

Transición energética e inteligencia artificial

G.L. Camacho Ahumada^a

ABSTRACT

La creciente preocupación por disminuir los niveles de emisiones de gases de efecto invernadero ha planteado nuevos retos en la manera como funcionan los diferentes sectores de la economía. La energía es uno de los más importantes, además de ser transversal y servir como materia prima, no sólo en los sectores productivos, sino también en los servicios de educación, salud, entre otros. Por tal motivo, es fundamental encontrar aquellas claves que permitan una transición energética en el corto plazo y faciliten la descarbonización en la producción y el consumo de la energía. En el presente estudio se analizan los resultados del artículo “*Leveraging the power of artificial intelligence toward the energy transition: The key role of the digital economy*” y las posibles implicaciones que tienen sus resultados en un sistema energético como el colombiano.

1. Introducción

La transición energética es uno de los principales temas en el panorama ambiental de todos los países, teniendo en cuenta que la energía es uno de los sectores que más contribuyen en las emisiones de gases de efecto invernadero. Según información reportada por la Agencia Internacional de Energía, en el año 2022 la mayor parte de las emisiones se originaron en la generación de energía eléctrica, en la industria y en el transporte [1]. A nivel local, de acuerdo con el inventario nacional de gases de efecto invernadero del Tercer informe bienal de actualización de cambio climático en Colombia [2], BUR 3 por sus siglas en inglés, en el año 2018, la energía representó el 30,7% de las emisiones por 302.974 Gg CO₂ eq. De ese 30%, el transporte, las industrias de la energía y las industrias manufactureras y de la construcción constituyen más del 80% del total.

A partir de estas cifras, surgen diferentes enfoques en la manera como se debe abordar la transición energética para lograr disminuir las emisiones e incluso alcanzar la carbono neutralidad en el consumo energético.

Uno de esos enfoques es la electrificación de los diferentes usos finales, de la mano con una generación de energía a partir de fuentes no convencionales de energía renovables, en adelante FNCER. Para el primer caso,

sectores como el transporte, en los últimos años se ha visto un crecimiento importante en la flota de vehículos eléctricos. En 2024, las ventas en el primer trimestre crecieron alrededor de un 25% en comparación con el mismo período del año anterior y totalizaron una cantidad similar a la vendida en todo el año 2022 [3]. En el segundo caso, los costos de la energía solar fotovoltaica y de la energía eólica han disminuido desde hace 15 años, lo que hace que estas tecnologías sean competitivas frente a las tecnologías tradicionales sin necesidad de recurrir a ayudas financieras [4]. Sin embargo, aunque sus costos de producción hayan presentado una reducción significativa, la incorporación de las FNCER en las redes de transmisión implica retos debido a la intermitencia del recurso y la predicción de este.

Por otra parte, la implementación de estas tecnologías trae consigo ventajas como la recopilación en tiempo real de grandes cantidades de información, por lo que herramientas como el *big data*, las redes neuronales, *block chain* y la inteligencia artificial, IA en adelante, van a jugar un papel crucial en el éxito de la transición energética, en adelante TE.

El artículo “*Leveraging the power of artificial intelligence toward the energy transition: The key role of the digital economy*” [5], analizó el impacto de la inteligencia artificial en la transición energética, encontrando que: 1) entre más desarrollada está la IA afecta de manera positiva

^a E-mail: germanl.camachoa@utadeo.edu.co

la transición; 2) la economía digital, en adelante ED, refuerza el impacto de la IA en la TE y; 3) el impacto de la IA varía entre países de acuerdo con su nivel de ingresos y su dependencia en recursos como el petróleo.

En el presente trabajo se va a presentar la metodología del artículo, a través de un resumen de este. Adicionalmente, se va a presentar un breve resumen de la actualidad del sistema energético colombiano y de las perspectivas oficiales respecto de la TE, para finalmente presentar un análisis de las implicaciones de los resultados del artículo para países como Colombia.

2. Resumen del artículo

2.1. Introducción

Desde la introducción del artículo los autores remarcan la importancia de implementar la TE para lograr disminuir la contaminación a partir de fuentes fósiles en el consumo de energía que genera calentamiento global.

Se plantea que la investigación en TE se ha enfocado en las rutas para alcanzarla, ya sea a través del análisis de modelos ambientales en los que se comparan diferentes estrategias como financiación verde o impuestos al carbono, o en impactos económicos y de gobierno que impactan la TE y, se influyen factores como los recursos naturales, recursos y subsidios para investigación y desarrollo, etc.

También se resalta que otro enfoque para lograr la TE es a través de IA. Esta ya es usada en el sector energético para pronosticar la demanda, optimizar la distribución de energía, manejo de la red, además de ayudar a mejorar la competitividad de las fuentes renovables de energía, lo que significa un enorme potencial para promover la TE.

Asimismo, menciona que la economía digital ha promovido el desarrollo de la IA en años recientes. A partir de la generación de nuevos modelos de negocios y de aplicaciones tecnológicas, ha promovido la IA a través de los datos y la infraestructura tecnológica (capacidad de almacenamiento y de procesamiento).

A partir de estos elementos, la contribución del estudio es la siguiente:

1. Revisar las relaciones entre IA y el sector energético, lo que revela caminos en los que la IA afecta la TE.
2. Analizar el rol de la economía digital para el desarrollo de la IA y su impacto en la TE. A través de indicadores de infraestructura digital, sociedad

digital y globalización digital para evaluar el nivel de desarrollo de la economía digital en los países y su función en este contexto.

