



Sistema de medición en tiempo real y gestión del consumo energético de máquinas industriales mediante habilitadoras digitales de la industria 4.0

Real-time measurement and management system for the energy consumption of industrial machines using digital enablers of Industry 4.0

Sistema de medição e gestão em tempo real do consumo energético de máquinas industriais, utilizando tecnologias digitais da Indústria 4.0

José Vicencio Bautista Sánchez ^I

jose.bautista@pucese.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0003-3358-1908>

Flavio Daniel Trelles Cabrera ^{II}

fdtrelles@pucese.edu.ec

<https://orcid.org/0009-0001-9457-2768>

Correspondencia: jose.bautista@pucese.edu.ec

Ciencias Técnicas y Aplicadas

Artículo de Investigación

*** Recibido:** 26 de septiembre de 2025 ***Aceptado:** 24 de octubre de 2025 *** Publicado:** 11 de noviembre de 2025

I. Pontificia Universidad Católica del Ecuador Sede Esmeraldas, Ecuador.

II. Pontificia Universidad Católica del Ecuador Sede Esmeraldas, Ecuador.

Resumen

Este artículo se enfoca en proponer un sistema de monitoreo y gestión del consumo energético de equipos industriales manejados en los distintos sectores productivos, mediante la utilización de habilitadores de la industria 4.0. Para la solución de este requerimiento se planteó diseñar un sistema de medición en tiempo real el cual permite la gestión del consumo de energía eléctrica mediante la selección de la fuente de alimentación eléctrica sea del servicio público o de alguna alternativa de energía renovable. De igual manera mediante el uso previo de la técnica de recolección de datos bibliográficos se fundamentó la parte teórica y referencial de la investigación, así como la aplicación de un método cuantitativo y cualitativo debido a las mediciones y comparaciones, aplicados en el sistema de medición en tiempo real y gestión del consumo energético. Como resultados obtenidos en la experimentación la aplicación del sistema de medición y gestión se generó un ahorro energético de hasta el 19% por el uso del sistema alterno. Mediante los datos obtenidos se pudo realizar una comparación de valor con los datos nominales del equipo y tener datos que reflejen el estado o condicione de trabajo para optimizar los mantenimientos y conservar la vida útil del mismo. La investigación permite concluir que la aplicación de los habilitadores enfocados en la industria 4.0 sirven de gran aporte para la reducción del consumo y genera ahorro en las industrias tanto en energía eléctrica como en costos de compra en equipos nuevos o de recambio.

Palabras Clave: IIoT; generación distribuida; ciberseguridad; big data; computación de la nube; simulación; integración de sistemas; robots cobots; fabrica aditiva y realidad aumentada.

Abstract

This article focuses on proposing a system for monitoring and managing the energy consumption of industrial equipment used in various production sectors, through the use of Industry 4.0 enablers. To address this requirement, a real-time measurement system was designed to manage electrical energy consumption by selecting the power source, whether from the public grid or a renewable energy alternative. The theoretical and referential framework of the research was established through prior bibliographic data collection, and a combination of quantitative and qualitative methods was applied, including measurements and comparisons, within the real-time measurement and energy consumption management system. Experimental results showed that the application of the measurement and management system generated energy savings of up to 19% through the use

of the alternative system. The data obtained allowed for a comparison of values with the equipment's nominal specifications, providing data that reflects the operating condition to optimize maintenance and extend its lifespan. The research concludes that the application of enablers focused on Industry 4.0 makes a significant contribution to reducing consumption and generates savings in industries, both in electricity and in the costs of purchasing new or replacement equipment.

Keywords: IIoT; distributed generation; cybersecurity; big data; cloud computing; simulation; systems integration; cobots; additive manufacturing and augmented reality.

Resumo

Este artigo propõe um sistema de monitorização e gestão do consumo energético de equipamentos industriais utilizados em diversos setores produtivos, através da aplicação de tecnologias da Indústria 4.0. Para dar resposta a esta necessidade, foi concebido um sistema de medição em tempo real para gerir o consumo de energia elétrica, seleccionando a fonte de alimentação, quer da rede pública, quer de uma fonte de energia renovável. O enquadramento teórico da investigação foi estabelecido através de uma recolha prévia de dados bibliográficos, tendo sido aplicada uma combinação de métodos quantitativos e qualitativos, incluindo medições e comparações, dentro do sistema de medição e gestão do consumo de energia em tempo real. Os resultados experimentais demonstraram que a aplicação do sistema de medição e gestão gerou uma poupança energética até 19% com a utilização do sistema alternativo. Os dados obtidos permitiram a comparação dos valores com as especificações nominais dos equipamentos, fornecendo dados que refletem as condições de funcionamento para otimizar a manutenção e prolongar a sua vida útil. A investigação conclui que a aplicação de tecnologias da Indústria 4.0 contribui significativamente para a redução do consumo e gera poupanças nas indústrias, tanto em energia elétrica como nos custos de aquisição de equipamentos novos ou de substituição.

Palavras-chave: IIoT; geração distribuída; cibersegurança; big data; computação em nuvem; simulação; integração de sistemas; robôs colaborativos; fabrico aditivo e realidade aumentada.

Introducción

A nivel mundial, la electricidad se reconoce como un servicio esencial para la vida humana, ya que se emplea en las actividades cotidianas. Desde la segunda revolución industrial, se ha utilizado

como la fuente primaria de energía para operar equipos, maquinaria y dispositivos electrónicos, mejorando así la calidad de vida. No obstante, los costos asociados a su producción y distribución han aumentado debido al crecimiento constante en la demanda de consumo, generando la necesidad de buscar alternativas de ahorro energético. En la actualidad, la Generación Distribuida (GD) surge como una solución concreta para lograr dicho ahorro, basada en tres características fundamentales: la mejora en las conexiones cercanas a la carga, la generación en distintas escalas (grande, mediana y pequeña), y la relevante capacidad de que los consumidores puedan elegir conectarse o no a la red de suministro público [1].

En base a la definición de la GD se puede indicar que el campo de la electricidad ha evolucionado a través de los tiempos, de allí que con el crecimiento poblacional día a día se genera una mayor demanda tanto para los sectores industriales, comerciales, viviendas entre otros.

