



Paakat: Revista de Tecnología y Sociedad
e-ISSN: 2007-3607
Universidad de Guadalajara
Sistema de Universidad Virtual
México
paakat@udgvirtual.udg.mx

Año 14, número 26, marzo – agosto 2024

La innovación disruptiva de la generación de electricidad distribuida: un reto para la administración pública en México

The disruptive innovation of distributed electricity generation: a challenge for public administration in Mexico

Juan Óscar Ollivier-Fierro*

<https://orcid.org/0000-0002-1773-4428>

Universidad Autónoma de Chihuahua, México

Jesús Robles-Villa**

<https://orcid.org/0009-0004-0371-1593>

Universidad Autónoma de Chihuahua, México

Mauro Alberto Flores-García***

<https://orcid.org/0009-0002-7425-0734>

Universidad Autónoma de Chihuahua, México

[Recibido: 04/03/2023. Aceptado para su publicación: 08/09/2023]

DOI: <http://dx.doi.org/10.32870/Pk.a14n26.852>

Resumen

La generación distribuida (GD) es la producción de electricidad, mayoritariamente fotovoltaica, en cercanía a los centros de consumo por usuarios individuales en residencias o empresas, cuyo principal objetivo es el autoconsumo; se considera disruptiva al romper con el paradigma de la generación centralizada. El objetivo del presente estudio fue analizar la tendencia, los beneficios y los retos que implica a la administración pública la penetración esta tecnología en México. Es un estudio con enfoque cuantitativo, basado en datos empíricos publicados por organismos internacionales y el gobierno mexicano, cuyos sujetos de estudio fueron el país y sus 32 entidades federativas. Se encontró una importante penetración de la GD en México, con una tasa de crecimiento anual compuesta de 45% en los últimos años, alcanzando una capacidad instalada del orden de 3 GW. Su distribución geográfica en México es heterogénea y se

Paakat: Revista de Tecnología y Sociedad

Año 14, núm. 26, marzo - agosto 2024, e-ISSN: 2007-3607

encuentra en función del nivel económico del Estado. La aportación de la GD a la transición energética es importante en el tema ambiental, representa un ahorro superior a un millón de toneladas de CO₂ por año y en términos económicos un ahorro importante para la administración pública en el rubro de generación de energía eléctrica. La administración pública mexicana se enfrenta a un doble reto: por una parte, estimular la GD para incrementar la generación de energía limpia para cumplir con los compromisos internacionales y, por otra, lograr la flexibilidad que requiere el sistema eléctrico nacional para la integración de energías limpias intermitentes, como la fotovoltaica.

Palabras clave

Recursos de energía distribuida; energía solar fotovoltaica; transición energética.

Abstract

Distributed generation (DG) is the generation of electricity, mostly photovoltaic, close to consumption centers by individual users in residences or companies, whose main objective is self-consumption. It is considered disruptive by breaking with the paradigm of centralized generation. The objective of this study was to analyse the trend, benefits and challenges that the penetration of this technology in Mexico implies for the public administration. A study with a quantitative approach, based on empirical data published by international organizations and the Mexican government, with the study subjects being the country and its 32 States. A significant penetration of DG was found in Mexico where it has had a compound annual growth rate of 45% in recent years, reaching an installed capacity of around 3 GW. Its geographical distribution in Mexico is heterogeneous and depends on the economic level of the State. The contribution that DG makes to the energy transition is important in environmental terms, it represents a saving of more than one million tons of CO₂ per year and in economic terms a significant saving for the public administration in the area of electrical energy generation. The Mexican public administration faces a double challenge: on the one hand, stimulating DG to increase the generation of clean energy to comply with international commitments and on the other, achieving the flexibility required by the National Electric System for the integration of intermittent clean energies. such as photovoltaics.

Keywords

Distributed energy resource; Photovoltaic solar energy; Energy transition.

Introducción

La generación distribuida puede ser definida como la producción de electricidad en cercanía a los centros de consumo por usuarios de residencias o empresas, generalmente conectadas a la red de distribución pública, cuyo principal objetivo es el autoconsumo. Las principales características son: 1) se genera principalmente a partir de energía fotovoltaica; 2) en potencias menores a 0.5 MW por usuario en México; 3) el excedente de energía generado puede ser inyectado a la red pública y compensado por ello (IEA, 2022; Presicce, 2019).

Esta innovación surgió hace aproximadamente dos décadas en los países desarrollados; se considera disruptiva puesto que rompe con el paradigma dominante en el siglo XX consistente en la generación de electricidad centralizada, donde los flujos de energía van en una sola dirección, de la central al usuario, pasando a un nuevo paradigma en el cual conviven la generación centralizada con la

descentralizada, cuyos flujos de energía pueden ir en ambas direcciones, también del usuario a la red. Debido a esta situación donde los usuarios de la GD pueden ser productores y consumidores de energía, se las ha denominado "prosumers" (IEA, 2019; Ramos, 2020; Suárez *et al.*, 2021).

La razón principal por la que emerge la tecnología de la GD se debe al abatimiento de los costos de los sistemas fotovoltaicos, debido al efecto combinado de las economías de escala en su fabricación y el incremento de la demanda, lo cual ha permitido a los usuarios amortizar en períodos cortos la inversión en el sistema de generación, en función de las tarifas del consumo de electricidad establecidas por el operador de la red y del pago por la energía que se inyecta a esta. Adicionalmente, están también como impulsores de esta tecnología, la incertidumbre y las mermas causadas por las interrupciones del servicio en las redes eléctricas públicas, así como la variabilidad en el precio de las tarifas eléctricas (Gómez *et al.*, 2018; Lazard, 2023).

Otro factor que ha promovido el desarrollo de la GD, al igual que en otros campos, es el avance en las tecnologías de la digitalización, lo cual ha permitido, particularmente en los equipos inversores, que hacen además de la conversión de la energía de corriente directa de los paneles solares a la corriente alterna de la red residencial, la gestión y conexión en sincronía y fase a la red pública a través de un medidor bidireccional, capaz de medir el flujo eléctrico en ambos sentidos (Calahorra *et al.*, 2020).

No obstante, como es sabido, el principal problema de la energía fotovoltaica es su intermitencia, es decir la dependencia que tiene de la presencia de la luz solar para la generación de electricidad, lo que determina su factor de planta relativamente bajo, del orden de 25%. El factor de planta de una central eléctrica es el cociente entre la energía real generada por ella durante un período (generalmente anual) y la energía generada si hubiera trabajado a plena carga durante ese mismo tiempo. Una de las formas de resolver el problema de variabilidad de la GD son los sistemas de almacenamiento de energía, como las baterías de respaldo, con el fin de tener el suministro de electricidad propio aun cuando el sol no lo permita; los vehículos eléctricos también pueden actuar como baterías de respaldo, al asumir esta función adicional en el transporte (IRENA, 2022).

Marco teórico

Referente al tema sobre las innovaciones tecnológicas, la principal fundamentación teórica se encuentra en el campo de la economía encabezada por Joseph Schumpeter, quien desde principios del siglo pasado acuñó el concepto de la innovación tecnológica, que continúa vigente en la época actual como el motor del desarrollo

económico a través del proceso de la destrucción creativa, siendo el emprendedor su principal actor motivado por la renta económica y el prestigio. Schumpeter propone como una explicación del cambio tecnológico la competencia entre empresas y los ciclos temporales, principalmente el largo denominado de Kondratieff, del orden de 40 a 50 años (Quevedo, 2019).

A partir de las obras de Schumpeter, durante el siglo pasado se hacen aportaciones teóricas a algunos aspectos que no estaban suficientemente aclarados en las obras originales, y se consolida una nueva teoría denominada "neoschumpeterismo" (Yoguel *et al.*, 2013). Esta nueva teoría señala, en síntesis, que la innovación como agente de cambio en las empresas incrementa su competitividad y genera márgenes de ganancia, que pueden ser temporales mientras es imitada o superada dicha innovación por la competencia.

