



Científica

ISSN: 1665-0654

ISSN: 2594-2921

revistacientifpn@yahoo.com.mx

Instituto Politécnico Nacional

México

Luna-López, Manuel; Hernández-Lozano, Minerva; Aldana-Franco, Rosario; Álvarez-Sánchez, Ervin; Leyva-Retureta, José Gustavo; Ricaño-Herrera, Francisco; Aldana-Franco, Fernando

Sistema inteligente de monitoreo para condiciones ambientales en Industria 4.0

Científica, vol. 25, núm. 2, 2021, Julio-Diciembre, pp. 1-10

Instituto Politécnico Nacional

Distrito Federal, México

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61466617007>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica Redalyc

Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal

Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

## Sistema inteligente de monitoreo para condiciones ambientales en Industria 4.0

Intelligent monitoring system for environmental conditions in Industry 4.0

Manuel Luna-López<sup>1</sup>, Minerva Hernández-Lozano<sup>2</sup>, Rosario Aldana-Franco<sup>3</sup>, Ervin Álvarez-Sánchez<sup>4</sup>  
José Gustavo Leyva-Retureta<sup>5</sup>, Francisco Ricaño-Herrera<sup>6</sup>, Fernando Aldana-Franco<sup>7</sup>

Universidad Veracruzana, MÉXICO

<sup>1</sup><https://orcid.org/0000-0001-5454-1740>

<sup>2</sup><https://orcid.org/0000-0002-11248103>

<sup>3</sup><https://orcid.org/0000-0002-0503-6024>

<sup>4</sup><https://orcid.org/0000-0002-0790-0429>

<sup>5</sup><https://orcid.org/0000-0001-5123-0111>

<sup>6</sup><https://orcid.org/0000-0002-0151-7146>

<sup>7</sup><https://orcid.org/0000-0003-4532-8782> | [faldana@uv.mx](mailto:faldana@uv.mx)

Recibido 14-05-2021, aceptado 30-08-2021.

### Resumen

La revolución tecnológica que implica la implementación de Industria 4.0 obliga a utilizar la tecnología a monitorear las condiciones en las que la producción se lleva a cabo. Esto repercute en los productos obtenidos, pero sobre todo en la salud del personal que labora en las industrias. Lo cual tiene como principal beneficio la reducción de los accidentes de trabajo y las enfermedades producidas por las condiciones ambientales desfavorables. Uno de los gases más peligrosos en el sector industrial es el Monóxido de Carbono, cuyo efecto en el cuerpo humano es el intoxicar los sistemas. Así se presenta un sistema que permite monitorear cuatro variables ambientales (humedad relativa, monóxido de carbono, radiación térmica, luminosidad) que son variables importantes en ambientes industriales en donde se emplean motores. El sistema opera de forma inteligente mediante una herramienta de inteligencia artificial que permite clasificar (tomar decisiones) llamada árbol de decisión. Empleando WEKA, se probaron tres algoritmos para la construcción del árbol de decisión: J.48, Random Forest y Random Tree. El experimento arrojó que el algoritmo J.48 obtuvo un promedio 99.86% de aciertos en la clasificación de todas las repeticiones. El algoritmo de Random Forest obtuvo 99.31% de la clasificación correcta. Mientras que Random Tree tuvo 95.07% de clasificación correcta. Este sistema permite modificar el estado de un sistema de ventilación, refrigeración, semáforo de variables y lámpara de emergencia. Además, el sistema envía los datos colectados mediante Internet de las Cosas (IoT) a un cliente quien puede consultar la información en tiempo real.

**Palabras clave:** Industria 4.0, internet de las cosas, control inteligente, árbol de decisión.

### Abstract

The technological revolution that implies the implementation of Industry 4.0 forces the use of technology to monitor the conditions in which production takes place. This has repercussions on the products obtained, but above all on the health of the personnel working in the industries. Which has as its main benefit the reduction of work accidents and diseases caused by unfavorable environmental conditions. One of the most dangerous gases in the industrial sector is Carbon Monoxide, whose effect on the human body is to poison the systems. This is how a system is presented that allows monitoring four environmental variables (relative humidity, Carbon monoxide, Thermal radiation, luminosity) which are important variables in industrial environments where motors are used. The system operates intelligently through an artificial intelligence tool that allows classifying (making decisions) called the decision tree. Using WEKA, three algorithms were tested for the construction of the decision tree: J.48, Random Forest, and Random Tree. The experiment showed that the algorithm J.48 obtained an average 99.86% of correctness in the classification of all the reviews. The Random Forest algorithm obtained 99.31% of the correct classification. While Random Tree had a 95.07% correct rating. This system allows modifying the status of a ventilation, cooling, variable traffic light and emergency lamp system. In addition, the system sends the data collected through the Internet of Things (IoT) to a client who can consult the information in real time.

**Index terms:** Industry 4.0, internet of things, intelligent control, decision tree.

## I. INTRODUCCIÓN

Las condiciones ambientales desfavorables en la industria acarrear problemas como accidentes laborales o enfermedades para el personal que interviene en el proceso de fabricación. Lo que repercute en gastos para la empresa o en la baja de personal que impacta al proceso industrial.

