

# Diseño de un sistema de control para el tratamiento de aguas de enfriamiento de un formador de azufre

*Design of a control system for the treatment of cooling water from a sulfur former*

*Projeto de um sistema de controle para tratamento de água de resfriamento proveniente de um formador de enxofre*

Urimare Campos<sup>1</sup>, Yordi González-Rondón<sup>2(\*)</sup>

Recibido: 08/11/2023

Aceptado: 08/03/2024

**Resumen.** - Se presenta el diseño de un sistema de control para el tratamiento de aguas de enfriamiento de un formador de azufre en un mejorador de crudo, para mantener la conductividad del agua de enfriamiento en rangos establecidos y de esta manera evitar la acumulación de minerales en las tuberías, lo cual deteriora el sistema de enfriamiento. En el desarrollo, se determinaron las propiedades fisicoquímicas a controlar, como la conductividad, sus agentes biológicos y los sólidos disueltos (TDS) presentes en el agua, tratándose la conductividad mediante purgas controladas y los microorganismos y TDS mediante la dosificación de productos químicos. También, se diseñó el sistema de control de conductividad y dosificación de químicos utilizando un Controlador Lógico Programable, se seleccionaron los diferentes componentes como sensores, bombas, válvulas, medidor de nivel y medidor de conductividad y posteriormente se validó el sistema de control mediante simulación del proceso con en el software LOGO SOFT confort. Los resultados demostraron el correcto funcionamiento de encendido y apagado de las bombas y válvulas, y se concluyó que el diseño es capaz de mantener controlado todos los parámetros ante cualquier cambio en las variables de entradas.

**Palabras clave:** Sistema de control, formador de azufre, Simulación.

---

(\*) Autor Corresponsal

<sup>1</sup> Bachiller en Ingeniería. Universidad de Oriente, Núcleo de Anzoátegui, Centro de Termofluidodinámica y Mantenimiento, Barcelona, Estado Anzoátegui (Venezuela), urimarecampos@gmail.com, ORCID iD: <https://orcid.org/0009-0004-7025-8442>

<sup>2</sup> Ingeniería Mecánica. Universidad de Oriente, Instituto de Investigaciones en Biomedicina y Ciencias Aplicadas, IIBCAUDO "Dra. Susan Tai", Cumaná, Estado Sucre (Venezuela), yordygonzalez@hotmail.com, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-4769-75682>

**Summary.** - The design of a control system for the treatment of cooling water of a sulfur former in a crude oil upgrader is presented, to maintain the conductivity of the cooling water in established ranges, and in this way avoid the accumulation of minerals in the pipes which deteriorates the cooling system. In the development, the physicochemical properties to be controlled were determined, such as conductivity, its biological agents and the dissolved solids (TDS) present in the water, treating the conductivity through controlled purges and the microorganisms and TDS through the dosage of chemical products. Also, the conductivity and chemical dosing control system was designed using a Programmable Logic Controller, the different components such as sensors, pumps, valves, level meter and conductivity meter were selected and subsequently the control system was validated through simulation of the process within the LOGO SOFT comfort software. The results demonstrated the correct on and off operation of the pumps and valves, and it was concluded that the design is capable of keeping all the parameters controlled in the event of any change in the input variables.

**Keywords:** Control system, sulfur former, Simulation.

**Resumo.** - É apresentado o projeto de um sistema de controle para o tratamento da água de resfriamento de um formador de enxofre em um melhorador de petróleo bruto, para manter a condutividade da água de resfriamento em faixas estabelecidas, e desta forma evitar o acúmulo de minerais nas tubulações que se deterioram. o sistema de refrigeração. No desenvolvimento foram determinadas as propriedades físicoquímicas a serem controladas, como a condutividade, seus agentes biológicos e os sólidos dissolvidos (TDS) presentes na água, tratando a condutividade através de purgas controladas e os microrganismos e TDS através da dosagem de produtos químicos. Além disso, o sistema de controle de condutividade e dosagem de produtos químicos foi projetado utilizando um Controlador Lógico Programável, os diferentes componentes como sensores, bombas, válvulas, medidor de nível e condutivímetro foram selecionados e posteriormente o sistema de controle foi validado através de simulação do processo dentro do LOGO Software de conforto SOFT. Os resultados demonstraram o correto funcionamento liga e desliga das bombas e válvulas, e concluiu-se que o projeto é capaz de manter todos os parâmetros controlados caso ocorra alguma alteração nas variáveis de entrada.

**Palavras-chave:** Sistema de controle, formador de enxofre, Simulação.

**1. Introducción.** - Un mejorador de crudo tiene como propósito procesar crudo extrapesado para transformarlo en un crudo mucho más liviano. En este proceso, uno de los subproductos que se obtiene es el azufre, el cual se genera en la unidad formadora de azufre y posteriormente se almacena en pilas en los patios del mejorador. Esta unidad formadora recibe el mineral en estado líquido a 150 °C aproximadamente, y luego lo transforma en estado sólido a 45 °C. Para lograr la solidificación del azufre, es fundamental la acción de aguas de enfriamiento, las cuales circulan a través de un sistema que consta de líneas de tuberías, intercambiador de calor, tanque de almacenamiento de agua de acero inoxidable y bomba de recirculación [1].

Todo sistema de enfriamiento recirculante que utiliza agua como medio refrigerante debe contar con algún tipo de tratamiento ya sea físico o químico [2], para evitar el aumento de ciclos de concentración, es decir, la concentración de iones en el agua (conductividad), la cantidad de minerales, los sólidos disueltos y la dureza en dichas aguas durante la recirculación [3-5]. A pesar de lo anterior, en las unidades formadoras de azufre no se trata el agua de ninguna forma, lo que se hace es suministrar agua constantemente al sistema de enfriamiento para impedir que aumente de manera exacerbada de estos ciclos, y para reponer el volumen del flujo evaporado [6].

Al respecto, la estrategia de suministrar agua constantemente en los formadores de azufre no es lo más adecuado, ya que se desperdicia en exceso el fluido, y además, esta agua de reposición generalmente viene asociada con bacterias, conjuntamente con carbonatos, bicarbonatos, sulfatos, entre otros minerales [7,8], que con el transcurrir del tiempo tienden a depositarse en las paredes internas de la tubería, lo que ocasiona severos daños como corrosión. Asimismo, se produce un aumento del espesor de pared del sistema hidráulico, lo que causa una disminución en la tasa de transferencia de calor del intercambiador, y un incremento en las pérdidas de carga del sistema de bombeo [9,10]. Por otra parte, las bacterias que se encuentran en el agua crean algas que causan obstrucción en las boquillas de aspersión de los sistemas de enfriamiento. Todos estos factores disminuyen la eficiencia en el proceso de formación de azufre lo que se traduce en pérdidas económicas [11].

