

# Sistema inteligente de monitoreo y adquisición de datos en tiempo real para un intercambiador de calor de tubos concéntricos aplicado a Industria 4.0

Intelligent real time monitoring and data acquisition system for a concentric tube heat exchanger applied to industry 4.0

Erick Omar Castañeda Magadán<sup>1</sup>, Víctor Manuel Zezatti Flores<sup>2\*</sup>,  
Miriam Navarrete Procopio<sup>1</sup>, Carlos Alberto Ochoa Ortiz<sup>3</sup>, Ángel Tlatelpa Becerro<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Facultad de Ciencias Químicas e Ingenierías (FCQeI), UAEM

Av. Universidad No. 1001, Col Chamilpa, Ed. 35, 36, Cuernavaca, Morelos, México

<sup>2</sup>Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas (CIICAp), UAEM

Av. Universidad No. 1001, Col Chamilpa, Ed. 48, Cuernavaca, Morelos, México

<sup>3</sup>Universidad Autónoma de Ciudad Juárez (UACJ)

Av. Plutarco Elías Calles No.1210 Fovisste Chamizal, Ciudad Juarez, Chihuahua, México

<sup>4</sup>Escuela de Estudios Superiores de Yecapixtla (EESY), UAEM

Avenida Félix Árias, Yecapixtla, Morelos, México

\*[zezatti@uaem.mx](mailto:zezatti@uaem.mx)

## PALABRAS CLAVE: RESUMEN:

Intercambiador de calor, GUI, IoT, control, adquisición

El presente trabajo muestra el desarrollo de un sistema de control, monitoreo y adquisición de datos (temperatura y flujo volumétrico) de la transferencia de energía en un Intercambiador de Calor de Tubos Concéntricos (ICTC), enfocado en la industria 4.0 (IoT). El sistema integra una Interfaz Gráfica de Usuario (GUI) que permite el monitoreo y adquisición de las variables en tiempo real, así como el control operativo de manera precisa. Esta interfaz facilita una interacción intuitiva con el sistema, mejorando la eficiencia operativa del equipo y reduciendo el control manual. El sistema tiene el propósito académico de proporcionar a los estudiantes del Laboratorio de Operaciones Unitarias (LOU), la oportunidad de operar y analizar el comportamiento del equipo y transferencia de energía en tiempo real.

## KEYWORDS:

Heat exchangers, GUI, IoT, Control, Acquisition

## ABSTRACT:

The present work shows a control, monitoring, and data acquisition system (temperature and volumetric flow) was developed for energy transfer in a concentric tube heat exchanger (ICTC), focused on industry 4.0 (IoT). The system integrates a graphical user interface (GUI) that allows monitoring, and acquisition of variables in real time, as well as precise operational control. This interface facilitates intuitive interaction with the system, improving the operational efficiency of the equipment and decreasing manual control. The system has the educational purpose of providing students of the Laboratory of Unit Operations (LOU), the opportunity to operate and analyze the equipment and heat exchange behavior in real time.

• Recibido: 20 de noviembre de 2024 • Aceptado: 5 de agosto del 2025 • Publicado en línea: 2 de junio de 2026

## 1. INTRODUCCIÓN

Los procesos químicos industriales son

fundamentales para la producción eficiente y económica de una amplia gama de productos esenciales [1-2]. Estas operaciones no solo

mejoran la calidad de los productos, sino que también optimizan el uso de recursos y reducen el impacto ambiental [3]. Las operaciones unitarias en la industria permiten la separación, la mezcla, la reacción, la transferencia de calor y la transferencia de masa entre diferentes componentes [4-5].

Uno de los equipos más importantes en las operaciones unitarias es el intercambiador de calor (IC), que se utiliza para transferir energía entre dos o más fluidos a diferentes temperaturas sin mezclarlos [6-7]. En la industria existen distintos tipos de intercambiadores de calor según el tipo de contacto, la dirección de los flujos y su estructura, tales como los de tubo y coraza, de placas, refrigerados por aire, así como uno de los más comunes: el intercambiador de tubos concéntricos, conocido por su efectividad y simplicidad en el diseño [8-9].

Por otra parte, la instrumentación precisa y confiable es esencial para el funcionamiento eficiente de los IC [10]. La instrumentación permite el monitoreo y control de variables críticas como la temperatura, la presión y el flujo, asegurando así la efectividad óptima y la seguridad del equipo [11]. El control adecuado de los equipos mantiene las condiciones dentro de los parámetros operativos, evitando fallos y mejorando la eficiencia del proceso [12-13].

Actualmente, en la industria química, la digitalización, la automatización y el control (IoT) son tendencias clave que transforman la operación de los intercambiadores de calor [14]. La implementación de tecnologías digitales, como sensores inteligentes y sistemas de control avanzados, permite el monitoreo en tiempo real y la optimización continua de la eficacia del equipo [15]. La sostenibilidad es otro aspecto importante para el diseño y operación de los intercambiadores de calor, contribuyendo a la reducción del consumo de energía y la emisión de gases de efecto invernadero,

reduciendo el impacto ambiental [16-17].

Las variables de proceso involucradas en la transferencia de energía en un intercambiador de calor se adquieren y se controlan mediante controles predictivos, algoritmos inteligentes y/o técnicas adaptativas. Li y Shi en el 2022 y Zhao en el 2024 utilizaron algoritmos inteligentes de programación, como redes neuronales y el algoritmo de búsqueda Sparrow, para diseñar controladores capaces de predecir la temperatura de salida del fluido caliente en un intercambiador de calor, logrando una desviación inferior al 1 % durante los cambios del punto de ajuste [18-19]. Dentro de los controles predictivos y difusos, Krishnan en el 2022 empleo los controladores proporcionales-integrales-derivativos (FPID) difusos para gestionar la no linealidad de los intercambiadores de calor [20] y Miao y Xu en el 2023 diseñó un sistema de control Smith-Fuzzy-PID para el control de temperatura de un intercambiador de calor, utiliza un control PID difuso para acelerar la velocidad de respuesta del sistema, mejorar la precisión del control y reducir el error de estado estable [21]. Controladores, como PID, lógica difusa, controlador PID basado en modelo interno, se utilizan para controlar la temperatura, estas estrategias de control avanzadas mejoran significativamente la regulación de la variable [22].