A nivel mundial se presenta como uno de los factores de gran interés para las industrias, debido a la necesidad de controlar su uso de manera eficiente, lo cual ha generado que los consumidores se interesen más en conocer cuáles son sus equipos que generar un mayor consumo dentro de sus sistemas de trabajo, mediante la medición de energía la cual se enfoca en determinar los equipos que presenten consumos altos en su funcionamiento, identificados estos por la variación de sus parámetros de trabajo energéticos [2][3]. De esta manera se puede lograr tomar medidas correctivas como modificar los patrones de consumo dentro de las horas pico o de mayor consumo en la red, procurando no afectar el proceso de producción [4].

Industria 4.0

El concepto de la industria 4.0 se centra en la adopción de nuevas tecnologías, conocidas como habilitadores digitales de la industria 4.0, que permiten la creación de sistemas de monitoreo para los parámetros del proceso productivo [5]. Originado en Alemania, este término también se conoce como fábricas inteligentes o Internet industrial, y está estrechamente vinculado al modelo de Internet de las cosas (IoT), el cual se relaciona con los procesos en evolución dentro de la transformación digital. Esta transformación se desencadena por los avances en la tecnología de la información, siendo uno de sus enfoques principales el desarrollo de software y la informática [6]. Con base en la información brindada por el Ministerio de Telecomunicaciones del Ecuador en cuanto a la adopción y aplicación de la industria 4.0, se resalta que la implementación tecnológica en el país pone de manifiesto una importante brecha digital que requiere la atención del Estado.

Entre las aplicaciones se incluyen la industria 4.0 y la capacitación o formación para promover su desarrollo y respaldo [7].

La actual situación limita la aplicación de esta tecnología en diversos sectores de producción en el país. No obstante, el Ministerio de Electricidad y Energías Renovables ha planteado una estrategia para motivar a las distintas ramas industriales a participar en el proyecto nacional de Eficiencia Energética para la Industria. El objetivo es reducir el consumo eléctrico y, de este modo, mitigar el impacto ambiental provocado por los altos niveles de consumo de combustibles en su generación. A pesar de estos esfuerzos, la eficiencia energética en la industria se enfoca más en su gestión que en el análisis de técnicas y métodos que aseguren un rendimiento energético óptimo, con miras a brindar competitividad a la industria y propiciar un incremento en la producción, a la vez que se reducen los costos de consumo [8].

La incapacidad para controlar el consumo eléctrico de los equipos industriales, incluso al considerar la generación o administración de la energía eléctrica mediante diversas fuentes renovables, conlleva a consumos excesivos y pérdidas económicas debido a la falta de control, lo que impacta negativamente los costos de producción. Por ello, surge la necesidad de emplear dispositivos de medición eficaces que garanticen un control en tiempo real, junto con un análisis preciso de los niveles de consumo eléctrico en los equipos industriales.

En esta coyuntura, la implementación de tecnologías vanguardistas vinculadas a la industria 4.0 puede lograr un ahorro eléctrico efectivo que beneficie directamente el consumo y el medio ambiente. Esto se logra mediante la gestión y selección adecuada de fuentes de alimentación para los equipos industriales, cumpliendo con el propósito de aprovechar fuentes alternativas y la generación distribuida.

La evolución tecnológica y los avances investigativos orientados a abordar las exigencias cotidianas en diversos sistemas, con un enfoque especial en la industria, han conducido a la conceptualización de la transformación digital, en sintonía con la noción de la cuarta revolución tecnológica. Esta transformación ha tenido un impacto positivo en el desarrollo de funciones y tareas laborales, así como en la reducción de la carga física para los colaboradores. Los paradigmas laborales tradicionales están experimentando cambios significativos, gracias a la adopción de tecnologías que agilizan y aseguran la realización de labores de manera más rápida, segura y eficiente [9]

Revolución Industrial

En el ámbito industrial, la eficiencia se encuentra estrechamente vinculada al ahorro y uso efectivo de insumos, elementos y materiales esenciales para el proceso. Por tanto, resulta crucial implementar medidas que permitan la búsqueda de recursos óptimos y la actualización de procesos con bajo rendimiento. Estas acciones buscan reducir o eliminar las pérdidas energéticas, las cuales representan un impacto económico significativo para las empresas. La energía desaprovechada podría ser utilizada de manera más adecuada para satisfacer las necesidades de otros consumidores o para expandir las operaciones [10].

La integración de tecnologías en el marco de la Cuarta Revolución Industrial 4.0, aunque inicialmente pueda percibirse como una inversión, está diseñada para mejorar la productividad y competitividad. Estos avances tecnológicos han propiciado una mayor eficiencia en los procesos [11]. En muchos países, las autoridades gubernamentales fomentan el desarrollo tecnológico para impulsar la economía, brindando apoyo y acompañamiento a las empresas interesadas en adoptar estas nuevas tecnologías con el fin de mejorar su eficiencia y productividad [12].

La Cuarta Revolución Industrial ha surgido gracias a los habilitadores digitales, como se ilustra en la figura 2, evidenciando que son, en esencia, nuevas tecnologías que optimizan los procesos productivos y aportan valor agregado o diferenciación a los productos manufacturados en la [13]. Es en este contexto donde conceptos como Big Data, IIoT (Internet Industrial de las Cosas), Computación en la Nube, Simulación, Integración de Sistemas, Robots Colaborativos (Cobots), Ciberseguridad, Fabricación Aditiva y Realidad Aumentada han emergido, con el propósito de avanzar en el desarrollo de procesos industriales. Estas tecnologías trabajan en sinergia para impulsar el progreso tecnológico.

Almacenamiento de Datos

La capacidad de Big Data radica en recopilar, almacenar y analizar volúmenes considerables de datos, con el propósito de detectar ineficiencias y cuellos de botella en los procesos de producción. Esta habilidad se logra gracias a la utilización de componentes tecnológicos que posibilitan el registro de información esencial y necesaria. De esta manera, se convierte en una herramienta fundamental para abordar futuras soluciones en los procedimientos. Su aplicación se sincroniza con herramientas como el Internet Industrial de las Cosas (IIoT), que permite compartir datos en tiempo real con dispositivos industriales, fábricas, oficinas y empresas conectadas a la red [14].