Para darle solución a la problemática presentada, en esta investigación se planteó hacer modificaciones a las condiciones operacionales del sistema de tratamiento de agua de una unidad formadora de azufre de un Complejo Petroquímico, tomando como estrategia el uso de químicos y purgas controladas. Para esto se propuso el diseño de un sistema de control con la finalidad de mantener en el agua de enfriamiento la conductividad, y a su vez dosificar las cantidades adecuadas de químicos dentro de parámetros que no afecten el proceso. Asimismo, se realiza la simulación del sistema de control propuesto, y se describe la selección de accesorios y equipos necesarios para el funcionamiento correcto del sistema.

## **2. Materiales y métodos.-**

**2.1 Descripción del sistema formador de azufre.** - Un complejo de mejoramiento de crudo tiene como propósito procesar crudo extrapesado para transformarlo en un crudo más liviano. Como subproductos de este proceso se obtiene coke y azufre. Este último es bombeado en forma líquida desde un tanque de almacenamiento de la unidad (ver figura I) por medio de tuberías encaquetadas hacia la unidad de solidificación de azufre, constituida por dos trenes en paralelo, como se muestra uno de ellos en la figura II. En el proceso, el azufre pasa por un filtro de malla de acero inoxidable de 150 mesh, y es solidificado de acuerdo al proceso Rotoformer®, que consiste en un estator cilíndrico y un cilindro hueco perforado. El azufre líquido llega al interior del estator cilíndrico y sale a la superficie de este por medio de boquillas, fluyendo de forma controlada por la acción de una barra distribuidora. Asimismo, el cilindro hueco perforado que rodea al estator gira concéntricamente depositando gotas de azufre sobre una banda transportadora metálica de acero inoxidable donde son enfriadas.

En la superficie de la banda transportadora se aplica una película muy delgada de antiadherente tipo polimérica (solución de Tegopren) mediante un rodillo, con la finalidad de evitar que se pegue el azufre a la correa y se mantenga la forma del producto de azufre (en forma de pastillas). La banda transportadora absorbe el calor del azufre mediante conducción, haciendo que el azufre solidifique a temperaturas inferiores de 45 °C. En el proceso, la velocidad de rotación del Rotoformer se sincroniza con la velocidad de la correa metálica, haciendo que las gotas se depositen sobre la correa sin deformación, y posterior a la solidificación, resulten en pastillas regulares con forma y/o aspecto óptimo. La forma de las pastillas es importante para las características de manejo y generación de polvo, debido a que una relación apropiada de diámetro y altura, le daría la cualidad de forma semiesférico.



Figura I. Tanque de almacenamiento de azufre.



Figura II. Tren de formación de azufre.

Para que ocurra con éxito la solidificación, en la parte inferior de la banda metálica se encuentran dispuestos varios aspersores que expulsan agua hacia la banda con el fin de retirar el calor de la misma. En el enfriamiento se pierde parte del líquido refrigerante por evaporación, y la otra parte de agua que no es evaporada, se recoge por gravedad en una bandeja, la cual converge en el tanque de almacenamiento del proceso de enfriamiento. La parte del agua que se evapora ocasiona un aumento en la cantidad de sólidos disueltos en el agua de enfriamiento. Este proceso de enfriamiento está constituido por dos (2) bombas centrífugas de 15 Hp (una en Stand Bie), las cuales se encargan de la recirculación de las aguas de enfriamiento, un intercambiador de calor de tiro forzado de 1.736 m<sup>2</sup>, donde el agua de enfriamiento disminuye su temperatura de 45 °C a 30 °C y un tanque de almacenamiento, construido en acero inoxidable, el cual puede albergar un volumen de 2.700 L.

Durante el proceso de enfriamiento se producen emanaciones de vapor de azufre, el cual es tóxico e irritante, razón por la cual existe un sistema de extracción o escape provisto de un ventilador de extracción de aire. La parte final del proceso que cumple la unidad 32 concluye con el transporte del azufre solidificado por un sistema de bandas transportadoras hacia el patio de manejo de sólidos, donde es almacenado en grandes pilas. La descripción anterior de la unidad formadora de azufre sugiere que se trata de proceso es muy complejo, pues en ella se involucran diferentes variables que se interrelacionan y deben ser controladas. Para resolver el problema planteado, en esta investigación se realizó una búsqueda detallada de información sobre las unidades de formadores de azufre en manuales, libros,

artículos, proyectos, revisión de diagramas de instrumentación y tuberías, todo esto con la finalidad de conocer el proceso y recorrido de las aguas de enfriamiento, así como también los accesorios, equipos, metalografía y el ambiente con que está en contacto el fluido refrigerante.

**2.2 Propiedades fisicoquímicas y concentración apropiada de químicos para la dosificación en las aguas de enfriamiento.** - Para conocer las propiedades fisicoquímicas que guardan relación con los diferentes problemas existentes en el sistema de enfriamiento, se realizaron entrevistas a expertos en sistemas de aguas industriales, también se realizaron inspecciones *in situ* de unidades formadores de azufre para determinar los posibles problemas del sistema de enfriamiento. Se realizaron toma de muestras del agua de enfriamiento con instrucciones y recomendaciones del personal de aguas industriales. Las muestras fueron analizadas en laboratorio a fin de seleccionar y analizar los productos químicos que mejor se adapten a las características dichas aguas, y así poder determinar la concentración del químico elegido, de igual manera esta concentración fue verificada mediante la prueba de jarras.

**2.3 Sistema de control de conductividad y dosificación de químicos para el tratamiento del agua de enfriamiento en el formador de azufre.** - El control de purgas controladas y la dosificación de productos químicos que se desarrolla en esta investigación, se realiza mediante la implementación de un controlador lógico programable (PLC). Para el cálculo de las purgas, se define primeramente el punto de ajuste (*set point*) que determina el encendido de una válvula, luego se determina el volumen de purga el cual será igual al volumen de reposición, y dependerá del volumen evaporado durante el proceso de refrigeración. Posteriormente se verifica, mediante la aplicación de un balance de masa en concentraciones, que el volumen de purga garantiza las sugerencias de expertos en operaciones. Por otra parte, la dosificación de químicos se diseña en base al volumen de agua de reposición y de la dosis de cada producto seleccionado. El punto de ajuste o *set point* que determina el encendido de las bombas se fija en función al nivel del tanque de almacenamiento y el tiempo de encendido de las mismas se determina respecto al volumen y al caudal de dosificación.

Para la dosificación de químicos y la medición de las variables es necesario diseñar un bypass siguiendo recomendaciones del personal de operaciones, con la finalidad que no fluya un caudal mayor a 1,955 m<sup>3</sup>/hr. Para esto se siguen las normas PDVSA 90616.1.024 y PDVSA MDP-02-FF-03, asumiendo un diámetro de tubería y un factor de fricción, se realizan iteraciones, y se verifica que los resultados obtenidos satisfagan las normas antes mencionadas. Igualmente se verifica que el espesor correspondiente al diámetro escogido soporte las sobrepresiones de diseño, esto mediante la norma MDP-02-FF-03. Luego se especifica la disposición de los equipos y accesorios necesarios para el funcionamiento de la propuesta de control y así definir la lógica de control que regirá el proceso. El lenguaje de programación que más se adapta a las necesidades de la organización y a las características del software de programación se eligió cumpliendo con la norma IEC 1131-3. El procedimiento incluye la conexión de los distintos componentes al PLC, así como los ajustes de los sensores de conductividad y nivel en función al rango de entrada.

