



**UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE CIENCIAS**

**SISTEMA DE EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE  
INSTALACIÓN DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA  
FOTOVOLTAICA EN MÉXICO**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
LICENCIADA EN MATEMÁTICAS**

**P R E S E N T A:**

**REGINA ORTIZ ZAMORA**



**TESIS DIRIGIDA POR:  
DRA DIANA XOCHITL CANALES LICONA  
DR RODRIGO PALACIOS SALDAÑA  
CIUDAD UNIVERSITARIA, CIUDAD DE MÉXICO.**

**2024**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Agradecimientos:.....	4
Dedicatoria .....	6
Introducción .....	7
Problema y pregunta de investigación .....	11
Justificación .....	12
Objetivos.....	14
Hipótesis .....	16
Estado de la cuestión .....	18
o. La generación distribuida en el sector eléctrico mexicano .....	23
o.1 Introducción a los fenómenos eléctricos y las fuentes de energía con las que interactuamos.....	23
o.2 Breve historia del sector eléctrico en México: desarrollo de regulación y capacidades .....	27
o.3 Generación distribuida en México: historia, tecnologías, contraprestaciones y contradicciones .....	31
1. Fundamentos teóricos del sistema de evaluación del potencial de instalación de generación distribuida fotovoltaica.....	40
1.1 Sentido en la construcción de la jerarquía .....	41
1.2 Procesos de resolución .....	42
1.3 Fundamentos matriciales.....	44
1.4 Consistencia.....	45
1.5 Escala de prioridades compuesta o global .....	47
2. Sistema de evaluación del potencial de instalación de generación distribuida fotovoltaica .....	49
2.1 Caracterización de los sectores y las unidades mínimas de evaluación.....	50
2.2 Particiones subregionales y sectoriales .....	51
2.3 Módulos de estimación del potencial por criterios técnicos.....	53
2.3.1 <i>Capacidad instalable por superficie</i> .....	54
2.3.2 <i>Potencial de instalación técnico (PIT)</i> .....	56
Potencial de instalación técnico del sector residencial .....	56
Potencial de instalación técnico del sector agropecuario.....	61
Potencial de instalación técnico del sector comercial y de servicios .....	70
Potencial de instalación técnico del sector industrial .....	75
Potenciales técnicos del sector público.....	80
2.4 Evaluación multicriterio por sectores .....	82
2.5 Construcción de niveles por jerarquía analítica .....	83
2.5.1 <i>Sector residencial</i> .....	85
2.5.1.1 Matrices de comparación entre características de las unidades residenciales .....	88
2.5.1.2 Matrices de comparación entre fenómenos en la subregión..	91
2.5.1.3 Matrices de comparación entre subcriterios .....	92
2.5.1.4. Matriz de comparación entre criterios .....	95
2.5.2 <i>Sector agropecuario</i> .....	97

2.5.3 Sector comercial y de servicios (e industrial) .....	100
2.5.4 Sector público.....	105
3. Implementación.....	107
Módulo 0. Delimitación geográfica:.....	107
Módulo 1. Capacidad instalable por superficie.....	107
Módulo 2.1 PIT del sector residencial.....	107
Módulo 2.2 PIT del sector agropecuario .....	109
Módulo 2.3 PIT del sector comercial y de servicios .....	111
Módulo 2.4 PIT del sector industrial .....	112
Módulo 2.5 PIT del sector público .....	112
Módulo 3.1 Análisis multicriterio del sector residencial .....	113
Módulo 3.2 Análisis multicriterio del sector agropecuario .....	117
Módulo 3.3 Análisis multicriterio del sector comercial y de servicios.....	121
Módulo 3.2 Análisis multicriterio del sector industrial.....	125
Módulo 3.2 Análisis multicriterio del sector público .....	128
Comparación: .....	131
Resultados y discusión.....	132
Conclusiones.....	135
Índice de tablas.....	142
Índice de figuras .....	145
Glosario .....	146
Referencias .....	147

## **Agradecimientos:**

A Jorge. Por ser cómplice en una vida repleta de curiosidad, por compartir la alegría en los logros y la compañía cálida en el ocasional desazón. Por hacerme saber que siempre tendré con quien compartir mis inquietudes, por hacer de esta vida llena de incertidumbres una aventura gozosa.

A Galaviz. Por el constante apoyo, cariño y motivación. Toda mi admiración a tu amable paso por el mundo.

A la familia Segal-Ruiz & Andrés. Por ser hogar, familia y hacer de accidentes un festín compartido.

A Sandra, Andrea y Victor. Por responder a preguntas con más preguntas. Pero sobre todo por compartir conmigo las ganas de entrarle a todo lo que implique pasarla bien, dejando las cosas un poquito mejor que antes.

A Mauro, Chris y Gaby. Por las risas en medio de la crisis, por el apapacho y la camaradería ineludible.

A Sofía Azul, Guille y Lalo. Por haberme devuelto la fe en el quehacer científico crítico, con un pie adentro y un pie afuera, siempre sabiendo desde dónde hacemos y con quienes nos acompañamos.

A Diego, Yuli, Diana Grisel y Tatiana. Por hacer que den ganas de ir a trabajar, pandemia o no pandemia. Por echar porras, oír mis diatribas y tener tanta disposición para platicar de todo.

A GETECC. Por haber sido el primer lugar donde se me hizo saber que tenía algo que decir y quien quisiera oírlo.

A Diana, Rodrigo y Luca. Por darme el espacio, las herramientas y el ánimo para poder empezar un largo camino de trabajo en la intersección de todo aquello que me importa y apasiona.

A Emi. Por no perder tu bondad en medio de un mundo complicado.

Y a Papá. Por haber hecho lo mejor que pudiste con una niña preguntona y respondona. Por aprender a confiar en mis decisiones y apoyarme aún cuando no me entendías del todo.

Este trabajo de investigación se realizó con financiamiento de una beca de asistente de investigación de SNI 3 de parte de Conahcyt y de la Plataforma Nacional de Energía Ambiente y Sociedad del Pronaces de Energía y Cambio Climático.

## **Dedicatoria**

A quienes luchan por el buen vivir, por quienes aún no.

## Introducción

La figura legal de generación distribuida se encuentra definida en la Ley de la Industria Eléctrica (LIE) de 2014 como “la generación de energía eléctrica realizada por un generador exento en una central eléctrica interconectada a un circuito de distribución que contenga una alta concentración de centros de carga” (LIE, 2014). Según la propia LIE, los generadores exentos son aquellos cuyas centrales eléctricas tienen una capacidad instalada menor a 0.5 MW y los centros de carga son las instalaciones y equipos que permiten que un usuario final reciba el suministro eléctrico. Así, la generación distribuida abastece a usuarios cercanos en su circuito de distribución pudiendo variar en la tecnología de la central o en el uso final de la energía, siempre y cuando cumpla los criterios anteriores.

La primera solicitud de interconexión de esta modalidad de generación a las Redes Generales de Distribución del Sistema Eléctrico Nacional (SEN) se realizó en el año 2017. Actualmente, la generación distribuida representa aproximadamente 2.67% de la capacidad instalada nacional, incluidas todas las formas de generación de energía eléctrica. La tecnología solar fotovoltaica es, por mucho, la de mayor presencia entre las centrales que operan bajo esta modalidad con 2,935.25 MW de capacidad instalada (99.34% del total instalado por generadores exentos) y 366,950 contratos hasta el primer semestre del 2023, según reportes de la Comisión Reguladora de Energía (CRE, 2023).

A los sitios donde es teóricamente posible instalar centrales de generación distribuida fotovoltaica (GDFV) se les nombró unidades mínimas de evaluación (UME). El alto porcentaje de participación de la tecnología solar fotovoltaica en la generación distribuida se debe a que dicha tecnología es fácilmente adaptable a distintas UME; requiere pocas condiciones previas para su instalación, puede interconectarse a la red eléctrica, operar de forma aislada o incluso tener un funcionamiento mixto; y además de las facilidades en su entorno fiscal, existe una tendencia a la baja en el costo de los componentes.

Frente a estas ventajas, la GDFV también presenta los siguientes inconvenientes: es intermitente, requiere de materiales no renovables que, al ser obtenidos, pueden generar tensiones socioambientales (Ávila, S., Deniau, Y., Sorman, A. H., y McCarthy, J., 2022), aún no se ha consolidado un sector laboral asociado con

la instalación y el mantenimiento que sea capaz de ofrecer opciones de trabajo digno y seguro (Aguilar, E. y Rátiva, S., 2022) y al ser una forma de generación eléctrica semilocal –ya que aunque la energía se genera cerca de donde se consume, los componentes de los sistemas no se producen localmente– esta tecnología depende de cadenas económicas y tecnológicas globales. Además, requiere de servicios conexos para garantizar los criterios de eficiencia, calidad, confiabilidad, continuidad y seguridad –que las instituciones rectoras en materia de electricidad han determinado como indispensables para la integridad de los sistemas eléctricos– los cuales en la mayoría de los casos, son suministrados por el SEN a partir de la generación eléctrica de centrales que predominantemente operan con tecnologías de combustión y fuentes denominadas no limpias.

El estudio del potencial y limitaciones de la GDFV es crucial para la planeación energética a mediano y largo plazo debido a la baja en combustibles fósiles, los impactos socioambientales asociados a su extracción, producción, transporte, consumo y desecho, y las consecuencias políticas y económicas de la falta de soberanía energética.

La falta de metodologías de evaluación del potencial de instalación de GDFV en México que integren consideraciones técnicas, sociales, ambientales y económicas se manifiesta en los escasos estudios que existen. Existen un puñado de cifras a nivel nacional calculadas a partir de datos poco disgregados de irradiación solar y algunas consideraciones económicas reducidas al costo por kWh, a la vez que los pronósticos disponibles en los programas rectores nacionales en materia de energía, que tratan de prever la penetración de esta modalidad, no definen con suficiencia los métodos en los cuales basan los cálculos para los distintos escenarios que modelan.

En este trabajo se presenta el desarrollo de un sistema de evaluación del potencial de instalación de sistemas de generación distribuida fotovoltaica en México que permite evaluar de forma integral criterios técnicos, sociales, ambientales y económicos de distintas regiones. Estos criterios competen a fenómenos cualitativos, mientras que la recopilación de la información asociada a cada criterio a partir de herramientas estadísticas, como censos y encuestas, permitió su tratamiento cuantitativo a través de la integración numérica por asignación de pesos contruidos a partir de procesos de jerarquía analítica.

El sistema evalúa las interrelaciones de distintos aspectos de los espacios donde se desarrollan las actividades de los sectores residencial, agropecuario, comercial y de servicios, industrial y público, permitiendo identificar las regiones cuyas características y componentes sean óptimas para aprovechar el mecanismo de GDFV. Se diseñó para el contexto mexicano tomando en cuenta la distribución de la tenencia de las viviendas y la tierra, los fenómenos sociales y ambientales que ocurren en el territorio e incluso la calidad de las fuentes de información disponibles, entre otras consideraciones.

Reconociendo la necesidad de ensanchar las herramientas y los modelos matemáticos a través de los cuales se estudia la realidad, encontrando nuevas formas de integrar los presupuestos del pensamiento matemático con otros enfoques para proponer modelos holísticos de gestión del conocimiento (McAdam, R. y McCreedy, S., 1999) que tomen en cuenta la integración de perspectivas humanas, organizacionales y tecnológicas (Salim, J., Yahya, Y., Othman, M. & Mohd, N., 2007), este sistema integra el uso de procesos de jerarquía analítica para evaluar las decisiones multicriterio requeridas en la evaluación del potencial.

Los procesos de jerarquía analítica establecen un marco para la resolución de problemas al organizar comparaciones por pares de criterios en función de cómo influyen estos en la toma de decisiones. Para ello se utilizan insumos de información juicios emitidos por personas con experiencia en el tema al comparar dicha información. Esto permite estimar magnitudes relativas con las cuales se construyen escalas de ratios. Las comparaciones se organizan en una estructura jerárquica que facilita atender el problema en cuestión y llegar a una solución al desglosarlo en sus partes constituyentes (Saaty, T. L., 1990).

La integración de estos procesos en el sistema permite evaluar los criterios que puedan incidir sobre el potencial de sistemas de GDFV que operen en unidades de distintos sectores socioeconómicos, comparando aspectos técnicos, sociales, económicos, ambientales y culturales, de tal forma que los insumos de información preexistentes pueden ponderarse por la opinión de personas con experiencia en los distintos temas a evaluar.

Este trabajo no pretende aportar una cifra del potencial instalable de generación distribuida solar fotovoltaica en ninguna región, ni señalar cuáles son los

criterios cuantitativos o cualitativos de mayor incidencia para determinar dicho potencial. Para lo primero sería necesario justificar nuestra propia construcción de lo segundo. El alcance de este trabajo compete al diseño de un sistema que pueda integrar los parámetros que se determinen como relevantes para el tema en cuestión bajo una jerarquía de criterios determinada para cada caso.

De esta manera, el sistema permite relacionar los datos que corresponden a las características de las distintas unidades que conforman los sectores socioeconómicos en los que se divide el país, a pesar de estar fuera de los alcances de este trabajo determinar la naturaleza de estas relaciones. Por ejemplo, se asume que hay un potencial diferenciado entre viviendas con techos de lámina, de cartón y de cemento, pero el sistema de antemano no puede más que indicar esa diferencia, pues aún no existen estudios que mapeen la magnitud de la diferencia atribuible a cada caso.

Por lo tanto, el sistema se desarrolló tomando en cuenta las características muy particulares de esta tecnología y modalidad de generación eléctrica, así como de las relaciones sociales y económicas que derivan de su uso en diferentes contextos. La consigna es que este trabajo pueda ser aprovechado por personas con interés en el tema desde sus respectivos enfoques: académico, legislativo o de proceso organizativo.

El resultado de este trabajo no es la evaluación de un caso, sino presentar el sistema que permite dicha evaluación. Para ilustrar los resultados que pueden obtenerse al aplicar este sistema de evaluación a una región se ofrece un ejemplo de implementación para la Ciudad de México utilizando datos de la Secretaría de Energía (Sener), la Comisión Reguladora de energía (CRE), el Instituto Nacional de Geografía y Estadística (Inegi) y el Centro Nacional de Prevención de Desastres (Cenapred).

## **Problema y pregunta de investigación**

En este trabajo se conceptualiza y presenta el modelo matemático de un sistema de evaluación del potencial de instalación de generación distribuida fotovoltaica.

Para la realización del modelo de evaluación del potencial de instalación de GDFV, se requiere definir un conjunto de criterios, subcriterios y elementos relevantes. Las características de estos conjuntos determinarán las necesidades operacionales del modelo matemático con el cual se integren, procurando abarcar características cualitativas y cuantitativas de aspectos relevantes, tomando en cuenta que cualquier modelo tiene una visión abstracta y simplificada de sus objetos, así como de las relaciones entre dichos objetos.

El trabajo desarrollado pretende responder a la pregunta: ¿cómo y con qué elementos debe integrarse un sistema de estimación del potencial de instalación de sistemas de generación distribuida fotovoltaica?

## **Justificación**

El proceso de construcción de modelos matemáticos puede robustecer los análisis interdisciplinarios y contribuir con las transiciones sociotecnológicas, las cuales implican cambios tecnológicos que transforman el ordenamiento y funcionamiento social (Savaget, P., & Acero, L., 2018; Geels, F. W., & Schot, J, 2010)

Uno de los principales reclamos que se hace a la investigación en torno a dichas transiciones es que son geográficamente ingenuas en su conceptualización del espacio, escala y transferibilidad de los resultados más allá de estrechos casos de estudio (Lawhon, M., & Murphy, J. T., 2012). Lamentablemente, los estudios en transiciones sustentables muestran poco interés en los aspectos espaciales a escala subnacional y conceptualizan el espacio de una manera hiper simplificada, pues no toman en cuenta la interdependencia entre el contexto social y los espacios en donde se implementan los proyectos (Hodson, M., & Marvin, S., 2010).

En este trabajo se aborda el espacio bajo un entendido relacional. Como remarcan Coenen, Benneworth y Truffer (2012):

La distancia entre los actores [factores] afecta la forma en que interactúan, pero la distancia debe entenderse como algo más que la ruta “en línea recta” en un mapa. Las interacciones regulares entre actores [factores] pueden generar conexiones, instituciones y redes más sólidas que, a su vez, pueden respaldar relaciones “remotas” adicionales. Estas redes definen y crean espacios con sus propios arreglos institucionales, relaciones de poder, instituciones de gobernanza y dinámicas, que ofrecen “proximidad” entre los actores [factores] (Boschma, 2005). Puede haber muchos mecanismos y relaciones diferentes a través de los cuales se construyen estas redes que son relevantes para comprender una situación particular. Lo que aporta un análisis geográfico para comprender cualquier fenómeno en un lugar en particular – como una transición hacia la sostenibilidad– es una apreciación de la importancia de estas relaciones y redes superpuestas, además de proporcionar un conjunto de herramientas conceptuales para comprender sus impactos específicos en un lugar.

Las transiciones sociotecnológicas no pueden entenderse plenamente sin apreciar cómo están contenidas, delimitadas y afectadas por la infraestructura, los procesos de los asentamientos y las políticas y prácticas propias de las regiones. (Soler, N. G., Moss, T., & Papasozomenou, O., 2018)

Un ejemplo de esto es el caso de México, donde existe una apremiante urgencia por construir metodologías para evaluar el uso óptimo de los pocos recursos energéticos de alta densidad, integrándolos a las iniciativas de “transición energética”, como una de tantas transiciones sociotecnológicas necesarias. En particular, el potencial de la GDFV, está poco estudiado en México. Los cálculos arrojados sobre el futuro de la generación distribuida por distintas instituciones, nacionales e internacionales, no sólo discrepan significativamente, sino que carecen de claridad acerca de su construcción.

Esto no es exclusivo para la tecnología solar fotovoltaica, mucho menos para el mecanismo de generación distribuida. Es un vicio que permea la forma en que se estudian y reportan distintas dinámicas del sector energético, donde es de una complejidad mayúscula valorar la viabilidad y rentabilidad de un proyecto cuando los tiempos en los que se recuperan las inversiones son largos ya que durante estos periodos es posible que una buena cantidad de cosas se reacomoden y alteren las condiciones sobre las cuales se hizo el cálculo inicial.

Aunque el universo de datos es público y vasto, no resulta suficiente para captar información útil para modelar las condiciones nacionales de acceso a la energía eléctrica, detectar qué usos tiene en diferentes sectores o a qué se debe la heterogeneidad en las brechas de acceso a distintos servicios energéticos. En este contexto es necesario desarrollar un sistema que permita elaborar una evaluación cuantitativa de criterios cualitativos transectoriales, integrando datos de libre acceso y alta calidad en su levantamiento, con la experiencia de personas expertas en el tema.

## Objetivos

El objetivo de este trabajo es conceptualizar y sistematizar los cálculos necesarios para evaluaciones regionales, a fin de identificar las zonas y los sectores socioeconómicos que tienen mayor potencial de instalación de sistemas de GDFV a partir de las características técnicas, económicas, sociales y culturales de las unidades que los conforman, tomando en cuenta los fenómenos socioambientales en la región evaluada.

Con ello se busca armar a los tomadores de decisiones de políticas públicas en materia de generación distribuida, con consideraciones más allá de las estrictamente técnicas para los planes de ampliación del Sistema Eléctrico Nacional (SEN), así como motivar medidas que atiendan fenómenos que, en una primera instancia, pueden parecer ajenos a la planeación eléctrica, pero que al momento de cruzar la evaluación con criterios sociales revelan su interrelación, como la crisis en la tenencia de las viviendas que dificulta a las familias mexicanas volverse prosumidoras eléctricas<sup>1</sup>.

La sistematización de la evaluación del potencial de instalación de GDFV busca atender dos necesidades urgentes: por un lado, canalizar los limitados recursos económicos y de voluntad política para crear la infraestructura necesaria para aprovechar este potencial en distintas regiones de México; y, por otro, orientar los limitados recursos energéticos y materiales para que operen en las regiones que mejor puedan aprovecharlos. Es decir, se pretende que los criterios que rigen los Programas de Ampliación y Modernización de la Red Nacional de Transmisión (PAMRNT) y Red General de Distribución (RGD) tomen en cuenta las necesidades de este mecanismo para poder ser competitivo en términos tecnológicos y económicos y que sea posible coordinar un esfuerzo estatal-comunitario con el objetivo de que los metales, los minerales y demás componentes estratégicos necesarios para elaborar esta tecnología se instalen y operen maximizando el bien común.

Sin una evaluación cuantitativa de las regiones y de la gran cantidad de fenómenos que en ellas se cruzan y que dan lugar a afectaciones al potencial de la instalación, no hay forma de coordinar esfuerzos que pretendan impulsar la penetración de la GDFV en la matriz eléctrica.

---

<sup>1</sup>La palabra es un neologismo inglés, que resulta de la unión de producir (productor) y consumer (consumidor), inventada en 1980 por el futurólogo estadounidense Alvin Toffler.

Se ha reconocido que las transiciones energéticas necesitan ser más que un cambio en las tecnologías a través de las cuales se genera, almacena, transmite y usa el recurso en cuestión. Identificar los supuestos, los prejuicios y las falacias que subyacen en nuestro entendimiento de las capacidades y limitaciones del sector eléctrico, así como reconceptualizar la relación con las fuentes energéticas que se encuentran en el entorno y los vínculos que se dan entre quienes gestionan estos espacios, quienes los cohabitan y quienes los llevan a puntos de no retorno, excede por mucho los alcances del presente trabajo, pero no por eso estas cuestiones dejan de estar presentes.

Las matemáticas nos ofrecen un abanico de herramientas para interrelacionar datos, cada una con sus limitaciones y ventajas. El modelo matemático que aquí se presenta, tiene como objetivo plantear un sistema para evaluar la magnitud de la afectación de fenómenos que consideramos correlacionados con la viabilidad de los sistemas de GDFV, sobre el potencial de instalación de estos sistemas.

## **Hipótesis**

### *Principal:*

Un sistema de evaluación del potencial de instalación de sistemas fotovoltaicos para generación distribuida puede construirse a partir de ponderaciones multicriterio que integren aspectos cuantitativos y cualitativos. Los criterios y sus respectivas ponderaciones pueden variar en función de la ubicación geográfica de las unidades evaluadas y del sector socioeconómico al que pertenezcan.

### *Secundarias:*

El sistema puede diseñarse de tal forma que el potencial de instalación final de una subregión sea la suma del potencial de instalación de los sectores socioeconómicos que lo conforman.

El sistema puede diseñarse de tal forma que el potencial de instalación final de un sector socioeconómico en una subregión se construya integrando la evaluación de características de las unidades que lo conforman, así como considerando los fenómenos subregionales que afecten a sus unidades.

### *Desarrollo de las hipótesis*

El derecho a la energía se ha demandado bajo el entendido de que sirve como instrumento para el acceso a otros derechos fundamentales, como la educación, la salud y la alimentación (Palacios, 2020). Por lo tanto, debe garantizarse en condiciones que no interfieran con el ejercicio de otros derechos. Así, una perspectiva que contemple las características técnicas, políticas, sociales, culturales, económicas, legislativas y ambientales busca contribuir con los esfuerzos de garantizar un acceso sostenible a recursos energéticos de calidad.

En el caso de la GDFV, dichas características incluyen aspectos cualitativos y cuantitativos. De acuerdo con el nivel en el que se evalúen, estas características pueden ser excluyentes o simultáneas. Dada la naturaleza de esta investigación, parte del

problema puede resolverse a partir de procesos de jerarquía analítica, los cuales ofrecen la ventaja de poder tomar en cuenta la opinión de personas expertas a la hora de ponderar criterios cuantitativos y cualitativos simultáneamente.

La GDFV es un mecanismo de producción de electricidad cuyo potencial de instalación varía según la región y el momento en que se realice la evaluación. Estas diferencias se deben a la diversidad de características de las unidades en donde es posible instalar estos sistemas, ya sean por pertenecer a diferentes sectores socioeconómicos, o incluso entre unidades del mismo sector pero que pertenezcan a subregiones geográficas distintas. A su vez, las unidades son afectadas por los fenómenos socioambientales presentes en su región de maneras diferenciadas en función del sector al que pertenezcan, pues las dinámicas de cada sector socioeconómico determinan en gran medida las características de las unidades. Debido a esto, los fenómenos socioambientales afectan de manera distinta el potencial de instalación no solo de una región a otra, sino de una unidad a otra.

Por lo tanto, los sistemas de GDFV se diferencian entre sí en función de la región en donde se encuentren, las características de la instalación y el espacio que se destine a la instalación.

## Estado de la cuestión

La búsqueda fue constreñida a trabajos desarrollados en inglés y español. El criterio de búsqueda se enfocó en estudios acerca del potencial de instalación de generación distribuida fotovoltaica o para otras tecnologías que operan también bajo la lógica de la generación distribuida. La mayoría del trabajo existente sobre GDFV puede clasificarse en las siguientes categorías:

- Pronósticos de aumento de la capacidad instalada de parte de empresas del sector eléctrico que toman en cuenta datos diversos de tendencia positiva, pronósticos de inversión privada y/o pública y el valor actual del kW. Es decir, no evalúan el potencial de instalación sino la tendencia del aumento de la capacidad instalada (Pv magazine, 2023)
- Estudios de financiamiento privado, y sin transparencia en sus fuentes de información, que incluyen algunos parámetros que incentivan o dificultan la viabilidad de proyectos de GDFV. Estos estudios pueden verse influenciados por los intereses de empresas de instalación y comercialización, y algunos llegan afirmar un potencial de 1,800 GW de capacidad de generación —lo cuál sería más de 20 veces el potencial actual del SEN en su totalidad (87 GW)—. Dicho potencial dice contemplar sólo la extensión geográfica y el nivel de irradiación, dejando de lado cualquier otro criterio social, ambiental, de viabilidad económica, de regulación, etcétera, para la construcción de dicha cifra, pero tampoco indica cómo es que integra los criterios que sí menciona. (Asolmex, 2017).
- Hojas de ruta que plantean cómo facilitar el despliegue de financiamiento a la generación distribuida desde la perspectiva de la banca comercial y las instituciones financieras. Estas hojas dicen identificar actores clave, los detonadores de riesgos e identifican oportunidades para el desarrollo de la generación distribuida en México, así como las implicaciones de dichos detonadores en la oferta de financiamiento para GDFV. Sin embargo, no transparentan los supuestos bajo los cuales se establecieron estos tres temas (LAB, 2021)
- Reportes acerca del potencial de la generación distribuida como una palanca para aumentar la “competitividad” desde un enfoque de apertura a capitales privados, mercantilización de la energía, prioridad al sector industrial sobre

todos los demás por ser el de mayor consumo y desmantelamiento del abasto eléctrico como servicio público (IMCO, 2015)

- Reportes contenidos en los documentos rectores de la política energética, como el Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional (Prodesen) o el Programa de Ampliación y Modernización de la Red Nacional de Transmisión (PAMRNT) que hablan sobre el crecimiento proyectado de la GDFV para diferentes escenarios de pronóstico de demanda y consumo, donde se consideran cambios en el consumo de combustibles derivados de hidrocarburos y leña por consumo eléctrico, es decir una mayor participación de la energía eléctrica en los sectores residencial, comercial y transporte. En estos escenarios se espera que México tenga tecnología —o que ésta sea asequible— en sectores como la producción, almacenamiento y transporte del H2 verde para la producción de energía eléctrica. Los escenarios de pronóstico consideran una penetración de “electromovilidad” de entre el 33% y el 81%. Para estos escenarios se prevé la electrificación del sector transporte, residencial y comercial a fin de reducir el uso de combustibles fósiles en estos sectores, a costa de trasladar dicho uso a otro sector, en particular el industrial (Cenace, 2023; Sener, 2023)

En materia de aplicaciones de procesos de jerarquía analítica u otras aproximaciones a tomas de decisiones multicriterio asociadas a sistemas de GDFV se encontraron:

- Modelos de priorización de tecnologías de generación distribuida para satisfacer la demanda eléctrica en Irán desde el punto de vista de las empresas dedicadas a la distribución o de los generadores independientes de energía. Estos modelos tomaron en cuenta consideraciones económicas, técnicas y ambientales y se incluyeron atributos regionales en la jerarquía para señalar el potencial de diferentes fuentes de energía en las regiones evaluadas además de un análisis de sensibilidad basado en la regulación para indicar cómo la variación de los pesos de los atributos podía influir en las prioridades entre alternativas de generación distribuida. (Zangeneh, A., Jadid, S., & Rahimi-Kian, A., 2009)
- Un marco metodológico de uso de procesos de jerarquía analítica para comparar costos de generación, precios, pérdidas, confiabilidad, capacidad,

disponibilidad y limitantes geográficas y locales de diferentes tecnologías de generación descentralizada en la India para evaluar su sostenibilidad ambiental y económica (Sanjeev H. Kulkarni, Bhairu J. Jirage & T.R. Anil, 2017).

- El diseño, el desarrollo y la aplicación de un metodología de toma de decisiones multicriterio para la planeación de un sistema de suministro eléctrico que toma en cuenta el desarrollo local de pequeñas poblaciones rurales o remotas en Colombia utilizando procesos de jerarquía analítica y el método VIKOR. Este último integra aspectos técnicos, económicos, sociales y ambientales. La propuesta permite comparar el comportamiento del sistema eléctrico ante el aumento de la generación distribuida o la extensión de las redes eléctricas (Correa-Henao, G. J., & Rojas-Zerpa, J. C., 2017).

La literatura existente en materia de los criterios de viabilidad de la GDFV en México puede distinguirse por pertenecer a las siguientes categorías:

- Estudios de caso sobre regiones o comunidades que cuentan con algún grado de penetración de sistemas de generación distribuida fotovoltaica. En estos se analiza el impacto de estos sistemas en la población a través de criterios económicos (Molina Pfennig, P. D., & González-Baheza, A., 2020; Hernández-Escobedo, Q., Fernández-García, A., y Manzano-Agugliaro, F., 2017).
- Propuestas técnicas para optimizar la instalación de sistemas fotovoltaicos de generación distribuida interconectada o en isla, es decir, trabajos desarrollados desde distintas ingenierías que evalúan las características del SEN en general o en un territorio en específico y desarrollan una propuesta alternativa a la infraestructura a partir de criterios técnicos/económicos (Binz, R. et al., 2019; León-Trigo, L. et al., 2019)
- Balances de ventajas y desventajas de la GDFV frente a otras tecnologías o modalidades de generación (Hancevic, P. I., Nuñez, H. M., y Rosellon, J., 2017).

No se encontraron herramientas o sistemas de estimación del potencial de instalación de GDFV en otros países que tomaran en cuenta criterios adicionales a los tecnoeconómicos ni metodologías sobre cómo realizar esta estimación a nivel nacional, regional o local.

El diagnóstico de transición energética de la Ciudad de México, publicado por la Secretaría de Desarrollo Económico en 2022, incluye una evaluación del potencial de aprovechamiento de energías renovables, entre ellas del recurso solar, a partir de su atractivo económico (Sedeco, 2022). En dicho estudio se evaluó la cantidad de usuarios potenciales por nivel económico, comparando el precio de la energía de las distintas tarifas de suministro básico de la CFE con el costo promedio de un sistema fotovoltaico de generación distribuida a lo largo de su vida útil, el cual situó para el caso de México en 1.61 MXN/kWh.

Esta comparación identificó a los usuarios de 8 tarifas de la Ciudad de México como potenciales instaladores, incluidos usuarios residenciales, comerciales e industriales para un total de 495, 260 usuarios en la capital del país. Tras excluir a los usuarios con instalación previa y asignando una capacidad promedio de 6.79 kW/contrato para usuarios residenciales, 22.23 kW/contrato para usuarios comerciales y 187.92 kW/contrato para usuarios industriales, se estimó un potencial de instalación sectorial de 542.37 MW para 79,917 usuarios residenciales, 8,932.77 MW para 401,747 usuarios comerciales y 1,382.54 MW para 7,357 usuarios industriales. No se menciona a usuarios del sector agropecuario ni público.

