Technological, Regulatory, and Professional Readiness for the Integration of 5G, Automation, and Renewable Energy in Costa Rica

Carolina Cedeño Brenes[1], Roxana Martínez[1]
[1]School of Industrial Engineering, Universidad Fidelitas, San Jose, Costa Rica; rmartinez@ufidelitas.ac.cr; ccedeno@ufidelitas.ac.cr

Abstract– ***This study presents an exploratory diagnosis of Costa Rica's technological, regulatory and professional readiness to integrate 5G connectivity, industrial automation and renewable energy. A mixed-methods design was applied: semi-structured interviews with representatives of the Costa Rican Association of Electrical, Mechanical and Industrial Engineers (CIEMI) and with the Vice Minister of Energy; a survey of 20 engineering professionals working in industry and in the energy sector; and a documentary review of national and international sources, including Spain's National Integrated Energy and Climate Plan as a reference case. Only 15% of respondents consider the country ready to integrate 5G into industrial processes, 70% state that current regulation requires adjustments or is insufficient, and most report only partial preparation in 5G and in renewable energy. The main gaps identified are the academia–industry disconnection, the lack of technical specialization and outdated regulatory knowledge, while 90% support a leading role of the professional association in regulatory modernization projects. The study does not measure productivity or carbon footprint; its contribution is to identify the training, infrastructure, regulatory and institutional-coordination gaps that must be addressed before the productive and environmental benefits of these technologies can be quantified.***

Keywords– ***5G technology, industrial automation, renewable energy, technological readiness, professional training.***

Preparación tecnológica, regulatoria y profesional para la integración de 5G, automatización y energías renovables en Costa Rica

Carolina Cedeño Brenes[1], Katherine Marín Guzmán[1], Roxana Martínez[1]
[1]School of Industrial Engineering, Universidad Fidelitas, San Jose, Costa Rica; rmartinez@ufidelitas.ac.cr; ccedeno@ufidelitas.ac.cr

Resumen*– Este estudio presenta un diagnóstico exploratorio de la preparación tecnológica, regulatoria y profesional de Costa Rica para integrar la conectividad 5G, la automatización industrial y las energías renovables. Se aplicó un diseño de métodos mixtos: entrevistas semiestructuradas a representantes del Colegio de Ingenieros Electricistas, Mecánicos e Industriales (CIEMI) y al Viceministro de Energía; una encuesta a 20 profesionales de ingeniería que laboran en la industria y en el sector energético; y una revisión documental de fuentes nacionales e internacionales, que incluye el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima de España como caso de referencia. Solo el 15% de las personas encuestadas considera que el país está preparado para integrar 5G en los procesos industriales, el 70% indica que la regulación actual requiere ajustes o no es suficiente, y la mayoría reporta una preparación apenas parcial en 5G y en energías renovables. Las principales brechas identificadas son la desconexión entre la academia y la industria, la falta de especialización técnica y la desactualización normativa, mientras que el 90% respalda que el colegio profesional lidere proyectos de modernización regulatoria. El estudio no mide productividad ni huella de carbono; su aporte consiste en identificar las brechas de capacitación, infraestructura, regulación y coordinación institucional que deben atenderse antes de cuantificar los beneficios productivos y ambientales de estas tecnologías.

Palabras clave*– tecnología 5G, automatización industrial, energías renovables, preparación tecnológica, formación profesional.

I. Introducción

En los últimos años, la transformación digital ha impulsado cambios significativos en los procesos industriales, logísticos y productivos a nivel mundial. En este contexto, la tecnología 5G se ha definido como un habilitador de altas velocidades de transmisión, baja latencia y conexión masiva de dispositivos [1], características que favorecen la automatización y la comunicación entre máquinas en los entornos de la Industria 4.0 [2].

Costa Rica presenta condiciones favorables para esta transición: su matriz eléctrica es mayoritariamente renovable y el país cuenta con una hoja de ruta de largo plazo para alcanzar una economía con cero emisiones netas en 2050 [3]. Sin embargo, las pequeñas y medianas empresas (PYMES) enfrentan desafíos relacionados con la inversión tecnológica, la capacitación del recurso humano y la integración de procesos sostenibles [4].

