

Development of a Toxic Gas Exposure Time Monitoring and Control System for Occupational Safety in Industrial Environments

Percy R. Guadalupe¹; Jhonatan D. Paucara²

1,2 Universidad Tecnológica del Perú, Perú, u20219586@utp.edu.pe, c23428@utp.edu.pe

Abstract- This study develops an automated system for monitoring and controlling the exposure time to toxic gases in industrial environments, aligned with OSHA/CAL occupational safety regulations. The implementation is carried out using a PLC LOGO 8.4, which allows efficient processing of the gas sensor signals and their transmission in real time through the MQTT protocol to monitoring platforms such as Node-Red. The system incorporates an interface with dynamic graphics, historical data logging and automatic notifications via WhatsApp and Remote-Red, facilitating user-friendly and remote monitoring that is easy to understand. In addition, it adjusts the exposure time according to the concentration of detected gases. The results show a fast response (less than 10 s), activating alarms and automatic ventilation, reinforcing its usefulness in occupational risk prevention.

Keywords-- MQTT, industrial IoT, safety standards, warning system.

Desarrollo de un sistema de monitoreo y control del tiempo de exposición a gases tóxicos para la seguridad laboral en entornos industriales

Percy R. Guadalupe¹; Jhonatan D. Paucara²

^{1,2}Universidad Tecnológica del Perú, Perú, u20219586@utp.edu.pe, c23428@utp.edu.pe

Resumen– El presente estudio desarrolla un sistema automatizado para el monitoreo y control del tiempo de exposición a gases tóxicos en entornos industriales, alineado con las normativas de seguridad ocupacional OSHA/CAL. La implementación se realiza mediante un PLC LOGO 8.4, el cual permite un procesamiento eficiente de las señales de los sensores de gases y su transmisión en tiempo real mediante el protocolo MQTT hacia plataformas de monitoreo como Node-Red. El sistema incorpora una interfaz con gráficos dinámicos, registro histórico de datos y notificaciones automáticas a través de WhatsApp y Remote-Red, facilitando la supervisión amigable y remota de fácil entendimiento. Además, ajusta el tiempo de exposición según la concentración de gases detectados. Los resultados muestran una respuesta rápida (menos de 10 s), activando alarmas y ventilación automática, lo que refuerza su utilidad en la prevención de riesgos laborales.

Palabras clave-- MQTT, IoT industrial, normas de seguridad, sistema de alerta.

I. INTRODUCCIÓN

En el contexto industrial contemporáneo, la seguridad laboral se erige como una prioridad máxima, especialmente en entornos donde la presencia de gases tóxicos representa una amenaza significativa para la integridad y la vida de los trabajadores. La exposición a estos gases no solo puede ocasionar enfermedades profesionales a lo largo de la vida laboral, sino que también constituye un riesgo inminente de accidentes mortales inmediatos [1]. Un caso ilustrativo se encuentra en el informe del Ministerio de Energía y Minas del Perú del año 2023, en el que se documentaron 12 accidentes mortales teniendo un total de 39 víctimas, donde 27 de ellos fallecieron producto de la inhalación de sustancias nocivas [2]. En consecuencia, se hace imperativa la implementación de métodos efectivos de alerta temprana para la detección y monitoreo de gases tóxicos.

En el contexto del caso presentado, las principales contribuciones de este estudio se centran en:

- 1) El desarrollo de un sistema de monitorización en tiempo real basado en la normativa de seguridad.
- 2) El desarrollo de una interfaz de monitorización fácil de usar e intuitiva.
- 3) El desarrollo de un sistema automatizado de gestión del tiempo de exposición, basado en umbrales de tiempo y

concentración, para contribuir a la prevención previa de los riesgos para la salud de los trabajadores

La estructura del documento se organiza de la siguiente manera: en la sección de antecedentes de la investigación, se presenta una comparación de soluciones utilizadas previamente, junto con un análisis de sus ventajas y limitaciones. En la sección dedicada al desarrollo del sistema de monitoreo, se detalla la organización del proyecto. Posteriormente, en la sección sobre la interfaz de monitoreo, se describen las configuraciones realizadas para optimizar su uso. En la sección referente a la gestión automatizada del tiempo de exposición, se presentan los conceptos normativos empleados para el desarrollo del modelo matemático de control. Asimismo, en la sección de desarrollo del sistema de alerta temprana, se explican los mecanismos de notificación implementados en el sistema propuesto. Finalmente, en la sección de conclusiones, se exponen los logros alcanzados y las recomendaciones derivadas del estudio.

