

Desarrollo de un Sistema de Supervisión y Control para un Generador Electroquímico de Hipoclorito de Sodio in-situ

Juan Tovar¹, José Barriola², Miguel Pérez³ y Sergio Rosales⁴

¹jbtovar@unimet.edu.ve, ²jbarriola@unimet.edu.ve, ³mperez@unimet.edu.ve, ⁴srosales@unimet.edu.ve
^{1,2,3,4}Universidad Metropolitana, Caracas, Venezuela.

Resumen– Se ha diseñado e implementado un sistema automatizado para la dosificación de hipoclorito de sodio, simulando una planta de generación in-situ de hipoclorito. La Interfaz hombre máquina (HMI) y el Sistema de Control se han desarrollado utilizando una computadora personal (PC) con un programa en MATLAB, un lenguaje de programación ampliamente utilizado en ingeniería y ciencia. La etapa de acondicionamiento de señal se ha construido empleando circuitos integrados digitales y analógicos, conectando un conversor/actuador implementado con una placa electrónica Arduino UNO y los elementos de control final, integrándose así al sistema de instrumentación. Se ha utilizado el circuito integrado LMP91000, también conocido como potencióstato, para la determinación de la concentración de hipoclorito. Se describe el procedimiento detallado para calibrar el equipo desarrollado en este proyecto.

Palabras clave– Sistema de Automatización, hipoclorito de sodio, Interfaz hombre-máquina, MATLAB, LMP91000.

Abstract– An automated system has been designed and implemented for the dosing of sodium hypochlorite, simulating an on-site hypochlorite generation plant. The Human-Machine Interface (HMI) and Control System have been developed using a personal computer (PC) with a MATLAB program, a widely used programming language in engineering and science. The signal conditioning stage has been constructed using digital and analog integrated circuits, connecting a converter/actuator implemented with an Arduino UNO electronic board and the final control elements, thus integrating into the instrumentation system. The LMP91000 integrated circuit, also known as a potentiostat, has been employed for determining the concentration of hypochlorite. The detailed procedure for calibrating the equipment developed in this project is described.

Keywords: Automation System, sodium hypochlorite, Human Machine Interface, MATLAB, LMP91000.

I. INTRODUCCIÓN

El cloro ha desempeñado un papel fundamental como desinfectante en el tratamiento histórico del agua potable y residuos, siendo utilizado para erradicar enfermedades entéricas y eliminar componentes no deseados como el sulfuro de hidrógeno, compuestos de hierro y especies orgánicas causantes de sabor y olor en el agua [1]. La desinfección del agua es esencial para reducir el riesgo de infecciones, especialmente aquellas transmitidas por el agua, al destruir o inactivar organismos patógenos presentes en el suministro de agua utilizado por las personas [2].

En entornos donde el suministro continuo de agua es escaso, la desinfección domiciliar y el almacenamiento seguro se vuelven cruciales para prevenir enfermedades

transmitidas por el agua [2]. Una solución potencial es un sistema de generación de hipoclorito de sodio in-situ con control abierto, que, aunque puede ser efectivo, requiere una medición constante de la concentración de hipoclorito por parte de los usuarios [3].

El desafío radica en que sistemas no automatizados o sin control constante pueden resultar perjudiciales para los usuarios, como indican estudios anteriores [4]. Además, métodos no automatizados como las pruebas de colorimetría con DPD, utilizadas para el control de la cloración, implican la realización manual y la posible toxicidad de los compuestos utilizados [5].

Ante esta problemática, surge la necesidad de un sistema de supervisión y control para la dosificación de hipoclorito de sodio que sea eficiente y accesible. Este trabajo se propone desarrollar un sistema de control cerrado adaptable a un generador electroquímico in-situ, seleccionando hardware y software adecuados, programando algoritmos, y evaluando métodos electroquímicos para la medición precisa de la concentración de ion hipoclorito en agua. El objetivo final es diseñar un sistema de supervisión y control integral, aplicable a sistemas domésticos y comunitarios de desinfección de agua, que garantice la seguridad y viabilidad económica en su implementación.

La introducción del uso del cloro como desinfectante del agua se remonta al siglo XIX, marcando un hito significativo en la historia de la salud pública. El cloro, un elemento del grupo de los halógenos con número atómico 17 y símbolo químico Cl , ha sido clave en la reducción drástica de enfermedades transmitidas por el agua desde principios del siglo XX hasta la actualidad.

La cloración, que implica el uso de compuestos de cloro como desinfectantes, se lleva a cabo mediante la aplicación de gas cloro, hipoclorito de calcio, hipoclorito de sodio, entre otros [2], [6]. El proceso químico detrás de la cloración del agua involucra reacciones de hidrólisis que generan ácido hipocloroso ($HClO$) y el ion hipoclorito (ClO^-), ambos actúan como agentes desinfectantes [7].

