Capítulo 4

Edificios inteligentes: el papel de la IA en la transición energética y en el cambio de conducta del ciudadano

Alberto Coronado-Mendoza[1]
alberto.coronado@academicos.udg.mx
Israel Guadalupe Hernández Villaseñor[1]
israel.hernandez7728@alumnos.udg.mx
Ángel Oswaldo Gama Camacho[1]
angel.gama@alumnos.udg.mx
Luis Manuel Sapien Macías[1]
luis.sapien3322@alumnos.udg.mx
Jesús Octavio Quezada Rosas[1]
joqr231210@gmail.com

https://doi.org/10.61728/AE20251987

[1] Centro Universitario de Tonalá, Universidad de Guadalajara.

Resumen

El presente capítulo establece algunas bases para la creación de una nueva cultura energética al interior de las organizaciones, donde los usuarios de los edificios, al estar informados en tiempo real sobre la huella de carbono que generan sus actividades diarias, pueden emprender acciones para su mitigación, asistidos por inteligencia artificial. Primeramente, se presenta cómo el cambio climático está estrechamente relacionado con la demanda de energía eléctrica a partir de la quema de combustibles fósiles. Se presentan algunos datos relevantes sobre la generación de energía en México y su consumo en el Área Metropolitana de Guadalajara. Posteriormente, se dan algunos conceptos sobre ciudades y edificios inteligentes, internet de las cosas y cómo la inteligencia artificial puede ser utilizada para predecir la demanda energética de estas edificaciones, así como de la generación fotovoltaica que se tendrá en días posteriores, con la finalidad de que el usuario esté informado y pueda tomar decisiones para cambiar sus hábitos de consumo. Finalmente, se presentan los avances del proyecto implementado en el Centro Universitario de Tonalá de la Universidad de Guadalajara, donde, a través del monitoreo de energía en tiempo real, tanto de generación del sistema fotovoltaico de 499 kWp como del consumo de los edificios universitarios, se promueve la figura del prosumidor y la carbono neutralidad.

Introducción

Cada año, las consecuencias del cambio climático se hacen más evidentes. Las catástrofes climáticas están presentes en nuestros territorios: incendios, inundaciones, sequías, temperaturas extremas, entre otros. La humanidad es la principal responsable del calentamiento global, derivado de la emisión de gases de efecto invernadero. Según las estadísticas, los edificios contribuyen en un 38 % del total de emisiones de CO_2 (ONU, 2020). La energía que se utiliza en México, como se muestra en la Fi-

gura 1, proviene principalmente de la quema de combustibles fósiles, en aproximadamente un 70 % (PRODESEN, 2023).

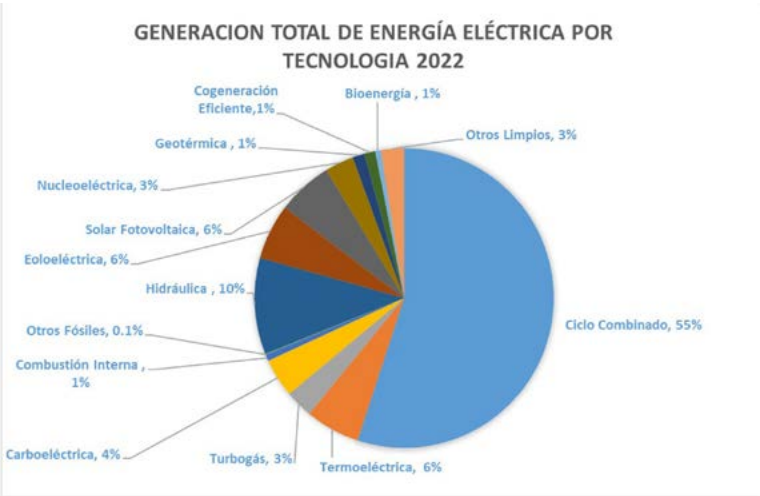

Figura 1. *Mezcla energética de México al 2022.*
Fuente: Elaboración propia con datos de CENACE, CRE Y CFE. *Otros fósiles incluyen cogeneración de abasto aislado e importaciones. ** Otros limpios incluyen Frenos regenerativos, Energía libre de combustible fósil, Energía adicional por enfriamiento auxiliar y Baterías.

En relación al consumo final de energía, la figura 2 muestra que la empresa mediana es la principal consumidora de energía con el 37.1 % en 2023 y la proyección es que esta crecerá al 28.1 % en 2037. Enseguida están el sector residencial y la gran industria con el 25 % aproximadamente.

Figura 2. *Consumo final del Sistema Eléctrico Nacional 2023 y 2037, escenario de planeación (%).*
Fuente: Elaboración propia con datos del CENACE (PRODESEN, 2023).

Las afectaciones del cambio climático se están dando en toda la Zona Metropolitana de Guadalajara, y el Municipio de Tlajomulco de Zúñiga no es la excepción. En los últimos años, Tlajomulco ha experimentado un crecimiento económico debido, entre otras razones, a la instalación de zonas industriales, así como al desarrollo de zonas habitacionales, donde este municipio creció de un 3 % en el año 2000 a un 29 % registrado en el año 2020 (ver tabla 1). Esto ha traído como consecuencia retos en movilidad y demanda energética, lo cual se ve reflejado en un incremento en emisiones de gases de efecto invernadero.

