 agregando un dispositivo nuevo.

Fuente: Elaboración propia.

Para acceder al PLC LOGO vía Web colocamos la dirección IP asignada y la clave de acceso e iniciamos sesión:

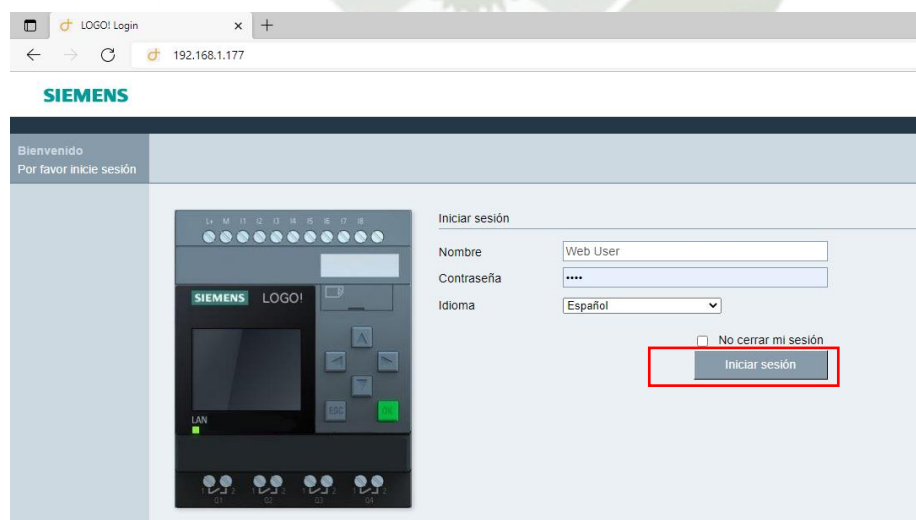


Figura 78. Acceso al servidor web vía página web.

Fuente: Elaboración propia.

Para acceder al control hacemos clic en LOGO BM (Base Maestra)

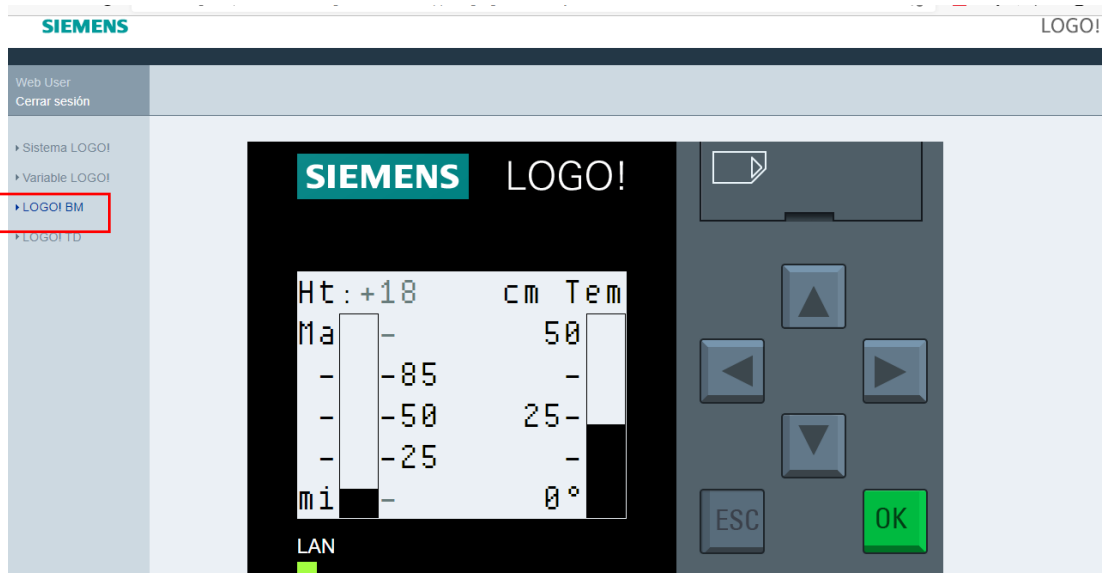


Figura 79 acceso al logo maestro.

Fuente: Elaboración propia

Para el ajuste del Set-poin presionamos la techa de la izquierda dos veces.

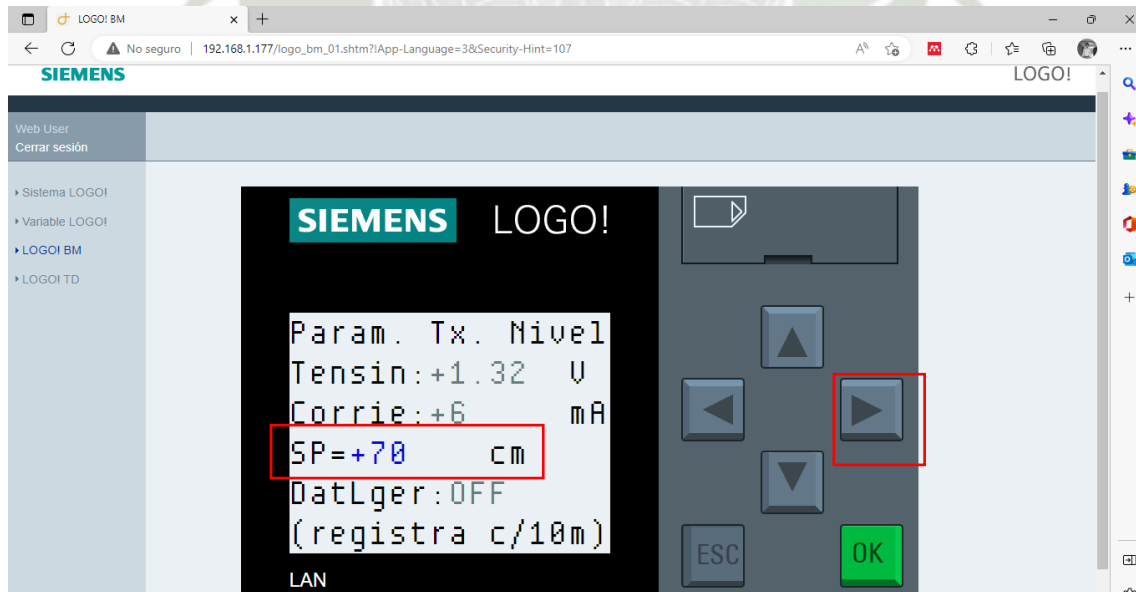


Figura 80 el punto de ajuste esta entre 20 y 90 cm de rango de escala.

Fuente: Elaboración propia

Para acceder al modo manual hacemos clic en la techa de la izquierda. Vemos que la valvula esta cerrado (Close)

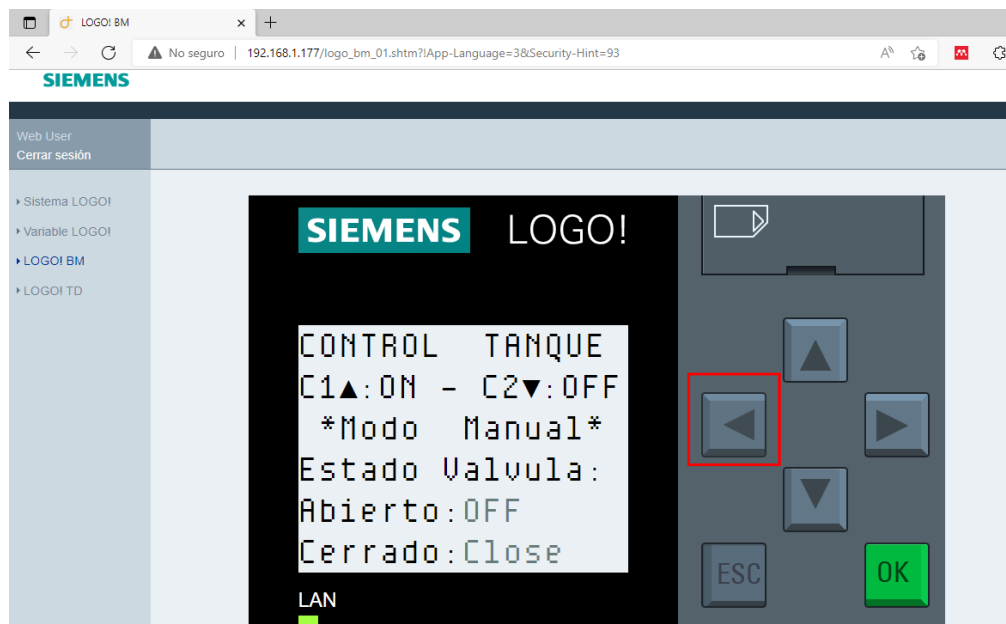


Figura 81 acceso al modo manual de control.