**2.4 Componentes y simulación del sistema de control.** - Según los requerimientos necesarios para llevar a cabo el proceso de tratamiento de agua de enfriamiento, se realiza la selección de la instrumentación mediante matrices de comparación y en otros casos se seleccionan en base a las marcas que manejan los formadores de azufre. Respecto a la simulación del proceso, se elige el lenguaje de programación adecuado a las necesidades del proceso, y a las características del software de programación cumpliendo con la norma IEC 1131-3. Se especifica la conexión de los distintos componentes al PLC, además se realizan los ajustes de los sensores (conductividad y nivel) en función al rango de entrada. Todo con el fin de conocer la relación existente entre los valores de entrada y salida de cada sensor, ya que el PLC interpreta la entrada de valores en esta unidad, para luego realizar el acondicionamiento de esta señal de entrada al rango de lectura del Software.

### 3. Resultados y discusión.-

**3.1 Propiedades fisicoquímicas a controlar.-** Se identificó que las propiedades a tratar en el agua del proceso de enfriamiento corresponden a la conductividad, el carbonato de calcio y minerales asociados al proceso, así como también los microorganismos, debido a que se evidenció la existencia de algas en las boquillas de aspersión y tendencia a la corrosión galvánica en algunos tramos de tubería por la acumulación de sedimentos en la misma, provenientes de la acumulación del carbonato de calcio, sílice, fosfatos, entre otros.

Para resolver la problemática, se decidió mantener bajo control el incremento de los minerales producidos por la recirculación y la evaporación en el proceso de la solidificación del azufre mediante la aplicación de purgas controladas. Respecto a los minerales que pudieran encontrarse en el agua de reposición, se implementa un tratamiento por medio de la dosificación de un inhibidor de corrosión para la dispersión del carbonato de calcio y los demás minerales, de tal manera que se reducirá al máximo la acumulación de estos agentes en la tubería. Asimismo, para el control de seres vivos muy pequeños formados por una sola célula (microorganismos) que bloquean el flujo de agua, reducen la transferencia de calor y aumentan las tasas de corrosión, se decidió utilizar una agente biosida no oxidante, esto conllevaría a preservar el tanque de almacenamiento, faja metálica, tuberías, intercambiador de calor, entre otros.

**3.2 Relación de la dosificación de químicos.** - La relación de dosificación de los productos químicos que se requiere para la solución del problema antes descrito, se determinó según las características de cada producto; y adicionalmente se realizó la prueba de jarra [12] en laboratorio. El ensayo consistió en someter a prueba la acción de determinada concentración de químico sobre una solución para corroborar el buen funcionamiento de los productos químicos. Los resultados obtenidos fueron satisfactorios en cada caso pertinente, pudiéndose observar que el agua no alteraba su color y los minerales no formaron flóculos de mayor tamaño, esto debido a la acción de inhibidor de corrosión el cual le proporciona una carga eléctrica a los minerales para que éstos se rechacen entre sí, y así impedir que éstos se adhieran a las paredes de las tuberías.

Posteriormente a esto, se examinó los análisis de laboratorio, y se sugirió la dosificación de un inhibidor de corrosión de acción media para el valor referente a la dureza total, la dureza cálcica y la conductividad del agua del proceso. Los productos químicos seleccionados en base a los agentes presentes en el agua de enfriamiento fueron LIPESA 131 y Biocida, y para controlar los agentes biológicos se especificó un Biocida no oxidante, LIPESA 100, por la existencia de acero inoxidable en el sistema [13].

**3.3 Propuesta de control para las aguas de enfriamiento de la unidad 32.**- En la industria se acostumbra a mantener la conductividad en los procesos de enfriamiento mediante purgas controladas [14], lo que conlleva a una reposición de las aguas de enfriamiento. Esta agua fresca de reposición al poseer una conductividad menor a la del proceso influirá directamente en dichas aguas, disminuyendo la concentración del carbonato de calcio, y por ende sobre la conductividad, ya que esta es directamente proporcional a dichos minerales.

En el estudio se determinó mantener en las aguas de enfriamiento una conductividad menor a quinientos siemens (500  $\mu$ S), como se muestra en la tabla I, ya que por encima de este valor se podrían presentar inconvenientes en el proceso, tales como: problemas de transferencias de calor en el intercambiador del sistema, aumentaría la tendencia a la corrosión en las tuberías y/o daría lugar para la formación de depósitos y/o el taponamiento de las tuberías por la alta concentración de minerales en las aguas de enfriamiento.

Tabla I. Clasificación de las aguas en función a su conductividad [15]

Conductividad y dureza del agua			
ppm	$\mu$ S/cm (Siemens)	°F	Dureza
0-70	0-140	0-7	muy blanda
70-150	140-300	7-15	blanda
150-250	300-500	15-25	ligeramente dura
250-320	500-640	25-32	moderadamente dura
320-420	640-840	32-42	dura
superior a 420	superior a 840	superior a 42	muy dura

Debido a que en el proceso de formación de azufre existe evaporación de las aguas de enfriamiento, se producirá un descenso del nivel en el tanque de almacenamiento, disminuyendo un centímetro y medio (1,5 cm) aproximadamente por hora de operación, según la lectura de los datos registrados por el medidor de nivel en dicho tanque. También se conoció que la conductividad en las aguas de enfriamiento en un día de operación promedio alcanza un incremento de sesenta y cinco (65)  $\mu$ S aproximadamente. Al respecto, se propone realizar las purgas en función al volumen evaporado en un día de operación para así realizar un encendido diario de las válvulas y bombas dosificadoras, lo cual se llevará a cabo de manera automatizada mediante la utilización de un control lógico programable (PLC).

**3.3.1. Volumen evaporado (VEP).** - En el estudio se dio a conocer que la altura de evaporación/h es de 1,5 cm, en un promedio de operación diaria de 11 h. El volumen de evaporación es de 0,093 m<sup>3</sup> en un área de 6,206 m<sup>2</sup> y para las once horas de operación se obtuvo un total de:

$$V_{ep} = 6,206m^2 * 0,015 \frac{m}{h} = \frac{0,093m^3}{h} * 11h = 1,024 m^3 (1.024 L)$$

**3.3.2. Conductividad resultante.** - Del mismo modo, se conoció que el sistema de transporte y almacenamiento de agua posee un diámetro y longitud de tubería de 4 pulgadas y 93 cm respectivamente, con volumen del tanque de 2.700 L y volumen de tubería de 3,454 m<sup>3</sup>. Sabiendo que una vez implementado el sistema de control, la conductividad en

las aguas de enfriamiento no superará los  $500 \mu S$  (considerando que las características no varían) debido a la realización de las purgas controladas, la cual permitirá introducir siempre el mismo volumen de  $1.024 L$  de agua fresca al sistema, y conociendo que esta posee una conductividad promedio de  $220 \mu S$ , se pudo calcular la conductividad resultante ( $C_f$ ) en el proceso, siendo de  $414 \mu S$  lo que satisface las exigencias de mantener la conductividad de las aguas de enfriamiento por debajo de los  $500 \mu S$ .