3. Analizar varianzas regionales, estado de los países y características propias de estos para tener un mejor entendimiento de los efectos heterogéneos de la IA.

2.2. Revisión de la literatura

La IA se ha desarrollado para imitar las actividades inteligentes de los humanos, como tomar decisiones a partir de juicios y en la actualidad es usada en diferentes actividades económicas como las finanzas, la salud, la educación y la manufactura. En el sector energético, las aplicaciones de IA se han enfocado en tres aspectos: eficiencia energética, intensidad energética y consumo energético.

Con respecto a las aplicaciones de la IA en eficiencia energética, el artículo encontró los siguientes estudios:

- Estudio de influencia del uso de robots en la calidad del aire, variable mediadora el consumo energético y moderadora la densidad de la población, encontrando que la densidad de la población reduce los efectos directos de la IA en la calidad del aire, mientras que incrementa los indirectos.
- Evidencia a micronivel entre la adopción de robots y la eficiencia energética. Influencia positivamente el ambiente y genera una armonización entre desarrollo económico y conservación ambiental.
- Uso de la IA en la industria ayuda a la eficiencia energética y disminuye la cantidad de contaminación.
- La IA logra reducir la intensidad de carbono a través de mejoras en la eficiencia energética.
- Impacto del uso de robots en la intensidad energética. Mejoran la intensidad energética y refuerzan la mejora en eficiencia energética.

Con respecto a la intensidad energética, el artículo encontró los siguientes estudios:

- Efectos de la IA en la intensidad energética. Se demostró que su uso ayuda a disminuir la intensidad energética a través de un menor consumo.

- La habilidad de la IA para reducir el consumo energético depende del ambiente de aplicación, porque en algunos, a pesar de promover la eficiencia, puede promover aumentos del consumo.

Por parte de las aplicaciones de la IA en la TE, el artículo encontró que este tema todavía se encuentra en discusiones preliminares que carecen de evidencia empírica a nivel global, sin embargo, menciona los siguientes estudios:

- Cómo los sistemas energéticos con renovables hacen uso de sensores para recolectar datos durante la operación de los sistemas eléctricos y mecánicos, esto puede ayudar a monitorear constantemente su correcto funcionamiento y así detectar a tiempo fallas para corregirlas con rapidez para lograr exitosamente la transición energética.
- Cuando los desarrollos en IA son incorporados en los sistemas energéticos se posibilita la TE.
- De acuerdo con el nivel de madurez de las aplicaciones de IA, depende el impacto en la TE.

Finalmente, el artículo presenta los estudios que relacionan el rol de la ED en el desarrollo de la IA:

- A través del desarrollo de nuevos modelos de negocio y de aplicaciones tecnológicas, la economía digital permite un mayor desarrollo de la IA con mayor capacidad de almacenamiento y computacional.
- Genera grandes cantidades de datos estandarizados que sirven de soporte para los procesos de entrenamiento y aprendizaje de la IA.
- Ayuda en la mejora en eficiencia energética.
- Rol positivo en la transición a energías renovables, aunque el efecto varía entre países con diferentes niveles de ingreso.
- La economía digital no sólo promueve la TE sino también la justicia económica.

2.3. Metodología

Los autores construyeron un modelo que explica la TE a través de variables como la urbanización, economía e inversión extranjera directa y la IA.

$$ET = f(AI, GDP, URH, FDI, DE)$$

Donde

ET: Representa la transición energética

AI: Representa la inteligencia artificial

GDP: Representa el producto interno bruto

URH: Representa la proporción de personas en áreas urbanas

FDI: Representa la inversión extranjera directa reflejada por la razón de flujo de inversión extranjera sobre el ingreso neto

DE: Representa la economía digital

La función lineal planteada para explicar la TE es la siguiente:

$$ET_i = \beta_0 + \beta_1 AI_i + \beta_2 DE_i + \beta_3 (AI_i \times DE_i) + \gamma CV + \alpha_i + \varepsilon_{it}$$

En este modelo se usa la variable *DE* para moderar *AI*. La variable *CV* representa las variables *GDP*, *URH* y *FDI*. Para evitar multicolinealidad usan la técnica de *media centering* para la variable moderadora ($AI_i \times DE_i$).

2.4. Datos

Los autores construyeron una base de datos de 64 países con 960 observaciones de los años 2005 a 2019.

Para definir la variable independiente, se menciona que se tenían dos enfoques de variables proxy. El primero, desde el lado del consumo, utilizando la proporción de consumo de gas natural en el consumo final o la proporción de fósiles en el consumo de energía primaria o la proporción de uso de renovables en el consumo final de energía. El segundo, desde el lado de la oferta, utilizando la proporción de generación con FNCER sobre la producción total de electricidad. Para el artículo, los autores eligieron la proporción de renovables sobre el consumo final de energía.

Con respecto a las variables independientes, para *AI* se utilizó como proxy el inventario de robots industriales y la *DE* se construyó a partir de indicadores como la construcción de infraestructura digital, participación social en la economía digital y globalización digital.

2.5. Análisis empírico y discusión

De acuerdo con los resultados del modelo, todas las variables resultaron significativas y tienen consistencia a medida que se agregan otras. El resultado de que el desarrollo de IA promueva la TE se puede analizar como consecuencia de que, al implementar IA en los modelos de predicción de la energía renovable, se disminuyen los riesgos asociados a su uso y se mejora su competitividad

(predicción de irradiancia, densidad potencia hidrógeno). Estos avances facilitan la integración de las renovables a la red. En el lado del consumo, la IA puede ayudar a las industrias manufactureras y de transporte a mejorar su eficiencia energética al mejorar sus procesos de producción y consumo de energía.

