

Sistema de desinfección de agua pluvial mediante control PI de la concentración de cloro

Rainwater disinfection system using PI control of chlorine concentration

Javier E. Abitia C.¹, Jesús M. Lafarga C.¹, María D. López O.¹, David E. Castro P.¹, Leonel E. Amabilis S.¹, Julio C. Picos P.¹

Autor de correspondencia: delia.lo@culiacan.tecnm.mx

Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Culiacán, Programa Académico de Maestría en Ciencias de la Ingeniería.

Resumen

El acceso al agua potable continúa siendo una problemática prioritaria en comunidades rurales de México, particularmente en regiones serranas donde la infraestructura hidráulica es limitada y el abastecimiento convencional es intermitente. En este contexto, la captación de agua pluvial representa una alternativa viable. Sin embargo, para garantizar la inocuidad, se requiere de procesos de desinfección. En este trabajo se presenta el diseño, modelado matemático, implementación y simulación de un sistema de cloración de agua pluvial con control proporcional-integral (PI), instrumentado mediante sensores, actuadores electromecánicos y un microcontrolador de hardware abierto, así como una interfaz gráfica de usuario para monitoreo y control. El sistema se modela a partir de balances de masa para el nivel hidráulico y la concentración de cloro, obteniendo un modelo dinámico no lineal que posteriormente se linealiza y discretiza para su implementación digital. Los resultados muestran que el controlador PI permite mantener la concentración de cloro residual dentro de rangos normativos ante perturbaciones hidráulicas, evidenciando la viabilidad técnica y social del sistema como alternativa de potabilización básica en contextos rurales, en concordancia con los Programas Nacionales Estratégicos (PRONACES) de la SECIHTI.

Palabras clave: Agua pluvial, cloración, control PI, modelado matemático, PRONACES, interfaz gráfica.

Abstract

Access to safe drinking water remains a priority challenge in rural communities of Mexico, particularly in mountainous regions with limited hydraulic infrastructure. In this context, rainwater harvesting represents a feasible alternative; however, its safe use requires technically sound disinfection processes. This work presents the design, mathematical modelling, implementation, and simulation of a rainwater chlorination system with proportional-integral (PI) control, instrumented through sensors, electromechanical actuators, an open-hardware microcontroller, and a graphical user interface for monitoring and control. The system is modelled using mass balance equations for hydraulic level and chlorine concentration, resulting in a nonlinear dynamic model that is subsequently linearized and discretized for digital implementation. Results show that the PI controller maintains residual chlorine concentration within regulatory limits under hydraulic disturbances, demonstrating the technical and social feasibility of the system as a basic water treatment alternative aligned with SECIHTI guidelines and the PRONACES framework.

Keywords: Pluvial water, chlorination, PI control, mathematical modelling, PRONACES, graphics.

Recibido: 06/04/2026; Aceptado: 24/04/2026; Publicado 30/04/2026

Introducción

El acceso desigual al agua potable constituye una de las problemáticas estructurales más relevantes en México, particularmente en comunidades rurales y serranas donde la dispersión poblacional, la topografía y la limitada inversión pública dificultan el desarrollo de infraestructura hidráulica convencional [1-2]. En estas regiones, el abastecimiento de agua depende frecuentemente del acarreo, del almacenamiento doméstico sin tratamiento o del aprovechamiento directo de fuentes superficiales, lo que incrementa los riesgos sanitarios asociados al consumo de agua contaminada [3].

Ante este escenario, la captación de agua pluvial ha sido identificada como una alternativa descentralizada y de bajo costo para mejorar la disponibilidad hídrica en comunidades rurales [4]. No obstante, diversos estudios han demostrado que el agua de lluvia puede contaminarse durante los procesos de captación, conducción y almacenamiento, por lo que resulta indispensable incorporar procesos de tratamiento que garanticen su calidad sanitaria [5].

La cloración continúa siendo el método de desinfección más utilizado a nivel mundial debido a su alta efectividad frente a patógenos, su bajo

costo operativo y su capacidad para mantener un residual desinfectante durante el almacenamiento [6]. Sin embargo, en sistemas rurales de pequeña escala la dosificación de cloro suele realizarse de forma empírica, sin criterios técnicos ni mecanismos de control, lo que puede derivar en subdosificación con riesgo microbiológico o sobredosificación con efectos adversos a la salud y rechazo del agua por parte de la población [7]. Esta problemática ha sido ampliamente documentada por organismos nacionales e internacionales [8].

A. Estado del arte

El uso de modelos matemáticos para describir sistemas de tratamiento de agua ha sido una práctica ampliamente adoptada en la ingeniería ambiental y de procesos [9]. En particular, los balances de masa constituyen una herramienta fundamental para representar la dinámica de sistemas hidráulicos y de reacción química, como los procesos de cloración [10].

En el ámbito del control automático, diversos estudios han demostrado que los controladores PI y PID permiten regular

eficazmente la dosificación de cloro en plantas de tratamiento a gran escala, reduciendo la variabilidad del cloro residual ante perturbaciones en el caudal y la demanda [11-12]. Sin embargo, la mayoría de estos trabajos se enfocan en infraestructuras centralizadas con tecnología propietaria y altos costos de implementación [13].

En años recientes, se han reportado esfuerzos por aplicar control automático en sistemas de tratamiento descentralizados utilizando plataformas de hardware abierto, como Arduino, debido a su bajo costo, flexibilidad y facilidad de programación [14]. No obstante, muchos de estos desarrollos carecen de un modelado matemático riguroso o de una justificación formal de las decisiones de diseño y control [15].

Este trabajo se posiciona en este contexto, proponiendo un sistema de cloración de agua pluvial con control proporcional-integral (PI), plenamente fundamentado desde el punto de vista hidráulico, químico, matemático y de control automático, con énfasis en su implementación práctica y su alineación con las prioridades nacionales establecidas por la Secretaría de Ciencias, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) y los Programas Nacionales Estratégicos (PRONACES).

B. Justificación

El presente proyecto se alinea directamente con los lineamientos de la SECIHTI, cuyo enfoque promueve el desarrollo de conocimiento científico y tecnológico orientado a la atención de problemáticas nacionales prioritarias con impacto social y territorial [16], centrándose en los ejes estratégicos mostrados en la *Figura 1*.