El desarrollo de Interfaces Gráficas de Usuario (GUI) para estos sistemas de control y adquisición de datos mejora significativamente la operación y monitoreo de los equipos. Las GUI permiten al usuario interactuar con los sistemas de manera intuitiva, facilitando la visualización de datos en tiempo real y la configuración de parámetros operativos [23-25].

En el presente trabajo se desarrolló una interfaz gráfica de usuario destinada al control y la adquisición de datos de un ICTC. Dicha interfaz se diseñó con el objetivo de brindar al usuario control y monitoreo en

tiempo real de un proceso experimental para evaluar la efectividad de un IC en distintas condiciones de operación. Este sistema está orientado con fines académicos, aplicando IoT y GUI, permitiendo a los estudiantes del Laboratorio de Operaciones Unitarias (LOU) manipular y analizar el comportamiento del sistema de transferencia de energía, contribuyendo a una formación académica con experiencia a escala del campo industrial.

## 2. INTERCAMBIADOR DE CALOR

### 2.1 Descripción del sistema

La representación del sistema de transferencia de energía se muestra mediante el Diagrama de Tubería e Instrumentación (DTI) del intercambiador de tubos concéntricos con las configuraciones paralelas (flujos en el mismo sentido) y contracorriente (flujos en sentido contrario). La figura 1 muestra la configuración en paralelo, el fluido caliente (agua) se encuentra en un tanque abierto de acrílico (TK-01), instrumentado con una resistencia R-10 que es activada por medio de un controlador tipo PID, para incrementar la temperatura del agua. Una vez alcanzada la temperatura del fluido caliente (agua), se hace pasar por gravedad (corriente 1) al intercambiador de calor (HE-01). El flujo volumétrico del fluido caliente se controla mediante una electroválvula proporcional (E-01) y se mide mediante un flujómetro (FM-01). A la entrada del IC se encuentra un sensor (S-01) para monitorear la temperatura del fluido caliente. Posteriormente, el fluido pasa por el lado interno del tubo (tubo interno) del IC (HE-01) y, a la salida del IC, se encuentra otro sensor (S-02) que mide la temperatura del agua de salida. El fluido caliente, al salir del intercambiador (corriente 2) se almacena en un tanque de acrílico (TK-02). Por medio de una bomba hidráulica (P-01), el fluido es succionado del tanque (TK02) (corriente 3) y

se impulsa (corriente 4) hacia el tanque (TK-01).

El recorrido del fluido frío (agua) inicia en un tanque de acrílico (TK-03), donde el fluido (corriente 5) es impulsado al sistema mediante una bomba hidráulica (P-02). El fluido se desplaza (corriente 6) hasta llegar a una electroválvula (E-02) encargada de regular el flujo de agua fría que entra al sistema. Posteriormente, pasa por el flujómetro (FM-02), para medir el flujo. El flujo frío continúa hasta encontrar un panel de configuración de flujos. Una configuración en paralelo necesita que la conexión AH-02 esté en la entrada AH-04 del IC (manguera color verde) y que la conexión AH-01 esté a la salida AH-03 del IC (manguera color azul).

El cambio de configuración del IC depende de la posición en la que se encuentren las mangueras hidráulicas conectadas. Una configuración en contracorriente necesita que la conexión AH-02 esté en la salida AH-03 del IC (manguera color azul) y que la conexión AH-01 esté a la entrada AH-04 del IC (manguera color verde), como se muestra en la Figura 2. Posteriormente a la salida del panel de configuración, el fluido frío de salida se dirige (Corriente 7) hacia un tanque de acrílico (TK-03).

### 2.2. Sistema de adquisición de datos

El sistema de adquisición de datos (DAQ) consta de distintos componentes que permiten medir las variables operativas del sistema. Entre los componentes del DAQ se incluyen sensores de temperatura, flujómetros, electroválvulas y una interfaz gráfica de usuario (GUI). Los sensores de temperatura utilizados en el sistema se seleccionan por su rango de medición y precisión. Estos sensores están ubicados a la entrada y salida del fluido caliente y frío, permitiendo así un monitoreo continuo de las temperaturas de operación.

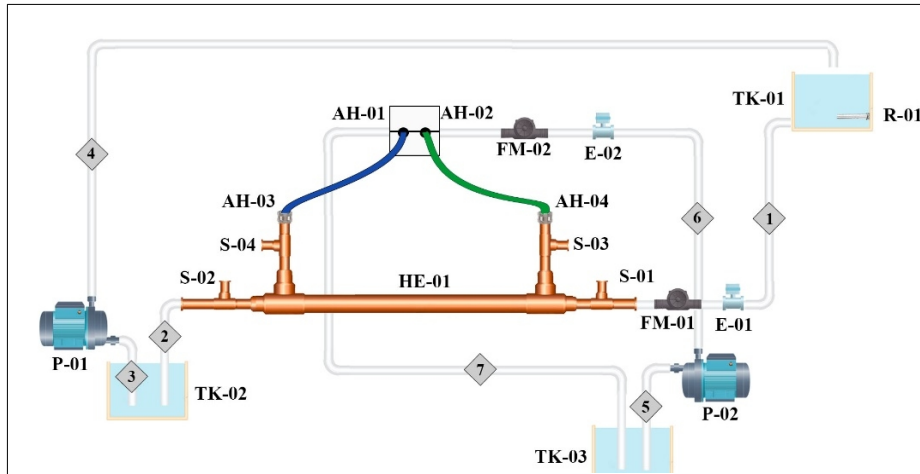


Figura 1. DTI intercambiador de tubos concéntricos. Configuración corriente en paralelo.