Otra herramienta de importancia que facilita la manipulación de información desde ubicaciones remotas a través del uso de internet es la denominada Computación en la Nube [15]. Sin embargo, debido a los diversos desafíos de seguridad informática que amenazan los sistemas relacionados con la red, surge en el contexto de esta revolución industrial el concepto de ciberseguridad. Esta se define como un conjunto de técnicas orientadas a resguardar la seguridad de los sistemas de información (SI) y de telecomunicación (ST), enfocadas en brindar protección de datos y prevenir ataques maliciosos o cibernéticos [13][16].

Un análisis más exhaustivo requiere mediciones de mayor precisión para monitorear el consumo de energía de cada carga representativa, con el propósito de comprender los diversos patrones de consumo y así interpretar el estado de los equipos y del sistema eléctrico. La metrología, o ciencia de la medición, ha experimentado un notable avance en el ámbito de las aplicaciones relacionadas con la Industria 4.0. Los sistemas industriales demandan mediciones precisas que garanticen la eficiencia y la calidad del producto resultante en los distintos procesos. Este enfoque apunta a la reducción de costos y al fortalecimiento del control en las distintas etapas de producción [17].

Habilitadores de la Industria 4.0

Otra característica que busca cubrir el uso de habilitadores de la Industria 4.0 es la obtención de datos confiables y en tiempo real. La medición en tiempo real permite automatizar los procesos industriales, lo que a su vez reduce la presencia de elementos no conformes o valores atípicos que podrían afectar la rentabilidad de la empresa [18].

En el contexto de la Industria 4.0, la gestión de la energía tiene como objetivo primordial minimizar el consumo energético del sistema en el que se aplica. Esto se traduce en la reducción de los costos relacionados con la electricidad, con el menor impacto ambiental posible. Para lograrlo, se emplean sistemas tecnológicos de control que permiten administrar y regular los niveles de [19][20]. Dentro de las estrategias de gestión del consumo energético, se incluye el uso de energías renovables o alternativas, las cuales satisfacen las demandas de los sistemas y contribuyen a la disminución de los costos de consumo [21].

El enfoque principal de esta investigación radica en ofrecer una alternativa para optimizar la productividad y eficiencia de los equipos industriales utilizados en diversos sectores productivos, mediante la implementación de habilitadores de la industria 4.0. Estos habilitadores permiten desarrollar una planificación para adoptar medidas rápidas y eficaces en el marco de la

organización. Los datos generados son de fácil interpretación, rápidos y adaptables al proceso. Para abordar esta necesidad, se propone diseñar un sistema de medición en tiempo real que permita gestionar el consumo de energía eléctrica al elegir entre la fuente de alimentación del servicio público y alguna alternativa de energía renovable.

El tema de estudio actual introduce un aspecto innovador que enriquece la diversidad de aplicaciones industriales en términos de ahorro de recursos, ejecución simplificada de tareas y registro estadístico de datos, para facilitar mejoras en equipos y procesos. La investigación se estructura en un índice que abarca bases teóricas, trabajos relacionados, metodología, resultados y conclusiones.

TRABAJOS RELACIONADOS

Dentro del área de investigación propuesta se consideran notables aquellos trabajos internacionales y nacionales que propusieron la utilización y estudio de habilitadores de la industria 4.0 para control y medición en procesos dentro de la industria. Esta investigación se apoyó en las distintas plataformas de búsquedas tales como: Scopus, IEE Explore, AMC y Google Académico, los estudios recopilados fueron obtenidos mediante el motor de búsqueda de tema principal. En los párrafos siguientes se presenta las investigaciones que influyeron de manera significativa en el desarrollo de la presente investigación.

Un primer estudio aplicado por Reinoso Jhon y Salazar Gabriel en el año 2017 en Ecuador el cual se denominó “*Sistema de Medición Inteligente de Energía Eléctrica en la Empresa The Tesalia Springs Company S.A.: Implementación y Análisis de Resultados*”, se centra en la eficiencia del diagnóstico del consumo de recursos, considerando que el consumo de energía eléctrica representa un enorme costo de producción para promover mayores niveles de productividad y eficacia, la constitución del sistema estuvo dada por equipos de medición, caudalímetros, PLC, a más de switches utilizados para extender la capacidad de las redes de comunicación industrial ethernet, entre los resultados de la aplicación del sistema el interfaz HMI permitió la visualización y almacenaje de mediciones para obtener y manejar la información mediante la creación de históricos de datos, lo cual permitió tomar medidas para ahorrar más reduciendo consumos innecesarios en máquinas y procesos [10].

El estudio mencionado se relaciona con el presente tema de investigación, por la necesidad de obtención de información o datos mediante la medición y monitoreo de los consumos eléctricos al

igual que la utilización de tecnología enfocada a la industria 4.0 con la finalidad de mejorar el consumo eléctrico y determinar los equipos que presente averías o daños.

Como segundo estudio de análisis se presentó la investigación titulada *“Design and Implementation of Raspberry Pi Based Real time Industrial Energy Analyzer”*, el cual fue aplicado en Bangladesh el 2019 por Majharul Islam, Farhanul Islam y Showmik Singha, este artículo analizo la monitorización inteligente basada en microcontroladores y Raspberry Pi, las mediciones, el registro de datos, la monitorización en línea, el acceso remoto y el sistema de análisis estadístico. El modelo basado en microcontroladores permitió que de una manera inteligente y fácil se realice la supervisión de cargas dentro del sistema de estudio, con funciones inteligente como análisis estadísticos, monitorización a distancia y en tiempo real misma que según el análisis es aplicada en la industria y en electrodomésticos. Se pudo determinar que las mediciones de energía basadas en Raspberry Pi presentan un enfoque distinto e innovador para la lectura de medidores de energía convencionales dominantes en términos de las características inteligentes descritas[22].

Por este motivo, la relación de este estudio con la investigación presente se empareja por lo importante de la aplicación de nuevas tecnologías que permitan facilitar las tareas a los colaboradores de las distintas industrias y a su vez en la facilidad de permitir la obtención de datos que mejoren la eficiencia y productividad del proceso.