$$C_f = 500 \mu S + \frac{996,1 \frac{Kg}{m^3} 1024 L}{990,2 \frac{Kg}{m^3} 3.454 L} (211 - 500) \mu S \approx 414 \mu S$$

**3.3.3. Evaporación en el tanque de almacenamiento.** - La apertura y cierre de las válvulas, y el encendido de las bombas, dependerán del nivel existente en el tanque de almacenamiento. La altura que representa el volumen de evaporación y la altura referente al volumen de químicos dosificados en dicho tanque se conoció basado en el volumen evaporado de  $1.024 L$  y la ecuación de volumen evaporado, por lo que la altura del punto de ajuste (*set point*) quedo determinado por  $A_{sp}$ :

$$A_{sp} = \frac{V_{ep}}{Ancho * largo} = \frac{1,024 m^3}{1,372 m * 4,523 m} = 165 mm$$

**3.3.4. Volumen de productos químicos a dosificar.** - La relación de dosificación que dictan los dos (2) productos químicos seleccionados es de  $6 L$  de producto por cada  $1.000 L$  de agua de reposición, por lo que el volumen de cada uno de los dos químicos a dosificar por cada  $1.024 L$  es de  $6,144 L/Bomba$ . Dado a que la relación de dosificación será igual para el inhibidor de corrosión y el biocida, se estarán inyectando al tanque de almacenamiento un total de  $12,288 L$  de productos químicos, y una altura de productos químicos en el tanque de  $2 mm$ . De tal manera, que la altura menor del *set point*, quedó definida por la sustracción de la altura de evaporación y la altura de productos de químicos a la altura máxima de llenado en el tanque de almacenamiento. Este *set point* activará la apertura de la válvula que permitirá el cierre o paso de las aguas de reposición.

$$SP = 435 mm - 165 mm - 2 mm = 268 mm$$

Respecto a las bombas dosificadoras, estas serán encendidas y apagadas por un temporizador, el cual se programa según el tiempo en el cual este estará enviando la señal de encendido a las bombas dosificadoras. Este tiempo ( $td$ ) depende del caudal de dosificación  $0,0091 L/s$  y el volumen de dosificación por bomba de  $6,144 L$ :

$$td = \frac{V}{Q} = \frac{6,144 L}{0,0091 L/s} = 675 seg$$

**3.4. Filosofía de operación de la unidad formadora de azufre.** - En la figura III se muestra la disposición de los elementos y las diferentes alturas de control en el tanque de almacenamiento, y en la figura IV se muestra el diagrama de flujo que define el sistema de control. Para iniciar el proceso se suplirá en su totalidad el sistema de enfriamiento con agua fresca hasta una altura de cuatrocientos treinta y tres ( $433$ ) mm en el tanque de almacenamiento, y posteriormente se le agregarán veinte (20) litros de biocida LIPESA 100 y veinte (20) litros de inhibidor LIPESA 131 y se activará el proceso de control automatizado [16].

Una vez que el proceso de enfriamiento esté en funcionamiento y comience a evaporarse el fluido refrigerante, se abrirá la válvula de entrada (Q2), cuando el nivel del tanque alcance los  $268$  mm, la válvula de entrada (Q2) estará abierta hasta que el nivel del tanque llegue a los  $433$  mm, Las bombas dosificadoras se encenderán cuando los temporizadores lo indiquen, los cuales enviarán la señal de encendido durante  $675$  s a dichas bombas. Los temporizadores se activarán cuando el nivel en el tanque haya alcanzado los  $433$  mm, si y sólo si, la altura anterior en el tanque sea menor a dicha altura, y se apagarán cuando el temporizador lo indique. Cuando la conductividad de las aguas de enfriamiento sea mayor o igual a  $500 \mu S$ , se abrirá la válvula de purga (Q1). Una vez drenado el volumen necesario para llegar a los  $268$  mm de altura, la válvula de purga se cerrará y entraran en accionamiento el control de nivel y dosificación de químicos descritos anteriormente.

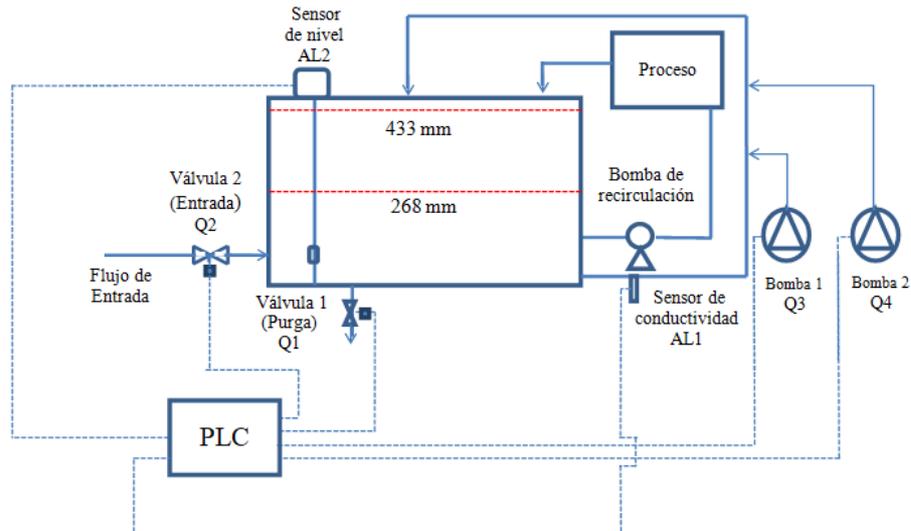


Figura III. Esquema de los elementos de control propuesto en el sistema de enfriamiento de la unidad formadora de azufre (unidad 32).

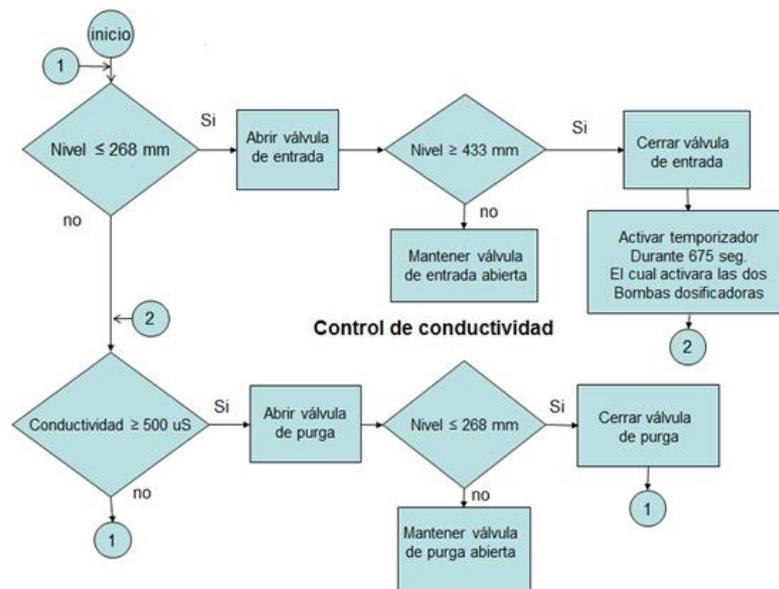


Figura IV. Diagrama de flujo para el control del agua de enfriamiento de la unidad 32, (control de nivel y dosificación de químicos).