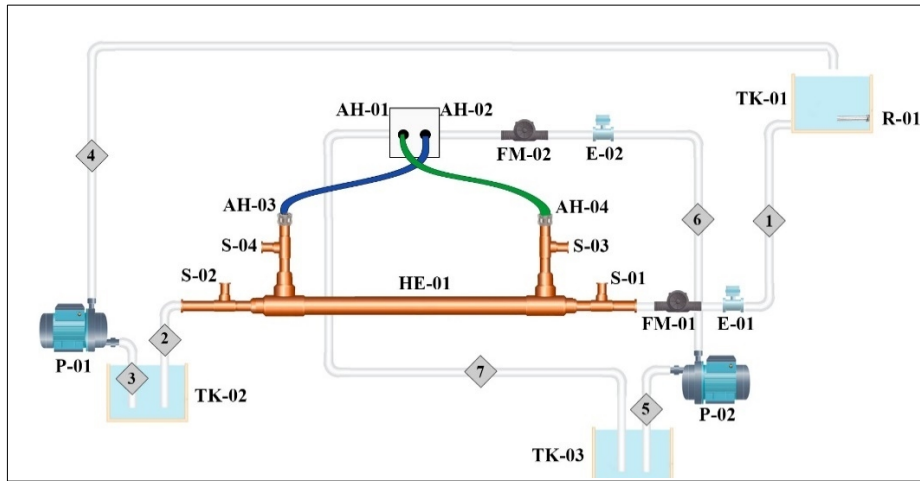


Figura 2. DTI intercambiador de tubos concéntricos. Configuración contracorriente.

Los flujómetros son dispositivos que miden el flujo volumétrico de los fluidos en el sistema. Se utilizaron flujómetros de tipo turbina, seleccionados por su precisión en la medición de flujos de líquidos. Estos dispositivos están conectados a la GUI y proporcionan datos en tiempo real sobre el flujo de fluidos del sistema.

Las electroválvulas son dispositivos que regulan el flujo de fluidos en un sistema. Estas válvulas son configuradas por el sistema de control, lo que permite ajustar el flujo de los fluidos. Las electroválvulas utilizadas en el sistema son de tipo proporcional, lo que permite un control

preciso del flujo. En la Tabla 1 se presenta la instrumentación utilizada para el control, el monitoreo y la adquisición de datos del ICTC.

### 3. METODOLOGÍA

#### 3.1. Diagrama de Comunicación

La comunicación entre los dispositivos se realiza a través de un servidor desarrollado en Node.js, dicho servidor es el encargado de adquirir y enviar información requerida por un usuario. Los usuarios pueden acceder a esta información a través de una red de área local creada. Todos los dispositivos conectados a esta red podrán acceder a la

página web en la que se realizará el monitoreo de las variables de interés del sistema. Los usuarios se conectan a la red creada mediante un navegador web desde un dispositivo electrónico, ingresando la dirección IP del servidor. Una vez que el usuario esté en línea con el servidor, se le enviará la información necesaria para cargar una página web, donde podrá iniciar el monitoreo y la adquisición de las variables del proceso configuradas.



Figura 3. Diagrama de comunicación.

Tabla 1. Instrumentación del ICTC

Instrumento	Descripción
Sensor de temperatura	Modelo: DS18B20
	Voltaje de alimentación: 3.0 a 5.5 VCD
	Intervalo de temperatura de operación: -55 hasta 125 °C
Flujómetro	Precisión de $\pm 0.5$ °C de -10 a +85 °C
	Modelo: YF-S201
	Voltaje de funcionamiento: 4.5 a 18 VCD
	Intervalo de caudal: 1 a 30 L/min
Electroválvula proporcional	Precisión: $\pm 10\%$
	Ecuación característica: Frecuencia (Hz) = $7.5 * \text{Caudal (L/min)}$
	Modelo: DN8-25
	Voltaje de alimentación: 0-10 VCD
Bomba hidráulica	Intervalo de rotación: 0 - 90°
	Intervalo de temperatura de operación: 1 - 95 °C
	Modelo: PKm 60-MD-1, 0.5 HP
ESP32	Voltaje de alimentación: 127 VCA
	Caudal Máximo: 65 L/min
	CPU: Dual-core Tensilica LX6 microprocessor
	Voltaje de operación: 3.3 VCD.
	Frecuencia máxima: 240 MHz.
	RAM: 520 KB SRAM.
	Wi-Fi: 802.11 b/g/n.
	Bluetooth: V4.2 BR/EDR y BLE.

El servidor se encarga de redirigir la información enviada por el ESP32 en formato JSON, que contendrá los datos obtenidos de los sensores. El servidor procesará el archivo JSON del dominio y enviará la información a los usuarios y a una base de datos MySQL de manera simultánea. Cada vez que el servidor reciba información del ESP32 a través de un WebSocket, se actualizará la información de todos los usuarios en tiempo real, permitiendo una visualización continua y actualizada, ver Figura 3.

### 3.2. Conexión ESP32

Para el envío de datos al servidor se utilizó una placa de desarrollo ESP32. En la placa se conectaron cuatro sensores de temperatura (S-01, S-02, S-03 y S-04) y dos flujómetros (FM-01 y FM-02), alimentados con un voltaje de 5 VCD. Los sensores de temperatura se conectaron a los pines GPIO34, GPIO35, GPIO32 y GPIO33 respectivamente, mientras que los flujómetros a los pines GPIO22 y GPIO23 como se muestra en la Figura 4. La placa ESP32 actúa como nodo central que recopila los datos de estos dispositivos y los envía al servidor para su procesamiento y visualización en tiempo real.

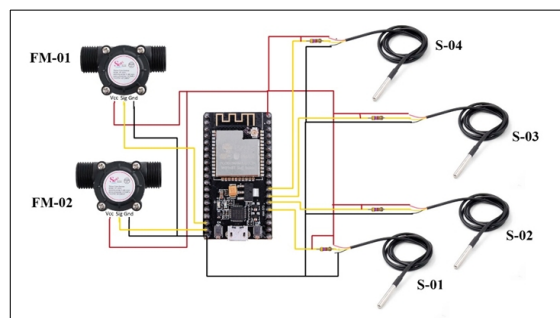


Figura 4. Esquema de conexión ESP32.

### 3.3. Calibración del sistema de adquisición

El sistema de adquisición y tratamiento de señales emplea cuatro sensores de temperatura tipo DS18B20 con un error de  $\pm 0.5$  °C. En consecuencia, es necesaria la afinación del registro de esta magnitud física mediante una calibración experimental del sistema de adquisición.