La relación entre FDI y URH con ET es significativa y negativa. Estos impactos se pueden explicar de la siguiente manera:

- FDI: Los inversores destinan los recursos en actividades tradicionales
- URH: A mayor densidad poblacional, mayor consumo de energía.

Con DE también se observa la relación significativa y negativa. La implementación de IA lleva al desarrollo de centros computacionales, redes, uso de dispositivos electrónicos, que llevan a un incremento en el consumo de electricidad.

Luego, los autores aplicaron el modelo por grupos de países para realizar un análisis de heterogeneidad. A partir de estos análisis encontraron que, en los países OECD y en los de altos ingresos AI es significativa y tiene impacto en ET. Esto se puede explicar porque tienen más recursos para recolectar, guardar y analizar datos que ayudan al entrenamiento y optimización de los algoritmos de IA. Sin embargo, para estos países, sus sistemas económicos e industriales son complejos, lo que lleva a que la variable DE sea negativa. El amplio uso de tecnologías de información y comunicaciones hace que se aumente el consumo energético.

Al analizar por regiones, se encuentra que el comportamiento de Europa y Asia Central es similar al presentado por OECD y los de alto ingreso. Sin embargo, para regiones como Latinoamérica y el caribe y el norte de África, la variable AI no es significativa y, adicionalmente, tiene una relación negativa con la ET. Lo anterior se puede explicar por los bajos ingresos de los países y la baja disponibilidad de profesionales con capacidades para el desarrollo de IA. En el caso del medio oriente, aunque no es significativa, la variable es positiva lo que puede ser explicado por la abundancia de recursos fósiles que llevarían a que los países tengan incentivos y necesiten utilizar la IA para acelerar la expansión de las FNCER y otras fuentes diferentes a las fósiles en la oferta de energía y así facilitar la TE.

Los autores también realizaron una prueba de robustez utilizando la variable ET rezagada para representar políticas, inversiones previas en energía y elecciones tecnológicas. Al rezagar e incluir los rezagos de la

variable ET como variables explicativas se aprecia que, no se afecta la significancia ni la dirección del impacto de la variable AI en ET, por lo que se confirma la robustez de los resultados previos.

Finalmente, para analizar el rol de la ED, se incluyó la variable de interacción entre AI y DE. Se obtiene como resultado que esta variable es significativa y positiva, lo que indica que entre mayor sea la economía digital en un país, mayor será el impacto en la AI, lo que implica que la AI tiene impacto en la ET. Lo anterior se puede explicar porque un país con ED desarrollada cuenta con tecnología y aplicaciones que permiten transformación digital en los sectores y recopilación de datos como demanda de energía que son la base de la IA.

Adicionalmente, al incluir cada uno de los elementos que componen la variable DE por aparte, se encuentra que son significativos y positivos, lo que refuerza los resultados previos e indica que los países deben priorizar la integración de la economía digital con la IA mediante el fortalecimiento de la infraestructura y el impulso a la sociedad digital.

2.6. Conclusiones y recomendaciones de política

Las principales conclusiones a las que llegaron los autores son las siguientes:

1. El nivel de transición energética de cada país aumenta progresivamente con el desarrollo y la implementación de la IA.
2. Aunque el impacto directo de la economía digital es negativo, juega un rol moderador positivo en el impacto de la IA en la TE.
3. Hay diferencias marcadas entre los países de altos ingresos y aquellos con medios y bajos. En los primeros la IA impulsa prominentemente la TE, mientras que sus efectos son bajos en los segundos. Además, en los países cuyas economías están basadas en la extracción de recursos, se encontró que la IA ayuda significativamente a la TE, caso contrario a los países no dependientes de recursos.

Partiendo de estas conclusiones, los autores hacen las siguientes recomendaciones a los gobiernos:

- i. Priorizar el uso de IA en el sector energético para impulsar el uso confiable de FNCER con la implementación de sistemas de manejo de energía y redes inteligentes, así como la implementación de un esquema colaborativo de

intercambio de información entre la industria IA y el sector energético.

- ii. La aplicación y entrenamiento de la IA debe ser ajustada a las características de los países. En aquellos con altos ingresos se debe buscar la mejora en el nivel de inteligencia de los sistemas energéticos para aumentar la competitividad de las FNCER. Para aquellos que dependen de recursos, deben aprovechar las oportunidades presentadas por la IA para disminuir la dependencia de los combustibles fósiles.
- iii. Los países se deben enfocar en los desarrollos de la economía digital para fortalecer el rol de la IA en la transición energética. Lo anterior a través de reducción de impuestos y subsidios. Adicionalmente deben incluir marcos legales y regulatorios para asegurar la integración sostenible y segura de la IA y la economía digital en el sector energético.

3. Sistema energético colombiano

3.1. Situación actual

Para el año 2022, el consumo final de energía en Colombia fue de 1.7 millones de TJ, de los cuales 456 mil provienen de energéticos primarios y el restante de secundarios.

De estos últimos, la electricidad tan sólo representó el 21,3%, siendo el sector que más consume el residencial, seguido por los sectores industrial y comercial con participaciones entre un 20 y 25%. El sector transporte no alcanza el 1% de participación del consumo eléctrico [6].