Fuente: Elaboración Propia

Para abrir la valvula hacemos clic en la techa arriba:

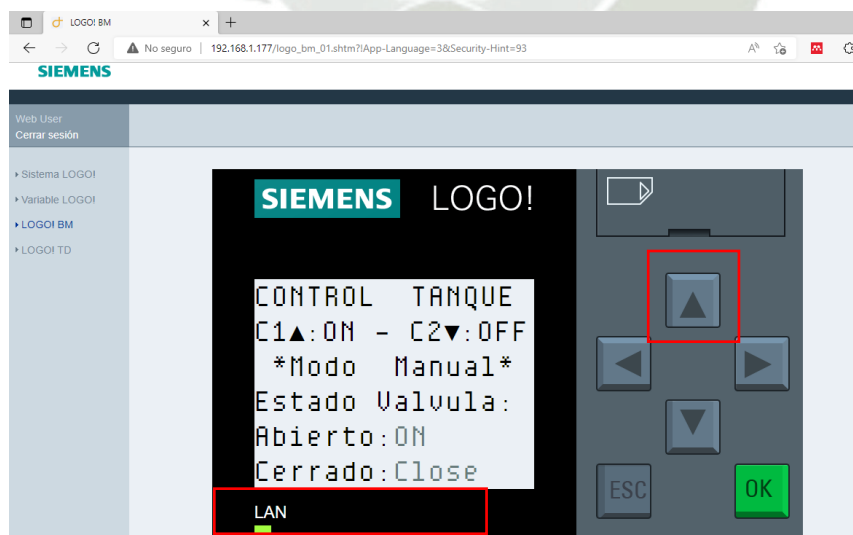


Figura 82 Apertura de la válvula.

Fuente: Elaboración propia.

Para cerrar la válvula hacemos clic en la techa abajo:

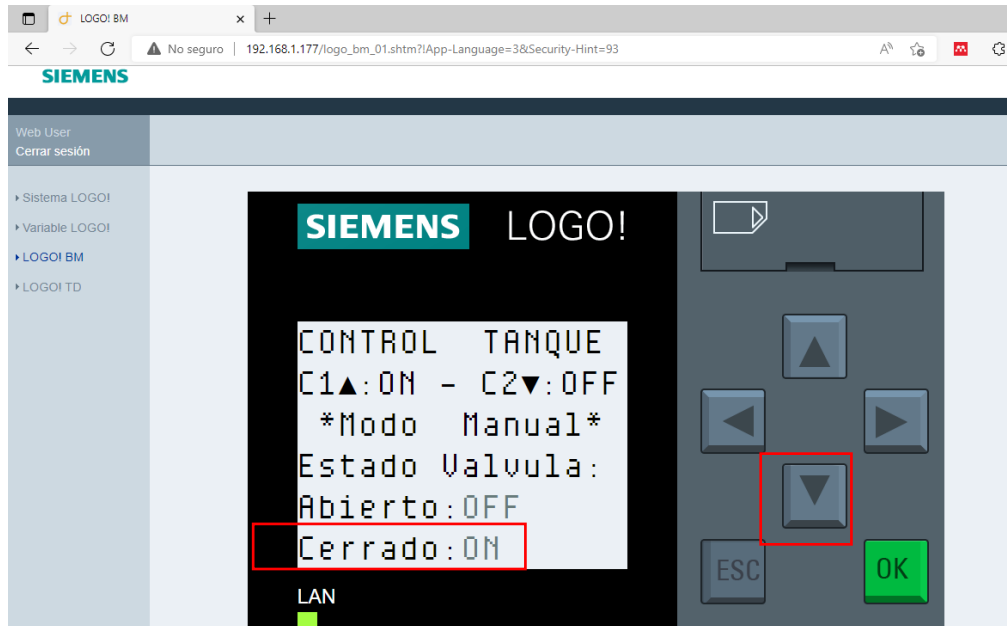


Figura 83. Cerrado de la válvula.

Fuente: Elaboración propia.

Las teclas de navegacion estan direccionadas como sigue:

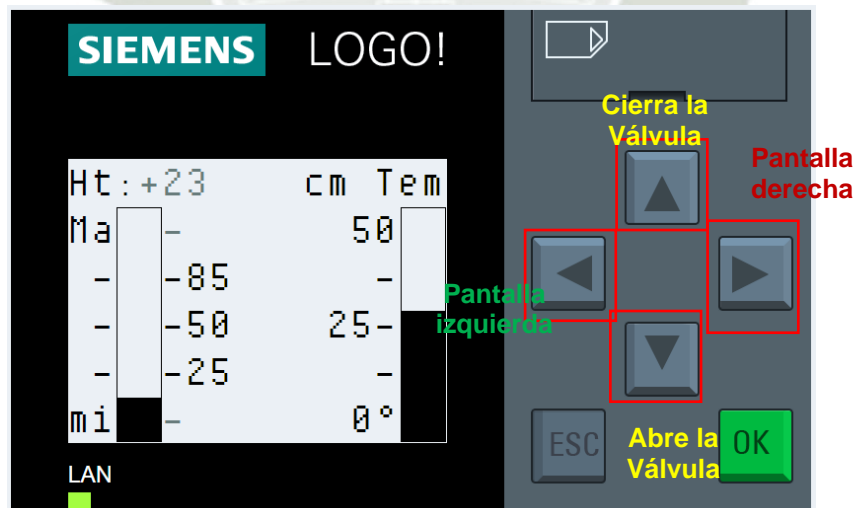


Figura 84. Direccionamiento de las techas de navegación.

Fuente: Elaboración propia.

4.5 Registro de datos del PLC LOGO

El LOGO registra datos digitales y analógicos provenientes de las I/O. Puede también registrar tiempo de temporizadores, la cuenta del contador, eventos, etc.

Para almacenar el programa, el PLC LOGO soporta únicamente tarjetas micro SD compatibles con el formato de archivo FAT32. Es posible almacenar programas y protegerlos contra copia (registrando o sin registrar los datos de proceso) del dispositivo LOGO! a una tarjeta microSD o bien copiar programas de la tarjeta al dispositivo LOGO!. El PLC LOGO! permite almacenar solo un programa en la memoria. Si desea modificar el programa o crear un programa adicional sin borrar el primero, debe guardarlo en otra parte.

El LOGO! copia el registro de datos en la tarjeta micro SD, lo guarda por defecto como archivo con formato .CSV, el cual se puede luego abrir desde la computadora. Cada línea del archivo .CSV incluye un sello de tiempo, el número del bloque de función y los valores reales registrados. Se le ha colocado al PLC una micro tarjeta SD de 2 GB de capacidad.

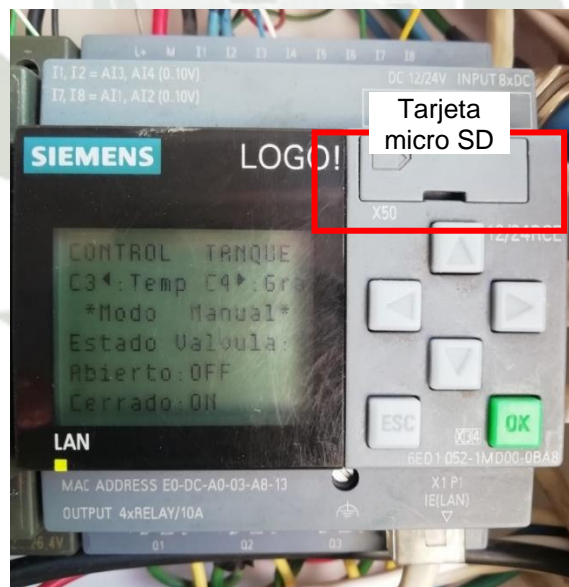


Figura 85 slot donde se coloca la memoria micro SD estándar.