En particular, el trabajo se inscribe en el marco del PRONACES Agua, que reconoce el acceso al agua potable como un derecho humano y una condición indispensable para la salud, la equidad social y el desarrollo sostenible [17].

En comunidades rurales, la falta de soluciones tecnológicas apropiadas para el tratamiento del agua limita el ejercicio efectivo de este derecho [1]. La captación de agua pluvial representa una alternativa pertinente; sin embargo, su consolidación como fuente segura de abastecimiento requiere sistemas de tratamiento confiables, reproducibles y acordes a las capacidades técnicas locales [19].

La consolidación del proyecto resulta viable y estratégica, ya que integra principios de ingeniería de control, modelado matemático e instrumentación con tecnologías de bajo costo y hardware abierto.

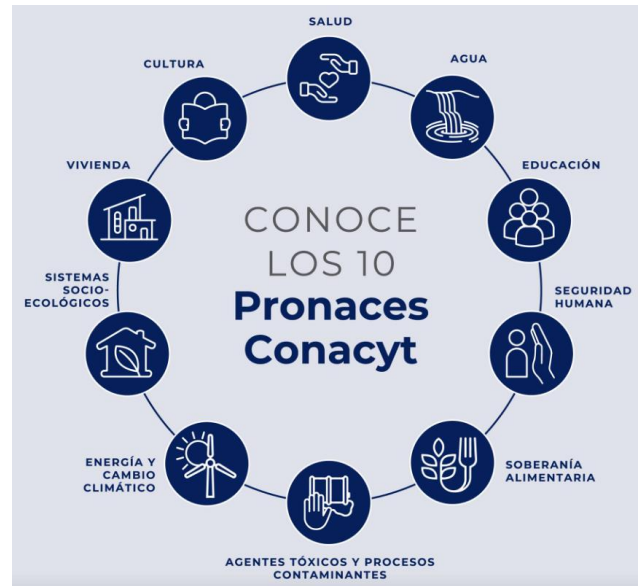


Figura 1. Programas Nacionales Estratégicos (PRONACES) impulsados por SECIHTI [18].

La implementación de un controlador PI permite regular automáticamente la dosificación de cloro en función del volumen de agua almacenado, garantizando concentraciones de cloro residual dentro de los rangos establecidos por la normativa sanitaria vigente [20]. Esta automatización reduce la dependencia de la operación manual y mejora la confiabilidad del sistema, aspectos clave en contextos rurales [11].

Adicionalmente, el desarrollo de una interfaz gráfica de usuario facilita la apropiación social del sistema, permitiendo que personas sin formación especializada monitoreen y operen el proceso de cloración de manera segura [21]. Este enfoque es consistente con los principios de soberanía tecnológica, accesibilidad y transferencia de conocimiento promovidos por la SECIHTI [16].

Fundamentación Teórica

A. Cloración del agua

La cloración es un proceso de desinfección basado en la oxidación de microorganismos patógenos mediante especies derivadas del cloro, como el ácido hipocloroso. Su efectividad depende de la concentración, el tiempo de contacto y las condiciones fisicoquímicas del agua [22].

B. Floración y control microbiológico

En sistemas de almacenamiento, la presencia de nutrientes, luz y temperaturas adecuadas favorece la floración algal y bacteriana. El mantenimiento de un residual de cloro inhibe estos procesos, justificando su control continuo [23].

C. Sensores, transductores y señales

Los sensores ultrasónicos permiten medir el nivel de agua sin contacto directo, reduciendo problemas de corrosión y contaminación [24]. Estas señales analógicas deben convertirse a formato digital para su procesamiento, lo que requiere una adecuada selección de resolución y frecuencia de muestreo [25].

D. Muestreo y control digital

De acuerdo con el teorema de Nyquist, la frecuencia de muestreo debe ser al menos el doble de la frecuencia máxima de la señal para evitar aliasing [26]. En sistemas de control digital, una mala selección de la frecuencia de muestreo puede degradar el desempeño del controlador [27].

E. Control proporcional–integral

El controlador PI combina una acción proporcional, que reduce el error instantáneo, y una acción integral, que elimina el error en estado estacionario [28]. Su simplicidad, robustez y bajo requerimiento computacional lo hacen adecuado para aplicaciones rurales [29].

Metodología

El sistema de la *Figura 2* se modela mediante balances de masa aplicados a dos tanques acoplados hidráulica y químicamente. El balance de masa asociado al nivel de agua permite describir la dinámica del volumen almacenado en cada tanque, mientras que el balance de masa del cloro contempla los procesos de dosificación, mezcla y dilución del desinfectante dentro del sistema [30]. El modelo dinámico resultante presenta características no lineales propias de los sistemas hidráulicos acoplados, por lo que, para efectos de análisis y diseño de control, se linealiza alrededor de un punto de operación representativo que corresponde a las condiciones nominales de funcionamiento del prototipo. [29]

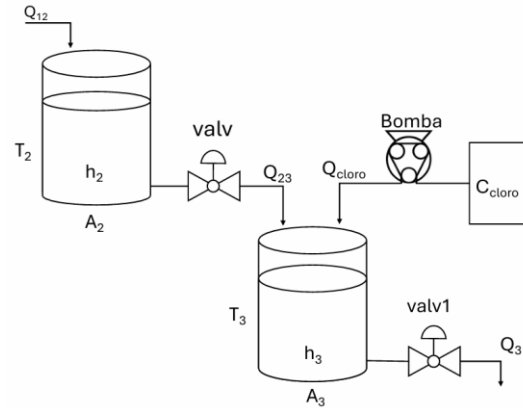


Figura 2. Diagrama de representación de sistema de cloración.