En 2023 se generaron 80.68 TWh de electricidad a partir de las siguientes fuentes:

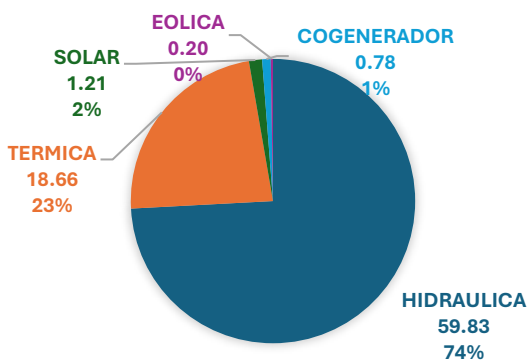


Figura 1. Generación electricidad 2023 por tipo de tecnología (GWh). Fuente: XM, construcción propia.

Esta energía se obtuvo a partir de una capacidad instalada de alrededor de unos 20 GW, de los cuales las hidroeléctricas representan alrededor del 65%, las térmicas alrededor de un 30% y las renovables no convencionales menos del 5% [7].

Sin embargo, aunque la matriz de generación de electricidad sea una de las más limpias y, a pesar de que se tiene una meta de expansión hasta de 6 GW de la capacidad de generación con FNCER [8], los sectores más intensivos en energía, léase transporte e industria manufacturera, son consumidores principalmente de energéticos fósiles y sus derivados (Figura 2).

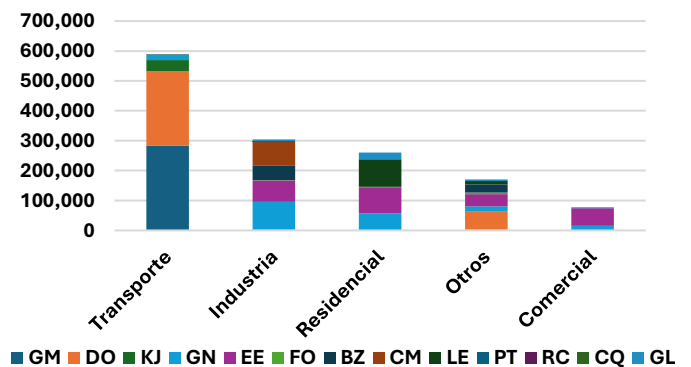


Figura 2. Consumo de energéticos por sectores (TJ)

Entonces, a partir de la información presentada se evidencia que, a pesar de que Colombia cuenta con un sistema de generación eléctrica que tiene bajas emisiones, si se lograra la electrificación de la mayoría de los usos finales en todos los sectores de consumo, se requeriría hacer una expansión del sistema actual en alrededor de 5 o más veces su capacidad actual.

3.2. Perspectivas a 2050

Actualmente Colombia cuenta con dos documentos oficiales que presentan perspectivas similares en cuanto a lo que debería ser el futuro de la producción y el consumo de la energía en el país. Por una parte, la Unidad de Planeación Minero Energética - UPME publicó el Plan Energético Nacional PEN 2022 – 2052.

Este documento plantea diferentes factores políticos, económicos, sociales, tecnológicos y ambientales que inciden en la transición energética y que no pueden ser controlados por el sector energético. Se destacan la construcción de consensos sociales sobre cómo hacer la transición, así como trabajar sobre lo construido teniendo en cuenta las experiencias internacionales y locales, financiamiento de proyectos, el precio de la energía eléctrica, los fósiles y del carbono asociado a estos últimos. Coinciden, como en el artículo analizado en este

trabajo, en factores sociales como la importancia del acceso a la información y la formación de capital humano para construir “un sistema energético descentralizado, descarbonizado y digitalizado”. También destacan la importancia de factores tecnológicos como la eficiencia energética, la electrificación y, a partir de la descentralización, la implementación de tecnologías como la medición inteligente y la digitalización [9].

Partiendo de estos factores y de la situación actual del sistema energético, el PEN presenta cinco escenarios llamados Actualización, Modernización, Inflexión, Disrupción y Transición Energética, en los que se plantean cambios en las tecnologías de producción y consumo final de energía y el uso de nuevas fuentes como la energía nuclear o el hidrógeno de bajas emisiones, variando su gradualidad e intensidad entre escenarios. Como resultado se encuentra que, el crecimiento del consumo de energía en el período 2022 - 2052 está entre el 70% (Actualización) y 40% (Disrupción y Transición Energética).

También, presentan la disminución en el indicador de intensidad energética, que mide cuántas unidades de energía se necesitan para generar valor agregado en la economía. Para el año 2021, Colombia presenta un valor de 1,4kJ/COP y a 2052, se proyecta que este indicador se ubique en un rango entre 1 y 0,6 kJ/COP, de acuerdo con el escenario de prospectiva. Asimismo, presenta la evolución de las emisiones en los sectores de consumo final, pasando de un valor de 65Mton CO₂ equivalente en el 2021 a un rango entre 105 – 25 Mton CO₂ equivalente.