A fines de la década de los noventa, el teórico y consultor de negocios Clayton M. Christensen (2006) desarrolló una influyente teoría en torno al término innovación disruptiva. Con el auge de la digitalización, en la actualidad este concepto es más importante que nunca para las empresas que pretenden ser más competitivas apoyándose en la tecnología. La innovación disruptiva es la aplicación de nuevas ideas que conducen a la modificación de productos, servicios y procesos, generando cambios drásticos en el mercado, las empresas y el comportamiento de los consumidores. La GD es considerada como una innovación disruptiva debido al nuevo paradigma de la energía descentralizada producida en el sitio de consumo, basada en fuentes primarias de energía renovable, la cual es sustentada en la teoría de posibilidades (Schweickardt, 2019).

Lian (2017) propone un marco teórico para la GD que proporciona una visión sistemática de la estructura general de los futuros sistemas de distribución junto con el flujo de información subyacente, la organización funcional y los procedimientos operativos. Se caracteriza por ser abierto, flexible e interoperable para la gestión de sistemas de distribución activos. En este marco, el consumo de energía de varios recursos de energía distribuida (DER, del inglés Distributed Energy Resource), como los paneles fotovoltaicos, se coordina y controla utilizando enfoques basados en el mercado de manera jerárquica.

El efecto fotoeléctrico fue descubierto y descrito por Heinrich Hertz, en 1887, al observar que el arco que salta entre dos electrodos conectados a alta tensión alcanza distancias mayores cuando se ilumina con luz ultravioleta que cuando se deja en la oscuridad. La explicación teórica fue hecha por Albert Einstein, quien publicó en 1905 el revolucionario artículo *Heurística de la generación y conversión de la luz*, basando su formulación de la fotoelectricidad en una extensión del trabajo sobre los cuantos de Max Planck. Más tarde, Robert Andrews Millikan pasó diez años experimentando en el intento de demostrar que la teoría de Einstein no era correcta,

para finalmente concluir que sí lo era. Eso permitió que Einstein y Millikan recibieran el Premio Nobel en 1921 y 1923, respectivamente (Cassini y Levinas, 2008).

En la definición más amplia de la GD, cuando se incluyen otros recursos además de los sistemas de generación (prácticamente en su totalidad fotovoltaicos), como los de almacenamiento y las bombas de calor, se denominan recursos de energía distribuida DER, que es la denominación adoptada por las instituciones internacionales como la Agencia Internacional de Energía (IEA, del inglés International Energy Agency,) y la Agencia Internacional de Energías Renovables, (IRENA, del inglés International Renewable Energy Agency) (IEA, 2021).

Debido al crecimiento de la GD y a los avances en la digitalización se han creado conjuntos de usuarios conectados en pequeñas redes, denominadas microrredes, que logran un efecto sinérgico gracias a su interconexión y estar provistos de sistemas de almacenamiento, lo cual permite independizarse de la red pública en caso de un corte o falla, para asegurar el suministro eléctrico ininterrumpido a instalaciones clave como hospitales, estaciones de bomberos o de policía (Khefifi, 2021; Nikam y Kalkhambkar, 2021; Valinejad *et al.*, 2020).

Igualmente, con el fin de evitar la dependencia de la red pública, existe una versión de una pequeña red limitada a nivel de los vecinos, que pueden consumir la energía generada por cualquier usuario con GD de la red, a través de un sistema de control adicional (Wang *et al.*, 2019). En un estadio más avanzado de estas microrredes y en función de su capacidad de generación instalada, pueden asumir el rol de una central de generación eléctrica virtual (VPP, del inglés Virtual Power Plant), lo cual pone de relieve la obsolescencia del paradigma de las centrales eléctricas tradicionales, como única fuente de energía (Guerrero *et al.*, 2020; IRENA, 2022; Mahmud *et al.*, 2020; Yang *et al.*, 2021).

Desde el punto de vista de los costos, la generación fotovoltaica en panel fijo (sin mecanismo de seguimiento al sol), se produce desde 2015 a un precio menor que las tarifas de electricidad en la mayoría de países. El costo nivelado de energía (LCOE, del inglés Levelized Cost Of Energy), expresado en dólares (\$), por megawatthora (MWh), es actualmente de 45 \$/MWh, cuando el de las centrales a base de combustibles fósiles es superior a los 70 \$/MWh. El cálculo de LCOE considera el costo de generación en dólares por MWh, incluyendo la inversión, operación y mantenimiento durante la vida útil del equipo generador (IEA, 2022).

Adicionalmente, una razón por la que el costo de la energía producida en las grandes centrales es relativamente alto se debe a la infraestructura de transmisión y distribución desde la central a los puntos de consumo, que conlleva además las pérdidas eléctricas, lo cual representa otra ventaja importante de la GD al no requerir

de esta infraestructura ni las pérdidas que en ella se generan, al encontrarse en o cerca del punto de consumo (Montoya *et al.*, 2021).

Adicional a estas ventajas económicas de la GD que explican su fuerte crecimiento, un gran beneficio es el carácter ambiental al tratarse de una energía renovable limpia que sustituye a la proporcionada por la red pública que en su mayoría tiene como fuente centrales basadas en combustibles fósiles, emisores de gases de efecto invernadero, por lo que la GD contribuye de manera importante a la transición energética orientada a la descarbonización del planeta (Cisterna-Arellano *et al.*, 2020; IEA, 2019).

Desde esta perspectiva global, la GD contribuye al cumplimiento del Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) número 7 de la Agenda 2030 de la Organización de las Naciones Unidas (ONU), específicamente a la meta 7.2, que señala para 2030 el propósito de aumentar considerablemente la proporción de energía renovable en el conjunto de fuentes energéticas (ONU, 2023).

En línea con el ODS 7, a fin de cuantificar científicamente el límite máximo de 1.5°C de incremento en el calentamiento global, en términos de la cantidad de carbón en la atmósfera, se estableció a nivel internacional lograr este límite antes de 2030 y el cero neto en emisiones de carbón en 2050; esto implica la descarbonización del planeta, que se lograría con un mínimo de 90% de energías renovables en la generación de energía eléctrica a nivel global para ese año (Frankhauser *et al.*, 2022).

Con el objetivo de mostrar el contexto mundial de las energías en general, de combustibles fósiles, energías renovables y dentro de ellas la solar, a continuación, se presentan las tablas de la generación de energía eléctrica en el mundo, de 2015 a 2022.

En la tabla 1 se observa la capacidad adicional creciente en energías renovables, con una tasa de crecimiento anual compuesta (en inglés CAGR) de 9.83%, así como decreciente en la capacidad adicional en energías no renovables, basadas en combustibles fósiles, con una CAGR de -6.95%, lo cual pone de relieve el avance de la transición energética hacia la descarbonización a nivel mundial. Igualmente, se muestra la evolución de la capacidad de las tres principales energías renovables, y se observa el alto valor de la CAGR de la energía solar, mayoritariamente fotovoltaica, de 21.81%, lo cual determinó el crecimiento de las energías renovables en este período.

La tabla 2 muestra la capacidad de la energía solar fotovoltaica a escala de las grandes centrales, así como la descentralizada generación distribuida de acuerdo con sus diferentes usuarios. Cabe aclarar que, si bien la mayor parte de esta tecnología GD se presenta en conexión con la red pública de electricidad, principalmente en las zonas urbanas, también existe en menor proporción un creciente número de casos de

generación para autoconsumo fuera de la red, en especial en el medio rural, lo cual forma parte del ODS 7, que establece el acceso universal a la electricidad para el año 2030 (World Bank, 2022).

Tabla 1. Evolución de la capacidad eléctrica adicional a nivel mundial de energías no renovables y renovables: eólica, hidráulica y solar, 2015-2022 (en GW)

Tipo de energía	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	CAGR (%)
No renovables	100	115	93	141	62	68	51	60.4	-6.95
Renovable	153	162	171	173	184	267	260	295	9.83
1) Eólica	67	51	47	50	57	111	92	75	1.62
2) Hidráulica	32	30	22	22	18	21	19	20	-6.16
3) Solar	48	72	95	94	102	126	138	191	21.81

Fuente: elaboración propia con base en datos de IEA.