Fuente: Elaboración propia

Para consultar los datos almacenados en la micro SD lo hacemos de la siguiente manera:

Herramientas >>Transferir >> Carga de registro de datos

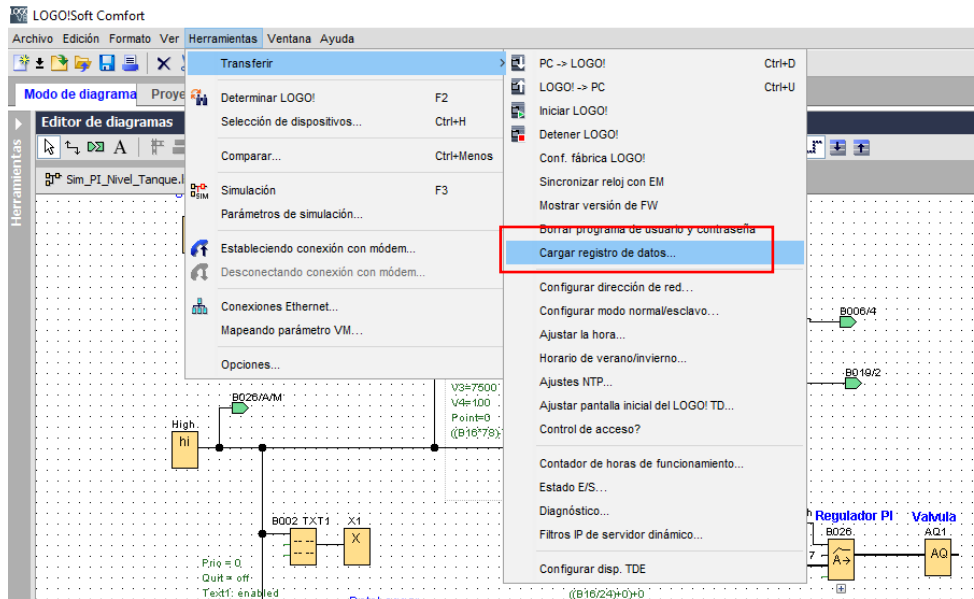


Figura 86 carga del registro de datos del PLC logo en archivo Excel.

Fuente: Elaboración propia.

Luego nos enlazamos vía ethernet al PLC:

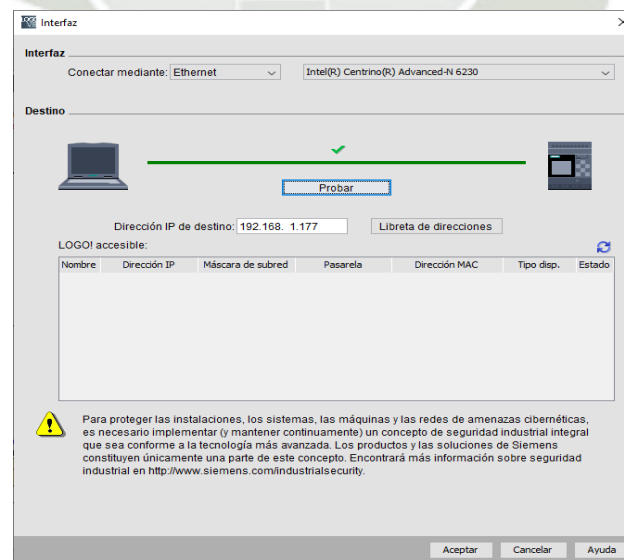


Figura 87. Interface PLC a computador.

Fuente: Elaboración propia.

Luego hacemos clic en cargar:

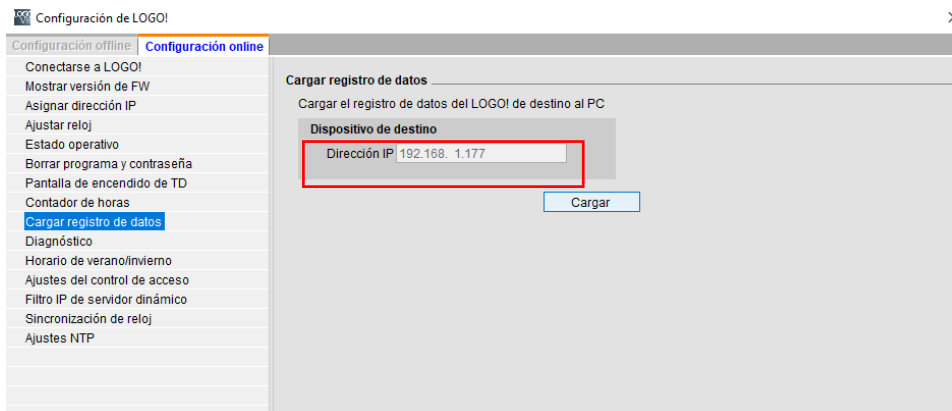


Figura 88 modo de configuración en línea para acceder al registro de datos.

Fuente: Elaboración propia.

Por defecto LogoSoft le asigna como nombre la IP seguido de la fecha y hora:

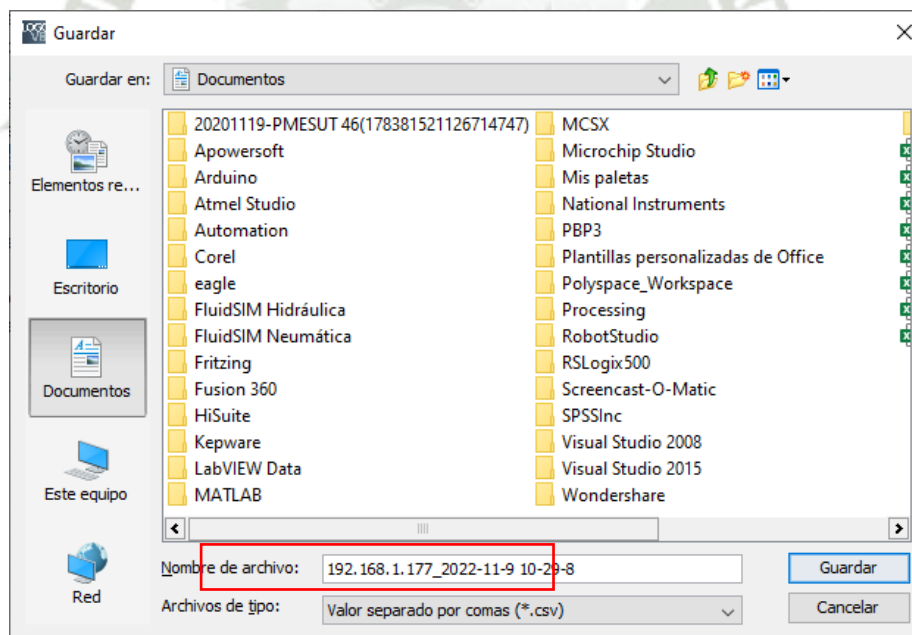


Figura 89. Nombre del archivo por defecto de extensión CVS.

Fuente: Elaboración propia.

Si la conexión es segura se nos cargara en el PC el último registro de datos creado de la tarjeta SD.

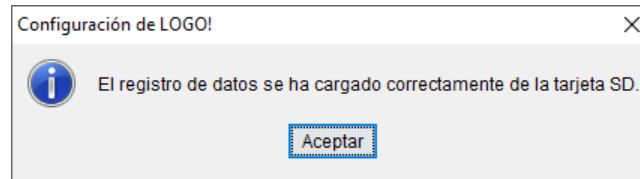


Figura 90. Validación de la descarga del registro de datos.

Fuente: Elaboración propia.

En el caso que se tuviera micro SD, se crea un registro de datos por programa y que este tendrá una capacidad máxima de 512 Bytes. Si usamos tarjeta microSD la capacidad es de 20000 líneas, cuando esta capacidad es excedida se genera un nuevo archivo, así hasta un máximo de 50 archivos.

4.6. Presentación de datos en Excel

La presentación consiste en importar el archivo .csv en Excel. En la imagen muestra que se han cargado 4551 filas de datos desde el 08-10-2022 hasta el 09-11-2022. Se programo el PLC para que registre datos cada 10 min.

Time	AM03	AM04	AI2	AM02	B001.Ax	AM01	H1	I2	J3	K4	L5	M6	N7	O8	P9	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6
2022-10-08 19:18:50	94	9	226	217	24	24	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2022-10-08 19:28:51	93	9	225	216	23	23	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2022-10-08 19:38:52	93	9	225	216	22	22	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2022-10-08 19:48:53	93	9	225	216	22	22	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2022-10-08 19:58:54	93	9	225	216	22	22	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2022-10-08 20:08:56	93	9	224	215	22	22	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2022-10-08 20:18:56	93	9	225	216	22	22	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2022-10-08 20:28:57	93	9	224	215	21	21	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2022-10-08 20:38:58	92	9	223	214	21	21	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2022-10-08 20:49:00	92	9	223	214	22	22	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2022-10-08 20:59:01	93	9	224	215	21	21	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2022-10-08 21:09:01	92	9	223	214	21	21	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2022-10-08 21:19:02	92	9	223	214	21	21	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2022-10-08 21:29:04	92	9	223	214	21	21	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2022-10-08 21:39:05	92	9	223	214	20	20	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2022-10-08 21:49:06	91	9	222	213	21	21	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2022-10-08 21:59:06	91	9	222	213	21	21	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2022-10-08 22:09:08	90	9	220	211	21	21	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2022-10-08 22:19:09	91	9	222	213	20	20	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2022-10-08 22:29:10	91	9	222	213	21	21	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 91. Base de datos en Excel.