Por su parte, el Ministerio de Minas y Energía publicó el documento “Escenarios Nacionales TEJ. Rutas que nos preparan para el futuro” [10], en el que al igual que la UPME, presentan escenarios de prospectiva, presentando alternativas tecnológicas que permiten la materialización de objetivos como la descarbonización de la matriz energética, e incorporando elementos de política pública para tener en cuenta elementos de justicia social y ambiental. Los resultados en términos energéticos y de emisiones son similares entre los escenarios Transición Energética del PEN y Transición Energética Justa del documento del MME. Sin embargo, el MME presenta un escenario más ambicioso en términos de reducción de emisiones llamado “Compromisos COP 26”, en el que esperan alcanzar emisiones de tan solo 8,09Mton CO₂ eq. No obstante, los documentos de la UPME y el MME presentan conclusiones similares en tanto que la TE pasa por la electrificación de un mayor número de actividades económicas, apoyada en una generación principalmente con fuentes renovables no convencionales. Estas

conclusiones refuerzan la tesis de la importancia que tiene y tendrá la IA en el camino de la TE.

4. Implicaciones de la IA en la TE para Colombia

A partir de lo planteado en el artículo analizado y de la actualidad energética colombiana se aprecia que, aunque la IA es importante para el desarrollo de la TE, tanto por el nivel de electrificación de la economía como por la adopción de tecnologías que permiten un uso más eficiente de esa energía, en los diferentes segmentos de su cadena de valor, en este momento hace parte de las claves a tener en cuenta, pero no representa el principal factor que impulsa la TE.

En primer lugar y como se describió en la sección anterior, el consumo de electricidad actualmente en Colombia representa el 20% y podría alcanzar hasta un 62% [9]. Sin embargo, la ruta para la TE no implica solamente la electrificación de los usos finales que consumen energía, sino también cambios en las dinámicas de mercado como la descentralización, la descarbonización, la digitalización y la eficiencia en el consumo [11]. En esta línea, juegan un papel fundamental las tecnologías para recopilar, transmitir, almacenar y analizar la información relacionada. También se deben tener en cuenta las capacidades tecnológicas, no solo en el uso final, sino también en los diferentes segmentos de la cadena de valor de la electricidad, léase generación, transmisión, distribución y comercialización.

4.1. Tecnologías que contribuyen a la TE

4.1.1. Generación

La necesidad de contar con una generación de energía de bajas emisiones ha impulsado la instalación de grandes capacidades de energía renovable no convencionales, que han llevado a que sus costos nivelados hayan presentado disminuciones de hasta el 89% en el período 2010 - 2022 en el caso de la solar fotovoltaica. La mayor parte de la reducción en el costo del kWh se presentó por la disminución en los costos de los módulos fotovoltaicos (45%), en los costos de instalación (12%), en los costos de los inversores (9%), así como por las mejores condiciones financieras para los proyectos por la madurez del mercado de renovables [12].

De igual manera, los costos nivelados de la energía eólica *on shore* para el mismo período se han reducido en un 69% [12].

Por otra parte, soluciones descentralizadas como la instalación de paneles fotovoltaicos en los hogares también representan una oportunidad importante para la transición porque, a pesar de que los costos de las materias primas tuvieron un aumento significativo post pandemia, los altos precios de la electricidad para el usuario final hacen viable su instalación.

Sin embargo, tanto las soluciones a gran escala como las descentralizadas han generado nuevos retos en los sistemas interconectados. El primero de ellos es la variabilidad del recurso. Tanto la radiación solar como el viento son recursos intermitentes y de difícil pronóstico. En este punto, la IA puede contribuir a la integración de estas tecnologías a los sistemas interconectados mediante el análisis de datos históricos y el uso de algoritmos de *machine learning* para conocer la disponibilidad del recurso con cierta anticipación sin generar costos adicionales al mercado eléctrico.

Por otra parte, la incorporación de capacidad con FNCER y la salida de plantas convencionales que generan electricidad con máquinas síncronas, tanto hidráulicas como aquellas con recursos fósiles, hacen necesaria la implementación de nuevas formas de regulación de frecuencia y tensión en las redes, así como nuevas formas de transportar la energía desde los puntos de generación que, como en el caso de Colombia, no están cerca de los puntos de mayor demanda de energía.

4.1.2. Transmisión y distribución

Como se mencionó en el apartado anterior, la incorporación de las FNCER ha incorporado nuevos retos en la transmisión de energía, dentro de los que se destacan tecnologías de almacenamiento, de regulación de frecuencia por ejemplo el sistema de transmisión AC flexible, FACTS por sus siglas en inglés, que son un conjunto de dispositivos de electrónica de potencia que ayudan en la protección de cargas frente a fenómenos de cambios en la tensión y frecuencia de la red, de transporte de energía en DC y gemelos digitales para simular los sistemas y llevar un mejor control de las fallas.

Almacenamiento de energía

Este tipo de tecnología busca aprovechar la generación de energía en horas de baja demanda para utilizarla en aquellas en las que se tiene mayor consumo y precios de generación más altos. También sirve de soporte para la generación con FNCER, supliendo su generación en los momentos en que los recursos (el sol o el viento) tengan interrupciones.

En el pasado se ha usado almacenamiento en centrales hidráulicas reversibles, en la que se turbinan el agua en los momentos de mayor demanda de energía y se bombea de vuelta en momentos de bajo consumo.

En los últimos años se han incorporado baterías de escala de red, dentro de las que se destacan las de Ion-Litio. A nivel mundial, la capacidad instalada en 2022 se ubicaba en los 28GW [13].

A nivel local, la UPME adjudicó en 2021 la construcción del primer sistema de almacenamiento de energía eléctrica con baterías en el departamento del Atlántico, “con una capacidad de entrega al sistema de 45MW”, con el objetivo de entregar suplir la generación de energía ante fallas de la red de transmisión [14].

De acuerdo con NREL, actualmente los costos de almacenamiento en un sistema de baterías de 4 horas están entre 347 y 500 USD de 2022 [15].