II. ESTADO DEL ARTE

La revisión de la literatura científica respalda la importancia de desarrollar sistemas innovadores que permitan gestionar y responder en tiempo real a la presencia de agentes tóxicos, garantizando su adaptabilidad a diversos entornos y necesidades. En este contexto, el estudio realizado en Indonesia implementó experimentalmente un sistema de monitoreo ambiental que hizo el uso de sensores comerciales MQ, cuyos datos obtenidos son procesados por una Raspberry Pi para ejecutar acciones como el envío de notificaciones a través de Telegram [3]. Otro artículo relevante destaca la implementación de un sistema de monitoreo basado en tecnología Blockchain, el cual, mediante conexión a la nube, permite un acceso seguro y en tiempo real a los usuarios [4]. De manera similar, otro estudio basado en IoT y MQTT utilizó sensores de gas conectados a un ESP32 para enviar datos a una plataforma web, demostrando su potencial para automatizar respuestas ante gases peligrosos, como la activación de ventilación y el cierre de válvulas en situaciones de emergencia [5]. En entornos laborales, la combinación de tecnologías de comunicación como GSM/GPRS y LoRa con sensores de gas ha demostrado ser efectiva en la transmisión de datos en tiempo real. Por ejemplo, el desarrollo de un

sistema de monitoreo de gases en cabinas de vehículos fue capaz de procesar variables ambientales y transmitir las a la nube de ThingSpeak, permitiendo el acceso en tiempo real a través de una aplicación móvil desarrollada en Virtuino [6].

En el ámbito de la telemetría y el monitoreo remoto, una investigación basada en tecnología LoRa permitió la supervisión en tiempo real en un entorno hospitalario, destacando su eficacia en la prevención de exposiciones prolongadas a gases tóxicos [7].

Asimismo, se han desarrollado estudios que emplean redes inalámbricas LAN y redes de sensores inalámbricos (WSN). En esta línea, se diseñó un sistema de monitoreo basado en un nodo sensor conectado a una Raspberry Pi, que procesa la información y la envía a un servidor NTP para su visualización a través de una red WiFi [8]. De manera similar, otro sistema basado en sensores MQ y Arduino logró un 82 % de precisión en el monitoreo que se visualizó mediante un interfaz móvil [9].

En entornos específicos como la minería, se ha desarrollado un sistema que monitorea en tiempo real la concentración de gases a través de un servidor web, contribuyendo a reducir la exposición a sustancias tóxicas [10]. Por último, el uso de la IA y Machine Learning no es ajeno en el campo del monitoreo ambiental de las áreas urbanas, estas son nuevas propuestas que tienen como finalidad brindar información precisa y eficaz en tiempo real de los niveles de contaminación [11], [12].

Si bien los avances tecnológicos en el campo del IoT han facilitado el desarrollo de soluciones eficientes y escalables para el control remoto y la gestión de emergencias. Sin embargo, el uso de microcontroladores como Raspberry Pi, ESP32 y Arduino en muchos de estos sistemas presenta ciertos desafíos. A pesar de su versatilidad y ligereza, estos dispositivos carecen de mecanismos de protección contra sobretensiones, descargas electrostáticas y perturbaciones eléctricas, lo que los hace menos adecuados para entornos industriales, además se requiere configuraciones adicionales para garantizar una comunicación en tiempo real. Las limitaciones específicas de estos microcontroladores utilizados en trabajos previos se detallan en la Tabla I.

En contraste con estos enfoques, el presente estudio propone el uso del controlador **LOGO V8.4**, el cual se distingue por su mayor capacidad y eficiencia, siendo particularmente adecuado para aplicaciones industriales. Este dispositivo, en combinación con el protocolo de comunicación **MQTT**, permite un control, monitoreo y transmisión de eventos en tiempo real de manera más rápida y confiable. Como resultado, esta investigación presenta una propuesta más integrada y robusta, cuyo objetivo es mejorar la seguridad y reducir los riesgos de exposición a gases en entornos industriales las comparaciones.