Los problemas que se pueden presentar varían de acuerdo con los elementos que forman parte del medio ambiente industrial. Un ejemplo son los motores, que producen monóxido de carbono (CO) que es tóxico para los seres humanos [1]. Se trata de un gas incoloro, inodoro, insaboro e insípido. Los efectos de la intoxicación por este gas son permanentes y en el medio ambiente se encuentra a razón de 0ppm a 1ppm. Para que un ambiente se considere sano, el nivel máximo del monóxido de carbono es de 9ppm, aunque se puede estar expuesto a 50ppm por no más de 8 horas. Los efectos de intoxicación pueden ir desde dolores de cabeza, náusea, vómito hasta la muerte [2].

Otro problema que se puede presentar en ambientes en donde están involucrados motores es la alta humedad en el ambiente. El calor (radiación térmica) que se genera produce que la humedad aumente en el ambiente y el efecto sobre las personas es la deshidratación, efectos sobre el sistema respiratorio y circulatorio.

Industria 4.0 es una nueva tendencia en la industria que presupone una revolución industrial enmarcada por los sistemas ciberfísicos. Este tipo de sistemas requieren del componente físico y un componente en el ciberespacio. Lo que permite interconectar los componentes e intercambiar información para la toma de decisiones [3].

El propósito fundamental es lograr aumentar la producción reduciendo los costos para aumentar las ganancias. Pero este enfoque también implica la transformación de puestos de trabajo y la mejora de las condiciones operativas de las fábricas. Por lo que es importante el diseño y creación de sistemas que incorporen la visión de la Industria 4.0 para la mejora de las condiciones en que los empleados de la industria se encuentran inmersos [4].

Los sistemas que emplean herramientas de Industria 4.0 para el monitoreo de variables han sido aplicados a diferentes ramas. Por ejemplo, el uso de la arquitectura IoT para el monitoreo de las condiciones en la agricultura [5], en donde se busca la mejora de las condiciones en donde se desarrollan los cultivos [6]. Otro ejemplo de sistemas IoT es el monitoreo de las condiciones de los ríos y prevenir desastres sobre comunidades cercanas [7]. También permiten el monitoreo de variables biomédicas en tiempo real para conocer el estado de físico de las personas [8] o de componentes de automóviles [9].

En el caso de la industria, los sistemas de monitoreo de señales basados en componentes de Industria 4.0 se emplean en diferentes aplicaciones. Lo que demuestra la flexibilidad y poder de aplicación de este tipo de tecnología. Por ejemplo, para el monitoreo de gases, fugas de combustible, temperatura de una caldera [10]. Este sistema envía alertas de seguridad sobre presencia de gases tóxicos o fugas de combustible en ambientes industriales a los gerentes mediante una plataforma de servicios Cloud. Esto se realiza mediante una red de sensores inteligentes, que envían la información para ser procesada en un servidor remoto. El disparo de las alertas tiene que ver con los niveles de seguridad establecidos por cada empresa.

En ese mismo sentido, se han creado sistemas que permiten monitorear un conjunto de variables ambientales mediante topologías diversas aplicadas a la red de sensores. Un ejemplo es la topología estrella que enlaza información mediante el protocolo ZigBee [11]. Para este sistema se emplean sensores de gas MQ4 y MQ7, además de un sensor de fuerza resistivo. La información se concentra en un microcontrolador Arduino y se utiliza el protocolo de comunicación IEE 802.15.4. También se emplea el sistema que reduce el tamaño de los mensajes MQTT (Message Queuing Telemetry Transport). Los datos son manejados mediante un servicio IaaS (Infraestructura como servicio) y puede ser visualizados mediante gráficas.

Otro ejemplo se presenta en un sistema de administración de energía [12]. Se trata de un sistema basado en una tarjeta Raspberry Pi y un servidor Cloud aplicado a una compañía manufacturera. El sistema se complementa con sensores para medir la energía existente en la planta. Este sistema tiene el propósito de optimizar el manejo de la energía mediante el análisis histórico y actual del consumo.

De este modo, el propósito de este trabajo implementar un sistema ciberfísico inteligente para el monitoreo de las condiciones ambientales en la industria. Este sistema debe funcionar como apoyo para monitorear las condiciones ambientales respecto a las variables: ppm de monóxido de carbono en el aire, humedad relativa, radiación térmica y luminosidad. Lo que contribuye al cuidado de la salud de los operadores involucrados en este tipo de ambientes.

En la primera sección de este artículo se presenta el problema a resolver junto con las generalidades de la investigación. En la sección de Antecedentes se muestran los conceptos mediante los cuales se plantea la solución del problema presentado. En la sección Propuesta de solución se muestra el proceso de diseño y prueba del sistema resultante. En la sección de Resultados se muestran los datos que validan el funcionamiento del sistema. En la sección de Discusión se abordan los aspectos destacados del sistema diseñado. Finalmente, en la última sección se muestran las conclusiones de la investigación.

## II. ANTECEDENTES

El término Industria 4.0 aparece por primera vez en Alemania en el año 2013. En dicho concepto, la mayoría de los componentes de un sistema de producción tienen una entidad cibernética, lo que les permite enviar datos y comunicarse con el resto de los dispositivos [13]. Lo que implica existan mecanismos de coordinación entre ellos, principalmente basados en técnicas de análisis de datos y toma de decisiones en forma autónoma, apoyados por la Inteligencia Artificial [14].