La calibración del sistema se llevó a cabo mediante un baño térmico para mantener un líquido refrigerante a distintas temperaturas permaneciendo constantes, realizando la calibración en un intervalo de temperatura comprendido entre los 15 °C hasta los 60 °C, realizando incrementos entre cada intervalo de 5 °C. En cada intervalo de temperatura se recolectaron 600 datos de cada sensor. Para verificar una temperatura constante en los distintos intervalos, se utilizó un sensor patrón de temperatura RTD (Resistance Temperature Detector) tipo PT-100, ver Figura 5.

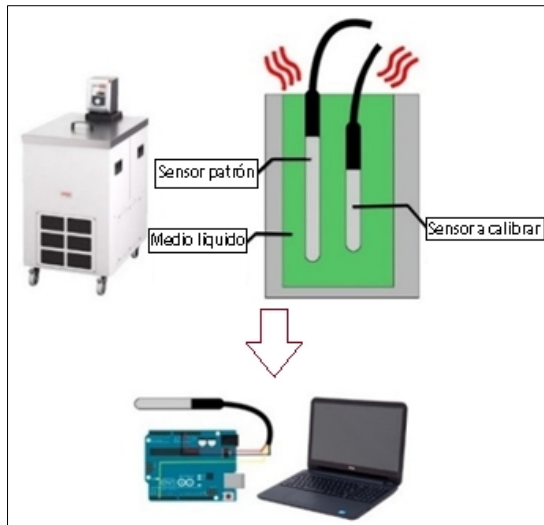


Figura 5. Esquema de calibración del sistema adquisidor de temperatura.

En la calibración de los flujómetros (FM-01, FM-02) se empleó la relación de volumen entre tiempos. Este proceso involucró medir el tiempo necesario para que los flujómetros registraran distintas tasas de flujo, es decir: 1, 1.5, 2, 2.5 y 3 litros por minuto. Se preparó el sistema de calibración conectando los componentes según lo mostrado en la Figura 6. El sistema para el ajuste del flujo volumétrico incluye una bomba hidráulica (P-01), un elemento de control de flujo o electroválvula proporcional, el modulador de voltaje de apertura (E-01), y los flujómetros (FM-01 y FM-02), así como un elemento de medición graduado (probeta).

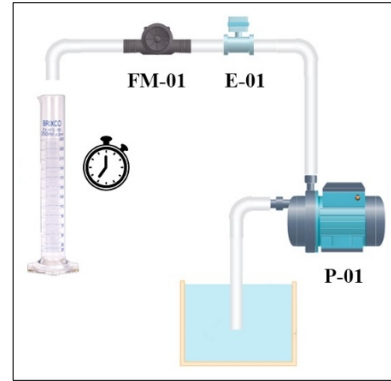


Figura 6. Esquema de calibración del flujo volumétrico.

Al obtener los flujos promedio de cada sensor, se compararon con los valores medidos experimentalmente y se obtuvo una ecuación característica para calibrar el valor medido con respecto al valor real para cada uno de los flujómetros. En las Tablas 2 y 3 se muestran los voltajes de apertura de la electroválvula proporcional de paso de flujo y se compara los flujos correspondientes.

Tabla 2. Configuración de flujo volumétrico del fluido caliente.

Voltaje de configuración (V)	Flujo volumétrico medido (L/min)	Sensor FM-01 Fluido Caliente (L/min)
6.10	1.0	0.99
6.72	1.5	1.50
7.35	2.0	1.99
7.97	2.5	2.49

Tabla 3. Configuración de flujo volumétrico del fluido frío.

Voltaje de configuración (V)	Flujo volumétrico medido (L/min)	Sensor FM-02 Fluido frío (L/min)
3.50	1.0	0.98
3.90	1.5	1.50
4.35	2.0	1.98
5.1	2.5	2.49

Las ecuaciones de ajuste de los sensores de temperatura y de flujo volumétrico ingresados en el sistema de adquisición de datos (ESP32) se muestran en la Tabla 4.

### 3.4. Obtención de datos experimentales

Se desarrollaron pruebas experimentales a diferentes flujos de operación en las dos

configuraciones de flujo. La Tabla 5 muestra las condiciones de operación para la adquisición de datos experimentales.

**Tabla 4.** Ecuaciones de ajuste del sistema de adquisición.

Sensor	Ecuación de ajuste
S-01	$y = 0.9972x + 0.3169$
S-02	$y = 1.0007x - 0.0674$
S-03	$y = 0.9999x + 0.0051$
S-04	$y = 1.0025x - 0.2485$
FM-01	$y = 0.5204x + 0.2446$
FM-02	$y = 0.3856x + 0.8913$

Donde “x” es el valor adquirido por ajustar, e “y” es el valor real de la variable de interés ajustado.

**Tabla 5.** Condiciones de operación.

Variable	Valor	Unidades
Configuración de flujo	Contracorriente & paralelo	
Presión	0.8	Atm
Flujo de fluido caliente	1, 1.5 y 2	L/min
Flujo de fluido frío	1, 1.5 y 2	L/min
Temperatura inicial del fluido caliente	40	°C
Temperatura inicial del fluido frío	22	°C

### 3.5. Dimensiones del ICTC

Se consideran las dimensiones y

**Tabla 6.** Dimensiones del ICTC.

Descripción	Diámetro Nominal (pulg./m)	Diámetro exterior (pulg./m)	Diámetro interior (pulg./m)	Espesor de pared (pulg./m)	Longitud total (m)	Material
Tubo exterior	1 / 0.025	1.125 / 0.028	1.024 / 0.026	0.050 / 1.27x10 <sup>-3</sup>	95	Cobre
Tubo interior	½ / 0.012	0.625 / 0.015	0.544 / 0.013	0.040 / 1.016x10 <sup>-3</sup>	121	Cobre
Conductividad térmica (W/m K)	-	-	-	-	-	385

propiedades del material del ICTC para el estudio termodinámico y de diseño Tabla 6.