El documento claramente indica que esta estimación excluye consideraciones importantes para la implementación de estos sistemas como el espacio disponible, la capacidad de afrontar la inversión inicial, la tramitología de interconexión o los límites de las RGD para absorber la generación total de estos sistemas. Debido a sus consideraciones estrictamente económicas “no calcula ni internaliza los beneficios ambientales y/o sociales asociados y que bien pueden ser motivación suficiente” (Sedeco, 2022).

Así, al momento de elaborar esta tesis, no se registraron en el estado del arte sistemas de estimación del potencial de instalación de GDFV para los distintos sectores socioeconómicos en México, tampoco se encontraron trabajos que hubieran realizado esta estimación a nivel nacional, regional o local con criterios más allá de los tecnoeconómicos, limitados a la irradiación solar y el precio de la energía de distintas tarifas.

Un trabajo de este tipo pertenecería tanto al campo de la ingeniería como de la matemática aplicada, los estudios sociales, ambientales y requeriría de antecedentes legales, por lo que no es inesperado la baja densidad de trabajos que atiendan dicha intersección. El reto de este trabajo consiste en poblar este espacio de investigación.

### **Resultados por palabras claves en motor de búsqueda especializado:**

Inglés		Español	
distributed, generation	27,100	generación, distribuida	50
distributed, generation, Mexico	25	generación, distribuida, México	1
distributed, generation, potential	135	generación, distribuida, potencial	28
distributed, generation, installing	9	generación, distribuida, instalación	35
distributed, generation, installation	75	generación, distribuida, instalable, potencial	0
distributed, generation, mexican	7	generación, distribuida, estimación	10
distributed, generation, mexico/mexican, potential, installing	0	generación, distribuida, potencial, instalación	0

*Tabla 1: Resultados encontrados por palabras claves en motor de búsqueda especializado. Fuente: Google Académico*

## **o. La generación distribuida en el sector eléctrico mexicano**

El sector eléctrico mexicano ha evolucionado como una doble hélice profundamente interdependiente entre los desarrollos tecnológicos asociados con los procesos de generación eléctrica —centralizada y distribuida—, y su instrumentación y marcos regulatorios.

En este capítulo se presentan los desarrollos tecnológicos de generación eléctrica fotovoltaica en la sección 0.1, la evolución del sector eléctrico mexicano en la sección 0.2 y la historia, tecnologías, contraprestaciones y contradicciones de la generación distribuida en la sección 0.3.

### *0.1 Introducción a los fenómenos eléctricos y las fuentes de energía con las que interactuamos*

La electricidad no es una fuente de energía, sino el resultado de la transformación de la energía obtenible de distintos materiales conocidos como fuentes. Tales técnicas de transformación son tecnologías que aprovechan un conjunto de fenómenos físicos asociados con la presencia y movimiento de materia con carga eléctrica.

La generación de electricidad en general, se conforma casi en su totalidad de tecnologías de dos tipos: unas basadas en generadores electromecánicos y otras que utilizan el efecto fotovoltaico (McLaren, Peter G., 1984). En México, las tecnologías de generación electromecánica representan el 92.5% de la capacidad instalada nacional y funcionan a partir de la rotación de turbinas mediante:

- vapor generado por la combustión de fuentes fósiles o bioenergéticos
- vapor generado por procesos geotérmicos de la tierra
- vapor producto del calor que emana de reacciones nucleares
- energía cinética del viento o el movimiento del agua en distintas configuraciones (presas, ríos, mares)

En la tabla 2 y 3 se muestra la capacidad instalada y generación de electricidad asociadas a las distintas tecnologías y fuentes de energía presentes en la matriz eléctrica nacional. Las centrales eléctricas pertenecen tanto al sector público como a la industria eléctrica privada y a generadores exentos en el caso de la GD.

<b>Tecnología</b>	<b>Capacidad instalada (MW)</b>	<b>Porcentaje</b>
Hidroeléctrica (LR)	12,613	14,48%
Geotermoeléctrica (LR)	976	1,12%
Eoloeléctrica (LR)	6,921	7,94%
Fotovoltaica (LR)	6.535	7,50%
Bioenergía (LR)	408	0,47%
Nucleoeléctrica (LnR)	1,608	1,85%
Cogeneración eficiente (LnR)	2,308	2,65%
Ciclo combinado	34,413	39,50%
Térmica convencional	11,343	13,02%
Turbogas	3,815	4,38%
Combustión interna	728	0,84%
Carboeléctrica	5,463	6,27%
<b>Total</b>	<b>87,130</b>	<b>100%</b>

Tabla 2: Capacidad instalada interconectada en el SEN hasta 2022. LR: Limpia renovable, LnR: Limpia no renovable. Fuente: Prodesen, 2022.

<b>Tecnología</b>	<b>Generación total (GWh)</b>	<b>Porcentaje</b>
Hidroeléctrica (LR)	35,558.9	10.44%
Geotermoeléctrica (LR)	4,412.7	1.30%
Eoloeléctrica (LR)	20,528.8	6.03%
Eoloeléctrica GD	2.1	0.001%
Fotovoltaica (LR)	20,342.0	5.97%
Fotovoltaica GD	4049.3	1.19%
Bioenergía (LR)	2,141.3	0.63%
Bioenergía GD	42.2	0.012%
Nucleoeléctrica (LnR)	10,539.5	3.09%
Cogeneración eficiente (LnR)	4,204.1	1.23%
Ciclo combinado	187,574.3	55.05%
Térmica convencional	20,000.6	5.87%
Turbogas	10,093.0	2.96%
Combustión interna	1,820.2	0.53%
Carboeléctrica	14,193.8	4.17%
<b>Total</b>	<b>340,712.7</b>	<b>100%</b>

Tabla 3: Generación total de energía eléctrica en 2022. LR: Limpia renovable, LnR: Limpia no renovable. Fuente: Prodesen, 2022.

Por su parte, las tecnologías que utilizan el efecto fotovoltaico representan el 7.5% de la capacidad instalada nacional y dependen de la generación de voltaje y corriente eléctrica en un material al exponerse a fotones. Este trabajo se enfoca en el potencial de instalación de sistemas solares fotovoltaicos que funcionan con dicha tecnología. Para entender qué es un sistema solar fotovoltaico es necesario comprender primero qué es una célula solar fotovoltaica.

Las celdas utilizadas en los sistemas solares fotovoltaicos, están compuestas de varias capas de materiales (ver figura 1) con propiedades que permiten convertir la energía proveniente del sol en corriente directa de la siguiente manera.

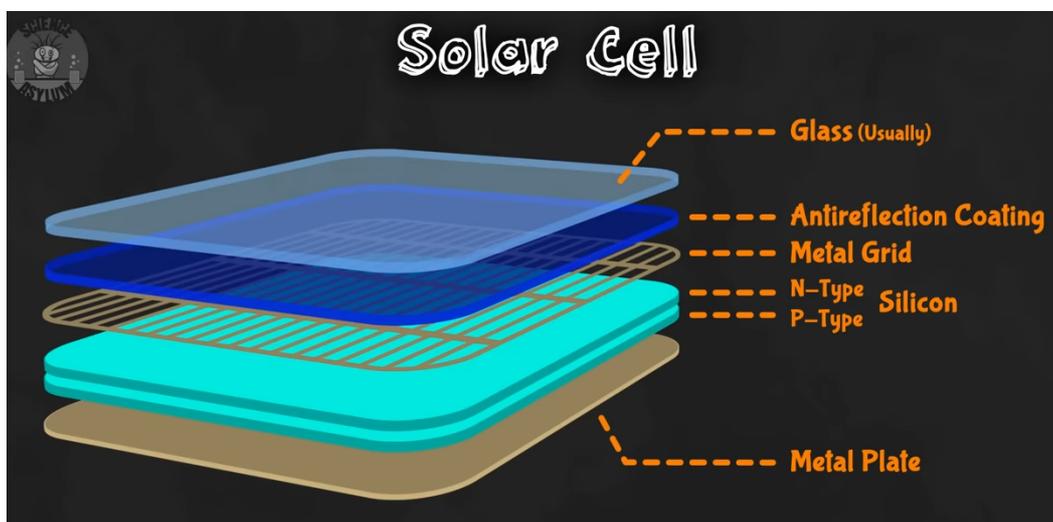


Figura 1. Estructura de una celda solar. Fuente: Physics of Solar Cells. Lucid, N. 2019.

Primero, la luz del sol incide en una capa de vidrio, la cual protege las capas inferiores de daños, dejando pasar una cantidad considerable de radiación. Abajo del vidrio se encuentra una capa antirreflejante que, a pesar de ser oscura, permite el paso de la luz. El grosor de esta capa permite cancelar parcialmente la reflexión ocasionada por los semiconductores que tiene debajo. Minimizar dicha reflexión disminuye las pérdidas de energía, pues la celda *de facto* tendrá pérdidas térmicas ocasionadas por la capa de vidrio. La cancelación de la reflexión no puede ser completa pues el grosor funciona para ciertas longitudes de onda, pero es más que suficiente para permitir la generación eléctrica fotovoltaica (Lucid, N. 2019).

La siguiente capa debe estar compuesta principalmente de un material, que según las condiciones, puede fungir de aislante o de conductor, por lo que recibe el nombre de semiconductor (Mathieu, H. Fanet, H., 2013). El silicón es el

semiconductor por excelencia, pues su banda de conducción no es demasiado grande (Shimura, F., 2012). Al solo tener 4 electrones en dicha banda, genera enlaces difíciles de romper. Es por esto que se le aplica un proceso de “dopaje” mediante el cual se “enriquece” con otro elemento que aporta electrones adicionales que no están enlazados. Esta primera capa de semiconductor se dopa de fósforo pues gracias a sus cinco electrones puede tener cuatro enlazados y uno adicional que está en condiciones de cruzar la banda de valencia (Rauschenbach, Hans S., 2012)

Es importante que al cruzar la banda de valencia los electrones “tengan a donde llegar”, por lo que el siguiente semiconductor también pasa por un proceso de dopaje. Para asegurar los espacios necesarios, este semiconductor de silicio se dopa con boro, el cual al tener 3 electrones en su banda de valencia puede recibir cómodamente a los electrones del primer semiconductor. Por separado, ambos tipos de silicio dopado son neutros, pero al ponerlos en contacto se genera un desbalance de carga dentro de la celda, quedando el fósforo con carga positiva al ceder electrones al boro mientras que el boro se carga negativamente al recibir electrones del fósforo (Lucid, N., 2019; Rauschenbach, Hans S., 2012)

Este desbalance de cargas, también conocido como gradiente de potencial eléctrico, indica la dirección en la que deben desplazarse los electrones entre las placas de semiconductores las cuales están interconectadas por conductores, produciendo así un flujo de electrones conocido como corriente eléctrica. La energía potencial eléctrica por unidad de carga eléctrica en un punto específico de las celdas se conoce como potencial eléctrico y se mide en voltaje, que es el trabajo por unidad de carga eléctrica que ejerce sobre una partícula un campo eléctrico (Griffiths, D. J., 1981)

El voltaje de una celda individual es menor que el de una pila AA, por lo que deben conectarse múltiples celdas en serie para conformar un panel solar y, según la capacidad que se quiera alcanzar, es necesario conectar múltiples paneles en serie (AET, 2014) junto con otros elementos técnicos —como acumuladores de energía, inversores, medidores bidireccionales, líneas de transmisión, cuadro eléctrico, equipo de medición, fusibles e interruptores— para conformar un sistema fotovoltaico (IER, 2017).

La tecnología de generación solar fotovoltaica depende de múltiples fuentes de energía para operar. No basta la irradiación solar si no hay un conjunto de materiales

con la capacidad de interactuar entre sí para aprovechar el efecto fotovoltaico. Tales metales y minerales de los que están hechas estas celdas y circuitos requieren de combustibles fósiles para su extracción minera, el ensamblaje y transporte de los componentes y equipos finales, y de trabajo humano en la instalación y el mantenimiento, así como controlar las redes a las que están interconectados los sistemas solares fotovoltaicos, etcétera. En síntesis, los sistemas solares fotovoltaicos son la punta del iceberg de una red de procesos, tecnologías, fuentes y deshechos que muchas veces se pierden de vista y sin los cuales no se pueden entender en su justa dimensión (Sánchez, S., 26 mayo, 2020).

Basta ver el caso nacional: que existan grandes yacimientos de litio no se traduce automáticamente en que haya una industria líder del sector, pues no es el mineral el que tiene intrínsecamente valor en el engranaje de la energía, sino los procesos tecnológicos y políticos a través de los cuales se transforma, gestiona e interactúa con otros componentes del sistema eléctrico (Vattuone, X. R., & Moreno, A. V., 2023).

Además de nuestra interdependencia de tecnología, materiales y minerales extranjeros, la generación distribuida enfrenta varios desafíos y retos, entre los cuales están las legislaciones y políticas energéticas. En las siguientes secciones se presenta brevemente la evolución legislativa del sector eléctrico nacional y de la generación distribuida en concreto.

## *0.2 Breve historia del sector eléctrico en México: desarrollo de regulación y capacidades*

La generación distribuida como mecanismo de generación eléctrica a pequeña escala, cerca de los centros de consumo, y con posibilidad de hacer uso de los mecanismos de contraprestaciones vigentes, existe como fruto de las tensiones y resoluciones que más adelante se detallan. En ese sentido pertenece a un proceso permanente de modificación de las estructuras sociales, tecnológicas, políticas, económicas y culturales que deben leerse desde una perspectiva histórica.

Los primeros usos de la electricidad en México fueron en fábricas, producción minera y alumbrado público, habiendo varios años de distancia entre estos usos y su

aparición generalizada en la vida doméstica. La primera central eléctrica comenzó a operar en 1879 en León de Los Aldama, Guanajuato, para uso de una fábrica textil. En los siguientes diez años se le otorgó a la iluminación eléctrica el carácter de servicio público (CFE, 2023) en Guadalajara, Monterrey, Veracruz, Mérida y la Ciudad de México, donde se instaló alumbrado eléctrico.

Para este momento, el entonces Ministerio de Fomento reportó la existencia de 60 centrales de generación eléctrica con una capacidad instalada total equivalente a menos de una cienmilésima parte de la reportada en 2022 (Sener, 2023). En su gran mayoría estas centrales eran térmicas, seguidas de hidroeléctricas, ambas cerca de los centros de consumo. Las centrales eran manejadas por compañías privadas que se encargaban de generar, transmitir, distribuir y comercializar electricidad a los usuarios finales (Palacios, R., en prensa).

Durante la década de los treinta, debido a la gran inestabilidad en el país por el proceso de la Revolución mexicana, muchas empresas del sector eléctrico se declararon en quiebra. En aquellos años no se habían podido realizar mejoras del servicio ni ampliaciones a la red (Mendoza, M., 2018), por lo que en 1933 se autorizó la creación de la Comisión Federal de Electricidad y, cuatro años después, le otorgó facultades para organizar y dirigir un sistema nacional de generación, transmisión y distribución de energía eléctrica basado en principios técnicos y económicos, sin propósitos de lucro y con la finalidad de obtener, a un costo mínimo, el mayor rendimiento posible en beneficio de los intereses generales de la nación (LCFE, 1937).

El artículo 27 de la constitución de 1917 (CPEUM, 1917) y la creación, en 1922, de la Comisión para el Fomento y Control de la Industria de Generación y Fuerza, que tenía entre sus facultades regular las tarifas eléctricas, pues los usuarios eran vulnerados por la arbitrariedad de las empresas que comercializaban la electricidad (Garza, E. *et al.*, 1994) establecieron antecedentes legislativos y de políticas públicas para el control estatal de las fuentes de energía y el fomento a la industria estatal de generación eléctrica.

El Código Nacional Eléctrico en 1928 buscó evitar la heterogeneidad de los gobiernos locales al establecer como competencia federal la regulación de tarifas, el otorgamiento de concesiones y su revocación en caso de no cumplir con las inspecciones (Palacios, R., en prensa), mientras que el Decreto de 1937 estableció que

debido a que las fuentes de abastecimiento de energía eléctrica son un factor modular para el progreso del país, necesario para el desarrollo social agrícola e industrial, debían estar gestionadas por la Secretaría de Economía Nacional (Dec, 1934, Dec, 1937).

Previo a la nacionalización de la industria eléctrica en 1960, la Ley de la Industria Eléctrica determinó la repartición entre empresas públicas y privadas en materia de generación, transformación, distribución, exportación, importación, compraventa y uso y consumo de energía eléctrica al determinar el abastecimiento de dicha energía como un servicio público.

La nacionalización de la industria eléctrica estuvo legitimada, entre otras cosas, por los abusos de las compañías privadas y extranjeras al revender la electricidad generada por CFE a precios excesivos. Al cierre de la década de los cincuenta, la Comisión ya contaba con más del 50% de la capacidad instalada nacional, y aumentó en 900% su capacidad en poco menos de 15 años.

Desde 1974 habían existido esfuerzos por disolver a Luz y Fuerza del Centro, pero durante décadas estos intentos se habían frenado debido a los conflictos sociales, laborales y sindicales que suponían, hasta que en 2009, el presidente espurio Felipe Calderón (Mandoki, L., 2006), decretó la extinción y liquidación de Luz y Fuerza del Centro, ordenando que la entonces Policía Federal tomara las instalaciones. Dicha medida dejó de la noche a la mañana desempleados a 44,300 trabajadores y en el desamparo a cerca de 22,000 personas jubiladas, quienes argumentaron que el motivo real no era extinguir una empresa del estado, sino eliminar una organización sindical democrática e independiente ante intereses privatizadores, ya que el Sindicato Mexicano de Electricistas impulsó desde siempre la nacionalización de la industria eléctrica y advirtió del riesgo de permitir su privatización, pues “mañana va a ser Pemex, la educación pública, la seguridad judicial, o la entrega de las escrituras del campo mexicano” (Taniguchi H., octubre 11, 2010).

Con la reforma de 1983 se flexibilizó el otorgamiento de permisos de autoabastos, lo que benefició principalmente al sector industrial y se tradujo en pérdidas dentro de las decenas de miles de millones, solo entre 2017 y 2021 se estiman 28 mil 096 millones de pesos aproximadamente que CFE absorbió, pues el sector privado de generación no paga el transporte de la energía eléctrica por el uso de la red

de la CFE, que se financia públicamente (CFE, 2021).

Casi diez años transcurrieron entre esta reforma y la de 1992 —durante el sexenio de otro presidente que también llegó al cargo a través de fraude electoral, Carlos Salinas de Gortari (Delgado, A., Paez-Varela, A., 2023)—. Esta reforma “quebrantó el espíritu constitucional al ampliar las excepciones por las que la generación de energía eléctrica no se considera servicio público”, abriendo la puerta a la generación en las modalidades de autoabastecimiento, cogeneración, pequeña producción (antecedente de la generación distribuida), producción independiente para venta a CFE, generación para exportación o importación destinada exclusivamente a usos propios y generación para uso en emergencias. (Palacios, R., en prensa).

En 1999, Ernesto Zedillo presentó una iniciativa de reforma a los artículos 27 y 28 de la Constitución, la cuál desaparecía el concepto de servicio público y la exclusividad del estado en la industria eléctrica. Esta iniciativa representó el primero de los cuatro intentos de reforma constitucional de parte de la dupla partidista PRI-PAN que buscaban desmantelar las garantías que ofrecía el Estado respecto al sector eléctrico. Las siguientes se dieron en 2001 por parte de senadores del PAN, en agosto del 2002 por parte de Vicente Fox y a finales del 2013 se publicó el decreto que redujo la exclusividad del estado únicamente a la gestión nuclear, la planeación y control del sistema eléctrico nacional y el servicio público de transmisión y distribución. La reforma dio lugar a la eventual Ley de la Industria Eléctrica del 2014, en la que quedó estipulado el mecanismo de generación distribuida que aborda este trabajo.

Este repaso histórico más que cumplir una función anecdótica, permite traer a cuenta que las complicaciones asociadas con los procesos energéticos, y en particular los eléctricos, tienen un carácter político, en donde lo que se juega no solo es aquello medible en unidades físicas, sino las nociones constitutivas del tejido de esta nación como la defensa del derecho al acceso a las fuentes de energía que posibilitan la vida digna. Es posible mapear en la distribución de las redes eléctricas, de las centrales de generación o de las regiones en pobreza energética de diversos tipos una larga y convulsa historia de intereses económicos, luchas populares, proyectos de nación y desarrollos tecnológicos que no siempre han sido puestos al servicio del bien común. Es por eso que el potencial de la generación distribuida fotovoltaica debe estudiarse

tomando en cuenta la evolución política, social y tecnológica que han hecho posible la existencia y florecimiento de esta modalidad de generación eléctrica.

### *0.3 Generación distribuida en México: historia, tecnologías, contraprestaciones y contradicciones*

Nuestra relación con la energía puede analizarse desde un caleidoscopio prácticamente inagotable. Incluso si nos limitamos al contexto nacional nos encontramos ante una diversidad de debates y dilemas que abarcan, aunque no se limitan a: discusiones estrictamente técnicas respecto a la viabilidad de ciertos proyectos ante la disminución en la disponibilidad de fuentes fósiles (Ferrari, L., Flores, J. R., Hernández, D., en prensa); las complicaciones asociadas a los procesos extractivos necesarios para la infraestructura de las llamadas renovables; debates políticos fuertemente dicotomizados sobre la distribución de la gestión de los servicios energéticos entre el estado o privados (Cámara de Diputados, 7 de enero de 2022); así como luchas por reformular nuestro entendido de la energía como un derecho instrumental para garantizar otros derechos. Cada vez hay más espacios en donde se cuestiona: “¿Energía para quién? ¿Energía para qué? ¿Energía cómo?”.

En medio de estos fuegos cruzados –y muchas veces abonando a la artillería de un lado u otro–, la legislación mexicana ha ido construyendo y reformando el marco regulatorio del sector energético. En particular, en las últimas dos décadas múltiples factores han obligado a evaluar con mayor detenimiento el potencial de la generación distribuida en México, entre ellos la reforma regulatoria y legal asociada con dicho mecanismo (LIE, 2014; CRE, 2017), así como las complicaciones cada vez más insostenibles de gestionar un sistema eléctrico centralizado, con participantes del mercado eléctrico en condiciones muy desiguales, la enorme dependencia en tecnologías que operan a partir de combustibles fósiles y los problemas ecosociales derivados tanto de su uso como de su carencia (GeoComunes, 2021).

El antecedente directo a la generación distribuida: es la figura de pequeña producción establecida en la Ley de Servicio Público de Energía Eléctrica de 1975 (LSPEE, 1975). Esta figura requería que los solicitantes destinaran la totalidad de la energía para su venta a la CFE y estaba limitada a una capacidad instalada de 30 MW, o que se destinara el total de la producción de energía eléctrica a pequeñas

comunidades rurales o áreas aisladas que carecieran de la misma y que la utilizaran para su autoconsumo, en tales casos, no podían excederse de 1 MW. La capacidad instalada es el volumen máximo de producción de una central eléctrica de generación (Planeas, 2022), por lo que una central eléctrica de pequeña producción, podía operar con distintas tecnologías mientras la cantidad de energía eléctrica que generara en condiciones ideales no rebasara los límites de capacidad establecidos.

La figura legal de generación distribuida se encuentra en la Ley de la Industria Eléctrica de 2014. Se define como “la generación de energía eléctrica realizada por un generador exento en una central eléctrica interconectada a un circuito de distribución que contenga una alta concentración de centros de carga” (LIE, 2014), donde los generadores exentos son aquellos cuyas centrales eléctricas tienen una capacidad instalada menor a 0.5 MW, 60 veces menos que el límite de las figuras de pequeña producción. En cuanto a las centrales de pequeña producción, por disposiciones administrativas de carácter general que expidió la CRE en 2017, éstas podían conservar sus contratos e instalaciones físicas en sus términos, también pudiendo migrar, en caso de solicitarlo, a generación distribuida.

En México existen registros de 8 tecnologías distintas asociadas a centrales de generación distribuida, pero como puede observarse en la figura 2, la mayoría de los contratos de interconexión y de la capacidad instalada corresponden a sistemas fotovoltaicos (99.93% de los contratos y 99.34% de la capacidad instalada) (CRE, 2023).

Las centrales eléctricas de generación distribuida no están obligadas a interconectarse al Sistema Eléctrico Nacional (SEN), pero cuentan con garantías de parte del Estado que establecen que estas centrales pueden interconectarse a la Red Nacional de Transmisión (RNT) o a las Redes Generales de Distribución (RGD) para la venta de excedentes y la compra de faltantes, siempre y cuando se celebre el contrato de interconexión correspondiente.

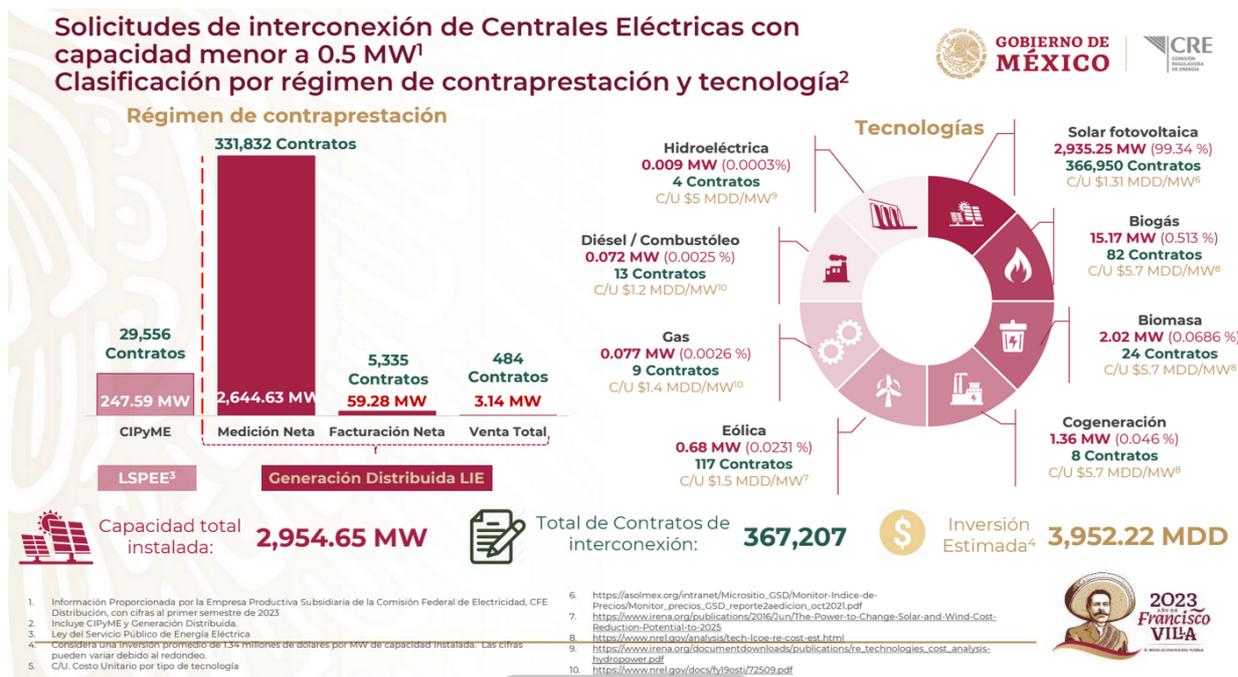
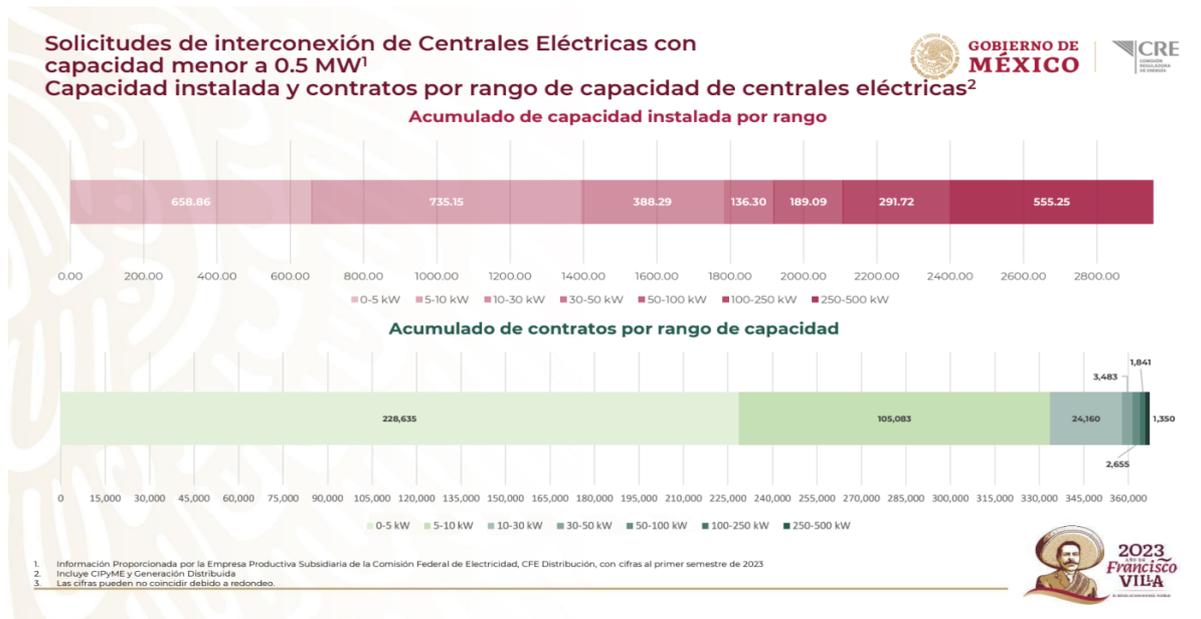


Figura 2: Clasificación de centrales eléctricas con capacidad menor a 0.5 MW por régimen de contraprestación y tecnología. Fuente: Solicitudes de interconexión de centrales eléctricas con capacidad menor a 0.5 MW (CRE, 2023).

Los mecanismos de contraprestaciones a los que acceden a partir de su interconexión representan una posibilidad de reducir el impacto económico de las cuentas eléctricas para los generadores exentos e incluso generar ingresos a través de la venta de energía eléctrica o de certificados de energía limpia (CRE, 2017).

Los tres regímenes de contraprestaciones vigentes hasta el 2023 son medición neta, facturación neta y venta total, quedando la primera como la predominante tanto en contratos como en capacidad instalada (98.27% de los contratos y 97.69% de capacidad instalada). La medición neta de energía considera los flujos de energía eléctrica recibidos y entregados desde y hacia las RGD; y compensa dichos flujos de energía eléctrica entre sí durante el periodo de facturación. La facturación neta considera los flujos de energía eléctrica recibidos y entregados desde y hacia las RGD, y les asigna un valor que puede variar de acuerdo con si se trata de una compra o una venta. La venta total de energía sólo considera el flujo de energía eléctrica entregada hacia las RGD y le asigna un valor de venta. (CRE, 2017).

Para el caso de las centrales de generación distribuida que no cuentan con contratos de interconexión, estos absorben los costos asociados a operar un sistema “en isla”.