Esta perspectiva implica una amplia transformación de los mecanismos de producción, con la finalidad de reducir los costos de producción y aumentar las ganancias. Esto se logra ya que las máquinas no dependen del factor humano, por lo que no existe la necesidad de detener la producción. Es decir, se trata de la automatización total de los procesos industriales.

Lo que conlleva un proceso de adaptación de los empleos, en donde el personal pasa de tareas en la línea de producción a tareas que implican supervisión y mantenimiento de los equipos. Además de puestos nuevos para mejorar los procesos de toma de decisiones y análisis de datos. Que impacta a las condiciones de seguridad a los que los seres humanos se verán expuestos.

La Industria 4.0 utiliza las siguientes herramientas computacionales: Big Data, Cloud Computing, Ciberseguridad, Robótica, Realidad virtual y aumentada, Visión Computacional e Internet de las Cosas. El Big Data es utilizado para el análisis masivo de los datos que provienen de cada componente de la fábrica, así como los datos que se obtienen de los productos, distribuidores y clientes. Dichos datos se guardan en servidores que no necesariamente son comprados por la empresa, ya que se espera que se utilicen los servicios de almacenamiento masivo del Cloud Computing. Por lo que la Ciberseguridad resulta fundamental para evitar el robo de información y el espionaje [15]. En el caso de la robótica, se emplea tanto la rama de control como la autónoma para realizar los procesos de producción, abastecimiento, empaque, distribución y almacenamiento de los productos. La realidad virtual y la realidad aumentada permiten un nuevo esquema de entrenamiento para el personal, que no compromete el sofisticado equipo de la fábrica, pero también permite la sustitución de tableros de control y otros dispositivos [16]. La visión computacional permite el monitoreo de los procesos en tiempo real mediante componentes de imagen y video. El Internet de las Cosas es el mecanismo que dota a los componentes de una fábrica de identidad ciber-física, permitiendo interconectarse [17].

IoT es una arquitectura que consiste únicamente en la conexión a Internet (ver figura 1). Esta arquitectura consta de cuatro capas (Soumyalt: sensado, red, cloud y aplicación. La capa de sensado contiene los componentes de medición y la tarjeta que adquiere las señales que se miden. La segunda capa es la de red e involucra la infraestructura de conexión, que típicamente se trata de una red inalámbrica de área local. La capa de almacenamiento de datos involucra la infraestructura para almacenar los datos, generalmente esta característica se encuentra en una nube de cómputo o algún dispositivo físico como memorias SD. Finalmente, la capa de aplicación aloja los mecanismos de decisión o que provee la autonomía al sistema de IoT y se comunica con los actuadores.

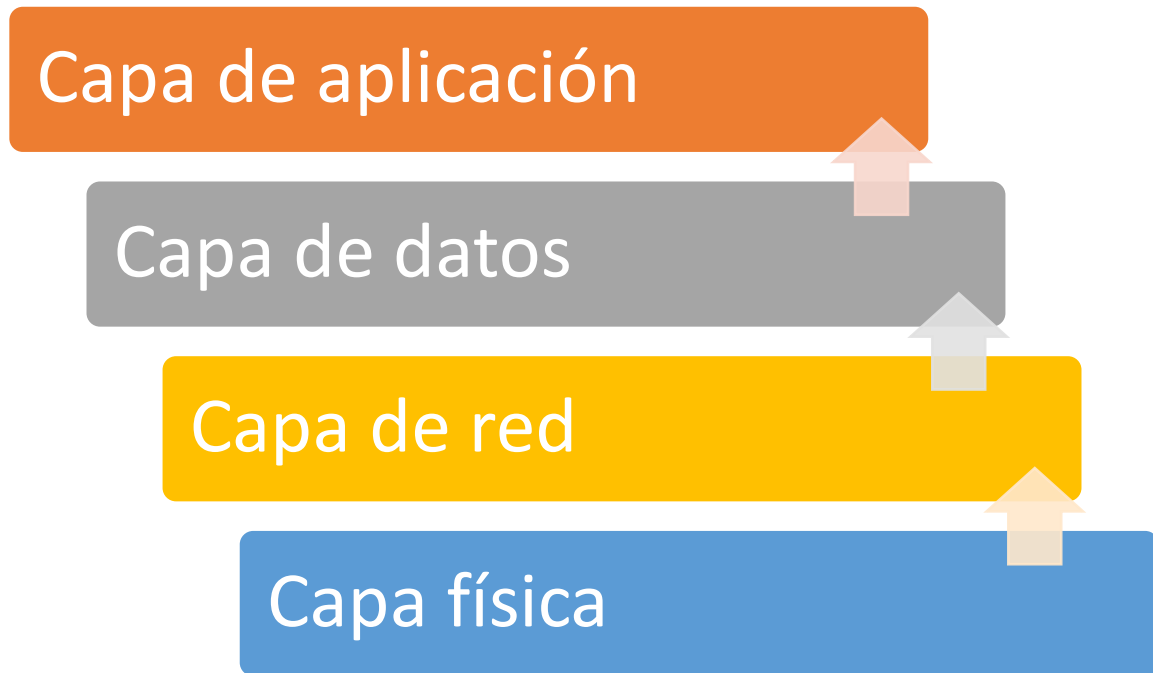


Figura 1. Arquitectura IoT.