La incorporación de redes 5G en ambientes industriales facilita la implementación de soluciones basadas en Internet de las Cosas (IoT), monitoreo en tiempo real, mantenimiento predictivo y automatización inteligente [2], [5]. A su vez, el enfoque de Industria 5.0 plantea que la transformación tecnológica debe ser sostenible, centrada en las personas y resiliente [6]. No obstante, el aprovechamiento de estas tecnologías depende de que existan profesionales capacitados, un marco regulatorio habilitante y una coordinación efectiva entre el Estado, la academia y el sector productivo.

Por lo anterior, el objetivo de esta investigación es diagnosticar el nivel de preparación tecnológica, regulatoria y profesional de Costa Rica para integrar la tecnología 5G, la automatización industrial y las energías renovables, a partir de la percepción de profesionales de ingeniería, de representantes del CIEMI y del sector gubernamental de energía. El estudio no pretende medir el efecto de la tecnología 5G sobre la productividad ni sobre la huella de carbono; su propósito es identificar las brechas de capacitación, infraestructura, regulación y articulación institucional que condicionan dicha integración.

II. Contexto

La tecnología 5G permite conectar múltiples dispositivos de manera simultánea, mantener estabilidad en la comunicación y reducir significativamente la latencia [1]. En Costa Rica, el despliegue de esta tecnología se encuentra en una etapa inicial: en 2025 el Ministerio de Ciencia, Innovación, Tecnología y Telecomunicaciones (MICITT), con base en la subasta realizada por la Superintendencia de Telecomunicaciones (SUTEL), adjudicó espectro en las bandas de 700 MHz, 2,3 GHz, 3,5 GHz y 26/28 GHz a dos operadores nacionales y cinco operadores regionales, con obligaciones de instalación de radiobases [7].

Uno de los principales beneficios del 5G en los procesos automatizados es la mejora en la comunicación entre máquinas, sensores y plataformas digitales, lo que habilita sistemas de monitoreo en tiempo real de variables críticas como temperatura, consumo energético, niveles de producción y desempeño de equipos [2]. Asimismo, mediante sensores inteligentes y análisis continuo de datos es posible detectar fallas potenciales antes de que ocurran, lo que favorece el mantenimiento predictivo y reduce interrupciones en la producción [2].

La integración de tecnologías inteligentes también permite controlar con mayor precisión el consumo energético de las operaciones industriales. En Costa Rica, el sistema eléctrico se sostiene principalmente en fuentes hidroeléctricas, geotérmicas, eólicas, de biomasa y solares, y el Plan Nacional de Descarbonización establece como eje la consolidación de un sistema eléctrico con capacidad, flexibilidad e inteligencia [3]. En este marco, la conectividad avanzada puede apoyar la gestión inteligente de redes energéticas y de recursos distribuidos.

Cuantificar la contribución de estas tecnologías a la reducción de emisiones requiere metodologías formales de contabilidad de gases de efecto invernadero, como el estándar corporativo del GHG Protocol [8]. Además, el aumento de dispositivos conectados y de estaciones base incrementa la demanda energética de las propias redes si no se aplican estrategias de eficiencia [9]. Por ello, los beneficios ambientales de la integración 5G–automatización–energías renovables no pueden suponerse; deben verificarse con mediciones en condiciones reales.

La incorporación de tecnología 5G y sistemas automatizados presenta, además, desafíos relacionados con la inversión inicial en infraestructura, la capacitación del personal y la ciberseguridad en entornos altamente conectados [5], [6]. Estos desafíos se vinculan con los Objetivos de Desarrollo Sostenible 7 (energía asequible y no contaminante), 9 (industria, innovación e infraestructura), 12 (producción y consumo responsables) y 13 (acción por el clima) [10]. En este escenario, la preparación de los ingenieros industriales, eléctricos y electromecánicos, así como el marco regulatorio y el rol del colegio profesional [11], resultan determinantes.

III. Metodología

A. Enfoque y tipo de investigación

La investigación tiene un enfoque mixto, de alcance exploratorio-descriptivo, con diseño no experimental y transversal. El componente cuantitativo consistió en una encuesta aplicada a ingenieros que laboran en la industria, en PYMES y en el sector energético. El componente cualitativo comprendió entrevistas semiestructuradas al Coordinador de la Comisión de Energías Renovables del CIEMI, Ing. Carlos Oreamuno, y a la Directora Ejecutiva del CIEMI, Ing. Priscilla Ledezma [12], así como al viceministro de Energía, Ing. Ronny Rodríguez, del periodo de gobierno 2026-2030 [13]. Finalmente, el componente documental incluyó fuentes nacionales, como la Cámara de Industrias de Costa Rica [4] y el CIEMI [11], e internacionales, como la CEPAL [5] y el Gobierno de España [14], este último como referente en materia de transición energética.