*Figura 3: Capacidad instalada y contratos por rango de capacidad de centrales eléctricas (incluye CIPyME y GD). Fuente: Solicitudes de interconexión de centrales eléctricas con capacidad menor a 0.5 MW (CRE, 2023).*

Como puede observarse en la figura 3, el 62.26% de los contratos vigentes (tanto de GD como de CIPyME) corresponden a centrales con capacidad instalada menor a 5 kW, seguido de 28.61% de contratos para centrales con entre 5 y 10 kW de capacidad instalada. Mientras que al otro extremo del espectro, el 2.54% de los contratos que corresponden a centrales eléctricas de 30 kW hasta 500 kW de capacidad instalada cuentan con el 39.67% de la capacidad instalada asociada a GD. Es decir, el 90% de los contratos de generación distribuida que corresponden a las centrales eléctricas más pequeñas tienen casi la misma capacidad instalada que el 2.54% de los contratos que corresponden a las centrales eléctricas más grandes.

Para ilustrar las escalas de estos proyecto conviene visualizar el problema a escala humana. Los sistemas fotovoltaicos están compuestos por varios módulos de celdas fotovoltaicas en configuraciones serie-paralelo, y pueden incorporar acumuladores de energía, inversores, medidores bidireccionales, líneas de transmisión, cuadro eléctrico, equipo de medición, fusibles e interruptores (IER, 2017). El componente del sistema que más espacio requiere son los paneles compuestos por celdas de silicio cristalino. Se estima que este material será predominante en la tecnología fotovoltaica por lo menos durante la siguiente década (MIT, 2016).

En 2017, un panel fotovoltaico de silicio común estaba hecho de entre 60 a 96 celdas solares individuales de 15 cm<sup>2</sup>, cada una con capacidad de producir de 4 a 5 W en hora pico. Las dimensiones típicas de los módulos fotovoltaicos comerciales eran de 1 m por 1.5 m por 4 cm con capacidad para generar una potencia pico o máxima de 260 a 320 W (IER, 2017). Con los años las dimensiones y la eficiencia han cambiado, llegando a encontrar en el mercado internacional paneles con eficiencias de hasta 22.8%, que pueden generar 440W en una superficie de 1.872 x 1.032 m.

Con la máxima eficiencia posible y tecnología de punta (a un costo considerable) una central con 30 kW de capacidad instalada requiere al menos 131.7 m<sup>2</sup> de paneles solares, sin contar todos los otros componentes. A este cálculo debe añadirse que las celdas antes eran menos eficientes, por lo que requerían más superficie para generar la misma potencia, así que esta cifra es un mínimo técnico por debajo del mínimo real. Es decir, esta es la superficie mínima que requieren los proyectos de 30 a 500 kW.

En cambio, las centrales más grandes con capacidad menor a 5 kW, rondan los 22 m<sup>2</sup> de superficie requerida por los paneles, considerando máxima eficiencia. Estos conforman casi dos terceras partes de todos los sistemas de generación distribuida en México, y corresponden a los sectores residenciales o de micro, pequeña y mediana empresa (MiPyME).

Sin embargo, un sistema de generación distribuida es un proyecto prohibitivo para quienes se encuentran en vulnerabilidad económica. Como una medida para combatir la pobreza energética, a partir de octubre de 2022, ha existido un proceso de modificación regulatoria que contempla la creación de la figura de generación distribuida colectiva. Este es un esfuerzo de parte de organizaciones de defensa del territorio, movimientos de resistencias contra megaproyectos energéticos, algunas veces desde la academia y diversas comunidades indígenas, campesinas, rurales y de organización popular urbana (Fundación Tosepan, 2023).

La propuesta de regulación busca permitir a una central eléctrica de generación distribuida suministrar energía eléctrica a múltiples usuarios que compartan un punto de interconexión y operen bajo la misma tarifa. Este cambio regulatorio sigue en proceso de aclaraciones y modificaciones de parte de la Comisión Nacional de Mejora Regulatoria y la CRE (CRE, 2022).

Existen varias críticas a esta nueva modalidad. Una de ellas es que los centros de consumo pertenezcan a la misma tarifa para poder participar de la generación distribuida colectiva, pues esto entorpece la vinculación del consumo entre viviendas y las unidades comerciales y/o de servicios con las que puedan estar relacionadas; (por ejemplo, una familia que viva sobre su tortillería o al lado de su taller mecánico, etcétera). A la par de lo anterior, se discute si la modalidad debería modificar sus rangos, pues como ya se mencionó antes, las centrales eléctricas varían enormemente en su tamaño y usuarios finales, por lo que un mecanismo orientado a garantizar el acceso a la energía eléctrica a través de relaciones colectivas no es congruente con que generadores exentos individualmente tengan centrales de hasta 0.5 MW; bajo esta modalidad, una sola central eléctrica de esa capacidad instalada puede generar en 10 horas de irradiación máxima la energía que ocupan más de 33 viviendas en tarifa básica durante 2 meses, ocupando más de 2,000 m<sup>2</sup> de paneles.

Claramente, dichas escalas de generación no corresponden a los sectores residenciales o de micro, pequeña y mediana empresa (MiPyME). E incluso para las estructuras de gestión comunitarias pueden ser demasiado grandes, por lo que es fundamental hacer un diagnóstico de las necesidades reales de las comunidades con el fin de establecer los límites, las contraprestaciones, facilidades y características particulares de la generación distribuida tradicional y colectiva.

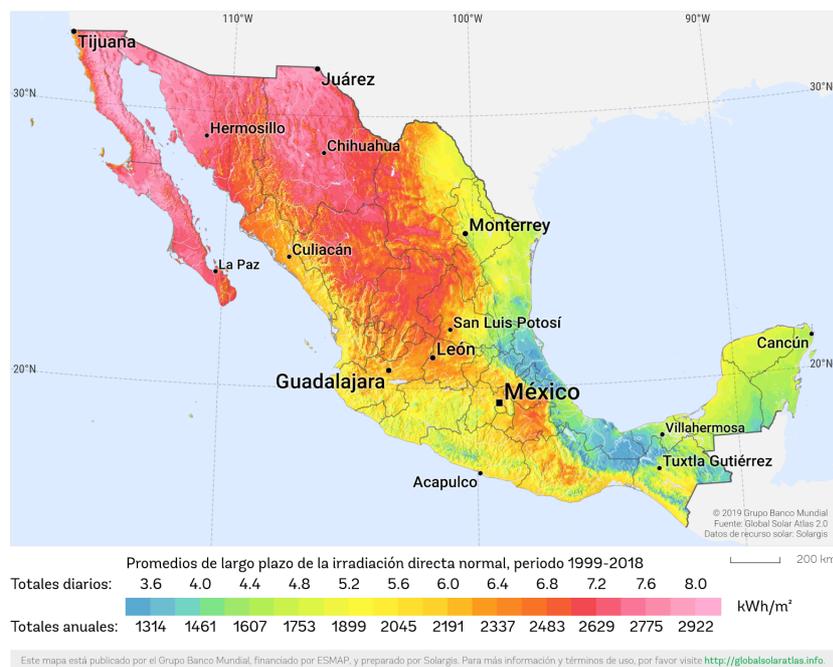
A pesar de que los sistemas fotovoltaicos pueden construirse de forma que tengan una capacidad instalada considerable, la intermitencia de su generación supone una desventaja. Los centros de carga requieren de complementos como baterías para que la energía generada en un momento pueda estar disponible en otro, o como suele ocurrir, que el sistema esté conectado al SEN para que en los momentos de baja o nula radiación solar, el lugar de consumo no quede sin acceso a servicios eléctricos. Además, puede que no siempre alcance la potencia necesaria, por lo que la interconexión y/o las baterías permiten satisfacer la demanda de los usuarios cuando las capacidades de potencia del sistema quedan sobrepasadas.

Todas estas consideraciones afectan el costo final del sistema y los costos asociados al mantenimiento, por lo que las cooperativas eléctricas son una parte crucial de la viabilidad a largo plazo de la GDFV. Esta viabilidad también depende de que las redes generales de distribución y transmisión tengan en cuenta la evolución de

la generación distribuida en sus planes de ampliación y modernización.

En promedio, México recibe 5 kWh de energía solar por cada metro cuadrado al día, distribuida en 11 horas aproximadamente (ver figura 4), por lo que una vivienda con un consumo intermedio de 240 kWh al bimestre, estará ocupando en promedio 4 kWh al día. Si la eficiencia del panel fuera del 20% bastaría con 4 m<sup>2</sup> para generar la energía que consume. Sin embargo, la energía no se usa instantáneamente, ni de forma homogénea a lo largo del tiempo.

Por lo tanto, se necesitan sistemas que sean capaces de atender las diferentes demandas de potencia. Por ejemplo, no es lo mismo utilizar un electrodoméstico que requiera 400 W de energía durante una hora que uno de 20 W de energía durante 20 horas. En ambos casos se consumió 400 Wh, pero la potencia necesitada en un caso fue de 400 W, mientras que en el otro fue 20 veces menor, durante más tiempo.



*Figura 4: Mapa de recurso solar: irradiación directa normal en México.  
Fuente: Global Solar Atlas 2.0 (2019)*

Reconociendo sus fortalezas y limitaciones, el impulso a la GDFV conforma un complemento al abanico de adaptaciones que requiere el SEN para poder garantizar el acceso a la energía eléctrica como un derecho que posibilita el acceso a otras garantías. El capítulo II, subsección 2.2 de la Resolución de la CRE por los que expide las disposiciones administrativas de carácter general y las especificaciones técnicas generales aplicables a la GD, estipula que:

Para determinar las necesidades de ampliación y modernización de las Redes Generales de Distribución, el Distribuidor [CFE] deberá considerar la capacidad disponible de los circuitos de distribución, y la tendencia de integración de Centrales Eléctricas de Generación Distribuida, estimada con base en los datos históricos de solicitudes de interconexión recibidas, la evolución tecnológica y los costos de las tecnologías de Generación Distribuida, así como la disponibilidad de los recursos primarios en diferentes zonas de las Redes Generales de Distribución.

Lo anterior toma en cuenta la tendencia de integración de centrales a partir del promedio histórico de solicitudes de interconexión, pero no contempla todos los factores que pueden facilitar, dificultar o imposibilitar que se aproveche la abundancia de irradiación solar a través de sistemas fotovoltaicos de generación distribuida. Es decir, considera las regiones que ya cuentan con solicitudes, pero no valora las causas de la existencia o inexistencia de dichas solicitudes para fomentar su aumento. A la fecha, no queda clara una hoja de ruta para este impulso en los documentos directrices del sector energético ni del sector eléctrico.

El Prodesen 2023-2037 presenta dos escenarios de crecimiento en la capacidad instalada de GD fotovoltaica para los próximos 15 años. El primer escenario está catalogado como de “planeación” y el segundo corresponde a un caso “acelerado” asumiendo que habrá mayor dinamismo e impulso en la GD. Sin embargo, en ninguna parte del documento se establecen los criterios para este incremento. No hay ninguna transparencia respecto a los criterios, los parámetros y las variables utilizados para la construcción de estos escenarios. Tampoco presenta un análisis regional, sectorial o de crecimiento de otras tecnologías utilizadas en generación distribuida.

Por su parte, los cálculos de la demanda horaria integrada en la ocurrencia de la máxima anual del Sistema Interconectado Nacional para 2023-2037 dicen contemplar el escenario de planeación de GD, pero no hay ninguna indicación respecto a los pronósticos de penetración de baterías para sistemas fotovoltaicos, o modelos que contemplen la figura de GD colectiva que está en proceso de modificación regulatoria desde el año pasado.

El artículo 33 de la Ley Orgánica de la Administración Pública Federal (LOAPF, 2021) establece que a Sener le corresponde establecer, conducir y coordinar la política energética del país, con prioridad en la seguridad y la diversificación energética, el ahorro de energía y la protección al medio ambiente, incluida la planeación energética

a mediano y largo plazo, así como fijar las directrices económicas y sociales del sector energético nacional y establecer mecanismos de coordinación con el Cenace. Lamentablemente, el Prodesen —que por ley debe plasmar en un documento el análisis y la planificación de las obras necesarias para contar con suficiente energía, equipos y redes para satisfacer la demanda de cada usuario final en el país— carece de información clara respecto a la hoja de ruta de la generación distribuida en México.

En general, las discusiones asociadas a la GDFV en el país giran en torno a un conjunto de dicotomías tales como los impactos socioambientales de la energía generada a partir de combustibles fósiles *vs* la generada por fuentes y tecnologías “limpias” o “renovables”, los riesgos y la robustez de la generación eléctrica centralizada *vs* la que se realiza cerca de los centros de consumo y en menor escala; también se discute sobre las consecuencias políticas y económicas de que la gestión de la energía esté en manos de grandes corporaciones o del Estado (y en menor medida como tercera vía la gestión comunitaria). Incluso en términos más amplios, se ha cuestionado si los esfuerzos de la llamada transición energética deben enfocarse hacia la electrificación por medios más justos y menos contaminantes, o si la electrificación en sí será prontamente inviable por la cantidad de componentes no-renovables que requiere y los altísimos costos energéticos asociados con la construcción de la infraestructura con la que operan los sistemas.

Ante este panorama, tanto de incertidumbre respecto a cómo cumplir con los criterios de operación óptima del SEN, como de las complicaciones asociadas a la integración de diferentes fuentes intermitentes de generación de energías “renovables” o “limpias”, la GDFV ha mostrado ser un mecanismo a tomar en cuenta, debido a sus características sociales, técnicas, económicas y ambientales.

## **1. Fundamentos teóricos del sistema de evaluación del potencial de instalación de generación distribuida fotovoltaica**

El proceso de jerarquía analítica es una propuesta metodológica para apoyar a la toma de decisiones. Se basa en la integración de información y juicios a partir de la experiencia para estimar magnitudes relativas a través de comparaciones por pares de elementos que han sido previamente identificados como relevantes al objetivo en cuestión. Por la forma en que organiza y opera los elementos, y los criterios que ordenan las comparaciones, la jerarquía permite identificar los principales atributos de una decisión óptima e ilustra la complejidad de las relaciones inherentes a la situación, integrando de manera ordenada factores contextuales que puedan influir con mayor o menor grado en el proceso (Saaty, 1990).

Este método es particularmente útil para ponderar propiedades en las que no existe una escala estándar de medida. Es capaz de tomar en cuenta tanto detalle como se considere necesario para representar minuciosamente los elementos de la decisión en cuestión, a la vez que establece guías para evitar que se pierda sensibilidad ante cambios entre los elementos o criterios que conforman la jerarquía establecida.

Para el sistema de evaluación del potencial de instalación de GDFV se desarrolló una adaptación al método establecido para la toma de decisiones por procesos de jerarquía analítica pues dichos procesos permiten distinguir la importancia de cada elemento que conforma un nivel tanto en su nivel, como en la jerarquía completa.

Estos procesos dan como resultado la identificación de la alternativa preferible a cierta toma de decisiones a partir de comparar alternativas en función de sus atributos y comparar los atributos en si. De ambos niveles de comparación se obtienen escalas integrables entre si para eventualmente poder identificar la alternativa preferible según los valores construidos en las escalas.

A diferencia de la aplicación clásica de procesos de jerarquía analítica, el sistema de evaluación no pretende identificar las UME con mayor potencial según sus atributos, sino permitir la construcción de una escala global que asigne a las distintas alternativas de UME un valor de potencial para posteriormente obtener el potencial total de una región, incluyendo todas las alternativas existentes de UME.

A continuación se presentan los fundamentos del proceso de jerarquía analítica que se emplea como base para el análisis multicriterio del sistema de evaluación del potencial de instalación de GDFV.

### 1.1 Sentido en la construcción de la jerarquía

La estructura está conformada por niveles que permiten reducir un problema de decisión a sus partes constituyentes. Visto de forma vertical (ver figura 5), se comienza de arriba a abajo, estableciendo en el primer nivel el objetivo general de la toma de decisión. El siguiente nivel consta de un conjunto de criterios que deben contemplarse en la evaluación para lograr el cometido del primer nivel. Dichos criterios pueden ser tangibles, medibles y representables dentro de una escala estándar, pero también pueden ser intangibles; para estos últimos no existen escalas, sino percepciones subjetivas.

Los criterios pueden o no requerir de subcriterios. En caso de existir, les corresponderá el siguiente nivel, pues cada nivel debe construirse de tal manera que la comparación entre elementos del mismo nivel sea posible dada su cercanía respecto a un criterio comparativo común. Los elementos de un nivel no necesariamente deben servir de criterio comparativo para todos los elementos de niveles inferiores, por lo cual se dice que la jerarquía no necesita ser completa. Por lo tanto, los subcriterios, en caso de existir, pueden corresponder a todos los criterios del nivel superior, o solo a algunos (o uno).

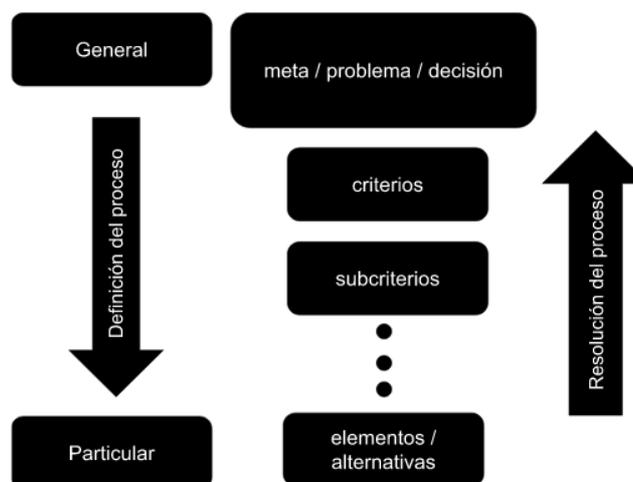


Figura 5: Esquema de la construcción de jerarquías de análisis. Elaboración propia.

Los elementos de carácter global deberán constituir los niveles superiores, mientras que aquellos que puedan caracterizar de forma particular el problema en cuestión refinarán los niveles inferiores.

El proceso para tomar una decisión requiere de muchas elecciones previas respecto a qué criterios, subcriterios y elementos tomar en cuenta para la construcción de la jerarquía. La misma pregunta puede arrojar distintas respuestas dependiendo de los criterios considerados al momento de evaluar las posibles respuestas con este o cualquier otro método. Afortunadamente, este proceso permite visualizar las relaciones que se establecen entre elementos considerados para la toma de decisiones con el fin de comparar no solo los resultados del proceso, sino el proceso de toma de decisiones en sí mismo respecto de otras formas de plantear la misma decisión.

### *1.2 Procesos de resolución*

Tras estructurar el problema como una jerarquía en niveles, es necesario determinar el peso de cada elemento respecto a los otros con los que comparte nivel en función de los elementos en el nivel inmediatamente superior que fungen de criterios de comparación para el nivel inmediatamente subordinado. Para esto se elaboran distintas matrices de  $n \times n$  comparaciones recíprocas, donde  $n$  corresponde al número de elementos a comparar entre sí.

Sea  $[A]$  una matriz de comparación, los valores que pueden asignarse a las  $n \times n$  comparaciones en  $[A]$  se establecen a partir de la escala fundamental de R.W. Saaty (ver tabla 4). Las consideraciones semióticas y de uso de escalas relativas y absolutas que empleó para su elaboración, se pueden consultar en “*Absolute and relative measurement with the AHP. The most livable cities in the United States*”, “*How to make a decision: the analytic hierarchy process*” y “*Models, methods, concepts & applications of the analytic hierarchy process*”, de 1986, 1987 y 2012 respectivamente. Los fundamentos de la elección por pares rebasa el alcance de este trabajo, pues implica estudios de las ramas de psicología, pero puede encontrarse más información en el trabajo de Nicolis, J. S., & Tsuda, I. que retoma el de Miller citado por Saaty en 1990.

La escala numérica utilizada para comparar elementos de un nivel por pares,

indica en cuántas magnitudes es más importante un elemento sobre otro en función del criterio que esté guiando la comparación. (Saaty, 2008).

Valor	Definición	Explicación
1	Igual importancia entre los elementos	Los elementos contribuyen en igual medida al criterio evaluado
3	Moderada importancia de un elemento sobre el otro	La experiencia y el juicio favorecen moderadamente a un elemento sobre el otro respecto al criterio evaluado.
5	Importancia fuerte o esencial de un elemento sobre el otro	La experiencia y el juicio favorecen fuertemente a un elemento sobre el otro respecto al criterio evaluado.
7	Importancia muy fuerte o demostrada de un elemento sobre el otro	Un elemento favorece mucho más el cumplimiento del criterio que otro y está demostrado en la práctica.
9	Importancia extrema de un elemento sobre el otro	La evidencia que favorece a un elemento sobre otro es del más alto orden posible.
2,4,6,8	Valores intermedios	Cuando se necesita matizar entre valores adyacentes.
$a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}}$	Recíprocos	Cuando al elemento $i$ se le asigna uno de los valores arriba indicados al compararlo con el elemento $j$ , entonces $j$ tiene el valor recíproco al compararlo con $i$

Tabla 4: Escala fundamental para procesos de jerarquía analítica. Fuente: Saaty, R., 1990

Estos valores se asignan al comparar por pares elementos de un nivel para establecer las relaciones dentro de la estructura del problema a tratar. Los valores asignados en la comparación se acomodan en la matriz  $[A]$  como se muestra en la tabla 5, de la cual se derivan las escalas radiales o “pesos” entre elementos al momento de calcular el vector principal de la matriz.

criterio $C$	elemento $a$	elemento $b$	...	elemento $n$
elemento $a$	1	importancia de $a$ sobre $b$ respecto a $C$	...	importancia de $a$ sobre $n$ respecto a $C$
elemento $b$	importancia de $b$ sobre $a$ respecto a $C$	1	...	importancia de $b$ sobre $n$ respecto a $C$
...	...	...	...	...
elemento $n$	importancia de $n$ sobre $a$ respecto a $C$	importancia de $n$ sobre $b$ respecto a $C$	...	1

Tabla 5: Estructura de la matriz de comparación entre elementos respecto a criterio . Elaboración propia.

Las propiedades de la matriz de comparación resultantes bajo esta construcción se presentan en la siguiente sección.

### 1.3 Fundamentos matriciales

Sea  $[A] = (a_{ij})$ , donde  $a_{ij}$  es el número de magnitudes que es más importante el elemento  $i$  frente al elemento  $j$  respecto al criterio  $C$ , para todo  $i, j = 1, \dots, n$ . Entonces  $[A]$  es:

- Positiva, pues todos sus elementos son mayores a cero, en específico todo  $a_{ij}$  que pertenezca a  $[A]$  está entre 1/9 y 9.
- Recíproca, pues se satisface la propiedad  $a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}}$  para todo  $a_{ij}$  que pertenezca a  $[A]$

La información contenida en las comparaciones por pares  $a_{ij}$  será recogida por el vector propio de cada matriz de comparación, el cual guarda el orden y escala de prioridades entre los elementos según el objetivo a resolver. Para ilustrar este fenómeno, retomamos el ejemplo dado por Thomas Saaty en *How to make a decision: The Analytic Hierarchy Process*.

Asumamos que nos son dadas  $n$  piedras  $A_1, \dots, A_n$ , cuyos respectivos pesos  $w_1, \dots, w_n$  nos son conocidos. Si formamos la matriz de comparación por pares  $[A]$  en cuyas hileras se enlistan los ratios de pesos de cada piedra con respecto a todas (incluyéndose), tendremos un arreglo del siguiente tipo:

$$\begin{matrix}
 & A_1 & A_2 & \dots & A_n \\
 A_1 & \left( \begin{matrix} w_1/w_1 & w_1/w_2 & \dots & w_1/w_n \end{matrix} \right) \\
 A_2 & \left( \begin{matrix} w_2/w_1 & w_2/w_2 & \dots & w_2/w_n \end{matrix} \right) \\
 \vdots & \left( \begin{matrix} \vdots & \vdots & \dots & \vdots \end{matrix} \right) \\
 A_n & \left( \begin{matrix} w_n/w_1 & w_n/w_2 & \dots & w_n/w_n \end{matrix} \right)
 \end{matrix}$$

Podemos observar que  $[A]$  tiene rango 1 pues cada hilera es producto de la primer hilera por una constante (por ejemplo, basta multiplicar la segunda hilera por la constante  $w_1/w_2$  para obtener la primer hilera). Por lo tanto, todos sus valores propios exceptuando uno, son igual a cero.

La suma de los valores propios de una matriz equivalen a su traza (la suma de los elementos en su diagonal), y en este caso, la traza de  $[A]$  equivale a  $n$  pues todos los elementos de la traza son iguales a 1 (por ser los ratios del peso de cada piedra respecto a si misma  $w_i/w_i$ ). Por lo tanto,  $n$  es el valor propio principal (o más grande) de  $[A]$  (Friedberg, S., 2014).

Habiendo establecido lo anterior, podemos observar que :

$$\begin{matrix} & A_1 & A_2 & \dots & A_n \\ A_1 & \left( \begin{matrix} w_1/w_1 & w_1/w_2 & \dots & w_1/w_n \end{matrix} \right) & & & \\ A_2 & \left( \begin{matrix} w_2/w_1 & w_2/w_2 & \dots & w_2/w_n \end{matrix} \right) & & & \\ \vdots & \left( \begin{matrix} \vdots & \vdots & \dots & \vdots \end{matrix} \right) & & & \\ A_n & \left( \begin{matrix} w_n/w_1 & w_n/w_2 & \dots & w_n/w_n \end{matrix} \right) & & & \end{matrix} \begin{pmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{pmatrix} = n \begin{pmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{pmatrix}$$

por lo que  $w = [w_1, w_2, \dots, w_n]$ , donde  $w_i$  indica el peso de la piedra  $i$ , es el vector propio principal de  $[A]$  el cuál conviene normalizar dividiendo el valor de sus entradas por la suma de las entradas.

Dado que no siempre serán conocidos los “pesos absolutos” de los elementos a comparar, esta relación entre el vector propio de una matriz de comparación por pares y el vector cuyas entradas corresponden a los pesos relativos a cierta propiedad entre los elementos de un grupo a comparar es de gran utilidad. Ante un conjunto de elementos cuya valoración global no esté explícitamente dispuesta en una escala, se podrán construir escalas relativas utilizando juicios o información de otras escalas que correspondan a algunos de los atributos a evaluar de manera que la integración de las escalas corresponda a una escala global.

#### 1.4 Consistencia

Además de positiva y recíproca, la matriz  $[A]$  construida con los pesos conocidos de piedras es consistente, pues una condición suficiente y necesaria para dicha condición es que el valor propio principal de la matriz (al que denotaremos  $l_{max}$ ) sea igual al orden de dicha matriz (Saaty, T., 1990).

Saaty define el índice de consistencia (IC) de la forma  $(l_{max} - n)/(n-1)$ . En caso de que la matriz construida sea inconsistente, se considera el índice aleatorio de

consistencia, resultado de promediar una gran cantidad de matrices recíprocas del mismo orden con entradas aleatorias, y se calcula la razón entre el índice de consistencia de la matriz y el índice aleatorio de consistencia del orden correspondiente. Si la razón es menor a 0.1 (10% o menos según Vargas, L.G., 1982) diremos que la matriz es casi consistente y se toma el vector de prioridades como el vector propio asociado al valor propio más grande de la matriz. Con base en la consistencia o inconsistencia de la matriz se pueden explorar mejoras a los juicios basados en experiencias que se emplean para la comparación de los elementos a partir de un criterio. En el caso de que la razón sea mayor a 0.1 deberá procederse a reevaluar los juicios que dieron lugar a la inconsistencia.

Por ejemplo, al momento de elegir un restaurante a donde ir a comer puede ser abrumador evaluar simultáneamente la distancia al lugar, el costo, que tan saludable es, que tan cómodo es, por nombrar algunos criterios relevantes. Si se tienen 3 alternativas de restaurantes, es posible elaborar cuatro matrices de comparación por pares de los restaurantes en función de los criterios antes descritos (ver tabla 6) y una matriz de comparación entre los criterios mismos para determinar el peso que tiene cada criterio en la decisión final (ver tabla 7).

De cada matriz de comparación por pares entre restaurantes respecto a un criterio se podrá obtener el vector propio que indique el orden y escala de preferencia de cada restaurante frente a cada criterio.

Distancia	A	B	C	Vector de prioridad	Saludable	A	B	C	Vector de prioridad
A	1	6	8	0,754	A	1	5	4	0,673
B	1/6	1	4	0,181	B	1/5	1	1/3	0,101
C	1/8	1/4	1	0,065	C	1/4	3	1	0,226
$l_{max}=3,136$		IC=0,068			$l_{max}=3,086$		IC=0,043		
Costo	A	B	C	Vector de prioridad	Cómodo	A	B	C	Vector de prioridad
A	1	7	1/5	0,233	A	1	1/7	1/5	0,072
B	1/7	1	1/8	0,055	B	7	1	3	0,65
C	5	8	1	0,712	C	5	1/3	1	0,278
$l_{max}=3,247$		IC=0,124			$l_{max}=3,086$		IC=0,043		

Tabla 6: Ejemplo de matrices de comparación por pares de alternativas respecto a criterios. Elaboración propia.

La escala de preferencia global entre los restaurantes contemplados como alternativas se obtendrá creando una matriz en donde las columnas sean los vectores de

preferencia entre restaurantes para cada criterio (habiendo cuidado que cada restaurante ocupara el mismo espacio columna/renglón en todas las matrices de comparación por pares, para que su valor de preferencia ocupe el mismo renglón para todas las columnas de la matriz) y multiplicando dicha matriz por el vector de preferencia de los criterios mismos.

Relevancia	Distancia	Costo	Saludable	Cómodo	Vector de prioridad
Distancia	1	1/5	1	1/2	0,107
Costo	5	1	7	2	0,542
Saludable	1	1/7	1	1/4	0,083
Cómodo	2	1/2	4	1	0,268
$l_{max}=4,041$		IC=0,014			

Tabla 7: Ejemplo de matrices de comparación por pares de criterios. Elaboración propia.

El vector resultante de esta multiplicación de matrices será la escala de preferencia global que indique cuál es el restaurante preferible (en este caso es el C) entre el grupo comparado según la preferencia que se le de a cada criterio a evaluar y cómo cada restaurante sea evaluado frente a los otros para cada criterio.

Integrado	Distancia	Costo	Saludable	Cómodo	Prioridad global
	0,107	0,542	0,083	0,268	
A	0,754	0,233	0,673	0,072	0,282119
B	0,181	0,055	0,101	0,65	0,23176
C	0,065	0,712	0,226	0,278	0,486121

Tabla 8. Composición de la escala global de prioridades. Elaboración propia.

### 1.5 Escala de prioridades compuesta o global

Un problema de decisión puede requerir una jerarquía de múltiples niveles, por lo que el problema deberá seccionarse por niveles. Para cada nivel se construye su matriz de comparación y se calcula su vector de prioridades.

La cantidad de comparaciones que deben realizarse para completar una matriz [A] de  $n$  elementos es:  $n \frac{(n-1)}{2}$ , pues los valores en la diagonal siempre serán 1 al comparar un elemento respecto a si mismo, mientras que la cantidad de matrices a realizar depende de los niveles de la jerarquía y la relación entre elementos de niveles contiguos. Deberá realizarse una matriz de comparación para cada criterio que se integre en la evaluación, además, dicha matriz deberá comparar a los elementos que

representen alternativas posibles sobre las cuales se pueda emitir un juicio sobre su importancia respecto al criterio en cuestión.

La escala global capaz de representar el aporte de cada elemento a la valoración final se calcula como la combinación lineal de las ponderaciones obtenidas en los vectores de prioridades según la jerarquía establecida.

Para el sistema de evaluación del potencial de instalación de GDFV, la diferencia fundamental con la aplicación clásica de los procesos de jerarquía analítica reside en el uso de las escalas relativas de proporción que se generen al comparar criterios, o alternativas de los criterios. En este caso, no se usarán para determinar qué características debe tener el espacio en donde vaya a realizarse la instalación para considerarse *la de mayor potencial de instalación*, sino que se aprovecha la valoración obtenida en las escalas relativas de *todas* las características que puedan tener los espacios instalables para contemplar el potencial *de todas las alternativas* aunque varíen significativamente entre sí.