Donde:

- Tanque de recolección T1: Funciona como depósito de captación inicial de agua pluvial, cuenta con un filtro inicial para la retención de partículas gruesas, hojas y sedimentos sólidos. Permite una primera etapa de sedimentación antes de transferir el flujo hacia el tanque intermedio T2. (Este sistema no está contemplado en el modelado).
- Tanque de almacenamiento T2: Depósito intermedio con un área transversal A_2 y un nivel de agua variable h_2 . Recibe el flujo de entrada Q_{12} proveniente del tanque de recolección T1. Su función es almacenar temporalmente el volumen transferido, estabilizar el caudal antes de la etapa de mezcla y cloración, y servir como punto de control para la gestión del volumen disponible en el sistema.
- Tanque de mezcla y cloración T3: Depósito inferior para el proceso de desinfección del agua. Tiene un área transversal A_3 y un nivel de agua variable h_3 . Recibe el flujo Q_{23} proveniente del tanque de almacenamiento T2, así como el caudal de dosificación de cloro Q_{cloro} . En este tanque se realiza la mezcla y homogenización del desinfectante con el volumen almacenado, permitiendo el control preciso de la concentración. El monitoreo del nivel h_3 permite regular el volumen tratado y gestionar el flujo de salida Q_3 .
- Actuadores de flujo (valv, valv1): El sistema cuenta con dos actuadores de tipo bola para el control del flujo hidráulico. La válvula *valv*, regula el caudal transferido Q_{23} entre los tanques T2 y T3. Su apertura es controlada mediante una señal PWM, donde un valor de 0 representa válvula completamente cerrada y 255 completamente abierta, permitiendo un control proporcional. Por otro lado, la válvula *valv1* opera en modo ON/OFF y controla el caudal de salida Q_3 hacia el usuario.

Posteriormente, el modelo se discretiza para su implementación en un microcontrolador Arduino DUE. El sistema integra sensores ultrasónicos, electroválvulas, una bomba peristáltica y una interfaz gráfica de usuario desarrollada para el monitoreo en tiempo real y el registro de datos [25].

A. Implementación de la interfaz gráfica de usuario

La interfaz gráfica de usuario (GUI) fue desarrollada como un componente integral del sistema de cloración, con el objetivo de facilitar el monitoreo, la supervisión y la interacción del usuario con el proceso de potabilización. La incorporación de la interfaz responde a la necesidad de garantizar una operación segura y comprensible del sistema, particularmente en contextos comunitarios donde los usuarios no necesariamente cuentan con formación técnica especializada, alineándose con los principios de accesibilidad y apropiación social de la tecnología promovidos por la SECIHTI y los PRONACES [18].

La GUI permite la visualización en tiempo real de las principales variables de operación del sistema, incluyendo los niveles de agua en los tanques, el estado de las válvulas solenoides, la activación de la bomba peristáltica y el modo de operación seleccionado. Estas variables se actualizan de manera continua mediante la comunicación entre el microcontrolador Arduino DUE y la plataforma de desarrollo de la interfaz, lo que permite al usuario identificar de forma inmediata el estado del sistema y detectar posibles condiciones anómalas [21].

La distribución de pines y la interconexión de sensores y actuadores con el microcontrolador se presentan en la *Tabla 1*, donde se detallan las entradas y salidas digitales y analógicas utilizadas para la instrumentación y control del sistema.

Tabla 1. Tabla de asignación de pines y conexión de sensores y actuadores al Arduino DUE.

Conector	Elemento	Pines Sensor	Pines Arduino
Conector 1	Sensor (#1) infrarrojo F249 (Contador de gotas)	VCC	3.3V
		GND	GND
		D0	-
		A0	A4
Conector 1	Sensor (#2) Sensor ultrasónico RCWL-9610	VCC	3.3V
		Trig/Sig	A0
		Echo	-
		GND	GND
Conector 1	Sensor (#3) ultrasónico RCWL-9610	VCC	3.3V
		Trig/Sig	A2
		Echo	-
		GND	GND
Conector 2	Electroválvula Tanque 2	SEL-PWM2	D5
		GND	GND
Conector 3	Electroválvula Tanque 3	SEL-O3	D8
		GND	GND
Dosificación de cloro	Bomba Peristáltica	PWM	D7
		GND	GND

El diseño de la interfaz se realizó bajo criterios de simplicidad, claridad visual y organización jerárquica de la información, priorizando el uso de indicadores gráficos intuitivos, etiquetas descriptivas y escalas fácilmente interpretables. Esta decisión metodológica busca reducir la probabilidad de error humano durante la operación del sistema y

facilitar su adopción en entornos rurales o periurbanos, donde el acceso a capacitación técnica especializada puede ser limitado [3].

La arquitectura de interconexión del sistema se muestra en la *Figura 3*, donde se detalla la integración estructural y funcional entre los elementos de sensado, los actuadores y el módulo de procesamiento encargado de la ejecución del algoritmo de control.

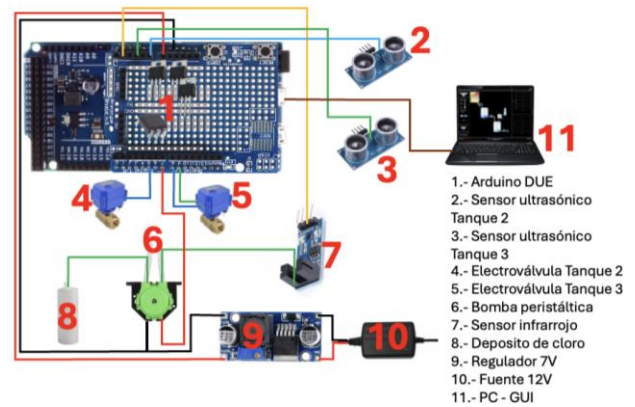


Figura 3. Diagrama general de interconexión del sistema.

Desde el punto de vista funcional, la interfaz gráfica integra dos modos de operación: manual y automático. En el modo automático, el sistema ejecuta de manera autónoma el algoritmo de control PI previamente diseñado, ajustando la dosificación de cloro en función de las variables medidas y del valor de referencia establecido. En el modo manual, el usuario puede intervenir directamente sobre los actuadores, permitiendo realizar tareas de mantenimiento, pruebas de funcionamiento o ajustes operativos específicos sin comprometer la integridad del sistema [28].

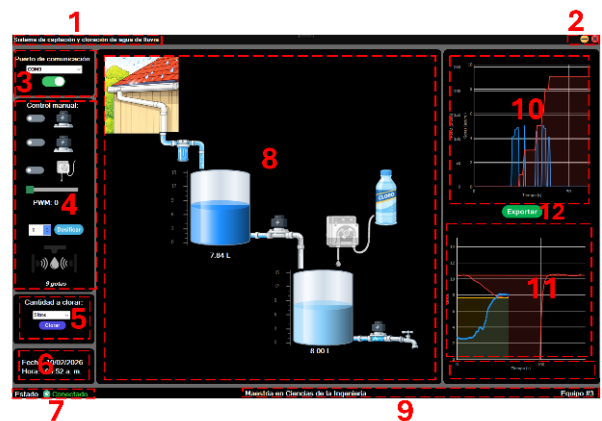


Figura 4. Descripción de la interfaz gráfica de usuario.