TABLA I
CARACTERÍSTICAS Y LIMITACIONES DE MICROCONTROLADORES USADOS EN TRABAJOS PREVIOS

Referencia	Wicaksono (2024)	Vega-Luna (2017)	Hassan et al. (2024)	Este estudio
Tecnología base	Raspberry Pi	Arduino	ESP32	PLC LOGO!
Diseño Industrial	No (requiere protección)	No (requiere protección)	No (requiere protección)	Sí
Robustez	Media (con protección)	Media (con protección)	Media (con protección)	Alta
Facilidad de programación	Media/Alta (según lenguaje)	Alta (C/C++)	Media/Alta (C/C++, Python)	Alta (FBD/LAD)
E/S Integradas	No (GPIO limitado y sin aislar)	Sí (GPIO sin aislar)	Sí (GPIO sin aislar)	Sí (aisladas y protegidas)
Procesamiento	Alto	Bajo	Medio	Moderado
Conectividad	Ethernet, Wi-Fi, BT, USB	USB (para programación)	Wi-Fi, BT, USB	Modbus, Ethernet, MQTT
Costo	Bajo	Muy bajo	Bajo	Alto

III. DESARROLLO DEL SISTEMA DE MONITOREO EN TIEMPO REAL

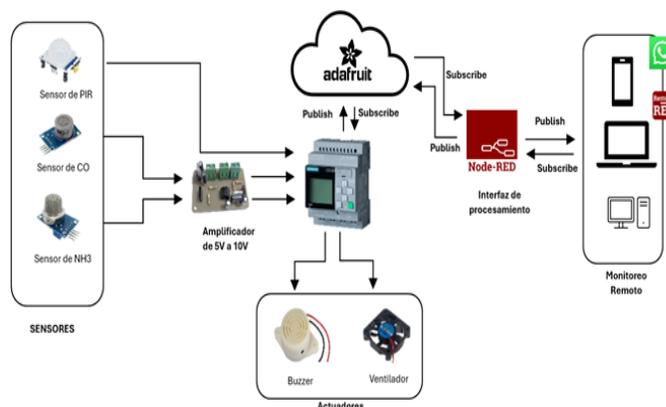


Fig. 1 Esquema propuesto integrando los sensores MQ-7 y MQ-135, PLC LOGO V8.4, bróker Adafruit, plataforma Node-Red y dispositivos para la visualización del monitoreo.

Como se muestra en la Figura 1, el sistema incorpora sensores comerciales de la línea MQ, específicamente los modelos MQ-7 y MQ-135, utilizados para la detección de monóxido de carbono (CO) y amoníaco (NH₃), respectivamente. Estos sensores poseen una salida analógica en el rango de 0 a 5V, lo que permite su uso como señal de entrada en el PLC LOGO V8.4.

Sin embargo, para garantizar un funcionamiento óptimo, es necesario adaptar la señal al rango de 0 a 10V, lo que requiere el uso de un amplificador de voltaje con una ganancia de 2. La amplificación se basa en la ecuación de un amplificador no inversor (1):

$$A = 1 + \frac{R_f}{R_i} \quad (1)$$

Donde A es la ganancia, y Rf y Ri son las resistencias utilizadas en el circuito de la Figura 2. Para este diseño, se propone que ambas resistencias tengan un valor de R = 10kΩ.

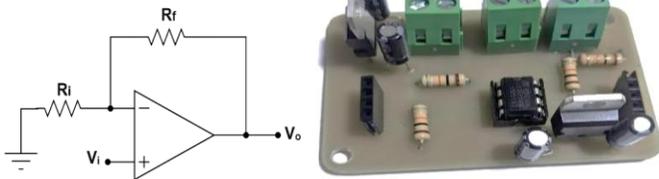


Fig. 2 muestra el circuito electrónico junto con su diseño impreso en placa PCB y los componentes utilizados, que incluyen: el circuito integrado LM358, un regulador de voltaje LM7805, resistencias de 10 kΩ, capacitores electrolíticos de 0.1 μF y 10 μF, así como terminales para la entrada de voltaje de 12V y las salidas analógicas de 0 a 10V.

La señal amplificada se conecta a la entrada analógica del PLC LOGO V8.4, mientras que el sensor PIR, encargado de la detección de presencia, se conecta a su entrada digital. Los datos provenientes de las entradas analógicas y digital del PLC LOGO V8.4 están configurados para enviar los datos cada 5 segundos al broker ADAFRUIT IO a través del protocolo MQTT, para ser posteriormente procesados en la plataforma Node-Red.

En esta plataforma, los datos almacenados en la nube son procesados; en el caso de los sensores de gas, la parametrización de la concentración se realiza mediante la siguiente ecuación (2):

$$\left(\frac{V_{out(max)} - V_{out(min)}}{V_{in(max)} - V_{in(min)}} * V_{in} \right) + K \quad (2)$$

El valor de la salida máxima equivale a 10 V, mientras que el valor de la salida mínima es 0 V. Por otro lado, el valor máximo de entrada del sensor, en el caso del CO, es de 2000 ppm, y el valor mínimo de entrada es de 20 ppm. Estos valores se multiplicarán por la corriente de entrada. El valor de concentración de tensión es un factor determinante. Por último, la variable K se refiere al valor mínimo de la salida, en nuestro caso, sería 0.