Dado el tratamiento casuístico para los diferentes sectores socioeconómicos que permite evaluar el sistema elaborado, el desarrollo detallado de las modificaciones a las escalas se aborda a partir de la sección 2.5 de este trabajo.

## **2. Sistema de evaluación del potencial de instalación de generación distribuida fotovoltaica**

El potencial de un sistema de generación se refiere a la capacidad máxima de generación de energía eléctrica bajo condiciones óptimas (Planeas, 2022), como iluminación y temperatura para el caso de un sistema solar fotovoltaico. El potencial de una región determinada se calcula sumando la potencia eléctrica de los distintos sistemas que se encuentren en dicha región. Para diseñar un sistema que permitiera mejorar las estimaciones del potencial de instalación de sistemas de GDFV de una región, se comenzó por definir de qué depende dicho potencial y se estableció como prioridad que el sistema tuviera las siguientes consideraciones:

1. Que permitiera evaluar el potencial de distintas escalas geográficas (manzana, área geoestadística básica, municipio, entidad federativa, territorio nacional).
2. Que funcionara con distintos insumos informáticos, siempre y cuando respete los formatos establecidos de entrada de información.
3. Que los criterios y subcriterios pudieran personalizarse, considerando que es posible que no se quieran evaluar todos los criterios indicados o que se desee hacer múltiples estimaciones tomando en cuenta diferentes criterios.
4. Que ofreciera una variedad de rutas para construir indicadores equivalentes para adaptarse a los insumos existentes o preferibles, e incluso para contrastar los mecanismos de evaluación y evidenciar, ante tomadores de decisiones, las disparidades que pueden resultar de enfoques distintos para la evaluación de una misma región.

La potencia eléctrica ( $W$ ) de un sistema fotovoltaico depende, a grandes rasgos, del tamaño ( $m^2$ ), la eficiencia de los paneles que componen al sistema (%) y la irradiación solar incidente en el panel solar ( $W/m^2$ ). El cálculo teórico se obtiene multiplicando estos tres componentes, pero la potencia real depende de las condiciones climáticas, la estación del año, y otros factores que no suelen considerarse en el cálculo teórico, pero que fueron integrados a los distintos módulos que conforman el sistema.

A los sitios donde es teóricamente posible instalar centrales de GDFV se les nombró unidades mínimas de evaluación (UME). La superficie disponible en las UME sobre la cual puede instalarse un sistema fotovoltaico, se mide en  $m^2$ . La superficie disponible no equivale a la superficie total de las UME pues no toda la infraestructura

es apta para instalación y los usos que se les dan a dichas superficies condicionan su disponibilidad. Por ejemplo, las azoteas de casas y edificios necesitan poder usarse para lavar y secar ropa, los patios de las escuelas para actividades deportivas y recreativas, las calles son usadas para movilidad en diferentes modalidades y los campos agropecuarios no pueden taparse indiscriminadamente con paneles sin importar la actividad principal para la que se destinan, etcétera.

### 2.1 Caracterización de los sectores y las unidades mínimas de evaluación

Las UME se determinaron a partir de los subsistemas a) de información demográfica y social; b) de información económica y c) de información de gobierno, seguridad pública e impartición de justicia de los programas de información de Inegi quedando definidas en función de los sectores socioeconómico detallados en la tabla 4.

<b>Sector</b>	<b>Unidad mínima de evaluación</b>	<b>Notación</b>
Residencial	Vivienda	UR
Agropecuario	Terreno	UA
Comercial y de servicios	Establecimiento	UCS
Industrial	Establecimiento, unidad minera o empresa	UI
Público	Inmueble	UP

*Tabla 9: Unidades mínimas de evaluación por sector socioeconómico. Fuente: Elaboración propia a partir de programas de información de Inegi*

A continuación se describe la diferenciación entre las unidades que conforman estos cinco sectores a partir de sus características físicas, su uso social, las dinámicas económicas que se realizan en el espacio en cuestión.

**Vivienda:** Espacio delimitado generalmente por paredes y techos de cualquier material, con entrada independiente, que se construyó para que la habiten personas, o que al momento del levantamiento censal se utiliza para vivir (Inegi, 2020).

**Terreno:** Superficie continua de tierra, con límites reconocidos por el productor, perteneciente a un solo régimen de tenencia y un mismo tipo de derechos. Para fines de las estadísticas agropecuarias, terreno, predio, parcela, lote y predio rústico, se consideran como sinónimos (Inegi, 2016).

**Establecimiento:** Unidad económica que, en una sola ubicación física, asentada

en un lugar de manera permanente y delimitada por construcciones o instalaciones fijas, combina acciones y recursos bajo el control de una sola entidad propietaria o controladora; se realizan actividades de producción de bienes o compraventa de mercancías o prestación de servicios, sea con fines de lucro o no (Inegi, 2019a). Para las actividades económicas cuyo funcionamiento dista del establecimiento, se emplearon unidades de observación adecuadas a sus condiciones de operación.

Inmuebles: Edificios, locales, construcciones e instalaciones que utiliza el gobierno para el desarrollo de sus actividades, así como las áreas para estacionamiento, esparcimiento, áreas verdes, entre otras.

## 2.2 Particiones subregionales y sectoriales

Se aprovecharon tanto las delimitaciones políticas al interior de la región a evaluar, como los sectores socioeconómicos a los que pertenecen las UME para construir la partición de la región que nos permita evaluar su potencial. Las delimitaciones políticas inducirán las diferentes posibles subregiones sobre las cuales se podrá realizar la evaluación y la disponibilidad de insumos determinará la elección de subregiones óptimas para cada caso.

Sea  $R$  el conjunto que contiene todas las UME en la región a evaluar,

$$R = \{x: x \text{ es una UME en la región}\}$$

$P(R)$  el conjunto potencia de  $R$ ,  $P(R) = \{x: x \subseteq R\}$

$|P(R)|$  la cantidad de subconjuntos posibles de  $R$ ,  $|P(R)| = 2^{|R|}$

Diremos que  $T \subseteq P(R)$  es una partición de  $R$  si:

- el vacío no pertenece a  $T$ :  $\forall t \in T, t \neq \emptyset$ ,
- los elementos de  $T$  son disjuntos a pares:

$$\forall t_1, t_2 \in T \text{ tales que } t_1 \neq t_2 \Rightarrow t_1 \cap t_2 = \emptyset$$

- $T$  cubre a  $R$  (la unión de  $t : t \in T = R$ )

Para cualquier región  $R$  con  $n$  cantidad de UME, diremos que  $|R| = n$  y la cantidad de particiones posibles de  $R$  será el número de Bell de  $n$ :  $B_n$  (Rota, G., 1964)

Dada la naturaleza del número de Bell, y la cantidad de UME en cualquier región, el total de particiones posibles de  $R$  puede ser inmenso, pero la gran mayoría no tendrá un sentido práctico para nuestra evaluación, pues los insumos de información se elaboran por criterios de delimitaciones políticas tales como entidades federativas, municipios, colonias, etcétera, y en programas de información enfocados a sectores socioeconómicos como se enlistan en la tabla 9, por lo que las particiones con las que trabajaremos serán las que tengan sentido en función de los insumos informativos disponibles.

Sea  $P$  una partición en donde cada elemento corresponde a una agrupación de UME que comparten subregión y sector socioeconómico, la suma del potencial de todos los elementos que conforman esta partición corresponderá al potencial de la región.

Por ejemplo, si la región  $R$  corresponde al territorio nacional,  $P$  puede ser la partición que corresponda a la agrupación de las UME en el territorio nacional que pertenezcan a la misma entidad federativa y sector socioeconómico. Si la región a evaluar es una entidad federativa  $P$  puede agrupar las UME presentes en dicha entidad a partir de compartir sector socioeconómico y municipio, áreas geoestadística básicas (AGEB), o cualquier otra forma de partición geográfica que para la cual existan insumos informativos que caractericen a las UME presentes en la región.

Una partición de este tipo permitirá, a su vez, evaluar independientemente el potencial de cada sector socioeconómico presente en la región, o de las distintas subregiones que conforman la región. Bastará sumar el potencial de elementos de dicha partición que sólo compartan subregión o sector socioeconómico

De aquí en adelante, para cualquier partición  $P$  de  $R$ , construida a partir de la agrupación de UME que comparten subregión y sector socioeconómico,  $|P| \leq n \times m$ , con  $n$  la cantidad de subregiones en las que se divida la región y  $m$  la cantidad de sectores socioeconómicos presentes en la región en las que estén agrupadas las UME.

Denotaremos por  $u_{ij} \in P$  al elemento de la partición  $P$  de la región  $R$  que agrupe a las UME que compartan subregión  $i$  y sector socioeconómico  $j$ , con  $i = 1, 2, \dots, n$  y  $j = 1, 2, \dots, m$  para las  $n$  subregiones y  $m$  sectores que conformen la región.

Según la región  $R$  y subregiones  $SR$  elegidas, es posible que para alguna subregión, o incluso la región entera, no existan UME de algún sector socioeconómico, por lo que  $m \leq 5$ .

Por ejemplo, para el caso en donde la región a evaluar sea la Ciudad de México, tomando sus alcaldías como subregiones, hasta el 2016 no existían registros de terrenos agropecuarios para 9 de sus 16 demarcaciones. Dado que existen UME de los otros cuatro sectores en las 16 alcaldías, para este caso  $|P| = 71$ . La partición constará de 71 agrupaciones de UME las cuales podrán sumarse de tal manera que se obtenga el potencial de cada una de las 16 alcaldías, el potencial de cada uno de los 5 sectores (aunque para el agropecuario la suma sea solo del potencial de 7 alcaldías) y el potencial de la región entera como suma del potencial de las 71 agrupaciones de UME.

### *2.3 Módulos de estimación del potencial por criterios técnicos*

La construcción de una partición de la región a evaluar por agrupación de UME que compartan sector socioeconómico y subregión permite refinar el cálculo de superficie disponibles para instalación de sistemas de GDFV en dichas UME, a la vez que permite mayor precisión para los valores de radiación solar por distribución geográfica. Dada la dependencia del cálculo teórico de la potencia eléctrica de un sistema de GDFV al tamaño de dicho sistema y la radiación solar incidente, estas particiones hacen posible maximizar la disgregación de datos, minimizando el riesgo de sobreestimaciones o subestimaciones pues cada UME por definición pertenece sólo a un sector socioeconómico y estará adscrita a solo una subregión.

A continuación se describen los módulos de estimación del potencial bajo criterios técnicos: el de capacidad instalable por superficie (CIS) y el de potencial de instalación técnico (PIT), el cuál está a su vez conformado por cinco submódulos correspondientes a cada sector socioeconómico.

El primero integra la eficiencia de los paneles y la irradiación solar de la región a evaluar para identificar la potencia eléctrica instalable por  $m^2$  para sistemas de GDFV en los distintos sectores socioeconómicos. Esta cifra permite calcular el PIT para cada sector al multiplicar el valor obtenido de la CIS por los metros cuadrados disponibles para instalación de sistemas de GDFV en cada sector, excluyendo las UME con instalación previa.

### 2.3.1 Capacidad instalable por superficie

Sea  $ef_{ij}$  la eficiencia de un panel solar instalable en la subregión  $i$  ( $sr_i$ ) para una UME del sector  $j$  ( $s_j$ ), dado por el porcentaje de energía solar que es capaz de transformar en energía eléctrica a partir de la energía que recibe, a la irradiación solar máxima que recibirá dicho panel se le denotará  $irrsol_i$ , la cual a su vez puede variar de acuerdo a la subregión  $i$  en donde se encuentre dicho panel. Esta variable tendrá unidades de  $W/m^2$ .

Llamaremos  $p_{ij}$  a la capacidad instalable por  $m^2$  de paneles solares en un sistema de GDFV ubicado en una UME en la subregión  $i$  y perteneciente al sector socioeconómico  $j$ . Esta capacidad instalable será el resultado de la eficiencia del panel por la irradiación solar máxima que pueda recibir:  $p_{ij} = ef_{ij} \times irrsol_i$  quedando con unidades de  $W/m^2$ .

El valor de  $ef_{ij}$  es especificado por los fabricantes de paneles en condiciones estándar de medida: irradiación solar de  $1000 W/m^2$ , temperatura de las células fotovoltaicas de  $25^\circ C$  y 1.5 de masa de aire, que refiere a cuánta atmósfera debe atravesar la irradiación.

La irradiación solar no llega a las superficies de modo constante y homogéneo, pues depende de factores astronómicos y ambientales tales como la nubosidad y la humedad, así como de cuestiones estructurales y de entorno por la reflectancia de superficies. La irradiación solar global es aquella que llega a un metro cuadrado de una superficie horizontal y es resultado de la suma de la radiación directa, de la radiación dispersa o difusa y de la radiación reflejada, pudiendo llegar hasta los  $1000 W/m^2$ . La radiación difusa es causada por la dispersión generada por moléculas en la atmósfera,

mientras que la reflejada depende del coeficiente de reflexión de las superficies (también llamado albedo).

La CIS deberá calcularse para cada  $u_{ij}$  que conforme la partición. Para todo  $u_{ij}$  que reciba en algún momento un máximo de irradiación solar incidente de  $1000 W/m^2$  su valor de CIS será  $p_{ij} = ef_{ij} \times 1000 W/m^2$  lo cual corresponde a la potencia eléctrica máxima que puede generar un metro cuadrado de panel solar del sistema de GDFV en determinado momento.

Los elementos que componen la matriz definida como  $CIS = \{p_{ij}: p_{ij} = ef_{ij} \times 1000 W/m^2\}$  permiten calcular el potencial de instalación técnico sectorial para los distintos sectores en una subregión al multiplicar la CIS de cada  $u_{ij}$  por los metros cuadrados disponibles para instalación de sistemas de GDFV en cada sector, excluyendo las UME con instalación previa (Ver tabla 10)

CIS ( $W/m^2$ )	$s_1$	$s_2$	...	$s_m$
$sr_1$	$ef_{11} \times 1000$	$ef_{12} \times 1000$	...	$ef_{1m} \times 1000$
$sr_2$	$ef_{21} \times 1000$	$ef_{22} \times 1000$	...	$ef_{2m} \times 1000$
...	...	...	...	...
$sr_n$	$ef_{n1} \times 1000$	$ef_{n2} \times 1000$	...	$ef_{nm} \times 1000$

Tabla 10: Capacidad instalable por superficie. Fuente: Elaboración propia

Los insumos requeridos para calcular la matriz CIS son entonces la matriz de eficiencia  $EF = \{ef_{ij}\}$  y el vector de irradiación solar  $IRRSOL = \{irrsol_i\}$ . El valor de la eficiencia puede variar por subregión y/o sector pues la disponibilidad de la tecnología y los costos varían geográficamente y la diferencia en costos también limita el acceso a ciertos paneles a UME con mayor capacidad adquisitiva (ver tabla 11).

$EF$	$s_1$	$s_2$	...	$s_m$	$IRRSOL$
$sr_1$	$ef_{11}$	$ef_{12}$	...	$ef_{1m}$	$irrsol_1$
$sr_2$	$ef_{21}$	$ef_{22}$	...	$ef_{2m}$	$irrsol_2$
...	...	...	...	...	...
$sr_n$	$ef_{n1}$	$ef_{n2}$	...	$ef_{nm}$	$irrsol_n$

Tabla 11: Entradas de eficiencia e irradiación solar para el cálculo de la matriz CIS. Fuente: Elaboración propia

La información respecto a la eficiencia de los paneles por región y sector es poca y se encuentra dispersa. Sin embargo, actualmente, existen fichas técnicas de paneles con eficiencia de hasta 22.8%, aunque la mayoría de los sistemas reportan fichas de entre 19% y 21%, por lo que esos serán los rangos esperados. Respecto a la irradiación solar, existen programas de información con distintos grados de disgregación geográfica y temporal que permiten asignar este valor a cualquier región en el territorio mexicano.

### *2.3.2 Potencial de instalación técnico (PIT)*

Tras identificar las UME para cada sector y determinar la capacidad instalable por  $m^2$  y la energía generable al día por  $m^2$  disgregadas por subregión y sector socioeconómico, fue posible plantear la metodología para el cálculo del potencial de instalación técnico de cada sector socioeconómico. Se establecieron como criterios la disponibilidad de superficie de las UME que conforman cada sección y se excluyeron las UME con instalación previa de sistemas de GDFV. Para cada sector se definieron dos opciones para atender la disponibilidad de insumos. La primera opción requiere de información disgregada respecto a la superficie que ocupan las UME de cada sector, mientras que la segunda funciona a partir de la asignación de un valor de capacidad instalable aproximada por UME según el sector evaluado.

#### *Potencial de instalación técnico del sector residencial*

Al quedar la vivienda como la UME del sector residencial, se estudiaron los insumos existentes en materia de caracterización de las viviendas en México, buscando las fuentes que tuvieran la información con mayor granularidad espacial y que aportaran información respecto a la superficie de las viviendas y la existencia de instalación previa de sistemas fotovoltaicos.

Se seleccionó el cuestionario ampliado del Censo de Población y Vivienda 2020 para establecer el formato en que debe estar estructurado el insumo informativo. Es decir, no es necesario utilizar este insumo, pero la metodología propuesta se elaboró en función del formato de dicho insumo y requiere que la información empleada para esta estimación tenga un formato congruente.

Se optó por este formato pues, a pesar de que existen variables similares en otros programas de información, como el censo mismo o diferentes encuestas especiales (de periodicidad no regular), se consideró que esta fuente cumplía con los criterios para establecer los cálculos necesarios para los potenciales técnicos, además de contar con otras variables con información crucial para el refinamiento de los potenciales técnicos del sector.

La variable TOTCUART corresponde al total de cuartos reportados por vivienda, incluida la cocina. Al contrastar los datos de este programa de información con la relación entre cuartos por vivienda y tamaño de la construcción de la Encuesta Nacional de Viviendas (ENVI) 2020 y las cuatro categorías en las que distingue en tamaño de vivienda se encontró la siguiente relación:

<b>Grupo</b>	<b>Superficie por grupo</b>	<b>Cuartos</b>	<b>Promedio de <math>m^2</math> por grupo</b>
1	hasta $55 m^2$	1	$39,01 m^2$
2	$56-100 m^2$	2-3	$72,34 m^2$
3	$101-150 m^2$	4-5	$120,66 m^2$
4	más de $150 m^2$	6 o más	$188,77 m^2$

*Tabla 12: Equivalencias entre número de cuartos y promedio de superficie de viviendas. Fuente: ENVI 2020*

Dado que el cuestionario ampliado del censo de población y vivienda 2020 no contiene información sobre el tamaño de las viviendas por  $m^2$ , pero sí por cantidad de cuartos, se utilizó la relación encontrada en la ENVI 2020 para determinar los cuatro grupos en los cuales se disgregaron las viviendas en función de su superficie promedio.

La variable PANEL\_SOLAR indica si la vivienda cuenta con instalación previa de sistemas fotovoltaicos. Dado que no existe información respecto al tamaño de los sistemas fotovoltaicos en viviendas, se decidió excluir a las viviendas que ya contarán con instalación previa en los cálculos de potenciales técnicos. Por último, FACTOR corresponde al factor de expansión, que permite estimar el total de viviendas respecto al cual se calcularán los porcentajes que correspondan a las viviendas de diferentes tamaños y con instalación previa.

Con estas variables se establecieron dos métodos de cálculo para cada potencial técnico adaptados a la información disponible para el sector residencial al nivel geográfico definido para las subregiones.

El primer método requiere información respecto a:

- el total de viviendas por subregión:  $UR_i^{Tot}$
- el porcentaje de viviendas por subregión que corresponden a cada grupo de tamaño de viviendas:  $UR_i^g$
- el porcentaje de superficie instalable en función del tamaño de la vivienda:  $UR_i^{SIg}$
- la proporción de viviendas por subregión de cada grupo de tamaño que cuenten con instalación previa:  $UR_i^{IPg}$
- la superficie promedio de cada grupo de viviendas por subregión:  $UR_i^{SPg}$

utilizando el índice  $g = 1, \dots, 4$  de acuerdo con los grupos de tamaño indicados en la tabla 12 y el índice  $i = 1, \dots, n$  para las  $n$  subregiones que conforman la región a evaluar. Debido a que las viviendas son las UME del sector residencial, se indicarán con las iniciales  $UR$ .

Al porcentaje de viviendas que corresponda a cada grupo deberá restarse el porcentaje de viviendas de dicho grupo que cuenten con instalación previa. El resultado se multiplicará por la superficie promedio de construcción de cada grupo de viviendas y por el porcentaje de superficie instalable para viviendas de ese grupo. Este valor se multiplicará por el total de viviendas en la subregión para obtener los  $m^2$  instalables para el sector residencial en la subregión.

El valor obtenido de superficie instalable para el sector residencial de cada subregión se multiplicará por el valor de la capacidad instalable por  $m^2$  de  $UR$  correspondiente a la subregión para obtener los  $W$  de capacidad instalables en el total de viviendas de la subregión. La suma del resultado de este cálculo para todas las subregiones nos dará el valor del potencial técnico de instalación en la región para el sector residencial.

*Cálculo del potencial técnico de instalación del sector residencial como suma de la capacidad instalable en  $W$  por superficie de viviendas, con criterio de exclusión de viviendas con instalación previa:*

$$PTI_{UR}^{Sup} = \sum_{i=1}^n (\sum_{g=1}^4 (UR_i^g \times (1 - UR_i^{IPg}) \times UR_i^{SPg} \times UR_i^{SIg}) \times p_{i1} \times UR_i^{Tot})$$

El segundo método de cálculo del potencial técnico de instalación para el sector residencial está pensado para regiones que no cuentan con información sobre el tamaño de las viviendas. En este caso será necesario asignar un valor de capacidad instalable aproximada (CIA) para viviendas de las distintas subregiones. Además del total de viviendas por subregión, este método requiere información sobre:

- la proporción de viviendas en la subregión que cuenten con instalación previa:  $UR_i^{IP}$
- la capacidad instalable aproximada que se determine para las viviendas en cada subregión:  $UR_i^{CIA}$

Al total de viviendas por subregión se le restará las viviendas en la subregión que cuentan con instalación previa. Posteriormente se multiplicará el valor obtenido por la capacidad instalable aproximada que se asigne a las viviendas. La suma de este valor para todas las subregiones nos dará el valor del potencial técnico de instalación del sector residencial en la región.

*Cálculo del potencial técnico de instalación del sector residencial como suma de la capacidad instalable aproximada en  $W$ , con criterio de exclusión de viviendas con instalación previa:*

$$PTI_{UR}^{CIA} = \sum_{i=1}^n UR_i^{Tot} \times (1 - UR_i^{IP}) \times UR_i^{CIA}$$

Variable	$UR^{Tot}$	$UR^{CIA}$	$UR^{IP}$
Unidad	viviendas	$W$	%
Descripción	viviendas por subregión	CIA en viviendas por subregión	viviendas en la subregión con instalación previa
$sr_1$	$UR_1^{Tot}$	$UR_1^1$	$UR_1^{IP_1}$
$sr_2$	$UR_2^{Tot}$	$UR_2^1$	$UR_2^{IP_1}$
...	...	...	...
$sr_n$	$UR_n^{Tot}$	$UR_n^1$	$UR_n^{IP_1}$

*Tabla 13: Insumos para cálculo de potencial de instalación por capacidad instalable aproximada. Elaboración propia*

Variable	$UR^{Tot}$	$UR^g$				$UR^{IPg}$			
Notación por tamaño de viviendas		$UR^1$	$UR^2$	$UR^3$	$UR^4$	$UR^{IP_1}$	$UR^{IP_2}$	$UR^{IP_3}$	$UR^{IP_4}$
Unidad	viviendas	%	%	%	%	%	%	%	%
Descripción	viviendas por subregión	viviendas del grupo 1	viviendas del grupo 2	viviendas del grupo 3	viviendas del grupo 4	viviendas del grupo 1 con IP	viviendas del grupo 2 con IP	viviendas del grupo 3 con IP	viviendas del grupo 4 con IP
$sr_1$	$UR_1^{Tot}$	$UR_1^1$	$UR_1^2$	$UR_1^3$	$UR_1^4$	$UR_1^{IP_1}$	$UR_1^{IP_2}$	$UR_1^{IP_3}$	$UR_1^{IP_4}$
$sr_2$	$UR_2^{Tot}$	$UR_2^1$	$UR_2^2$	$UR_2^3$	$UR_2^4$	$UR_2^{IP_1}$	$UR_2^{IP_2}$	$UR_2^{IP_3}$	$UR_2^{IP_4}$
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
$sr_n$	$UR_n^{Tot}$	$UR_n^1$	$UR_n^2$	$UR_n^3$	$UR_n^4$	$UR_n^{IP_1}$	$UR_n^{IP_2}$	$UR_n^{IP_3}$	$UR_n^{IP_4}$

Tabla 14: Insumos para cálculo de potenciales de instalación por tamaño de las viviendas. IP: instalación previa Elaboración propia.

Variable	$UR^{SPg}$				$UR^{SIg}$				$p_{i1}$
Notación por tamaño de viviendas	$UR^{SP_1}$	$UR^{SP_2}$	$UR^{SP_3}$	$UR^{SP_4}$	$UR^{SI_1}$	$UR^{SI_2}$	$UR^{SI_3}$	$UR^{SI_4}$	
Unidad	$m^2$	$m^2$	$m^2$	$m^2$	%	%	%	%	W/m <sup>2</sup>
Descripción	superficie promedio de viviendas del grupo 1	superficie promedio de viviendas del grupo 2	superficie promedio de viviendas del grupo 3	superficie promedio de viviendas del grupo 4	superficie instalable en viviendas del grupo 1	superficie instalable en viviendas del grupo 2	superficie instalable en viviendas del grupo 3	superficie instalable en viviendas del grupo 4	capacidad instalable por $m^2$ en viviendas
$sr_1$	$UR_1^{SP_1}$	$UR_1^{SP_2}$	$UR_1^{SP_3}$	$UR_1^{SP_4}$	$UR_1^{SI_1}$	$UR_1^{SI_2}$	$UR_1^{SI_3}$	$UR_1^{SI_4}$	$p_{11}$
$sr_2$	$UR_2^{SP_1}$	$UR_2^{SP_2}$	$UR_2^{SP_3}$	$UR_2^{SP_4}$	$UR_2^{SI_1}$	$UR_2^{SI_2}$	$UR_2^{SI_3}$	$UR_2^{SI_4}$	$p_{21}$
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
$sr_n$	$UR_3^{SP_1}$	$UR_3^{SP_2}$	$UR_3^{SP_3}$	$UR_3^{SP_4}$	$UR_3^{SI_1}$	$UR_3^{SI_2}$	$UR_3^{SI_3}$	$UR_3^{SI_4}$	$p_{31}$

Tabla 15: Insumos para cálculo de potenciales de instalación por tamaño de las viviendas. SP: superficie promedio. SI: superficie instalable. Elaboración propia.

### *Potencial de instalación técnico del sector agropecuario*

Para el desarrollo de los potenciales técnicos del sector agropecuario, se trabajó con los siguientes tabulados de la actualización del marco censal agropecuario 2016:

- Número de terrenos y superficie total según *tenencia de la tierra* por entidad federativa y municipio
- Número de terrenos y superficie total según *derechos sobre la tierra* por entidad federativa y municipio
- Número de terrenos y superficie total según *actividad principal* por entidad federativa y municipio

Por la magnitud de las superficies correspondientes a las unidades que conforman el sector agropecuario, se corría el riesgo de perder información respecto a la distribución de tamaños de los terrenos si sólo se promediaba la superficie correspondiente al sector agropecuario en una subregión entre el número de terrenos reportados, pues nada garantiza la homogeneidad de sus tamaños.

Para estudiar la distribución de tamaños de los terrenos, y por lo tanto de la superficie disponible para instalación en unidades del sector agropecuario, se decidió integrar contrastes de la información reportada en función de la tenencia de los terrenos, los derechos sobre la tierra y la actividad principal.

- La tenencia de la tierra corresponde a las formas de propiedad reconocidas por la ley en las que una persona o un grupo de personas poseen la tierra o disponen de ella. Las modalidades pueden ser: ejidal, comunal, privada, de colonia agrícola o pública.
- Los derechos sobre la tierra se refieren a la situación que guardan los terrenos y pueden ser: propiedad del productor, rentados, tomados a medias (o en aparcería), prestados, concesionados o en posesión.
- La actividad principal es aquella que se considera la más importante por reportar los mayores ingresos, por ejemplo: agricultura, ganadería, forestal, sin actividad u otras.

Así, para la misma subregión se puede contrastar el promedio de superficie de los terrenos agrupados en las particiones correspondientes a tenencia, derechos sobre la tierra o actividad principal con el promedio de superficie de terrenos calculado a partir del total de superficie agropecuaria en una subregión entre el total de terrenos.

Dado que todo terreno tiene reportado simultáneamente alguna modalidad de tenencia, alguna modalidad de derechos sobre la tierra y alguna modalidad de actividad principal, afirmamos que representan tres particiones de las unidades agropecuarias en cada región respectivamente. Llamaremos:

$TEN_i = \{ten_i: ten_i = \{\text{terrenos en la subregión } i \text{ que pertenecen a la modalidad de tenencia } t\}\}$

con  $t = ejidal, comunal, privada, colonia agrícola, pública o no se sabe$

$DT_i = \{dt_i: dt_i = \{\text{terrenos en la subregión } i \text{ que tienen derechos sobre la tierra } d\}\}$

con  $d = propio, rentado, tomado a medias (o en aparcería), prestado, concesionado en posesión o no se sabe$

$AP_i = \{ap_i: ap_i = \{\text{terrenos en la subregión } i \text{ con actividad principal } a\}\}$

con  $a = agricultura, ganadería, forestal, sin actividad u otra$

Aun perteneciendo al mismo elemento de la partición y, por lo tanto, a la misma modalidad de tenencia, derechos o actividad principal en una subregión, pueden existir terrenos con superficies muy dispares. Sin embargo, se asume que la similitud en tenencia, derechos sobre la tierra o actividad principal de terrenos en una subregión contribuye a homogeneizar sus características, como ocurre con su superficie.

No se identificó ninguna fuente de información relevante que contabilizara la instalación previa de sistemas fotovoltaicos en terrenos agropecuarios para ninguna escala geográfica, por lo que los terrenos con instalación previa se contemplan con el mismo criterio de exclusión que en el cálculo del sector residencial.

Para el cálculo de la capacidad instalable por unidades agropecuarias en una subregión se requiere información de:

- Porcentaje de superficie instalable por terreno en la subregión:  $UA_i^{SIpm}$
- Total de terrenos por subregión:  $UA_i^{Tot}$

- Porcentaje de terrenos que conforman las distintas particiones a evaluar por subregión:  $UA_i^{Pm}$
- Porcentaje de terrenos que conforman las distintas particiones a evaluar por subregión que cuentan con instalación previa:  $UA_i^{IPm}$
- Superficie promedio de los terrenos que conforman las distintas particiones a evaluar por subregión:  $UA_i^{SPm}$

En donde el índice  $Pm$  sirve para diferenciar estos valores para las particiones a comparar con  $P = \{1,2,3,4\}$  de acuerdo con las particiones utilizadas para contrastar el promedio de superficies (total, tenencia, derechos sobre la tierra y actividad principal) y  $m$  corresponde a las modalidades de terrenos presentes en cada una de estas particiones sobre las subregiones  $i$ .