FACTS

Dentro de los dispositivos de regulación de frecuencia y voltaje se encuentran, entre otros, los compensadores síncronos estáticos, STATCOM, los compensadores estáticos VAR, SVC. Estos dispositivos son usados para regular el voltaje de la red mediante la compensación de potencia reactiva [16].

HVDC

En proyectos de transmisión de electricidad a grandes distancias, las líneas HVDC (*high voltage direct current*) se presentan como una solución para superar retos presentados en las líneas AC como [17]:

- La transferencia de potencia se puede ver afectada por la imposibilidad de mantener la misma diferencia angular a lo largo de la línea.
- El control de voltaje, debido a que para mantener el mismo voltaje entre los puntos de entrada y salida de la línea se necesita de la instalación de sistemas de compensación de potencia reactiva.
- Compensación de línea con FACTS
- Problemas de interconexión AC, ya que dos sistemas de AC que se conecten deben tener en cuenta la frecuencia y voltaje manejado por el otro, por lo que se requieren sistemas de AGC.

Gemelos digitales

A partir de la recolección de información de la operación de los sistemas eléctricos, se pueden generar gemelos digitales que ayuden en la detección de problemas o

fallas, la predicción de estas y la optimización de su funcionamiento.

4.1.3. Consumo final

Del lado del consumo final, los retos tecnológicos pasan por la adopción de dispositivos más eficientes que sustituyan otros que actualmente son usados en aplicaciones de movilidad, calentamiento e iluminación.

Adicionalmente, el uso de nuevas aplicaciones eléctricas debe ser adoptado en conjunto con tecnologías de medición y recopilación de información.

Medición inteligente

Uno de los elementos tecnológicos claves para el desarrollo de la TE son los medidores inteligentes. Estos no solamente pueden ayudar a los consumidores a tener un mayor control de la manera como consumen energía, sino que también son fundamentales en los casos en que, a raíz de la descentralización en la generación de energía, los usuarios finales se convierten en “prosumidores” y entregan energía a la red, por lo que requieren tener un control de las cantidades que inyectan y toman, como de la calidad de estas.

Si bien esta es una tecnología que lleva muchos años en el mercado, en Colombia su implementación se ha visto afectada por la discusión de la responsabilidad de su reposición y cambio en caso de daño y la responsabilidad de quién debe ser el encargado de asumir los costos de la implementación de la medición inteligente.

Para el primer caso, el Concepto 073 de 2020 de la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios estableció que *“Será obligación de los usuarios, reparar o reemplazar los instrumentos de medición cuando se establezca que el funcionamiento no permite determinar en forma adecuada y precisa los consumos, o cuando el desarrollo tecnológico ponga a su disposición instrumentos de medida más precisos.”* [18]

En el segundo caso, en su artículo 56, la Ley 2099 de 2021 estableció que *“Las empresas prestadoras del servicio de energía deberán asumir los costos asociados a la adquisición, instalación, mantenimiento y reparación de los medidores inteligentes de los que trata la presente Ley. De ninguna manera este costo podrá ser trasladado al usuario en la facturación o cualquier otro medio.”* [19] Este artículo fue demandado por inconstitucionalidad y la Corte Constitucional mediante Sentencia C-186/22, determinó, entre otras razones, que aunque el objetivo era prevenir que los usuarios, sin importar su nivel de ingresos, tuviesen que incurrir en costos por un equipo que habían adquirido previamente, va en contra de la

recuperación de costos en la prestación de servicios públicos.

Adicionalmente, se requieren cambios regulatorios para que los usuarios puedan tomar decisiones de consumo basadas en las tarifas que enfrentan, es decir, que puedan decidir en qué momentos del día consumen de acuerdo con valor de la energía, así como la manera en que van a comercializar la energía que puedan entregar a la red.

Estas discusiones han contribuido al retraso en la implementación masiva de esta tecnología, que no sólo puede contribuir en alcanzar un consumo eficiente, sino que reforzarían la recopilación de información y su posterior tratamiento y análisis mediante el uso de la IA.

En el año 2022 el número de medidores inteligentes instalados en Colombia estaba alrededor de 450.000 de acuerdo con datos de ANDESCO [20]. Esta cifra parece pequeña frente a la meta establecida para 2030 de cubrir el 75% de los usuarios del servicio de energía eléctrica con esta tecnología (que representarían más de 10 millones).

Electrificación de otros usos

A partir de la descripción del consumo final de energía de la Figura 2, se aprecia que los sectores que más consumen energía y que a su vez cuentan con un mayor espacio para reducir brechas de eficiencia son el transporte y la industria.

En el primero, su principal uso son los motores de combustión interna, por lo que su eficiencia energética está limitada, en el mejor de los casos, a valores cercanos a 40% de no realizar un cambio tecnológico. Además, los motores de combustión interna hacen uso de combustibles fósiles que, en el caso del sector energético colombiano, son los que generan mayores aportes a las emisiones de gases de efecto invernadero. Por tal motivo, tanto el PEN 2022 – 2052 como el documento de TEJ presentan como alternativa la electrificación del parque automotor liviano como solución para alcanzar la carbono neutralidad a 2050. Asimismo, para el transporte pesado, léase transporte de pasajeros y de carga de largas distancias, se plantea el uso de gas natural comprimido e incluso de celdas de hidrógeno debido a que el uso de baterías eléctricas no sería del todo eficiente ya que, por la cantidad de energía requerida, implicaría baterías de gran tamaño y peso.