Así, la capa de aplicación requiere de una herramienta que dote de autonomía a los sistemas. Estas herramientas puede ser cualquier algoritmo de IA que funcionen como clasificadores como los Árboles de Decisión [18]. Estos mecanismos de clasificación son jerárquicos, secuenciales y explicativos que reciben un conjunto de datos de entrada (atributos) y devuelve un valor de clase. Los árboles de decisión reciben su nombre porque son estructuras que comienzan con un nodo raíz que se va dividiendo en ramas que producen nodos hijos hasta alcanzar los nodos hojas (valores de clase). De tal manera que las decisiones se toman recorriendo las diferentes ramas de acuerdo con las condiciones que se presentan.

Para producir un árbol de decisión es necesario contar con una base de conocimiento (también llamada base de datos). En dicha base se incluyen los diferentes casos a los que se puede enfrentar el árbol y sus soluciones. La base de conocimientos se puede crear a través de mediciones reales o por el conocimiento de un experto humano (ingeniería del conocimiento).

Con la base de datos, es necesario crear y probar el árbol de decisión mediante algún algoritmo de aprendizaje automático. Entre estos algoritmos se encuentra el J48, Random Forest y Random Tree. Estos algoritmos generan los árboles a través de la métrica de la Entropía de la Información, que sirve para determinar cuál de todos los atributos explica mejor una decisión.

De tal manera que los árboles de decisión son estructuras sencillas de programar mediante instrucciones si-entonces. Estos pueden ser programados en computadoras y tarjetas empujadas. Esto permite incorporar sensores y actuadores de acuerdo con las necesidades del entorno y del sistema.

### III. PROPUESTA SOLUCIÓN

Se creó un sistema inteligente ciberfísico con la finalidad de monitorear las variables ambientales de un sistema de producción en el que están involucrados motores (véase figura 2). Este sistema está basado en IoT, empleando la tarjeta Arduino y un árbol de decisión como mecanismo de toma de decisiones. Las variables monitoreadas fueron: humedad relativa, radiación térmica, luminosidad, monóxido de carbono. Se construyó

una base de datos, mediante ingeniería del conocimiento, para entrenar el árbol en el software Weka [19]. El sistema fue dotado con la capacidad de modificar el funcionamiento de un sistema de ventilación, uno de refrigeración, semáforo y lámpara de emergencia. Por ello el sistema fue dividido en cinco etapas: bloque de senado y tarjeta de control, comunicación, almacenaje de datos y aplicación.

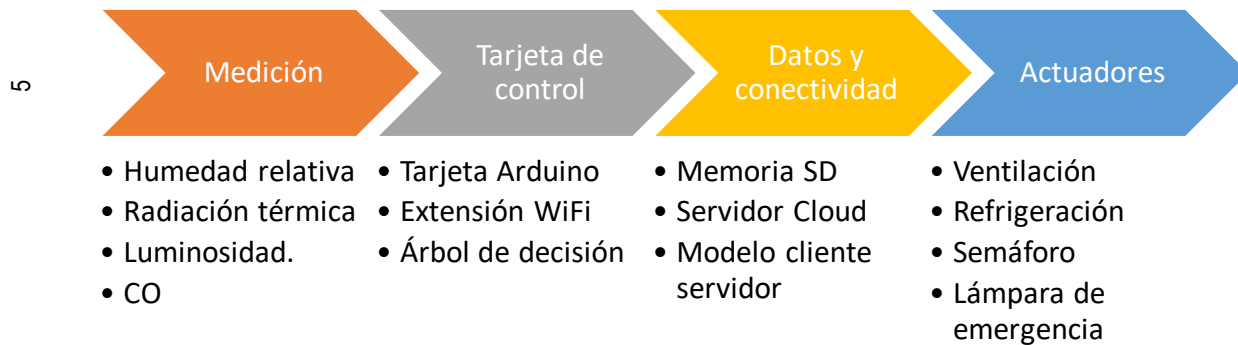


Figura 2. Funcionamiento de la propuesta.

El bloque de medición y tarjeta de control conjuga la adquisición y procesamiento de las señales. Para medir la radiación térmica se empleó el sensor SEN-09570, se trata de un sensor de efecto PIR. Existen tres niveles para la radiación térmica: Baja (menor a 15°C), normal (de 15°C a 25°C) y alta (mayor a 25°C). Para medir la humedad relativa. El sensor se conectó mediante el canal I2C.

La humedad relativa es la relación entre la humedad absoluta que se encuentra en el aire y la cantidad de vapor de agua que contiene el aire. Para medir la humedad relativa se empleó el sensor SEN-09569. La humedad relativa se cuantificó en tres niveles: baja (menor a 50%), aceptable (50% a 60%) y alta (mayor a 60%). El sensor fue conectado a la tarjeta adquisidora mediante un canal analógico.

En cuanto a la intensidad luminosa se utilizó el sensor TEMT-6000. Se emplearon dos niveles de detección: Insuficiente (menor a 300 luxes) e suficiente (superior a 300 luxes). Estos niveles son los recomendados para labores industriales ordinarias. El sensor se conecta mediante un canal analógico a la tarjeta adquisidora. La intensidad luminosa en una fábrica es importante ya que facilita el rango de visión de los procesos.