## 4. IMPLEMENTACIÓN Y RESULTADOS

### 4.1. Interfaz gráfica de usuario (GUI)

La GUI desarrollada para el sistema proporciona una plataforma intuitiva para el monitoreo y control del IC. La interfaz permite a los usuarios visualizar en tiempo real los datos del sistema, como las temperaturas de entrada y salida de los fluidos, y los flujos volumétricos. La interfaz incluye gráficos que muestran la tendencia de los datos operativos a lo largo del tiempo, lo que permite a los usuarios identificar cualquier desviación o anomalía en el sistema. Esto proporciona un control preciso y eficiente del sistema, optimizando la eficacia del IC. La integración de la GUI con el sistema de control y adquisición de datos se realiza mediante Python, a través de un entorno de ejecución de Node.js que permite ejecutar código JavaScript en el servidor. La Figura 7 muestra la pantalla principal de la GUI desarrollada.

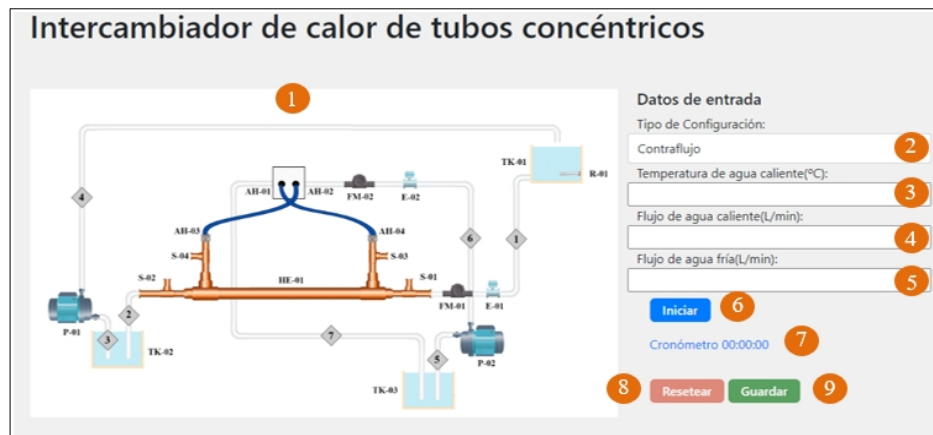


Figura 7. GUI, pantalla principal.

La pantalla principal cuenta con una sección de datos de entrada (parte lateral derecha) donde el usuario puede ingresar los datos de configuración en el IC deseada, en la parte lateral izquierda se muestra el DTI con la configuración seleccionada Figura 7 (1), el cambio del tipo de configuración en el IC se realiza desde un menú desplegable Figura 7 (2), la temperatura necesaria en el tanque del fluido caliente (TK-01) Figura 7 (3), los flujos volumétricos del fluido caliente y del fluido frío Figura 7 (4-5). Es indispensable completar todos los campos mencionados para iniciar la adquisición en la GUI. Para comenzar el registro de datos, se presiona el botón “iniciar” Figura 7 (6). Al realizar esto, se activa un cronómetro que monitorea el tiempo de experimentación Figura 7 (7). En caso de ser necesario pausar la experimentación o terminar el proceso, se presiona el botón de inicio nuevamente.

Los datos adquiridos se almacenan con la opción de “Guardar” en formato “.csv” Figura 7 (9). Para iniciar una nueva prueba, se da clic en el botón “Resetear” Figura 7 (8).

Al realizar la configuración y dar clic en “iniciar” se despliegan ventanas para el monitoreo en tiempo real de los datos de temperaturas y flujos volumétricos registrados, como se muestran en las Figuras 8 y 9.

#### 4.2. Adquisición de datos

La validación de la GUI y transferencia de energía se llevó a cabo mediante pruebas experimentales adquiriendo los datos a distintos flujos volumétricos y configuraciones de flujo. La Figura 10 muestra la temperatura promedio medida en paralelo por los sensores del ICTC.



Figura 8. Adquisición de temperaturas.

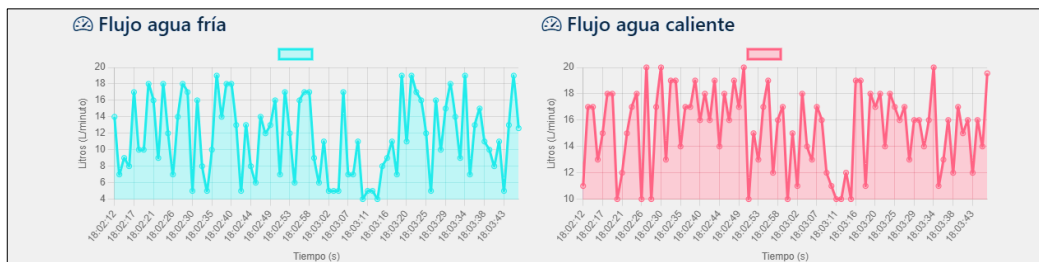
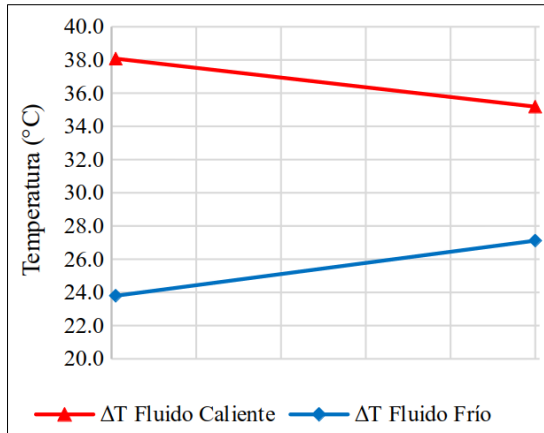
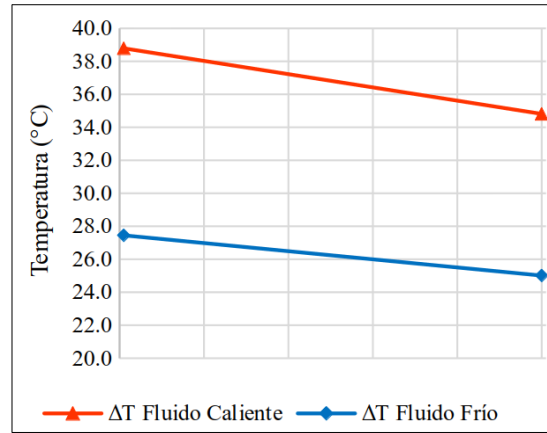