Tabla 2. Evolución de la capacidad eléctrica adicional fotovoltaica a nivel mundial a escala de central y generación distribuida (GD), en empresas, residencias y fuera de red, 2015-2022 (en GW)

Energía fotovoltaica	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	CAGR (%)
A escala de central	33	56.4	60.6	54.8	65.8	75.9	92.7	111	18.9
Generación distribuida	16.2	19.1	35.6	42.1	42.9	58.1	52.7	50.7	17.7
Empresas	9.6	12.5	28.6	33.1	25.7	30.1	24.9	30.5	18.0
Residencias	6.1	5.9	6.3	8.3	16.6	27.5	27.2	19.5	18.1
Fuera de red	0.5	0.7	0.7	0.7	0.6	0.5	0.6	0.7	4.90

Fuente: elaboración propia con base en datos de IEA.

La tasa de crecimiento anual compuesta muestra un aumento importante de la capacidad en energía fotovoltaica tanto a nivel de centrales de 18.9%, como de generación distribuida de 17.7%. En congruencia con el crecimiento de la GD, se aprecia el incremento de sus dos principales componentes, en empresas que pueden ser comercios o industrias con una CAGR de 18% y en residencias con un crecimiento de 18.1%. Por otra parte, se observa que la potencia instalada en GD fuera de la red, también denominada "en isla", es relativamente menor comparada con la conectada a la red pública en empresas y residencias, pero también con crecimiento.

Problema de investigación

Con el fin de aprovechar los beneficios de las energías limpias y avanzar hacia la transición energética, los gobiernos han emitido políticas públicas que regulan la GD asociada a sistemas de medición bidireccionales, tanto para la energía consumida de la red como para el excedente inyectado a esta, que puede ser reembolsado, lo cual modifica el paradigma tradicional de la red eléctrica unidireccional a nivel de distribución (Bakke, 2016; Muñoz-Vizhñay *et al.*, 2018; Ramos, 2020). Sin embargo, como antes se comentó, la intermitencia de la generación fotovoltaica crea serios problemas al sistema de la red pública de distribución de electricidad.

Al considerar el desarrollo de la GD, el problema de esta investigación es la ausencia de literatura sobre su crecimiento, su aportación a la transición energética, los retos que implica su coexistencia con las redes públicas y, en consecuencia, la regulación necesaria por parte de la administración pública, en el caso específico de México. Este problema se puede resumir en el cuestionamiento, ¿cuál es la tendencia, beneficios y los retos que implica el crecimiento de la GD para la administración pública en nuestro país?

Objetivos

El objetivo general fue analizar la tendencia, los beneficios y los retos a la administración pública, que implica el desarrollo de la tecnología de la GD en México. Este objetivo se desagrega en tres objetivos específicos:

- 1) Identificar el crecimiento, tendencia y distribución geográfica a nivel de entidad federativa de la GD en México.
- 2) Estimar la contribución potencial de la GD en la transición energética en México.

- 3) Identificar las principales medidas que el gobierno mexicano tendría que tomar para hacer frente al desarrollo de la GD, de cara a la transición energética planeada.

Este trabajo se justifica por la ausencia de estudios relativos al tema, que muestren la importancia del desarrollo de la GD en México, su contribución a la descarbonización del planeta y las principales medidas que tendría que tomar el gobierno mexicano en materia de administración pública para hacer frente a la penetración de esta tecnología.

Método

Se trata de un estudio con un enfoque cuantitativo, de tipo no experimental, transversal, de conocimiento aplicado, basado en datos empíricos recabados en documentos publicados por organismos internacionales, del gobierno mexicano y organizaciones empresariales del país.

Esta investigación se realizó en 2023 y considera la evolución de la GD de 2015 a 2022; los sujetos de estudio fueron el país en su conjunto y las 32 entidades federativas mexicanas que lo componen. Se recabó información de las siguientes fuentes nacionales: 1) la Comisión Reguladora de Energía (CRE), para la capacidad instalada y los contratos de interconexión; 2) el Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional (PRODESEN), para la generación de energía eléctrica; 3) la empresa Conermex para la intensidad de radiación solar; 4) el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), para el producto interno bruto (PIB) por entidad federativa. Para los datos de la energía eléctrica de origen fósil y renovable a nivel mundial, se consultaron: la Agencia Internacional de Energía (IEA) y la Agencia Internacional de Energía Renovable (IRENA).

Las principales variables consideradas en los resultados fueron:

- La capacidad eléctrica en GD instalada en México.
- El número de contratos de conexión a la red de distribución de la CFE.
- La capacidad de GD en cada una de las 32 entidades federativas.
- La intensidad de la radiación solar en la capital de las 32 entidades federativas.
- El PIB en cada una de las 32 entidades federativas.
- Los años de 2015 a 2022.

La estrategia de análisis consistió en analizar, en primer lugar, la evolución de la capacidad instalada en GD en México, así como su tendencia y proyección a 2030, su distribución geográfica por entidad federativa y factores que la determinan como

la intensidad de la radiación solar y el PIB. En segundo lugar, estimar la contribución de la GD a la transición energética en este país; en tercer lugar, las medidas que serán necesario tomar por el gobierno mexicano a la luz del análisis anterior, tomando como referencia las estrategias implementadas en países líderes en esta tecnología.

En cuanto al procedimiento, una vez analizados los documentos listados en las referencias bibliográficas, se recabó la información de las bases de datos de las principales organizaciones con los que se elaboraron bases de datos en el programa estadístico SPSS, para su presentación en las tablas y pruebas estadísticas, con el fin de llevar a cabo el análisis de los resultados, la redacción del informe y sus conclusiones.

Desarrollo

En el caso de México, no obstante que los primeros contratos de interconexión de la GD en México empiezan en 2007, un importante despegue de esta tecnología se dio en 2017 con la resolución RES/142/2017 y la publicación del *Manual de Interconexión de Centrales de Generación con Capacidad Menor de 0.5 MW*, por la Comisión Reguladora de Energía (Gutiérrez-Villegas *et al.*, 2018).

De la misma manera que a nivel global, la GD ha tenido un fuerte crecimiento en México, que además de ser permitida y regulada por el gobierno, el país se caracteriza por tener una alta radiación solar en la mayor parte de su territorio. La tabla 3 muestra la capacidad instalada de GD adicional por empresas y residencias, así como el número de contratos de interconexión con la red de distribución de la CFE (Medinilla, 2022).

Tabla 3. Número de contratos de interconexión y potencia instalada adicional en MW de GD en México, de 2015 a 2022

Variable	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Contratos	7,970	12,577	29,676	35,661	51,046	65,159	59,408	64,478
Potencia adicional	55.66	130.07	211.65	233.56	390.58	467.71	480.15	598.54

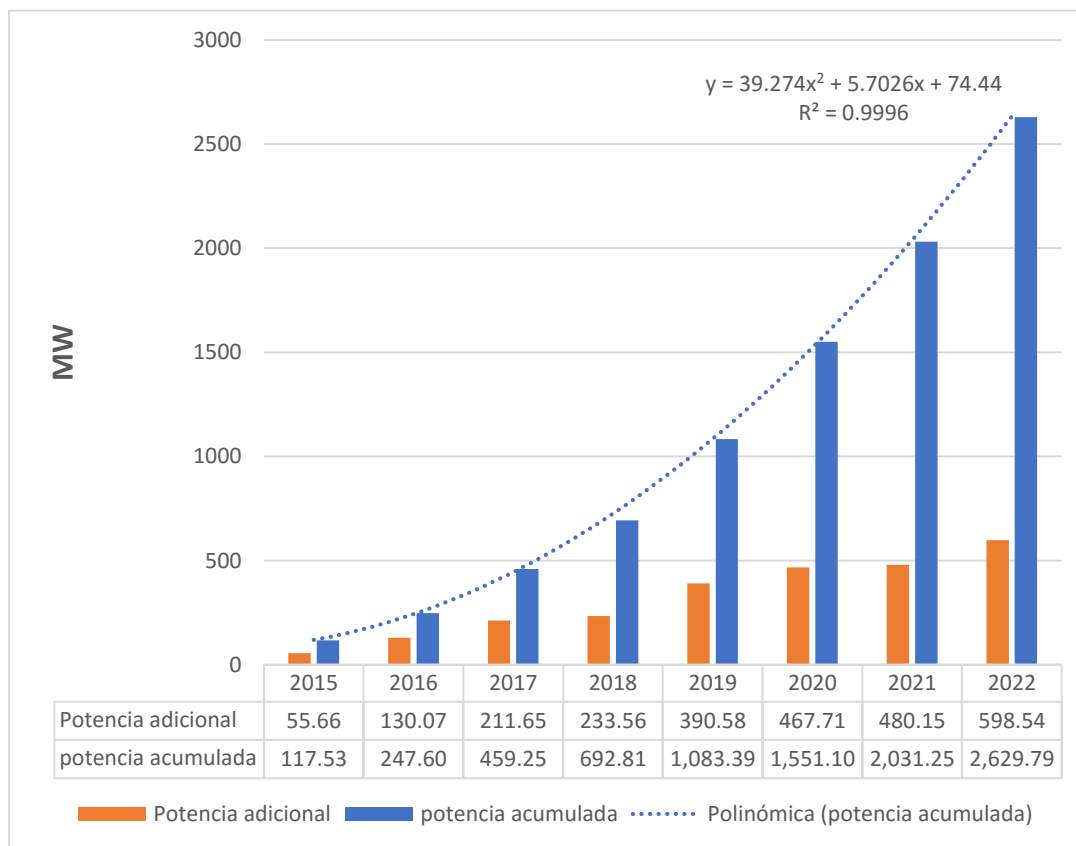
Fuente: elaboración propia con base en estadísticas de la Comisión Reguladora de Energía (2023).