Fuente: Elaboración propia

El limite de filas que puede registrar el PLC es de 20000, despues de alli genera un nuevo archivo .csv y continua grabando los datos.

La direccion AM03 (del PLC) corresponde al nivel de agua osmonizada en el tanque, mientras que AI2 corresponde a la temperatura en grados centigrados dentro del tanque.

I3 a I4 corresponde al estado de la valvula: I4 en “1” equivale a valvula cerrada, mientras que I3 en “1” equivale a valvula abierta.

La tendencia del nivel de agua osmonizada en el tanque respecto del tiempo se muestra en la 1ra y 2da columna de la tabla de datos:

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	Time	AM03	AM04	AI2	AM02	B001.Ax	AM01	I1	I2	I3	I4
2	2022-10-08 19:18:50	94	9	226	217	24	24	0	0	0	1
3	2022-10-08 19:28:51	93	9	225	216	23	23	0	0	0	1
4	2022-10-08 19:38:52	93	9	225	216	22	22	0	0	0	1
5	2022-10-08 19:48:53	93	9	225	216	22	22	0	0	0	1
6	2022-10-08 19:58:54	93	9	225	216	22	22	0	0	0	1
7	2022-10-08 20:08:56	93	9	224	215	22	22	0	0	0	1
8	2022-10-08 20:18:56	93	9	225	216	22	22	0	0	0	1
9	2022-10-08 20:28:57	93	9	224	215	21	21	0	0	0	1
10	2022-10-08 20:38:58	92	9	223	214	21	21	0	0	0	1
11	2022-10-08 20:49:00	92	9	223	214	22	22	0	0	0	1
12	2022-10-08 20:59:01	93	9	224	215	21	21	0	0	0	1
13	2022-10-08 21:09:01	92	9	223	214	21	21	0	0	0	1
14	2022-10-08 21:19:02	92	9	223	214	21	21	0	0	0	1
15	2022-10-08 21:29:04	92	9	223	214	21	21	0	0	0	1
16	2022-10-08 21:39:05	92	9	223	214	20	20	0	0	0	1

Figura 92. Representación de la fila de tiempo y el nivel de agua osmonizada en el tanque.

Fuente: Elaboración propia.

Graficando esta tendencia tenemos:



Figura 93. Gráfico del nivel de agua osmonizada vs tiempo.
Fuente: Elaboración propia.

La grafica anterior es sin control PI, es decir modo manual, en el caso de usar controlador PI con un set-point de 70 cm, la gráfica es la siguiente:

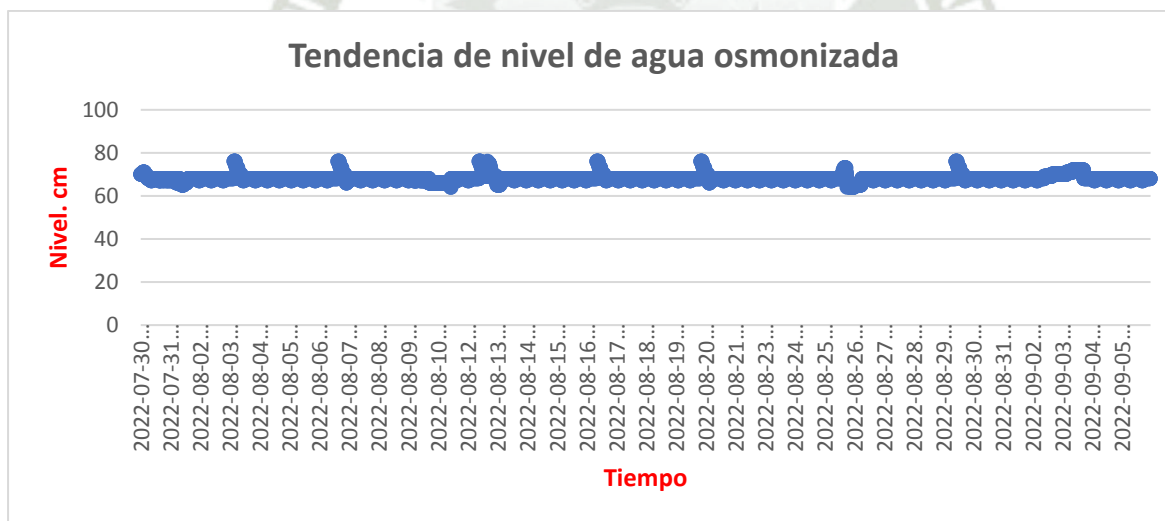


Figura 94. Gráfico del nivel de agua osmonizada vs el tiempo con PI.
Fuente: Elaboración propia

Se aprecia que, el nivel del agua osmonizada entra dentro del valor de 70 cm con pequeñas oscilaciones. En este sistema de nivel de agua, no se necesita precisión por lo que la respuesta dada es válida.

CAPÍTULO V. COSTOS Y PRESUPUESTOS

5.1 Costo de componentes y desarrollo del programa para el PLC.

COSTOS Y PRESUPUESTOS		
HARDWARE		
Componentes	Cantidad	Costos
PLC Logo 12/24 RCe OBA8	1	475.0
Fuente de poder LOGO Power, 24 V _{DC} , 1.25 A	1	320.0
Suministro de entradas analógicas	1	500.00
Válvula proporcional motorizada de 24 VDC	1	350.0
Transmisor de Nivel de agua	1	185.0
Detectores de Nivel de agua sin contacto	2	120.0
Sensor de temperatura resistivo PT100	1	40.0
Convertor de tensión a corriente para sensor de temperatura PT100	1	60.0
Interruptor Térmico 220 VAC, 10 A	1	50.0
Gabinete de distribución de PVC, capacidad para 6 llaves térmicas	1	65.0
Cables UTP categoría 6 para datos	30 metros	45.00
Caja de paso de 15x15x10 cm	1	10.0
Placa PBC de conexionado de sensores y actuadores	1	60.0
Otros imprevistos de instalación	1	100.0
Total, Nuevos Soles S/.		2380.0
SOFTWARE		
Licencia de Software LogoSoft Comfort versión 8.2	1	120.0
Programación y configuración del PLC LOGO 12/24 RCE	1	220.0
Total, Nuevos Soles S/.		340.0
TOTAL, TESIS Nuevos Soles S/.		2720.0

Tabla 9. Costos y presupuestos

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO VI

6.1. Resultados

a) Se logró tener un resultado satisfactorio del sistema de control de nivel propuesto y desarrollado en la tesis de acuerdo al diagrama de bloques general que se propuso (Remítase al ítem 3.4. Diagrama en bloques del control de nivel de tanque de agua osmonizada).

b) El día 18 de setiembre de 2022 se realizaron las pruebas antes, durante de la sanitización del anillo de circulación, teniendo como resultado satisfactorio como se muestra en los resultados físicoquímicos y bacteriológicos del agua medidos por la empresa “Interlabs” poniendo en evidencia que dicho sistema no afecto en nada el proceso de sanitización y no pondrá en riesgo a ningún paciente.

c) Las pruebas fueron monitoreadas y registradas en un formato por los diferentes técnicos de la planta de tratamiento de la clínica de enfermedades renales, siendo estas validadas por los médicos nefrólogos de turno. (Remítase en el Anexo X)

d) Se realizó el modelamiento matemático del control de nivel de agua osmonizada relacionado a un sistema de 1er orden tomándose como se aprecia en ítem (Remítase al ítem 3.6)

e) Se resume que el sistema planteado a un principio “Diseño, simulación, implementación y puesta en marcha” fue desarrollado y probado con éxito en una clínica de la ciudad de Arequipa para pacientes con enfermedades renales.

f) Se valida experimentalmente, durante el proceso de la ejecución de la tesis, la hipótesis de investigación H_i la cual se planteó inicialmente como una interrogante (Remítase al ítem 6.2)

g) El método de sintonía de Ziegler-Nichols nos proporciona un ajuste fino, debido a que se trabaja a valores extremos (críticos) es decir que por encima dichos valores empiezan tienen un margen de error del 20% ya que para este sistema no necesitamos que el margen de error este dentro de la frontera de inestabilidad.

h) El método de sintonía por software de Matlab necesita el modelo de la planta para evaluar los parámetros sintonizados del PI. Muchas veces no se tiene el modelo de la planta, por lo que en estos casos se utiliza la función de transferencia de primer orden más retraso.

i) Los parámetros calibrados o sintonizados del controlador PI no son únicos, como se demostró en la presente tesis. Se calculó los parámetros mediante el software de Matlab y mediante el diseño de Ziegler-Nichols.

j) Para realizar un ajuste fino, podemos sintetizar que para una buena sintonización es necesario considerar:

- Selección del algoritmo de control PI apropiado (P, PI).
- Ajuste de ganancia.
- Ajuste Fino

Para el ajuste fino primero necesitamos ajustar nuestra parte proporcional del sistema, teniendo como resulta el error ya establecido procedemos a ajustar la parte integral del sistema.