En el segundo, los usos que demandan más energía son aquellos de calentamiento directo o indirecto. Por las altas temperaturas que se requieren en los diferentes procesos industriales, los energéticos más usados son el carbón y el

gas natural. Aunque el uso de estos energéticos está asociado a emisiones de gases de efecto invernadero, la sustitución de gas natural por carbón podría contribuir en la disminución de las emisiones del sector industrial. Adicionalmente, los documentos de prospectiva de la UPME y del MME plantean el uso del hidrógeno mezclado con gas natural. En el artículo se menciona como una variable proxy de la IA el inventario de robots industriales. En el caso de Colombia, aunque haya procesos industriales robotizados y automatizados, la disponibilidad de información de mejoras a través de su uso (por políticas de confidencialidad), podría incidir en un mayor desarrollo de los mismos.

En los sectores comercial y residencial, aunque la energía eléctrica tiene mayor participación, todavía tienen usos de calentamiento directo como la cocción, que actualmente hace uso principalmente de la leña y del gas combustible (gas natural y GLP). Sin embargo, en las ciudades se pueden integrar tecnologías como las estufas de inducción o los hornos eléctricos, que no solo pueden ayudar a disminuir emisiones de gases de efecto invernadero por la sustitución de electricidad por gas combustible, sino que también pueden ayudar a hacer un consumo más eficiente de la energía.

5. Conclusiones

Aunque se evidencia la disposición de las entidades oficiales y de agentes del sector energético por avanzar en la TE, en Colombia se requiere un fuerte enfoque en la adopción de tecnologías que la habiliten y que a su vez permitan la integración de la IA para acelerar su consecución

Si bien la IA puede contribuir en la TE como está planteado en el desarrollo del artículo analizado, el primer reto que enfrenta Colombia desde el lado de la demanda es la electrificación de usos finales que permita una descarbonización de la economía colombiana. En este punto, el principal sector llamado a reemplazar su parque tecnológico es el transporte. Sin embargo, esta sustitución tecnológica tiene asociados altos costos de inversión no sólo en temas de movilidad, sino también de infraestructura de distribución eléctrica, lo cual puede retrasar los avances en TE. Otros sectores como la industria pueden hacer uso de robots, automatización de procesos e incluso implementación de gemelos digitales, para hacer más eficiente el consumo de energía a partir de combustibles fósiles e incluso, pueden hacer uso de estas tecnologías para el manejo de sus emisiones de gases de efecto invernadero. Sin embargo, la TE en este sector no podría medirse por el grado de electrificación o de uso de

FNCER, por lo que un análisis empírico de la influencia de la IA en la TE de Colombia debería buscar variables proxy diferentes a las utilizadas en el estudio para evaluar ese impacto. Por ejemplo, como lo plantea el mismo estudio dentro de su revisión de literatura, para la TE se podría usar la participación del gas natural o de los fósiles en la matriz de consumo de energía.

El segundo reto que enfrentaría Colombia es la incorporación de una capacidad significativa de FNCER. A agosto de 2024, la capacidad instalada del SIN es de alrededor de 20 GW, de los cuales cerca de 0,7 GW son de FNCER mayormente solares y se proyecta que para el 2026 esta cifra llegue a 6 GW. Sin embargo, a partir de los documentos de prospectiva del MME y de la UPME, la capacidad de generación de electricidad debería aumentar hasta 5 veces y, preferiblemente, con base en soluciones de bajas emisiones. Asimismo, no sólo se debe tener en cuenta la instalación de estas tecnologías, sino la predicción de sus recursos y las alternativas para mitigar el impacto de esa variabilidad en las redes de transmisión para proyectos ubicados lejos de los centros de consumo o de distribución en el caso de soluciones individuales.

Otro reto frente a la TE de la manera como se planteó en el artículo analizado, es que Colombia cuenta con reservas de recursos como petróleo y el carbón. Si bien las metas y objetivos a mediano y largo plazo buscan la descarbonización de la economía, la economía colombiana depende de estos recursos y la inversión extranjera puede verse direccionada hacia estos sectores tradicionales y no ser dirigida hacia proyectos de TE.

A partir de las recomendaciones de los autores del artículo analizado, Colombia no sólo debe priorizar en la implementación de la IA en el sector energético sino en todos aquellos sectores intensivos en energía, esto en conjunto con robotización y automatización de procesos, no sólo para mejorar la eficiencia en el consumo energético sino para optimizar la explotación de recursos como el petróleo y el carbón.

Adicionalmente, se debe acelerar la adopción de aquellas tecnologías que permitan usar de manera eficiente la electricidad, no sólo para su generación y transmisión, sino también en los usos finales, así como la medición inteligente. Asimismo, se debe propender por un manejo abierto pero adecuado de la información recolectada para poder implementar algoritmos de *machine learning* o modelos de gemelos digitales que permitan planear las etapas de avance en la TE de acuerdo con las necesidades del país.

Con respecto a las recomendaciones de reducción de impuestos, aunque no es específicamente para el desarrollo de la IA, si se han desarrollado incentivos para el ingreso de nuevas tecnologías que pueden permitir a futuro la integración de la IA y un mayor impulso a la TE.

Por último y como también lo recomienda el artículo, el país debe fortalecer la capacitación del talento humano, no solamente para que pueda manejar sino que también pueda desarrollar aplicaciones de IA que contribuyan al logro de la TE.