B. Diseño metodológico

La metodología se estructuró en cuatro fases.

Fase 1. Entrevista con el CIEMI. En marzo de 2026 se entrevistó a la Dirección Ejecutiva y al Coordinador de la Comisión de Energías Renovables [12]. Los entrevistados indicaron que el CIEMI busca fortalecer el desarrollo profesional mediante capacitaciones, cursos y seminarios sobre energías renovables y cálculo de huella de carbono, y que cuenta con cursos de energía solar y un laboratorio fotovoltaico en sus instalaciones de recreación de Uxarrací, Cartago. Señalaron, además, la necesidad de que la legislación avance con mayor rapidez y de que se brinden incentivos y garantías a las industrias y PYMES para adoptar automatización, tecnologías 5G y energía renovable. El colegio promueve becas y comisiones de trabajo (Sistemas Inteligentes, Energías Renovables, Ingeniería Industrial y Eléctrica, entre otras) en coordinación con la academia; no obstante, ambos entrevistados reconocieron brechas importantes en tecnología, legislación y apoyo gubernamental.

Fase 2. Entrevista al Viceministro de Energía [13]. El Viceministro destacó que Costa Rica fue uno de los primeros países en presentar un plan de descarbonización de largo plazo con metas hacia 2050 [3], que la matriz eléctrica es casi totalmente renovable y que la cobertura eléctrica ronda el 99,6%. Explicó que el enfoque nacional evolucionó de la generación distribuida hacia los recursos distribuidos renovables, que incluyen la movilidad eléctrica, el almacenamiento energético (baterías e hidrógeno) y los sistemas de optimización energética y microrredes. Indicó que el país no requiere construir grandes plantas en el corto plazo, pero sí impulsar un mercado atractivo para inversiones en autoconsumo y soluciones energéticas inteligentes. Identificó como principales retos el sector transporte y la necesidad de incentivos y de una legislación energética que acelere la adopción de energías limpias, con apoyo de la academia, el CIEMI y el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE).

Fase 3. Encuesta a profesionales. Se aplicó un cuestionario en línea con preguntas cerradas de selección única, de selección múltiple y de escala (bajo, medio, alto), además de preguntas abiertas, sobre la preparación del país y de los ingenieros en 5G, automatización y energías renovables, la regulación vigente y el rol del colegio profesional. Se obtuvieron 20 respuestas válidas mediante un muestreo no probabilístico por conveniencia. Las preguntas cerradas se analizaron mediante frecuencias absolutas y relativas, y las abiertas mediante análisis de frecuencia de términos, representado en nubes de palabras.

Fase 4. Revisión documental. Se consultaron fuentes sobre el estado del 5G en la región [5], la guía de prácticas ambientales para PYMES de la Cámara de Industrias de Costa Rica [4], que recomienda medidas de gestión energética (iluminación natural y LED, sensores de movimiento, paneles y calentadores solares) y de gestión integral de residuos, y la actualización del Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2023-2030 de España [14].

C. Alcances y limitaciones

Los resultados se basan en la percepción de una muestra no probabilística de 20 profesionales y de tres informantes clave, por lo que no son generalizables a toda la población de ingenieros del país. El estudio no incluyó mediciones de campo de productividad, consumo energético ni emisiones, ni

comparaciones antes y después de la adopción de 5G. La revisión internacional se limitó al caso de España y a datos de la CEPAL. Por lo tanto, los hallazgos deben interpretarse como un diagnóstico exploratorio que orienta futuras investigaciones aplicadas.

IV. Resultados y discusión

A. Preparación del país y marco regulatorio

La Fig. 1 muestra que solo el 15% de los encuestados considera que Costa Rica está preparada para integrar la tecnología 5G en los procesos industriales, mientras que el 40% la considera parcialmente preparada y el 45% no preparada. Los participantes señalaron que el 5G requiere una infraestructura de antenas y estaciones base más densa para cubrir áreas extensas con la misma eficiencia que el 4G, lo cual es coherente con las obligaciones de despliegue asociadas a la adjudicación del espectro [7].