De esta forma, el número de contratos de interconexión de los usuarios de GD con la CFE a 2022, en potencias menores a 0.5MW, es de 334,984 y la potencia acumulada es de 2,629.78 MW. De esta potencia acumulada, 247.59 MW (9.4%)

corresponden a contratos de interconexión para la pequeña y mediana escala (CIPyME), realizados entre 2007 y 2016. El resto 2,382.91 MW fueron contratos de generación distribuida a partir de 2017, elaborados conforme a la resolución RES/142/2017 (CRE, 2022).

La inversión estimada en esta potencia acumulada es del orden de 3,522.39 millones de dólares, que corresponde a un aproximado de 1.34 MDD/MW, donde cabe destacar que se trata de una inversión realizada por los usuarios particulares, lo cual representa una ventaja adicional al gobierno por no tener que hacer esta inversión en el rubro de la generación de energía (CRE, 2022). La gráfica 1 muestra la evolución de la capacidad instalada de GD en México.

Gráfica 1. Capacidad instalada adicional por año y acumulada de GD en México en MW, de 2015 a 2022.



Fuente: elaboración propia con base en estadísticas de la Comisión Reguladora de Energía (2022).

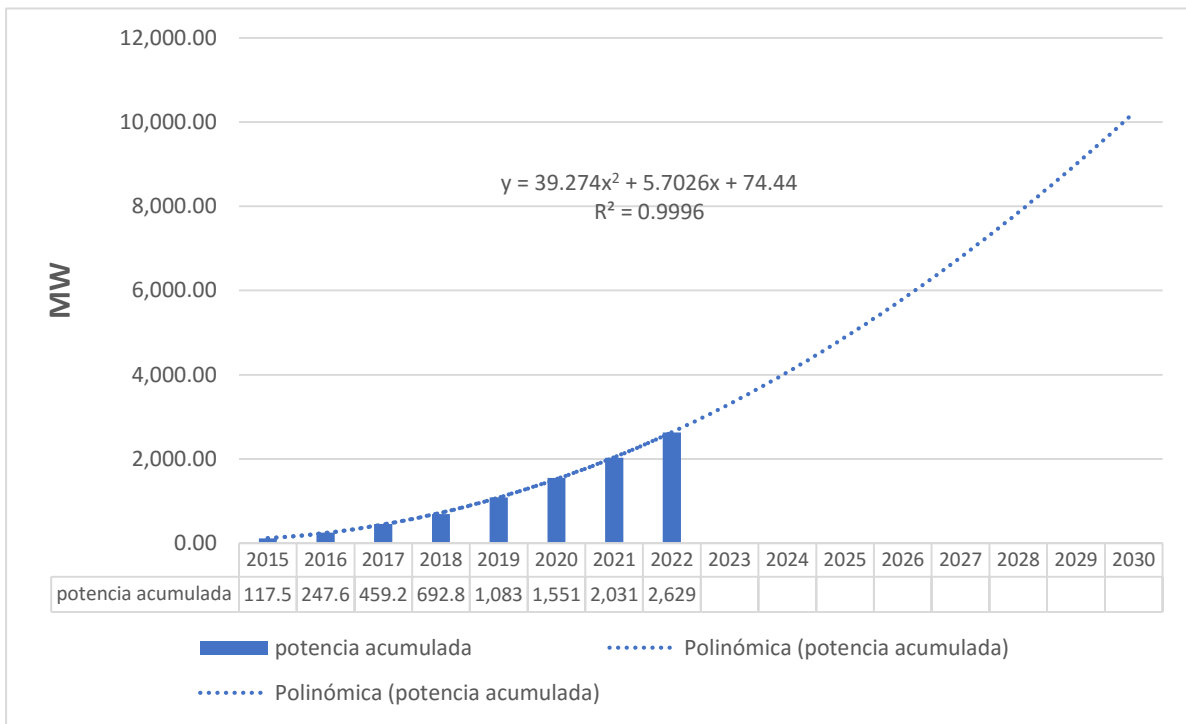
Como se muestra en la gráfica 1, tanto el número de contratos de interconexión como la capacidad instalada adicional de GD por año de 2015 a 2022 es creciente, de

tal manera que la capacidad acumulada tiene un crecimiento cuadrático de acuerdo con la ecuación 1:

$$Y = 7.44 + 5.7026 X + 39.274 X^2 \dots\dots\dots (1)$$

Donde Y es la capacidad instalada acumulada en MW y X es el año en cuestión, con un coeficiente de determinación R² de 0.9996. Esta ecuación permite proyectar el crecimiento de la capacidad instalada de GD para 2030, y se representa en la gráfica 2.

Gráfica 2. Proyección el crecimiento de la potencia instalada de GD para 2030 en México.



Fuente: elaboración propia con base en estadísticas de la Comisión Reguladora de Energía (2022).

En la proyección de la gráfica 2 se puede observar el fuerte crecimiento de la potencia instalada esperada de la GD en México, que para 2030 sería superior a 10,000 MW, lo cual representa una contribución importante al cumplimiento de las metas fijadas por el gobierno mexicano en la LTE (Quadri *et al.*, 2018).

Transición energética en México

En cumplimiento de los acuerdos de París de 2015, se expidió en México la Ley de Transición Energética (LTE), publicada el 24 de diciembre 2015, basada en la Ley General de Cambio Climático (LGCC), que considera metas mínimas de generación de

energías limpias en relación con el total de generación de electricidad: 35% a 2024; 37.7% a 2030; 50% a 2050. De manera más detallada, el artículo tercero transitorio menciona que la Secretaría de Energía fija como meta una participación mínima de energías limpias en la generación de energía eléctrica del 25% para 2018 y del 30% para 2021 (DOF, 2015).

Vale la pena hacer la aclaración que esta ley se refiere específicamente a la generación de energía eléctrica, en el caso de la energía primaria, que comprende las otras fuentes de energía no eléctrica como los combustibles para vehículos, para la cocción de alimentos, calefacción de agua y espacios, principalmente, el porcentaje de energías renovables es considerablemente menor, del orden de 10.3% del total.

La tabla 4 muestra la evolución (2018-2021) de las principales fuentes de generación de energía eléctrica destacando el papel creciente de la GD, así como del resto de las energías limpias. La generación se expresa en GWh y la tasa de crecimiento anual compuesta, en porcentaje. Cabe mencionar que en otras energías limpias se consideran tanto las renovables: hidráulica, eólica, geotérmica, solar de central, solar aislada (fuera de red) y bioenergía, como las no renovables: nucleoelectrónica, frenos regenerativos y cogeneración eficiente (CENACE, 2023).