6.2. Curvas Reales obtenidas en la implementación

- Curva real obtenida con set-point 93

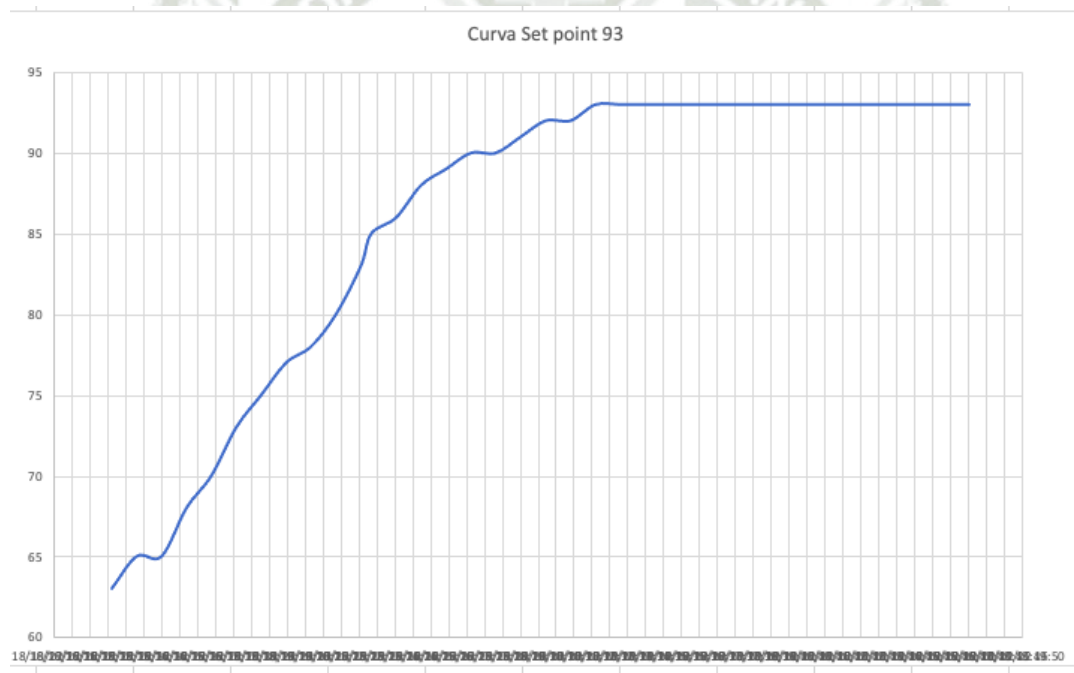


Figura 95 Curva set point 93

Fuente: Elaboración propia

- Curva real obtenida con set-point 73

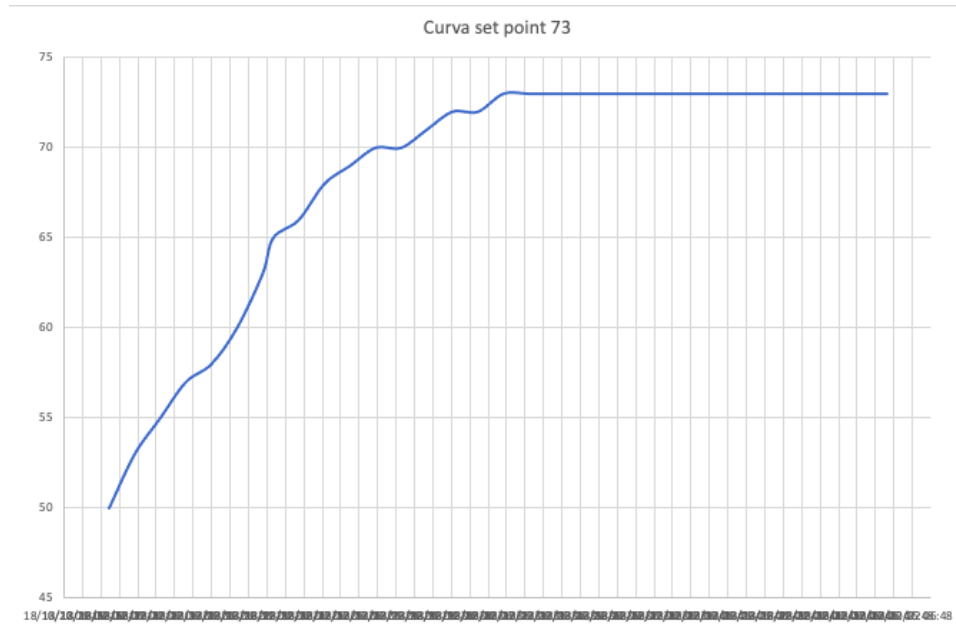


Figura 96 Curva set-point 73
Fuente: Elaboración propia

- Curva real obtenida con set-point 50

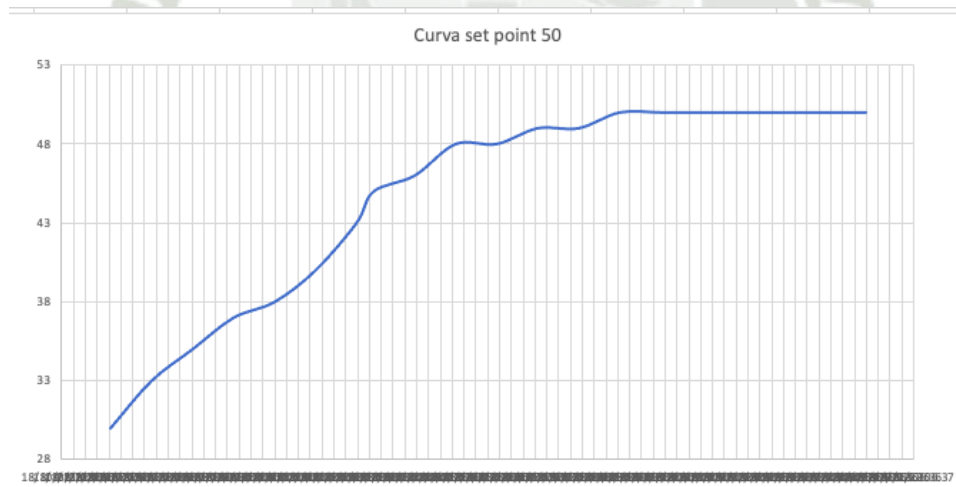


Figura 97 Curva set- point 50
Fuente: Elaboración propia

6.3. Accionamiento de la válvula proporcional.

- Válvula proporcional Abierta al 20%



Figura 98 válvula proporcional al 20%
fuente: Elaboración propia

- Válvula proporcional al 40%



Figura 99 válvula proporcional al 40%
Fuente: Elaboración propia

- Válvula proporcional al 75%



Figura 100 válvula proporcional al 75%

Fuente: Elaboración propia.

CONCLUSIONES

1. Se realizó el diseño, la simulación y la implementación del control PI del nivel en un tanque de agua osmonizada en una clínica de Arequipa para personas con insuficiencia renal crónica que requieren el tratamiento de hemodiálisis.

2. Se efectuó el planteamiento teórico de control relacionado al diseño de control de nivel aplicado a un tanque de agua osmonizada en una planta de tratamiento de hemodiálisis.

3. Se realizó la simulación, se logró comprender mejor la programación del sistema mediante el simulador del programa LogoSoft Comfort y cómo realizar el control PI del nivel de agua osmonizada mediante prueba de campo. antes de transferir el programa al PLC.

4. Se elaboró un sistema de control de nivel de tanque en lazo cerrado, seleccionando adecuadamente cada uno de los componentes para la medición y control de nivel de lazo cerrado aplicando la técnica de control PI mediante PLC.

5. Se monitoreo el valor de la temperatura en °C del agua osmonizada en el tanque, ya que si la temperatura tiende a elevarse produciría un aumento de la conductividad afectando notablemente en la producción de agua para el tratamiento ya que si esta tiende a subir podría formar microorganismos que contaminarían todo el sistema de agua osmonizada afectando directamente al paciente.

6. Se realizó pruebas de tiempo de vaciado aproximadamente 1 hora y 15 minutos y llenado del tanque de agua osmonizada en 1 hora y 45 minutos esto solo es aplicado dos veces al mes ya que es parcialmente para la sanitización del anillo de agua osmonizada.

7. Se logró configurar el servidor Web del PLC para el monitoreo de los datos del tanque de agua osmonizada vía página web para facilitar la supervisión del director médico o administrador de la clínica donde fue realizada la tesis.