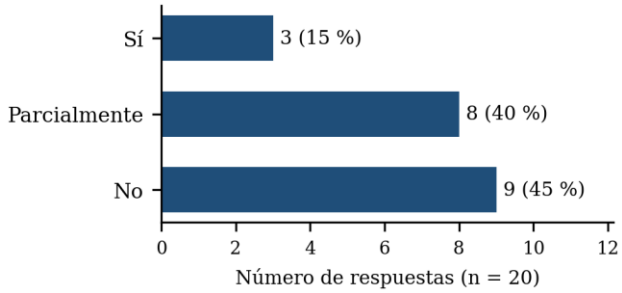


Fig. 1. Percepción sobre la preparación de Costa Rica para integrar la tecnología 5G en los procesos industriales.

En cuanto a la infraestructura regulatoria para el desarrollo industrial basado en 5G (Fig. 2), el 30% la considera suficiente, el 50% indica que requiere ajustes y el 20% que no es suficiente. Los encuestados manifestaron que los incentivos para adoptar tecnologías eléctricas y 5G no se perciben en el corto plazo, que se requiere inversión y que el sistema de financiamiento bancario no se ha adaptado.

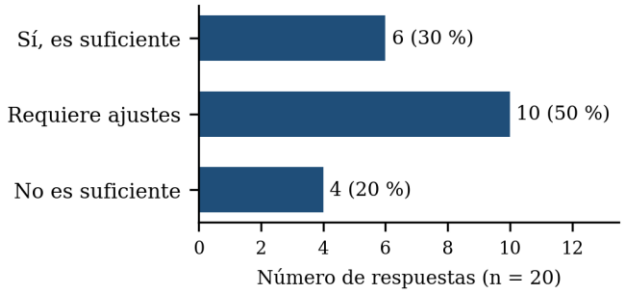


Fig. 2. Percepción sobre la infraestructura regulatoria actual para el desarrollo industrial basado en 5G.

De forma consistente, el 55% considera que la regulación para la implementación de las tecnologías 5G no es suficiente (Fig. 3). Las razones mencionadas son leyes o reglamentos poco ágiles, recursos limitados y una coordinación aún débil entre la industria y la academia, lo que ralentiza la actualización tecnológica y reduce la participación en proyectos estratégicos. En línea con ello, el 90% desea que el colegio profesional lidere, junto con el Estado, proyectos técnicos para modernizar la regulación tecnológica (Fig. 4).

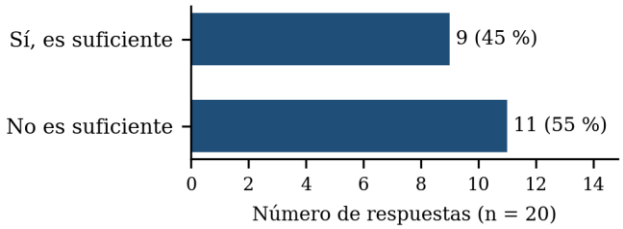


Fig. 3. Percepción sobre la suficiencia de la regulación para la implementación de las tecnologías 5G.

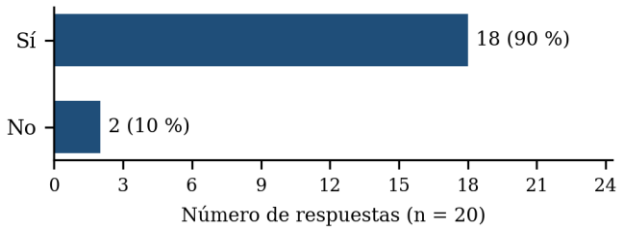


Fig. 4. Apoyo a la participación del CIEMI en proyectos técnicos con el Estado para modernizar la regulación tecnológica.

B. Preparación profesional de los ingenieros

Respecto a la preparación de los ingenieros para la implementación y uso de las energías renovables (Fig. 5), el 50% la considera suficiente, el 40% indica que requiere ajustes y el 10% que no es suficiente. Cuando se consulta específicamente por la tecnología 5G (Fig. 6), solo el 30% se considera preparado, el 60% parcialmente y el 10% no preparado; para el uso de energías renovables en procesos industriales (Fig. 7), los valores son 35%, 55% y 10%, respectivamente. Estos resultados sugieren que la preparación profesional es mayor en energías renovables que en 5G, pero en ambos casos predomina una preparación parcial.