La *Figura 4* muestra la interfaz del sistema de captación y cloración de agua de lluvia, la cual integra distintos módulos funcionales para supervisión y control. En la parte superior se encuentra la barra de

título (1), que identifica el sistema, junto con los controles de ventana para minimizar y cerrar (2). En el lado izquierdo se ubica el panel de comunicación (3), que permite establecer conexión con el hardware mediante un puerto serial, seguido del panel de control manual (4), donde se operan directamente actuadores como válvulas o bombas mediante interruptores y señal PWM. Debajo, el panel de control de dosificación (5) permite definir la cantidad de agua a clorar, mientras que la fecha y hora del sistema (6) facilitan la trazabilidad de los datos y el estado de conexión (7) indica si el sistema se encuentra operativo. En la parte central (8) se presenta una representación gráfica del proceso físico, incluyendo tanques, tuberías y dosificación de cloro, lo que permite visualizar el comportamiento del sistema en tiempo real. En la zona inferior se incluye el pie de página institucional (9), que contextualiza el desarrollo dentro del ámbito académico. Finalmente, en el lado derecho se muestran las gráficas de monitoreo: la gráfica superior (10) correspondiente al proceso de cloración y la gráfica inferior (11) a los niveles de los tanques, además del botón de exportación de datos (12), que permite almacenar la información generada para su análisis posterior.

La comunicación entre la interfaz gráfica mostrada y el microcontrolador se implementó mediante un protocolo serial configurado con una velocidad de transmisión de 9600 baudios, lo que permite el intercambio bidireccional de información de forma confiable y en tiempo real. Este esquema de comunicación facilita tanto el envío de comandos desde la interfaz hacia el sistema embebido como la recepción de datos de proceso para su visualización y almacenamiento, contribuyendo a una arquitectura flexible y escalable [25]. Adicionalmente, la interfaz incorpora funciones de registro y almacenamiento de datos operativos, tales como niveles de agua, tiempos de activación de los actuadores y eventos de dosificación de cloro.

Tabla 2. Especificaciones técnicas del microcontrolador Arduino DUE.

Características	Arduino DUE
CPU	ARM Cortex-M3 (ATSAM3X8E)
Números de núcleos	1
Frecuencia del procesador	84 MHz
Tipo de aritmética	Enteros (32 bits)
Memoria Flash total	512 KB
Memoria RAM total	96 KB (64 KB SRAM + 32 KB SRAM)
Temporizadores de CPU (32 bits)	9 (Contadores/Temporizadores)
Resolución del ADC	12 bits (0-4095)
Pines de entrada ADC	12 (A0-A11)
Tiempo de conversión ADC	~1 µs
Módulos PWM	12 canales PWM
Salidas DAC	2 (12-bit)
Voltaje de operación	3.3 V
Pines digitales de E/S	54 (12 PWM)

Estos registros constituyen una herramienta fundamental para el análisis del desempeño del sistema, la validación experimental del modelo matemático y la comparación entre los resultados esperados y los observados durante la operación continua [21].

A fin de sustentar técnicamente la selección del microcontrolador implementado, la *Tabla 2* resume sus especificaciones más relevantes, incluyendo arquitectura de procesamiento, frecuencia de reloj, resolución del ADC y recursos de comunicación, elementos determinantes para la ejecución del algoritmo de control y la adquisición de señales.

Desde una perspectiva metodológica, la interfaz gráfica no se concibe como un elemento accesorio, sino como parte esencial del sistema ciberfísico de cloración, ya que fortalece la interacción humana-máquina, incrementa la confiabilidad operativa y contribuye a la sostenibilidad del sistema a largo plazo. Asimismo, la disponibilidad de información clara y accesible para el usuario final favorece la toma de decisiones informadas y la consolidación del sistema como una solución tecnológica viable para la potabilización descentralizada de agua pluvial [31].

B. Desarrollo del modelo matemático de segundo orden

1. Dinámica Principal 1 (Nivel h_3)

La variación del volumen acumulado en T_3 es igual al flujo que ingresa desde el sistema del T_2 . El cambio de nivel en T_3 (h_3) depende directamente del caudal transferido Q_{23} desde el T_2 .

$$A_3 \frac{dh_3}{dt} = Q_{23} \quad (1)$$

2. Desglose de Términos 1 (2)

Para obtener un modelo preciso, se sustituye el término de flujo Q_{23} por la Ley de Torricelli. Esta expresión integra las restricciones mecánicas del actuador y la carga hidráulica diferencial entre ambos recipientes.

$$\frac{dh_3}{dt} = \frac{C_d * A_0 * \sqrt{2 * g}}{A_3} * \sqrt{h_2} \quad (2)$$

3. Forma Linealizada 1 por Series de Taylor y FT

Esta representación matemática (3) permite observar cómo cada componente físico influye en la velocidad de llenado del sistema.

La linealización para obtener $G_1(s)$, se realiza considerando que el punto de operación de la válvula es $P_{valv} = 1$ (completamente abierta).

$$\frac{d\bar{h}_3}{dt} = \left[\frac{C_d * A_0 * \sqrt{2 * g}}{A_3} * \bar{h}_2 \right] * \left[\frac{1}{2\sqrt{\bar{h}_{20}}} * \bar{h}_2 \right] \quad (3)$$

El primer término después de la igualdad representa el caudal medio de entrada a T_3 y el segundo término la resistencia variable en el flujo.

Calculamos el caudal medio (4) de las pruebas:

$$\bar{Q}_{23} = \frac{Vt}{Te} = \frac{5000 \text{ cm}^3}{55s} = 90.90 \text{ cm}^3/s \quad (4)$$

Luego, la Resistencia Hidráulica (5), que es la oposición al flujo:

$$R_h = \frac{\Delta H_3}{\bar{Q}_{23}} = \frac{5.03 \text{ cm}}{90.90 \text{ cm}^3/s} = 0.0553 \text{ s/cm}^2 \quad (5)$$

$$K1 = \bar{Q}_{23} * R_h = 5.03 \quad (6)$$

El valor es 5.03. Confirma que, por la apertura total de válvula, el nivel en el tanque sube los 5.03 cm de las pruebas.