La suma de las concentraciones de ácido hipocloroso, ion hipoclorito y gas cloro disuelto se conoce como "Cloro Residual Libre" (FAC) y se expresa comúnmente en mg/L [6], [7]. El concepto de "Cloro Disponible" se refiere a la capacidad de oxidación de estas especies en relación con el cloro molecular Cl_2 [8]. Este concepto es esencial para comprender la eficacia de la desinfección.

El uso generalizado del cloro como desinfectante en el suministro de agua ha sido un avance crucial. Desde su primera aplicación en el siglo XIX hasta la introducción de la cloración en ciudades de América del Norte en 1908, el cloro ha demostrado ser uno de los desinfectantes más efectivos y económicos para el tratamiento de agua potable [2]. A lo largo de los años, su implementación ha contribuido significativamente a la reducción de enfermedades transmitidas por el agua, como la fiebre tifoidea.

La desinfección por cloración ha evolucionado, adaptándose a normativas y estándares que establecen concentraciones aceptables de cloro residual para distintos usos, como en piscinas [9], [10]. Estrategias como el "Shock dosing" se emplean para mantener la calidad del agua, elevando temporalmente las concentraciones de cloro residual.

Este estudio aborda la importancia del cloro como desinfectante, destacando la necesidad de un sistema eficiente y accesible para la generación in-situ de hipoclorito de sodio con control cerrado. Se propone desarrollar un sistema de supervisión y control que garantice la dosificación precisa, adaptándose a aplicaciones domésticas y comunitarias de desinfección de agua. La investigación se centra en seleccionar métodos electroquímicos adecuados y diseñar un prototipo de sistema, considerando la relevancia histórica y actual del cloro en la salud pública.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Sistemas de Generación "in-situ" de Hipoclorito de Sodio.

El cloro e hipoclorito se obtienen mediante la electrólisis de salmueras y soluciones salinas, una técnica empleada desde principios del siglo XX y que sigue siendo atractiva cuando se dispone fácilmente de una fuente de salmuera [11]. En el núcleo de cualquier Sistema de Generación in-situ se encuentra una celda electrolítica que realiza la producción electroquímica de cloro [12]. La figura 1 ilustra el flujo de señal propuesto para un Sistema de Generación Electroquímica de Hipoclorito de Sodio in-situ. Este proceso de electrooxidación transforma la salmuera de cloruro de sodio, $NaCl$, utilizada como materia prima en el generador in-situ, en una solución desinfectante que contiene cloro acuoso. La ecuación 1 representa la conversión del cloruro de sodio en hipoclorito de sodio durante la electrooxidación [6]:



En un sistema generador in-situ, como se representa en la figura 1, el tanque inicialmente contiene sólo cloruro de sodio. Después de aplicar el proceso de electrólisis de manera sucesiva mediante la celda y la recirculación, la concentración de cloruro de sodio disminuye gradualmente, mientras que la de hipoclorito de sodio aumenta hasta alcanzar un valor máximo del 1%, según lo permitido por la naturaleza de la reacción en esa configuración.

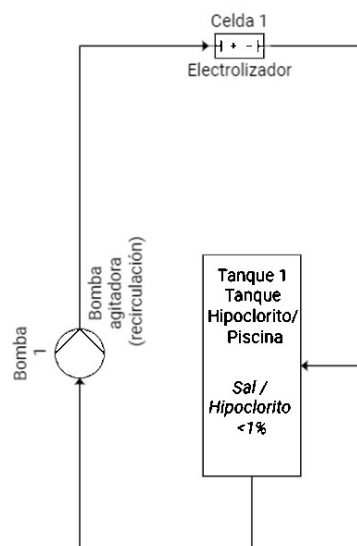


Fig. 1 Gráfica de Flujo de Señal para un Generador Electroquímico de Hipoclorito de Sodio in-situ.

B. Sistemas de Generación "in-situ" de Hipoclorito de Sodio.

Los Sistemas de Dosificación de Hipoclorito de Sodio comprenden tanques de almacenamiento equipados con bombas dosificadoras [13]. En este proceso, un tanque inicialmente lleno de agua sin cloro recibe una alimentación controlada de la solución concentrada mediante la bomba dosificadora, generando así una solución diluida de hipoclorito de sodio en el tanque. Para garantizar una mezcla homogénea y una concentración constante de cloro en el menor tiempo posible, se utiliza una bomba agitadora para recircular y agitar el contenido del tanque [13]. La figura 2 presenta una propuesta visual de este sistema de dosificación.

C. Sistemas de Generación "in-situ" de Hipoclorito de Sodio.

En complemento a los sistemas previamente mencionados, es factible integrar ambos en un único sistema. En esta configuración, el hipoclorito se produce mediante la electrólisis de la salmuera, alcanzando la concentración máxima posible. Posteriormente, el sistema de dosificación administra la cantidad precisa en el depósito final. La figura 3 ilustra esta propuesta integrada.

D. Sistema de Automatización: Supervisión y Control.

La aplicación conjunta de sistemas de generación in-situ y dosificación automática se destaca como una práctica altamente recomendable para el control efectivo de la concentración de desinfectante, como el cloro, en el agua.