El último sensor empleado fue el MQ-07, que detecta diversos gases, entre ellos el monóxido de carbono. El sensor detecta la presencia o ausencia del gas, pero también puede ser configurado para medir la aproximación de ppm del gas en el aire. Para calibrar este sensor se realizaron pruebas en un medio controlado en donde se produjo el gas y se almacenó. Posteriormente se pesó y se obtuvo una relación de la cantidad de gas existente. Con este paso realizado, se sometió el sensor al espacio donde se almacenó el gas y se calibró la resistencia de ajuste de acuerdo con la tabla de la hoja de datos proporcionada por el usuario. El nivel de gas fue cuantificado en tres niveles: Aceptable (menores a 200ppm), Peligro medio (200ppm a 1200ppm), Peligro alto (mayores a 1200ppm). El sensor se conectó a un canal analógico de la tarjeta adquisidora.

Todas las mediciones fueron adquiridas y procesadas en una tarjeta Arduino ADK que fue programada con lenguaje C. Se empleó este modelo ya que brinda la posibilidad de usar la extensión de WIFI, que brindó conectividad al sistema. La adquisición de datos fue completada con una tarjeta SD incorporada a la extensión WIFI para almacenar los datos que fueron enviados posteriormente a un servidor Cloud.

Para la conectividad se empleó una red inalámbrica de área local y el modelo cliente servidor. El servidor es la tarjeta de adquisición de datos. El cliente es un navegador web en donde se muestra el valor de cada sensor en tiempo real.

Dentro de la tarjeta Arduino se programó un árbol de decisión. Este mecanismo de clasificación se entrenó mediante el software de licencia libre WEKA. Se trata de un programa que permite entrenar diferentes herramientas de clasificación, clustering, regresión y predicción. Consta de un entorno de exploración y uno de experimentación.

Para entrenar el árbol se utilizó una base de datos generada con todas las combinaciones posibles de las entradas. Por ello, la base de datos contenía 54 instancias con 4 atributos, 4 clases. Para determinar la salida correcta, se aplicó ingeniería del conocimiento. Es decir, la decisión en la base de datos la toma un ser humano en cada uno de los casos de la base.

Se probaron tres tipos de algoritmos para producir los árboles de decisión: J.48 [20], Random Forest [21], Random Tree [22]. Esto se hizo con la finalidad de conocer cuál de los algoritmos resuelve de mejor manera la base presentada. Se configuró un experimento con 90 repeticiones para cada tipo de árbol, empleando como mecanismo de validación cross-validation a 10 folds. Todos los árboles se configuraron como binarios. Se comparó la media de los porcentajes de acierto de los tres algoritmos para elegir la mejor opción. Finalmente se eligió el árbol que mayor porcentaje de clasificación obtuvo. Esto se realizó mediante el explorador de WEKA.

La respuesta del sistema se dio mediante cuatro sistemas de actuación: sistema de ventilación, sistema de refrigeración, Semáforo, Lámparas de emergencia. El sistema de ventilación tuvo la intención de evitar el paro del proceso productivo ante condiciones adversas de la calidad de aire. Este sistema de ventilación tuvo tres valores de salida: Apagado, Normal y Máximo. El sistema de refrigeración funciona para disminuir la humedad relativa y temperatura ambiente. Este sistema tuvo tres niveles de funcionamiento: Apagado, Normal, Máximo. El sistema de semáforo fue una alerta visual que muestra las condiciones del medio ambiente mediante tres leds de colores rojo, amarillo y verde. El color verde se asoció a condiciones óptimas de operación, mientras que el amarillo indica condiciones poco favorables, mientras que el rojo indicó condiciones no favorables. Finalmente, las lámparas de emergencia son dispositivos que fueron agregados al sistema para complementar el sistema de semáforo e indicar el paro necesario. Se generaron dos posibles estados para las lámparas: Apagado y Encendido. Todos los elementos de actuación se controlaron a través de la misma tarjeta Arduino y su valor depende de la decisión obtenida por el árbol. De tal manera que todos los actuadores se conectaron a relevadores. Esto permitió controlar sus diversos niveles a través de señales digitales.

Se probó el funcionamiento del sistema en forma física mediante la base de datos construida. Para ellos se manipularon las condiciones de los sensores y se contó la cantidad de aciertos que el sistema generó.

#### IV. RESULTADOS

El experimento para seleccionar al algoritmo que resolvió de mejor manera la base de datos presentada permitió establecer que el algoritmo J.48 es el que genera un mejor porcentaje de clasificación (ver tabla 1). Este resultado fue seguido del algoritmo Random Forest. El peor de los algoritmos de clasificación para esta base de datos fue el Random Tree. Es importante remarcar que el procedimiento experimental de esta fase del estudio está basado en la repetición de los algoritmos y la medición de su efectividad. Por lo cual se repitió el proceso de aprendizaje de cada algoritmo 90 veces, lo que asegura la fiabilidad de los resultados.

Tabla 1. Resultados del proceso experimental en Weka.

Algoritmo	J.48	Random Forest	Random Tree
Porcentaje de ejemplos bien clasificados	99.86%	99.31%	95.07%
Porcentaje de error en la clasificación	0.14%	0.69%	4.93%

Aunque los algoritmos J.48 y Random Forest tienen un rendimiento similar, el primero produce árboles más pequeños. Este es un factor importante porque determina el tamaño total de los árboles programados. Por ello se decidió emplear un árbol de decisión J.48 y se eligió para programar en la tarjeta Arduino el árbol de la semilla 6, que obtuvo 100% de clasificación de la base de datos (ver figura 3). La incertidumbre de casos fuera de la base de datos no se puede establecer en los modelos de clasificación presentados.