Lo relevante de la tabla 4 es que la meta de la LTE para 2018 no se cumplió (22.47% vs. 25%); sin embargo, la meta para 2021 prácticamente sí se ha cumplido (29.47% vs. 30%) en buena medida gracias a que la GD creció del orden de tres veces en este período. Además, ante el reto de cumplir la meta de 35% en 2024, se considera que la GD sigue siendo un componente cada vez más importante dentro de las energías limpias.

Otro aspecto importante en la tabla 4 es el valor de la tasa de crecimiento anual compuesta de la GD en estos cuatro años, del orden de 45%, así como de las otras energías limpias con 10.46%, en comparación con las energías fósiles con un crecimiento negativo de -1.62%, lo cual muestra claramente las tendencias en la conformación de la mezcla, de la matriz energética en los próximos años.

Desde el punto de vista ambiental, el ahorro en emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera debido a la generación distribuida en 2021 fue del orden de 1,424,380 ton de CO₂, asumiendo de que en México cada kWh producido por combustibles fósiles genera 0.458 Kg de CO₂. Al considerar que aproximadamente 70% de la electricidad producida actualmente es de origen de combustibles fósiles, se constata un amplio margen para el ahorro de gases de efecto invernadero con las energías renovables (Hernández, 2021).

Tabla 4. Generación total de energía eléctrica en México 2018-2021 (GWh).

Fuente de energía	2018	2019	2020	2021	CAGR (%)
Generación distribuida	1,018	1,564	2,303	3,110	45.10
Otras limpias	69,545	69,919	81,996	93,740	10.46
Suman limpias	70,563	71,484	84,300	96,850	
%limpias/total	22.47%	22.23%	26.57%	29.47%	
Fósiles	243,414	250,101	232,968	231,747	-1.62
Total	313,977	321,584	317,268	328,598	1.53

Fuente: elaboración propia con datos del PRODESEN 2022-2036.

A nivel de entidad federativa

Al igual que en otros temas, la distribución geográfica en la capacidad de GD en México es sumamente heterogénea en los diferentes estados, como se muestra en la tabla 5. Esta capacidad total de 2,954.65 MW corresponde al primer semestre de 2023, considerada en 367,207 contratos de interconexión (CRE, 2023).

Esta heterogeneidad se pone de relieve al contrastar el primer decil que corresponde a los tres primeros estados, que tienen una capacidad instalada equivalente al 32.72% del total, mientras que el último decil correspondiente a los tres últimos, equivalente al 1.35% de la capacidad total. Con el fin de analizar y explicar esta heterogeneidad, se encontró un coeficiente de correlación de Pearson de 0.62 ($P < 0.05$), entre el PIB y la capacidad en GD en MW, ambos rangos estatales.

De acuerdo con el análisis de los factores que influyen en esta capacidad de la GD en los diferentes estados, la tabla 6 muestra el valor de la radiación solar promedio anual medida en la capital del estado, así como el PIB en 2022 en cada uno de ellos (CONERMEX, 2023; INEGI 2023).

Tabla 5. Capacidad instalada acumulada de GD en los estados mexicanos al primer semestre del año 2023 (MW).

Estado	Potencia instalada en GD	Estado	Potencia instalada en GD
Jalisco	455.82	Nayarit	55.98
Nuevo León	313.19	Tamaulipas	52.34
Chihuahua	199.31	Durango	51.39
Guanajuato	183.1	Colima	50.4
Estado de México	163.56	Puebla	49.04
Ciudad de México	138.48	Quintana Roo	47.08
Michoacán	130.21	Morelos	45.74
Sonora	124.15	Zacatecas	28.75
Yucatán	121.83	Guerrero	26.13
Coahuila	121.11	Baja California Sur	23.65
Aguascalientes	92.01	Chiapas	22.74
Sinaloa	91.62	Hidalgo	20.98
Baja California	91.05	Oaxaca	20.89
Veracruz	74.0	Tabasco	17.31
Querétaro	60.63	Campeche	16.65
San Luis Potosí	59.6	Tlaxcala	5.85

Fuente: elaboración propia con datos de la CRE en estadísticas al primer semestre 2023.

Tabla 6. Valores de la radiación solar promedio (KWh/m²) y del PIB en 2022 para cada uno de los 32 estados mexicanos.

Estado	Radiación solar	PIB 2022	Estado	Radiación solar	PIB 2022
Jalisco	5.81	2,104,629	Nayarit	5.88	207,827
Nuevo León	4.94	2,407,368	Tamaulipas	5.28	353,279
Chihuahua	5.59	1,049,809	Durango	5.73	893,794
Guanajuato	5.79	2,646,687	Colima	5.61	172,836
E. de México	5.46	1,226,241	Puebla	5.4	851,589
CDMX	5.46	4,397,228	Quintana R.	4.98	314,112
Michoacán	5.58	707,134	Morelos	5.94	433,743
Sonora	5.73	442,021	Zacatecas	5.76	263,375
Yucatán	5.3	1,056,659	Guerrero	5.68	394,649
Coahuila	5.16	1,066,144	Baja Cal. S.	5.59	275,914
Aguascalientes	5.91	1,110,558	Chiapas	5.15	473,024
Sinaloa	5.98	376,325	Hidalgo	5.16	466,101
Baja California	5.27	665,121	Oaxaca	5.26	744,116
Veracruz	4.6	1,260,338	Tabasco	4.94	451,798
Querétaro	5.86	664,328	Campeche	5.59	537,920
San Luis P.	5.49	668,269	Tlaxcala	5.4	160,600

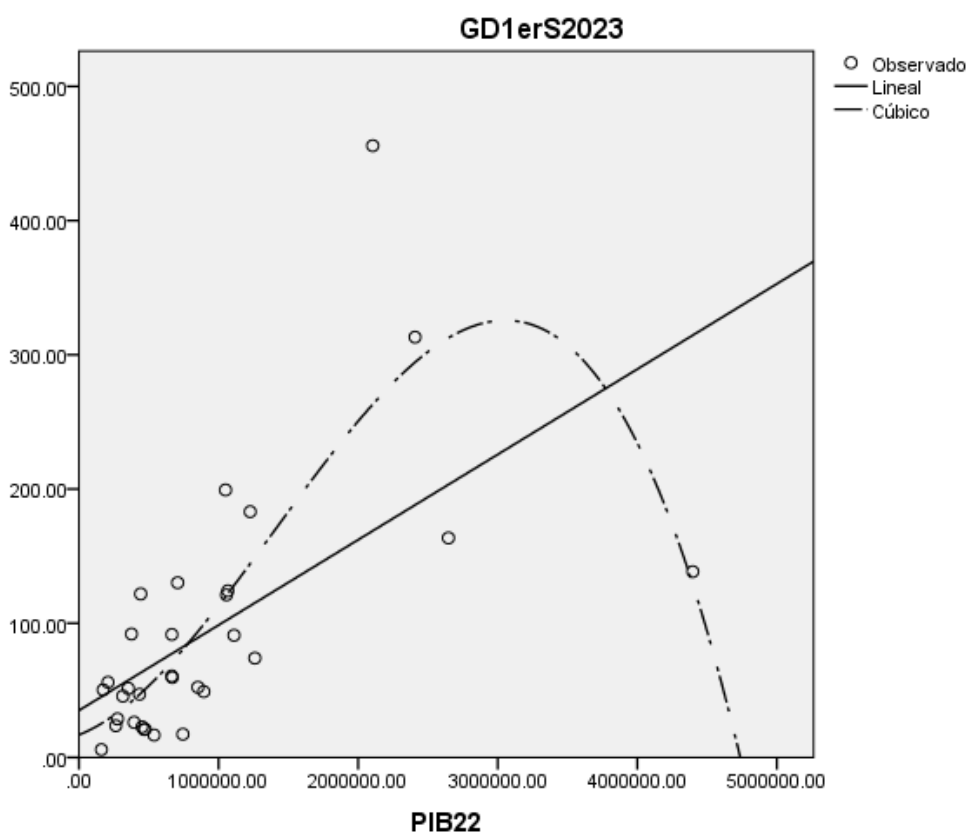
Fuente: elaboración propia con base en datos de CONERMEX (2023) e INEGI (2023).