En la Figura 3 se presentan las diferentes fuentes de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) de cada uno de los municipios que conforman el Área Metropolitana de Guadalajara (AMG). Ocupando el primer lugar, Zapopan; luego Guadalajara, y Tlajomulco de Zúñiga se encuentra en tercer lugar, donde el transporte es la principal causa, enseguida de la energía estacionaria. A nivel del AMG, cada habitante tiene una huella de carbono de 3.3 toneladas de CO_{2e}.

Tabla 1. *Variación porcentual de habitantes por municipio.*
Fuente: Elaboración propia con datos del Censo de población y vivienda del INEGI 2020.

Municipio	Año	
	2000	2020
Guadalajara	45 %	27 %
Zapopan	27 %	29 %
Tonalá	9 %	11 %
Tlaquepaque	13 %	14 %
Tlajomulco	3 %	29 %
El Salto	2 %	5 %

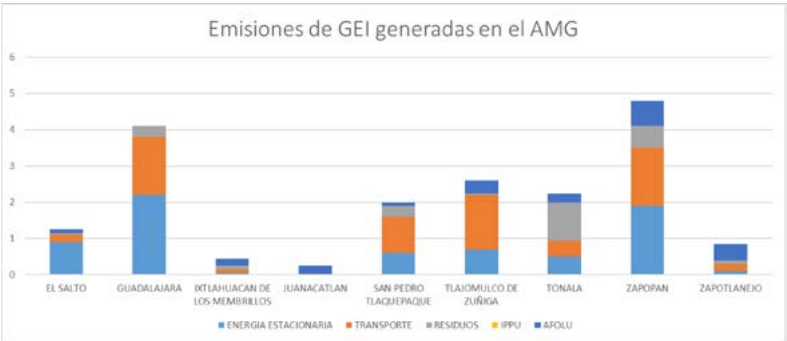

Figura 3. *Emisiones de GEI generadas en el AMG.*
Fuente: Elaboración propia con información de (PACmetro, 2020).

El sector de energía estacionaria fue el que más emisiones generó con 6.9 $MtCO_{2e}$, lo que equivale a una aportación del 43 % (ver Figura 3). Las emisiones provienen de la quema de combustible, así como de las emisiones fugitivas liberadas en el proceso de generación, entrega y consumo de formas útiles de energía (como electricidad o calor).

Tabla 2. *Emisiones totales por subsector para el sector de la Energía estacionaria en el AMG.*
Fuente: Elaboración propia con datos del PACmetro 2020.

Sector Energía estacionaria 6.9 $MtCO_{2e}$ 43 %	Edificios residenciales	44 %
	Edificios e instalaciones comerciales	43 %
	Industrias manufactureras	12 %

Como se muestra en la Tabla 2, el AMG emite anualmente 16.1 millones de toneladas de CO_{2e}, distribuyéndose en energía estacionaria con 6.9 MtCO2e (43 %), luego le sigue el transporte con 6.2 $MtCO_{2e}$ (39%), y el sector residuos con 2.9 $MtCO_{2e}$ (18 %).

Transición energética

La transición energética mundial es un proceso que busca cambiar el modelo de producción y consumo de energía hacia uno más sostenible, eficiente y respetuoso con el medioambiente. Esta transición es impulsada por la necesidad de abordar desafíos globales como el cambio climático, la seguridad energética y la contaminación ambiental. Implica la adopción de fuentes de energía renovable, la mejora de la eficiencia energética, la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y la promoción de tecnologías limpias.

La historia de la transición energética mundial se remonta a décadas atrás, pero ha ganado impulso significativo en las últimas dos o tres décadas, a medida que se ha intensificado la conciencia sobre los impactos negativos del uso predominante de combustibles fósiles. La creciente preocupación por el cambio climático, resultado principalmente de la quema de carbón, petróleo y gas natural, ha llevado a un creciente consenso internacional sobre la necesidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.

La transición energética se ha acelerado gracias a los avances tecnológicos en energías renovables como la solar, eólica, hidroeléctrica, geotérmica y de biomasa, así como en tecnologías de almacenamiento de energía y redes inteligentes. Estos avances han hecho que las energías

renovables sean más competitivas en términos de costo y confiabilidad, lo que ha impulsado su adopción a gran escala en muchos países.

En el caso específico de México, la transición energética ha sido un tema relevante en los últimos años. México ha sido tradicionalmente dependiente del petróleo como fuente principal de energía y ha enfrentado desafíos en términos de seguridad energética, así como de contaminación ambiental debido a la explotación y refinación de este recurso.

Sin embargo, en los últimos años, México ha comenzado a diversificar su matriz energética, promoviendo activamente la adopción de energías renovables y la mejora de la eficiencia energética (SENER, 2018). Se han implementado políticas y regulaciones para fomentar la inversión en energías limpias (CONUEE, 2014), se han establecido objetivos ambiciosos de generación de energía renovable (Ley de Transición Energética, 2015) y se han llevado a cabo subastas para la contratación de proyectos de energía renovable a gran escala (COPARMEX, 2023).

Además, México cuenta con un gran potencial para la generación de energía solar y eólica debido a sus condiciones geográficas favorables, lo que ha contribuido al rápido crecimiento de estas tecnologías en el país. La Ley de Transición Energética y la Ley de Transición a Energías Limpias son ejemplos de iniciativas legislativas que buscan promover una transición hacia un sistema energético más sostenible y limpio en México.