7

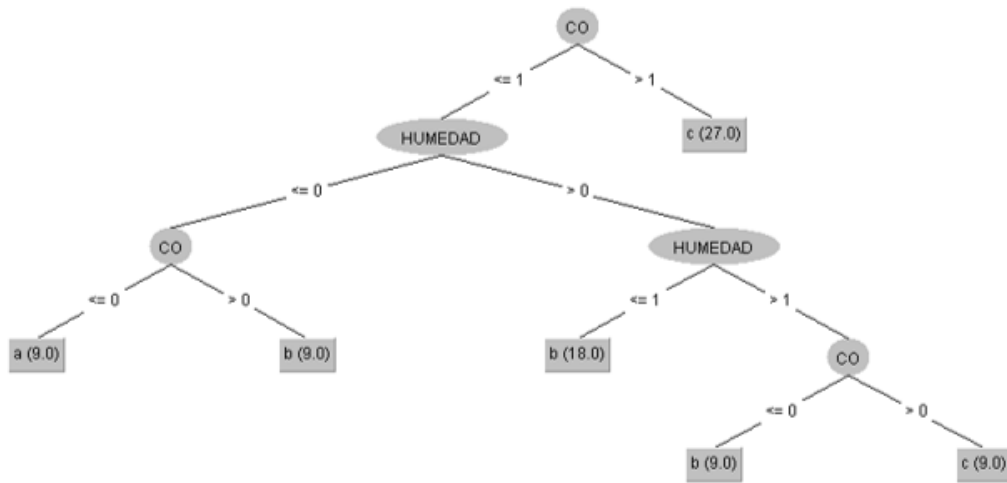


Figura 3. Vista del árbol de decisión programado.

Con ello se probó el sistema físico integrado por los sensores, actuadores, tarjeta de adquisición y procesamiento de datos, módulo de comunicación (véase figura 4). La prueba de la comunicación se realizó mediante un dispositivo móvil. Con esto se obtuvo las mediciones del sistema a petición del cliente.

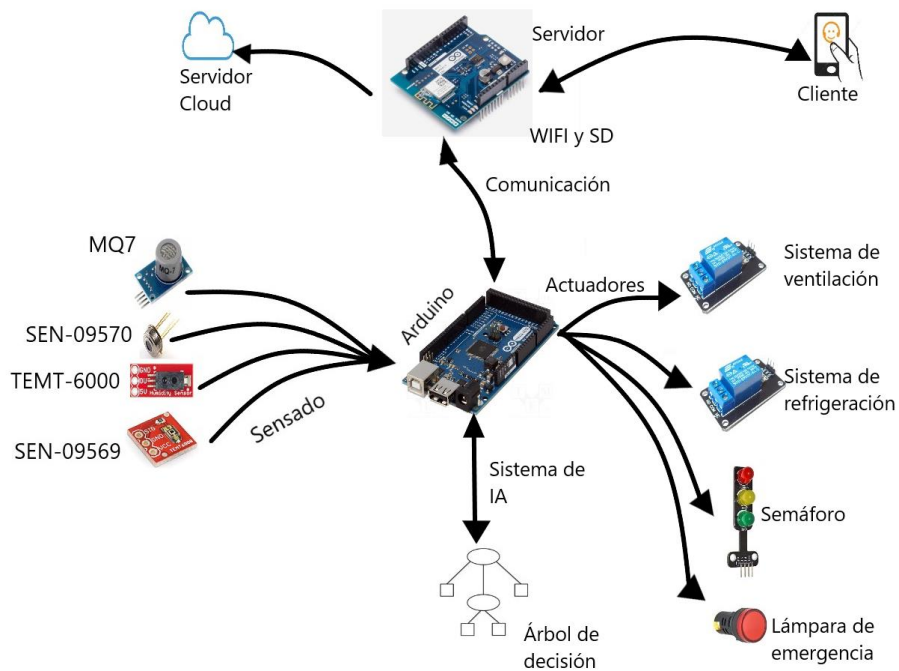


Figura 4. Diagrama electrónico y de flujo de señales del sistema prototipo.



Finalmente, la prueba realizada al sistema ciberfísico inteligente mediante la manipulación intencionada de las variables de entrada. Esto produjo que el 100% de las instancias presentadas fueran clasificadas de manera correcta. Es decir, el sistema clasificó de forma correcta las 54 instancias que componen la base de conocimiento.

## V. DISCUSIÓN

Se construyó un sistema ciberfísico inteligente basado en un árbol de decisión J.48 con la finalidad de monitorear las condiciones ambientales ante la presencia de motores en el marco de un entorno industrial. El sistema fue equipado con la capacidad de comunicación mediante una red WIFI y el modelo cliente servidor mediante la arquitectura de IoT, que forma parte del marco Industria 4.0 [23].