**3.5. Diseño hidráulico de tubería bypass.** - Debido a que tanto las mediciones de variables como las modificaciones sólo se realizarán en la línea de tubería, fue necesario el diseño de un bypass [17] que se describe en la figura V con una longitud total de 9,50 m. El bypass se diseñó en función de un caudal no mayor del 5 % del caudal de recirculación, debido a que el sistema de enfriamiento fue diseñado para operar con un flujo no menor al 90 % del caudal de recirculación, quedando así un 5 % del caudal de recirculación para futuras modificaciones. Al respecto, el caudal de recirculación del sistema de enfriamiento cuenta con 39,1 m<sup>3</sup>/h, de tal manera que el caudal del bypass se define por:

$$\text{caudal de bypass} < \frac{5\%}{100\%} * \frac{39,1\text{m}^3}{h} = 0,5 \text{ L/s}$$

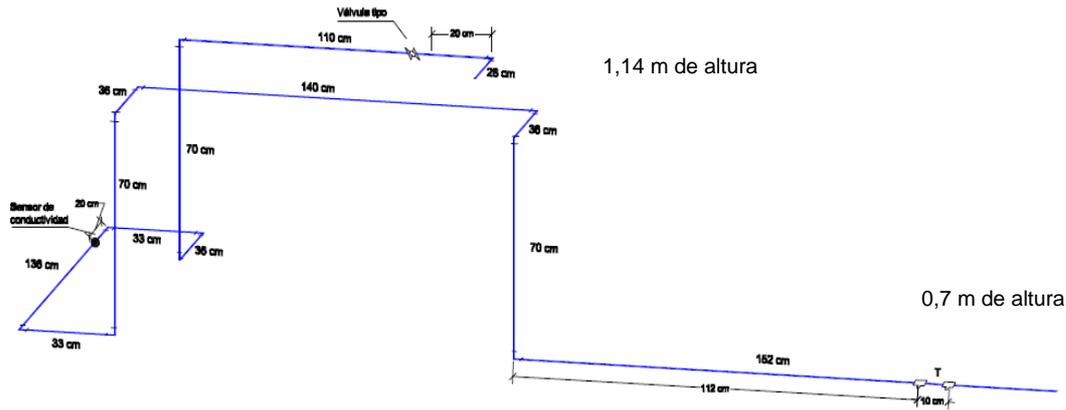


Figura V. Geometría del bypass.

Asimismo, para el dimensionamiento de la tubería basándose en ciertos criterios de velocidad y caída de presión, se utilizó la ecuación de caudal [16], y se determinó que el diámetro en función de la velocidad de erosión y a un caudal menor del especificado anteriormente, resultando  $D \leq 0,027 \text{ m}$  (1 plg). Se seleccionó un diámetro de 3/4 plg. con un diámetro interior de 18,9 mm, tomando en cuenta que se debe garantizar un caudal menor a 0,5 L/s.

**3.6. Selección de componentes.** - Fue necesario un sensor de conductividad GF modelo 3-2820-1 con transmisor GF Signet 8850-1 de visualización directa de lectura para instalación en panel [18]. Para la medición de nivel en el tanque de almacenamiento un sensor modelo NORMIX 190122111 con salida 4 – 20 mA, y dos (2) válvulas solenoides on/off del tipo normalmente cerradas. Una de las válvulas se coloca en la tubería que suministra agua al tanque de almacenamiento (válvula de entrada) y la segunda válvula para la realización de purgas (válvula de purga) montada en niple en la parte inferior del tanque de almacenamiento [19]. Las bombas dosificadoras que integran el sistema de control corresponden al tipo PROMINENT y línea Gamma/L por existir en los procesos del mejorador. Las bombas son de tipo electromecánica de membrana modelo GALa0232. Los PLC modelo SIMATIC S7-200 Siemens se ajustaron a las exigencias del proceso.

**3.7. Programación del controlador y modelo de montaje.** - La programación se basó en el PLC S7 SIEMENS con el software LOGO Soft Comfort, mediante el leguaje normalizado escalera. El modelo de montaje consistió en el PLC montado en campo, conectado a la sala de control de la unidad 32 por medio de la interfaz de comunicación Ethernet, para permitir la visualización del proceso control ejercido sobre las aguas de enfriamiento. La válvula de entrada, válvula de salida y bombas dosificadoras se alimentan desde el PLC por medio de los penetradores, los cuales son activados digitalmente mediante selenoides. El sensor de conductividad y sensor de nivel de tipo analógico fueron ajustados según las respuestas de los mismos, en función a su escala de medición y su rango de salida que es de 4-20 mA para ambos sensores. En las figuras VI y VII se muestra la disposición de los pines de la CPU 224 XP para la conexión de los elementos finales de control y los sensores, respectivamente.

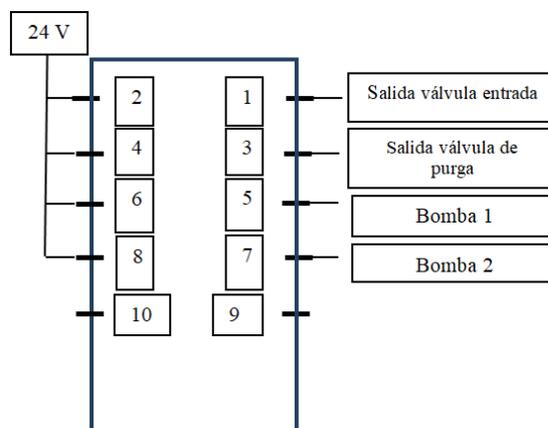


Figura VI. Esquema de conexión de los elementos finales de control en el pinado de la CPU 224 XP.

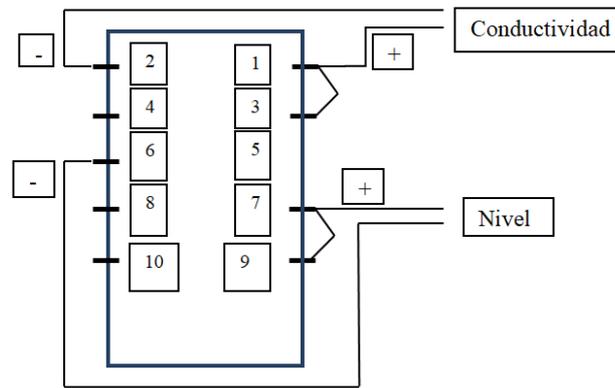


Figura VII. Esquema de conexión de los sensores en el pinado de la CPU 224 XP.