A pesar de estos avances, México todavía enfrenta desafíos en su transición energética, como la necesidad de mejorar la infraestructura de transmisión y distribución de energía, abordar la intermitencia de las energías renovables y garantizar una transición justa para las comunidades y trabajadores afectados por el cambio hacia un modelo energético más sostenible.

A nivel del Área Metropolitana de Guadalajara, se formuló el Plan de Acción Climática, o PACmetro, donde uno de sus objetivos es conseguir una metrópoli carbono neutral basada en la gestión integral de los residuos, la movilidad masiva y no motorizada, el uso eficiente de la energía y el suministro de energía renovable. (PACmetro, 2020). En resumen, la transición energética mundial es un proceso que busca transformar el sistema energético global hacia uno más sostenible y limpio, impulsado

por la necesidad de abordar los desafíos ambientales y climáticos. En México, este proceso ha sido un tema relevante en los últimos años, con esfuerzos significativos para diversificar la matriz energética y promover el uso de energías renovables. Sin embargo, todavía existen desafíos que deben superarse para lograr una transición exitosa hacia un futuro energético más sostenible.

Ciudades y edificios inteligentes

Existen en la actualidad dos tendencias importantes para la transición energética de las ciudades: ciudades inteligentes y edificios inteligentes. A continuación, se dan algunos detalles sobre estos dos conceptos. Las ciudades inteligentes son aquellas que conectan e integran los diferentes servicios, tecnologías, infraestructura, sustentabilidad y calidad de vida en beneficio de cada habitante para una mejor optimización de los recursos y necesidades de las descendencias futuras, formando un sistema robusto.

Algunas características de ciudades inteligentes son:

- Movilidad urbana
- Conectividad
- Sustentabilidad ambiental
- Sostenibilidad
- Gobernanza

En otras palabras, la ciudad inteligente es aquella que establece las mejores experiencias para cada uno de sus habitantes. Utilizando recursos renovables como la energía, reutilizando el uso del agua, implementando servicios de movilidad, infraestructura para su conectividad y administración eficiente.

Tal como lo señala la Organización de las Naciones Unidas, las ciudades y las áreas metropolitanas son centros neurálgicos de crecimiento económico, ya que contribuyen al 60 % del PIB mundial. Sin embargo, también representan el 70 % de las emisiones de carbono y más del 60% del uso de recursos.

Algunos elementos para el funcionamiento son:

- Detectores
- Sensores

- Captadores
- Luces
- Análisis de datos
- Unidad central

Estos dispositivos son esenciales para su administración, movimiento y sobre todo la captación de la información y análisis de datos. Todo esto con la única finalidad de que los quehaceres del día a día sean más seguros y eficientes en sus diferentes servicios.

Como indica Caird (2018), Los hallazgos ejemplifican las prácticas, los desafíos y las recomendaciones de evaluación e información de las ciudades contemporáneas para apoyar el desarrollo urbano inteligente.

Según los ciudadanos asocian la ciudad inteligente a la tecnología, la eficiencia y la mejora de su calidad de vida, centrándose en los problemas actuales: una ciudad humana con tecnología centrada en los ciudadanos. De esta manera, la ciudad actúa como un verdadero socio del ciudadano, dispuesta a reforzar la calidad de vida urbana y el entorno vital con diálogo y cocreación.

Además, Caird, Hudson y Kortuem, (2016) especifica que las tecnologías inteligentes crean nuevas oportunidades para una variedad de programas de desarrollo y regeneración de ciudades inteligentes diseñados para abordar los desafíos ambientales, económicos y sociales concentrados en las ciudades.

Los Edificios Inteligentes son aquellas infraestructuras dotada de diferentes sistemas con tecnología de última generación para la mejora y optimación de los diferentes procesos, en beneficio del deshago del usuario.

- Algunos elementos del inmueble son:
- Trabajo productivo y eficiente
    - Funcionabilidad y eficiencia
    - Ahorro de costos
    - Confort
    - Seguridad
    - Comercialización
    - Flexibilidad

- Diseño
- Sustentabilidad
- Calefacción
- Ventilación

En este sentido un edificio inteligente tiene control total del ambiente que se genera dentro de él, teniendo características favorables para la inspección de cada elemento y tener automatizado el entorno. Según Kirschning, (1992) recalca la integración de la calefacción, la ventilación, la climatización y todas las formas de administración de energía para su implementación. Por lo tanto, esta infraestructura tiene como objetivo, facilitar la estadía en el lugar disminuyendo el uso de energía y el ahorro sustentable del agua, al mismo tiempo debe de trabajar con un gestor de aprendizaje y una red neuronal para la recolección de datos en los diferentes movimientos de los usuarios, para así tener una eficiencia puntal en las necesidades de cada uno de ellos.

Como señala Pombo, Gupta y Stankovic (2018), en "Servicios Sociales Para Ciudadanos Digitales: Oportunidades para América Latina y el Caribe", se enfatiza la diferencia entre la causa del problema y la posibilidad de predecirlo, aclarando que no hace falta conocer el origen de un problema a predecir, sino que una mayor cantidad de datos relevantes pueden permitir generar modelos con variables correlacionadas para una mayor precisión en las predicciones.

Los edificios inteligentes utilizan tecnologías prometedoras que cooperan con la inteligencia artificial para proporcionar a sus ocupantes comodidad y un entorno energéticamente eficiente, tal como lo describe Luo, (2022) proporcionar una revisión mediante análisis bibliométrico y su aplicación con la tecnológica.