El sistema presentado cuenta con la capacidad de monitorear una variable ambiental muy importante como es la presencia del monóxido de carbono. Este gas en altas cantidades resulta tóxico para los seres humanos. En el caso de los motores, es producido por los efectos de calor que se generan en el funcionamiento. Dados los efectos de intoxicación no reversibles en el ser humano, el sistema construido trata de evitar accidentes en el entorno industrial sin interrumpir los procesos desarrollados. Por ello incorpora un sistema de ventilación y un sistema de refrigeración fueron incorporados al diseño para mejorar la calidad del aire.

Uno de los mayores desafíos que se presentaron en el desarrollo del sistema fue la calibración del sensor MQ7. Al no contar con un instrumento que permitiera medir la cantidad de partículas del gas en el aire, se recurrió a un proceso de producción del gas en un laboratorio para poder cuantificarlo. De esta manera, se obtuvo la calibración deseada.

Los altos niveles en las variables de humedad y temperatura en un ambiente industrial pueden llevar a los trabajadores a la deshidratación, y con ello a la disminución de las capacidades neuronales de los trabajadores. Por lo que resulta fácil de imaginar que algunos accidentes derivados de la falta de atención del personal pueden tener relación con dichas variables. Tanto la temperatura como la humedad pueden ser modificadas por el calor producido por los motores en durante su funcionamiento.

De este modo, el sistema ciberfísico inteligente incorporó estas variables para reducir los accidentes de trabajo. Esto es una prueba que los sistemas de industria 4.0 pueden mejorar los sistemas de producción a través del cuidado de la seguridad de los trabajadores [24]. Los mecanismos de actuación para el control de estas variables fueron el sistema de ventilación y el sistema de refrigeración.

La intensidad de la luminosidad en un ambiente industrial es una variable fundamental para que los procesos industriales sean exitosos y sin accidentes. Si la intensidad luminosa es inadecuada, la capacidad visual del personal se ve reducida. Lo cual resulta peligroso cuando en la fábrica existen motores.

De tal manera que el sistema propuesto no modifica la luminosidad del recinto, pero si tienen capacidad para avisar que los niveles de esta variable no cumplen con los valores requeridos. Esto se realiza mediante el sistema de señalización del semáforo.

En este sentido, el semáforo resulta importante para el sistema. La idea es detener la producción sólo en los casos en que las condiciones ambientales sean peligrosas para el personal involucrado. Lo que se complementa con el sistema de lámpara de emergencia, que se encienden cuando las condiciones son críticas, principalmente relacionadas con altos niveles de monóxido de carbono, temperatura y humedad.

El mecanismo que se utilizó para construir la base de datos se conoce como ingeniería del conocimiento. En dicho proceso, un experto humano se encarga de analizar las condiciones de la base de datos y producir una respuesta o salida deseada. Lo cual vuelve al sistema portable entre diferentes recintos.

Los árboles de decisión fueron elegidos como la herramienta de IA que brinda autonomía al sistema debido a su capacidad explicativa respecto a las salidas, la facilidad de entrenamiento y programación. Por lo que el mecanismo de toma de decisiones puede ser nuevamente entrenados en cualquier momento, incorporando casos nuevos sin necesidad de modificar profundamente el sistema. Inclusive permitiendo la incorporación de más variables.

La elección del mejor árbol de decisión se llevó a cabo mediante un proceso estadístico, en donde se repitieron los procesos de entrenamiento para tres algoritmos de entrenamiento: J.48, Random Tree y Random Forest. Se cuantificó la cantidad de aciertos del sistema mediante un mecanismo de validación robusto como Cross-Validation. Lo que brinda certeza de que la selección del mecanismo de autonomía no fue basada en una decisión personal. El mejor de los resultados para el caso probado fue el algoritmo J.48.

En las pruebas realizadas al sistema ciberfísico mostraron que el funcionamiento fue el deseado. Esto dado a que en las pruebas de manipulación de las variables de entrada se verificó que el árbol de decisión clasifica correctamente el total de las instancias de la base de conocimiento. Además, que se verificó la conexión con el cliente y la respuesta del servidor brindando los datos que se obtienen. En este sentido, como trabajo futuro se prevé la incorporación de un sistema de ciberseguridad que evite el uso inadecuado de los datos.

## VI. CONCLUSIONES

Se presenta la propuesta de un sistema ciberfísico inteligente para el monitoreo de cuatro variables ambientales (monóxido de carbono, humedad relativa, temperatura e intensidad luminosa) empleando el modelo de IoT en el marco de la Industria 4.0. Las condiciones ambientales monitoreadas se relacionan con la presencia de motores en la industria. El sistema tiene como núcleo de autonomía un árbol de decisión J.48, entrenado a partir de una base de datos. Dicha base de datos es creada a través de ingeniería del conocimiento, en donde un experto humano determina la respuesta deseada ante cada circunstancia presentada en cada instancia de la base de conocimiento. El sistema guarda los datos de las variables en una memoria SD, pero pueden ser enviados a un servidor Cloud. Además, a petición de un cliente, muestra las mediciones obtenidas en tiempo real. Finalmente, el sistema presentado es escalable ya que permite incorporar más variables y se puede adaptar a cualquier medio ambiente al modificar su base de conocimientos.