Otro estudio relacionado se presenta en la investigación realizada por Nerley Adrián Giraldo Gómez en Colombia 2021, titulada *“Diseño de un sistema de monitoreo de un prototipo de máquina industrial, para la presentación de datos en tiempo real con recursos de la nube de IBM en Colombia”*, el cual se planteó como objetivo desarrollar un método de monitoreo de producción en máquinas industriales, presentando los datos de forma gráfica en una página WEB y con datos locales de la nube de IBM Watson, enviando la información a un servidor SQL para almacenar los datos, utilizando LAMP (Linux, Apache, MySQL, PHP/Perl/Python), el software de gráfico de código abierto IBM NODE-RED basado en el diseño de software NODE-JS, utilizando Raspberry PI con NODE-RED y placa de expansión para placa Raspberry PI y opto-acoplador para conectar a la máquina industrial que se conectara para entrar, se utilizó para el desarrollo del prototipo realizado. La selección de software y hardware bajo su correcta selección permitió un funcionamiento del prototipo satisfactorio el mismo que se dirigido a las pequeñas y medianas industrias, ya que la automatización lograda permitió la recolección de datos de forma automática para la generación de graficas de monitoreo en WATSON IoT y registro de información en SQL,

lo cual permitió la reducción de registros manuales por cada turno liberando tiempos a la operación y aumentando productividad de la maquinas[23].

Es así como este tema de estudio se relaciona con la presente investigación mediante la utilización de protocolos de comunicación que permiten programar y así poder utilizar herramientas mediante un sistema de automatización que faciliten las tareas de adquisición de todos y disminuye las actividades de los colaboradores.

Un cuarto estudio, titulado “*Destacando los beneficios de la Industria 4.0 en la producción: un enfoque de simulación basado en agentes*” realizado por Julio Takashi Cavata, Alexandre Augusto Massote, Rodrigo Filev y Fábio Lima publicado en la revista Gestão & Produção publicado el 2020, permitió analizar los beneficios de la aplicación de habilitares y equipos enfocados en la industria 4.0 ya se planteó como objetivo la comparación entre un proceso de fabricación tradicional y un proceso de fabricación avanzado, ambos modelados por una sociedad multi agente. La investigación tuvo un enfoque experimental ya se basó en una simulación tanto de una fábrica convencional y una fábrica avanzada, en ambas simulaciones se buscó obtener los datos de los tiempos de trabajo en cada proceso incluyendo los de mantenimiento, pero en el caso de la fábrica avanzada estos tiempos de mantenimiento eran determinados por los datos obtenidos de los sensores de medición y basado en las definiciones de los procesos.

Los resultados arrojaron mejoras significativas en la simulación aplicada en fábricas avanzada en la cual se generaron valores mayores de producción en comparación con la fábrica convencional o tradicional estas pruebas fueron aplicadas en los mismos intervalos de tiempo y proceso. La investigación permite en base a su resultados dar una nueva visión y opción a las pequeñas y medianas empresas para poder adaptar en sus proceso conceptos o tecnología de la denominada industria 4.0 [24].

Esta investigación se relaciona de forma directa con el estudio actual realizado ya que permitió mediante la simulación entender de manera clara los beneficios para la productividad y mantenimiento de la utilización o aplicación de habilitadores o conceptos de la industria 4.0.

Como ultima relación se presenta la investigación titulada “*Sistema para el monitoreo del consumo de energía eléctrica en tiempo real*” aplicada en Cuba en el 2020 por Ramón De Jesús López Suarez en la que se estableció el objetivo de desarrollar un sistema de medición de consumo eléctrico en tiempo real que permita la medición, el registro, visualización y el análisis de su comportamiento en el tiempo. El desarrollo de la investigación tuvo un enfoque bibliográfico experimental ya que

para el diseño se montó sobre una placa y se conectó a un Arduino Nano para acoplar un transformador de corriente HWCT004 con una relación de transformación de 50A / 50 mA de igual manera se desarrolló un programa con el empleo de Programming/Wiring para el Arduino y C# en el medio de proceso Visual Studio Community 2019 para producir una aplicación de escritorio con una interfaz de usuario intuitiva, ligera, portable y aplicable, tanto a computadoras personales, como a portátiles en el sistema operativo Windows.

De esta manera se obtuvo un sistema de monitoreo del consumo de energía eléctrica, ya que gracias a la validación de este sistema se pudo comprobar que la facilidad de obtención de recomendaciones apropiadas para la optimización y ahorro de energía eléctrica[13].

Es así como esta investigación se relaciona al estudio actual por que presenta la necesidad de la medición del consumo eléctrico y demuestra que no solo ayuda a la mejorar el desarrollo productivo gracias a la optimización de información y de tiempos de trabajo si no que ayuda la predicción de daños en los equipos.

es por ello que el objetivo de este artículo es realizar un sistema de medición en tiempo real y gestión del consumo energético de máquinas industriales mediante habilitadoras digitales de la industria 4.0.

MATERIALES Y MÉTODOS

El enfoque de esta investigación se sustentó en un diseño de tipo experimental, ya que se elaboró un prototipo en los laboratorios de la PUCE Sede Esmeraldas utilizando equipos y sistemas relacionados con la Industria 4.0. Este enfoque experimental se implementó con el propósito de alcanzar los objetivos delineados en el estudio. Además, se recurrió a la recopilación de datos bibliográficos, utilizando fuentes como Scopus, IEEE Xplore, ACM y Google Académico. Esta búsqueda bibliográfica fue esencial para respaldar la parte teórica y referencial de la investigación. Luego de esta etapa, se llevó a cabo una revisión exhaustiva de los contenidos, seleccionando aquellos que presentaban una mayor afinidad con el tema de estudio, incluyendo aspectos como la medición en tiempo real, los habilitadores de la Industria 4.0 y la gestión de energía.

Para abordar de manera integral la investigación, se emplearon métodos cuantitativos y cualitativos. Los datos se obtuvieron mediante el uso de un medidor digital en el prototipo, permitiendo la medición precisa de los valores de consumo energético. Estos datos se transmitieron a través del protocolo de comunicación RS-485 MODBUS a una tarjeta electrónica conocida como

ESP32, la cual estaba configurada y protegida para aplicaciones industriales, proporcionada por la empresa española Industrial Shield. La tarjeta ESP32 cuenta con el protocolo de comunicación IEEE 802.11, lo que posibilitó la transmisión de los datos de consumo energético a un servidor en la nube.

El servidor en la nube asumió diversas funciones cruciales en el proceso. Entre ellas, destacan el almacenamiento de datos, el análisis de información y la creación de una aplicación web o tablero de control (Dashboard) para visualizar la información capturada. Esta visualización se representó en la **Figura 1**. La interacción de estos componentes formó un conjunto cohesivo que respaldó la ejecución y los resultados de la investigación.