RECOMENDACIONES

1. Se recomienda agregar al proceso de nivel debe integrarse a futuro en un sistema SCADA para monitoreo y control.
2. Se recomienda para la planta de pre-tratamiento, medir las variables pH, conductividad, dureza, cloro, presión y temperatura para un óptimo desempeño de la planta y calidad del agua.
3. Se recomienda la implementación del sistema realizado en el pozo de agua potable instalada en la clínica para evitar inundaciones afectando las bombas de agua dura y tableros: afectando notablemente el tratamiento de pacientes por falta de agua potable.
4. Se sugiere implementar un plan de contingencia contra inundaciones, para no afectar el tratamiento de pacientes.
5. Se sugiere implementar un sistema de protección para exceso de nivel con aviso sonoro y bombas sumergibles.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Alatiqi, A. H. Ghabris y S. Ebrahim (1989). “System Identification and Control of Reverse Osmosis desalination”
- Alfaro, V (2002). “Ecuaciones para controladores PID Universales”, *Ingeniería: Revista de la Universidad de Costa Rica*, Vol. 12, No. 1-2, diciembre, 2002.
- Alpi, L. (2019). Artículo Control PID: Rompiendo la barrera del tiempo.
- Bishop (2005). *Sistemas de Control Moderno*. Décima edición. Pearson Educación, S.A. Madrid, España, 2005.
- Fresenius Medical Care (2016). *Manual de sistema de tratamiento de agua por osmosis inversa para hemodiálisis*.
- Galón, V., y Hernán J. (1997) Introducción a los Sistemas Automáticos de Control. *Segunda edición*. Editorial Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia, pp. 281, 1997.
- García, Y. y Lobo, I. (2009). Controlador PID integrado por la estructura de control de modelo interno (IMC) y lógica difusa. *Artículo de Investigación Revista Ciencia e Ingeniería*, Vol. 30, No. 1, pp. 29-40.
- Guías y documentos de consenso. (2006). Tratado de hemodiálisis. *Manual de sistema de tratamiento de agua por osmosis inversa para hemodiálisis, 2da ed.* https://www.novusautomation.com/site/default.asp?Idioma=34&TroncoID=053663&SecaoID=0&SubsecaoID=0&Template=../artigosnoticias/user_exibir.asp&ID=638091#
- Jerez, J y Dulhoste, F. (2005). Comparación entre las técnicas de control tradicional y las de control no lineal para la regulación del nivel de agua en un canal abierto. *Revista Ciencia e Ingeniería*. Vol. 26 No. 1. Mérida, Venezuela.
- Kuo (2006). *Sistemas de Control Automático*. Séptima edición. Prentice Hall, México, 1996.
- Moreno, R. (2001). Ingeniería de la Automatización Industrial. *Alfa Omega Grupo Editor, S. A. de C.V. México*, pp. 152, 153, 2001.
- Ogata, K. (2010). Ingeniería de Control Moderna. *Prentice-Hall Hispanoamericana S.A., México*, 5(1). pp. 92-96, 669-674, 2010.
- García. Pérez (2014). Instrumentación electrónica., *escuela politécnica de ingeniería de Gijón, España*.

Pérez, P. (2012): Uso de la IEC 1131-7 para el control de plantas industriales 79 - 168: Control clásico aplicado a la planta. Capítulo 4 Control Borroso Industrial [Online]. <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/12070/fichero/4.+CAP%C3%8DTULO+4.pdf>.

Toro (2020). *Automatización y modernización al sistema de sanitización de la planta de tratamiento de agua de la unidad de hemodiálisis hospital C.A.S.E. Essalud*. [Tesis de título profesional de ingeniería electrónica]. Universidad Católica de Santa María.



ANEXOS

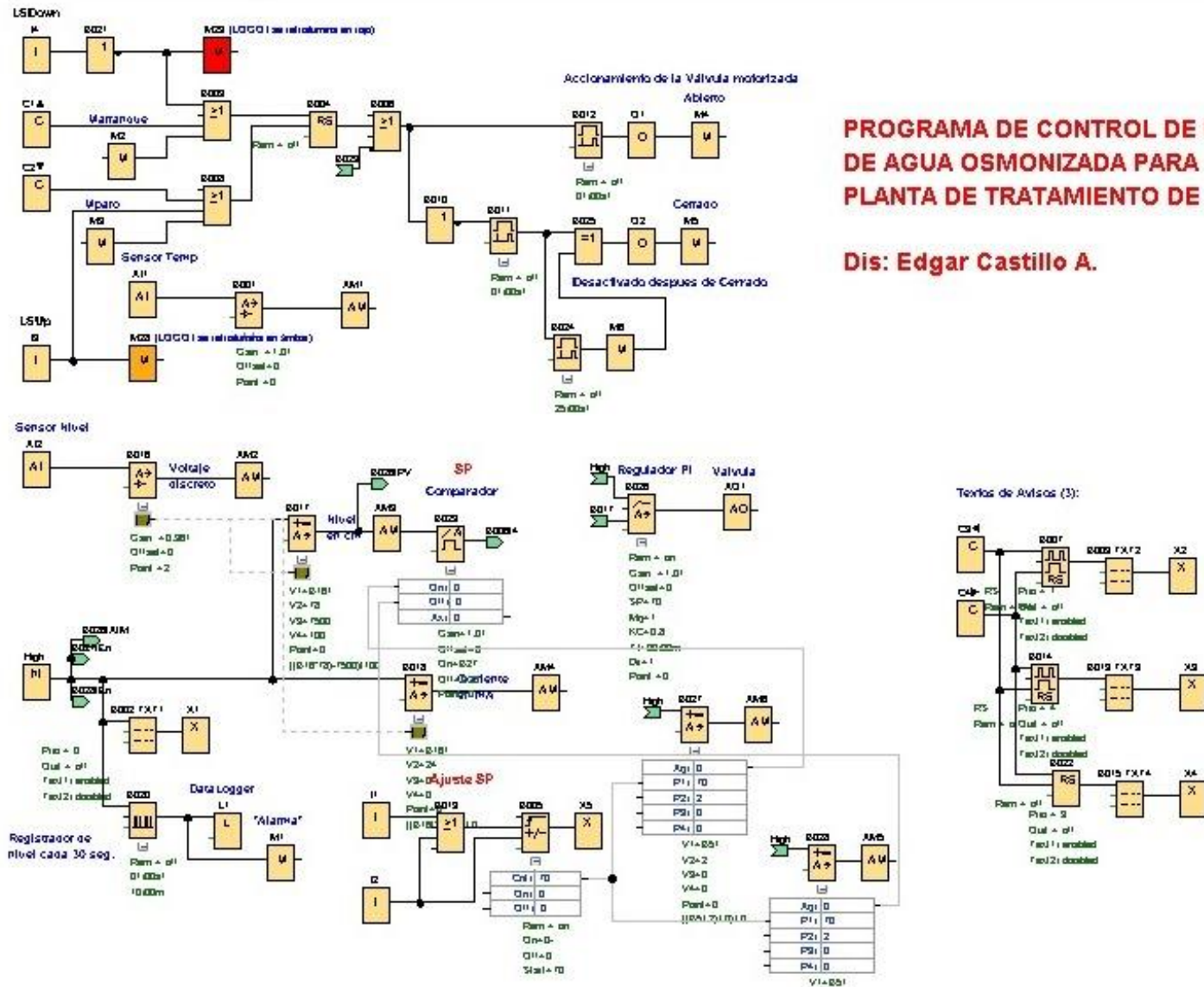
Anexo I: Alarma de la pantalla LCD en color amarillo que indica que el tanque está lleno



Anexo II: Nivel de agua osmonizada a 1.03 m de altura con 20 °C



Anexo III: Programa del control de nivel de agua osmonizada del PLC LOGO



**PROGRAMA DE CONTROL DE NIVEL
DE AGUA OSMONIZADA PARA
PLANTA DE TRATAMIENTO DE HEMODIALISIS**

Dis: Edgar Castillo A.

Anexo IV: Imagen del tanque de almacenamiento de agua tratada de la Clínica de Salud.

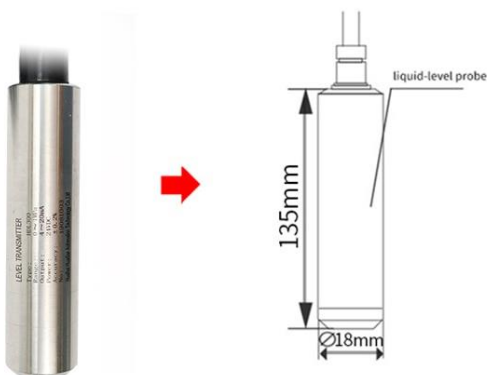


Anexo V: Sistema de producción de agua tratada de la Clínica de Salud.