Tao (7) depende de la geometría del tanque y la resistencia hidráulica, esta define la velocidad de respuesta.

$$\tau_s = A_3 * R_h \quad (7)$$

$$\tau_s = 1028.8 \text{ cm}^2 * 0.0553 \text{ s/cm}^2 = 56.89s \quad (8)$$

Si consideramos que a los 55 segundos de que el proceso terminó en las pruebas reales y se incrementó el nivel h_3 en 5.03 cm:

$$G_1(s) \approx \frac{K_1}{\tau_1 * s} \approx \frac{5.03}{55 * s} \approx \frac{1}{11 * s} \quad (9)$$

Tomamos el ultimo valor ya que la simulación representa de manera exacta el comportamiento físico. Este sistema se comporta como un integrador en donde por cada 11s que pasan el nivel incrementa 1 cm con Pvalv completamente abierta.

4. Sintonización para control P para control H_3

Al ser el sistema $K > 0$ es estable, por lo que la ganancia (10) puede incrementar y seguir estable, además al ser un sistema implícito de integración agregar otra no ayudaría al sistema y los 255 ayuda a compensar el PWM de salida para Pvalv.

$$k_{p1} = 255 \quad (10)$$

5. Discretización para el control de h_3

Utilizando el método de Retención de Orden Cero ZOH y $T_s = 1s$, y tao es 11 veces mayor, cumple con el teorema de Nyquist-Shannon y el ancho de banda común en control.

$$G(z) = (1 - 1z^{-1})Z \left\{ \frac{G_1(s)}{s} \right\} \quad (11)$$

$$G(z) = \frac{z-1}{z} * \frac{1}{11} * \frac{T_s z}{(z-1)^2} = \frac{T_s}{11(z-1)} \quad (12)$$

$$G_1(z) = \frac{0.09091}{z-1} \quad (13)$$

La dinámica del tanque (14) se describe como:

$$h_3[k+1] = h_3[k] + 0.09091 * \left(\frac{u[k]}{255} \right) \quad (14)$$

6. Dinámica principal 2 (Concentración C_3):

El cambio en la cantidad de cloro acumulado (15) es igual a lo que inyecta la bomba peristáltica Q_{cloro} , menos lo que se diluye por el flujo de agua limpia Q_{23} . Al ser un proceso de llenado, la masa total es el producto del volumen V_3 por la concentración C_3 .

$$\frac{d(V_3 C_3)}{dt} = Q_{cloro} * C_{cloro} - Q_{23} * C_3 \quad (15)$$

7. Desglose de Términos 2 (16)

Aplicando la regla del producto a la derivada y considerando que el cambio de volumen en el tiempo es igual al caudal de agua que entra Q_{23} , obtenemos la dinámica de la concentración.

$$\frac{dC_3(t)}{dt} = \frac{Q_{cloro} * C_{cloro} - Q_{23} * C_3}{V(t)} \quad (16)$$

8. Forma Linealizada 2 por Series de Taylor y FT

Linealizamos la ecuación alrededor del volumen medio (17) de la prueba $V_3=2500 \text{ cm}^3$. La relación entre la inyección y la concentración final se expresa como un sistema de primer orden.

$$\frac{d\bar{C}}{dt} = - \left(\frac{\bar{Q}_{23}}{\bar{V}_3} \right) * \bar{C} + \left(\frac{1}{\bar{V}_3} \right) * \bar{Q}_{cloro} \quad (17)$$

$$G_2(s) = \frac{C_3(s)}{Q_{cloro}(s)} = \frac{\frac{C_{cloro}}{Q_{23}}}{\frac{\bar{V}_3}{Q_{23}} * s + 1} = \frac{K_2}{\tau_2 + 1} \quad (18)$$

K_2 (19) define cuánto aumenta la concentración por cada unidad de flujo de cloro inyectado en estado estacionario, contrarrestando la dilución del flujo Q_{23} .

$$K_2 = \frac{1}{\bar{Q}_{23}} = \frac{1}{0.09091 \text{ L/s}} \approx 11 \quad (19)$$

Tao 3 (20) representa el tiempo de renovación del tanque, definiendo qué tan rápido se homogeniza la mezcla.

$$\tau_3 = \frac{\bar{V}_3}{\bar{Q}_{23}} = \frac{2500 \text{ cm}^3}{90.91 \text{ cm}^3/\text{s}} = 27.5 \text{ s} \quad (20)$$

9. Sintonización para control PI para control C_3

Para la sintonización se utiliza la representación en paralelo del control PI (21).

$$C(s) = P + \frac{I}{s} \quad (21)$$

El valor P da respuesta inmediata al error y como el valor de referencia a medir es bajo y la salida es a escala 255, utilizamos un valor alto para P.

$$I = \frac{P}{\tau_2} = \frac{70.83}{27.5} = 2.57 \quad (22)$$

10. Discretización para el control de C_3

Aplicando la misma metodología que en el sistema anterior ZOH.

Se calcula el polo discreto (23):

$$a = e^{-T_s/\tau_2} = 0.96433 \quad (23)$$

Cálculo de ganancia (24):

$$b = K_2(1 - a) = 0.3923 \quad (24)$$

Función de transferencia discreta (25) C_3 :

$$G_2(z) = \frac{0.3923}{z - 0.9643} \quad (25)$$

Sintonización con el método de cancelación de Polo-Cero (26):

$$C(z) = P + I * T_s \left(\frac{1}{z - 1} \right) \quad (26)$$

Se utilizaron los mismos valores de PI en lo continuo y discreto.

Ecuación diferencia de C_3 :

$$u[k] = u[k - 1] + 70.83 * e[k] - 68.26 * e[k - 1] \quad (27)$$

11. Acoplamiento de señal entre sistemas.

En T_3 , el flujo de agua proveniente de T_2 (Q_{23}) no solo aumenta el nivel, sino que actúa como un agente diluyente. La masa de cloro existente se distribuye en un volumen cada vez mayor de agua sin cloro, lo que genera una caída en la concentración medida (C_3).