Si se establece el orden de las modalidades  $m$  para cada partición de la siguiente manera:

$1m = total\ de\ terrenos$

$2m = ejidal, comunal, privada, colonia\ agrícola, pública, nosesabe$

$3m = propio, rentado, amedias, prestado, concesionado, enposesión, nosesabe$

$4m = agricultura, ganadería, forestal, sinactividad, otra$

$P_i m_{min}$  la primer modalidad presente en la partición  $P$  de la subregión  $i$

$P_i m_{max}$  la última modalidad presente en la partición  $P$  de la subregión  $i$

$P_i m_{tot}$  total de modalidades presente en la partición  $P$  de la subregión  $i$

$|1_i m_{tot}| = 1$  para la partición por total de terrenos de las subregiones  $i$

$|2_i m_{tot}| \leq 6$  para la partición por tenencia de los terrenos de las subregiones  $i$

$|3_i m_{tot}| \leq 7$  para la partición por derechos sobre la tierra de los terrenos en las subregiones  $i$

$|4_i m_{tot}| \leq 5$  para la partición por actividad principal de terrenos de las subregiones  $i$ .

La desigualdad se debe a que es posible que en una subregión la partición no incluya alguna modalidad debido a que no se registren terrenos con dicha modalidad.

La superficie de las unidades agropecuarias puede llegar a ser de tal tamaño que es posible instalar sistemas fotovoltaicos que rebasen el límite de 0.5 MW marcado por ley. Si el porcentaje de superficie que se considera instalable en una subregión  $i$ ,  $(UA_i^{SIp})$ , rebasa la capacidad instalada máxima, se les asignará a los terrenos de esa subregión el máximo instalable (0.5 MW), aunque la superficie requerida para dicha instalación sea menor al porcentaje de superficie instalable que se considera viable para la coexistencia con las actividades a las que se destinan los terrenos.

El potencial de instalación del sector agropecuario en una región calculado con el promedio de la superficie total de terrenos entre el total de terrenos en las subregiones  $(PTI_{UA}^{Tot})$ , será la suma de la capacidad instalable en sus subregiones. Esta capacidad será el producto del total de terrenos en la subregión  $(UA_i^{Tot})$ , menos el porcentaje de terrenos que reportan instalación previa  $(UA_i^{IP11})$ , por la capacidad instalable por terreno.

La capacidad instalable por terreno se obtiene multiplicando el porcentaje de la superficie instalable por terreno en la subregión  $(UA_i^{SI11})$ , por la superficie promedio por terreno en la subregión  $(UA_i^{SP11})$ , para obtener la superficie instalable por terreno y, posteriormente, multiplicando este valor por la capacidad instalable por  $m^2$  que corresponda a las unidades agropecuarias de la subregión  $(p_{i2})$ .

En caso de que la capacidad instalable por terreno sea mayor a 0.5 MW, se asignará este valor como la capacidad instalable por terreno para respetar el límite marcado por ley para la generación distribuida.

*Potencial técnico de instalación del sector agropecuario como suma de la capacidad instalable en W por subregiones, calculado por promedio de superficie del total de terrenos en las subregiones, con criterio de exclusión de terrenos con instalación previa:*

$$PTI_{UA}^{Tot} = \sum_{i=1}^n UA_i^{Tot} \times (1 - UA_i^{IP11}) \times \text{Min} \left( 0.5MW, UA_i^{SP11} \times UA_i^{SI11} \times p_{i2} \right)$$

El procedimiento para calcular el potencial de instalación del sector agropecuario en una región utilizando los promedios de superficie de terrenos de las distintas modalidades de tenencia obtenidos al dividir la superficie de terrenos de las distintas modalidades de tenencia entre la cantidad de terrenos de dichas modalidades en las subregiones será el siguiente:

- Se calculará la capacidad instalable en las subregiones y se definirá el potencial de instalación por tenencia de la región como la suma de estas capacidades subregionales.
- La capacidad instalable subregional será el producto de cuatro valores
  - 1) el total de terrenos en la subregión:  $UA_i^{Tot}$ ,
  - 2) el porcentaje de terrenos que corresponden a cada modalidad de tenencia:  $UA_i^{2m}$
  - 3) el porcentaje de terrenos que corresponden a cada modalidad de tenencia que reportan instalación previa:  $UA_i^{IP_{2m}}$
  - 4) la capacidad instalable por terrenos de distintas tenencias la cual a su vez se obtiene multiplicando tres valores:
    - la superficie promedio de los terrenos de las distintas modalidades de tenencia en la subregión:  $UA_i^{SP_{2m}}$
    - el porcentaje de la superficie instalable de terrenos de las distintas modalidades de tenencia en la subregión:  $UA_i^{SI_{2m}}$
    - la capacidad instalable por  $m^2$  que corresponda a los terrenos de la subregión:  $p_{i2}$ .

En caso de que el resultado de este producto, es decir, la capacidad instalable por terreno de cualquier modalidad de tenencia, sea mayor a 0.5 MW, se asignará este valor como la capacidad instalable por terreno de las respectivas modalidades de tenencia para respetar el límite marcado por ley para la generación distribuida.

Para las variables indicadas arriba  $i = 1, \dots, n$  para las  $n$  subregiones que conforman a la región,  $2m$  corresponde al índice  $Pm$  que indica la partición utilizada en las subregiones  $i$  y sus respectivas modalidades (en este caso la tenencia es la segunda partición establecida y por lo tanto  $P = 2$ ) y los subíndices de la variable  $p_{i2}$  corresponden a la subregión  $i$  que se esté evaluando y al sector  $j$  (en este caso el sector agropecuario se estableció como  $j = 2$ ).

Potencial técnico de instalación del sector agropecuario como suma de la capacidad instalable en W por subregiones, calculado por promedio de superficies de terrenos de las distintas modalidades de tenencia en las subregiones, con criterio de exclusión de terrenos con instalación previa:

$$PTI_{UA}^{Ten} = \sum_{i=1}^n \sum_{m=m_{min}}^{m_{max}} UA_i^{Tot} \times UA_i^{2m} \times (1 - UA_i^{IP_{2m}}) \times \text{Min} \left( 0.5MW, UA_i^{SP_{2m}} \times UA_i^{SI_{2m}} \times p_{i2} \right)$$

Como ya se mencionó, dado a que es posible que en una subregión no existan terrenos de alguna modalidad de tenencia  $|m_{tot}| \leq 6$  para la evaluación del potencial de instalación por tenencia de la tierra

El cálculo para la evaluación por derechos de la tierra y actividad principal en el terreno son idénticos en estructura, adaptados a la partición correspondiente

Potencial técnico de instalación del sector agropecuario como suma de la capacidad instalable en W por subregiones, calculado por promedio de superficies de terrenos de las distintas modalidades de derechos sobre la tierra en las subregiones, con criterio de exclusión de terrenos con instalación previa:

$$PTI_{UA}^{DT} = \sum_{i=1}^n \sum_{m=m_{min}}^{m_{max}} UA_i^{Tot} \times UA_i^{3m} \times (1 - UA_i^{IP_{3m}}) \times \text{Min} \left( 0.5MW, UA_i^{SP_{3m}} \times UA_i^{SI_{3m}} \times p_{i2} \right)$$

$$|m_{tot}| \leq 7$$

Potencial técnico de instalación del sector agropecuario como suma de la capacidad instalable en W por subregiones, calculado por promedio de superficies de terrenos de las distintas modalidades de actividad principal del terreno en las subregiones, con criterio de exclusión de terrenos con instalación previa:

$$PTI_{UA}^{AP} = \sum_{i=1}^n \sum_{m=m_{min}}^{m_{max}} UA_i^{Tot} \times UA_i^{4m} \times (1 - UA_i^{IP_{4m}}) \times \text{Min} \left( 0.5MW, UA_i^{SP_{4m}} \times UA_i^{SI_{4m}} \times p_{i2} \right)$$

$$|m_{tot}| \leq 5$$

Por último, es posible que no se tenga información sobre el tamaño promedio de los terrenos en una subregión y solo se sepa el total de terrenos, por lo que el cálculo del potencial técnico de instalación por capacidad instalable aproximada ( $PTI_{UA}^{CIA}$ ), será la suma de las capacidades instalables a nivel subregional, las cuales a su vez serán el producto del total de terrenos por subregión ( $UA_i^{Tot}$ ), menos el porcentaje de terrenos en la subregión con instalación previa ( $UA_i^{IP_{11}}$ ), por la capacidad instalable aproximada

por terreno de cada subregión ( $UA_i^{CIA}$ ), la cual deberá ser menor a  $0.5MW$ .

$$PTI_{UA}^{CIA} = \sum_{i=1}^n UA_i^{Tot} \times (1 - UA_i^{IP11}) \times UA_i^{CIA}$$

Variable	$UA^{Tot}$	$UA^{IP}$	$UA^{CIA}$
Unidad	terrenos	%	$W$
Descripción	terrenos por subregión	% de terrenos en la subregión con instalación previa	Capacidad instalable aproximada en terrenos por subregión
$sr_1$	$UR_1^{Tot}$	$UA_1^{IP}$	$UA_1^{CIA}$
$sr_2$	$UR_2^{Tot}$	$UA_2^{IP}$	$UA_2^{CIA}$
...	...	...	...
$sr_n$	$UR_n^{Tot}$	$UA_n^{IP}$	$UA_n^{CIA}$

Tabla 16: Insumos para cálculo del potencial de instalación por capacidad instalable aproximada en terrenos. Elaboración propia.

Variable	$UA^{Tot}$	$UA^{Pm}$				$UA^{IPm}$			
Valor de $P$		1:Total	2:Tenencia	3:Derechos sobre la tierra	4:Actividad principal	1:Total	2:Tenencia	3:Derechos sobre la tierra	4:Actividad principal
Notación por partición $P$		$UA^{1m}$	$UA^{2m}$	$UA^{3m}$	$UA^{4m}$	$UA^{IP1m}$	$UA^{IP2m}$	$UA^{IP3m}$	$UA^{IP4m}$
Valores de $m$ para cada $P$		1:todos los terrenos	1:ejidal, 2:comunal, 3:privada, 4:col.agrícola, 5:pública, 6:no se sabe	1:propio 2:rentado 3:amedias 4:prestado 5:concesionado 6:en posesión 7:nosesabe	1:agricultura 2:ganadería 3:forestal 4:sin actividad 5:otra	1:todos los terrenos	1:ejidal, 2:comunal, 3:privada, 4:col.agrícola, 5:pública, 6:no se sabe	1:propio 2:rentado 3:amedias 4:prestado 5:concesionado 6:en posesión 7:nosesabe	1:agricultura 2:ganadería 3:forestal 4:sin actividad 5:otra
Unidad	terrenos	%	%	%	%	%	%	%	%
Descripción	terrenos por subregión	total de terrenos	terrenos de cada modalidad $m$ de tenencia	terrenos de cada modalidad $m$ de derechos sobre la tierra	terrenos de cada modalidad $m$ de actividad principal	terrenos con IP	terrenos de cada modalidad $m$ de tenencia con IP	terrenos de cada modalidad $m$ de derechos sobre la tierra con IP	terrenos de cada modalidad $m$ de actividad principal con IP
$sr_1$	$UA_1^{Tot}$	$UA_1^{1m}$	$UA_1^{2m}$	$UA_1^{3m}$	$UA_1^{4m}$	$UA_1^{IP1m}$	$UA_1^{IP2m}$	$UA_1^{IP3m}$	$UA_1^{IP4m}$
$sr_2$	$UA_2^{Tot}$	$UA_2^{1m}$	$UA_2^{2m}$	$UA_2^{3m}$	$UA_2^{4m}$	$UA_2^{IP1m}$	$UA_2^{IP2m}$	$UA_2^{IP3m}$	$UA_2^{IP4m}$
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
$sr_n$	$UA_n^{Tot}$	$UA_n^{1m}$	$UA_n^{2m}$	$UA_n^{3m}$	$UA_n^{4m}$	$UA_n^{IP1m}$	$UA_n^{IP2m}$	$UA_n^{IP3m}$	$UA_n^{IP4m}$

Tabla 17: Insumos para cálculo del potencial de instalación por promedio de superficies de terrenos. Elaboración propia

Variable	$UA^{SP_{Pm}}$				$UA^{SI_{Pm}}$				$p_{i2}$
Valor de $P$	1:Total	2:Tenencia	3:Derechos sobre la tierra	4:Actividad principal	1:Total	2:Tenencia	3:Derechos sobre la tierra	4:Actividad principal	
Notación por partición $P$	$UA^{SP_{1m}}$	$UA^{SP_{2m}}$	$UA^{SP_{3m}}$	$UA^{SP_{4m}}$	$UA^{SI_{1m}}$	$UA^{SI_{2m}}$	$UA^{SI_{3m}}$	$UA^{SI_{4m}}$	
Valores de $m$ para cada $P$	1: todos los terrenos	1:ejidal, 2:comunal, 3:privada, 4:col.agrícola, 5:pública, 6:no se sabe	1:propio 2:rentado 3:amedias 4:prestado 5:concesionado 6:en posesión 7:nosesabe	1:agricultura 2:ganadería 3:forestal 4:sin actividad 5:otra	1: todos los terrenos	1:ejidal, 2:comunal, 3:privada, 4:col.agrícola, 5:pública, 6:no se sabe	1:propio 2:rentado 3:amedias 4:prestado 5:concesionado 6:en posesión 7:nosesabe	1:agricultura 2:ganadería 3:forestal 4:sin actividad 5:otra	
Unidad	$m^2$	$m^2$	$m^2$	$m^2$	%	%	%	%	$\frac{W}{m^2}$
Descripción	superficie promedio de los terrenos	superficie promedio de los terrenos de cada modalidad $m$ de tenencia	superficie promedio de los terrenos de cada derechos sobre la tierra	superficie promedio de terrenos de cada actividad principal	superficie instalable en terrenos	superficie instalable en terrenos de modalidad $m$ de tenencia	superficie instalable en terrenos de cada derechos sobre la tierra	superficie instalable en terrenos de cada actividad principal	Capacidad instalable por $m^2$ en terrenos
$sr_1$	$UA_1^{SP_{1m}}$	$UA_1^{SP_{2m}}$	$UA_1^{SP_{3m}}$	$UA_1^{SP_{4m}}$	$UA_1^{SI_{1m}}$	$UA_1^{SI_{2m}}$	$UA_1^{SI_{3m}}$	$UA_1^{SI_{4m}}$	$p_{12}$
$sr_2$	$UA_2^{SP_{1m}}$	$UA_2^{SP_{2m}}$	$UA_2^{SP_{3m}}$	$UA_2^{SP_{4m}}$	$UA_2^{SI_{1m}}$	$UA_2^{SI_{2m}}$	$UA_2^{SI_{3m}}$	$UA_2^{SI_{4m}}$	$p_{22}$
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
$sr_n$	$UA_n^{SP_{1m}}$	$UA_n^{SP_{2m}}$	$UA_n^{SP_{3m}}$	$UA_n^{SP_{4m}}$	$UA_n^{SI_{nm}}$	$UA_n^{SI_{2m}}$	$UA_n^{SI_{3m}}$	$UA_n^{SI_{4m}}$	$p_{32}$

Tabla 18: Insumos para cálculo del potencial de instalación por promedio de superficies de terrenos. Elaboración propia

### *Potencial de instalación técnico del sector comercial y de servicios*

Para evaluar los potenciales técnicos del sector comercial y de servicios se trabajó con datos abiertos de los *censos económicos 2019* por entidad federativa. El sector comercial y de servicios está conformado por los subsectores económicos dedicados a actividades relacionadas con:

1. Comercio al por mayor
2. Comercio al por menor
3. Transportes, correos y almacenamiento
4. Información en medios masivos
5. Servicios financieros y de seguros
6. Servicios inmobiliarios y de alquiler de bienes muebles e intangibles
7. Servicios profesionales, científicos y técnicos
8. Servicios corporativos
9. Servicios de apoyo a los negocios y manejo de residuos, y servicios de remediación.
10. Servicios educativos
11. Servicios de salud y de asistencia social
12. Servicios de esparcimiento culturales y deportivos, y otros servicios recreativos
13. Servicios de alojamiento temporal y de preparación de alimentos y bebidas
14. Otros servicios excepto actividades gubernamentales

Las unidades enfocadas a estas actividades económicas se distribuyen en cinco estratos dependiendo de la cantidad de personas ocupadas en la unidad económica:

1. 0-10 personas
2. 11-50 personas
3. 51-250 personas
4. 251 y más personas
5. Estratos agrupados debido al principio de confidencialidad.

Dado que no se encontraron datos sobre el tamaño de las unidades económicas, los estratos se utilizaron para orientar el cálculo por superficie instalable al ser una aproximación al tamaño de las unidades y por lo tanto, de la superficie disponible para instalación.

Sea  $UCS_i = \{ucs_i: ucs_i \text{ sea una unidad comercial y de servicios en la subregión } i\}$ , toda  $ucs_i$  pertenece a un subsector económico  $sb$  y a un estrato  $st$ , por lo que se puede generar una partición de  $UCS_i$  para cada subregión  $i$  cuyos elementos sean los subconjuntos  $E_i \subset UCS_i$ , tales que los elementos de  $E_i$  compartan subsector económico y estrato por personal ocupado en las  $ucs_i$ :

Llamaremos  $E_i$  a la partición de  $UCS_i$ :

$$E_i = \{e_i^{sb/st} : e_i^{sb/st} = \{ucs_i \text{ que compartan subsector económico } sb \text{ y estrato } st\}\}$$

Si se establece el orden de los subsectores económicos  $sb$  y los estratos  $st$  con el listado arriba expuesto y la seriación de  $sb/st$  corre primero sobre los estratos  $st$  y luego sobre los subsectores  $sb$  de tal manera que el primer de los  $sb/st$  posibles sea 1/1 seguido de 1/2, 1/3,...,14/4 hasta 14/5 existiran 70 combinaciones posibles de  $sb/st$ . Aprovecharemos el orden antes definido para identificar

$sb/st_{min}$ : el primer grupo de  $ucs_i$  que compartan  $sb/st$  en la subregión  $i$

$sb/st_{max}$ : el último grupo de  $ucs_i$  que compartan  $sb/st$  en la subregión  $i$

$sb/st_{tot}$ : el total de grupos de  $ucs_i$  que compartan  $sb/st$  en la subregión  $i$

$|sb/st_{tot}| \leq 70$  para cualquier subregión  $i$  que contenga unidades comerciales y de servicios. Es posible que varíe entre subregiones pues dependiendo de la región evaluada pueden existir subregiones que no cuenten con unidades comerciales y de servicios  $ucs_i$  de todos los subsectores económicos o de todos los estratos.

Se puede obtener el potencial técnico para el sector comercial y de servicio en una región de dos maneras:

- por superficie instalable definida para cada  $e_i^{sb/st}$
- asignando una capacidad instalable aproximada para cada  $e_i^{sb/st}$ ,

en donde:

$$e_i^{sb/st} = \{ucs \text{ de la subregión } i \text{ que compartan subsector económico } sb \text{ y estrato } st\}$$

Para el cálculo por superficie instalable para cada  $e_i^{sb/st}$  se requiere:

- Cantidad de unidades comerciales y de servicios que conforman cada grupo de subsectores y estratos presentes cada subregión  $i$   $UCS_i^{sb/st}$
- Porcentaje de las unidades comerciales y de servicios que conforman cada grupo de subsectores y estratos presentes cada subregión que cuentan con instalación previa:  $UCS_i^{IPsb/st}$
- Superficie promedio de las  $ucs_i$  que conforman cada grupo de unidades que comparten subsector y estrato en cada subregión:  $UCS_i^{SPsb/st}$
- Porcentaje de la superficie promedio de  $ucs_i$  que conforman cada grupo de unidades que comparten subsector y estrato por subregión que puede usarse para instalación:  $UCS_i^{SIsb/st}$
- capacidad instalable por  $m^2$  en unidades del sector comercial y de servicios de cada subregión  $i$ :  $p_{i3}$

*Cálculo de watts instalables por superficie promedio de unidades comerciales y de servicios de los distintos subsectores económicos y estratos que conforman la subregión  $i$ , con criterio de exclusión de unidades con instalación previa*

$$PIT_{UCS} = \sum_{i=1}^n \sum_{sb/st=sb/st_{min}}^{sb/st_{max}} UCS_i^{sb/st} \times (1 - UCS_i^{IPsb/st}) \times UCS_i^{SPsb/st} \times UCS_i^{SIsb/st} \times p_{i3}$$

Para el cálculo por asignación de una capacidad instalable aproximada para cada  $e_i^{sb/st}$  se requiere:

- Cantidad de unidades comerciales y de servicios que conforman cada grupo de subsectores y estratos presentes cada subregión  $i$ :  $UCS_i^{sb/st}$
- Porcentaje de las unidades comerciales y de servicios que conforman cada grupo de subsectores y estratos presentes cada subregión que cuentan con instalación previa:  $UCS_i^{IPsb/st}$
- Capacidad instalable aproximada en  $ucs_i$  que conformen cada grupo de

unidades que compartan subsector y estrato en cada subregión  $UCS_i^{CIA_{sb/st}}$

Cálculo de watts instalables por capacidad instalable aproximada en las unidades comerciales y de servicios de los distintos subsectores económicos y estratos que conforman la subregión  $i$ , con criterio de exclusión de unidades con instalación previa

$$PIT_{UCS}^{CIA} = \sum_{i=1}^n \sum_{sb/st=sb/st_{min}}^{sb/st_{max}} UCS_i^{sb/st} \times (1 - UCS_i^{IP_{sb/st}}) \times UCS_i^{CIA_{sb/st}}$$

Variable	$UCS^{sb/st}$	$UCS^{IP_{sb/st}}$	$UCS^{SP_{sb/st}}$	$UCS^{SI_{sb/st}}$	$p_{i3}$
valores posibles para subsector económico $sb$	1-14				
valores posibles para estrato de personal $st$	1-5				
Unidad	unidades comerciales y de servicios	%	$m^2$	%	$W$
Descripción	unidades comerciales y de servicios de cada $sb/st$	unidades comerciales y de servicios de cada $sb/st$ con IP	superficie promedio de unidades comerciales y de servicios de cada $sb/st$	superficie instalable en unidades comerciales y de servicios de cada $sb/st$	capacidad instalable por $m^2$ en unidades comerciales y de servicios
$sr_1$	$UCS_1^{sb/st}$	$UCS_1^{IP_{sb/st}}$	$UCS_1^{SP_{sb/st}}$	$UCS_1^{SI_{sb/st}}$	$p_{13}$
$sr_2$	$UCS_2^{sb/st}$	$UCS_2^{IP_{sb/st}}$	$UCS_2^{SP_{sb/st}}$	$UCS_2^{SI_{sb/st}}$	$p_{23}$
...	...	...	...	...	...
$sr_n$	$UCS_n^{sb/st}$	$UCS_n^{IP_{sb/st}}$	$UCS_n^{SP_{sb/st}}$	$UCS_n^{SI_{sb/st}}$	$p_{n3}$

Tabla 19: Insumos para cálculo del potencial de instalación por promedio de superficie de unidades comerciales y de servicios. Elaboración propia.

Variable	$UCS^{sb/st}$	$UCS^{IPsb/st}$	$UCS^{CIA_{sb/st}}$	$p_{i3}$
valores posibles para subsector económico $sb$	1-14			
valores posibles para estrato de personal $st$	1-5			
Unidad	unidades comerciales y de servicios	%	$W$	$W$
Descripción	unidades comerciales y de servicios de cada $sb/st$	unidades comerciales y de servicios de cada $sb/st$ con IP	capacidad instalable aproximada para unidades comerciales y de servicios de cada $sb/st$	capacidad instalable por $m^2$ en unidades comerciales y de servicios
$sr_1$	$UCS_1^{sb/st}$	$UCS_1^{IPsb/st}$	$UCS_1^{CIA_{sb/st}}$	$p_{13}$
$sr_2$	$UCS_2^{sb/st}$	$UCS_2^{IPsb/st}$	$UCS_2^{CIA_{sb/st}}$	$p_{23}$
...	...	...	...	...
$sr_n$	$UCS_n^{sb/st}$	$UCS_n^{IPsb/st}$	$UCS_n^{CIA_{sb/st}}$	$p_{n3}$

Tabla 20: Insumos para cálculo del potencial de instalación por capacidad instalable aproximada en unidades comerciales y de servicios. Elaboración propia

### *Potencial de instalación técnico del sector industrial*

Para evaluar los potenciales técnicos de las UME del sector industrial también se trabajó con los datos abiertos de los *Censos económicos 2019* por entidad federativa. El sector industrial se definió como aquel que incluye actividades relacionadas con:

1. Minería
2. Generación, transmisión, distribución y comercialización de energía eléctrica, suministro de agua y de gas natural por ductos al consumidor final
3. Construcción
4. Industrias manufactureras

Las unidades enfocadas a estas actividades económicas también se distribuyen en cinco estratos dependiendo de la cantidad de personas ocupadas en la unidad económica. Dado que no existen datos sobre el tamaño de las UME del industrial, los estratos sirven como aproximación al tamaño de las unidades y por lo tanto, de la superficie disponible para instalación.

Ya que la superficie de las unidades industriales pueden llegar a ser de tal tamaño que es posible sobreinstalar un sistema fotovoltaico al punto de rebasar el límite de 0.5 MW marcado por ley (similar al caso del sector agropecuario), es importante evaluar el tamaño de las unidades para asegurar que el porcentaje de superficie que se considera instalable no rebase la capacidad instalable máxima y si es caso, asignar a esas unidades el máximo instalable (0.5 MW) aunque sea menos porcentaje que el definido como el instalable para las unidades industriales de una subregión  $i$  que compartan subsector económico  $sb$  y estrato de personal  $st$ .

Sea  $UI_i = \{ui_i : ui_i \text{ sea una unidad industrial en la subregión } i\}$ , toda  $ui_i$  pertenece a un subsector económico  $sb$  y a un estrato  $st$ , por lo que se puede generar una partición de  $UI_i$  para cada subregión  $i$  cuyos elementos sean los subconjuntos  $F_i$  de  $UI_i$  que compartan subsector económico y estrato por personal ocupado en las  $ui_i$ :

Llamaremos  $F_i$  a la partición de  $UI_i$ :

$$F_i = \{f_i^{sb/st} : f_i^{sb/st} = \{ui \text{ en la subregión } i \text{ que comparten subsector económico } sb \text{ y estrato } st\}\}$$

Si se establece el orden de los subsectores económicos  $sb$  y los estratos  $st$  de la siguiente manera:

$sb$  = minería, generación, transmisión, distribución y comercialización de energía eléctrica, suministro de agua y de gas natural por ductos al consumidor final, construcción, industrias manufactureras

$st$  = 0-10 personas, 11-50 personas, 51-250 personas, 251 y más personas, estratos agrupados debido al principio de confidencialidad

Si se establece el orden de los subsectores económicos  $sb$  y los estratos  $st$  con el listado arriba expuesto y la seriación de  $sb/st$  corre primero sobre los estratos  $st$  y luego sobre los subsectores  $sb$  de tal manera que el primer de los  $sb/st$  posibles 1/1 seguido de 1/2, 1/3,...,4/4 hasta 4/5 existirán 20 combinaciones posibles de  $sb/st$ . Aprovecharemos el orden antes definido para identificar

$sb/st_{min}$ : el primer grupo de  $ui_i$  que comparten  $sb/st$  en la subregión  $i$

$sb/st_{max}$ : el último grupo de  $ui_i$  que comparten  $sb/st$  en la subregión  $i$

$sb/st_{tot}$ : el total de grupos de  $ui_i$  que comparten  $sb/st$  en la subregión  $i$

$|sb/st_{tot}| \leq 20$  para cualquier subregión  $i$  que contenga unidades industriales. Es posible que varíe entre subregiones pues dependiendo de la región evaluada pueden existir subregiones que no cuenten con unidades industriales  $ui_i$  de todos los subsectores económicos o de todos los estratos.

Se puede obtener el potencial técnico para el sector industrial en una región de dos maneras:

- por superficie instalable definida para cada  $f_i^{sb/st}$
- asignando una capacidad instalable aproximada para cada  $f_i^{sb/st}$  ,

en donde:

$$f_i^{sb/st} = \{ui \text{ de la subregión } i \text{ que comparten subsector económico } sb \text{ y estrato } st\}$$

Para el cálculo por superficie instalable para cada  $f_i^{sb/st}$  se requiere:

- Cantidad de unidades industriales que conforman cada grupo de subsectores y estratos presentes cada subregión  $i$ :  $UI_i^{sb/st}$
- Porcentaje de las unidades industriales que conforman cada grupo de subsectores y estratos presentes cada subregión que cuentan con instalación previa:  $UI_i^{IP_{sb/st}}$
- Superficie promedio de las  $ui_i$  que conforman cada grupo de unidades que comparten subsector y estrato en cada subregión:  $UI_i^{SP_{sb/st}}$
- Porcentaje de la superficie promedio de  $ucs_i$  que conforman cada grupo de unidades que comparten subsector y estrato por subregión que puede usarse para instalación:  $UI_i^{SI_{sb/st}}$
- Capacidad instalable por  $m^2$  en unidades del sector industrial de cada subregión  $i$ :  $p_{i4}$

El procedimiento para calcular el potencial de instalación del sector industrial en una región utilizando el promedios de superficie de unidades industriales que comparten subsector y estrato en cada subregión  $i$  será el siguiente:

- Se calculará la capacidad instalable en las subregiones y se definirá el potencial de instalación regional como la suma de estas capacidades subregionales.
- La capacidad instalable subregional será el producto de tres valores
  - 1) Cantidad de unidades industriales que conforman cada grupo de subsectores y estratos presentes cada subregión  $i$ :  $UI_i^{sb/st}$
  - 2) Porcentaje de las unidades industriales que conforman cada grupo de subsectores y estratos presentes cada subregión que cuentan con instalación previa:  $UI_i^{IP_{sb/st}}$
  - 3) la capacidad instalable por unidades industriales de cada grupo de subsectores y estratos presentes en las subregiones, la cual a su vez se obtiene multiplicando tres valores:
    - la superficie promedio de las unidades industriales que comparten subsector y estrato en cada subregión:  $UI_i^{SP_{sb/st}}$
    - el porcentaje de superficie de las unidades industriales que comparten subsector y estrato que puede usarse para instalación:  $UI_i^{SI_{sb/st}}$

■ la capacidad instalable por  $m^2$  que corresponda a las unidades industriales de la subregión:  $p_{i4}$  .

- En caso de que el resultado de este producto, es decir, la capacidad instalable por unidad industrial de cualquier grupo de unidades que compartan subsector económico y estrato, sea mayor a 0.5 MW, se asignará este valor como la capacidad instalable por unidad industrial del respectivo grupo para respetar el límite marcado por ley para la generación distribuida.