III. DESARROLLO DE LA INTERFAZ DE CONTROL AMIGABLE

Para la visualización y gestión de los datos recopilados, se emplea la plataforma Node-Red, específicamente el módulo Dashboard, que permite representar de manera clara e intuitiva las mediciones obtenidas por el sistema. Esta plataforma facilita la integración de distintos nodos, optimizando la interpretación y el control de la información procesada.

En primer lugar, el nodo CHART se utiliza para la representación gráfica de la concentración de gases en función del tiempo. Este componente emplea gráficos lineales que permiten analizar la evolución de los niveles de contaminación y detectar posibles tendencias en la exposición a gases tóxicos.

Complementariamente, el nodo SWITCH controla el historial de monitoreo, habilitando o deshabilitando la visualización de los registros almacenados según las necesidades del usuario.

Para la presentación de los valores en tiempo real, se incorpora el nodo GAUGE, el cual permite una rápida identificación del estado del ambiente mediante una codificación por colores: verde para condiciones seguras, amarillo para niveles de advertencia y rojo para situaciones de peligro. Además, con el fin de emitir alertas preventivas, se emplea el nodo TEXT, que genera notificaciones textuales en función de los umbrales predefinidos, facilitando la toma de decisiones oportunas ante eventos críticos.

Finalmente, se integra el nodo BUTTON, el cual cumple la función de reiniciar el contador del tiempo de exposición. Esta funcionalidad resulta esencial para restablecer el monitoreo en caso de eventos que requieran un nuevo inicio del proceso de medición. La arquitectura del sistema de visualización y sus componentes principales se presentan en la figura 3.

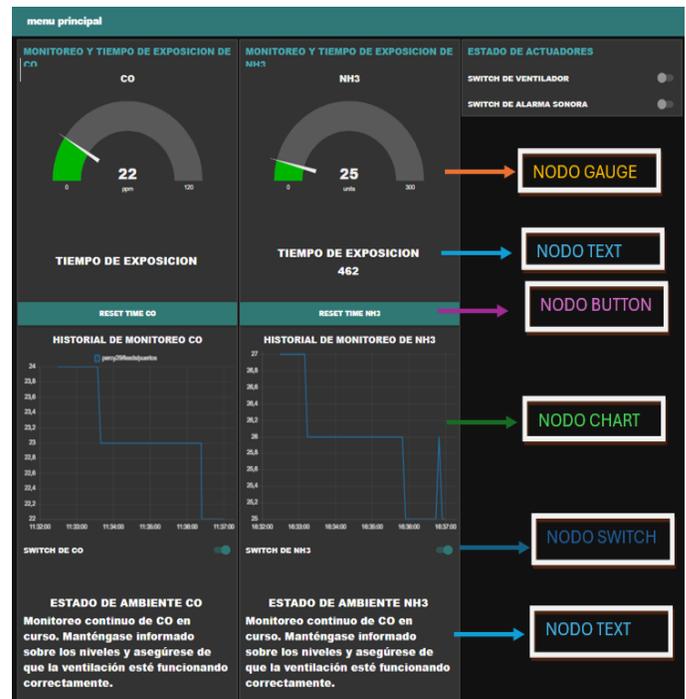


Fig. 3 Interfaz gráfica del sistema de monitoreo haciendo uso de los nodos Gauge, Chart, Button, Text y Switch.

IV. DESARROLLO DEL SISTEMA AUTOMATIZADO DE GESTIÓN DEL TIEMPO DE EXPOSICIÓN

Según las regulaciones de OSHA/CAL, los límites permisibles de exposición para monóxido de carbono (CO) y amoníaco (NH₃) están definidos con base en estándares de seguridad ocupacional. El promedio ponderado en el tiempo (TWA) para el CO y NH₃ es de 25 ppm, mientras que el límite de exposición a corto plazo (STEL) es de 100 ppm para el CO y 35 ppm para el NH₃ [13], [14], [15], [16]. En cumplimiento

con estas normativas, la implementación de medidas de control de exposición se basa en el umbral STEL, activando mecanismos de seguridad cuando el sensor de presencia detecta la entrada de trabajadores en el área monitoreada.