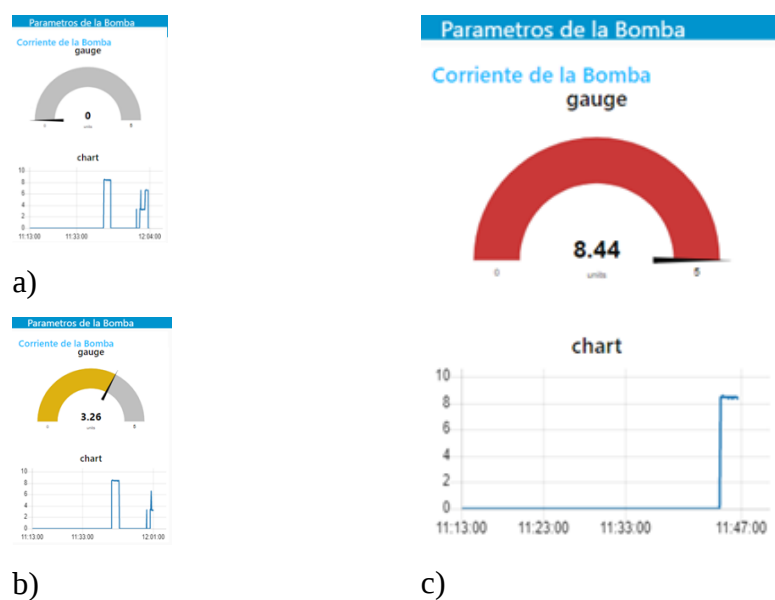


Figura 1. Dashboard desplegado mediante NodeRed, a) condición inicial, b) rango de trabajo normal y c) desborde.

Los datos del consumo energético fueron monitoreados a través de un microprocesador en la nube. En este caso, se empleó un Raspberry Pi que también fue configurado y protegido para uso industrial por parte de la empresa española Industrial Shield. Los datos mencionados, en conjunto con la programación implementada en el Raspberry Pi, posibilitaron la ejecución del control y la toma de decisiones que regulaban la gestión energética deseada, basada en los límites programados. Cuando el consumo energético de la maquinaria industrial era bajo, se utilizaba la fuente de alimentación proveniente de la fuente alterna basada en paneles solares y baterías. Por otro lado, en momentos de alto consumo energético, se efectuaba una conmutación para cambiar a la energía suministrada por la empresa generadora de electricidad. Esta conmutación se llevaba a cabo a

través de los puertos de propósito general del Raspberry Pi, haciendo uso de componentes electrónicos de potencia.

Los datos obtenidos, presentados en la **Figura 2**, proporcionaron un análisis detallado del equipo bajo monitoreo. Esto permitió evaluar el estado de la maquinaria mediante la comparación de los valores de consumo con los datos nominales de operación establecidos

1	Marca temporal	Corriente
2467	15/08/2022 11:56:22	
2468	15/08/2022 11:56:25	
2469	15/08/2022 11:56:28	
2470	15/08/2022 11:56:31	
2471	15/08/2022 12:06:27	3.26
2472	15/08/2022 12:06:30	3.3
2473	15/08/2022 12:06:33	3.3
2474	15/08/2022 12:06:36	3.27
2475	15/08/2022 12:06:38	3.24
2476	15/08/2022 12:06:42	3.24
2477	15/08/2022 12:06:45	5.76
2478	15/08/2022 12:06:48	5.76
2479	15/08/2022 12:06:51	6.63
2480	15/08/2022 12:06:54	6.64
2481	15/08/2022 12:06:57	6.64
2482	15/08/2022 12:07:00	6.63

Figura 2 Datos exportados en Microsoft Excel

Desarrollo del Prototipo de medición

El trabajo se centró en la creación del prototipo, para lo cual se priorizó la incorporación de habilitadores característicos de la Industria 4.0. Estos incluyeron la adopción de tecnologías como la computación en la nube y la Internet Industrial de las Cosas (IIoT). Asimismo, se optó por la utilización de dispositivos electrónicos equipados con las últimas innovaciones diseñadas para entornos industriales, destacando su estructura sólida y su adaptabilidad.

En el contexto del caso de estudio, se aprovechó la funcionalidad de la membresía del servidor de Google Drive. Esta plataforma facilitó el almacenamiento y acceso a los datos obtenidos de la medición en tiempo real, lo cual fue esencial para los objetivos del prototipo, permitiendo manejar un volumen considerable de información.

La implementación del Dashboard se llevó a cabo mediante la herramienta de programación visual Node-RED, tal como se detalla en la **Figura 3**. A través de esta plataforma, se configuró una Interfaz Humano-Máquina (HMI) diseñada para la visualización de los datos de consumo energético. Esta visualización gráfica, materializada en el HMI, permitió una comprensión clara y eficaz de la información recopilada durante el proceso.

El concepto de IIoT, o Internet Industrial de las Cosas, se aplica a elementos, sensores y dispositivos de medición en la industria que incorporan capacidades de conexión a Internet en su hardware. En este estudio, se emplearon dispositivos de la marca Industrial Shields, especializados en automatización industrial basada en hardware abierto como Arduino y Raspberry Pi. El prototipo se construyó utilizando un ESP32 y un Raspberry Pi de la misma marca. El ESP32 recopiló datos de consumo desde un multímetro digital mediante protocolos de comunicación modbus y rs485, transmitiendo estos datos a la nube a través de su conexión a Internet.

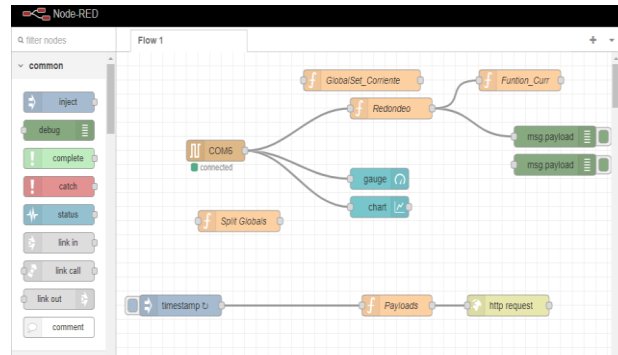


Figura 3 Programación del Dashboard mediante NodeRed

La gestión de la energía se logró mediante programación Python, consultando un servidor en la nube para tomar decisiones sobre la conmutación de la fuente de energía del sistema de bombeo entre la red de suministro público y una fuente alternativa basada en energía solar y baterías, lo que permitió una administración precisa y eficaz de la energía en el sistema.