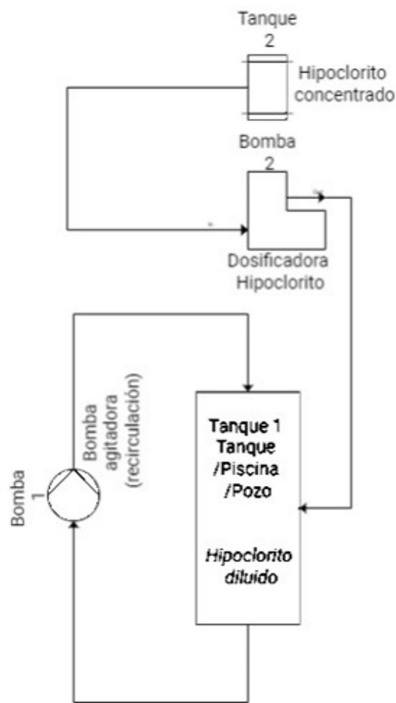


Fig. 2 Gráfica de Flujo de Señal para un Dosificador.

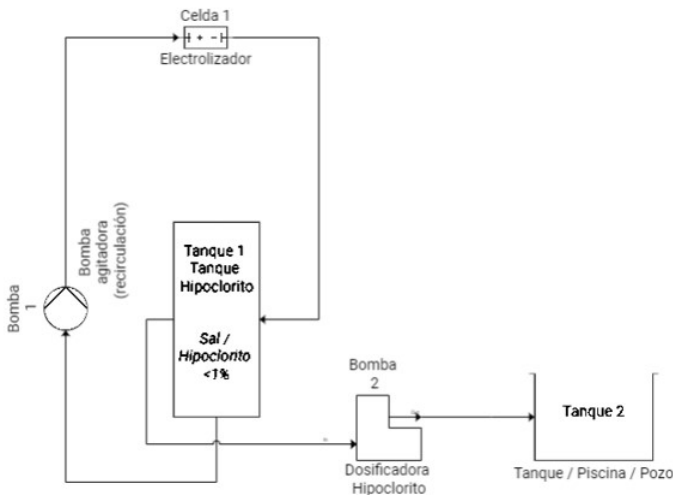


Fig. 3 Gráfica de Flujo de Señal para un Generador Electroquímico de Hipoclorito de Sodio in-situ con Dosificador.

Estos sistemas, monitoreados por sensores que miden los niveles residuales de cloro, ajustan la dosificación con precisión para mantener niveles adecuados, garantizando así la calidad y potabilidad del agua según la Organización Mundial de la Salud [14].

Las propuestas de sistemas previamente presentadas, tanto de generación in-situ como de dosificación, requieren una instrumentación de control adecuada para su implementación correcta [13], [14].

En términos generales, un proceso se define como una serie de acciones sistemáticas dirigidas hacia un resultado específico. Para lograr que el proceso funcione de forma automática y entregue los resultados deseados, se requiere la integración de un sistema de automatización. Este sistema consta de componentes para la supervisión y control del proceso, operando sin intervención manual [15].

El sistema de automatización se conecta al proceso a través de señales del proceso, que se dividen en señales de entrada y señales de salida. Las señales de entrada proporcionan información sobre el comportamiento del proceso, mientras que las señales de salida alteran dicho comportamiento [16].

El sistema de automatización, de manera general, se divide en tres sistemas principales: instrumentación, control e interfaz hombre-máquina. La figura 4 ilustra la estructura básica de un sistema de automatización.

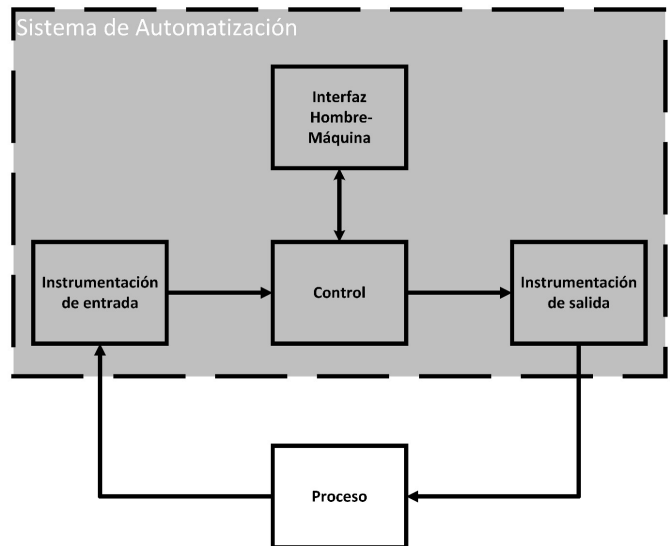


Fig. 4 Estructura de un sistema de automatización [16].

III. ANÁLISIS Y RESULTADOS

A. Sistema de Automatización: Supervisión y Control.

A continuación, se presenta el sistema de automatización desarrollado en este trabajo para un prototipo de planta de dosificación de hipoclorito de sodio, que simula una planta de generación de hipoclorito de sodio in-situ.