Al detectar la presencia de personal, el sistema inicia un control de tiempo dinámico, ajustando automáticamente el tiempo de exposición en función del nivel de concentración del gas detectado. Este proceso opera de la siguiente manera: cuando la concentración de CO alcanza los 25 ppm, se establece un tiempo de exposición inicial de 480 minutos. Si la concentración del gas aumenta, el sistema recalcula automáticamente el tiempo de exposición restante. La fórmula utilizada para este cálculo, específicamente para el CO, se presenta en la Ecuación (3):

$$\text{tiempo restante} = \begin{cases} \text{tiempo anterior} - \frac{1}{12} & \text{if } CO_{ppm} < 25 \\ \text{tiempo anterior} - \frac{CO_{ppm}}{37.5} & \text{if } CO_{ppm} \geq 25 \end{cases} \quad (3)$$

Con base en esta ecuación, si la concentración de CO supera los 100 ppm, el tiempo restante de exposición se reduce a menos de 15 minutos, garantizando el cumplimiento de los estándares de OSHA/CAL.

Este mismo enfoque se aplica para el NH₃, como se ilustra en la Figura 4. En el primer nodo de procesamiento, se define una variable acumuladora global, mientras que, en el segundo nodo, el sistema calcula el tiempo restante de exposición mediante una función de redondeo para mejorar la precisión.

```

1 var pir = flow.get('pir') || 0;
2 var val = msg.payload;
3 var msg_val = { payload: val };
4 var msg_acum = { payload: 0 };
5 if (pir==1){
6 var acum = flow.get('acum') || 0;
7 if (val<25){
8   acum+=1/12;
9 }
10 else{
11   acum += val/36; // 480/15=32 == 32 100/3
12   // si la concentracion bajaba sube
13 }
14 if(acum<0){acum = 0;
15 }
16 if(acum>480){acum = 480;
17 }
18 }
19 else {
20   acum = 0;
21 }
22 // store the value back
23 flow.set('acum', acum);
24 // make it part of the outgoing msg object
25 msg_acum.payload = acum;
26 return [msg_val,msg_acum];
27
Nombre: función 1
1 var acum = msg.payload;
2 var tiempo = 480;
3 tiempo = 480 -acum;
4 tiempo = Math.round(tiempo);
5 var msg_tiempo = { payload: tiempo };
6 return msg_tiempo;

```

Fig. 4 Código de programación realizado en el Nodo Función de Node-Red para el tiempo de exposición.

V. IMPLEMENTACION DEL SISTEMA DE ALERTAS TEMPRANA ALINEADO CON LA NORMATIVA DE SEGURIDAD INTERNACIONAL Y LOCAL PARA LA PROTECCION DEL PEROSNAL Y LA PROMOCION DE MEDIDAS PREVENTIVAS

De acuerdo con los niveles establecidos por las normativas OSHA/CAL, se ha llevado a cabo la parametrización en el nodo de función de Node-Red, con el objetivo de visualizar gráficos en el panel de control y generar las notificaciones correspondientes. Este proceso permite monitorear en tiempo real la concentración de gases y establecer alertas preventivas en caso de superar los límites de exposición definidos. La implementación de este mecanismo se ilustra en las Figuras 3 y 5.

```

1 var ppm = msg.payload;
2
3 if (ppm >= 0 && ppm <= 25) {
4   msg.payload = "Monitoreo continuo de CO en curso. Manténgase ";
5 } else if (ppm > 25 && ppm <= 100) {
6   msg.payload = "Advertencial Niveles de CO entre 25-100 ppm. ";
7 } else if (ppm > 100) {
8   msg.payload = "¡Peligro! Alta concentración de CO (>100 ppm). ";
9 } else {
10  msg.payload = "Fuera de rango de monitoreo";
11 }
12
13 return msg;

```

Fig. 5 Programación realizada en NODE-RED haciendo uso de los nodos función, gauge, text y WhatsApp. Esta programación está basada en las normas OSHA/CAL.

Además, con el propósito de integrar el sistema en el entorno cotidiano, se implementaron notificaciones a través de las aplicaciones REMOTE RED y WhatsApp, permitiendo así una comunicación eficiente y en tiempo real sobre el estado del ambiente monitoreado, como se muestra en la Figura 6.