Con el objetivo de analizar la relación entre estas variables, se realizó un modelo de regresión lineal considerando como variable dependiente la capacidad instalada en la GD y como variables predictoras la radiación solar promedio en la capital del estado y el PIB 2022 en el estado. En este modelo de regresión lineal se

empleó el método hacia atrás en el programa SPSS, con el cual se eliminó la variable radiación por no ser significativa ($P > 0.05$), quedando como significativa solo la variable PIB 2022 en la relación lineal con un coeficiente de determinación R^2 de 0.358. Al considerar bajo este valor de R^2 , se exploraron otras estimaciones curvilíneas encontrándose la de tipo cúbico con el mayor R^2 de 0.632, expresado en la ecuación (2) y en la gráfica 3.

$$GD = 16.864 + 4.12 E^{-5} PIB + 7.235 E^{-11} PIB^2 - 1.727 E^{-17} PIB^3 \dots\dots\dots (2)$$

Gráfica 3. Diagrama de dispersión de la relación lineal y cúbica entre las variables GD, 1er semestre de 2023 y el PIB 2022.



Fuente: elaboración propia.

En el modelo de regresión de la ecuación (2) se observa que la presencia de la GD no está correlacionada con la radiación solar, sino con el nivel económico de las diferentes regiones del país, lo cual pone de relieve el potencial de la GD en regiones

con alta radiación solar, pero con bajo nivel económico en las que mediante algún estímulo podría aprovecharse este potencial en la generación de energía con la tecnología de la GD.

Los estados con la mayor potencia instalada de GD son también regiones económicamente prósperas, como Jalisco, Nuevo León, Chihuahua, Guanajuato y el Estado de México, los que concentran 44.5% de la capacidad instalada y 32.7% del PIB nacional (Medinilla, 2022). Así mismo, el valor positivo de la primera y segunda potencia de la ecuación (2) muestra un fuerte crecimiento de la GD con el aumento de la economía en el estado.

Retos para la administración pública

Dentro de la administración pública del gobierno mexicano, la empresa encargada de los sistemas de generación, transmisión, distribución e interconexión de la red de electricidad a nivel nacional es la Comisión Federal de Electricidad (CFE). Para hacer frente al crecimiento de la GD, la CFE tiene un doble reto: 1) debe fomentar la generación de electricidad limpia para cumplir con las metas ambientales establecidas en la LTE derivadas de compromisos internacionales; 2) integrar esta fuente de energía al resto del Sistema Eléctrico Nacional (SEN), para asegurar su crecimiento, estabilidad y confiabilidad (Gautam *et al.*, 2020).

Las medidas más comunes para fomentar la GD como energía limpia, diseñadas y experimentadas con éxito en países vanguardistas en esta tecnología, se basan esencialmente en los intereses económicos de los usuarios que invierten en la GD, buscando la rentabilidad de su inversión:

- La norma FIT (del inglés Feed-in Tariff), que consiste en pagar un sobreprecio a la tarifa de mercado por KWh inyectados a la red.
- La norma de la medición neta de energía (del inglés Net Energy Metering, NEM), que consiste en acumular en una bolsa los KWh inyectados a la red, para su pago o uso posterior.
- La norma del pago neto (del inglés Net Billing), que consiste en el pago de la energía inyectada a la red de acuerdo con el precio horario del KWh inyectado a la red.

De estas tres normas, la más empleada en México es la de tipo NEM, que corresponde en acumular en una bolsa los KWh inyectados a la red para su pago o eventual consumo. No obstante, el principal problema de integrar la generación distribuida al sistema eléctrico de la red pública radica en su intermitencia, siendo prácticamente en su totalidad fotovoltaica, depende de la presencia del sol, lo cual significa que el SEN tiene que tener la capacidad de suplir la ausencia de la generación

de la GD en la medida de la declinación del sol, principalmente en la demanda pico de la tarde cuando termina su radiación (Latreche y Kerrou, 2021).

Esta necesidad de respaldo a las fuentes intermitentes en la ausencia de sistemas de almacenamiento, se debe al imperativo de no interrumpir el suministro de energía eléctrica por parte del SEN, el cual requiere que las centrales con base de combustibles fósiles, que son la mayor parte del sistema mexicano, estén preparadas para intervenir inmediatamente en la medida en que la intermitencia aparezca. Esto hace que el costo de la generación fotovoltaica en general sea mayor al de su LCOE, que no considera este respaldo.

Por esta razón la IEA (2022) ha desarrollado un nuevo indicador de costo que incluye la integración al sistema, considerando el almacenamiento de energía necesario denominado Costo nivelado de sistema completo de energía (en inglés LFSCOE), que para las centrales solares es del orden de 1,548 USD/MWh.

Este requerimiento de flexibilidad del SEN para hacer frente a la intermitencia de la GD, dado que representa solo del orden del 1% (0.946%) de la generación total al término del 1er semestre 2023, aún no se puede considerar un problema mayor al sistema para suplir su intermitencia. Sin embargo, como se observó en la tabla 4, la GD se caracteriza por tener un fuerte crecimiento, por lo que sumada a las centrales fotovoltaicas y eólicas, representarán un reto cada vez mayor para la administración pública a fin de respaldar estas fuentes variables para asegurar la estabilidad y confiabilidad del sistema eléctrico nacional (Hu *et al.*, 2021; Touzani *et al.*, 2021).

Los recursos para el almacenamiento de energía empleados para suplir la de las grandes centrales intermitentes son diversos; el más común para las grandes potencias es el bombeo hidráulico; sin embargo, debido al avance en tecnologías de baterías y la reducción de su costo por las economías de escala en su producción, recientemente también se están empleando los bancos de baterías para estas centrales. En el caso de la GD, el sistema de almacenamiento más común es a base de baterías, el cual en México no se ha desarrollado por su alto costo. De acuerdo con estudios del Departamento de Energía de Estados Unidos, el costo de las baterías de ion-litio ha disminuido en 89% de 2008 a 2022, pasando a un costo en este año de 153 USD/KWh, por lo que cada vez son más empleadas (Ameli *et al.*, 2023).

Este recurso de almacenamiento de energía a base de baterías, que es comúnmente empleado por los usuarios de GD en los países desarrollados, en buena medida es fruto de una política pública orientada al subsidio o estímulo fiscal en la adquisición de estas baterías como complemento a la generación fotovoltaica para suplir, al menos parcialmente, la ausencia de la luz solar. De esta manera se soluciona, al mismo tiempo, el estímulo al crecimiento de esta fuente de energía limpia y se disminuye del problema de la intermitencia por la ausencia del sol (IRENA, 2017).

Este punto da pie a comentar que, independientemente de las soluciones locales que se implementen, existe una fuente de información importante en las soluciones que han adoptado con éxito los países líderes en la tecnología de la GD, como Estados Unidos y los países europeos, que han desarrollado diferentes modelos de negocios orientados a fomentar y regular esta fuente de energía (Burger y Luke, 2017; Hou *et al.*, 2020).

Conclusiones

Conforme al planteamiento de los objetivos, se muestra a continuación su cumplimiento:

Objetivo específico 1: Identificar el crecimiento, tendencia y distribución geográfica a nivel de entidad federativa de la GD en México. Se encontró una importante penetración de la tecnología de la GD en la última década en el mundo y en particular en México, donde ha tenido una tasa de crecimiento anual compuesta de 45% en los últimos ocho años, alcanzando una capacidad instalada de 2,954 MW al primer semestre de 2023. Esto permite proyectar una tendencia de crecimiento del orden de 10 GW en 2030, que representaría el orden de un 10% de la capacidad instalada en el país.

La distribución geográfica de la GD en México es bastante heterogénea: se encuentra más en función del nivel económico de la entidad federativa, medido por el PIB estatal, que la incidencia de la radiación solar, como se muestra en la tabla 6 y el modelo de regresión de la gráfica 3, donde la curva con el mejor ajuste fue de tipo polinomial cúbica, con un coeficiente de determinación R^2 , de 0.632 ($P < 0.05$). Los cinco principales estados en capacidad instalada, en orden descendente son Jalisco, Nuevo León, Chihuahua, Guanajuato, el Estado de México y la Ciudad de México, los cuales son relativamente prósperos en términos económicos.