- Concentración media en C_3 : 2.0mg/L
- Caudal medio de agua Q_{23} : 90.91cm³/s

$$K_{acople} = 2.0/90.91 = 0.022 \quad (28)$$

8. Matriz de transferencia

El modelo hidráulico desarrollado permitió describir adecuadamente la dinámica de los niveles de agua en los tanques T2 y T3 ante variaciones en los caudales de entrada y salida. Los resultados muestran que el nivel de agua en el tanque de almacenamiento responde de manera directa a la simulación del evento de lluvia, representado por el flujo de entrada Q , mientras que el tanque de mezcla presenta una respuesta amortiguada debido al acoplamiento hidráulico y a la regulación ejercida por las válvulas solenoides.

$$\begin{bmatrix} H_3(s) \\ C_3(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 11 * s & 11 \\ -0.02 & \frac{11}{27.5 * s + 1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{valv} \\ Q_{cloro} \end{bmatrix} \quad (29)$$

Las simulaciones realizadas evidencian que el sistema alcanza estados estacionarios estables bajo condiciones nominales de operación, lo que valida la formulación del balance de masa empleado. Asimismo, se observó que las perturbaciones en el flujo de entrada generan variaciones transitorias en los niveles, las cuales son absorbidas por el sistema sin comprometer el volumen operativo del tanque de cloración, condición necesaria para asegurar una dosificación adecuada del desinfectante.

9. Diagrama a Bloques.

La arquitectura de control del sistema se representa mediante el diagrama a bloques de la Figura 5. En este esquema se observa la interacción de dos lazos de control principales:

Lazo de nivel (h3): Implementa un control proporcional P(s) que regula la apertura de la válvula de entrada para alcanzar el nivel deseado en el tanque de mezcla, actuando sobre $G_1(s)$.

Lazo de concentración (C3): Utiliza un controlador PI(s) para gestionar la dosificación de cloro a través de $G_2(s)$, eliminando el error.

Acoplamiento (Kacop): Un elemento de acoplamiento, el cual modela cómo el flujo de agua limpia proveniente del primer tanque actúa

como una perturbación que diluye la masa de cloro en el tanque de mezcla.

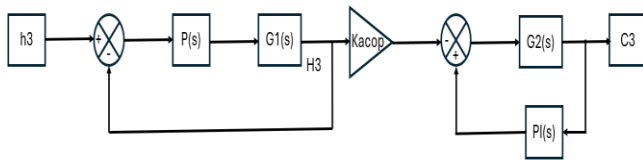


Figura 5. Representación en diagrama a bloques del sistema.

Resultados

Los resultados obtenidos se presentan de acuerdo con las etapas de desarrollo del sistema, abarcando el comportamiento del modelo hidráulico, la respuesta del sistema de cloración bajo control PI y el desempeño de la interfaz gráfica durante la operación del prototipo mostrado en la Figura 6. Esta organización permite analizar de manera integral el desempeño del sistema y contrastar los resultados experimentales con el comportamiento esperado a partir del modelo matemático.

Las simulaciones muestran que el controlador PI mantiene la concentración de cloro residual dentro de los rangos normativos aun ante perturbaciones hidráulicas. Las respuestas del sistema presentan estabilidad y tiempos de asentamiento adecuados, lo que valida el diseño del controlador [28].

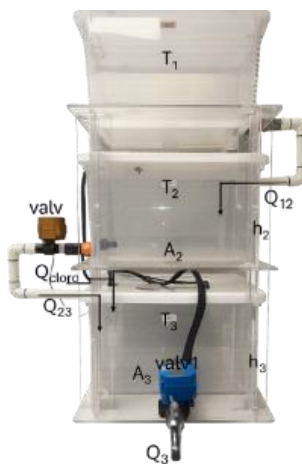


Figura 6. Prototipo de representación de sistema de cloración.

A. Gráficas y validación del modelo

Interpretación de Nivel H3 Continua:

- Respuesta en Lazo Abierto (H3 FT): Muestra el comportamiento natural del sistema con una constante de tiempo $\tau_1 = 11$ s. Es una respuesta lenta que tarda aproximadamente 55 segundos en estabilizarse.

- Respuesta en lazo cerrado (H3 LC): El controlador acelera drásticamente el proceso. Se observa un sobretiro inicial, que no respeta la dinámica real.
- Respuesta con Control PI (H3 PI): Se observa que sigue el comportamiento inicial límite del sistema, característico de una sintonía agresiva diseñada para alcanzar rápidamente el nivel necesario. El sistema elimina el error de estado estacionario, estabilizándose.
- El comportamiento del nivel en tiempo continuo se detalla en la Figura 7.

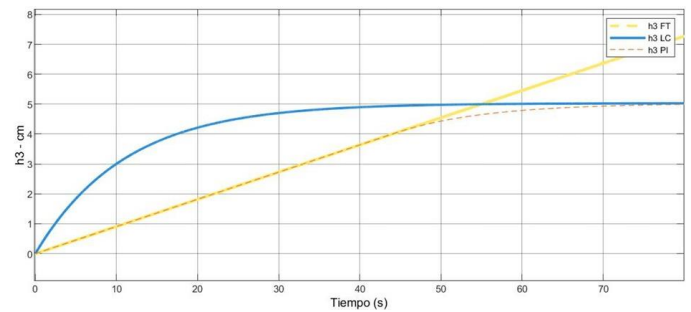


Figura 7. Comportamiento del cambio de volumen en T3 continuo.

Interpretación de Nivel H3 Discreta:

- Efecto de Muestreo: La gráfica presenta una forma escalonada, lo cual es la representación real de cómo el microcontrolador procesa la señal cada $T_s = 1$ s.
- Fidelidad: A pesar de la naturaleza discreta, la curva sigue fielmente la trayectoria del modelo continuo, validando que el tiempo de muestreo seleccionado es lo suficientemente rápido para la dinámica hidráulica del tanque.
- La Figura 8 ilustra la fidelidad del muestreo digital, validando que la frecuencia de 1 Hz es adecuada para la dinámica del sistema.

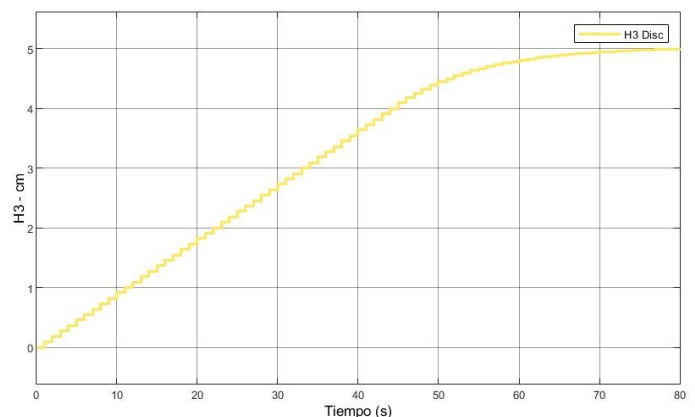


Figura 8. Comportamiento del cambio de volumen en T3 discreto.