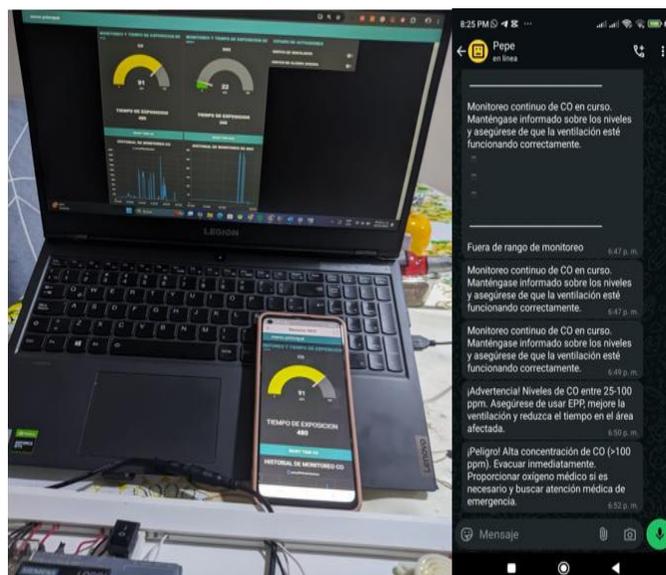


Fig. 6 Envío de notificaciones sobre el estado del ambiente a las aplicaciones móviles Remote Red y WhatsApp.

Finalmente, como parte de una medida correctiva dentro de la jerarquía de control de riesgos, se implementó el enfoque de "Control de Ingeniería", mediante la instalación de un extractor y como parte del "Control Administrativo" se usó una alarma sonora. Estos dispositivos se activan automáticamente cuando los niveles de gas superan los 100

ppm, garantizando una respuesta inmediata ante condiciones peligrosas. Además, el ventilador cuenta con modos de operación manual, remoto y automático, permitiendo la purificación del ambiente según las necesidades de los trabajadores dentro del área monitoreada. Este proceso se ilustra en la Figura 7.

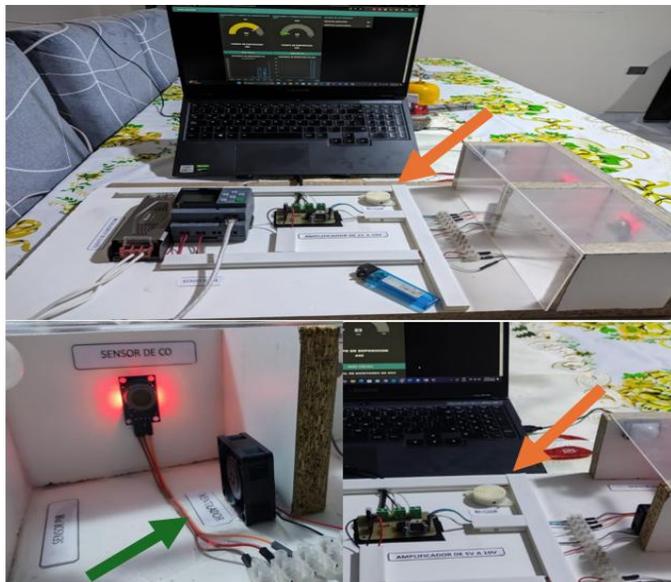


Fig. 7 Reducción del nivel de riesgo mediante la jerarquía de control de riesgo.

VI. PRUEBAS EXPERIMENTALES DEL SISTEMA

Para validar el sistema desarrollado se realizó pruebas experimentales en un entorno controlado simulando concentraciones de monóxido de carbono y amoníaco, los sensores MQ-7, MQ-135 fueron precalentados y calibrados de acuerdo con la documentación técnica del fabricante. Las pruebas se realizaron en intervalos de 20 segundos con mediciones repetidas para cada concentración.

TABLA II
TIEMPO DE RESPUESTAS DEL SISTEMA EN PRUEBAS EFECTUADAS

Gas Detectado	Concentración (ppm)	Tiempo de detección (s)	Activación de alarma	Activación de ventilación
CO	25	6	No	No
CO	100	7	Sí	Sí
NH ₃	25	6	No	No
NH ₃	35	8	Sí	Sí

Las condiciones de pruebas se dieron en un ambiente ventilado con una temperatura promedio de 25°C y la humedad relativa de 84%, la frecuencia de envío de datos del PLC al Broker es de 5 segundos por cada muestra emitida. Los

datos obtenidos del tiempo de respuesta se pueden visualizar en la tabla II.

VII. LIMITACIONES Y RECOMENDACIONES

El sistema propuesto demuestra una alta eficiencia y aplicabilidad en entornos industriales, no obstante, se han identificado los siguientes puntos de mejora para trabajos futuros:

Sensores MQ: Tiene una sensibilidad adecuada, pero pueden presentar variaciones en condiciones de alta humedad o temperaturas extremas. Por tal limitación se recomienda el uso de sensores certificados de mayor resistencia como podría ser de la marca MSA, DRAGER, etc.