La interfaz hombre-máquina (HMI) y el sistema de control se implementan mediante una computadora personal (PC) ejecutando un programa en MATLAB, un lenguaje de programación interpretado.

El sistema de instrumentación se compone de una etapa de acondicionamiento de señal, utilizando circuitos integrados

digitales y analógicos necesarios para conectar el convertidor/actuador implementado con una placa electrónica Arduino UNO y los elementos de control final.

El proceso al cual se integró el sistema de automatización consiste en un tanque de solución diluida de hipoclorito a una concentración específica.

El objetivo de la automatización es lograr, sin intervención manual más allá de activar el proceso, que un reservorio con un volumen determinado de agua alcance una concentración específica de cloro.

La señal de entrada del proceso que recibe el sistema de automatización es la concentración de hipoclorito.

Las señales de salida del sistema de automatización para el proceso incluyen la dosificación de hipoclorito, la agitación, la toma de muestra, la dosificación de ácido a la muestra, la toma de medida y el desagüe de la celda de muestra.

La estructura general del sistema de automatización abarca la instrumentación, el control y la interfaz hombre-máquina. La Fig. 5 muestra la estructura básica de este sistema de automatización.

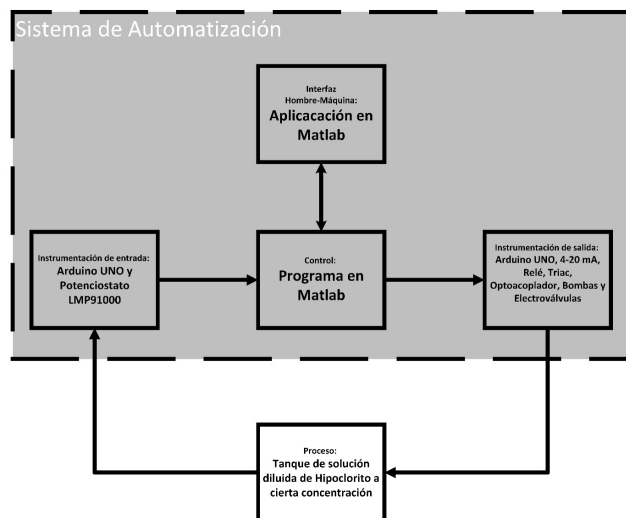


Fig. 5 Estructura básica del sistema de automatización.

B. Instrumentación

Se exhibe el Sistema de Instrumentación construido, mostrando en la Fig. 6 los componentes que conforman su estructura.

C. Componentes funcionales del sistema de instrumentación de entrada

1. Conversor

La etapa Conversor en el sistema de instrumentación de entrada tiene como objetivo mejorar la calidad de la señal recibida por el acondicionador de señal y adaptarla a la forma adecuada para su transmisión al sistema de control. Para cumplir con esta función, se emplea un ADC, un USART y un Conversor USB-Serial.

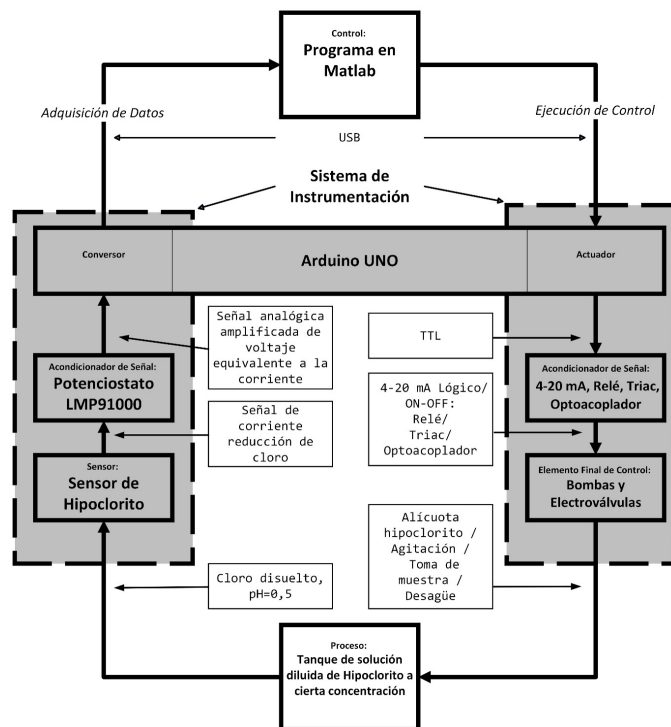


Fig. 6 Estructura del sistema de instrumentación construido.

La placa electrónica Arduino UNO cuenta con un microcontrolador que integra un ADC de 10 bits y un USART. En el mismo circuito impreso se incluye un chip Conversor USB-Serial y un conector USB tipo B. De esta manera se implementó la etapa Conversor en el sistema de instrumentación de entrada.



Fig. 7 Placa Electrónica Arduino UNO.