*Cálculo de watts instalables por superficie promedio de unidades industriales de los distintos subsectores económicos y estratos que conforman la subregión i, con criterio de exclusión de unidades con instalación previa*

$$PIT_{UI} = \sum_{i=1}^n \sum_{sb/st=sb/st_{min}}^{sb/st_{max}} UI_i^{sb/st} \times (1 - UI_i^{IP_{sb/st}}) \times \text{Min} (0.5MW, UI_i^{SP_{sb/st}} \times UI_i^{SI_{sb/st}} \times p_{i4})$$

Para el cálculo por asignación de una capacidad instalable aproximada para cada  $f_i^{sb/st}$  se requiere:

- Cantidad de unidades industriales que conforman cada grupo de subsectores y estratos presentes cada subregión  $i$ :  $UI_i^{sb/st}$
- Porcentaje de las unidades industriales que conforman cada grupo de subsectores y estratos presentes cada subregión que cuentan con instalación previa:  $UI_i^{IP_{sb/st}}$
- capacidad instalable aproximada en  $ui_i$  que conformen cada grupo de unidades que comparten subsector y estrato en cada subregión:  $UI_i^{CIA_{sb/st}}$

*Cálculo de watts instalables por capacidad instalable aproximada en las unidades industriales de los distintos subsectores económicos y estratos que conforman la subregión i, con criterio de exclusión de unidades con instalación previa*

$$PIT_{UI}^{CIA} = \sum_{i=1}^n \sum_{sb/st=sb/st_{min}}^{sb/st_{max}} UI_i^{sb/st} \times (1 - UI_i^{IP_{sb/st}}) \times UI_i^{CIA_{sb/st}}$$

Variable	$UI^{sb/st}$	$UI^{IPsb/st}$	$UI^{SPsb/st}$	$UI^{SIsb/st}$	$p_{i4}$
valores posibles para subsector económico $sb$ : 1-4					
valores posibles para estrato de personal $st$ : 1-5					
Unidad	unidades industriales	%	$m^2$	%	$W$
Descripción	unidades industriales de cada $sb/st$	unidades industriales de cada $sb/st$ con IP	superficie promedio de unidades industriales de cada $sb/st$	superficie instalable en unidades industriales de cada $sb/st$	capacidad instalable por $m^2$ en unidades industriales
$sr_1$	$UI_1^{sb/st}$	$UI_1^{IPsb/st}$	$UI_1^{SPsb/st}$	$UI_1^{SIsb/st}$	$p_{14}$
$sr_2$	$UI_2^{sb/st}$	$UI_2^{IPsb/st}$	$UI_2^{SPsb/st}$	$UI_2^{SIsb/st}$	$p_{24}$
...	...	...	...	...	...
$sr_n$	$UI_n^{sb/st}$	$UI_n^{IPsb/st}$	$UI_n^{SPsb/st}$	$UI_n^{SIsb/st}$	$p_{n4}$

Tabla 18: Insumos para cálculo del potencial de instalación por promedio de superficie de unidades industriales. IP: instalación previa. Elaboración propia.

Variable	$UI^{sb/st}$	$UI^{IPsb/st}$	$UI^{CIA_{sb/st}}$	$p_{i4}$
valores posibles para subsector económico $sb$ : 1-4				
valores posibles para estrato de personal $st$ : 1-5				
Unidad	unidades industriales	%	$W$	$W$
Descripción	unidades industriales de cada $sb/st$	unidades industriales de cada $sb/st$ con IP	CIA para unidades industriales de cada $sb/st$	capacidad instalable por $m^2$ en unidades industriales
$sr_1$	$UI_1^{sb/st}$	$UI_1^{IPsb/st}$	$UI_1^{CIA_{sb/st}}$	$p_{14}$
$sr_2$	$UI_2^{sb/st}$	$UI_2^{IPsb/st}$	$UI_2^{CIA_{sb/st}}$	$p_{24}$
...	...	...	...	...
$sr_n$	$UI_n^{sb/st}$	$UI_n^{IPsb/st}$	$UI_n^{CIA_{sb/st}}$	$p_{n4}$

Tabla 19: Insumos para cálculo del potencial de instalación por capacidad instalable aproximada (CIA) en unidades industriales. IP: instalación previa. Elaboración propia.

### *Potenciales técnicos del sector público*

Para evaluar el potencial técnico de las UME del sector público se trabajó con los datos abiertos del *Censo Nacional de Gobiernos Municipales y Demarcaciones Territoriales de la Ciudad de México 2021*. A través de este censo se pudieron identificar los inmuebles usados para actividades del sector público. El potencial técnico para el sector público en una región puede obtenerse de dos maneras:

- por superficie instalable en unidades públicas de cada subregión  $i$
- asignando una capacidad instalable aproximada para unidades del sector público en cada subregión  $i$

Para el cálculo por superficie instalable en unidades públicas de cada subregión  $i$  se requiere:

- Cantidad de unidades públicas presentes cada subregión  $i$ :  $UP_i$
- Porcentaje de las unidades públicas de cada subregión que cuentan con instalación previa:  $UP_i^{IP}$
- Superficie promedio de las unidades públicas en cada subregión:  $UP_i^{SP}$
- Porcentaje de la superficie promedio de unidades públicas por subregión que puede usarse para instalación:  $UP_i^{SI}$
- Capacidad instalable por  $m^2$  en unidades del sector público de cada subregión  $i$ :  $p_{i5}$

*Cálculo de watts instalables por superficie promedio de unidades públicas, con criterio de exclusión de unidades con instalación previa*

$$PIT_{UP} = \sum_{i=1}^n UP_i \times (1 - UP_i^{IP}) \times UP_i^{SP} \times UP_i^{SI} \times p_{i5}$$

Para el cálculo por asignación de una capacidad instalable aproximada para unidades del sector público en cada subregión  $i$  se requiere:

- Cantidad de unidades públicas en cada subregión  $i$ :  $UP_i$
- Porcentaje de las unidades públicas en cada subregión que cuentan con instalación previa:  $UP_i^{IP}$

- Capacidad instalable aproximada para unidades públicas en cada subregión:

$$UP_i^{CIA}$$

Cálculo de watts instalables por capacidad instalable aproximada en las unidades públicas de cada subregión, con criterio de exclusión de unidades con instalación previa

$$PIT_{UP}^{CIA} = \sum_{i=1}^n UP_i \times (1 - UP_i^{IP}) \times UP_i^{CIA}$$

Variable	$UP$	$UP^{IP}$	$UP^{SP}$	$UP^{SI}$	$p_{i5}$
Unidad	unidades públicas	%	$m^2$	%	$W$
Descripción	unidades públicas	unidades públicas con IP	superficie promedio de unidades públicas	superficie instalable en unidades públicas	capacidad instalable por $m^2$ en unidades públicas
$sr_1$	$UP_1$	$UP_1^{IP}$	$UP_1^{SP}$	$UP_1^{SI}$	$p_{15}$
$sr_2$	$UP_2$	$UP_2^{IP}$	$UP_2^{SP}$	$UP_2^{SI}$	$p_{25}$
...	...	...	...	...	...
$sr_n$	$UP_n$	$UP_n^{IP}$	$UP_n^{SP}$	$UP_n^{SI}$	$p_{n5}$

Tabla 23: Insumos para cálculo del potencial de instalación por promedio de superficie de unidades públicas. IP: instalación previa. Elaboración propia.

Variable	$UP$	$UP^{IP}$	$UP^{CIA}$	$p_{i5}$
Unidad	unidades públicas	%	$W$	$W$
Descripción	unidades públicas	unidades públicas que con IP	capacidad instalable aproximada para unidades públicas	capacidad instalable por $m^2$ en unidades públicas
$sr_1$	$UP_1$	$UP_1^{IP}$	$UP_1^{CIA}$	$p_{15}$
$sr_2$	$UP_2$	$UP_2^{IP}$	$UP_2^{CIA}$	$p_{25}$
...	...	...	...	...
$sr_n$	$UP_n$	$UP_n^{IP}$	$UP_n^{CIA}$	$p_{n5}$

Tabla 24: Insumos para cálculo del potencial de instalación por capacidad instalable aproximada. IP: instalación previa. Elaboración propia.

## *2.4 Evaluación multicriterio por sectores*

Tras definir los cálculos para el potencial de instalación técnico de los cinco sectores a evaluar, con sus respectivas alternativas en función de la disponibilidad de insumos, se procedió a diagnosticar los criterios ambientales, sociales, culturales, económicos y políticos relevantes para refinar dicho potencial para cada sector socioeconómico. Este diagnóstico se orientó con procesos de jerarquía analítica para establecer el peso de cada criterio por sector.

Cabe recordar que se asumió que el potencial sectorial por subregión es independiente entre sectores por lo que aunque pueda haber criterios similares entre sectores, por ejemplo de tenencia de la unidad o de afectación por fenómeno ambiental, la evaluación del peso de estos criterios se hará sobre las unidades mínimas de cada sector.

En la tabla 25 se despliegan los criterios que se consideraron más relevantes para la evaluación del potencial de instalación de GDFV en los distintos sectores presentes en el territorio mexicano. Se pueden distinguir 3 cúmulos temáticos: criterios técnicos que ya se consideraron para los primeros módulos, criterios económico-ambientales que se relacionan con los costos adicionales que pueda tener la instalación de sistemas fotovoltaicos a partir de las características de las unidades y criterio socioculturales que contemplan dinámicas sociales que pueden dificultar la instalación así como el correcto mantenimiento y operación o la viabilidad de un sistema de GDFV en las distintas unidades.

La tabla incluye una columna de criterios trans-sectoriales que contempla fenómenos con incidencia diferenciada por regiones geográficas. Estos criterios afectan el potencial de las unidades que conforman todos los sectores pero lo hacen de manera diferenciada debido a las características de dichas unidades, por ejemplo, las unidades industriales pueden tener acceso a sistemas fotovoltaicos de mayor eficiencia que las unidades residenciales debido a que su presupuesto de instalación es mayor, o una inundación puede afectar de maneras distintas a un inmueble público que a un terreno agropecuario aunque estén en la misma subregión, por lo que estos criterios se evalúan para todos los sectores, pero deben integrarse de manera diferenciada en función de las unidades que afecten.

	Residencial	Agropecuario	Comercial y de Servicios	Industrial	Público	Trans-sectoriales
1	Tamaño de la unidad					Irradiación solar
2	Instalación previa					Eficiencia de sistemas fotovoltaicos*
3	Material de techo	Actividad Principal	Material de techo *			
4	Interconexión a las RGD*					Fenómenos ambientales
5	Vivienda vertical	Derechos sobre la Tierra	Techo propio *			Eventos delictivos
6	Tenencia		Porcentaje destinado a renta		Tenencia	Percepción de inseguridad

Tabla 25: Criterios por sector y cúmulos técnicos (1-2), económico-ambientales (3-4) y socioculturales (5-6). Elaboración propia

Los criterios marcados con \* son aquellos que a pesar de identificarse como relevantes para una evaluación holística, en el proceso de recopilación de insumos no se identificaron fuentes con metodologías rastreables que arrojaran información sobre dichos criterios en las unidades correspondientes, por lo que quedan como posibles criterios a integrar en función de la información que pueda tener las personas usuarias del sistema de evaluación.

### 2.5 Construcción de niveles por jerarquía analítica

Para cada sector socioeconómico se diseñó su respectiva jerarquía analítica con criterios, subcriterios y elementos comparables entre sí en cada nivel de la jerarquía, dado que para poder establecer una comparación por pares es necesario que los elementos de un nivel tengan cierta afinidad respecto a un criterio común con el cual serán comparados.

La cantidad de elementos a comparar deben ser relativamente pocos para mejorar la consistencia y la exactitud de las mediciones. Si el número de elementos comparados es demasiado grande, las prioridades relativas se vuelven pequeñas y un error puede distorsionarlas considerablemente. En [R.W., Saaty, 1987, p.172] se explica su preferencia por trabajar menos de 9 elementos. En las matrices de comparación por pares definidas para todos los criterios, subcriterios y elementos de cada sector no fue necesario rebasar este límite.

Cada nivel puede tener tantos cúmulos de elementos como sea necesario para que los elementos de cada cúmulo sean comparables entre sí respecto a elementos del nivel inmediatamente superior. La creación de estos cúmulos permite minimizar las comparaciones manteniendo realizable el total de las  $n \frac{(n-1)}{2}$  comparaciones.

La diferencia fundamental con la aplicación clásica de los procesos de jerarquía analítica es que en este caso las escalas relativas de proporción que se generen al comparar criterios, o alternativas de los criterios, no se usarán para determinar qué características debe tener una unidades mínima de evaluación de cualquier sector para considerarse *la de mayor potencial de instalación*, sino que se aprovecha la valoración obtenida en las escalas relativas de *todas* las características que puedan tener las UME para contemplar el potencial *de todas las unidades* aunque varíen entre sí.

Para cada sector, en el primer nivel de criterios a evaluar se definieron las características de las UME de cada sector ( $C1$ ) y los fenómenos socioambientales que ocurren en región y que afectan a las UME ( $C2$ ). Este nivel determinó una matriz  $G$  en donde se compara la importancia relativa de ambos tipos de criterios para el potencial de instalación de cada sector en la región a evaluar.

En el siguiente nivel se establecieron los subcriterios que permiten matizar los criterios definidos en el primer nivel. Ya que estos subcriterios no se aplican a todos los elementos del primer nivel, se dice que la jerarquía es incompleta. Estos subcriterios serán comparados por pares para establecer su peso relativo al criterio dominante respecto al que están siendo comparados.

Finalmente, el tercer nivel consta de los elementos que sirven de alternativas para los subcriterios. Estos elementos podrán corresponder cada uno a una alternativa o representar cúmulos de alternativas definidos por las fuentes de información con las que se trabajó para diseñar el sistema.

Habiendo definido los elementos de cada sector que integran los niveles de su jerarquía se procede a realizar las comparaciones por pares necesarias para completar cada matriz. Al completar cualquier matriz, sea de comparación entre alternativas, subcriterios o criterios, es fundamental revisar que la escala de prioridades local que se obtiene al resolver la matriz para determinar su vector propio principal sea significativa en función del índice de consistencia de la matriz. Este índice nos indica

las afectaciones a la consistencia de la matriz que surgen al elaborar las comparaciones.

Recordemos que una matriz  $M_{n \times n} = (m_{ij})$  es consistente si  $m_{ij}m_{jk} = m_{ik}, \forall i, j, k$ . Si  $m_{ij}m_{jk} \neq m_{ik}$  para algún  $i, j, k \in n$  entonces  $m_{ij}m_{jk} > m_{ik}$  o  $m_{ij}m_{jk} < m_{ik}$  pero dado que  $M$  es recíproca, si  $m_{ij}m_{jk} > m_{ik} \Rightarrow \frac{1}{m_{ij}} m_{jk} < \frac{1}{m_{ik}}$  o viceversa y por lo tanto se compensa. Esto permite un cierto rango de inconsistencia de la matriz en donde aún sea viable utilizar su vector propio para obtener una escala significativa.

El índice de consistencia (IC) corresponde al valor de  $\frac{(\lambda_{max}-n)}{(n-1)}$  en donde  $\lambda_{max}$  es el valor propio principal de la matriz si no es consistente. El trabajo de [Vargas, 1982] desarrolla por qué basta con que el IC sea menor al 10% para poder asegurar que el vector propio principal, que en este caso representa la escala local de prioridades, es tolerable. En caso de que una matriz tenga un IC mayor al 10% es necesario re-evaluarla para identificar las comparaciones que no estén siendo congruentes respecto al criterio dominante de la matriz.

A continuación se desarrolla el proceso de análisis multicriterio basado en procesos de jerarquía analítica para el sector residencial. Los procesos de análisis de los otros cuatro sectores serán semejantes salvo las diferencias especificadas

### 2.5.1 Sector residencial

En el caso de las unidades residenciales el insumo principal para la evaluación multicriterio de las *características de las unidades residenciales que afectan la instalación de GDFV* fue el cuestionario ampliado de la muestra del censo de población y vivienda 2020. Mientras que las alternativas que corresponden a los fenómenos en la subregión que afectan la instalación de GDFV en unidades residenciales se obtuvieron de dos fuentes:

- Para la percepción de inseguridad en la subregión se utilizó la *Encuesta nacional de victimización y percepción sobre seguridad pública (Envipe) 2023* del Inegi.
- Para el riesgo de fenómenos ambientales en la subregión se emplearon los distintos atlas estatales y municipales incluyendo los *indicadores*

*municipales de peligro, exposición y vulnerabilidad del atlas nacional de riesgos del cenapred.*

Del cuestionario ampliado de la muestra del censo de población y vivienda 2020 se seleccionaron las alternativas que corresponden a los subcriterios de las variables enlistadas en la tabla 14 y se establecieron cúmulos entre aquellas que eran lo suficientemente semejantes, al punto de que comparar dichas alternativas por separado no aportaba información relevante respecto al orden de prioridades de las alternativas del subcriterio en cuestión.

<b>Nombre de variable en el censo</b>	<b>Alternativas por variable en el censo</b>	<b>Subcriterio correspondiente</b>	<b>Cúmulos agrupados por subcriterio</b>
Electricidad	3	Electricidad (facilidad para interconectar a las redes generales de distribución)	2
Tenencia	4	Tenencia (facilidad para toma de decisiones sobre inversiones en vivienda)	4
Techos	11	Material de techo (facilidad para instalar sin necesitar inversión adicional para lograr capacidad de carga)	5
CLAVIVP	10	Tipo de vivienda (disponibilidad de superficie en función de la verticalidad del inmueble y los usos propios o compartidos de las superficies)	5

*Tabla 26: Relación de subcriterios con variables del cuestionario ampliado del censo de población y vivienda 2020. Fuente: elaboración propia con datos del censo de población y vivienda 2020*

Por ejemplo, para el subcriterio de *verticalidad de la vivienda*, que evalúa la disponibilidad de superficie en función de la verticalidad del inmueble y los usos propios o compartidos de las superficies, se agruparon las viviendas que reportaron ser *casa única en el terreno* con las que reportaron ser *casa que comparte terreno con otras*.

(G)¿Qué puede afectar la instalación de GDFV en unidades residenciales de una subregión?: Ciertas características de las unidades residenciales y algunos fenómenos en la subregión					
(C1) ¿Qué características de las unidades residenciales en la subregión afectan la instalación de GDFV? Si cuentan previamente con electricidad, su tenencia, el material de techo y su verticalidad.			(C2) Qué fenómenos en la subregión afectan la instalación de GDFV en unidades residenciales? La percepción de inseguridad y los riesgo de fenómenos ambientales		
(SC1) ¿Cómo afecta a la instalación de GD el hecho de que una vivienda cuente previamente con electricidad?  En la facilidad para interconectar a las redes generales de distribución	(SC2) ¿Cómo afecta la tenencia de las viviendas a su instalación de GD?  En la facilidad para la toma de decisiones sobre inversiones en la infraestructura de la vivienda	(SC3) ¿Cómo afecta el material de techo de las viviendas a la instalación de GD?  En la facilidad y viabilidad para instalar sin necesitar inversión adicional para lograr capacidad de carga.	(SC4) ¿Cómo afecta la verticalidad de la vivienda a la instalación de GD?  En la disponibilidad de superficie de techos y los usos propios o compartidos de dichas superficies.	(SC5) ¿Cómo afecta la percepción de inseguridad en la subregión a la instalación de GD en viviendas?  En que sea motivo de migración o los habitantes tengan gastos adicionales asociados a cuestiones securitarias	(SC6) ¿Cómo afecta el riesgo de fenómenos ambientales en la subregión a la instalación de GD en viviendas?  En que las viviendas y/o los sistemas de GD sean vulnerables y los fenómenos conlleven una afectación económica
¿Bajo qué alternativas puede evaluarse este subcriterio en viviendas?  A11 Tiene electricidad  A12 No tiene electricidad, no se sabe	¿Bajo qué alternativas puede evaluarse este subcriterio en viviendas?  A21 Propia  A22 Rentada  A23 Prestada  A24 Otra	¿Bajo qué alternativas puede evaluarse este subcriterio en viviendas?  A31 Desecho, Lámina de cartón/ metal/ asbesto/ fibrocemento, no especificado  A32 Palma, Terrado  A33 Madera, Teja  A34 Concreto	¿Bajo qué alternativas puede evaluarse este subcriterio en viviendas?  A41 Casa única en el terreno/ comparte terreno con otras  A42 Casa duplex  A43 Departamento, vecindad o cuartería  A44 Cuarto de azotea, Local, Vivienda móvil, Refugio, No especificado	¿Bajo qué alternativas puede evaluarse este subcriterio en las subregiones?  A51 Segura  A52 Insegura	¿Bajo qué alternativas puede evaluarse este subcriterio en las subregiones?  A61 Inundación  A62 Tormenta  A63 Incendio  A64 Deslave

Tabla 27: Niveles de jerarquía para análisis multicriterio de sector residencial. Fuente: elaboración propia con datos del censo de población y vivienda 2020 de Inegi.

### 2.5.1.1 Matrices de comparación entre características de las unidades residenciales

Llamaremos  $W_r^{UR}$  al vector propio de la matriz  $UR_r$  con  $r = G, C1, C2, SC1, SC2, \dots, SC6$ . Tomando como ejemplo la matriz que compara las alternativas del subcriterio de tenencia (SC2). Las entradas de la matriz  $UR_{SC2}$  se llenan con la respuesta a la pregunta:

“Al comparar dos elementos,  $i$  del lado izquierdo de la matriz y  $j$  en la parte superior, ¿cuál alternativa de tenencia facilita más la toma de decisiones sobre inversiones en la infraestructura de la vivienda y qué tanto más la facilita una que la otra?”

Los valores posibles de respuesta son los indicados en la escala fundamental

**Facilidad para la toma de decisiones sobre inversiones en la infraestructura de la vivienda a partir de la tenencia (SC2)**

$UR_{SC2}$	propia ( $A2_1$ )	rentada ( $A2_2$ )	prestada ( $A2_3$ )	otra ( $A2_4$ )
<b>propia</b> ( $A2_1$ )	1	importancia de $A2_1$ sobre $A2_2$ respecto a SC2	importancia de $A2_1$ sobre $A2_3$ respecto a SC2	importancia de $A2_1$ sobre $A2_4$ respecto a SC2
<b>rentada</b> ( $A2_2$ )	importancia de $A2_2$ sobre $A2_1$ respecto a SC2	1	importancia de $A2_2$ sobre $A2_3$ respecto a SC2	importancia de $A2_2$ sobre $A2_4$ respecto a SC2
<b>prestada</b> ( $A2_3$ )	importancia de $A2_3$ sobre $A2_1$ respecto a SC2	importancia de $A2_3$ sobre $A2_2$ respecto a SC2	1	importancia de $A2_3$ sobre $A2_4$ respecto a SC2
<b>otra</b> ( $A2_4$ )	importancia de $A2_4$ sobre $A2_1$ respecto a SC2	importancia de $A2_4$ sobre $A2_2$ respecto a SC2	importancia de $A2_4$ sobre $A2_3$ respecto a SC2	1

Tabla 28: Matriz de comparación correspondiente al subcriterio de tenencia con sus respectivas alternativas. Fuente: elaboración propia.

Tras completar la matriz, la escala de prioridades asociada al subcriterio de tenencia se obtiene del vector propio principal de la matriz  $UR_{SC2}$ . Llamaremos  $W_r^{UR}$  al vector propio de cada matriz  $r$  que pertenezca a un nivel de la jerarquía asignada al sector residencial. Para este ejemplo  $W_{SC2}^{UR} = (w_{A2_1}^{UR}, w_{A2_2}^{UR}, w_{A2_3}^{UR}, w_{A2_4}^{UR})$ .

La magnitud de las entradas que conforman la escala local indican tanto el orden de las prioridades como la dominancia de una alternativa sobre las otras (es decir, que tanto es más importante una que otra respecto al criterio).

Esta escala local debe re-escalarse para que la alternativa dominante coincida

con el 100% de potencial técnico y el resto de las alternativas mantengan el orden descendente y con la misma relación de dominancia. A los valores obtenidos de re-escalar cada elemento de  $W_r^{UR}$ , para las matrices  $r = SC1, SC2, SC3, SC4$  se les denominará la escala ajustada de cada alternativa. Por ejemplo, para el primer elemento de  $W_{SC2}^{UR} : w_{A2_1}^{UR}$ , su escala ajustada será  $AJE_{A2_1}^{UR} = \frac{w_{A2_1}^{UR}}{\supremo(W_{SC2}^{UR})}$ .

Escala local de prioridades	Escala ajustada por tenencia	% de viviendas por tenencia	Factor de modificación por tenencia
$w_{A2_1}^{UR}$	$AJE_{A2_1}^{UR}$	$UR_i^{A2_1}$	$FM_i^{UR,A2_1} = AJE_{A2_1}^{UR} \times UR_i^{A2_1}$
$w_{A2_2}^{UR}$	$AJE_{A2_2}^{UR}$	$UR_i^{A2_2}$	$FM_i^{UR,A2_2} = AJE_{A2_2}^{UR} \times UR_i^{A2_2}$
$w_{A2_3}^{UR}$	$AJE_{A2_3}^{UR}$	$UR_i^{A2_3}$	$FM_i^{UR,A2_3} = AJE_{A2_3}^{UR} \times UR_i^{A2_3}$
$w_{A2_4}^{UR}$	$AJE_{A2_4}^{UR}$	$UR_i^{A2_4}$	$FM_i^{UR,A2_4} = AJE_{A2_4}^{UR} \times UR_i^{A2_4}$
<b>Suma = 1</b>		<b>Suma = 1</b>	<b>Suma = <math>FM_i^{UR,SC2}</math></b>

Tabla 29: Procesamiento de escala local de prioridades del subcriterio de tenencia en unidades residenciales para obtener el factor de modificación correspondiente a cada alternativa de tenencia. Fuente: elaboración propia

Dado que:

- $UR_{SC2}$  es la matriz de comparación de las alternativas de tenencia respecto a la facilidad para la toma de decisiones sobre inversiones en la infraestructura de la vivienda
- $W_{SC2}^{UR}$  es el vector propio de la matriz, que tiene como elementos los pesos de cada alternativa  $W_{SC2}^{UR} = (w_{A2_1}^{UR}, w_{A2_2}^{UR}, w_{A2_3}^{UR}, w_{A2_4}^{UR})$ .
- $w_{A2_1}^{UR}$  corresponde al peso de la tenencia propia respecto a las otras alternativas de tenencia en función de la facilidad para la toma de decisiones sobre inversiones en la infraestructura de la vivienda

muy probablemente la tenencia propia  $A2_1$  será la alternativa de mayor peso y por lo tanto  $AJE_{A2_1}^{UR} = 1$ , mientras que la tenencia prestada u otra serán las que tengan menos facilidades para la toma de decisiones sobre inversiones en vivienda y por lo tanto el valor obtenido al ajustar la escala sea considerablemente menor.

Previo al ajuste de escala, no había sido necesario introducir información referente a las subregiones pues debido a la naturaleza de los elementos comparados, es poco probable que la importancia, orden o prioridad de las alternativas respecto al

subcriterio se modifique de subregión en subregión por lo que la matriz de comparación entre las alternativas que corresponden a cada subcriterio y el ajuste de escala puede elaborarse con juicios regionales.

A partir de ese momento, debe introducirse la consideración de la distribución regional de las alternativas posibles para cada subcriterio. Para obtener el valor que corresponde a la afectación del potencial técnico de instalación debido a las condiciones de tenencia de las viviendas en la subregión se deberán sumar los factores de modificación  $FM_i^{UR,A2}$  que corresponden a las distintas condiciones de tenencia. Estos factores de modificación son el producto del porcentaje de viviendas en cada subregión  $i$  que cuenta con las distintas alternativas de tenencia, por la escala ajustada de cada alternativa.

Al momento de multiplicar la escala ajustada de cada alternativa por el porcentaje de viviendas en cada subregión que cumplen la característica indicada en la alternativa, se obtienen variables que vuelve a ser dependiente de la subregión, por lo que los factores de modificación que correspondan a una cierta alternativa en la subregión  $i$  tienen un subíndice subregional  $FM_i^{UR,A2_1}, FM_i^{UR,A2_2}, FM_i^{UR,A2_3}, FM_i^{UR,A2_4}$

Llamaremos a la suma de estos factores de modificación de cada alternativa el factor de modificación del subcriterio, que en el ejemplo para el subcriterio de tenencia tendrá la siguiente notación:  $FM_i^{UR,SC_2}$  con superíndices correspondientes al sector socioeconómico, nivel y número del criterio al que hace referencia y subíndice subregional.

Es crucial que la matriz de comparación se construya evaluando alternativas cuyo potencial no sea nulo, pues de lo contrario, la presencia de una alternativa que en contraste con las demás es infinitamente menos importante, hace que la diferencia en importancia de las otras alternativas se vuelva insignificante y se pierda información relevante. Si se da el caso que se considere que alguna alternativas de un subcriterio, o un subcriterio de un criterio, corresponde a un potencial nulo, dicho elemento no debe integrarse a la matriz de comparación por pares.

Por practicidad, para cualquier matriz  $r$  que llegara a presentar esta situación, tras calcular el vector propio  $W_r$ , se definiría el vector  $W_r^+$  como el vector ampliado cuya última entrada sea cero y corresponda al peso del cúmulo de alternativas cuyo

potencial de instalación sea nulo y por lo tanto tenga una escala ajustada y un factor de modificación nulo. De esta manera se cumple que la suma de los porcentajes que corresponden a las unidades que cuentan con las características indicadas en las alternativas del criterio en cuestión dé el 100% de las unidades y efectivamente se esté evaluando el potencial de todas las unidades residenciales de las subregiones, incluyendo aquellas cuyas características no son aptas para instalación de GDFV.

El proceso descrito anteriormente deberá realizarse para los subcriterios de electricidad, tenencia, material de techo y verticalidad de la vivienda, obteniendo como resultado los siguientes valores de factores de modificación para cada subregión  $i$ :

$$FM_i^{UR,SC_1}, FM_i^{UR,SC_2}, FM_i^{UR,SC_3}, FM_i^{UR,SC_4}$$

#### *2.5.1.2 Matrices de comparación entre fenómenos en la subregión*

Para el subcriterio *percepción de inseguridad en la subregión (SC5)*, tras obtener el vector propio que corresponde a la matriz de comparación entre las alternativas del subcriterio, la escala ajustada de cada alternativa se utilizará para obtener el factor de modificación de las alternativas, como se desarrolló para subcriterios previos. La suma de estos dará el factor de modificación global del subcriterio *percepción de inseguridad*.

Los valores de las alternativas que corresponden a percepción de inseguridad (segura, insegura) son compartidos por todos los sectores pues representan la distribución de percepción sobre la subregión entre los habitantes de las subregiones, lo que varía entre sectores es cuánto afecta esta percepción al potencial de instalación de GDFV en sus unidades.

Hay sectores que pueden ser indiferentes a una alta percepción de inseguridad, por lo que el vector propio del subcriterio sería (0.5,0.5) y la escala ajustada de las alternativas equivaldrá al 100% en ambos casos. En tal caso el subcriterio de percepción de inseguridad no modifica para ese sector el potencial, mientras que para un sector en donde si se considere que la percepción de inseguridad influye en la instalación de sistemas de GDFV en las unidades de dicho sector, al haber una diferencia entre los valores que conforman el vector propio, la escala ajustada contendrá tal diferencia, con alguno valiendo menos de 100% y por lo tanto el factor

de modificación global disminuirá en función de la diferencia de importancia de una percepción y otra y la distribución de la percepción de inseguridad en la subregión.

Para el subcriterio que corresponde a *cómo afecta el riesgo de fenómenos ambientales en la subregión a la instalación de GD en viviendas* los valores obtenidos por el vector propios de la matriz que compara uno a uno los riesgos en función de su relevancia para la instalación, serán automáticamente equivalentes a lo que para otros subcriterios corresponde a la escala ajustada, pues al ser los riesgos de distintos fenómenos ambientales alternativas que ocurren simultáneamente sobre las subregiones no es que cada tipo de riesgo se evalúe sobre una porción de viviendas, sino que todos los riesgos son evaluados sobre todas las viviendas simultáneamente, aunque el peso asignado a los riesgos varíe entre unos y otros y, los riesgos en sí varíen entre subregiones.

Los pesos que corresponden a cada alternativa obtenidos al calcular el vector propio se multiplicarán por el grado de riesgo de cada fenómeno ambiental reportado por subregión para obtener el factor de modificación para unidades residenciales según cada tipo de riesgo y la suma de estos factores dará el factor de modificación del subcriterio *riesgo de fenómenos ambientales en la subregión*.

#### 2.5.1.3 Matrices de comparación entre subcriterios

Tras:

- a) elaborar las matrices de comparación entre las alternativas de cada subcriterio;
- b) obtener los vectores propios que corresponden a las escalas locales de prioridades de cada subcriterio;
- c) generar las escalas ajustadas de cada alternativa por subcriterio;
- d) calcular los factores de modificación de cada subcriterio;

se procede a realizar las matrices de comparación entre los subcriterios mismos, para obtener la escala de prioridades que corresponde a la importancia de cada subcriterio en función de los otros para el criterio *características de la vivienda* y el criterio *fenómenos en la subregión*.