En resumen, el desarrollo del prototipo estuvo respaldado por la incorporación estratégica de elementos clave de la Industria 4.0, haciendo hincapié en la utilización de la computación en la nube, la IIoT y dispositivos electrónicos de última generación diseñados para entornos industriales. La elección del servidor en la nube y la implementación del Dashboard a través de Node-RED enriquecieron la funcionalidad del prototipo, permitiendo una gestión eficiente de los datos y una presentación gráfica intuitiva de los resultados.

Equipamiento adicional

En cuanto a los componentes utilizados, se empleó un transformador de corriente (TCs) para obtener los valores de consumo de energía en una medición semidirecta. La elección del TCs se basó en el valor nominal de corriente del equipo de bombeo (4.5A), seleccionando un transformador con un rango de trabajo de 0 a 100 A para garantizar una medición precisa.

Asimismo, se utilizó un multímetro ENTES EMM 4180, con comunicación rs485 en protocolo Modbus y Display integrado, para visualizar y compartir las mediciones obtenidas. La programación del multímetro incluyó la selección de tipo de conexión y la configuración de comunicación, velocidad de bits y bit de paridad, asegurando una comunicación eficiente con el sistema.

Además, se programaron las salidas de los relés según el estándar de comunicación rs485 para controlarlos a distancia en caso de alarmas. El equipo de bombeo monofásico, con valores nominales de 4.5 A y 110V, fue utilizado en las pruebas de consumo de energía. El sistema de control y fuerza incluye 2 contactores con bobinas de 24V. Todos estos elementos se integran en la arquitectura de conexión representada en la **Figura 4**, que detalla la interacción entre los componentes involucrados en el desarrollo del proyecto.

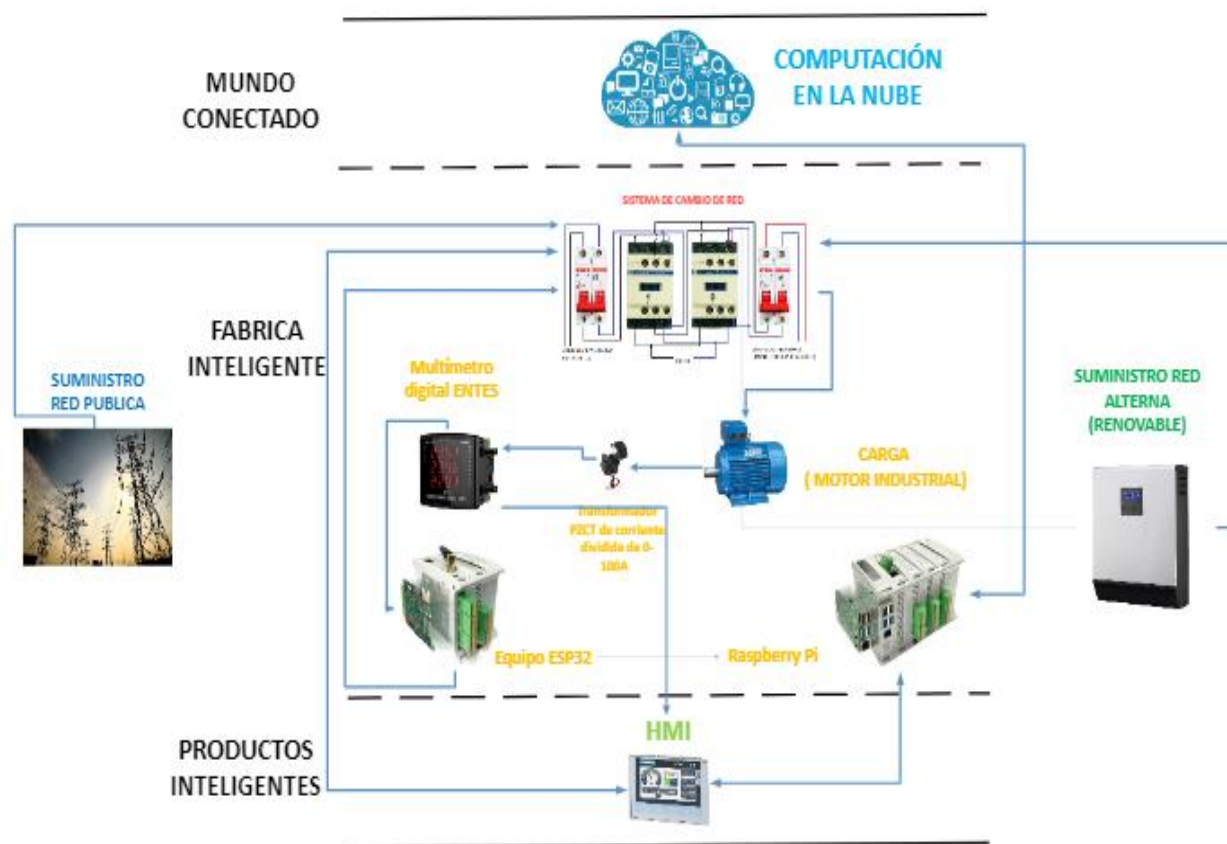


Figura 4 Arquitectura de referencia de la implementación del prototipo

Funcionamiento del Sistema

El prototipo desarrollado, mostrado en la **Figura 4**, se enfocó en medir el consumo energético de un sistema de bombeo que empleaba una bomba monofásica, con los parámetros ya mencionados. El sistema constó de un recipiente de agua destinado a ser bombeada, y se instalaron válvulas de esfera en las conexiones de succión y descarga de la bomba para regular el flujo del fluido y simular distintas cargas de trabajo en la bomba. Estas válvulas fueron cruciales para generar variaciones en la corriente eléctrica y, por lo tanto, en los valores de consumo del equipo.