Anexo VI: Características del transductor de nivel de agua modelo HDL 300

Product Size



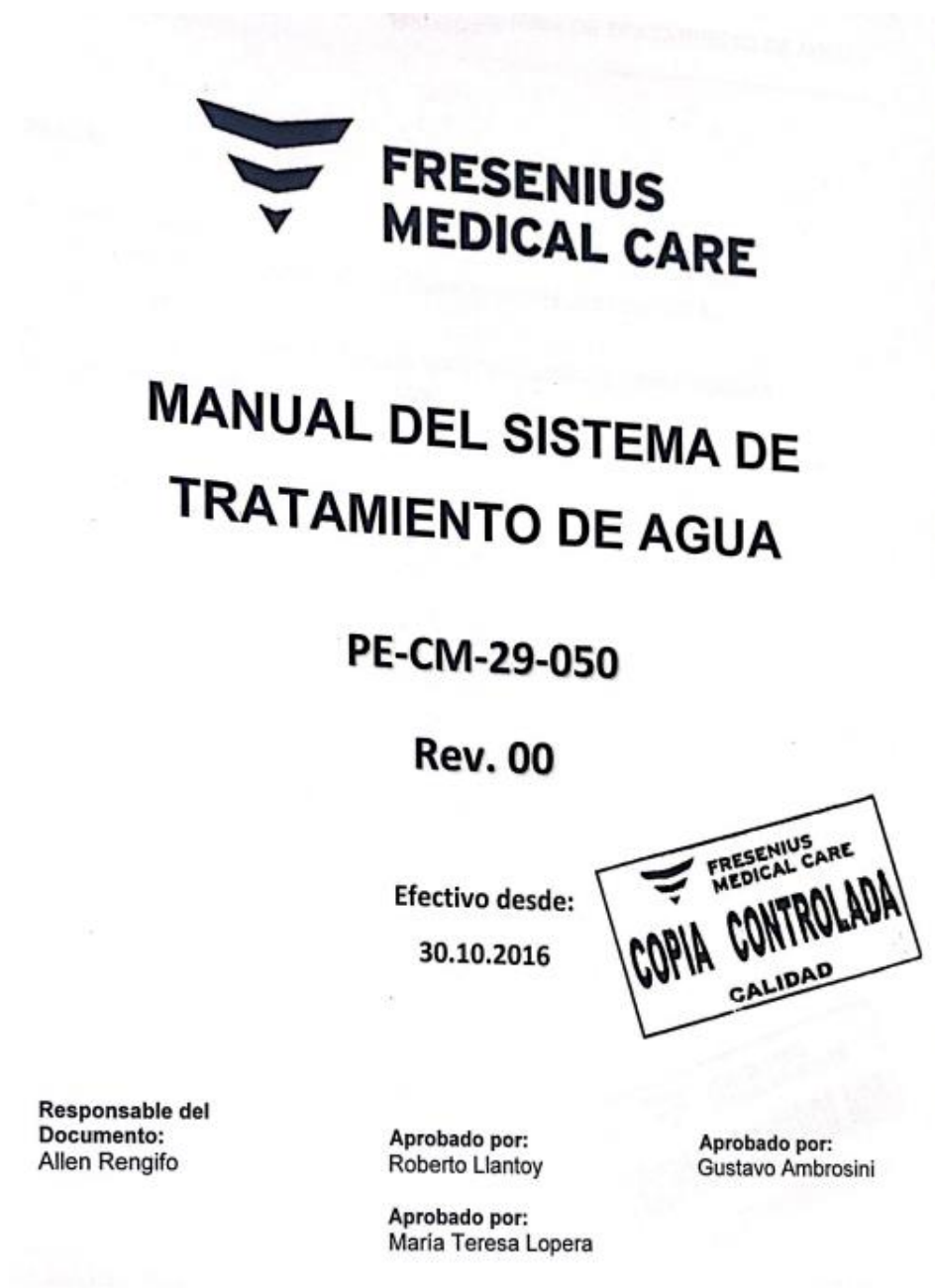
Mainly technical parameters

Model	HDL300
Power supply	3-5VDC、12-36VDC (standard)
Output single	4~20mA、1~5V、0~10V、RS485
Measuring range	0.5... 500 metre
Compensation temperature	-10~70°C
Medium temperature	-40~80°C
Environment temperature	-40~85°C
Measuring media	Liquid、Water
Accuracy	0.1%F.S、0.25%F.S (standard)
Zero tempe drift	±0.03%F.S/°C
Sensitivity temperature drift	±0.03%F.S/°C
Material	316L core&Rubber breathable cable
Overload	200%F.S
Long-term stability	≤0.2%F.S/year
Inherent frequency	5kHz~650kHz
Protection grade	IP68

Selection Table

Product Series	
HDL300	
Measuring range	
Selection between 0-500 meters	
Accuracy Level	
E1:0.1%F.S、E2:0.25%F.S (standard)	
Power Supply Mode	
D1:12-36VDC、D2:3V-5VDC	
Signal Output	
F1: 4~20mA (2-wire) 、F2: 0-5V (3-wire) F3: 0-10V (3-wire) 、F4: RS485 (4-wire) F5: Others	
HDL300 - 5m - E1 - D1 - F1 Eg: HDL300 -5m - E1 - D1 - F1	

Anexo VII: Manual del sistema de tratamiento de agua.



Anexo VIII: Ensayo químico de Agua.



INFORME DE ENSAYO N° Q-2209-0307-001N

Orden de Trabajo : OT-CCM2209-0307
 Cliente : CLINICA DE ENFERMEDADES RENALES Y DIÁLISIS DEL SUR S.A.C. - CLERDISUR S.A.C.
 Domicilio Legal : CAL MANUEL UGARTECHE NRO. 514 URB. SELVA ALEGRE AREQUIPA - AREQUIPA - AREQUIPA
 Procedencia de las muestras : CAL MANUEL UGARTECHE NRO. 514 URB. SELVA ALEGRE AREQUIPA - AREQUIPA - AREQUIPA
 Servicio Solicitado : Ensayo Químico
 Producto Declarado : AGUA PURIFICADA - AGUA DE PROCESO
 Número de Muestras : 01
 Identificación / marca : OSMOSIS INVERSA – SALIDA / Proporcionada por el solicitante
 Presentación / Cantidad : Envase de plástico / 350.0 ml. Aprox.
 Lugar y fecha de recepción : Laboratorio, 02 de Octubre de 2022
 Condición de las muestras : Buen estado, refrigerada y preservada
 Fecha de Inicio de Ensayos : 02 de Octubre de 2022
 Fecha de Término de Ensayos : 03 de Octubre de 2022

MUESTRAS	RESULTADOS					
	SODIO TOTAL		POTASIO TOTAL		CLORAMINAS	
	RESULTADO	VALOR DE REFERENCIA	RESULTADO	VALOR DE REFERENCIA	RESULTADO	VALOR DE REFERENCIA
OSMOSIS INVERSA – SALIDA 2209-0307-001	0.306 mg/L	<50.0000 mg/L	< 0.009 mg/L	<0.0030 mg/L	< 0.01 mg/L	<0.1000 mg/L

DETERMINACIONES	MÉTODOS DE ENSAYO
Sodio Total	SMENW-APHA-APHA-MEF Part 3020 B, 3125 B, 23rd Ed. 2017. Preliminary Treatment of Sample. Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry (ICP-MS) Method
Cloraminas	SMENW-APHA-APHA-MEF Part 4020 C, G, DPD Colorimetric Method, 23rd Ed. 2017
Potasio Total	SMENW-APHA-APHA-MEF Part 3020 B, 3125 B, 23rd Ed. 2017 ICP MS

Observaciones:
Ninguna.



Emitido en Lima, el 21 de Octubre de 2022

Av. San Diego De Alcalá Mz. W2 Lote. 01 Urb. San Diego Vgld - San Martín de Porres

FLM-004
Versión: 00
F.E.: Octubre 2022

Los ensayos se han realizado bajo responsabilidad de InterLabs S.A.C. Los resultados no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce. Queda prohibido la reproducción total o parcial de este informe, sin la autorización escrita de InterLabs S.A.C. y para todo efecto su originalidad se encuentra en un soporte electrónico en

Anexo IX: Ensayo microbiológico.

InterLabs
INTERNATIONAL LABORATORIES S.A.C.

LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL
ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACION INACAL - DA
CON REGISTRO N° LE-069

INACAL
DA - Perú
Laboratorio de
Acreditación
Regimen N° 12-001

INFORME DE ENSAYO N° M-2209-0307-001

<p>Orden de Trabajo : OT-CCM2208-0307 Cliente : CLINICA DE ENFERMEDADES RENALES Y DIALISIS DEL SUR S.A.C. - CLERDISUR S.A.C. Domicilio Fiscal : CALMANUEL UGARTECHE NRO. 514 URB. SELVA ALEGRE AREQUIPA - AREQUIPA - AREQUIPA Procedencia de las muestras : CALMANUEL UGARTECHE NRO. 514 URB. SELVA ALEGRE AREQUIPA - AREQUIPA - AREQUIPA Servicio Solicitado : Ensayos Microbiológicos Producto Declarado : AGUA PURIFICADA Número de Muestras : 04 Identificación / marca : Proporcionada por el cliente Presentación / Cantidad : En frasco de vidrio / 500.0ml Aprox c/u Lugar y fecha de recepción : Laboratorio, 30 de Septiembre de 2022 Condición de las muestras : Buen estado, refrigeradas Fecha de Inicio de Ensayos : 02 de Octubre de 2022 Fecha de término de Ensayos : 09 de Octubre de 2022</p>
--

MUESTRAS	RESULTADOS
	Numeración de Heterótotas
OSMOSIS INVERSA - SALIDA 2209-0307-002	9 Est. UFC/ml
RETORNO DE ANILLO RECIRCULACION HD (PRE DESINFECCION) 2209-0307-003	10 Est. UFC/ml
RETORNO DE ANILLO RECIRCULACION CEBADO (PRE DESINFECCION) 2209-0307-004	8 Est. UFC/ml
LIQUIDO DE DIALISIS DE MAQUINA HD N° 15 2209-0307-006	2 Est. UFC/ml

DETERMINACIONES	MÉTODOS DE ENSAYO
Numeración de Heterótotas	ISO 4853:2006/ISO 4853 B: 2017. Método de placa serial. Pour plate method.

Est.: Estimado

Observaciones:

Método utilizado: Vertido en placa, incubación entre 20-28°C por 7 días, medio de cultivo utilizado R2A agar.



Emisión en Lima, el 13 de Octubre de 2022.

FLM-004
Versión: 01
F.E.: Marzo 2022

Calle C. Mz. C Lt. 1 – Corp. Virgen de Guadalupe – Los Olivos

08/11/2022 07:05 p. m

Anexo X: Características del módulo salida analógica


SIEMENS

Hoja de datos

6ED1055-1MM00-0BA2



Módulo de ampliación LOGO! AM2 AO, alimentación: DC 24V, 2 A0, 0-10V, 0/4-20 mA para LOGO! 8

Diseño/montaje	
Montaje	sobre perfil normalizado de 35 mm, 2 módulos de ancho
Tensión de alimentación	
Valor nominal (DC)	24 V
Salidas analógicas	
Nº de salidas analógicas	2
Rangos de salida, tensión	
• 0 a 10 V	SI
Rangos de salida, intensidad	
• 0 a 20 mA	SI
• 4 mA a 20 mA	SI
CEM	
Emisión de radiofrecuencias según EN 55 011	
• Clase de límite B, para aplicación en el ámbito residencial	SI
Grado de protección y clase de protección	
Grado de protección IP	IP20
Normas, homologaciones, certificados	
Markado CE	SI
Homologación CSA	SI
Homologación UL	SI
Homologación FM	SI
desarrollado conforme a IEC 61131	SI
según VDE 0831	SI
Homologaciones navales	SI
Condiciones ambientales	
Temperatura ambiente en servicio	
• mín.	0 °C; A partir de E503: -20 °C
• máx.	55 °C
Dimensiones	
Ancho	35,5 mm
Altura	90 mm
Profundidad	58 mm
Última modificación:	12/3/2021 

Anexo XI: Formato de registro de nivel y temperatura.

CLINICA DE ENFERMEDADES RENALES						
Control de funcionamiento de nivel de tanque de Agua osmonizada						
Fecha	Hora	Nivel de tanque	Temperatura	Nombre encargado	Firma y sello técnico	Medico de turno
21/09/2022	12:00	70%	17°C	Nehemias Martinez	CLERDISUR S.A.C. <i>[Signature]</i>	CLERDISUR S.A.C. <i>[Signature]</i>
21/09/2022	14:00	75%	17°C	Jesús Meza V	Nehemias Martinez Tapia CLERDISUR S.A.C. <i>[Signature]</i>	Carlos Alberto Fuentes Haces CLERDISUR S.A.C. C.M.P. 070917 - R.N.E. 047077
22/09/2022	06:00	90%	17°C	Edger Castillo	Edger Meza Villafuerte CLERDISUR S.A.C. <i>[Signature]</i>	CLERDISUR S.A.C. C.M.P. 075624 - R.N.E. 77781
22/09/2022	12:00	75%	17°C	Edger Castillo	Edger Castillo Amado CLERDISUR S.A.C. <i>[Signature]</i>	María Teresa Meza Aragón MEDICO NEFRÓLOGO CLERDISUR S.A.C.
22/09/2022	19:00	75%	17°C	Jesús Zela	Edgar Castillo Amado Técnico de Máquina CLERDISUR S.A.C. Jesús Zela Flores CLERDISUR S.A.C.	María Teresa Meza Aragón MEDICO NEFRÓLOGO C.M.P. 31911 - R.N.E. 15234
23/09/2022	06:00	85%	17°C	Jesús Zela	Jesús Zela Flores CLERDISUR S.A.C. <i>[Signature]</i>	Rocio Paola Lajo Valle CLERDISUR S.A.C. C.M.P. 075760 - R.N.E. 040554
23/09/2022	12:00	90%	17°C	Jesús Zela	Jesús Zela Flores CLERDISUR S.A.C. <i>[Signature]</i>	Rocio Paola Lajo Valle MEDICO NEFRÓLOGO C.M.P. 075760 - R.N.E. 040554
23/09/2022	18:00	75%	17°C	Nehemias Martinez	Nehemias Martinez Tapia Técnico de Máquina CLERDISUR S.A.C. <i>[Signature]</i>	Sidney Borda MEDICO NEFRÓLOGO C.M.P. 075760 - R.N.E. 26781

CLERDISUR S.A.C.
[Signature]
Jesús Zela Flores
TÉCNICO DE MANTENIMIENTO



CLINICA DE ENFERMEDADES RENALES						
Control de funcionamiento de nivel de tanque de Agua osmonizada						
Fecha	Hora	Nivel de tanque	Temperatura	Nombre encargado	Firma y sello técnico	Medico de Turno
18/09/2022	12:00	70%	19°C	Edger Castillo	 Edger Castillo Amado Técnico de Máquinas CLERDISUR S.A.C.	 María Teresa Meza Aragón Médico Nefrólogo CLERDISUR S.A.C.
19/09/2022	6:00	90%	15°C	Jesus Meza V	 Jesus Meza Villafuerte Técnico de Máquinas CLERDISUR S.A.C.	 Carlos Alberto Fuentes Llanos Médico Nefrólogo CLERDISUR S.A.C.
19/09/2022	10:00	75%	17°C	Jesus Meza V.	 Jesus Meza Villafuerte Técnico de Máquinas CLERDISUR S.A.C.	 Carlos Alberto Fuentes Llanos Médico Nefrólogo CLERDISUR S.A.C.
19/09/2022	18:30	75%	18°C	Bryan Salinas	 Bryan Salinas Sandoval Técnico de Máquinas CLERDISUR S.A.C.	 Carlos Alberto Fuentes Llanos Médico Nefrólogo CLERDISUR S.A.C.
20/09/2022	06:00	90%	15°C	Jesus Zela	 Jesus Zela Flores Técnico de Máquinas CLERDISUR S.A.C.	 Sidney Arteta Borda Médico Nefrólogo CLERDISUR S.A.C.
20/09/2022	12:00	75%	17°C	Jesus Zela	 Jesus Zela Flores Técnico de Máquinas CLERDISUR S.A.C.	 Sidney Arteta Borda Médico Nefrólogo CLERDISUR S.A.C.
20/09/2022	19:00	70%	17°C	Edger Castillo	 Edger Castillo Amado Técnico de Máquinas CLERDISUR S.A.C.	 María Teresa Meza Aragón Médico Nefrólogo CLERDISUR S.A.C.
21/09/2022	6:00	90%	17°C	Nehemias Martines	 Nehemias Martines Tapia Técnico de Máquinas CLERDISUR S.A.C.	 Carlos Alberto Fuentes Llanos Médico Nefrólogo CLERDISUR S.A.C.

CLERDISUR S.A.C.

Jesus Zela Flores
TÉCNICO DE MÁQUINAS