La matriz  $UR_{C1}$  tendrá la siguiente estructura:

**Afectaciones a la instalación de GD fotovoltaica en unidades residenciales a partir de sus características: (C1)**

$UR_{C1}$	<b>Electricidad. (SC1)</b>	<b>Tenencia de la vivienda (SC2)</b>	<b>Material de techo (SC3)</b>	<b>Verticalidad de la vivienda (SC4)</b>
<b>Electricidad. (SC1)</b>	1	importancia de SC <sub>1</sub> sobre SC <sub>2</sub> respecto a C1	importancia de SC <sub>1</sub> sobre SC <sub>3</sub> respecto a C1	importancia de SC <sub>1</sub> sobre SC <sub>4</sub> respecto a C1
<b>Tenencia de la vivienda (SC2)</b>	importancia de SC <sub>2</sub> sobre SC <sub>1</sub> respecto a C1	1	importancia de SC <sub>2</sub> sobre SC <sub>3</sub> respecto a C1	importancia de SC <sub>2</sub> sobre SC <sub>4</sub> respecto a C1
<b>Material de techo (SC3)</b>	importancia de SC <sub>3</sub> sobre SC <sub>1</sub> respecto a C1	importancia de SC <sub>3</sub> sobre SC <sub>2</sub> respecto a C1	1	importancia de SC <sub>3</sub> sobre SC <sub>4</sub> respecto a C1
<b>Verticalidad de la vivienda (SC4)</b>	importancia de SC <sub>4</sub> sobre SC <sub>1</sub> respecto a C1	importancia de SC <sub>4</sub> sobre SC <sub>2</sub> respecto a C1	importancia de SC <sub>4</sub> sobre SC <sub>3</sub> respecto a C1	1

Tabla 30: Matriz de comparación correspondiente al criterio características de las unidades residenciales con sus respectivas alternativas. Fuente: elaboración propia

El vector propio de esta matriz  $W_{C1}^{UR}$  corresponderá a la escala de prioridades de los diferentes subcriterios, es decir, que tan importante es cada subcriterio respecto a los otros en cuestión de afectaciones a la instalación de GDFV en unidades residenciales.

La forma normalizada de este vector permite identificar el peso de cada subcriterio como el componente que aporta dicho subcriterio al total del criterio. Multiplicando el peso de los cuatro subcriterios ( $w_{SC}^{UR}$ ) por su respectivo factor de modificación del potencial para una subregión  $i$  ( $FM_i^{UR,SC}$ ) se obtiene la ponderación que corresponde a cada subcriterio asociado a las *características de las unidades residenciales* ( $P_i^{UR,SC}$ ) (véase tabla 31).

La suma de la ponderación de los cuatro subcriterios dará el porcentaje del potencial de instalación técnico de unidades residenciales que se evalúa es viable de acuerdo a:

- la distribución de viviendas con las posibles características indicadas como alternativas para los cuatro subcriterios evaluados,
- los pesos calculados para cada una de esas características

- los pesos calculados para dichos subcriterios.

Escala de prioridades de los subcriterios	Factor de modificación por subcriterio	Ponderación por subcriterio
$w_{SC1}^{UR}$	$FM_i^{UR,SC1}$	$P_i^{UR,SC1} = w_{SC1}^{UR} \times FM_i^{UR,SC1}$
$w_{SC2}^{UR}$	$FM_i^{UR,SC2}$	$P_i^{UR,SC2} = w_{SC2}^{UR} \times FM_i^{UR,SC2}$
$w_{SC3}^{UR}$	$FM_i^{UR,SC3}$	$P_i^{UR,SC3} = w_{SC3}^{UR} \times FM_i^{UR,SC3}$
$w_{SC4}^{UR}$	$FM_i^{UR,SC4}$	$P_i^{UR,SC4} = w_{SC4}^{UR} \times FM_i^{UR,SC4}$
Suma = 1		Suma = $P_i^{UR,C1}$

Tabla 31: Procesamiento de escala de prioridades de cada subcriterio de características de las unidades residenciales para obtener la ponderación asociada. Fuente: elaboración propia.

Mientras que de la matriz de comparación  $UR_{C2}$  de los subcriterios *percepción de inseguridad en la subregión* (SC5) y *riesgo de fenómenos ambientales en la subregión* (SC6) se obtendrá el vector propio que corresponda a la escala de prioridades de los subcriterios.

**Afectaciones a la instalación de GDFV a partir de los fenómenos en la subregión en donde se encuentran las unidades residenciales (C2)**

	Percepción de inseguridad en la subregión (SC5)	Riesgo de fenómenos ambientales en la subregión(SC6)
$UR_{C2}$		
<b>Percepción de inseguridad en la subregión (SC5)</b>	1	importancia de SC5 sobre SC6 respecto a C2
<b>Riesgo de fenómenos ambientales en la subregión(SC6)</b>	importancia de SC6 sobre SC5 respecto a C2	1

Tabla 32: Matriz de comparación correspondiente al criterio fenómenos en la subregión con sus respectivas alternativas. Fuente: elaboración propia

El peso de cada subcriterio deberá multiplicarse por su correspondiente factor de modificación para obtener la ponderación que corresponde a cada subcriterio asociado a los *fenómenos en la subregión* ( $P_i^{UR,SC}$ ) (véase tabla 33).

La suma de la ponderación de ambos subcriterios dará el porcentaje del

potencial de instalación técnico de unidades residenciales que se evalúa es viable de acuerdo a:

- la distribución de la percepción de inseguridad y el riesgo de fenómenos ambientales
- los pesos calculados para cada una de las alternativas de estos fenómenos
- los pesos calculados para dichos subcriterios

Escala de prioridades de los subcriterios	Factor de modificación por subcriterio	Ponderación por subcriterio
$w_{SC5}^{UR}$	$FM_i^{UR,SC5}$	$P_i^{UR,SC5} = w_{SC5}^{UR} \times FM_i^{UR,SC5}$
$w_{SC6}^{UR}$	$FM_i^{UR,SC6}$	$P_i^{UR,SC6} = w_{SC6}^{UR} \times FM_i^{UR,SC6}$
Suma = 1		Suma = $P_i^{UR,C2}$

Tabla 33: Procesamiento de escala de prioridades de cada subcriterio de fenómenos en la subregión para obtener la ponderación asociada. Fuente: elaboración propia.

#### 2.5.1.4. Matriz de comparación entre criterios

Por último, la matriz  $UR_G$  que compara los criterios *características de las unidades residenciales (C1)* y *fenómenos en la subregión que afectan la instalación de generación distribuida fotovoltaica en unidades residenciales (C2)* permite establecer qué contribución tendrá al indicador final del potencial tanto la evaluación de las características de las unidades residenciales, como la evaluación de los fenómenos subregionales.

Bastará multiplicar los pesos arrojados por el vector propio de esta matriz  $W_G$  (ver tabla 34) por los porcentajes del potencial asociados a cada subregión  $i$  para cada criterio  $C$  ( $P_i^{UR,C}$ ) para obtener el porcentaje del potencial instalable que corresponde a cada criterio ( $PI_i^{UR,C}$ ).

<b>Incidencia en el potencial de instalación de GD fotovoltaica en unidades residenciales</b>		
$UR_G$	<b>Características de las unidades residenciales en la subregión que afectan la instalación de GDFV (C1)</b>	<b>Fenómenos en la subregión que afectan la instalación de GDFV en unidades residenciales (C2)</b>
<b>Características de las unidades residenciales en la subregión que afectan la instalación de GDFV (C1)</b> <b>Fenómenos en la subregión que afectan la instalación de GDFV en unidades residenciales (C2)</b>	1	comparación de importancia de C1 respecto de C2
	comparación de importancia de C2 respecto de C1	1

Tabla 34: Matriz de comparación entre criterios. Fuente: elaboración propia

La suma de estos dos valores dará el porcentaje del potencial técnico del sector residencial en la subregión que se estima puede instalarse de acuerdo al refinamiento por criterios económico-ambientales y socioculturales ( $PI_i^{UR,G}$ ) (ver tabla 35)

<b>Escala de prioridades de los criterios</b>	<b>Porcentaje del potencial de acuerdo a la evaluación por subcriterios de cada criterio</b>	<b>Porcentaje del potencial instalable para el sector residencial</b>
$w_{C1}^{UR}$	$P_i^{UR,C1}$	$PI_i^{UR,C1} w_{C1}^{UR} \times P_i^{UR,C1}$
$w_{C2}^{UR}$	$P_i^{UR,C2}$	$PI_i^{UR,C2} w_{C2}^{UR} \times P_i^{UR,C2}$
<b>Suma = 1</b>		<b>Suma = <math>PI_i^{UR,G}</math></b>

Tabla 35. Procesamiento de escala de prioridades de entre criterios para obtener el porcentaje del potencial instalable. Fuente: elaboración propia.

Al multiplicar el porcentaje del potencial instalable por el potencial técnico del sector residencial en cada subregión se obtendrá el potencial de instalación del sector residencial para cada subregión. La suma del potencial de todas las subregiones dará el total del potencial de instalación de generación distribuida fotovoltaica para el sector residencial en la región tomando en cuenta criterios técnicos, económico-ambientales y socioculturales.

### 2.5.2 Sector agropecuario

El proceso de delimitación de los criterios, subcriterios y alternativas del sector agropecuario fueron idénticos al sector residencial. Para el primer nivel de criterios también se definieron tanto las características de las unidades agropecuarias (terrenos) ( $C1$ ), como los fenómenos en las subregiones ( $C2$ ) que afectan la instalación de generación distribuida fotovoltaica en dichas unidades. Como en el sector previo, este nivel determinó una matriz  $UA_G$ , en donde se compara la importancia relativa de ambos criterios para el potencial de instalación del sector agropecuario en la región a evaluar (ver tabla 36)

En el siguiente nivel nuevamente se establecieron subcriterios que permiten matizar los criterios definidos en el primer nivel a través de comparación por pares para establecer su peso relativo a su criterio dominante, es decir, respecto al que están siendo comparados.

Para la matriz de comparación de los subcriterios que corresponden a las características de las unidades agropecuarias en una subregión se construyó la matriz  $UA_{C1}$  de  $4 \times 4$  que compara uno a uno la relevancia de la interconexión a las redes generales de distribución ( $SC1$ ), la tenencia ( $SC2$ ), los derechos sobre la tierra ( $SC3$ ) y la actividad principal del terreno ( $SC4$ ) en la instalación de GDFV en unidades agropecuarias, como se indica en la tabla 24.

Para la matriz de comparación de los subcriterios que corresponden a cómo afectan los fenómenos que ocurren en la subregión a la instalación de GD fotovoltaica en las unidades agropecuarias se construyó la matriz de comparación  $UA_{C2}$  de  $2 \times 2$  que compara los subcriterios percepción de inseguridad y riesgos de fenómenos ambientales.

Finalmente, el tercer nivel consta de los elementos que sirven de alternativas para los subcriterios. Las alternativas comparadas en la evaluación multicriterio de las características de los terrenos que afectan la instalación de GDFV surgen de los tabulados de la actualización del marco censal agropecuario 2016, mientras que las alternativas que corresponden a los fenómenos en la subregión que afectan la instalación de generación distribuida fotovoltaica en las distintas unidades son idénticas a las usadas para el sector residencial, pues están definidas para los 5 sectores.

Este nivel requiere de seis matrices, una para cada subcriterio que corresponde a las *características de las unidades agropecuarias* ( $UA_{SC1}$  ,  $UA_{SC2}$  ,  $UA_{SC3}$  ,  $UA_{SC4}$  ) y dos más vinculadas a los subcriterios que corresponden a *los fenómenos en la subregión que afectan la instalación de generación distribuida fotovoltaica en unidades agropecuarias* ( $UA_{SC5}$  ,  $UA_{SC6}$  ).

Al igual que para la evaluación multicriterio del sector residencial, será necesario construir las matrices que corresponden a la comparación de los elementos de distintos niveles de la jerarquía, en donde las entradas pertenecen al conjunto de valores indicados en la escala fundamental

La matriz  $UA_{SC1}$  comparará las alternativas del primer subcriterio para determinar qué peso tiene que un terreno cuente o no con interconexión al sistema eléctrico. La siguiente matriz  $UA_{SC2}$  comparará las alternativas del segundo subcriterio para determinar qué peso tiene cada modalidad de tenencia de los terrenos en función de la facilidad para la toma de decisiones colectivas o individuales sobre modificaciones al terreno. La tercer matriz  $UA_{SC3}$  comparará las alternativas de derechos sobre la tierra en función de la facilidad para la toma de decisiones sobre inversiones en infraestructura en los terrenos y la última  $UA_{SC3}$  comparará las actividades principales posibles para determinar a qué actividades se les puede asignar mayor potencial.

Del total de alternativas ofrecidas por los insumos informáticos se construyeron cúmulos entre aquellas que no representan una diferencia significativa al compararse una a una respecto al subcriterio que las dominara (Carlos, M. S., y Celsa, C. R., 2017), quedando las matrices cómodamente por debajo del límite de 9 elementos.

¿Qué puede afectar la instalación de GDFV en unidades agropecuarias de una subregión?: Ciertas características de las unidades agropecuarias y algunos fenómenos en la subregión					
(C1) ¿Qué características de las unidades agropecuarias en la subregión afectan la instalación de GDFV? Si cuentan previamente con interconexión al sistema eléctrico, su tenencia, sus derechos sobre la tierra y su actividad principal.				(C2) Qué fenómenos en la subregión afectan la instalación de GDFV en unidades agropecuarias? La percepción de inseguridad y los riesgos de fenómenos ambientales	
(SC1) ¿Cómo afecta a la instalación de GD el hecho de que un terreno cuente previamente con interconexión al sistema eléctrico?  En la facilidad para interconectar a las redes generales de distribución	(SC2) ¿Cómo afecta la tenencia de un terreno a su instalación de GD?  En la facilidad para la toma de decisiones colectivas o individuales sobre modificaciones al terreno	(SC3) ¿Cómo afectan los derechos sobre la tierra de un terreno a la instalación de GD?  En la facilidad para la toma de decisiones sobre inversiones en infraestructura	(SC4) ¿Cómo afecta la actividad principal del terreno a la instalación de GD?  En la disponibilidad de superficie de instalación y los usos compartidos que tendrá..	(SC5) ¿Cómo afecta la percepción de inseguridad en la subregión a la instalación de GD en terrenos?  En que sea motivo de migración o los habitantes tengan gastos adicionales asociados a cuestiones securitarias	(SC6) ¿Cómo afecta el riesgo de fenómenos ambientales en la subregión a la instalación de GD en terrenos?  En que las unidades y/o los sistemas de GD sean vulnerables y los fenómenos conlleven una afectación económica
¿Bajo qué alternativas puede evaluarse este subcriterio en terrenos?  (A1 <sub>1</sub> ) Tiene electricidad  (A1 <sub>2</sub> ) No tiene electricidad, no se sabe	¿Bajo qué alternativas puede evaluarse este subcriterio en terrenos?  (A2 <sub>1</sub> ) Ejidal y comunal  (A2 <sub>2</sub> ) Privada y colonia agrícola  (A2 <sub>3</sub> ) Pública  (A2 <sub>4</sub> ) No se sabe	¿Bajo qué alternativas puede evaluarse este subcriterio en terrenos?  (A3 <sub>1</sub> ) Propio  (A3 <sub>2</sub> ) Rentado, concesionado  (A3 <sub>3</sub> ) Tomado a medias, prestado, en posesión  (A3 <sub>4</sub> ) No se sabe	¿Bajo qué alternativas puede evaluarse este subcriterio en viviendas?  (A4 <sub>1</sub> ) Agricultura  (A4 <sub>2</sub> ) Ganadería  (A4 <sub>3</sub> ) Forestal  (A4 <sub>4</sub> ) Sin actividad  (A4 <sub>5</sub> ) Otra	¿Bajo qué alternativas puede evaluarse este subcriterio en las subregiones?  (A5 <sub>1</sub> ) Segura  (A5 <sub>2</sub> ) Insegura	¿Bajo qué alternativas puede evaluarse este subcriterio en las subregiones?  (A6 <sub>1</sub> ) Inundación  (A6 <sub>2</sub> ) Tormenta  (A6 <sub>3</sub> ) Incendio  (A6 <sub>4</sub> ) Deslave

Tabla 36: Niveles de jerarquía para análisis multicriterio del sector agropecuario. Fuente: elaboración propia con datos de la actualización del marco censal agropecuario 2016.

Tras completar las matrices descritas arriba se procede a obtener la escala de prioridades asociada a cada subcriterio calculando el vector propio principal de cada matriz  $UR_{SC}$  para los 4 subcriterios que corresponden a características de los terrenos y los 2 subcriterios que corresponden a los fenómenos en la subregión. De estos vectores propios se podrán obtener las escalas ajustadas y los factores de modificación por alternativa. El procesamiento de datos será idéntico, obteniendo de la suma de los factores de modificación por alternativa el factor de modificación de cada subcriterio. Este factor deberá integrarse con el peso obtenido para cada subcriterio para obtener la ponderación por subcriterio que permitirá calcular el aporte de cada criterio al porcentaje de potencial final que corresponde a la evaluación multicriterio de las unidades agropecuarias.

Bastará multiplicar este porcentaje por el resultado del potencial técnico del sector agropecuario en cada subregión para obtener el potencial de instalación del sector agropecuario para cada subregión tomando en cuenta criterios técnicos, económico-ambientales y socioculturales. La suma del potencial de todas las subregiones dará el total del potencial de instalación de generación distribuida fotovoltaica para el sector residencial en la región tomando en cuenta criterios técnicos, económico-ambientales y socioculturales.

### *2.5.3 Sector comercial y de servicios (e industrial)*

Para la matriz de comparación de los subcriterios que corresponden a las características de las unidades económicas en una subregión se construyó una matriz  $UCS_{C1}$  de  $4 \times 4$  que compara uno a uno la relevancia para la instalación de GDFV en unidades comerciales y de servicios de información referente a:

- La interconexión de las unidades económicas a las redes de distribución y transmisión (a partir del consumo de energía eléctrica por unidad económica o si la unidad económica cuenta con medidor de la CFE)
- La vulnerabilidad en la tenencia (a partir de los gastos que realizó el establecimiento por rentas y alquileres y las ganancias del establecimiento)
- La titularidad del establecimiento (a quién pertenece)
- El tipo de establecimiento (fijo, semifijo, actividad dentro de vivienda)

Para la matriz de comparación de los subcriterios que corresponden a cómo afectan los fenómenos que ocurren en la subregión a la instalación de GDFV en las unidades económicas se construyó la matriz de comparación  $UCS_{C2}$  de  $2 \times 2$  que compara los subcriterios:

- percepción de inseguridad ( $SC5$ )
- riesgos de fenómenos ambientales ( $SC6$ ).

Finalmente, el tercer nivel consta de los elementos que sirven de alternativas para los subcriterios. Las alternativas comparadas en la evaluación multicriterio de las características de las unidades económicas que afectan la instalación de GDFV surgen del cuestionario básico del censo económico 2019, mientras que las alternativas que corresponden a los fenómenos en la subregión que afectan la instalación de generación distribuida fotovoltaica en las distintas unidades son idénticas a las usadas para el sector residencial, pues están definidas para los 5 sectores.

Este nivel requiere de cinco matrices, una para cada subcriterio que corresponde a las *características de las unidades económicas*, excepto para el subcriterio de *vulnerabilidad en la tenencia* ( $UCS_{SC1}$ ,  $UCS_{SC3}$ ,  $UCS_{SC4}$ ) y dos más vinculadas a los subcriterios que corresponden a *los fenómenos en la subregión que afectan la instalación de generación distribuida fotovoltaica en unidades comerciales y de servicios* ( $UCS_{SC5}$ ,  $UCS_{SC6}$ ).

¿Qué puede afectar la instalación de generación distribuida fotovoltaica en unidades económicas de una subregión?: Ciertas características de las unidades comerciales y de servicios y algunos fenómenos en la subregión					
(C1) ¿Qué características de las unidades económicas en la subregión afectan la instalación de GDFV? Si cuentan previamente con interconexión al sistema eléctrico, su tenencia, la infraestructura de la unidad económica y si ha tenido que cambiar de domicilio			(C2) Qué fenómenos en la subregión afectan la instalación de GDFV en unidades económicas? La percepción de inseguridad y los riesgos de fenómenos ambientales		
(SC1) ¿Cómo afecta a la instalación de GD el hecho de que una unidad económica cuente previamente con interconexión al sistema eléctrico?  En la facilidad para interconectar a las redes generales de distribución	(SC2) ¿Cómo afecta la tenencia de una unidad económica a su instalación de GD?  En la facilidad para la toma de decisiones sobre inversiones en infraestructura	(SC3) ¿Cómo afectan la titularidad de la unidad económica a la instalación de GD?  En la facilidad para la toma de decisiones colectivas o individuales sobre modificaciones e inversiones	(SC4) ¿Cómo afecta el tipo de unidad económica a la instalación de GD?  En la disponibilidad de superficie de instalación y los usos compartidos que tendrá.	(SC5) ¿Cómo afecta la percepción de inseguridad en la subregión a la instalación de GD en unidades económicas?  En que sea motivo de migración o los propietarios tengan gastos adicionales asociados a cuestiones securitarias	(SC6) ¿Cómo afecta el riesgo de fenómenos ambientales en la subregión a la instalación de GD en unidades económicas?  En que las unidades y/o los sistemas de GD sean vulnerables y los fenómenos conlleven una afectación económica
¿Bajo qué alternativas puede evaluarse este subcriterio en unidades económicas?  A11 Tiene medidor de la CFE  A12 No tiene electricidad, no se sabe	¿Bajo qué alternativas puede evaluarse este subcriterio en unidades económicas?  Continuo de reales	¿Bajo qué alternativas puede evaluarse este subcriterio en unidades económicas?  A31 Persona física  A32 Una sociedad o asociación, Partido u organización política  A33 El Gobierno  A34 Embajada, consulado u oficina de representación diplomática de otro país, Organismo internacional (ONU, OEA, OCDE, entre otros)	¿Bajo qué alternativas puede evaluarse este subcriterio en unidades económicas?  A41 Fija  A42 Semifija, actividad dentro de vivienda	¿Bajo qué alternativas puede evaluarse este subcriterio en las subregiones?  A51 Segura  A52 Insegura	¿Bajo qué alternativas puede evaluarse este subcriterio en las subregiones?  A61 Inundación  A62 Tormenta  A63 Incendio  A64 Deslave

Tabla 37: Niveles de jerarquía para análisis multicriterio del sector comercial y de servicios e industrial. Fuente: elaboración propia con datos de la actualización del marco censal agropecuario 2016.

La matriz  $UA_{SC1}$  comparará las alternativas del primer subcriterio para determinar qué peso tiene que una unidad económica cuente o no con interconexión al sistema eléctrico. Para el siguiente subcriterio no se elaborará una matriz de comparación entre alternativas debido a la cantidad de alternativas posibles, pero la importancia del subcriterio si será comparado con los otros en su nivel para determinar su peso. La matriz del tercer subcriterio  $UA_{SC3}$  comparará las alternativas de la titularidad de la unidad económica en función de la facilidad para la toma de decisiones sobre inversiones en infraestructura en las unidades económicas y la matriz  $UA_{SC4}$  comparará el tipo de establecimiento para determinar a cuales se les puede asignar mayor potencial.

Para el subcriterio de titularidad de la unidad económica se construyeron cúmulos entre las alternativas que no representan una diferencia significativa al compararse una a una respecto al subcriterio, quedando la matriz con 4 alternativas en vez de 6.

Tras completar las matrices descritas arriba se procede a obtener la escala de prioridades asociada a cada subcriterio calculando el vector propio principal de las 3 matrices que corresponden a características de las unidades económicas. Las distintas escalas locales para cada subcriterio deben re-escalarsse para que la alternativa dominante coincida con el 100% de potencial técnico y el resto de las alternativas mantengan el orden descendente y con la misma relación de dominancia.

La escala ajustada de cada alternativa se multiplicará por el vector que contenga como entradas los porcentajes de unidades económicas que comparten subsector económico y estrato en una subregión que cumplen tener como característica dicha alternativa. El resultado será el vector que corresponde al *factor de modificación* de la alternativa.

La suma de los factores de modificación que corresponden a las distintas alternativas que conforman un subcriterio nos dará el factor de modificación general del subcriterio, que al ser una suma de vectores, también es un vector. Cada entrada corresponde al factor de modificación general del subcriterio de los distintos grupos de unidades económicas que comparten subsector económico y estrato.

Al construir el potencial técnico de los sectores comercial y de servicios e industrial, se opta por evaluar el potencial técnico de cada grupo de unidades

económicas que comparten subsector económico y estrato, para posteriormente sumarlas entre subsectores, entre estratos y entre subregiones. Esta evaluación sumamente disgregada responde a la varianza considerable entre las características espaciales de las unidades en función de estos criterios, la cual no solo se refleja en su superficie disponible, sino en la distribución entre las alternativas que competen a los subcriterios no técnicos, por lo que generar los factores de modificación para cada alternativa con la misma disgregación (un factor por cada grupo que comparta subsector económico, estrato y subregión) permite eventualmente integrar el porcentaje de potencial instalable que se obtenga para cada uno de estos grupos al porcentaje técnico calculado y obtener un potencial de instalación construido con mucha más granularidad

A diferencia de los otros 3 subcriterios que refieren a características de las unidades económicas, el subcriterio vulnerabilidad en la tenencia tiene como alternativas el rango de los reales del 0 al 1, que corresponde a los valores posibles para el indicador de vulnerabilidad en la tenencia. A cada grupo de unidades económicas que comparten estrato, subsector económico y subregión le corresponde un valor obtenido de calcular el gasto en renta y alquiler entre la suma de dicho gasto más las ganancias de la unidad. En caso de no tener gasto en renta, el valor será 0, en caso de no tener ganancia el valor será de 1.

El indicador de vulnerabilidad será 1 menos dicho valor y el factor de modificación de dicho subcriterio será el vector que contenga como entradas este indicador para cada grupo de unidades económicas que comparten subsector económico y estrato en una subregión.

El resto del procedimiento será idéntico que para el sector residencial y el agropecuario hasta obtener el vector que representa el porcentaje del potencial técnico de cada grupo de unidades económicas que comparten subsector económico y estrato en una subregión que se estima puede instalarse de acuerdo al refinamiento por criterios económico-ambientales y socioculturales.

Así, cada entrada del vector al estar vinculada con un grupo específico de unidades económicas que comparten subsector económico y estrato, deberán multiplicarse por el valor del potencial técnico de instalación de dicho grupo. La suma de estos potenciales para todos los subsectores económicos, estratos y subregiones

dará el total del potencial de instalación de GDFV para el sector comercial y de servicios y el sector industrial en la región.

#### *2.5.4 Sector público*

Para la matriz de comparación de los subcriterios que corresponden a las características de las unidades públicas solo se encontró información respecto a la tenencia de las unidades en el Censo Nacional de Gobiernos Municipales y Demarcaciones Territoriales de la Ciudad de México 2021 por lo que la matriz que corresponde al primer criterio no será necesaria hasta que existan más insumos que ilustren la instalación previa, el material de techos o uso de suelos públicos, la interconexión a las redes de distribución y si los techos de los inmuebles públicos son propios o compartidos en cada subregión.

Para la matriz de comparación de los subcriterios que corresponden a cómo afectan los fenómenos que ocurren en la subregión a la instalación de GDFV en las unidades públicas se construyó la matriz de comparación  $UP_{C2}$  de  $2 \times 2$  que compara los subcriterios: percepción de inseguridad ( $SC5$ ) y riesgos de fenómenos ambientales ( $SC6$ ).

Finalmente, el tercer nivel consta de los elementos que sirven de alternativas para los subcriterios de tenencia, percepción de inseguridad y riesgos de fenómenos ambientales. Este nivel requiere sólo de tres matrices, una que compare alternativas de tenencia, otra que compare percepción de seguridad vs percepción de inseguridad y finalmente una que compare alternativas de riesgos de fenómenos ambientales ( $UP_{SC1}$ ,  $UP_{SC2}$ ,  $UP_{SC3}$ ).

El resto del procedimiento será idéntico que en los sectores previos hasta obtener el porcentaje del potencial técnico que se estima puede instalarse de acuerdo al refinamiento por criterios económico-ambientales y socioculturales en cada subregión. La suma de estos potenciales para todas las subregiones dará el total del potencial de instalación de GDFV para el sector público en la región.

¿Qué puede afectar la instalación de generación distribuida fotovoltaica en unidades públicas de una subregión?: Ciertas características de las unidades públicas y algunos fenómenos en la subregión		
(C1) ¿Qué características de las unidades públicas en la subregión afectan la instalación de generación distribuida fotovoltaica? Su tenencia	(C2) ¿Qué fenómenos en la subregión afectan la instalación de generación distribuida fotovoltaica en unidades públicas? La percepción de inseguridad y los riesgos de fenómenos ambientales	
(SC2) ¿Cómo afecta la tenencia de una unidad pública a su instalación de GD?  En la facilidad para la toma de decisiones sobre inversiones en infraestructura	(SC2) ¿Cómo afecta la percepción de inseguridad en la subregión a la instalación de GD en unidades públicas?  En que sea motivo de gastos adicionales que imposibiliten presupuestos locales para la instalación	(SC3) ¿Cómo afecta el riesgo de fenómenos ambientales en la subregión a la instalación de GD en unidades públicas?  En que las unidades y/o los sistemas de GD sean vulnerables y los fenómenos conlleven una afectación económica
¿Bajo qué alternativas puede evaluarse este subcriterio en unidades públicas?  (A2 <sub>1</sub> ) Propios (A2 <sub>1</sub> ) Rentados (A2 <sub>1</sub> ) Otro, no especificado	¿Bajo qué alternativas puede evaluarse este subcriterio en las subregiones?  (A2 <sub>1</sub> ) Segura (A2 <sub>2</sub> ) Insegura	¿Bajo qué alternativas puede evaluarse este subcriterio en las subregiones?  (A3 <sub>1</sub> ) Inundación (A3 <sub>2</sub> ) Tormenta (A3 <sub>3</sub> ) Incendio (A3) Deslave

Tabla 38: Niveles de jerarquía para análisis multicriterio del sector público. Fuente: elaboración propia con datos del Censo Nacional de Gobiernos Municipales y Demarcaciones Territoriales de la Ciudad de México 2021

### 3. Implementación

A continuación se presentan los resultados de la implementación del sistema de evaluación para el análisis del potencial de instalación de GDFV en la Ciudad de México. Para ver los cálculos desglosados y los datos favor de ingresar al anexo de: [Implementación CDMX](#)

#### *Módulo 0. Delimitación geográfica:*

Región	Clave subregión	Nombre subregión
Ciudad de México	1	Azcapotzalco
	2	Coyoacán
	3	Cuajimalpa de Morelos
	4	Gustavo A. Madero
	5	Iztacalco
	6	Iztapalapa
	7	Magdalena Contreras
	8	Milpa Alta
	9	Álvaro Obregón
	10	Tláhuac
	11	Tlalpan
	12	Xochimilco
	13	Benito Juárez
	14	Cuauhtémoc
	15	Miguel Hidalgo
	16	Venustiano Carranza

*Tabla 39: Delimitación geográfica para la Ciudad de México.*

#### *Módulo 1. Capacidad instalable por superficie*

Sector	Eficiencia de paneles	Capacidad instalable ( $W/m^2$ )
Residencial	19.00%	190
Agropecuario	20.50%	205
Comercial y servicios	20.00%	200
Industrial	21.00%	210
Público	20.00%	200

*Tabla 40: Capacidad instalable por superficie a partir de la eficiencia de paneles para cada sector. Elaboración propia.*

Este módulo puede ajustarse por subregión, pero para este caso se estableció idéntico entre las 16 subregiones que conforman la ciudad de México

#### *Módulo 2.1 PIT del sector residencial*

Para el cálculo del PIT en las viviendas que conforman el sector residencial se

utilizaron los datos del cuestionario ampliado del censo de población y vivienda 2020 para la cantidad de viviendas, el porcentaje de viviendas de cada grupo de tamaños según los cuartos y el porcentaje de viviendas con instalación previa de sistemas fotovoltaicos. De la encuesta nacional de viviendas 2020 se obtuvo la superficie promedio por cantidad de cuartos. El porcentaje de superficie instalable se asignó de la siguiente manera para todas las subregiones:

- viviendas de 1 cuarto: 0%
- viviendas de 2-3 cuartos: 15%
- viviendas de 4 a 5 cuartos: 20%
- viviendas de 6 cuartos o más 25%

nomSR	UR_TOT	UR_PIT_SUP	UR_PW
Nombre de subregión	Total de unidades residenciales por subregión	PIT por superficie de unidades residenciales, excluyendo IP:	Promedio de W por unidades residenciales
	unidades residenciales	W	W
Azcapotzalco	132,362	557,799,861.46	4,214.20
Coyoacán	184,264	911,659,787.36	4,947.57
Cuajimalpa de Morelos	66,220	313,297,846.91	4,731.17
Gustavo A. Madero	332,413	1,439,919,937.65	4,331.72
Iztacalco	116,121	503,497,165.90	4,335.97
Iztapalapa	488,986	1,967,203,490.64	4,023.03
Magdalena Contreras	69,294	294,505,643.03	4,250.09
Milpa Alta	39,534	145,129,641.64	3,671.01
Álvaro Obregón	215,988	932,577,369.61	4,317.73
Tláhuac	104,103	433,097,974.42	4,160.28
Tlalpan	195,648	859,901,911.01	4,395.15
Xochimilco	113,895	465,628,987.23	4,088.23
Benito Juárez	175,375	806,751,757.06	4,600.15
Cuauhtémoc	201,317	793,254,686.21	3,940.33
Miguel Hidalgo	149,989	637,781,062.71	4,252.19
Venustiano Carranza	134,950	544,397,990.16	4,034.07
<b>Ciudad de México</b>	<b>2,720,459</b>	<b>11,606,405,113.00</b>	<b>4266.34</b>

Tabla 41: PIT por superficie de unidades residenciales, excluyendo IP y promedio de capacidad instalable por unidad residencial en la Ciudad de México. Elaboración propia.