En una etapa subsiguiente, se procedió a conectar el transformador de corriente (TC) en las terminales del multímetro, como se había explicado previamente, para medir la corriente del equipo durante las pruebas. La simulación, se llevó a cabo durante 2 horas diarias a lo largo de una semana laboral de 5 días, los valores de medición se enviaron al ESP32 mediante comunicación rs485. Posteriormente, el ESP32 transmitió estos datos a través de Internet a una cuenta establecida en la nube. Los datos fueron recopilados por el Raspberry Pi utilizando su conexión a Internet y una programación específica. Esta programación se encargó de gestionar la energía, basándose en los parámetros definidos, como un consumo máximo de 750W para el experimento.

El proceso descrito en el párrafo anterior también permitió la selección de la fuente de alimentación, ya sea la red eléctrica pública o una fuente de energía alternativa. Aunque no se profundizó en el uso de la energía alternativa en este estudio debido al enfoque en la tecnología de la Industria 4.0, cabe mencionar que esta elección podría personalizarse según las necesidades de la empresa o los investigadores que repliquen el experimento.



Figura 5. Implementación del prototipo

Es importante destacar que en este estudio se utilizaron baterías para almacenar la energía de un sistema fotovoltaico, el cual operaba mediante un inversor que permitía el uso de una alimentación de 110V.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Medición de consumo

Se realizó una exhaustiva medición y transmisión de datos a lo largo de una semana laboral de cinco días. Durante este período, se llevaron a cabo pruebas en intervalos de dos horas, en las cuales se sometió al sistema de bombeo a condiciones de operación que simulaban un alto consumo energético. Los valores obtenidos en estas mediciones se expresaron en vatios (W) y se presentan detalladamente en la **Tabla 1**. Estos valores reflejan los puntos de mayor consumo dentro del sistema, incluyendo tanto los vatios provenientes de la fuente de energía externa como los generados por fuentes de energía renovable.

En el marco de la programación de gestión, se definió un umbral máximo de 180W para el uso de la alimentación eléctrica alterna. Cuando el consumo de energía del equipo superaba este límite, el programa de gestión tomaba medidas y realizaba una conmutación automática a la red eléctrica pública, asegurando el suministro necesario para el sistema de bombeo.

Tabla 1 Consumo durante pruebas de una semana durante 2 horas por día.

Día	Consumo pública (W)	Red	Tiempo de trabajo (H)	Consumo Sistema alterno (W)	Tiempo de trabajo (H)
1	778		1:20	180	0:40
2	769		1:25	180	0:35
3	768		1:15	180	0:45
4	775		1:18	180	0:42
5	773		1:22	180	0:38
Total	3863		6:40	900	3:20

En términos de eficiencia energética, la implementación del sistema de gestión basado en el umbral de 180W resultó en un ahorro notable del 18.89%, como se detalla en la **Tabla 2**. Este ahorro se logró gracias a una administración efectiva y al aprovechamiento de la fuente de energía alterna en momentos de alta demanda energética.

Efectividad de la gestión

Basándose en las pruebas llevadas a cabo, que implicaron la restricción y apertura completa de las válvulas de succión y descarga en el sistema de bombeo, se confirma que la programación implementada en los equipos de control logró con éxito el propósito de administrar el suministro eléctrico según los datos obtenidos en las mediciones. Estos valores, indiscutiblemente, serían de gran relevancia en un entorno de producción para evaluar el estado y posibles problemas operativos de un equipo. Sin embargo, es importante mencionar que, durante la transición de suministro, se produce un breve lapso en el cual el equipo debe ser detenido por unos milisegundos. Esto se debe a que la nueva red eléctrica necesita que se desactive el contactor que está conectado al suministro público, permitiendo así la entrada del suministro alterno o viceversa. Esta pausa puede ser un inconveniente en equipos que requieren funcionar de manera continua y no pueden detenerse para llevar a cabo este cambio.

Tabla 2 . Cuadro de porcentaje de ahorro energético.

			Potencia (W)	Ahorro de energía
Consumo energía	total	de	4763	100%
Consumo publica	de	red	3863	81,11%
Consumo alterna	de	red	900	18,89%

La evaluación de los resultados respalda y se alinea con los antecedentes investigativos propuestos en este estudio, ya que la medición y supervisión del consumo energético con la incorporación de habilitadores y tecnologías vinculadas a la industria 4.0 demuestran notables ventajas en la ejecución de proyectos de esta índole.

Las variaciones observadas se encuentran en los equipos empleados para llevar a cabo las mediciones, como se evidencia en el estudio realizado por Reinoso Jhon y Salazar Gabriel en la Empresa The Tesalia Springs Company S.A., donde se utilizaron dispositivos de medición de corriente diferente [13].

En términos generales, los objetivos establecidos en esta investigación fueron cumplidos con éxito, y es pertinente señalar que el punto de convergencia radica en la coincidencia temática con los antecedentes, que se centran en la adopción de nuevas tecnologías enfocadas en la industria 4.0, las cuales agilizan la ejecución de tareas de control y supervisión, con el consecuente potencial de mejorar la gestión del consumo energético.

CONCLUSIONES

La importancia de comprender y administrar el consumo energético en la industria contemporánea ha llevado a la búsqueda de soluciones que identifiquen equipos con elevados consumos y, por ende, costos energéticos excesivos. La aplicación de tecnologías propias de la Industria 4.0 permite no solo medir y gestionar dicho consumo, sino también implementar estrategias de eficiencia mediante el uso de fuentes de energía alternativas y renovables.

Este estudio propuso un prototipo orientado al ámbito industrial, desarrollado en el entorno de laboratorios de la PUCSE, con el objetivo de medir y gestionar el consumo energético de un sistema de bombeo. Los resultados obtenidos demostraron que la adopción de tecnologías avanzadas representa un hito significativo en la monitorización y control de sistemas eléctricos. La implementación del prototipo permitió la alternancia eficiente entre el suministro eléctrico público y una fuente de energía alternativa, basada en un sistema de alimentación con energía renovable, durante periodos de baja demanda y alta demanda respectivamente.

El sistema de suministro alternativo demostró reducir el consumo energético proveniente de la red pública, implicando una disminución en los costos operativos. El empleo de tecnologías digitales y la visualización en tiempo real contribuyeron a un monitoreo efectivo y a la toma de decisiones informadas. Aunque la investigación se realizó en un entorno controlado como el laboratorio de la PUCSE, se plantea la posibilidad de aplicar este enfoque en entornos industriales reales. Esto podría impulsar a las industrias a ser más competitivas al reducir costos y mejorar la eficiencia energética en sus operaciones de producción.