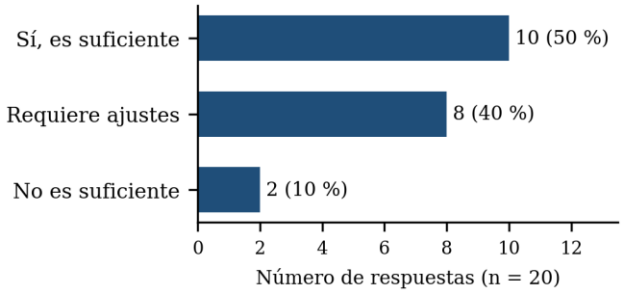


Fig. 5. Percepción sobre la preparación de los ingenieros para la implementación y uso de las energías renovables.

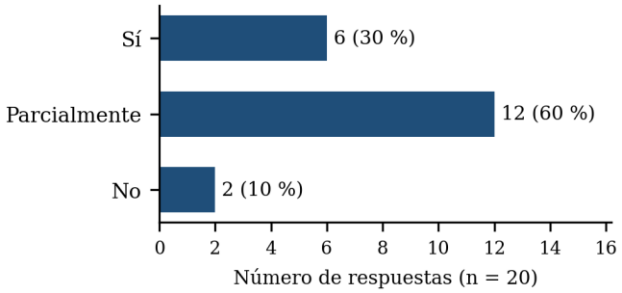


Fig. 6. Autopercepción de preparación de los ingenieros para la implementación de la tecnología 5G.

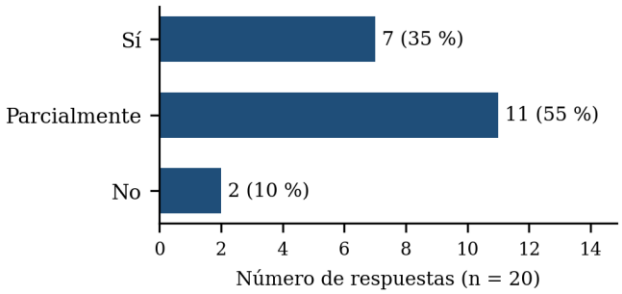


Fig. 7. Autopercepción de preparación de los ingenieros para el uso de energías renovables en los procesos industriales.

Entre las principales debilidades detectadas (Fig. 8, selección múltiple), la más mencionada es la desconexión entre la academia y la industria (13 menciones), seguida de la falta de especialización técnica (12), la desactualización normativa (10), la poca inversión en innovación (10) y la falta de certificaciones internacionales (7).



Fig. 8. Principales debilidades detectadas en los ingenieros (número de menciones).

C. Oferta de capacitación del colegio profesional

La Fig. 9 muestra las áreas en las que los encuestados consideran que el CIEMI promueve suficiente capacitación: transformación digital y eficiencia energética (10 menciones cada una), Industria 4.0/5.0 (9) y normativa ambiental (6); en contraste, las telecomunicaciones avanzadas recibieron una sola mención, lo que evidencia una brecha formativa directamente relacionada con el 5G. Al valorar el nivel de la capacitación por área temática (Fig. 10), predomina el nivel alto en gestión energética industrial (65%) y en generación renovable (60%), mientras que la integración de redes inteligentes presenta la mayor proporción de nivel bajo (15%).

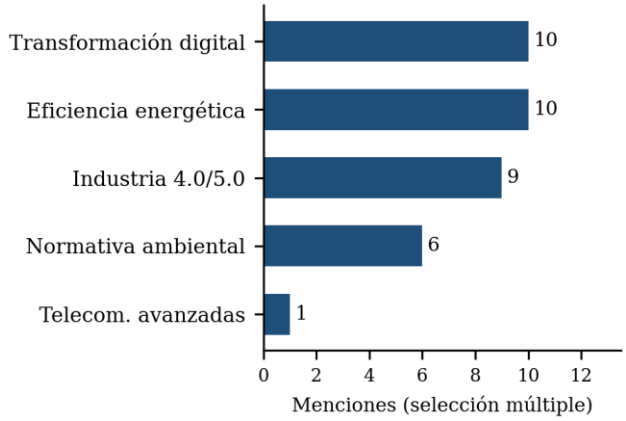


Fig. 9. Áreas en las que el CIEMI promueve suficiente capacitación (número de menciones).