Interpretación de Concentración de Cloro C3 Continua:

- Respuesta del Proceso: Se observa en la *Figura 9* una curva suave que alcanza el setpoint de 2.0 mg/L.
- Acoplamiento: El controlador logra compensar el efecto de dilución ($K_{acople} = -0.02$) provocado por la entrada de agua desde el Tanque 2. La constante de tiempo $\tau_3 = 27.5$ s se ve reducida por la acción del control integral.

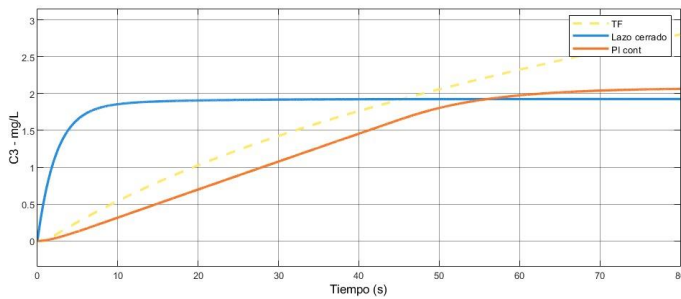


Figura 9. Comportamiento en la concentración de cloro en tiempo continuo.

Interpretación de Concentración de Cloro C3 Discreta:

- Comportamiento Oscilatorio: La *Figura 10* muestra un patrón de "diente de sierra". Esto se debe a la naturaleza de la bomba peristáltica controlada por PWM y al umbral de activación de esta.
- Interpretación Física: Los picos representan los pulsos de inyección de cloro. Debido a que el volumen de mezcla es pequeño (2500 cm^3 promedio), cada inyección causa un aumento rápido de concentración seguido de una dilución inmediata cuando la bomba se apaga.

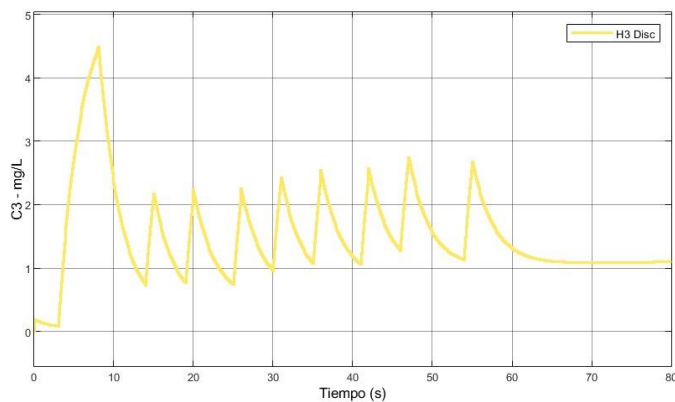


Figura 10. Comportamiento en la concentración de cloro en tiempo continuo.

Los resultados demuestran que el sistema es capaz de mantener las variables críticas dentro de los rangos de seguridad. La diferencia entre las gráficas continuas y discretas valida el impacto del tiempo de muestreo y la zona muerta de los actuadores, proporcionando un modelo fiel para el control automático de cloración en sistemas de recolección de agua pluvial.

Discusión

En comparación con sistemas reportados en la literatura, el sistema propuesto presenta un desempeño funcional equivalente en términos de monitoreo y control del proceso, pero con una ventaja significativa en la reducción de costos y en la accesibilidad del hardware empleado [13]. Esta característica resulta particularmente relevante en contextos donde la implementación de soluciones tecnológicas está limitada por restricciones económicas, lo que posiciona al sistema como una alternativa viable para aplicaciones en entornos de bajo recurso o comunidades con infraestructura limitada.

Adicionalmente, a diferencia de varios desarrollos previos que se enfocan únicamente en la automatización del proceso, el presente trabajo incorpora una interfaz gráfica de usuario (HMI), lo que mejora sustancialmente la interacción humano-máquina. Esta integración no solo facilita la supervisión en tiempo real y la toma de decisiones operativas, sino que también reduce la dependencia de personal altamente especializado, incrementando así la usabilidad y la adopción del sistema en escenarios reales.

Desde una perspectiva de impacto social, la propuesta se alinea de manera consistente con los principios promovidos por los Programas Nacionales Estratégicos (PRONACES), particularmente en lo relacionado con el acceso equitativo a tecnologías que contribuyan a la gestión sustentable de recursos hídricos [18]. En este sentido, el sistema no solo representa una contribución técnica en el ámbito de la instrumentación y el control, sino también una solución con potencial de transferencia tecnológica y aplicación directa en problemáticas prioritarias a nivel nacional.

No obstante, es importante señalar que, aunque el sistema demuestra un desempeño adecuado, existen áreas de mejora relacionadas con la robustez del control en condiciones dinámicas y la escalabilidad del sistema para aplicaciones de mayor capacidad. Estos aspectos abren oportunidades para trabajos futuros orientados a la optimización de algoritmos de control y a la integración de arquitecturas distribuidas más avanzadas.

Conclusiones

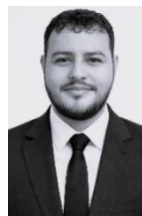
El sistema desarrollado demuestra la viabilidad técnica de implementar control automático de cloración en sistemas de captación de agua pluvial orientados a comunidades rurales. El modelado matemático, la estrategia de control PI y la interfaz gráfica permiten mantener condiciones sanitarias adecuadas y un seguimiento en tiempo real del proceso, favoreciendo el acceso equitativo al agua potable. El proyecto se alinea con los objetivos de la SECIHTI y el enfoque PRONACES, consolidándose como una propuesta tecnológica con impacto social.

Como trabajo futuro, se recomienda realizar un estudio de factibilidad técnica y económica que evalúe costos de implementación, mantenimiento y escalabilidad del sistema en contextos reales. Asimismo, se propone validar el prototipo en campo bajo distintas condiciones operativas, explorar estrategias de control más avanzadas que optimicen el consumo de desinfectante y la eficiencia energética, e incorporar un sensor de cloro que permita medir en tiempo real la concentración residual y retroalimentar el sistema de control para mejorar su precisión y robustez.