**3.8. Simulación del diseño.** - Para validar el funcionamiento del diseño, se tomaron ejemplos representativos de acciones de control en funcionamiento, comprobándose que las entradas y salidas se comportan de manera esperada según las perturbaciones [20]. En la figura VIII se muestra la pantalla de la simulación en condiciones de trabajo, pudiéndose observar en el cuadro de monitoreo una conductividad de 450  $\mu\text{S}$  y un llenado total del tanque. También se le han ingresado valores de entrada de 450  $\mu\text{S}$  al sensor de conductividad AI1 y 435 mm al sensor de nivel AI2, los cuales equivalen a 454 y 857,45 respectivamente, en la escala interna del PLC.

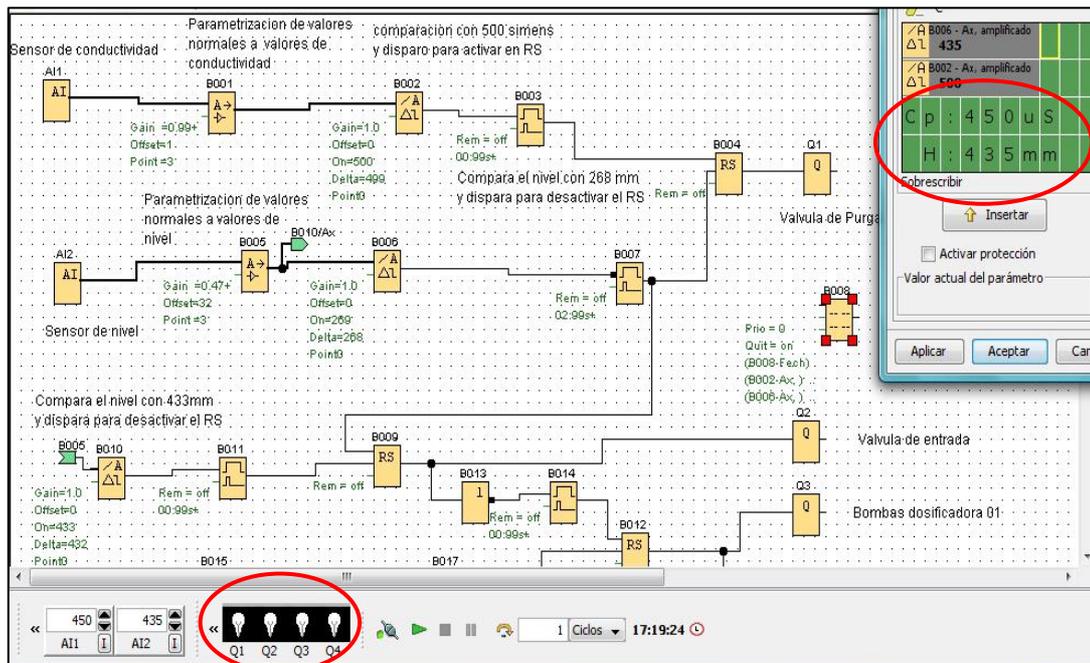


Figura VIII. Simulación del bloque de monitoreo.

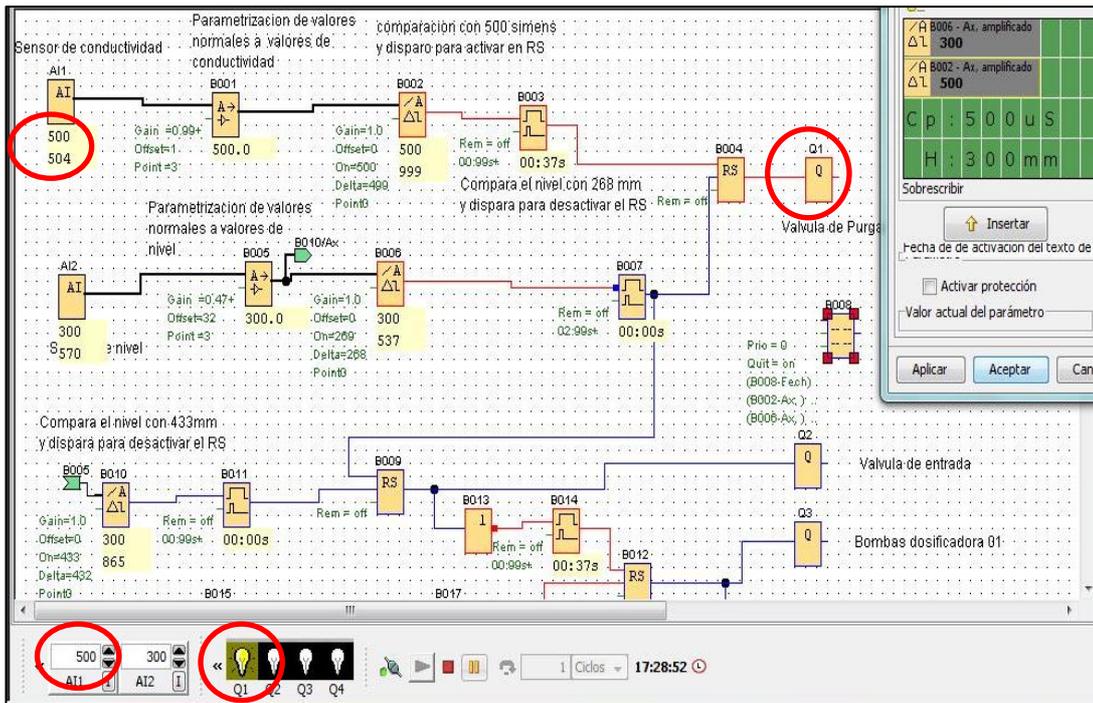


Figura IX. Simulación de la alarma de alta conductividad.

Como se explicó en la filosofía, el sistema de control del agua de enfriamiento del formador de azufre consta de dos procesos paralelos: el control de conductividad del agua del proceso y el control de nivel del tanque de almacenamiento. En esta parte de la simulación se muestra cómo actúa el sistema de control cuando la conductividad sale del rango deseado (menor a 500  $\mu\text{S}$ ) y alcanza los quinientos (500)  $\mu\text{S}$  equivalente a quinientos cuatro (504) en la escala interna del PLC, este valor de entrada arrojado por el medidor de conductividad (AI1) enciende la válvula de purga Q1, lo cual se puede apreciar en la figura IX. Luego que se da la apertura de la válvula de purga (Q1), el nivel en el tanque empieza a disminuir y cuando este haya alcanzado los doscientos sesenta y ocho (268) mm, lo cual equivale a quinientos dos con trece (502,13) en la escala interna del PLC, la alarma se encenderá; El PLC al leer dicho valor enviará un impulso a la válvula de entrada (Q2) para dar paso a la entrada del flujo de reposición, como se observa en la figura X.