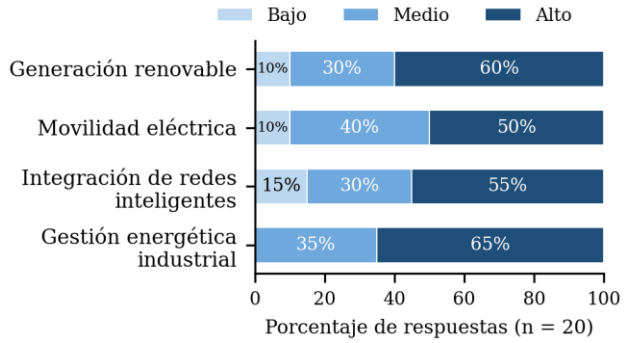


Fig. 10. Nivel percibido de la capacitación promovida por el CIEMI por área temática.

D. Percepciones de las preguntas abiertas

Las respuestas abiertas se resumen en las Figs. 11 a 14, donde el tamaño de cada término es proporcional a su frecuencia. Sobre el rol que debería tener el CFIA/CIEMI en la transformación digital sostenible (Fig. 11), predominan los términos “líder” y “transformación digital”. En relación con las reformas legales necesarias para potenciar el 5G y las energías renovables (Fig. 12), destacan “inversión”, “permisos” y “regulación”. Al visualizar el perfil del ingeniero costarricense en 2030 (Fig. 13), los participantes mencionan con mayor frecuencia “datos”, automatización, inteligencia artificial e infraestructura 5G. Respecto a las alianzas que deberían fortalecerse (Fig. 14), sobresalen las universidades y el sector privado, junto con el ICE, la SUTEL y el MICITT, con el fin de agilizar los marcos regulatorios y promover las energías renovables en la automatización industrial.



Fig. 11. Términos más frecuentes sobre el rol que debería tener el CFIA/CIEMI en la transformación digital sostenible del país.



Fig. 12. Términos más frecuentes sobre las reformas legales necesarias para potenciar el 5G y las energías renovables en la industria.



Fig. 13. Términos más frecuentes sobre el perfil del ingeniero costarricense en 2030 frente a la industria.



Fig. 14. Términos más frecuentes sobre las alianzas estratégicas que deberían fortalecerse (universidades, ICE, SUTEL, MINAE y sector privado).

E. Referente internacional y discusión

Como referente internacional, la actualización del Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2023-2030 de España plantea fortalecer el crecimiento industrial y la cadena de valor, reducir la dependencia energética exterior hasta cerca del 50% y disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero en un 32% respecto a 1990 para 2030, con un 48% de energía renovable en el consumo final y un 81% de generación eléctrica renovable [14]. El plan prevé, además, 76 GW de energía fotovoltaica (19 GW de autoconsumo), 62 GW de eólica, 22,5 GW de almacenamiento y 12 GW de electrolizadores para hidrógeno renovable [14]. A diferencia de Costa Rica, donde la electricidad ya es mayoritariamente renovable [3], el reto español se centra en la expansión de la generación; el caso muestra la importancia de contar con metas cuantificables, planificación de largo plazo y coordinación institucional.

Al triangular las entrevistas y la encuesta, se observa coincidencia en que Costa Rica posee ventajas estructurales (matriz eléctrica renovable, política de descarbonización y adjudicación reciente del espectro 5G), pero que su preparación es parcial. Las principales barreras no son exclusivamente tecnológicas, sino regulatorias, financieras, formativas y de articulación entre la academia, el Estado y el sector productivo.

F. Propuesta de integración tecnológica para un piloto industrial

A partir de las brechas identificadas, se propone como línea de aplicación un piloto de integración 5G–IoT–gestión energética que permita pasar del diagnóstico de percepción a una validación técnica. La propuesta no constituye un resultado

experimental de este estudio, sino una arquitectura de referencia para investigaciones posteriores. En ella, sensores IoT instalados en equipos de producción y sistemas eléctricos registrarían variables como consumo energético, temperatura, estado operativo y tiempos de funcionamiento; los datos serían transmitidos mediante conectividad 5G hacia una plataforma de supervisión para generar tableros, alertas y tendencias en tiempo casi real [2], [5].