2. Acondicionador de la señal de entrada

En la fase de acondicionamiento de la señal de entrada, se utiliza un potenciostato, como el circuito integrado LMP91000 de Texas Instruments (TI), para aprovechar la corriente de una celda electroquímica como sensor.

El LMP91000 funciona como un circuito "front-end" analógico (AFE). Este tipo de sistema está diseñado para una aplicación específica con una señal de entrada que tiene características bien definidas y un rango dinámico conocido [17]. El sistema "front-end" analógico se encarga de amplificar y filtrar las señales provenientes de los sensores [17].

Además, el LMP91000 es programable mediante I2C, lo que facilita la comunicación con un microcontrolador cercano, en este caso, el microcontrolador de la tarjeta electrónica Arduino UNO. Este mismo microcontrolador también está implementado en la etapa de Actuador en el Sistema de Instrumentación de salida.

La polarización de la celda se realiza digitalmente, y la salida de corriente analógica sirve como entrada al ADC de la etapa Conversor. El LMP91000EVM es un módulo de evaluación que presenta el circuito integrado LMP91000 en una tarjeta de circuito impreso manejable, con fácil acceso a todos sus pines, lo que permite, por ejemplo, la conexión a un microcontrolador.

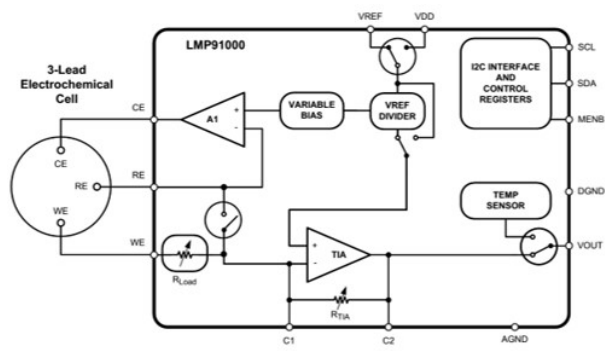


Fig. 8 Diagrama funcional LMP91000 [18].

En la Fig. 9, se presenta el barrido de potencial realizado sobre una resistencia como forma de prueba del dispositivo.

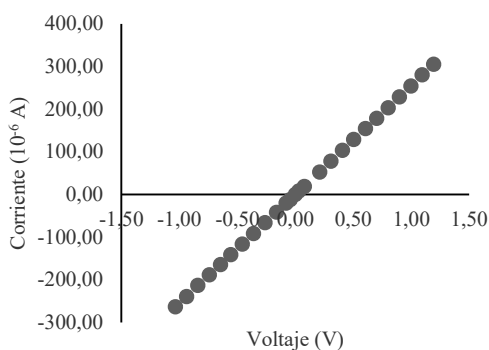


Fig. 9 Barrido de potencial realizado sobre una resistencia de 4KΩ como forma de prueba del dispositivo.

3. Elemento Sensor

Se construyó un sistema electroquímico para medir la concentración de hipoclorito. La celda electroquímica utilizada es un sistema de tres electrodos [19]:

- Disco de grafito como electrodo de trabajo (WE),
- Plata/cloruro de plata (Ag/AgCl) en solución 3M de cloruro de sodio (3M NaCl) como electrodo de referencia (REF),
- Barra de grafito como contra electrodo (CE)
- Para determinar la concentración de hipoclorito [20]: Se establece una diferencia de potencial de -0,4 V entre WE y REF. Se mide la corriente de reducción de cloro gaseoso disuelto a pH < 0,5. Esta corriente es proporcional a la concentración de hipoclorito.

D. Componentes funcionales del sistema de instrumentación de salida

En esta etapa se utilizó un Actuador en el sistema de instrumentación de salida el cual tiene como función transformar la señal de salida de comandos del sistema de control en una señal adecuada para el acondicionador de señal.

En esta etapa de acondicionamiento de la señal de salida se construyeron cada uno de los circuitos electrónicos necesarios para convertir las señales en lógica TTL del Actuador en las señales adecuadas para cada uno de los Elementos de Control Final que conforman la siguiente etapa. Todos los circuitos fueron simulados en LTSpices: como el Circuito opto aislado que transmite señal on/off a la bomba peristáltica; el Circuito 4-20 mA lógico que transmite la señal on/off a las bombas dosificadoras; Circuito con relé que transmite señal on/off a las electroválvulas; Circuito con un Triac que controla la bomba agitadora; Circuito Fuentes diseñada para poder contar con todos los voltajes requeridos para la alimentación de los circuitos.

E. Elemento Final de Control

Los elementos que conforman esta etapa son:

Bomba Dosificadora Hipoclorito, esta bomba aplica al proceso la dosis o alícuota de hipoclorito de sodio según el caudal al que haya sido calibrada, cada vez que recibe el comando del sistema de control en forma de una señal lógica de 20mA. Modelo: LMI Milton Roy Metering Pump, con accesorio Micropace.