Dependencia de la conectividad MQTT: En el caso de la pérdida de red, el sistema no transmite datos hasta restablecer conexión. Se propone replicar los cálculos usados en el PLC haciendo uso de compuertas lógicas en este caso un OR para que el sistema continúe trabajando sin problemas cuando la conexión a internet falle.

VIII. DISCUSION

La presente investigación ha demostrado que la integración de tecnologías como PLC LOGO V8.4, sensores MQ-7 y MQ-135, comunicación MQTT y la plataforma Node-Red permite el desarrollo de un sistema de monitoreo automatizado de exposición a gases tóxicos en entornos industriales. La implementación de este sistema responde a la necesidad de mejorar la seguridad de los trabajadores, optimizando el control y la supervisión de los niveles de CO y NH₃ en el ambiente, en cumplimiento con normativas como OSHA y CAL-OSHA. En comparación con estudios previos, como el de Wicaksono [3], que emplea plataformas IoT para el monitoreo ambiental y alertas remotas, nuestro sistema introduce una mejora significativa al utilizar un controlador industrial robusto (PLC LOGO V8.4) en lugar de una Raspberry Pi. Esto garantiza una mayor estabilidad y fiabilidad en condiciones adversas, donde la resistencia a interferencias y la continuidad operativa son factores críticos. Además, a diferencia de Vega [9], que emplea tecnología LoRa para la transmisión de datos en un entorno hospitalario, nuestro enfoque resalta por su adaptabilidad a ambientes industriales exigentes y la implementación de notificaciones en WhatsApp y Remote-Red, facilitando una comunicación más accesible y efectiva para los operarios. Uno de los aportes más relevantes de esta investigación es la implementación de un control adaptativo del tiempo de exposición, basado en los niveles de concentración de gases tóxicos. A través de una ecuación paramétrica, el sistema ajusta automáticamente el tiempo restante de permanencia en función de la concentración detectada, asegurando que no se superen los límites establecidos por la normativa. Este enfoque no ha sido abordado en los estudios previos revisados [3], [4], [6], [9], donde el monitoreo se limita a la detección y notificación, sin una gestión dinámica del tiempo de exposición.

Asimismo, la integración con Node-Red permitió el diseño de una interfaz visual intuitiva, utilizando nodos como CHART para gráficos históricos, GAUGE para visualización de valores en tiempo real y SWITCH para activar o desactivar monitoreos. La capacidad de emitir alertas a través de WhatsApp y Remote-Red refuerza la accesibilidad del sistema, diferenciándolo de trabajos previos que utilizan plataformas menos extendidas, como Telegram [3]. Además, la incorporación de un ventilador con operación manual, remota y automática, junto con una alarma sonora, establece un mecanismo de control correctivo, alineado con las estrategias de control de ingeniería recomendadas por OSHA. Los resultados obtenidos confirman que el sistema presenta un tiempo de respuesta inferior a 10 segundos, lo que garantiza una reacción rápida ante cambios en las condiciones ambientales. Esto representa una mejora significativa en comparación con otros sistemas de monitoreo que dependen de microcontroladores de menor capacidad de procesamiento o de redes de transmisión menos eficientes. En términos generales, el sistema desarrollado no solo cumple con las normativas internacionales de seguridad ocupacional, sino que también ofrece una solución escalable y adaptable a distintos entornos industriales, proporcionando una herramienta integral para la prevención de riesgos laborales y la mejora en la gestión de la exposición a gases tóxicos.

VII. CONCLUSIONES

El desarrollo del sistema de monitoreo y control de gases tóxicos en entornos industriales ha demostrado ser una solución eficiente, confiable y adaptable. La integración de tecnologías como PLC LOGO V8.4, comunicación MQTT, Node-Red, WhatsApp y Remote-Red permitió un monitoreo continuo en tiempo real, ofreciendo una plataforma robusta para la prevención de accidentes laborales.

Eficiencia del sistema desarrollado: El desarrollo del sistema demostró ser una solución amigable y confiable para el monitoreo y control de gases tóxicos en entornos industriales, destacándose por su capacidad de integrar tecnologías como el PLC LOGO V8.4, Whatsapp, Node -red, Remote red y MQTT los que permitieron realizar un monitoreo continuo y en tiempo real ofreciendo así una solución robusta y adaptable para prevenir accidentes laborales.

Cumplimiento Normativo: El sistema cumplió con las especificaciones de las normas internacionales y locales, como OSHA, NIOSH y la legislación peruana. Esto asegura que la solución propuesta no solo sea técnicamente funcional, sino que también esta alineado a los estándares requeridos para la seguridad laboral.