La lógica de solución vincula cada brecha con una acción verificable: la falta de monitoreo se atiende mediante sensorización y adquisición de datos; la baja especialización, mediante capacitación técnica en 5G, IoT y análisis de datos; la desactualización normativa, mediante una mesa de coordinación entre CIEMI/CFIA, MICITT, SUTEL, MINAE, academia y sector productivo; y la necesidad de demostrar beneficios ambientales, mediante una línea base energética y un inventario de emisiones calculado con una metodología reconocida como GHG Protocol [8]. De esta forma, el uso de 5G se plantea como habilitador de comunicación y no como evidencia automática de reducción de consumo o emisiones.

Para evaluar el piloto se recomienda establecer una línea base previa y comparar, durante un periodo definido, indicadores antes y después de la intervención: consumo eléctrico (kWh), demanda máxima (kW), disponibilidad de equipos, número de alertas atendidas, tiempo de respuesta ante anomalías y emisiones asociadas al consumo eléctrico (kg CO_2e). Solo después de obtener estas mediciones sería metodológicamente válido estimar cambios en eficiencia energética, productividad o huella de carbono. Este enfoque responde a la necesidad de comprobar en condiciones reales los beneficios que la literatura atribuye a la conectividad avanzada y a la automatización [9].

Componentes mínimos del piloto: (1) sensores IoT para consumo, temperatura y estado de equipos; (2) conectividad 5G para transmisión de datos; (3) plataforma de monitoreo con tendencias y alertas; (4) gestión energética con comparación contra una línea base; (5) contabilidad de GEI con factores documentados; y (6) gobernanza y capacitación para atender las brechas regulatorias y de especialización. Los indicadores de validación deben incluir kWh, kW, disponibilidad del enlace, tiempos de respuesta, eventos atendidos y kg CO_2e.

V. Conclusiones

1. El estudio ofrece un diagnóstico exploratorio de la preparación de Costa Rica para integrar la tecnología 5G, la automatización industrial y las energías renovables. Aunque el país cuenta con condiciones favorables, solo el 15% de los profesionales encuestados lo considera preparado para integrar 5G en la industria, y el 70% señala que la regulación requiere ajustes o no es suficiente.
2. La preparación profesional es mayor en energías renovables que en 5G, aunque en ambos casos predomina una preparación parcial. Las brechas más relevantes son la desconexión entre la academia y la industria, la falta de especialización técnica y la desactualización normativa; además, la capacitación en telecomunicaciones avanzadas es la menos reconocida dentro de la oferta del colegio profesional.
3. Existe un amplio respaldo (90%) a que el CIEMI asuma un rol de liderazgo, junto con el Estado, en la modernización regulatoria. Los informantes clave coinciden en la necesidad de incentivos, agilidad normativa y coordinación entre MINAE, MICITT, SUTEL, ICE, universidades y sector privado.
4. La evidencia obtenida no permite concluir que la integración de 5G, automatización y energías renovables incremente la productividad o reduzca la huella de carbono, ya que estas variables no fueron medidas. Dichos beneficios, reportados en la literatura, constituyen hipótesis que deberán verificarse en estudios posteriores con indicadores energéticos y de emisiones. Como respuesta a esta limitación, se incorpora una arquitectura de piloto 5G–IoT–gestión energética con indicadores verificables para orientar una fase experimental posterior.

VI. Recomendaciones

Se recomienda fortalecer la coordinación entre el MINAE, el MICITT, la SUTEL, el ICE, el CIEMI, el CFIA, las universidades y el sector empresarial para construir una hoja de ruta nacional que acelere la implementación de tecnologías 5G aplicadas a la automatización industrial, con metas medibles, incentivos económicos y mecanismos de seguimiento orientados a la descarbonización del sector productivo.

Es conveniente que las universidades actualicen los planes de estudio de las carreras de ingeniería e incorporen contenidos sobre Industria 5.0, inteligencia artificial, gemelos digitales, Internet de las Cosas, ciberseguridad industrial, hidrógeno verde, análisis de datos y cuantificación de la huella de carbono.

Se recomienda que el CIEMI y el CFIA amplíen los programas de capacitación especializada, en particular en telecomunicaciones avanzadas y redes inteligentes, mediante certificaciones, laboratorios demostrativos, proyectos piloto y alianzas internacionales que favorezcan la transferencia de conocimiento hacia la industria nacional y las PYMES.