Metodología

En esta sección se presenta el desarrollo de un sistema de monitoreo de energía en tiempo real, que ha sido diseñado por colaboradores del Instituto de Energías Renovables de la Universidad de Guadalajara, para fomentar la cultura del prosumidor. Un prosumidor, se define como aquel usuario del servicio eléctrico que además de consumir energía, también

la genera a partir de energías renovables. De tal forma que debe gestionar un uso responsable para lograr la carbono neutralidad, es decir, que toda la energía que consuma, provenga de energías renovables.

Este desarrollo tecnológico se ha puesto a disposición de la sociedad, para que las empresas, instituciones e industrias de la región, que deseen implementar acciones de transición energética para lograr estas cero emisiones de gases de efecto invernadero, por concepto de utilización de energía eléctrica, puedan socializar este proceso a sus colaboradores, fomentando de esta manera una nueva cultura energética al interior de las organizaciones. Contribuyendo de esta manera a la consecución de los ODS 3, 7, 11, 12, y 13.

Internet de las cosas en la transición energética de la sociedad

El Internet de las cosas (IoT por sus siglas en inglés) es un concepto que se refiere a la interconexión de dispositivos físicos a través de internet, permitiendo que estos dispositivos se comuniquen entre sí y con sistemas externos. Estos dispositivos pueden ser cualquier cosa, desde electrodomésticos y vehículos hasta sensores industriales y dispositivos electrónicos. La idea fundamental detrás del IoT es la capacidad de recopilar datos de manera remota, analizarlos y utilizarlos para mejorar la eficiencia, la comodidad y la productividad en una amplia gama de aplicaciones.

Los dispositivos IoT suelen estar equipados con sensores, actuadores y conectividad a internet, lo que les permite recopilar datos del entorno circundante, enviar estos datos a través de internet a servidores o plataformas de análisis y recibir comandos remotos para realizar acciones específicas. Por ejemplo, un termostato inteligente puede recopilar datos de temperatura en una casa, enviar estos datos a una plataforma en la nube que analiza los patrones de uso y ajustar automáticamente la temperatura según las preferencias del usuario.

El IoT tiene aplicaciones en una variedad de industrias, incluyendo hogares inteligentes, ciudades inteligentes, salud, manufactura, agricultura, transporte y más. Ofrece beneficios como la automatización de procesos, la optimización de recursos, la mejora de la toma de decisiones basada

en datos y la creación de nuevas oportunidades de negocio.

Es así, que gracias a esta tecnología, hoy es posible conocer en tiempo real el consumo energético que tienen los edificios, para que el usuario final esté informado y pueda adoptar medidas para gestionar su propio impacto en su huella de carbono.

Inteligencia artificial en la transición energética de la sociedad

La inteligencia artificial (AI por sus siglas en inglés) es un área de la informática que se centra en el desarrollo de sistemas y algoritmos capaces de realizar tareas que normalmente requieren inteligencia humana. Estos sistemas están diseñados para aprender de los datos, adaptarse al cambio, reconocer patrones y tomar decisiones autónomas. Hay varias ramas dentro de la inteligencia artificial, incluyendo el aprendizaje automático (machine learning), el procesamiento del lenguaje natural (natural language processing), la visión por computadora (computer vision), la robótica y más. El aprendizaje automático es una subcategoría particularmente relevante, que se refiere a la capacidad de los sistemas para aprender y mejorar automáticamente a partir de la experiencia sin ser programados explícitamente para tareas específicas.

La inteligencia artificial se utiliza en una amplia gama de aplicaciones, desde recomendaciones de productos en línea y reconocimiento facial hasta diagnósticos médicos, conducción autónoma y predicción del tiempo. Su creciente adopción se debe a su capacidad para automatizar procesos, mejorar la eficiencia, optimizar decisiones y ofrecer experiencias personalizadas.

Soluciones se están aportando desde el Instituto de Energías Renovables de la Universidad de Guadalajara

El Centro Universitario de Tonalá fue el primer Centro de la Red Universitaria de Guadalajara y una de las primeras universidades en instalar un sistema fotovoltaico de 499 kWp bajo la ley de Generación Distribuida (Figura 4). Sin embargo, se ha observado que la instalación de generación renovable, como la fotovoltaica, no es suficiente para reducir la huella

de carbono a niveles acelerados como se estipulan en los tratados internacionales: Acuerdo de Paris, COP 26, IPCC, etcétera.

Figura 4. *Huerto solar fotovoltaico del CUTonalá.*
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 5 se muestra la evolución de uno de los indicadores energéticos que se monitorean en el Centro Universitario de Tonalá, que es el ahorro de energía de un mes del año actual respecto al mismo mes del año anterior. En la gráfica se puede apreciar que en los años 2019 a 2021 se tuvo un muy buen comportamiento de este indicador, ya que se tenía una disminución en el consumo de energía. Esto claro, debido a la pandemia. Sin embargo, en el 2022, al ir retornando a las actividades normales después de la pandemia, la tendencia fue a la alza. Pero en 2023, esta tendencia fue a la baja, donde los usuarios de los edificios fueron más conscientes respecto a la utilización de la energía, aunque todavía con incrementos de energía respecto al año anterior.