Bomba Agitadora, que funciona como una bomba de recirculación. Luego de haber sido dosificado un cierto caudal de hipoclorito al proceso, recibe una señal por parte del sistema de control en forma de una señal ON. Esto garantiza la condición de homogeneidad o de "agitación continua" (en inglés, continuous stirred tank reactor, CSTR) [21] en el tanque de hipoclorito diluido y así poder tratar el problema desde la perspectiva de parámetros concentrados y no distribuidos [22]. Modelo: Bomba de desagüe de lavadora genérica.

Bomba Peristáltica, que se utiliza para tomar una muestra

del tanque problema, y se agrega a la celda electroquímica. Modelo: Cole Palmer serie L/S.

Bomba dosificadora ácido, esta bomba administra a la celda electroquímica una cantidad específica de ácido clorhídrico, ajustada de acuerdo con el caudal al que ha sido previamente calibrada. Se activa cada vez que recibe la orden del sistema de control, manifestada como una señal lógica de 20 mA. Se agrega la cantidad de ácido necesaria para garantizar un $pH < 0,5$ para la medida. Modelo: LMI Milton Roy Metering Pump, con accesorio Micropace.

Electroválvula 1, Venturi y Electroválvula 2, estos tres elementos se utilizan para manejar el desagüe de la celda electroquímica. Una electroválvula se encuentra conectada directamente en la parte inferior de la celda. Cuando la válvula se activa eléctricamente, la presión de la solución en la celda no es lo bastante elevada como para provocar la apertura de la válvula. Para solucionar esto último se conecta la salida de la electroválvula a la boca de vacío de un Venturi, el cual se activa cuando la segunda electroválvula deja pasar a través del Venturi un flujo de agua.

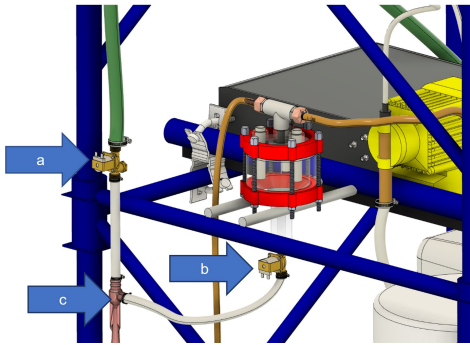


Fig. 10 Señalado por las flechas: a:Electroválvula 2, b:Electroválvula 1, c:Tubo Venturi generador de vacío.

F. Control

En la Fig. 11 se muestra la estructura del sistema de control, dividida entre la estrategia de automatización y las interfaces para el intercambio de datos con el sistema de instrumentación y la interfaz hombre-máquina.

En la Fig. 12 se presenta el Diagrama de Flujo del algoritmo de control.

G. Estrategia de Automatización

El elemento sensor del sistema de instrumentación de entrada no mide de forma continua, entonces la estrategia que se plantea para implementar el algoritmo de control es la de un Control Discreto Secuencial con condición intermedia o “interlock”.

H. Interfaz Hombre-Máquina

En la Fig. 13 se presenta como muestra la aplicación en Matlab que sirve como implementación de la Interfaz Hombre/Máquina.

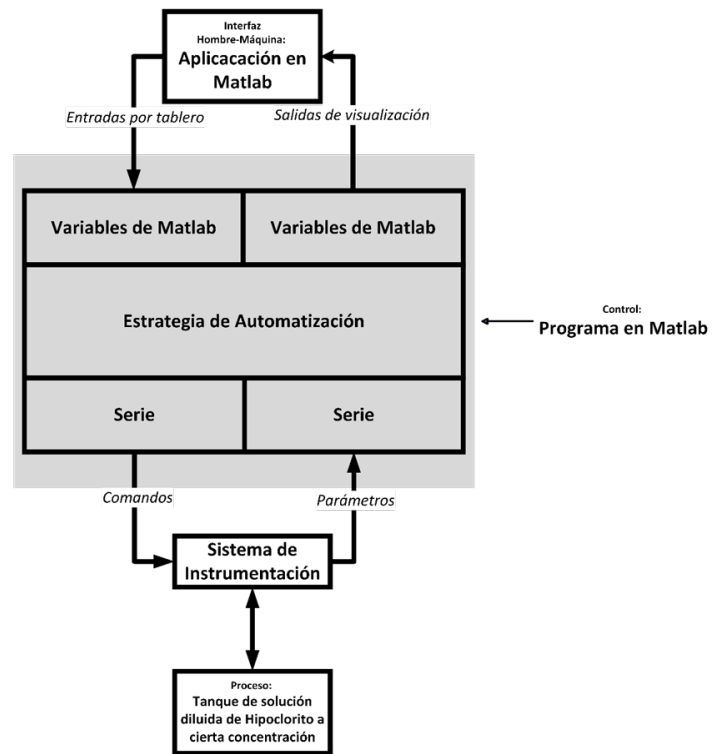


Fig. 11 Estructura del sistema de control.