Objetivo específico 2: Estimar la contribución potencial de la GD en la transición energética en México. Se encontró que la aportación de la GD a la transición energética establecida en la LTE es importante, coadyuvando al cumplimiento de la meta para el año 2021 del 30% de energía limpias en la generación de electricidad (ver tabla 4). Desde el punto de vista ambiental, la sustitución de la energía de origen fósil por la limpia de la GD representa un ahorro superior a un millón de toneladas de CO₂ por año. Además, en términos económicos al término del año 2022 representó un ahorro para la administración pública del orden de 3,500 millones de USD en el rubro de infraestructura para la generación de energía eléctrica, debido a que esta inversión la realizan los usuarios de la GD, que son mayoritariamente particulares.

Objetivo específico 3: Identificar las principales medidas que el gobierno mexicano tendría que tomar para hacer frente al desarrollo de la GD, de cara a la transición

energética planeada. Con el fin de continuar con el cumplimiento de las metas establecidas en la LTE (tener 35% de energía limpias para 2024; 37.7% a 2030 y 50% para 2050), la administración pública mexicana se enfrenta a un doble reto: por 1) estimular la inversión por los usuarios en GD para incrementar la generación de energía limpia y 2) lograr la flexibilidad del Sistema Eléctrico Nacional que requiere una integración cada vez mayor de energías limpias intermitentes, como la solar, eólica y en menor medida la hidroeléctrica, en este sistema, así como el incremento de energías limpias de base no intermitentes, como la nucleoelectrica y geotérmica.

Al considerar estos beneficios y el balance positivo que arroja la GD al país, se visualizan un par de acciones que deberán ser derivadas de una política pública para hacer frente a este doble reto, por parte de la administración gubernamental: 1) establecer una tarifa para pagar los KWh inyectados a la red que pueda resultar atractiva para el usuario de la GD, como podría ser la tarifa DAC (Doméstica de Alto Consumo) y facilitar su reembolso; 2) lanzar una política pública orientada a fomentar en la adquisición de baterías, que pudiera ser a través de un subsidio, como es el caso en Estados Unidos. Vale la pena considerar que el costo de este subsidio a las baterías, significaría un ahorro en la generación de energía en las centrales y en las consecuentes pérdidas en el transporte de energía, puesto que disminuiría su demanda, por lo que sería un esquema económicamente rentable.

De esta forma, la administración pública cubriría el doble propósito: por una parte, promover el crecimiento de usuarios de GD como energía limpia y, por otra, disminuir la problemática que causa la intermitencia en el sistema eléctrico. Se considera que, no obstante, las ventajas que aporta a la sociedad la GD y su crecimiento en los últimos años, la administración pública mexicana no ha tomado suficientes medidas para fomentarla regulando su desarrollo y estar preparada para hacer frente a la intermitencia, que puede ser facilitando la instalación de baterías y otorgando una mayor flexibilidad a la red para poder integrar a ella una mayor participación de las energías limpias.

En suma, la GD en buena medida es una muestra de cómo las fuerzas tecnológicas asociadas a las económicas pueden llevar a la población a tomar decisiones que, prácticamente en ausencia de directrices del gobierno, conducen a escenarios a los que los gobiernos tienen que adaptarse y regular, más que dirigir. Además, en este caso por resultar de beneficio la GD para la sociedad y los objetivos energéticos y ambientales del país, fijados por el mismo gobierno, la administración pública está obligada a reconocer y apoyar su integración al sistema eléctrico nacional.

Finalmente, a manera de recomendación, se puede señalar que ante este nuevo escenario tecnológico que origina el nuevo paradigma en la generación de electricidad con la GD, el gobierno, a la luz de este cambio en las reglas del juego, está obligado

a tomar conciencia de ellos y encontrar el nuevo lugar que debe ocupar para beneficio de la sociedad en aspectos sociales, económicos y ambientales. En este estudio se esbozan algunas soluciones basadas en la realidad mexicana e inspiradas en las que ya han tomado con éxito los países líderes en esta tecnología.

Referencias bibliográficas

- Ameli, N., Nijse, M. & Mercure, J. (2023). Solar power expected to dominate electricity generation by 2050 – even without more ambitious climate policies, Published: October 26. <https://theconversation.com/solar-power-expected-to-dominate-electricity-generation-by-2050-even-without-more-ambitious-climate-policies-215367>
- Bakke G. A. (2016). *The grid: the fraying wires between americans and our energy future*. Bloomsbury. <https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&scope=site&db=nlebk&db=nlabk&AN=2675741>
- Burger, S. P., & Luke, M. (2017). Business models for distributed energy resources: A review and empirical analysis. *Energy Policy*, 109, 230-248., <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.07.007>
- Calahorra, A. J. M., Castillo, G. J., Casas, C. R., & Rodriguez, F. M. (2020). Generación distribuida y autoconsumo fotovoltaico. Potencial energético para las industrias de las almazaras en España. *DYNA*, 95(6), 591-595. <https://doi.org/10.6036/9748>
- Cassini, A., & Levinas, M. L. (2008). La explicación de Einstein del efecto fotoeléctrico: un análisis histórico-epistemológico. *Revista latinoamericana de filosofía*, 34(1), 5-38. http://www.scielo.org.ar/scielo.php?pid=S1852-73532008000100001&script=sci_arttext&tlng=en
- CENACE (2023). Programa del desarrollo del sistema eléctrico nacional (PRODESEN), 2022-2036, SENER. <https://www.cenace.gob.mx/Paginas/SIM/Prodesen.aspx>
- Christensen, C. M. (2006). El proceso en curso de construcción de una teoría de la disrupción. *Revista de gestión de la innovación de productos*, 23 (1), 39-55. https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4667048/mod_resource/content/2/Rdg%2054%20Clayton%20Christensen.pdf.
- Cisterna-Arellano, L., Améstica-Rivas L., y Piderit M. (2020). "Proyectos Fotovoltaicos en Generación Distribuida ¿Rentabilidad Privada o Sustentabilidad Ambiental?" *Revista Politécnica* (45) 2, 31-40. <https://doi.org/10.33333/rp.vol45n2.03>
- CONERMEX (2023). Insolaciones NASA en México. <https://www.conermex.com.mx/webinar/Insolaciones%20NASA.pdf>
- CRE (2022). Contratos Interconexión de Pequeña y Mediana Escala / Generación Distribuida – Estadísticas al primer semestre de 2022 www.gob.mx/cre.
- CRE (2023). Contratos Interconexión de Pequeña y Mediana Escala / Generación Distribuida – Estadísticas al primer semestre de 2023 www.gob.mx/cre
- DOF (2015). Decreto por el que se expide la Ley de transición Energética, 24 Diciembre, 2015. https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5421295&fecha=24/12/2015#gsc.tab=0
- Fankhauser, S., Smith, S.M. & Allen, M. (2022). The meaning of net zero and how to get it right. *Nature Climate Change* 12, 15–21. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01245-w>
- Gautam, P., Piya, P., & Karki, R. (2020). Resilience assessment of distribution systems integrated with distributed energy resources. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 12(1), 338-348., <https://doi.org/10.1109/TSTE.2020.2994174>