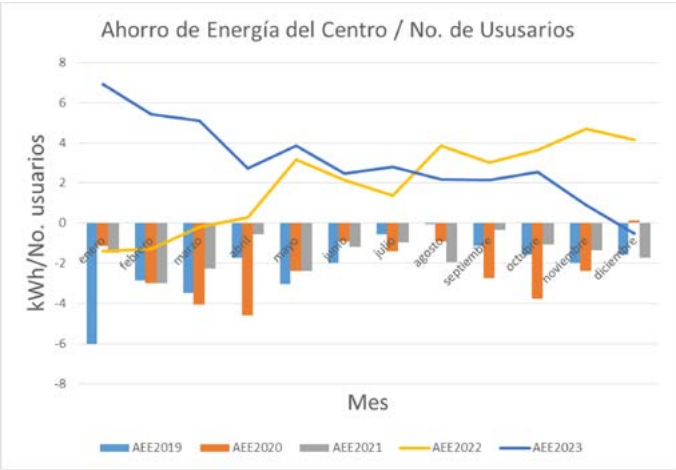

Figura 5. *Dinámica del ahorro energético anual por usuario.*
Fuente: Tomado del Informe 2023 del Instituto de Energías Renovables de la Universidad de Guadalajara.

Es bien conocida la premisa de que lo que no se mide, no se puede controlar. En este sentido, investigadores, egresados y estudiantes de Ingeniería en Energía, Ciencias Computacionales y tesistas de las maestrías y doctorado en agua y energía han desarrollado una plataforma para presentar en formato visual de una pantalla un "dashboard" con la información de la energía generada y consumida en un edificio, de modo que los usuarios de estos puedan estar informados sobre su huella de carbono que se deriva de sus actividades diarias y de qué manera pueden emprender acciones para mitigar ese impacto.

Dentro del mismo "dashboard" se puede ver una actualización consecutiva cada 5 minutos del consumo energético en contraste con lo generado, para así poder corresponderle una "calificación" y hacer un llamado a la acción en caso de tener un "promedio negativo". También, dentro del espacio de la pantalla, se reproducen videos que son alusivos, además, sobre transición energética, medioambiente, sustentabilidad, y se cuenta con un código QR para invitar a los usuarios a que aporten diferentes acciones e ideas en apoyo del medioambiente y la sustentabilidad.

Figura 6. *"Dashboard" para la socialización de la huella de carbono en edificios.* *Fuente*: Elaboración propia.

Como se comentó en la sección de internet de las cosas, las soluciones tecnológicas de hoy en día permiten conocer en tiempo real el consumo de algún equipo o edificio, gracias a los sensores que se instalan en los centros de carga y que estos mandan la información a algún servidor (IoT). En este sentido, el CUTonalá tiene monitoreado actualmente 8 edificios, tanto en generación fotovoltaica como en consumo, como se muestra en las Figuras 7 y 8.

El grupo de Gestores Energéticos del Centro Universitario de Tonalá, ha estado desarrollando en los últimos años un proyecto basado en el monitoreo de energía en tiempo real, para promover el uso responsable de energía eléctrica en sus edificios, donde a partir de estos sensores en tiempo real, se crea una plataforma para su monitoreo, como se presenta en la Figura 9.

Figura 7. *Sensores instalados en el cuarto de inversores del huerto solar fotovoltaico.*
Fuente: Elaboración propia.

Figura 8. *Sensor instalado en el centro de carga de las aulas amplias.*
Fuente: Elaboración propia.

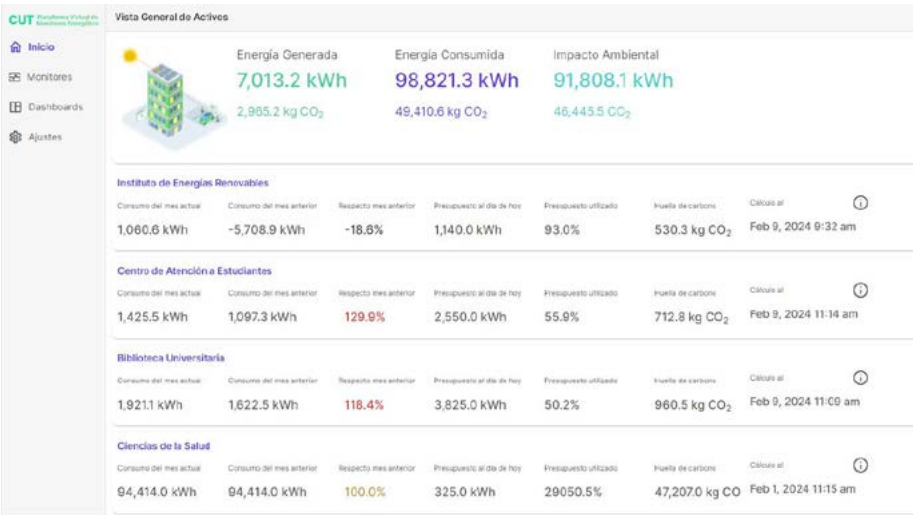

Figura 9. Plataforma de monitoreo de energía en edificios universitarios del CUT. Fuente: Elaboración propia.

Predicción de generación y demanda con redes neuronales

Hoy en día, es de suma importancia usar de manera eficiente la energía en cualquier tipo de sector, desde las industrias de producción masiva hasta el sector residencial-doméstico, ya que garantiza utilizar de manera correcta los recursos disponibles optimizando el gasto económico que implica la disposición de la energía. Dentro de dicha disposición, se sabe que las actividades que realiza el ser humano tanto para fines económicos como para necesidades básicas guardan un patrón de consumo de energía cíclico y repetitivo en cierta medida. Ante estos patrones cíclicos es posible medir, cuantificar y tener una idea aproximada de cuánta energía se usará en cierta hora del día. Sin embargo, una aproximación intuitiva en términos de eficiencia no es lo ideal, ya que se requiere saber a ciencia cierta cuánta energía se utiliza, la hora en que se utiliza y en que se utiliza.