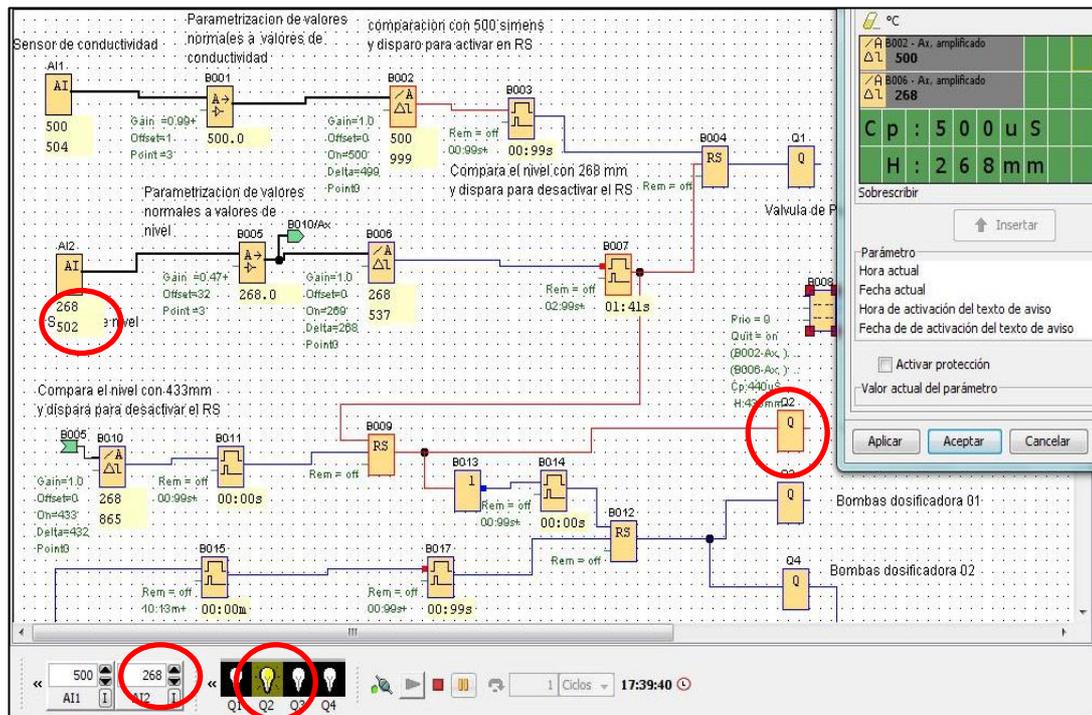


Figura X. Simulación de alerta del encendido de la válvula de entrada.

Con la apertura de la válvula de entrada (Q2) empieza el ascenso del nivel del tanque, al llegar a los cuatrocientos treinta y cinco (435) mm equivalente a ochocientos cincuenta y siete con cuarenta y cinco (857,45) de lectura interna del PLC, la misma será interpretada por el PLC para enviar una señal ordenando el cierre de la válvula de entrada (ver figura XI). La señal de cierre de la válvula de entrada servirá para el encendido de las dos (2) bombas dosificadoras, las cuales estarán encendidas durante diez minutos con catorce segundos (10 min.14 s) por medio de la utilización de un bloque funcional de relé de barrido.

El proceso de la activación de las alertas anteriormente descritas se activará cada vez que la conductividad de las aguas del proceso de enfriamiento alcance los quinientos (500)  $\mu\text{S}$ . Para el control del nivel en el tanque de almacenamiento, por motivo de la evaporación existente en el proceso, se cumplirán de manera análoga la activación de la alerta de encendido de la válvula de entrada y la alerta del encendido de las bombas dosificadoras.

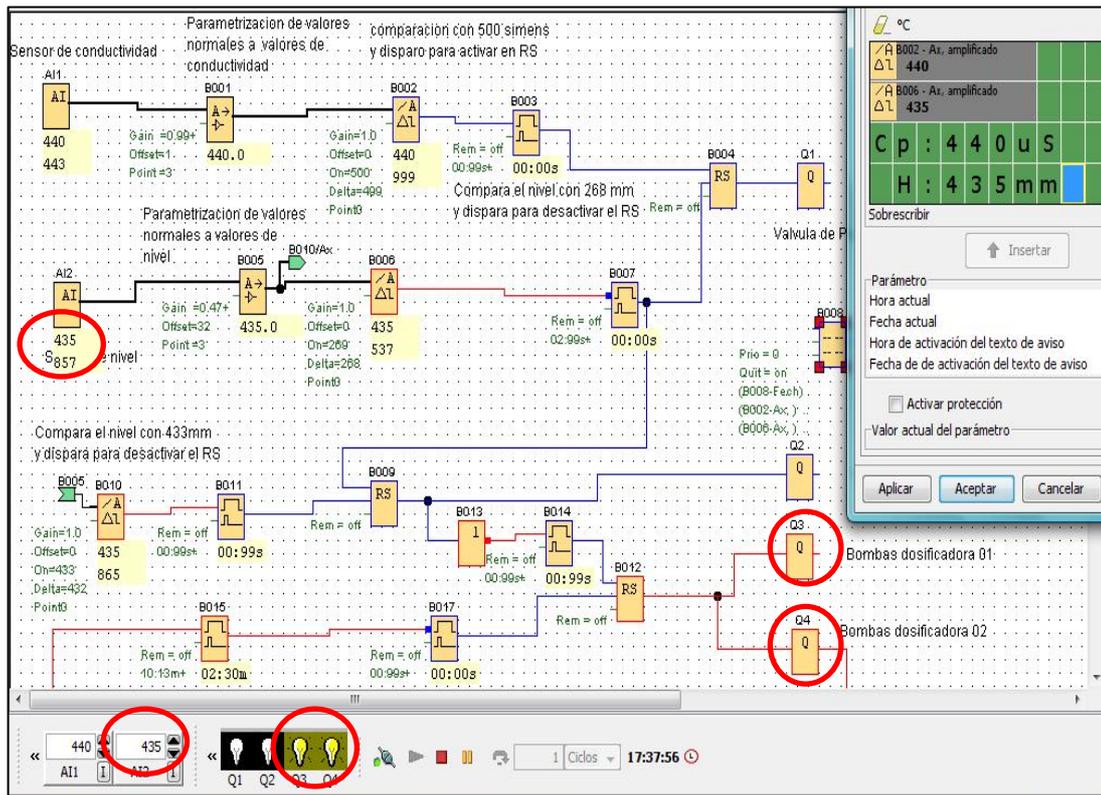


Figura XI. Simulación de alerta del encendido de las bombas dosificadoras.

**3.9. Análisis de la simulación del proceso.**- Luego de validar mediante simulación el correcto funcionamiento del sistema de control diseñado en esta investigación, se sugiere que su implementación repercutirá positivamente en los aspectos que fueron considerados en los objetivos planteados según se describen a continuación: Se mantendrá el control de los minerales que aparecen en el sistema de enfriamiento producto de la recirculación y evaporación del agua durante el proceso de solidificación del azufre. La aplicación del tratamiento al agua de recirculación a base de LIPESA 131, Biocida, y LIPESA 100 permitirá la dispersión del carbonato de calcio y otros minerales, reduciendo al máximo la acumulación de estos agentes en el sistema hidráulico. También se mantendrá controlada la aparición de pequeños seres vivos unicelular, microorganismos, que tienden normalmente a obstruir el flujo de agua en los aspersores de refrigeración. Asimismo, este control permitirá que la eficiencia del sistema de transferencia de calor se mantenga en niveles más altos, y la tasa de corrosión en todo el sistema permanezca en los niveles más bajos, alargando la vida útil del tanque de almacenamiento, tuberías, intercambiador de calor, entre otros.