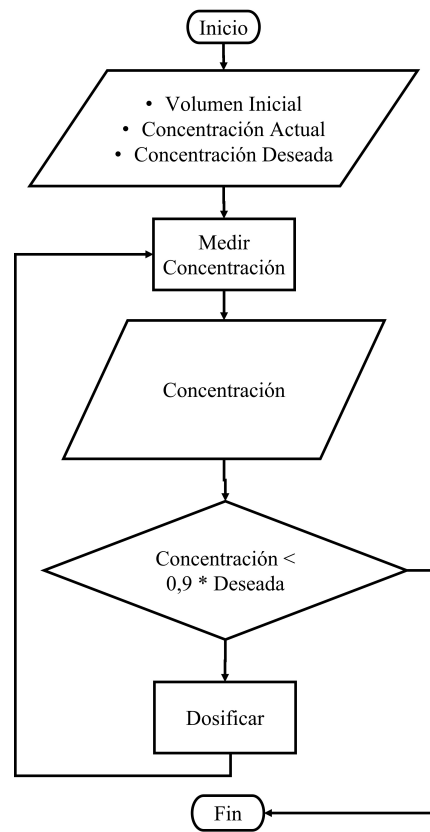


Fig. 12 Diagrama de flujo del algoritmo de control.



Fig. 13 Interfaz de usuario del sistema de automatización.

I. Diseño y construcción del Sistema de Automatización

Se diseñó y construyó un prototipo de proceso automatizado, en la Fig. 14 se muestra una imagen 3D del mismo.

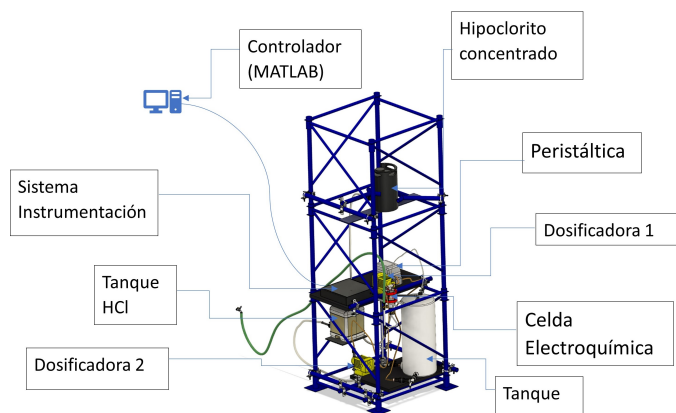


Fig. 14 Diseño del prototipo de Planta. Elementos del sistema de automatización del proceso de dosificación de hipoclorito.

J. Calibración del Sistema de Automatización para el Dosificador de Hipoclorito

Los pasos para seguir con la calibración son los siguientes:

a) Preparar dos soluciones de hipoclorito de sodio con concentraciones de 2ppm y 10ppm, sin HCl, utilizando bandas de medición o pastillas de DPD como referencia para verificarlas.

El DPD (N,N-dietil-p-fenilendiamina) es un medidor colorimétrico estándar que se aplica en el recipiente de control de un kit comercial. Al comparar el color adquirido con la escala, se determina la concentración de hipoclorito. (1ppm = 1mg/L)

b) Preparar triplicados de 500 ml de soluciones de hipoclorito de sodio con concentraciones de 2ppm y 10ppm a pH = 0.5, utilizando HCl. Utilice un embudo para agregar las soluciones a la celda de medida.

c) Colocar todos los electrodos en la celda y medir utilizando el programa en modo manual. Registre y guarde los valores de corriente obtenidos como datos de calibración.

d) Vacíe la celda y realice mediciones durante al menos cinco días.

IV. CONCLUSIONES

Se desarrolló un método electroquímico sencillo y eficaz utilizando electrodos de grafito para medir la concentración de ion hipoclorito en agua. La relación entre el tiempo de dosificación y la capacidad de control se consideró cuidadosamente para garantizar la eficiencia del proceso.

En la implementación del sistema, se optó por el hardware y software adecuados, como el microcontrolador Arduino UNO y el circuito integrado LMP91000, para lograr una supervisión y control efectivos.

El prototipo de dosificación automatizada a escala real construido tiene un potencial de aplicación valioso en la desinfección de tanques comunitarios.

Se recomienda la verificación de las pruebas mediante métodos de química analítica para evaluar la precisión y exactitud del sistema, que demostró tener una resolución de 2mg/L para medidas entre 2mg/L y 12 mg/L.

La posible implementación de este sistema en comunidades sin acceso continuo a agua potable, tras un análisis bioquímico exhaustivo, podría contribuir significativamente a mejorar la calidad de vida en dichas comunidades.

En resumen, se evaluó con éxito el método electroquímico para medir la concentración de ion hipoclorito en agua, y se diseñó un sistema de supervisión y control basado en este método. La cuidadosa elección de hardware y software, junto con las pruebas realizadas en un entorno controlado, respalda la efectividad del sistema en la medición y control precisos de la concentración de hipoclorito en agua.