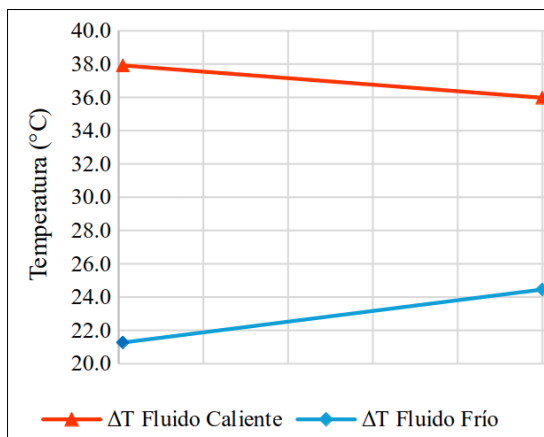
Figura 9. Adquisición de flujos volumétricos.



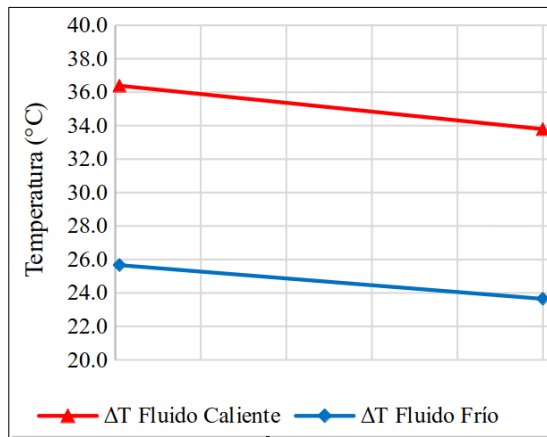
(a)



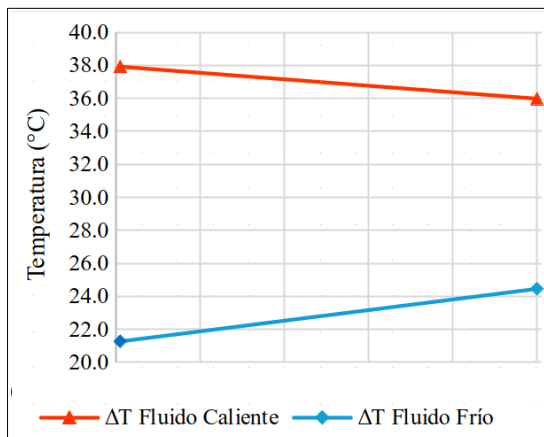
(a)



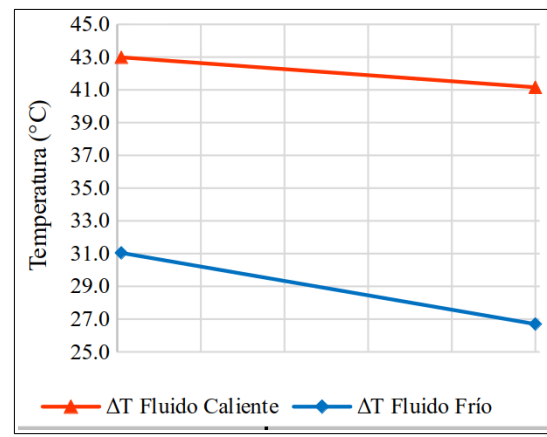
(b)



(b)



(c)



(c)

**Figura 10.** Adquisición de temperatura en el ICTC en paralelo. **a)** 1 L/min, **b)** 1.5 L/min y **c)** 2 L/min.

**Figura 11.** Adquisición de temperatura en el ICTC a contracorriente. **a)** 1 L/min, **b)** 1.5 L/min y **c)** 2 L/min.

La Figura 11 muestra la temperatura promedio registrada por los sensores en el ICTC a contracorriente.

Los datos adquiridos fueron exportados desde el software desarrollado en formato .csv para su posterior tratamiento y análisis.

Por medio de la ecuación 1 es posible calcular la transferencia de energía térmica  $\dot{Q}$  en ambos fluidos de trabajo de manera independiente en el ICTC.

$$\dot{Q} = \dot{m} C_p \Delta T \quad (1)$$

Donde  $\dot{m}$  es la masa,  $C_p$  el calor específico (también llamada capacidad calorífica específica) y  $\Delta T$  es la diferencia de temperatura.

## 5. CONCLUSIONES

El desarrollo e implementación de un sistema de control, monitoreo y adquisición de datos para un ICTC demostró ser una herramienta efectiva para mejorar la eficiencia a condiciones de operación constantes de un proceso a escala de laboratorio con aplicaciones industriales.

La GUI desarrollada proporciona una plataforma intuitiva para el monitoreo y control del sistema, facilitando la visualización de datos en tiempo real y el ajuste de parámetros operativos.

La digitalización y control del IC proporciona una herramienta educativa para los estudiantes de ingeniería, permitiéndoles adquirir experiencia práctica en el control, adquisición y monitoreo de sistemas de transferencia de energía.

La configuración rápida tanto de manera física como digital en el equipo permite demostrar y comprobar los cambios en la transferencia de calor debido a las configuraciones y poder determinar el mayor intercambio de energía calorífica.

Comparando los promedios de temperatura ( $T_{prom}$ ) de los fluidos de trabajo para ambas configuraciones (paralelo y a contracorriente) muestran el comportamiento térmico que establece la literatura.

En el intercambiador de calor en flujo paralelo las temperaturas promedio de salida de los fluidos alcanzan un valor semejante con una tendencia al equilibrio térmico, es decir,  $T_{fluido\ frío} = 3.31\text{ °C}$  y  $T_{fluido\ caliente} = 2.89\text{ °C}$ .