Referencias

- [1] L. F. Grisales, B. J. Restrepo Cuestas, y F. E. Jaramillo, «Ubicación y dimensionamiento de generación distribuida: una revisión TT - Location and sizing of distributed generation: a review», *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, vol. 27, n.o 2, pp. 157-176, 2017.
- [2] R. Real-Calvo, A. Moreno-Munoz, V. Pallares-Lopez, M. J. Gonzalez-Redondo, I. M. Moreno-Garcia, y E. J. Palacios-Garcia, «Sistema Electrónico Inteligente para el Control de la Interconexión entre Equipamiento de Generación Distribuida y la Red Eléctrica», *RIAI - Revista Iberoamericana de Automatica e Informatica Industrial*, vol. 14, n.o 1, pp. 56-69, 2017, doi: 10.1016/j.riai.2016.11.002.
- [3] Z. Qiu, R. Chen, y M. Yan, «Monitoring data analysis technology of smart grid based on cloud computing», en *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020. doi: 10.1088/1757-899X/750/1/012221.
- [4] J. C. Cuisano, L. R. Chirinos, y E. J. Barrantes, «Eficiencia energética en sistemas eléctricos de micro, pequeñas y medianas empresas del sector de alimentos. Simulación para optimizar costos de consumo de energía eléctrica», *Información tecnológica*, vol. 31, n.o 2, pp. 267-276, 2020, doi: 10.4067/s0718-07642020000200267.
- [5] E. M. Andrango, «Tecnologías de industria 4.0 aplicables para el desarrollo de pymes», vol. 9, pp. 1-8, 2020.
- [6] J. Del Val Roman, «Industria 4.0. La Transformación Digital de la Industria Española», España, 2012.
- [7] J. L. Granda, «Industria 4-0 en Ecuador», *Mi region la informacion que me gusta*, Quito, p. 2, 2021.
- [8] Grace Estefanía Gancino Bustamante, «Análisis de escenarios de la gestión energética del sector industrial del Ecuador Trabajo», Universidad central del Ecuador, 2018.
- [9] J. L. Román Del Val, «La Digitalización y la Industria 4.0. Impacto industrial y laboral», *XXVII Congreso de ACEDE*, pp. 1-93, 2017.
- [10] J. Reinoso y G. Salazar, «Sistema de Medición Inteligente de Energía Eléctrica en la Empresa The Tesalia Springs Company S.A.: Implementación y Análisis de Resultados», *Revista Politécnica*, vol. 39, n.o 2, pp. 33-40, 2017, doi: 10.33333/rp.v39i2.767.
- [11] R. M. A. Zambrano, «La revolucion industrial y la industrialización del Ecuador», p. 47, 2018.

- [12] F. C. M. La Rivera, P. Hermosilla, J. Delgadillo, y D. Echeverría, «Propuesta de construcción de competencias de innovación en la formación de ingenieros en el contexto de la industria 4.0 y los objetivos de desarrollo sostenible (ODS)», *Formacion Universitaria*, vol. 14, n.o 2, pp. 75-84, 2021, doi: 10.4067/S0718-50062021000200075.
- [13] L. S. Ramón de Jesús, «Sistema para el monitoreo del consumo de Energía Eléctrica en tiempo real.», Universidad de Matanzas, 2020.
- [14] J. H. Carvajal Rojas, «La Cuarta Revolución Industrial o Industria 4.0 y su Impacto en la Educación Superior en Ingeniería en Latinoamérica y el Caribe», 15th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology: “Global Partnerships for Development and Engineering Education”, n.o July, pp. 1-5, 2017.
- [15] R. M. Hinojosa Meza, «Sistema Integral de Monitoreo de Consumo de Energía Eléctrica mediante Tecnología IoT: Consumo Energético de un Torno CNC DMTG», Instituto Tecnológico de Pabellón de Arteaga, 2020.
- [16] EDX, «Curso de ciberseguridad», 2022. <https://www.edx.org/es/aprende/ciberseguridad> (accedido 10 de marzo de 2022).
- [17] D. M. Herramientas, «Metrología en la Industria 4.0», 2018. <https://www.demaquinasyherramientas.com/herramientas-de-medicion/metrologia-en-la-era-de-la-industria-4-0> (accedido 27 de febrero de 2022).
- [18] «Medir en tiempo real en procesos industriales Vs muestreo de laboratorio». <https://scl.es/blog/medir-en-tiempo-real-en-procesos-industriales/> (accedido 27 de febrero de 2022).
- [19] D. Madathil et al., «An Energy Management Control Strategy for Efficient Scheduling of Domestic Appliances in Residential Buildings», 2019 Innovations in Power and Advanced Computing Technologies, i-PACT 2019, pp. 1-6, 2019, doi: 10.1109/i-PACT44901.2019.8960067.
- [20] S. Zhou et al., «Application Research of Big Data Real-time Processing Technology in Smart Grid», en IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021. doi: 10.1088/1755-1315/696/1/012044.
- [21] A. M. Al-Ghaili, H. Kasim, N. M. Al-Hada, B. N. Jorgensen, M. Othman, y W. Jihua, «Energy Management Systems and Strategies in Buildings Sector: A Scoping Review», *IEEE Access*, vol. 9, pp. 63790-63813, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3075485.

- [22] M. M. Islam, M. F. Islam, y S. Singha, «Design and Implementation of Raspberry Pi Based Real time Industrial Energy Analyzer», en 2nd International Conference on Electrical, Computer and Communication Engineering, ECCE 2019, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., abr. 2019. doi: 10.1109/ECACE.2019.8679392.
- [23] N. A. G. Gómez, «Diseño de un sistema de monitoreo de un prototipo de máquina industrial, para la presentación de datos en tiempo real con recursos de la nube de IBM en Colombia.», Universidad Nacional Abierta Y A Distancia Escuela, 2021.
- [24] J. T. Cavata, A. A. Massote, R. F. Maia, y F. Lima, «Highlighting the benefits of industry 4.0 for production: An agent-based simulation approach», Gestao e Producao, vol. 27, n.o 3, 2020, doi: 10.1590/0104-530x5619-20.

© 2025 por los autores. Este artículo es de acceso abierto y distribuido según los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).