**4. Conclusiones.** - Se diseñó un sistema de control para el tratamiento de aguas de enfriamiento de un formador de azufre que evitara el deterioro del mejorador de crudo, traduciéndose en menor impacto ambiental y económico causado por el agotamiento de los recursos, labores de mantenimiento, reemplazos de equipos y paradas del proceso. Con el estudio de la filosofía de operación se conocieron los complejos procesos que intervienen en él, desde la entrada del azufre en estado líquido hasta la solidificación de este por acción refrigerante. Se establecieron como propiedades a controlar en el tratamiento del agua de enfriamiento la conductividad, los minerales disueltos y los microorganismos, a partir de estudios de laboratorio. Se determinaron las adecuadas concentraciones de químicos que repercute en una mejor actuación de los productos sobre el agua de enfriamiento. Asimismo, se estableció el tiempo de encendido de

las bombas que dosifican dichos químicos.

Se seleccionó la instrumentación necesaria para censar las variables nivel y conductividad, y un controlador lógico programable con entradas y salidas integradas para mantener la acción de dos bombas dosificadoras electromecánicas y dos válvulas on/off. El sistema de control diseñado fue validado mediante simulación con el software computacional LOGO SOFT confort. Para esto se verificó el correcto funcionamiento de encendido y apagado de las bombas y válvulas, las cuales dependen de diferentes valores de *set point*, es decir, el encendido y apagado de las válvulas al igual que el encendido de las bombas dosificadoras se establecieron con un *set point* referente al nivel del tanque y el apagado de éstas en función a un *set point* que solo guarda relación con el volumen y el caudal de dosificación.

## Referencias

- [1] NALCO, (1990). Manual Técnico de Agua de Enfriamiento. Sección 1 y 3, Illinois: Naperville S.A. URL
- [2] González – Rondón, Y. Rengel, J. & Martínez, J. (2021). Simulación termofluidodinámica en un molde de colada continua de acero. *Revista Memoria Investigaciones en Ingeniería*. No. 21. <https://doi.org/10.36561/ING.21.4>
- [3] Guan, C., Yicheng, Y., Nan, Y., Nanyan, H., Jie, Z., Yang, H. (2021). A critical review of prevention, treatment, reuse, and resource recovery from acid mine drainage, *Journal of Cleaner Production*, Volume 329.
- [4] Jun, L., Salma, T. (2022). Synergism of hydrolytic acidification and sulfate reducing bacteria for acid production and desulfurization in the anaerobic baffled reactor: High sulfate sewage wastewater treatment, *Chemical Engineering Journal*, Volume 444.
- [5] Macías, M., Padilla, H., Jordy, L. (2021). Evaluación del tiempo de retención hidráulico de la planta de tratamiento de aguas residuales en base a lodos activados como posible causante de la contaminación odorífera en la ciudadela Puerto Seymour. Guayaquil. ULVR. Facultad de Ingeniería, Industria y Construcción Carrera de Ingeniería Civil. 109 P.
- [6] Colomo, A. (2001). Instructivo de la unidad Formadora de Azufre “Trenes Solidificadores”. Operadora Petroanzoategui C.A.
- [7] Yanhui, L., Shaoming, D., Zhouyang, B., Shuzhong, W., Fan, Z., Jie, Z., Donghai, X., Jianqiao, Y. (2022). Corrosion characteristics and mechanisms of typical iron/nickel-based alloys in reductive supercritical water environments containing sulfides, *The Journal of Supercritical Fluids*, Volume 187.
- [8] Zhao, Z., Chunhui, Z., Yang, Y., Zhuwei, Z., Yuanhui, T., Peidong, S., Zhiwei, L. (2022). A review of sulfate-reducing bacteria: Metabolism, influencing factors and application in wastewater treatment, *Journal of Cleaner Production*, Volume 376.
- [9] Hong-Cheng, W., Ying, L., Yu-Meng, Y., Ying-Ke, F., Shuang, L. Hao-Vi, C. Ai-Jie, W. (2022). Element sulfur-based autotrophic denitrification constructed wetland as an efficient approach for nitrogen removal from low C/N wastewater, *Water Research*, Volume 226.
- [10] Nallakukkala, S., Rehman, A., Zaini, D.B., Lal, B. (2022). Gas Hydrate-Based Heavy Metal Ion Removal from Industrial Wastewater: A Review. *Water*, 14, 1171. <https://doi.org/10.3390/w14071171>.
- [11] Elis, W., Nogueira, L., Augusto, G., Lauren, N., Márcia, R. (2021). Sulfate and metal removal from acid mine drainage using sugarcane vinasse as electron donor: Performance and microbial community of the down-flow structured-bed bioreactor, *Bioresource Technology*, Volume 330.
- [12] Suárez, V. y Trujillo, D. (2011). Diseño y Construcción de un Equipo de Prueba de Jarras para la Tratabilidad de Aguas Residuales. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Riobamba.
- [13] LIPESA, (2003). Manual Técnico de Sistemas de Enfriamiento. Sección 3 y 5. Barcelona. URL
- [14] Rigola, M. (2001). Tratamiento de aguas industriales: aguas de procesos y residuales. Barcelona, España: Alfaomega Marcombo S.A.
- [15] INFOAGRO (2009). Informe de conductividad. URL
- [16] González – Rondón, Y. (2022). Automatización del sistema de medición de parámetros en un compresor centrífugo de pruebas experimental ARMFIELD FM 12. *Revista Servolab Science*. Volumen 1, No. 2. URL
- [17] American National Standards Institute. Committee B31, Code for Pressure Piping. (2002). Pipeline Transportation Systems for Liquid Hydrocarbons and Other Liquids: ASME Code for Pressure Piping, B31. American Society of Mechanical Engineers. URL
- [18] Creus, A. (2005). Instrumentación Industrial. Barcelona, España: Alfaomega Marcombo S.A.
- [19] Mora, K. B. (2013). Conceptualización del sistema de separación y transporte de los fluidos producidos en la zona sur del campo el salto. Universidad de Oriente. Tesis de Grado. URL
- [20] Lugo, J. G. C., Ybarra, J. J. P., y Romero, E. (2005). Metodología para realizar una automatización utilizando PLC. *Impulso*, 18. URL

**Nota contribución de los autores:**

1. Concepción y diseño del estudio
2. Adquisición de datos
3. Análisis de datos
4. Discusión de los resultados
5. Redacción del manuscrito
6. Aprobación de la versión final del manuscrito

UC ha contribuido en: 1, 2, 3, 4, 5 y 6.

YGR ha contribuido en: 1, 2, 3, 4, 5 y 6.

**Nota de aceptación:** Este artículo fue aprobado por los editores de la revista Dr. Rafael Sotelo y Mag. Ing. Fernando A. Hernández Goberti.