Por otro lado, en caso de contar con una instalación que genere energía a partir de fuentes renovables como la solar fotovoltaica, eólica o hidroeléctrica, el monitorear y conocer de manera precisa cuánta energía se produce se vuelve aún más importante, ya que el monitoreo constante

de la potencia producida por el sistema, nos brinda información valiosa sobre los patrones de generación y como las variables meteorológicas influyen, debido a que, en general, los sistemas de energía renovable son altamente dependientes a los cambios de estas variables.

Predicción de demanda eléctrica

La predicción de la demanda eléctrica de un sitio determinado, resulta una herramienta importante que nos da la facilidad de poder anticipar acciones concretas o proponer una mejor cultura de consumo eléctrico para hacer más eficiente el manejo de la energía, debido a se tiene una posible demanda (con cierto error de predicción). Esta predicción puede realizarse mediante herramientas como el análisis de series de tiempo, modelos de regresión lineal y polinomial, modelos de promedios móviles simples y autorregresivos (ARIMA) e incluso técnicas de inteligencia artificial. Estas últimas, recientemente han tomado fuerza en este tipo de temas y son más utilizadas por la comunidad científica, gracias a su versatilidad y a que resultan muy intuitivas, ya que su comportamiento simula el aprendizaje humano. Dentro de las técnicas de inteligencia artificial aplicadas a este tópico destacan las redes neuronales artificiales (RNA), las cuales simulan el comportamiento de la transmisión de información y aprendizaje en el cerebro humano. En este tipo de modelos, no es necesario conocer el proceso interno ni el modelo general del sistema, ya que la red neuronal aprende, reconoce e interpreta patrones entre las variables de entrada para obtener un resultado determinado. En este sentido, resulta de utilidad intentar utilizar un predictor basado en redes neuronales artificiales para la estimación de la demanda eléctrica en un determinado lugar, a partir del comportamiento histórico de esta, así como para la estimación de la potencia generada por un sistema de energía renovable como un parque solar o eólico.

En particular, el Centro Universitario de Tonalá cuenta con una red de monitoreo del consumo de energía eléctrica a lo largo del día, la cual obtiene datos de demanda de 4 edificios (biblioteca (BIB), centro de atención a estudiantes (CAE), edificio de salud (SAL) y el instituto de energías renovables (IER)). Los datos que se obtienen de la potencia

demandada son datos que se registran en promedio cada hora, dependiendo de la disponibilidad de la red de internet, ya que el envío de datos está directamente relacionado con la conexión de Wi-Fi. Debido a esto, existen datos que no son transmitidos al servidor por cuestión de la red. En la práctica, el uso de estos datos como entrada en una red neuronal es un problema, ya que una red neuronal necesita datos completos para poder predecir de manera correcta el comportamiento a lo largo del día de la demanda. Esta omisión de datos obliga a un pretratamiento, en el cual es necesario completar los datos vacíos. El proceso de llenado de datos se realiza utilizando interpolación lineal. Sin embargo, el proceso de interpolación de los datos en este momento se encuentra en una fase donde se realiza artesanalmente, es decir, dato por dato, lo cual resulta ser poco práctico al tratar datos con un volumen grande. Es necesario asegurar que la red será estable en todo momento para garantizar que el sensor estará mandando datos de manera constante con un horizonte de tiempo fijo.

A grandes rasgos, el funcionamiento de una RNA se puede resumir en tres pasos: aprendizaje, validación y prueba. En la primera fase, la RNA analiza un porcentaje de los datos obtenidos (por lo general 70 %) para encontrar patrones y relaciones entre las variables en cuestión, las cuales en nuestro caso son potencia de consumo y tiempo. En la fase validación toma un 15 % de datos para verificar que efectivamente la fase de aprendizaje se llevó a cabo correctamente y finalmente, en la fase de prueba se toma el 15 % restante de datos para retar a la RNA con datos diferentes y ver su comportamiento.

Las métricas más utilizadas para evaluar el rendimiento de una RNA son el coeficiente de correlación R y el error cuadrático medio (ECM). Ambas métricas nos sirven para identificar qué tan buena es una predicción, ya que el primero de ellos señala un número entre 0 y 1 (idealmente mayor a 0.95), que evalúa la semejanza o relación lineal entre la predicción y los datos, mientras que el segundo es un valor de tolerancia definido según la aplicación o el problema en cuestión, donde se dictamina que si el ECM es menor a ese valor, se considera una buena predicción, aunque R no sea tan cercana a 1.

Estudio de caso

En este ejemplo de predicción se toman 7 días de datos horarios dentro del periodo comprendido entre el 16 y el 20 de enero de 2023 para el edificio (SAL), utilizando una red neuronal no lineal autorregresiva (RNA-NLAR), en la cual se predice el valor de la demanda en cierta hora del día a partir del comportamiento anterior de la misma. En la figura 10 se muestra la demanda típica de una semana escolar.