En el intercambiador de calor a contracorriente las temperaturas promedio de salida de los fluidos son mayores comparadas con una configuración en paralelo, incrementando la temperatura del fluido frío y disminuyendo la del fluido caliente, es decir,  $T_{fluido\ frío} = 2.43\text{ °C}$  y  $T_{fluido\ caliente} = 3.97\text{ °C}$ .

Para este ICTC la mayor diferencia de temperatura promedio ( $3.97\text{ °C}$ ) se alcanzó en la configuración a contracorriente y para la configuración en paralelo ( $2.89\text{ °C}$ ) bajo un flujo volumétrico de  $1\text{ L/min}$  respectivamente.

El desarrollo de este sistema representa la modernización y digitalización de los procesos experimentales, alineándose con las tendencias actuales de la Industria 4.0. La integración de tecnologías digitales en el diseño y operación de equipos industriales mejorara la eficiencia, sostenibilidad y competitividad de las industrias modernas.

Exportar los datos adquiridos en formato .csv permite un posterior tratamiento y análisis de datos para la transferencia de calor en un Intercambiador de Calor de Tubos Concéntricos de manera sencilla y rápida en cualquier ordenador que cuente con un editor de textos.

Adquirir datos a diferentes flujos de operación en ambas configuraciones permite a los usuarios de la GUI desarrollar estudios térmicos en el Intercambiador de calor a escala laboratorio.

## REFERENCIAS

- [1] Acosta Solares A, Pérez Navarro O, Albernas Carvajal Y, Cortés Falcón MF. Potencialidades de la metodología de superficie respuesta en la

- optimización experimental en la industria química y alimentaria. *Centro Azúcar*. 2021;48(4):123-138. Disponible en [https://centroazucar.uclv.edu.cu/index.php/centro\\_azucar/article/view/684](https://centroazucar.uclv.edu.cu/index.php/centro_azucar/article/view/684)
- [2] Hougen OA, Watson KM, Ragatz RA. Principios de los procesos químicos. *Termodinámica*. Vol. 2. Barcelona: Reverté; 1982.
- [3] Fleites Avila Y, Martí Marcelo CA, Albernas Carvajal Y, Miño Valdés JE, González Suárez E. Experiencias de las aplicaciones de la programación lineal en la industria de procesos químicos en Cuba. *Centro Azúcar*. 2020;47(4):90-102. Disponible en [https://centroazucar.uclv.edu.cu/index.php/centro\\_azucar/article/view/634](https://centroazucar.uclv.edu.cu/index.php/centro_azucar/article/view/634)
- [4] Dirzo RS, Guzmán Gómez AJ, Méndez Gutiérrez AE, Zamora Plata JA, Herrera Toledo RA, Garduño CM, et al. *Termodinámica de Procesos y Operaciones Unitarias en Ingeniería Química*. Ciudad de México: UNAM, Facultad de Estudios Superiores Zaragoza; 2019.
- [5] Bernal Portilla NB, Ubillus Purizaca PP, Villanueva Nehmad F, Ágreda Paz RE. *Operaciones Unitarias- IN177-202101*. Lima: Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas; 2021. <http://hdl.handle.net/10757/664532>
- [6] Fakheri A. Heat exchanger efficiency. *Journal of Heat Transfer*. 2007;129(9):1268-1276. doi: <https://doi.org/10.1115/1.2739620>
- [7] Lara-Lara J, Clemente-Gómez R, López-Ramos O. Diseño de un intercambiador de calor de coraza y tubos. *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*. 2024;12(Esp):116-122. doi: <https://doi.org/10.29057/icbi.v12iEspecial.12143>
- [8] Kakaç S, Liu H, Pramuanjaroenkij A. *Heat Exchangers: Selection, Rating, and Thermal Design*. 4th ed. Boca Raton: CRC Press; 2020. doi: <https://doi.org/10.1201/9780429469862>
- [9] Malla Peña JT. Diseño de un intercambiador de calor de tubos concéntricos mediante un estudio teórico para el proceso de calentamiento de amoníaco. Machala, Ecuador: Universidad Técnica de Machala; 2022. <http://repositorio.utmachala.edu.ec/handle/48000/18641>
- [10] Bequette BW. Process control practice and education: Past, present and future. *Computers and Chemical Engineering*. 2019;128:538-556. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2019.06.011>
- [11] Boyes W. *Instrumentation Reference Book*. 4th ed. Oxford, UK: Butterworth-Heinemann; 2010.
- [12] Seborg DE, Edgar TF, Mellichamp DA, Doyle FJ. *Process Dynamics and Control*. 4th ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons; 2017
- [13] Chen Z, Lovett D, Morris J. Process analytical technologies and real time process control: A review of some spectroscopic issues and challenges. *Journal of Process Control*. 2011;21(10):1467-1482. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2011.06.024>
- [14] Ricardez-Sandoval LA, Budman H, Douglas PL. The future of control of process systems. *Computers and Chemical Engineering*. 2023;178:108365. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2023.108365>
- [15] Cecilia A. Next-generation control systems for industrial automation trends and challenges. *Global Journal of Technology and Optimization*. 2024;15:399. doi: <https://doi.org/10.37421/2229-8711.2024.15.399>
- [16] Tarighaleslami AH, Walmsley TG, Atkins MJ, Walmsley MRW, Neale JR. Heat exchanger network retrofit with heat exchanger and material type selection: A review and a novel method. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021;138:110479. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110479>
- [17] Parekh N, Kurian J, Patil R, Gautam R. A review on techno managerial approaches to energy optimization in chemical process industries. *Frontiers in Energy Research*. 2023;10:1107912. doi: <https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.1107912>
- [18] Li J, Shi X. Temperature control based on improved sparrow search algorithm. In: 6th Int. Conf on Mechatronics and Intelligent Robotics (ICMIR2022). Kunming, China: SPIE; 2022. p. 123012K. doi: <https://doi.org/10.1117/12.2644831>
- [19] Zhao A, Zhang Y, Quan W, Zhang Y, Zhang M. Heat exchanger control: Using deep-Q network. *Thermal Science and Engineering Progress*. 2024;50:102498. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2024.102498>
- [20] Krishnan S, Preethi SVS, Sekhar C. Modeling and controller design for temperature control of heat exchangers in power plants. *International Journal of Scientific Research in Engineering and Management*. 2022;6(5). doi: <https://doi.org/10.55041/IJSREM12747>
- [21] Miao W, Xu B. Simulation of heat exchanger temperature control based on Smith predictive fuzzy PID. In: 2022 Workshop on Electronics Communication Engineering. Xi'an, China: SPIE; 2023. p. 127200H. doi: <https://doi.org/10.1117/12.2674163>
- [22] Puduru P, Vankunavath P, Sadam I, Ginuga PR. Real-time temperature control of shell and tube heat exchanger by IMC based PID controller. In: Bandi A, Hossain M, Jin Y, editors. *Proceedings of 38th International Conference on Computers and Their Applications*. EasyChair; 2023. p. 155-163. doi: <https://doi.org/10.29007/dgt1>
- [23] Sánchez JDCP, Carrera Erazo SC, Chávez Murillo SE, Cabezas Elizondo NE. Diseño de interfaces gráficas en el desarrollo de software: metodología para asegurar la efectividad. *Dilemas Contemporáneos: Educación, Política y Valores*. 2019;7(Esp):59. doi: <https://doi.org/10.46377/dilemas.v30i1.1139>
- [24] Fenza G, Loia V, Nota G. Patterns for visual management in Industry 4.0. *Sensors*. 2021;21(19):6440. doi: <https://doi.org/10.3390/s21196440>
- [25] Schmitt T, Viklund P, Sjölander M, Hanson L, Amouzar K, Urenda Moris M. Augmented reality for machine monitoring in industrial manufacturing:

framework and application development. Procedia  
CIRP. 2023;120:1327-1332. doi:  
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.09.171>

## ACERCA DE LOS AUTORES



Erick Omar Castañeda Magadán. Obtuvo la Licenciatura en Ingeniería Mecánica por la Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos (FCQeI-UAEM) en 2016, y recibió los grados de Maestría y Doctorado por el Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos (CIICAp-UAEM) en 2017 y 2022, respectivamente. Inició su carrera de investigación con la participación en un proyecto a través del programa de apoyo PRODEP-UAEM para la incorporación de nuevos doctores en 2014. Ha participado en la Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica (SOMIM) de 2015 a 2019. Ha dirigido y codirigido tesis de investigación en Ingeniería Mecánica, Ingeniería Eléctrica-Electrónica e Ingeniería Química en la FCQeI-UAEM. Desde 2020 es profesor de la Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería en los Programas Educativos de Ingeniería Mecánica, Ingeniería Eléctrica-Electrónica, Ingeniería Química e Ingeniería Industrial en la FCQeI-UAEM. Su investigación se centra en la generación y aplicación de conocimiento sobre la captura y utilización de CO<sub>2</sub>, el cálculo de eficiencia hidráulica en turbomaquinaria mediante la aplicación de la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), el diseño y optimización de intercambiadores de calor; así como en la instrumentación, control, adquisición y tratamiento de señales en procesos de separación a escala laboratorio con aplicaciones en energías renovables en la FCQeI-UAEM.



El Dr. Victor Manuel Zezatti Flores realizó sus estudios de licenciatura en Ingeniería Mecánica, la maestría y el doctorado en Ciencias e Ingeniería con opción terminal en Mecánica. Cuenta con experiencia de 10 años como docente de la Facultad de Ciencias Químicas e Ingenierías FCQeI, actualmente con el puesto de profesor investigador de tiempo completo PITC, en el Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas CIICAp. Forma parte del Sistema Nacional de Investigadores CONAHCYT participando en diversos proyectos colaborativos para la investigación y publicación de artículos con línea de investigación en tecnologías avanzadas en Ingeniería Térmica y optimización de sistemas mediante internet de las cosas IoT.



Miriam Navarrete Procopio es profesora de Ingeniería Química en la Universidad Estatal de Morelos (UAEM), México. Obtuvo un doctorado en Ingeniería y Ciencias Aplicadas en el Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas (CIICAp). La Dra. Navarrete dirige laboratorios de ingeniería química donde imparte clases de destilación, absorción, desorción, columnas de adsorción, intercambiadores de calor y diseño de reactores químicos. Ha realizado estudios exergéticos de varios procesos tanto a escala industrial como de laboratorio.



Carlos Alberto Ochoa Ortiz. (Bs'94 - Eng.Master '00; PhD'04 - Investigador Postdoctoral '06, Investigación Postdoctoral Industrial '09, Investigación Postdoctoral Estudios Energéticos '18, & Sabático

Académico '23). Se incorporó a la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez en junio de 2008. Ha escrito más de 887 artículos científicos en 11 idiomas relacionados principalmente con logística para Smart Cities e Industria 4.0 y 5.0 utilizando diferentes técnicas de inteligencia artificial. Ha dirigido 97 tesis doctorales, 96 tesis de maestría y 94 tesis de licenciatura. Participa en la organización de varias conferencias internacionales, tales como Cilog y Micai. Ha sido revisor de varias revistas especializadas incluyendo dos importantes revistas de Elsevier: Applied: Soft Computing y, Computer on Human Behavior. Sus intereses de investigación incluyen la computación ubicua, la computación evolutiva, el procesamiento del lenguaje natural, los modelos sociales para una ciudad inteligente. Desde enero de 2017 participa en el NAB del Doctorado en Tecnología (PNPC) de la UACJ. Desde septiembre de 2016 cuenta con la distinción SNI 2. En 2024 desarrolló un nuevo índice para medir la calidad en una Smart City a partir de una muestra de 10 sociedades en México, dichos resultados los presento en un Libro Científico de 187 páginas auspiciado por la Universidad Anáhuac. Actualmente tiene un proyecto con la Universidad de la República del Uruguay asociado con la implementación del Social IoT en una Smart City para poder monitorear la calidad de vida en dicho tipo de Sociedad con fecha de término hasta el 2027 y con financiamiento internacional mediante la compra de Licencias de Unreal Engine 5.4.