- Gómez, V. A., Hernández, C., & Rivas, E. (2018). La influencia de los niveles de penetración de la generación distribuida en los mercados energéticos. *Información tecnológica*, 29(1), 117-128. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642018000100117>
- Guerrero, J., Gebbran, D., Mhanna, S., Chapman, A. C., & Verbič, G. (2020). Towards a transactive energy system for integration of distributed energy resources: Home energy management, distributed optimal power flow, and peer-to-peer energy trading. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 132, 110000. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110000>.
- Gutiérrez-Villegas, J.†, Quiroz-Martínez R., Torres-Núñez R. y Mejía-Pérez (2018). Evolución de la normatividad y su impacto en el aumento de los Sistemas Fotovoltaicos (SFV) instalados en México. *Revista de Operaciones Tecnológicas 2* (7), 1-6.
- Hernández, J. (2021). Efecto del consumo de energía renovable en las emisiones de gases de efecto invernadero en países con ingresos bajos y altos. *Acta Universitaria 31*, e3030. <http://doi.org/10.15174.au.2021.3030>
- Hou, J., Wang, C., & Luo, S. (2020). How to improve the competitiveness of distributed energy resources in China with blockchain technology. *Technological Forecasting and Social Change*, 151, 119744. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2019.119744>
- Hu, J., Liu, X., Shahidehpour, M., & Xia, S. (2021). Optimal operation of energy hubs with large-scale distributed energy resources for distribution network congestion management. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 12(3), 1755-1765. <https://doi.org/10.1109/TSTE.2021.3064375>
- IEA (2019), Status of Power System Transformation 2019 , IEA, París <https://www.iea.org/reports/status-of-power-system-transformation-2019>
- IEA (2021), Renewable Energy Market Update 2021, IEA, París <https://www.iea.org/reports/renewable-energy-market-update-2021>
- IEA (2022), Unlocking the Potential of Distributed Energy Resources, IEA, París <https://www.iea.org/reports/unlocking-the-potential-of-distributed-energy-resources>
- INEGI (2023). Producto Interno Bruto por Estado en México en 2022. https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2022/PIBEF/PIBEF_ED_MX.pdf
- IRENA (2017), Indicadores de costes y competitividad de IRENA: energía solar fotovoltaica en tejados, Agencia Internacional de Energías Renovables. www.irena.org/publications/2017/Dec/IRENA_Cost_Indicators_PV_2017.pdf?rev=a06c31812bfa43d2b8c4e39d64ad44c4
- IRENA (2022), World Energy Transitions Outlook 2022: 1.5°C Pathway, International Renewable Energy Agency, www.irena.org/publications
- Khefifi, N. (2021). *Élaboration de stratégies de contrôle-commande basées sur la passivité pour le pilotage d'un micro-réseau de génération décentralisée de type AC en mode autonome* (Doctoral dissertation, Nantes). <https://www.theses.fr/2021NANT4031>
- Latreche, Y., & Kerrou, F. (2021). *Etude de l'intégration de la production décentralisée dans les réseaux de distribution* (Doctoral dissertation, Université Frères Mentouri-Constantine 1). <http://depot.umc.edu.dz/handle/123456789/6090>
- Lazard (2023). 2023 Levelized Cost Of Energy+, Lazard 12 April p. 9. <https://www.lazard.com/research-insights/2023-levelized-cost-of-energyplus/>
- Lian, J., Wu, D., Kalsi, K. & Chen, H. (julio de 2017). Marco teórico para la integración de recursos energéticos distribuidos en los sistemas de distribución. En la *Asamblea General de IEEE Power & Energy Society de 2017* (págs. 1-5). <https://doi.org/10.1109/PESGM.2017.8274331>
- Mahmud, K., Khan, B., Ravishankar, J., Ahmadi, A., & Siano, P. (2020). An internet of energy framework with distributed energy resources, prosumers and small-scale virtual power plants: An overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 127, 109840. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109840>

- Medinilla, M. (2022). La generación distribuida de México alcanzó máximos históricos durante el 2021. *Energía Estratégica*, Feb. 2022. <https://www.energiaestrategica.com/la-generacion-distribuida-de-mexico-alcanzo-maximos-historicos-durante-el-2021/>
- Montoya, C. A. G., López-Lezama, J. M., & Román, T. G. S. (2021). Estimación del costo de distribución de la energía eléctrica en Colombia considerando generación distribuida fotovoltaica. *Información tecnológica*, 32(1), 79-88. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642021000100079>
- Muñoz-Vizhñay, J. P., Rojas-Moncayo, M. V., & Barreto-Calle, C. R. (2018). Incentivo a la generación distribuida en el Ecuador. *Ingenius. Revista de Ciencia y Tecnología*, (19), 60-68. <https://www.redalyc.org/journal/5055/505554803006/505554803006.pdf>
- Nikam, V., & Kalkhambkar, V. (2021). A review on control strategies for microgrids with distributed energy resources, energy storage systems, and electric vehicles. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 31(1), e12607. <https://doi.org/10.1002/2050-7038.12607>
- ONU (2023). Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible, ONU. <http://unstats.un.org/sdgs>
- Presicce, L. (2019). El periplo de la regulación del autoconsumo energético y generación distribuida en España: la transición de camino hacia la sostenibilidad. *Revista Vasca de Administración Pública. Herri-Ardurularitzako Euskal Aldizkaria*, (113), 181-221. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6906449>
- Quadri, I. A., Bhowmick, S., & Joshi, D. (2018). A comprehensive technique for optimal allocation of distributed energy resources in radial distribution systems. *Applied energy*, 211, 1245-1260. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.11.108>
- Quevedo, L. F. (2019). Aproximación crítica a la teoría económica propuesta por Schumpeter. *Revista Investigación y Negocios*, 12(20), 57-62. http://www.scielo.org/bo/scielo.php?pid=S2521-27372019000200006&script=sci_arttext
- Ramos, E. (2020). La generación distribuida: El camino hacia la producción descentralizada de electricidad y pautas para su reglamentación. *Forseti. Revista de derecho*, 8(11), 07-35. <https://doi.org/10.21678/forseti.v8i11.1255>
- Schweickardt, G. A. (2019). Generación distribuida basada en fuentes primarias de energía renovable: Análisis técnico-económico y regulatorio. <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/133783>
- Suarez, J. P. R., Ortega, M. V., & Abril, S. O. (2021). Análisis del potencial uso de la Generación Distribuida en Colombia. *Boletín Redipe*, 10(6), 428-440. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8116483>
- Touzani, S., Prakash, A. K., Wang, Z., Agarwal, S., Pritoni, M., Kiran, M. & Granderson, J. (2021). Controlling distributed energy resources via deep reinforcement learning for load flexibility and energy efficiency. *Applied Energy*, 304, 117733. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117733>
- Valinejad, J., Marzband, M., Korkali, M., Xu, Y., & Al-Sumaiti, A. S. (2020). Coalition formation of microgrids with distributed energy resources and energy storage in energy market. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 8(5), 906-918. <https://doi.org/10.35833/MPCE.2019.000116>
- Wang, J., Zhong, H., Qin, J., Tang, W., Rajagopal, R., Xia, Q., & Kang, C. (2019). Incentive mechanism for sharing distributed energy resources. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 7(4), 837-850. doi: <https://doi.org/10.1007/s40565-019-0518-5>
- World Bank (2022). Off-Grid Solar Market Trends Report 2022 : State of the Sector. © Washington, DC. <http://localhost:4000/entities/publication/68035134-9106-52d4-a2a4-3db90cf46947>
- Yang, Q., Wang, H., Wang, T., Zhang, S., Wu, X., & Wang, H. (2021). Blockchain-based decentralized energy management platform for residential distributed energy resources

in a virtual power plant. *Applied Energy*, 294, 117026.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117026>.

Yoguel, G., Barletta F. y Pereira M. (2013). De Schumpeter a los postschumpeterianos: viejas y nuevas dimensiones analíticas. *Problemas del desarrollo*, 44(174), 35-59.
http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0301-70362013000300003&lng=es&tlng=es

Este artículo es de acceso abierto. Los usuarios pueden leer, descargar, distribuir, imprimir y enlazar al texto completo, siempre y cuando sea sin fines de lucro y se cite la fuente.

CÓMO CITAR ESTE ARTÍCULO:

Ollivier-Fierro, J. O., Hinojosa Robles-Villa, J. y Flores-García, M. A. (2024). La innovación disruptiva de la generación de electricidad distribuida: un reto para la administración pública en México. *Paakat: Revista de Tecnología y Sociedad*, 14(26). DOI: <http://dx.doi.org/10.32870/Pk.a14n26.852>

* Profesor en la Facultad de Contaduría y Administración, de la Universidad Autónoma de Chihuahua, México. Doctor en Administración. Líneas de investigación: gestión e innovación tecnológica en organizaciones. Correo electrónico: jollivier@uach.mx

**Profesor en la Facultad de Contaduría y Administración, de la Universidad Autónoma de Chihuahua, México. Doctor en Administración. Líneas de investigación: administración y políticas públicas en México. Correo electrónico: roblesvilla7@gmail.com

*** Profesor en la Facultad de Contaduría y Administración, de la Universidad Autónoma de Chihuahua, México. Maestro en Administración. Líneas de investigación: administración y finanzas en empresas y gobierno. Correo electrónico: mfloresm@uach.mx