Control automatizado de tiempo de exposición: la parametrización de los umbrales y tiempos de exposición basados en la norma STEL de OSHA/CAL, para concentraciones críticas de gases demostró ser una herramienta efectiva que se adapta de manera dinámica de acuerdo las condiciones detectadas del ambiente minimizando así los riesgos a la salud.

Rapidez y confiabilidad: el sistema logro tiempos de respuestas inferiores a los 10 segundos desde la detección hasta la emisión de alertas. Esto garantiza una acción preventiva inmediata, reduciendo significativamente las probabilidades de accidentes laborales.

Finalmente, la implementación de este sistema representa una contribución significativa a la seguridad laboral en entornos industriales, proporcionando una herramienta innovadora y escalable que promueve un ambiente de trabajo más seguro y saludable. La capacidad del sistema para integrar múltiples tecnologías y su facilidad de uso lo posicionan como una solución viable y replicable en distintos sectores industriales, contribuyendo a la protección de la salud de los trabajadores y a la mejora de las condiciones laborales.

REFERENCIAS

- [1] “Aprueba la Norma Técnica de Salud que establece el Listado de Enfermedades Profesionales. | SINIA.”
- [2] MINEM, “ESTADÍSTICA DE ACCIDENTES MORTALES EN EL SECTOR MINERO - 2021,” 2021.
- [3] M. F. Wicaksono and M. D. Rahmatya, “SERVER SECURITY AND AIR QUALITY MONITORING SYSTEM USING RASPBERRY PI 4 AND TELEGRAM,” *Journal of Engineering Science and Technology*, vol. 19, no. 4, pp. 1156–1170, Aug. 2024.
- [4] A. K. Hassan, M. S. Saraya, A. M. T. Ali-Eldin, and M. M. Abdelsalam, “Low-Cost IoT Air Quality Monitoring Station Using Cloud Platform and Blockchain Technology,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 14, no. 13, Jul. 2024,
- [5] E. Juan and S. J. Castrillon, “DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITOREO Y ALERTAS TEMPRANAS PARA GAS NATURAL Y MONÓXIDO DE CARBONO EN EL HOGAR,” 2022.
- [6] F. Bandieri, N. Falcone, and M. Kuzman, “BreatheEasy: Sistema de monitoreo ambiental distribuido para la detección y alerta temprana de fugas de gases tóxicos,” 2023.
- [7] C. A. Pajares Galvez and M. A. Rumay Gil, “Implementación de un sistema informático para el monitoreo de concentración de gases contaminantes del aire para el distrito de Víctor Larco Herrera, Trujillo 2023,” lima, 2023.
- [8] Oscar Uchelly Romero Cortez, “Vista de Sistema Electrónico Portátil para el Monitoreo de Gases Tóxicos en la Cabina de Vehículos mediante una Aplicación Móvil | Revista Científica Emprendimiento Científico Tecnológico.”
- [9] J. I. Vega-Luna, M. A. Lagos-Acosta, and G. Salgado-Guzmán, “Monitoreo de concentración de monóxido de carbono usando tecnología Long-Range,” *Ingenius. Revista de Ciencia y Tecnología*, no. 18, pp. 73–83, Jul. 2017.
- [10] A. S. Nagy, A. Polanco Risquet, O. L. Martínez de la Cotera, and O. Carralero Ibargollen, “Medición simultánea de gases con sensores MQ,” *Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones*, vol. 41, no. 1, pp. 34–43, 2020,
- [11] U. Y. Sociedad, O. Erazo Moreta, Á. R. Santana Sornoza, M. J. Vera Alarcón, and B. W. Oviedo Bayas, “Monitorización de gases contaminantes en ambientes cerrados usando WSN para la toma de acciones preventivas,” *Revista Universidad y Sociedad*, vol. 12, no. 3, pp. 116–122, 2020.
- [12] M. Alberto and D. Alvarado, “‘Diseño e implementación de un sistema electrónico de monitoreo de gases tóxicos para minería subterránea con acceso remoto a través de web server’ Ingeniero Electrónico”.
- [13] O. A. Cevallos Boboa, “Implementación de un sistema de monitoreo de gases contaminantes que afectan a la ciudad de Esmeraldas,” *Pontificia Universidad Católica del Ecuador*, 201AD.
- [14] “La Ley de Seguridad y Salud Ocupacional y las Normas de OSHA.” Accessed: Dec. 27, 2024.
- [15] “CARBON MONOXIDE | Occupational Safety and Health Administration.”
- [16] “AMONÍACO | Administración de Seguridad y Salud Ocupacional.”