De los resultados obtenidos (Figura 10) se observa que el coeficiente de correlación global entre los datos y la predicción es de 0.96607, por lo cual se dictamina que se encuentra una buena correlación entre ambos datos. Por su parte, el ECM obtenido es de 1.066 kW. Al observar la gráfica, gran parte del error es debido a la demanda base; sin embargo, la demanda base no es la zona de interés, sino los picos de alta demanda, en los cuales la predicción obtenida es muy similar a los datos reales. Posterior a los resultados obtenidos, resulta necesario evaluar la RNA ante un monitoreo en tiempo real, lo cual ayudará a mejorar el aprendizaje de la red y evaluar el rendimiento de la misma en modo dinámico.

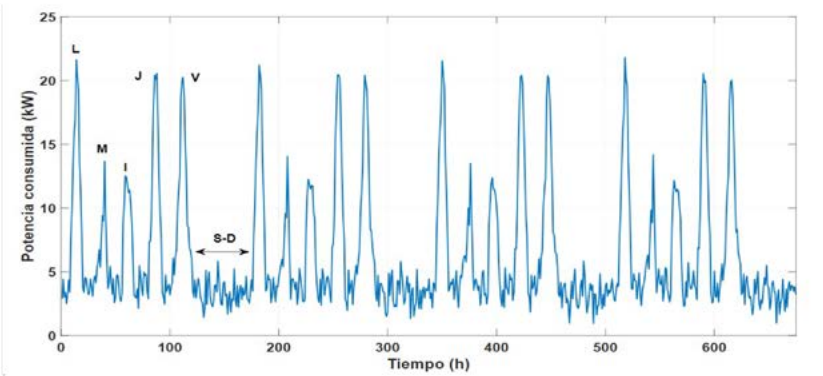

Figura 10. *Demanda eléctrica de una semana en el edificio SAL.*
Fuente: Elaboración propia.

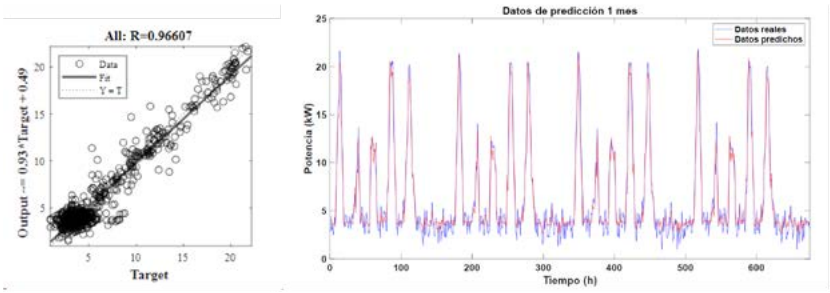

Figura 11. *Resultados de predicción mediante RNA-NLAR.*
Fuente: Elaboración propia.

Predicción de generación de energía solar fotovoltaica

Por otro lado, el Centro Universitario de Tonalá cuenta con un parque solar conformado por 1560 módulos fotovoltaicos de 320 W, los cuales generan electricidad destinada a satisfacer la demanda eléctrica de los edificios antes mencionados. Dicha generación de energía está directamente ligada a factores atmosféricos y geográficos como la irradiancia solar, la temperatura y la ubicación. Se sabe que la potencia generada por N módulos fotovoltaicos está definida por la ecuación:

$$P_{PV} = N_{PV} P_{NOM} D_{rf} \frac{G}{G_{STD}} [1 + \alpha(T + 0.0256G - T_{STD})] \qquad (1)$$

Donde PPV es la potencia total generada por los módulos, NPV es el número de módulos, PNOM es la potencia nominal indicada por el fabricante, Drf un factor de pérdida (por lo general entre 0.85 y 0.90), G es la irradiancia solar del lugar, GSTD es la irradiancia a condiciones estándar (1000 W/m2), alpha es el coeficiente de temperatura, T la temperatura del lugar y TSTD la temperatura estándar (25 °C). En la figura 12 se muestra la generación de energía en el año 2022, con un promedio alrededor de los 400 kW y un pico de generación de 450 kW en el mes de marzo.

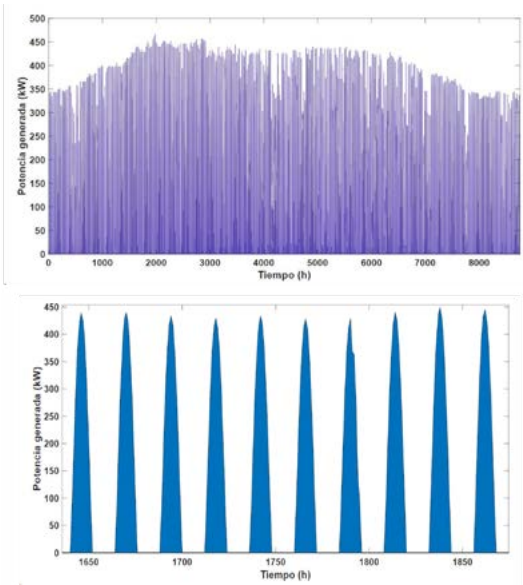

Figura 12. *Generación fotovoltaica del parque solar.*
Fuente: Elaboración propia con datos de la National Solar Radiation Database, NREL (2022).

Al observar la gráfica de generación, es posible notar que la potencia fotovoltaica obedece un comportamiento cíclico donde la misma presenta un pico marcado durante el día, mientras que esta cae a cero durante la noche. Debido a lo anterior, es posible implementar una RNA para predecir la generación fotovoltaica durante el año. En la figura 13 se muestran los resultados obtenidos, donde se observa que el coeficiente de correlación es de 0.94424.