6. Referencias

- [1] IEA, «CO2 Emissions in 2022,» 1 Marzo 2023. [En línea]. Available: <https://www.iea.org/reports/co2-emissions-in-2022>.
- [2] IDEAM, PNUD, Fundación Natura, GEF, «Tercer informe bienal de actualización de cambio climático en Colombia,» 1 Junio 2022. [En línea]. Available: https://unfccc.int/documents/424157?gad_source=1&gclid=CjwKCAjwiaa2BhAiEiwAQBgyHppqrS0BG3Csn-ZF3mScXvzvUgJgk4V8MyMQltKmOH5WdqGvEmXW0hoCq1YQAvD_BwE.
- [3] IEA, «The world's electric car fleet continues to grow strongly, with 2024 sales set to reach 17 million,» 23 Abril 2024. [En línea]. Available: <https://www.iea.org/news/the-worlds-electric-car-fleet-continues-to-grow-strongly-with-2024-sales-set-to-reach-17-million>.
- [4] IRENA, «Renewables Competitiveness Accelerates, Despite Cost Inflation,» 29 Agosto 2023. [En línea]. Available: <https://www.irena.org/News/pressreleases/2023/Aug/Renewables-Competitiveness-Accelerates-Despite-Cost-Inflation>.
- [5] C.-C. Lee, Y. Fang, S. Quan y X. Li, «Leveraging the power of artificial intelligence toward the energy transition: The key role of the digital economy,» *Energy Economics*, 2024.
- [6] UPME, «Balance Energético Colombiano,» 1 Agosto 2023. [En línea]. Available: <https://www1.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Paginas/BECO.aspx>.
- [7] XM, «Paratec, Parámetros técnicos del SIN,» 31 Agosto 2024. [En línea]. Available: <https://paratec.xm.com.co/paratec/SitePages/generacion.aspx?q=capacidad>.
- [8] Ministerio de Minas y Energía, «El Ministerio de Minas y Energía y la UPME avanzan con el desarrollo y acompañamiento de proyectos para la generación de energías renovables,» 6 Octubre 2023. [En línea]. Available: <https://www.minenergia.gov.co/es/sala-de-prensa/noticias-index/el-ministerio-de-minas-y-energ%C3%ADa-y-la-upme-avanzan-con-el-desarrollo-y-acompa%C3%B1amiento-de-proyectos-para-la-generaci%C3%B3n-de-energ%C3%ADas-renovables/>.
- [9] UPME, «Plan Energético Colombiano 2022 - 2052,» 1 Junio 2023. [En línea]. Available: https://www1.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Documents/PEN_2020_2050/Actualizacion_PEN_2022-2052_VF.pdf.
- [10] MME, «Escenarios Nacionales TEJ. Rutas que nos preparan para el futuro,» 1 Agosto 2023. [En línea]. Available: https://www.minenergia.gov.co/documents/10442/3._Escenarios_nacionales_TEJ._Rutas_que_nos_preparan_para_el_futuro.pdf.
- [11] C. Parris, «Digital's Role in the Future of Energy,» 24 Febrero 2021. [En línea]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=AiEN-lZsIgY&list=PLFwtVid19r0kXaFk8XVRK0AsePUKM751-&index=4>. [Último acceso: 9 Septiembre 2024].
- [12] IRENA, «Renewable power generation costs in 2022,» 1 Enero 2023. [En línea]. Available: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2023/Aug/IRENA_Renewable_power_generation_costs_in_2022.pdf. [Último acceso: 14 Septiembre 2024].
- [13] IEA, «Grid-scale Storage,» 11 Julio 2023. [En línea]. Available: <https://www.iea.org/energy-system/electricity/grid-scale-storage>. [Último acceso: 15 Septiembre 2024].

- [14] UPME, «UPME adjudica convocatoria para la construcción del primer sistema de almacenamiento de energía eléctrica con baterías al servicio del Sistema Interconectado Nacional,» 2 Julio 2021. [En línea]. Available: https://www1.upme.gov.co/SalaPrensa/ComunicadosPrensa/Comunicado_04_2021.pdf. [Último acceso: 15 Septiembre 2024].
- [15] NREL, «Cost Projections for Utility-Scale Battery Storage: 2023 Update,» 1 Junio 2023. [En línea]. Available: <https://www.nrel.gov/docs/fy23osti/85332.pdf>. [Último acceso: 15 Septiembre 2024].
- [16] E. Watanabe, F. Kleber, R. Da Silva, M. Aredes, P. Barbosa y S. Lima, «Capítulo 26. Flexible AC Transmission Systems,» de *Power Electronics Handbook*, 2024, pp. 909-937.
- [17] V. Sood, «Chapter 25. HVDC Transmission,» de *Power Electronics Handbook*, 2024, pp. 865-907.
- [18] Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, «Concepto 073 de 2020,» 25 Febrero 2020. [En línea]. Available: https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/concepto_superservicios_0000073_2020.htm#:~:text=%2D%20Ser%C3%A1%20obligaci%C3%B3n%20de%20los%20usuarios,instrumentos%20de%20medida%20m%C3%A1s%20precisos.. [Último acceso: 5 Septiembre 2024].
- [19] Congreso de la República, «Ley 2099 de 2021,» 10 Julio 2021. [En línea]. Available: <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=166326>. [Último acceso: 5 Septiembre 2024].
- [20] Portafolio, «Los medidores ‘inteligentes’ llegarían a 6 millones de usuarios,» *Portafolio. Diario Económico*, 7 Febrero 2022.