Para futuras investigaciones, se sugiere ampliar la muestra e incorporar empresas industriales, operadores de telecomunicaciones y entidades gubernamentales. Asimismo, se recomienda ejecutar el piloto 5G–IoT–gestión energética propuesto, estableciendo una línea base y mediciones antes y después de la intervención para cuantificar consumo eléctrico, demanda, disponibilidad, tiempos de respuesta y emisiones de gases de efecto invernadero. Este diseño permitiría evaluar con evidencia el efecto de la conectividad y la automatización sobre la eficiencia energética, los costos operativos y, cuando corresponda, la productividad. La secuencia de validación propuesta es: línea base, instrumentación IoT, transmisión mediante 5G, monitoreo de indicadores y comparación antes-después, evitando atribuir causalidad al 5G sin evidencia experimental.

AGRADECIMIENTO

Las autoras agradecen al Colegio de Ingenieros Electricistas, Mecánicos e Industriales de Costa Rica (CIEMI), a la Cámara de Industrias de Costa Rica y al Viceministro de Energía por su colaboración en las entrevistas, así como a los ingenieros agremiados al CFIA que respondieron la encuesta.

REFERENCIAS

[1] ITU-R, "IMT Vision – Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond," International Telecommunication Union, Geneva, Switzerland, Rec. ITU-R M.2083-0, Sep. 2015.

[2] M. Wollschlaeger, T. Sauter, and J. Jasperneite, "The future of industrial communication: Automation networks in the era of the Internet of Things and Industry 4.0," IEEE Ind. Electron. Mag., vol. 11, no. 1, pp. 17–27, Mar. 2017.

[3] Gobierno de Costa Rica, Plan Nacional de Descarbonización 2018-2050. San José, Costa Rica: Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE), 2019.

[4] Cámara de Industrias de Costa Rica, "Prácticas ambientales para PYMES: Recomendaciones," Colección de recursos: Ambiente y responsabilidad social. Accessed: Sep. 25, 2026. [Online]. Available: https://cicr.com/colecciones_recursos/ambiente-y-responsabilidad-social/

[5] Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), "La tecnología 5G," Observatorio de Desarrollo Digital. Accessed: Sep. 25, 2026. [Online]. Available: https://desarrollodigital.cepal.org/es/datos-y-hechos/la-tecnologia-5g

[6] M. Breque, L. De Nul, and A. Petridis, Industry 5.0: Towards a Sustainable, Human-Centric and Resilient European Industry. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2021.

[7] V. Contreras García, "Costa Rica da banderazo al despliegue 5G: Micitt adjudica licencias de espectro," DPL News, Apr. 28, 2025. Accessed: Sep. 25, 2026. [Online]. Available: https://dplnews.com/costa-rica-5g-micitt-adjudica-licencias-de-espectro/

[8] World Resources Institute and World Business Council for Sustainable Development, The Greenhouse Gas Protocol: A Corporate Accounting and Reporting Standard, rev. ed. Washington, DC, USA: WRI/WBCSD, 2004.

[9] D. López-Pérez et al., "A survey on 5G radio access network energy efficiency: Massive MIMO, lean carrier design, sleep modes, and machine learning," IEEE Commun. Surveys Tuts., vol. 24, no. 1, pp. 653–697, 2022.

[10] United Nations General Assembly, "Transforming our world: The 2030 Agenda for Sustainable Development," Res. A/RES/70/1, Oct. 2015.

[11] Colegio de Ingenieros Electricistas, Mecánicos e Industriales de Costa Rica (CIEMI), "Leyes y reglamentos." Accessed: Sep. 25, 2026. [Online]. Available: https://ciemicr.org/leyes-y-reglamentos/

[12] C. Oreamuno and P. Ledezma, Colegio de Ingenieros Electricistas, Mecánicos e Industriales de Costa Rica (CIEMI), private communication (interview), Mar. 2026.

[13] R. Rodríguez, Viceministro de Energía, Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE), private communication (interview), 2026.

[14] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO), "El Gobierno aprueba la actualización del Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2023-2030," Madrid, España, Sep. 2024. Accessed: Sep. 25, 2026. [Online]. Available: https://www.miteco.gob.es/es/prensa/ultimas-noticias/2024/septiembre/el-gobierno-aprueba-la-actualizacion-del-plan-nacional-integrado.html