Referencias

- [1] Organización Mundial de la Salud (OMS). (2017). *Guidelines for drinking-water quality* (4th ed.). World Health Organization.
- [2] Organización de las Naciones Unidas. (2010). *Resolución 64/292: El derecho humano al agua y al saneamiento*. Asamblea General de las Naciones Unidas.
- [3] Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2022). *Estadísticas del agua en México, edición 2022*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- [4] Gould, J., & Nissen-Petersen, E. (1999). *Rainwater catchment systems for domestic supply: Design, construction and implementation*. Intermediate Technology Publications.
- [5] Texas Water Development Board. (2005). *The Texas manual on rainwater harvesting* (3rd ed.). State of Texas.
- [6] White, G. C. (2010). *Handbook of chlorination and chloramination practices* (2nd ed.). John Wiley & Sons.
- [7] Environmental Protection Agency (EPA). (2019). *Water treatment manuals: Disinfection*. U.S. Environmental Protection Agency.
- [8] USEPA. (2018). *Disinfection profiling and benchmarking technical guidance manual*. U.S. Environmental Protection Agency.
- [9] Chapra, S. C. (2008). *Surface water-quality modeling*. Waveland Press.
- [10] Fogler, H. S. (2016). *Elements of chemical reaction engineering* (5th ed.). Pearson Education.
- [11] Seborg, D. E., Edgar, T. F., Mellichamp, D. A., & Doyle, F. J. (2011). *Process dynamics and control* (3rd ed.). John Wiley & Sons.
- [12] Åström, K. J., & Hägglund, T. (2006). *Advanced PID control*. ISA – The Instrumentation, Systems, and Automation Society.
- [13] Kim, J., Park, J., & Lee, S. (2020). Automatic chlorine dosage control in small water supply systems. *Water Research*, 170, 115350. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.115350>
- [14] Li, X., Zhang, Y., & Wang, H. (2019). Residual chlorine control strategies for decentralized water treatment systems. *Journal of Water Supply: Research and Technology—AQUA*, 68(6), 455–466. <https://doi.org/10.2166/aqua.2019.082>
- [15] Metcalf & Eddy, Inc., Tchobanoglous, G., Stensel, H. D., Tsuchihashi, R., & Burton, F. L. (2014). *Wastewater engineering: Treatment and resource recovery* (5th ed.). McGraw-Hill Education.
- [16] Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI). (2024). *Lineamientos de la política nacional de ciencia, humanidades, tecnología e innovación*. Gobierno de México.
- [17] Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI). (2024). *Programas Nacionales Estratégicos (PRONACES): Agua*. Gobierno de México.
- [18] Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI). (2024). *Programas Nacionales Estratégicos (PRONACES)*. Gobierno de México. <https://secihti.gob.mx/pronaces/>
- [19] Spellman, F. R. (2013). *Handbook of water and wastewater treatment plant operations* (3rd ed.). CRC Press.
- [20] Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021. (2022). *Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua*. Diario Oficial de la Federación.
- [21] Pressman, R. S., & Maxim, B. R. (2014). *Software engineering: A practitioner's approach* (8th ed.). McGraw-Hill Education.
- [22] Snoeyink, V. L., & Jenkins, D. (1980). *Water chemistry*. John Wiley & Sons.
- [23] Reynolds, C. S. (2006). *The ecology of phytoplankton*. Cambridge University Press.
- [24] Elecrow. (2022). *HC-SR04 ultrasonic sensor datasheet*. Elecrow Electronics.
- [25] Arduino. (2023). *Arduino DUE technical specifications*. <https://docs.arduino.cc/hardware/duel>
- [26] Shannon, C. E. (1949). Communication in the presence of noise. *Proceedings of the IRE*, 37(1), 10–21. <https://doi.org/10.1109/JRPROC.1949.232969>
- [27] Franklin, G. F., Powell, J. D., & Workman, M. L. (2015). *Digital control of dynamic systems* (3rd ed.). Pearson.
- [28] Ogata, K. (2010). *Modern control engineering* (5th ed.). Prentice Hall.
- [29] Bequette, B. W. (2003). *Process control: Modeling, design, and simulation*. Prentice Hall.
- [30] Montgomery, J. M. (2008). *Water treatment principles and design*. Wiley.
- [31] Organización Mundial de la Salud (OMS). (2019). *Small drinking-water supplies: Policies and practice*. World Health Organization.
- [32] Dorf, R. C., & Bishop, R. H. (2017). *Modern control systems* (13th ed.). Pearson.

Semblanza Autores



Javier Eduardo Abitia Camacho, Ingeniero en Procesos Industriales por la Universidad Autónoma de Sinaloa, Campus Culiacán (2017), estudiante de la Maestría en Ciencias de la Ingeniería, Tecnológico Nacional de México, campus Culiacán.



Jesús Manuel Lafarga Chávez, Ingeniero Mecatrónico (2015) y estudiante de la Maestría en Ciencias de la Ingeniería, Tecnológico Nacional de México, campus Culiacán.



María Delia López Ortiz, Ingeniera Ambiental (2019) y estudiante de la Maestría en Ciencias de la Ingeniería, Tecnológico Nacional de México, campus Culiacán.



David Enrique Castro Palazuelos, Ingeniero Electrónico por el Tecnológico Nacional de México, Campus Culiacán (2000). Maestro en Ciencias en Telemática por la Universidad de Colima (2004) y Doctor en Ciencias en Ingeniería Eléctrica con especialización en Telecomunicaciones por el CINVESTAV del IPN, Unidad Guadalajara (2015).



Leonel Ernesto Amabilis Sosa, Doctor en Ingeniería Ambiental-Especialidad Aguas. Sus líneas de investigación incluyen: Optimización de procesos biológicos para el tratamiento de aguas residuales con compuestos recalcitrantes, Movilidad y transporte de contaminantes y Evaluación de procesos para la recuperación de nutrientes



Julio Cesar Picos Ponce, Ingeniero en Electrónica por el Tecnológico Nacional de México, Campus Culiacán (2003). Maestro en Ciencias en Ingeniería Eléctrica por el Centro de Investigación y Estudios Avanzados, IPN, Unidad Guadalajara (2005). Doctor en Ciencias en Sistemas de Información por la Universidad Autónoma de Sinaloa, Campus Culiacán (2017).