Discusión

Existe la necesidad de abordar la reducción de emisiones de GEI de una manera acelerada, por lo que en las rutas de descarbonización de los diferentes sectores, no solo se debe buscar la transición a las energías renovables y la eficiencia energética, sino también cambiar el aspecto cultural de los usuarios de los edificios, para que puedan alcanzarse esos objetivos de carbono neutralidad para el 2050. Es ahí donde la inteligen-

cia artificial puede fungir como un asistente para la gestión energética de los edificios, basándose en la predicción de consumo y generación. Existe poca literatura que se enfoque en esta temática de la IA aplicada a modificar los hábitos de consumo, por lo que este capítulo puede ayudar a explorar esta posibilidad.

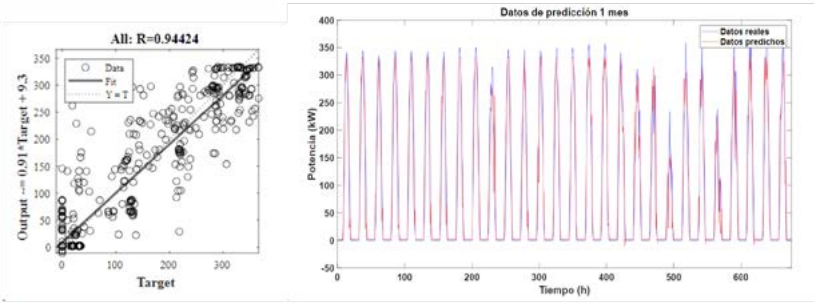

Figura 13. *Resultados de predicción mediante RNA-NLAR.*
Fuente: Elaboración propia.

Conclusiones

Actualmente, este sistema de monitoreo de energía ya se encuentra funcionando como prueba piloto en ocho edificios del Centro Universitario de Tonalá, donde se busca lograr la carbono neutralidad de los edificios intervenidos, logrando así contribuir al ODS 11, Ciudades y Comunidades Sostenibles, y al ODS 7, energía asequible y no contaminante.

El siguiente paso de este proyecto es acercar este tipo de tecnología a diferentes edificios del Área Metropolitana de Guadalajara, con el objetivo de promover una nueva cultura energética, donde la inteligencia artificial funcione como un gestor automático de energía, que ajuste de manera adaptable las metas energéticas para cada edificio en función de su consumo de energía eléctrica, su producción fotovoltaica y sus potenciales de ahorro en dos vertientes: control automático de demanda y uso responsable de energía demandada por los usuarios.

Referencias

Agüero, G.A., Vivas, H.L., & Britos, P.V. (2022). I*nteligencia Artificial y ciudades inteligentes. Una mirada sobre la perspectiva Ética para el desarrollo de servicios digitales ciudadanos, monografía.*

Arencibia-Pardo, F.R., Peña-Rodríguez, B., & Caicedo-Villamizar, S.B. (2020). *El entorno de sustentabilidad en los edificios inteligentes, pasos para una "Domótica saludable preventiva".*

Batlle, M.J., Martine, D., Sally, K., & Els Van, C. (2019). *La inteligencia artificial en las ciudades.*

Caird, S. (2018). *Enfoques urbanos para la evaluación y presentación de informes sobre ciudades inteligentes: estudios de caso en el Reino Unido.*

Caird, S., Hudson, L., & Kortuem, G. (2016). *Una historia de evaluación e informes en las ciudades inteligentes del Reino Unido.*

Cabello, S. (2022). *El camino de desarrollo de las ciudades inteligentes, una evaluación de Bogotá, Buenos Aires, Ciudad de México y São Paulo.*

Corporate.enelx.com. (S.F.). *¿Qué es una ciudad inteligente?* Recuperado de https://corporate.enelx.com/es/question-and-answers/what-is-a-smart-city

Dongsu, K., Yeobeom, Y., Jongman, L., Mago, P.J., Kwangho, L., & Heejin, C. (2022). *Diseño e implementación de edificios inteligentes: una revisión de la tendencia de investigación actual.*

González, S.F. (2017). *Smart cities, la evolución de las ciudades.*

Luo, J. (2022). *Una revisión bibliométrica sobre inteligencia artificial para edificios inteligentes.*

ONU. (2020). *Emisiones del sector de los edificios alcanzaron nivel récord.* Recuperado de https://www.unep.org/es/noticias-y-reportajes/comunicado-de-prensa/emisiones-del-sector-de-los-edificios-alcanzaron-nivel#:~:text=La%20operaci%C3%B3n%20y%20construcci%C3%B3n%20de,la%20neutralidad%20clim%C3%A1tica%20en%202050

PACmetro. (2020). *Plan de Acción Climática del Área Metropolitana de Guadalajara.* Recuperado de https://www.imeplan.mx/pacmetro/

PRODESEN. (2023). *Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional 2023-2037*. Recuperado de https://www.gob.mx/sener/articulos/programa-de-desarrollo-del-sistema-electrico-nacional-2023-2037

CONUEE. (2014). *Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía*. Recuperado de https://www.gob.mx/conuee/prensa/notas-seleccionadas-del-dia-16-de-diciembre-de-2014

Ley de Transición Energética. (2015). Recuperado de https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LTE.pdf

Prospectiva de Energías Renovables. (2018). Recuperado de https://www.gob.mx/sener/documentos/prospectivas-del-sector-energetico

COPARMEX. (2023). Recuperado de https://coparmex.org.mx/subastas-de-largo-plazo-de-energia-electrica-en-mexico/