## REFERENCIAS

- [1] D. G. Chele Sancang, "Vehículos híbridos, una solución interina para bajar los niveles de contaminación del medio ambiente causados por las emisiones provenientes de los motores de combustión interna," *INNOVA Research Journal*, vol. 2, no. 12, 2017, pp. 1-10
- [2] R. Bakr, B. Ulaş, H. Kıvrak, "A mini review on health and environmental risks of oil and gas industry undesired products: hydrogen sulfide and carbon monoxide," *International Journal of Ecosystems and Ecology Science (IJEES)*, vol. 7, no. 4, 2017, pp. 883-894.
- [3] B. Nikolic, J. Ignjatic, N. Suzic, B. Stevanov, A. Rikalovic, "Predictive manufacturing systems in industry 4.0: trends, benefits and challenges," *Annals of DAAAM & Proceedings*, 28. 2017.
- [4] G. Manogaran, C. Thota, D. Lopez, R. Sundarasekar, "Big data security intelligence for healthcare industry 4.0," In *Cybersecurity for Industry 4.0*, (pp. 103-126). Springer, Cham. 2017.
- [5] S. R. Prathibha, A. Hongal, M. P. Jyothi, "IoT based monitoring system in smart agriculture," In *2017 international conference on recent advances in electronics and communication technology (ICRAECT)*, pp. 81-84. IEEE, 2017.
- [6] L. I. U. Dan, C. Xin, H. Chongwei, J. Liangliang, "Intelligent agriculture greenhouse environment monitoring system based on IOT technology," In *2015 International Conference on Intelligent Transportation, Big Data and Smart City*, (pp. 487-490). IEEE, 2015.
- [7] T. Perumal, M. N. Sulaiman, C. Y. Leong, "Internet of Things (IoT) enabled water monitoring system," In *IEEE 4th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE)*, (pp. 86-87). IEEE, 2015.
- [8] P. Valsalan, T. A. B. Baomar, A. H. O. Baabood, "IoT based health monitoring system," *Journal of critical reviews*, vol. 7, no. 4, pp. 739-743, 2020.
- [9] A. Srinivasan, "IoT cloud based real time automobile monitoring system," In *3rd IEEE International Conference on Intelligent Transportation Engineering (ICITE)*, (pp. 231-235). IEEE, 2018.
- [10] B. C. Kavitha, R. Vallikannu, "IoT based intelligent industry monitoring system," In *6th International Conference on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN)*, (pp. 63-65). IEEE, 2019.
- [11] G. S. C. Prasad, A. S. Pillai, "Role of Industrial IoT in Critical Environmental Conditions. In *2018 Second International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICICCS)* (pp. 1369-1372). IEEE, 2018.
- [12] M. D. Mudaliar, N. Sivakumar, "IoT based real time energy monitoring system using Raspberry Pi," *Internet of Things*, no. 12, 2020.
- [13] M. Ghobakhloo, M. "Industry 4.0, digitization, and opportunities for sustainability," *Journal of Cleaner Production*, no. 252, 2020.
- [14] A. Garrell, L. Guilera, *La industria 4.0 en la sociedad digital*. España: Marge Books, 2019.

- [15] L. X. Falconi Tello, J. F. López Aguirre, J. C. Pomaquero Yuquilema, J. L. López Salazar, "Habilidades gerenciales para la revolución industrial 4.0 en el ámbito del capitalismo consciente," *Revista Contribuciones a la Economía*, 2018.
- [16] J. P. Navarro Londoño, L. E. Vallejo Sánchez, *Realidad Virtual bajo una visión modular de Industria 4.0*. (online) 2020. Available: <http://hdl.handle.net/11371/3374>
- [17] P. Gokhale, O. Bhat, S. Bhat, "Introduction to IOT," *International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology*, vol. 5, no. 1, pp. 41-44. 2018.
- [18] R. R. Maaliw III, M. A. Ballera, *Classification of Learning Styles in Virtual Learning Environment Using J48 Decision Tree*, USA: International Association for Development of the Information Society. 2017.
- [19] R. R. Bouckaert, E. Frank, M. Hall, R. Kirkby, P. Reutemann, A., Seewald, D. Scuse, *WEKA manual for version 3-9-1*. University of Waikato, Hamilton, New Zealand. 2016.
- [20] W. Dai, W. Ji, "A mapreduce implementation of C4. 5 decision tree algorithm," *International journal of database theory and application*, vol. 7. no. 1, pp. 49-60. 2014.
- [21] C. Nguyen, Y. Wang, H. N. Nguyen, "Random forest classifier combined with feature selection for breast cancer diagnosis and prognostic," *Journal of Biomedical Science and Engineering*, vol. 6, no. 5, 2013.
- [22] C. Zhuge, J. Liu, D. Guo, Y. Cui, "Phototropism rapidly exploring random tree: An efficient rapidly exploring random tree approach based on the phototropism of plants," *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 17, no. 5, 2020.
- [23] M. Alloghani, D. Al-Jumeily, A. Hussain, A. J. Aljaaf, J. Mustafina, E. Petrov, "Healthcare services innovations based on the state of the art technology trend industry 4.0," In *2018 11th International Conference on Developments in eSystems Engineering (DeSE)* (pp. 64-70). IEEE, 2018.
- [24] G. Aceto, V. Persico, A. Pescapé, "Industry 4.0 and health: Internet of things, big data, and cloud computing for healthcare 4.0," *Journal of Industrial Information Integration*, 18, pp. 100-129, 2020.