REFERENCIAS

- [1] T. F. O'Brien, T. V Bommaraju, y F. Hine, «Introduction», en Handbook of Chlor-Alkali Technology: Volume I: Fundamentals, Volume II: Brine Treatment and Cell Operation, Volume III: Facility Design and Product Handling, Volume IV: Plant Commissioning and Support Systems, Volume V: Corrosion, Environmental Issues, an, Boston, MA: Springer US, 2005, pp. 1-16. doi: 10.1007/0-306-48624-5_1.
- [2] V. M. Witt y F. M. Reiff, «La desinfección del agua a nivel casero en zonas urbanas marginales y rurales», PAHO/HPE, Serie ambiental, n.o 13, pp. 41-67, 1993, [En línea]. Disponible en: http://usam.salud.gob.sv/archivos/pdf/agua/Desinfeccion_Agua_Casero_Zona_s_Urbanas_Marginales_Rurales.pdf
- [3] A. Zubiarrain-Laserna, S. Angizi, M. A. Akbar, R. Divigalpitiya, P. R. Selvaganapathy, y P. Kruse, «Detection of free chlorine in water using graphene-like carbon based chemiresistive sensors», RSC Adv., vol. 12, n.o 4, pp. 2485-2496, 2022, doi: 10.1039/D1RA08264G.
- [4] Y. Qin, H.-J. Kwon, M. M. R. Howlader, y M. J. Deen, «Microfabricated electrochemical pH and free chlorine sensors for water quality monitoring: recent advances and research challenges», RSC Adv., vol. 5, n.o 85, pp. 69086-69109, 2015, doi: 10.1039/C5RA11291E.
- [5] F. Koderá, S. Kishioka, M. Umeda, y A. Yamada, «Electrochemical Detection of Free Chlorine Using Anodic Current», Jpn J

Appl Phys, vol. 43, n.o No. 7A, pp. L913--L914, jun. 2004, doi: 10.1143/jjap.43.L913.

[6] AWWA, «ANSI/AWWA C651-14 Standard Disinfecting Water Mains». USA, 2015. doi: 10.12999/AWWA.C651.14.

[7] J. Clark, «Understanding On-line Amperometric Chlorine Measurements», Norcross, Georgia, 2014. [En línea]. Disponible en: <https://chemtrac.com/wp-content/uploads/Understanding-On-line-Amperometric-Chlorine-Measurements.pdf>

[8] AWWA, Water Quality & Treatment: A Handbook on Drinking Water. en Water Resources and Environmental Engineering Series. McGraw-Hill Education, 2010.

[9] MSAS, «Normas para Proyecto, Construcción, Reparación, Reforma y Mantenimiento de Edificaciones», Gaceta Oficial N° 4044, Caracas, Venezuela, p. 182, septiembre de 1988.

[10] PoolPAK, «New Free Chlorine Standards for Indoor Pools and Water Parks», 2013. [En línea]. Disponible en: www.poolpak.com

[11] AWWA, Water quality and treatment, 3.a ed. New York, USA: McGraw-Hill, 1971.

[12] L. W. Casson y J. W. Bess, «On-Site Sodium Hypochlorite Generation», Proceedings of the Water Environment Federation, vol. 2006, n.o 5, pp. 6335-6352, 2006, doi: 10.2175/193864706783761374.

[13] W. Lauer, M. G. Barsotti, y D. K. Hardy, Chemical Feed Field Guide for Treatment Plant Operators. American Water Works Association, 2009.

[14] World Health Organization, «Guidelines for safe recreational water environments: Volume 2. Swimming pools and similar environments», World Health Organization, vol. 2, p. 146, 2006.

[15] K. Ogata, Ingeniería de Control Moderna. Madrid, España: PEARSON EDUCACIÓN, S.A., 2003.

[16] K. L. S. Sharma, Overview of Industrial Process Automation. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2017.

[17] S. Bhunia, S. J. A. Majerus, y M. Sawan, Implantable Biomedical Microsystems. Waltham, MA: William Andrew Publishing - Elsevier, 2015.

[18] Texas Instruments, «Sensor AFE System: Configurable AFE Potentiostat for Low-Power Chemical-Sensing Applications, N° LMP91000», Texas, dic. 2014.

[19] H. Kabir, P. Y. Ma, N. Renn, N. W. Nicholas, y I. F. Cheng, «Electrochemical determination of free chlorine on pseudo-graphite electrode», Talanta, vol. 205, p. 120101, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2019.06.101>.

[20] E. Pungor, É. Szepesváry, y P. Szepesváry, «Voltammetric determination of the chlorine content of aqueous solutions, using a silicone-rubber based graphite electrode», Talanta, vol. 17, n.o 4, pp. 334-338, 1970, doi: [https://doi.org/10.1016/0039-9140\(70\)80221-1](https://doi.org/10.1016/0039-9140(70)80221-1).

[21] W. Ahrens, «A process model for a continuous stirred tank reactor», University of Arizona, 1967.

[22] M. Mulholland, Applied Process Control: Essential Methods. Weinheim, Germany: Wiley-VCH, 2016.