## *Módulo 2.2 PIT del sector agropecuario*

Para el cálculo del PIT en los terrenos que conforman el sector agropecuario se utilizaron los datos de la actualización del marco censal agropecuario 2016 para la cantidad de terrenos en la subregión y la distribución por tenencia, derechos sobre la tierra y actividad principal. El porcentaje de superficie instalable se asignó de la siguiente manera para todas las subregiones:

- actividad principal agricultura: 20%
- actividad principal ganadería 25%
- actividad principal forestal: 10%
- actividad principal sin actividad: 30%
- actividad principal otra: 10%
- cualquier tenencia o derecho sobre la tierra: 10%

Se puede observar que las distintas particiones arrojan resultados similares pero lo suficientemente diferenciados para poder privilegiar la elección de una partición que permita mayor granularidad. Para este caso el valor obtenido del cálculo subregional por actividad primaria será el que se utilice de base para el reajuste del módulo 3.

nomSR	UA_TOT	UA_PIT_TOT	UA_PIT_TEN	UA_PIT_DT	UA_PIT_AP
Nombre de subregión	Total de terrenos por subregión	PIT por tamaño promedio de superficie de terrenos	PIT por tamaño promedio de superficies de terrenos de las distintas modalidades de		
			tenencia,	derechos sobre la tierra,	actividad principal,
		excluyendo terrenos con instalación previa:			
	terrenos	W	W	W	W
Azcapotzalco	0	0	0	0	0
Coyoacán	0	0	0	0	0
Cuajimalpa de Morelos	164	82,000,000	82,000,000	81,964,678	81,509,516
Gustavo A. Madero	0	0	0	0	0
Iztacalco	0	0	0	0	0
Iztapalapa	0	0	0	0	0
Magdalena Contreras	511	255,500,000	255,447,252	255,422,813	255,500,000
Milpa Alta	8,248	4,124,000,000	3,591,042,209	4,115,545,014	4,124,000,000
Álvaro Obregón	203	101,500,000	101,489,561	101,500,000	99,769,997
Tláhuac	4,269	951,534,417	951,577,278	967,492,952	1,442,496,979
Tlalpan	2,458	1,229,000,000	1,229,000,000	1,227,995,035	1,228,393,329
Xochimilco	5,293	1,026,733,542	1,242,624,530	1,050,500,387	1,465,047,519
Benito Juárez	0	0	0	0	0
Cuauhtémoc	0	0	0	0	0
Miguel Hidalgo	0	0	0	0	0
Venustiano Carranza	0	0	0	0	0
<b>Ciudad de México</b>	<b>21,146</b>	<b>7,770,267,958</b>	<b>7,453,180,830</b>	<b>7,800,420,878</b>	<b>8,696,717,341</b>

Tabla 42: PIT por superficie de unidades agropecuarias, excluyendo IP en la Ciudad de México. Elaboración propia.

### Módulo 2.3 PIT del sector comercial y de servicios

Para el cálculo del potencial técnico de instalación de GDFV en las unidades económicas que conforman el sector comercial y de servicios se utilizaron los datos del censo económico 2019 del cual se obtuvo la cantidad de unidades económicas por subsector económico y estrato de personal en las subregiones. Para este sector el cálculo se realizó por asignación de capacidad instalable aproximada (CIA). La asignación de la CIA fue la siguiente para todas las subregiones:

- para los subsectores económicos con estrato de personal 1: 2000 W
- para los subsectores económicos con estrato de personal 2: 3000 W
- para los subsectores económicos con estrato de personal 3: 3500 W
- para los subsectores económicos con estrato de personal 4: 4000 W
- para los subsectores económicos con estrato de personal 99: 3000 W

nomSR	UCS_TOT	UCS_PIT_CIA	UCS_PW
Nombre de subregión	Total de unidades comerciales y de servicios por subregión	PIT por CIA en unidades económicas, excluyendo IP:	Promedio de W instalables por unidad comercial y de servicios
	unidades económicas	W	W
Azcapotzalco	15,584	35,409,500	2,272
Coyoacán	21,161	56,156,500	2,654
Cuajimalpa de Morelos	7,363	20,554,500	2,792
Gustavo A. Madero	44,173	100,668,000	2,279
Iztacalco	14,336	39,703,500	2,769
Iztapalapa	70,955	193,400,000	2,726
Magdalena Contreras	6,712	15,543,000	2,316
Milpa Alta	6,367	13,958,000	2,192
Álvaro Obregón	21,244	51,408,000	2,420
Tláhuac	15,119	44,872,000	2,968
Tlalpan	22,577	59,415,000	2,632
Xochimilco	17,586	51,598,000	2,934
Benito Juárez	22,910	53,722,000	2,345
Cuauhtémoc	58,303	123,793,000	2,123
Miguel Hidalgo	21,647	51,157,000	2,363
Venustiano Carranza	27,561	74,684,000	2,710
<b>Ciudad de México</b>	<b>393,598</b>	<b>986,042,000</b>	<b>2,505</b>

Tabla 43: PIT por superficie de unidades comerciales y de servicios, excluyendo IP y promedio de capacidad instalable por unidad comercial y de servicios en la Ciudad de México. Elaboración propia.

## Módulo 2.4 PIT del sector industrial

Para el cálculo del potencial técnico de instalación de GDFV en las unidades económicas que conforman el sector industrial también se utilizaron los datos del censo económico 2019 del cual se obtuvo la cantidad de unidades económicas por subsector económico y estrato de personal en las subregiones. Para este sector el cálculo se realizó por asignación de capacidad instalable aproximada (CIA). La asignación de la CIA fue la siguiente para todas las subregiones:

- para los subsectores económicos con estrato de personal 1: 2000 W
- para los subsectores económicos con estrato de personal 2: 3000 W
- para los subsectores económicos con estrato de personal 3: 4000 W
- para los subsectores económicos con estrato de personal 4: 5000 W
- para los subsectores económicos con estrato de personal 99: 3000 W

nomSR	UI_TOT	UI_PIT_CIA	UI_PW
Nombre de subregión	Total de unidades industriales por subregión	PIT por CIA en unidades económicas, excluyendo IP:	Promedio de W instalables por unidad económica
	unidades económicas	W	W
Azcapotzalco	1,664	3,949,000	2,373
Coyoacán	1,632	3,602,000	2,207
Cuajimalpa de Morelos	560	1,685,000	3,009
Gustavo A. Madero	3,887	8,368,000	2,153
Iztacalco	1,631	3,730,000	2,287
Iztapalapa	7,532	16,243,000	2,157
Magdalena Contreras	495	1,485,000	3,000
Milpa Alta	583	1,186,000	2,034
Álvaro Obregón	1,768	3,954,000	2,236
Tláhuac	1,764	3,704,000	2,100
Tlalpan	2,105	4,488,000	2,132
Xochimilco	1,567	3,246,000	2,071
Benito Juárez	1,605	3,821,000	2,381
Cuauhtémoc	4,253	9,234,000	2,171
Miguel Hidalgo	1,561	3,911,000	2,505
Venustiano Carranza	1,730	3,676,000	2,125
<b>Ciudad de México</b>	<b>34,337</b>	<b>76,282,000</b>	<b>2,222</b>

Tabla 44: PIT por superficie de unidades industriales, excluyendo IP y promedio de capacidad instalable por unidad industrial en la Ciudad de México. Elaboración propia.

## Módulo 2.5 PIT del sector público

Para el cálculo del potencial técnico de instalación de GDFV en las unidades que

conforman el sector público se utilizaron los datos del Censo Nacional de Gobiernos Municipales y Demarcaciones Territoriales de la Ciudad de México 2021 del cual se obtuvo la cantidad de unidades públicas. Para este sector el cálculo se realizó por asignación de capacidad instalable aproximada (CIA). La asignación de la CIA fue de 5,000 W por unidad pública para todas las subregiones

nomSR	UP_TOT	UP_PTI_CIA
Nombre de subregión	unidades públicas totales por subregión	PIT por CIA en unidades públicas, excluyendo IP:
	unidades públicas	W
Azcapotzalco	112	560,000
Coyoacán	186	930,000
Cuajimalpa de Morelos	70	350,000
Gustavo A. Madero	55	275,000
Iztacalco	265	1,325,000
Iztapalapa	423	2,115,000
Magdalena Contreras	100	500,000
Milpa Alta	123	615,000
Álvaro Obregón	216	1,080,000
Tláhuac	130	650,000
Tlalpan	439	2,195,000
Xochimilco	198	990,000
Benito Juárez	96	480,000
Cuauhtémoc	135	675,000
Miguel Hidalgo	274	1,370,000
Venustiano Carranza	265	1,325,000
<b>Ciudad de México</b>	<b>3,087</b>	<b>15,435,000</b>

Tabla 45: PIT por superficie de unidades públicas, excluyendo IP y promedio de capacidad instalable por unidad pública en la Ciudad de México. Elaboración propia

### Módulo 3.1 Análisis multicriterio del sector residencial

Matriz de comparación de criterios (G): importancia de cada criterio para la instalación de GDFV en unidades residenciales de una subregión

Alternativas:

- (C1) características de las unidades residenciales
- (C2) fenómenos en la subregión

Escala de prioridades:  $WG = (0.75, 0.25)$

Matriz de comparación de subcriterios (C1): importancia de las características que pueden tener las unidades residenciales en la subregión para la instalación de GDFV

Alternativas:

- (SC1) Acceso a electricidad,
- (SC2) Modalidad de tenencia,
- (SC3) Material del techo
- (SC4) Verticalidad de la vivienda.

Escala de prioridades:  $WC1 = (0.4778, 0.2561, 0.1379, 0.1280)$

Matriz de comparación de subcriterios (C2): importancia de fenómenos en la subregión que para la instalación de GDFV en unidades residenciales

Alternativas:

- (SC5) Percepción de inseguridad
- (SC6) Riesgo de fenómenos ambientales

Escala de prioridades:  $WC2 = (0.666667, 0.333333)$

Matriz de comparación de alternativas del subcriterio 1 (SC1): importancia del acceso a la electricidad en la vivienda para la instalación de GDFV en función de la facilidad para interconectar a las redes generales de distribución

Alternativas:

- (A11) Tiene electricidad
- (A12) No tiene electricidad, no se sabe

Escala de prioridades:  $WSC1 = (0.9, 0.1)$

Matriz de comparación de alternativas del subcriterio 2 (SC2): importancia de la modalidad de la tenencia de la vivienda para la instalación de GDFV en función de la facilidad para la toma de decisiones sobre inversiones en la infraestructura de la vivienda

Alternativas:

- (A21) Propia
- (A22) Rentada
- (A23) Prestada
- (A24) Otra

Escala de prioridades:  $WSC2=(0.495, 0.267, 0.154, 0.0826)$

Matriz de comparación de alternativas del subcriterio 3 (SC3): importancia del material del techo de la vivienda para la instalación de GDFV en función de la facilidad y viabilidad para instalar sin necesitar inversión adicional para lograr capacidad de carga.

Alternativas:

- (A31) Concreto
- (A32) Teja
- (A33) Madera
- (A34) Palma, Terrado
- (A35) Desecho, Lámina de cartón, Lámina de metal, Lámina de asbesto, Lámina de fibrocemento, no especificado

Escala de prioridades  $W_{SC3} = (0.526, 0.173, 0.131, 0.109, 0.058)$

Matriz de comparación de alternativas del subcriterio 4 (SC4): importancia de la verticalidad de la vivienda para la instalación de GDFV en función de la disponibilidad de superficie de techos y los usos propios o compartidos de dichas superficies.

Alternativas:

- (A41) Casa única en el terreno, Casa que comparte con terreno con otras
- (A42) Casa duplex
- (A43) Departamento en edificio, Vivienda en vecindad o cuartería
- (A44)\* Vivienda en cuarto de azotea de un edificio, Local no construido para habitación, Vivienda móvil, Refugio, No especificado de vivienda particular (no se integra en la comparación por pares, se le asigna valor de 0 en la escala de prioridades)

Escala de prioridades:  $WSC4^* = (0.571, 0.285, 0.142, 0)$

Matriz de comparación de alternativas del subcriterio 5 (SC5): importancia de la percepción de inseguridad para la instalación de GDFV en función de que sea motivo de migración o los habitantes tengan gastos adicionales asociados a cuestiones securitarias

Alternativas:

- (A51) Segura
- (A52) Insegura

Escala de prioridades:  $WSC_5 = (0.75, 0.25)$

Matriz de comparación de alternativas del subcriterio 6 (SC6): importancia de los riesgos de fenómenos ambientales para la instalación de GDFV en viviendas en función de que las viviendas y/o los sistemas de GD sean vulnerables y los fenómenos conlleven una afectación económica

Alternativas:

- (A61) Inundación
- (A62) Tormenta
- (A63) Incendio
- (A64) Deslave

Escala de prioridades:  $WSC_6 = (0.495, 0.267, 0.154, 0.0826)$

w(C1)								w(C2)			
0.75								0.25			
w(SC1)		w(SC2)		w(SC3)		w(SC4)		w(SC5)		w(SC6)	
0.478		0.256		0.138		0.128		0.667		0.333	
w	MP	w	MP								
0.900	100%	0.496	100%	0.526	100%	0.571	100%	0.750	100%	0.496	49.6%
0.100	11.11%	0.267	53.88%	0.174	33.05%	0.286	50.00%	0.250	33.33%	0.267	26.7%
		0.154	31.09%	0.132	25.06%	0.143	25.00%			0.154	15.4%
		0.083	16.67%	0.109	20.78%	0.000	0.00%			0.083	8.3%
				0.059	11.16%						

Tabla 46: Niveles de jerarquía analítica para sector residencial. Elaboración propia.

nomSR	UR_PI	UR_PIT_SUP	UR_PII
Nombre de subregión	Potencial instalable en unidades residenciales por análisis multicriterio	PIT por superficie	Potencial de instalación integrado
	%	W	W
Azcapotzalco	77.46%	557,799,861.46	432,081,611.71
Coyoacán	80.60%	911,659,787.36	734,784,069.48
Cuajimalpa de Morelos	87.65%	313,297,846.91	274,595,335.92
Gustavo A. Madero	78.94%	1,439,919,937.65	1,136,704,050.75
Iztacalco	77.20%	503,497,165.90	388,717,126.12
Iztapalapa	77.15%	1,967,203,490.64	1,517,653,816.61
Magdalena Contreras	83.72%	294,505,643.03	246,562,747.02
Milpa Alta	81.84%	145,129,641.64	118,776,700.61
Álvaro Obregón	81.07%	932,577,369.61	756,001,323.74
Tláhuac	77.91%	433,097,974.42	337,447,812.95
Tlalpan	81.51%	859,901,911.01	700,909,256.33
Xochimilco	81.11%	465,628,987.23	377,659,375.78
Benito Juárez	79.83%	806,751,757.06	644,068,628.74
Cuauhtémoc	75.01%	793,254,686.21	595,051,173.13
Miguel Hidalgo	77.81%	637,781,062.71	496,249,035.15
Venustiano Carranza	78.96%	544,397,990.16	429,875,510.13
<b>Ciudad de México</b>	<b>79.16%</b>	<b>11,606,405,113.00</b>	<b>9,187,137,574.17</b>

Tabla 47: Potencial instalable en unidades residenciales por análisis multicriterio y potencial de instalación integrado. Elaboración propia.

### Módulo 3.2 Análisis multicriterio del sector agropecuario

Matriz de comparación de criterios (G): importancia de cada criterio para la instalación de GDFV en unidades agropecuarias de una subregión

Alternativas:

- (C1) características de las unidades agropecuarias
- (C2) fenómenos en la subregión

Escala de prioridades: WG=(0.667, 0.333)

Matriz de comparación de subcriterios (C1): importancia de las características que pueden tener las unidades agropecuarias en la subregión para la instalación de GDFV

Alternativas:

- (SC1) Acceso a electricidad,
- (SC2) Modalidad de tenencia,
- (SC3) Modalidad de derechos sobre la tierra
- (SC4) Actividad principal.

Escala de prioridades:  $WC_1=(0.471, 0.107, 0.164, 0.256)$

Matriz de comparación de subcriterios (C2): importancia de fenómenos en la subregión que para la instalación de GDFV en unidades agropecuarias

Alternativas:

- (SC5) Percepción de inseguridad
- (SC6) Riesgo de fenómenos ambientales

Escala de prioridades:  $WC_2= (0.25, 0.75)$

Matriz de comparación de alternativas del subcriterio 1 (SC1): importancia del acceso a la electricidad en las unidades agropecuarias para la instalación de GDFV en función de la facilidad para interconectar a las redes generales de distribución

Alternativas:

- (A11) Tiene electricidad
- (A12) No tiene electricidad, no se sabe

Escala de prioridades:  $WSC_1=(0.75, 0.25)$

Matriz de comparación de alternativas del subcriterio 2 (SC2): importancia de la modalidad de la tenencia de la unidad agropecuaria para la instalación de GDFV en función de la facilidad para la toma de decisiones colectivas o individuales sobre modificaciones al terreno

Alternativas:

- (A21) Ejidal y comunal
- (A22) Privada y colonia agrícola
- (A23) Pública

- (A24) No se sabe (no se integra en la comparación por pares, se le asigna valor de 0 en la escala de prioridades)

Escala de prioridades:  $WSC2^*=(0.16342, 0.29696, 0.53961, 0)$

Matriz de comparación de alternativas del subcriterio 3 (SC3): importancia de derechos sobre la tierra para la instalación de GDFV en función de la facilidad para la toma de decisiones sobre inversiones en infraestructura.

Alternativas:

- (A31) Propio
- (A32) Rentado, concesionado
- (A33) Tomado a medias, prestado, en posesión
- (A34) No se sabe (no se integra en la comparación por pares, se le asigna valor de 0 en la escala de prioridades)

Escala de prioridades  $WSC3^*=(0.57142, 0.28571, 0.14285, 0)$

Matriz de comparación de alternativas del subcriterio 4 (SC4): importancia de la actividad principal del terreno para la instalación de GDFV en función de la disponibilidad de superficie de instalación y los usos compartidos que tendrá.

Alternativas:

- (A41) Agricultura
- (A42) Ganadería
- (A43) Forestal
- (A44) Sin actividad
- (A45) Otra

Escala de prioridades:  $WSC4=(0.26, 0.13, 0.066, 0.533)$

Matriz de comparación de alternativas del subcriterio 5 (SC5): importancia de la percepción de inseguridad para la instalación de GDFV en función de que sea motivo de migración o los habitantes tengan gastos adicionales asociados a cuestiones securitarias

Alternativas:

- (A51) Segura
- (A52) Insegura

Escala de prioridades:  $WSC_5 = (0.75, 0.25)$

Matriz de comparación de alternativas del subcriterio 6 (SC6): importancia de los riesgos de fenómenos ambientales para la instalación de GDFV en terrenos en función de que las unidades y/o los sistemas de GD sean vulnerables y los fenómenos conlleven una afectación económica

Alternativas:

- (A61) Inundación
- (A62) Tormenta
- (A63) Incendio
- (A64) Deslave

Escala de prioridades:  $WSC_6 = (0.1667, 0.333, 0.333, 0.1667)$

w(C1)								w(C2)			
0.75								0.25			
w(SC1)		w(SC2)		w(SC3)		w(SC4)		w(SC5)		w(SC6)	
0.478		0.256		0.138		0.128		0.667		0.333	
w	MP	w	MP								
0.900	100%	0.496	100%	0.526	100%	0.571	100%	0.750	100%	0.496	49.6%
0.100	11.11%	0.267	53.88%	0.174	33.05%	0.286	50.00%	0.250	33.33%	0.267	26.7%
		0.154	31.09%	0.132	25.06%	0.143	25.00%			0.154	15.4%
		0.083	16.67%	0.109	20.78%	0.000	0.00%			0.083	8.3%
				0.059	11.16%						

Tabla 48: Niveles de jerarquía analítica para sector agropecuario. Elaboración propia.

nomSR	UA_PI	UA_PIT_SUP	UA_PII
Nombre de subregión	Potencial instalable en unidades agropecuarias por análisis multicriterio	PIT en unidades agropecuarias por superficie	Potencial de instalación integrado en unidades agropecuarias
	%	W	W
Azcapotzalco		0	0.00
Coyoacán		0	0.00
Cuajimalpa de Morelos	73.32%	81,509,516	59,761,005.71
Gustavo A. Madero		0	0.00
Iztacalco		0	0.00
Iztapalapa		0	0.00
Magdalena Contreras	75.79%	255,500,000	193,637,903.53
Milpa Alta	70.45%	4,124,000,000	2,905,492,185.05
Álvaro Obregón	72.22%	99,769,997	72,050,165.51
Tláhuac	67.80%	1,442,496,979	977,980,437.51
Tlalpan	74.73%	1,228,393,329	917,980,958.73
Xochimilco	71.54%	1,465,047,519	1,048,026,126.83
Benito Juárez		0	0.00
Cuauhtémoc		0	0.00
Miguel Hidalgo		0	0.00
Venustiano Carranza		0	0.00
<b>Ciudad de México</b>	<b>71.00%</b>	<b>8,696,717,341</b>	<b>6,174,928,782.87</b>

Tabla 49: Potencial instalable en unidades agropecuarias por análisis multicriterio y potencial de instalación integrado. Elaboración propia.

### Módulo 3.3 Análisis multicriterio del sector comercial y de servicios

Matriz de comparación de criterios (G): importancia de cada criterio para la instalación de GDFV en unidades comerciales y de servicios de una subregión

Alternativas:

- (C1) características de las unidades comerciales y de servicios
- (C2) fenómenos en la subregión

Escala de prioridades:  $WG=(0.5, 0.5)$

Matriz de comparación de subcriterios (C1): importancia de las características que pueden tener las unidades comerciales y de servicios en la subregión para la

instalación de GDFV

Alternativas:

- (SC1) Acceso a electricidad,
- (SC2) Titularidad de la unidad
- (SC3) Tipo de unidad

Escala de prioridades:  $WC_1=(0.33,0.33,0.33)$

Matriz de comparación de subcriterios (C2): importancia de fenómenos en la subregión para la instalación de GDFV en unidades comerciales y de servicios

Alternativas:

- (SC4) Vulnerabilidad de la tenencia en la subregión
- (SC5) Percepción de inseguridad
- (SC6) Riesgo de fenómenos ambientales

Escala de prioridades:  $WC_2=(0.142857,0.571429,0.285714)$

Matriz de comparación de alternativas del subcriterio 1 (SC1): importancia del acceso a la electricidad en las unidades comerciales y de servicios para la instalación de GDFV en función de la facilidad para interconectar a las redes generales de distribución

Alternativas:

- (A11) Tiene electricidad
- (A12) No tiene electricidad, no se sabe

Escala de prioridades:  $WSC_1=(0.66, 0.33)$

Matriz de comparación de alternativas del subcriterio 2 (SC2): importancia de titularidad de la unidad económica para la instalación de GDFV en función de la facilidad para la toma de decisiones colectivas o individuales sobre modificaciones al terreno

Alternativas:

- (A21) Persona física
- (A22) Una sociedad o asociación, Partido u organización política

- (A23) El Gobierno
- (A24) Embajada, consulado u oficina de representación diplomática de otro país, Organismo internacional (ONU, OEA, OCDE, entre otros)

Escala de prioridades:  $WSC_2 = (0.0836, 0.186, 0.502, 0.227)$

Matriz de comparación de alternativas del subcriterio 3 (SC3): importancia del tipo de unidad para la instalación de GDFV en función de la disponibilidad de superficie de instalación y los usos compartidos que tendrá.

Alternativas:

- (A31) Fija
- (A32) Semifija, actividad dentro de vivienda (no se integra en la comparación por pares, se le asigna valor de 0 en la escala de prioridades)

Escala de prioridades:  $WSC_3^* = (1, 0)$

Matriz de comparación de alternativas del subcriterio 5 (SC5): importancia de la percepción de inseguridad para la instalación de GDFV en función de que sea motivo de migración o los habitantes tengan gastos adicionales asociados a cuestiones securitarias

Alternativas:

- (A51) Segura
- (A52) Insegura

Escala de prioridades:  $WSC_5 = (0.66, 0.33)$

Matriz de comparación de alternativas del subcriterio 6 (SC6): importancia de los riesgos de fenómenos ambientales para la instalación de GDFV en unidades comerciales y de servicios en función de que las unidades y/o los sistemas de GD sean vulnerables y los fenómenos conlleven una afectación económica

Alternativas:

- (A61) Inundación
- (A62) Tormenta
- (A63) Incendio

- (A64) Deslave

Escala de prioridades: WSC6= (0.142, 0.285, 0.285, 0.285)

w(C1)						w(C2)					
0.50						0.50					
w(SC1)		w(SC2)		w(SC3)		w(SC4)		w(SC5)		w(SC6)	
0.333		0.333		0.333		0.143		0.571		0.286	
w	MP	w	MP	w	MP	w	MP	w	MP	w	MP
0.666	100%	0.084	16.6%	1.0	100%	1.0	100%	0.666	100%	0.143	14.2%
0.333	50%	0.186	37.1%	0.0	0%	0.0	0%	0.333	50%	0.286	28.5%
		0.502	100%							0.286	28.5%
		0.228	45.3%							0.286	28.5%

Tabla 50: Niveles de jerarquía analítica para sector comercial y de servicios. Elaboración propia.

nomSR	UCS_PI	UCS_PTI_CIA	UCS_PII
Nombre de subregión	Potencial instalable en unidades comerciales y de servicios por análisis multicriterio	PIT en unidades comerciales y de servicios por superficie	Potencial de instalación integrado en unidades comerciales y de servicios
	%	W	W
Azcapotzalco	45.22%	35,409,500	16,012,254.47
Coyoacán	47.58%	56,156,500	26,720,276.70
Cuajimalpa de Morelos	53.07%	20,554,500	10,907,993.10
Gustavo A. Madero	46.40%	100,668,000	46,707,071.75
Iztacalco	43.35%	39,703,500	17,212,823.64
Iztapalapa	43.68%	193,400,000	84,472,618.08
Magdalena Contreras	47.27%	15,543,000	7,346,794.79
Milpa Alta	45.60%	13,958,000	6,365,344.98
Álvaro Obregón	46.92%	51,408,000	24,120,425.68
Tláhuac	43.08%	44,872,000	19,332,537.59
Tlalpan	48.00%	59,415,000	28,520,926.11
Xochimilco	46.59%	51,598,000	24,039,350.90
Benito Juárez	52.71%	53,722,000	28,315,344.95
Cuauhtémoc	45.45%	123,793,000	56,259,476.60
Miguel Hidalgo	47.14%	51,157,000	24,115,328.36
Venustiano Carranza	48.83%	74,684,000	36,470,909.71
<b>Ciudad de México</b>	<b>46.34%</b>	<b>986,042,000</b>	<b>456,919,477.39</b>

Tabla 51: Potencial instalable en unidades comerciales y de servicios por análisis multicriterio y potencial de instalación integrado. Elaboración propia.

### *Módulo 3.2 Análisis multicriterio del sector industrial*

Matriz de comparación de criterios (G): importancia de cada criterio para la instalación de GDFV en unidades industriales de una subregión

Alternativas:

- (C1) características de las unidades comerciales y de servicios
- (C2) fenómenos en la subregión

Escala de prioridades:  $WG=(0.5, 0.5)$

Matriz de comparación de subcriterios (C1): importancia de las características que pueden tener las unidades comerciales y de servicios en la subregión para la instalación de GDFV

Alternativas:

- (SC1) Acceso a electricidad,
- (SC2) Titularidad de la unidad
- (SC3) Tipo de unidad

Escala de prioridades:  $WC1=(0.33,0.33,0.33)$

Matriz de comparación de subcriterios (C2): importancia de fenómenos en la subregión para la instalación de GDFV en unidades industriales

Alternativas:

- (SC4) Vulnerabilidad de la tenencia en la subregión
- (SC5) Percepción de inseguridad
- (SC6) Riesgo de fenómenos ambientales

Escala de prioridades:  $WC2=(0.33,0.33,0.33)$

Matriz de comparación de alternativas del subcriterio 1 (SC1): importancia del acceso a la electricidad en las unidades industriales para la instalación de GDFV en función de la facilidad para interconectar a las redes generales de distribución y de transmisión

Alternativas:

- (A11) Tiene electricidad
- (A12) No tiene electricidad, no se sabe

Escala de prioridades:  $WSC_1=(0.66, 0.33)$

Matriz de comparación de alternativas del subcriterio 2 (SC2): importancia de titularidad de la unidad económica para la instalación de GDFV en función de la facilidad para la toma de decisiones colectivas o individuales sobre modificaciones al terreno

Alternativas:

- (A21) Persona física
- (A22) Una sociedad o asociación, Partido u organización política
- (A23) El Gobierno
- (A24) Embajada, consulado u oficina de representación diplomática de otro país, Organismo internacional (ONU, OEA, OCDE, entre otros)

Escala de prioridades:  $WSC_2=(0.083, 0.186, 0.502, 0.227)$

Matriz de comparación de alternativas del subcriterio 3 (SC3): importancia del tipo de unidad para la instalación de GDFV en función de la disponibilidad de superficie de instalación y los usos compartidos que tendrá.

Alternativas:

- (A31) Fija
- (A32) Semifija, actividad dentro de vivienda (no se integra en la comparación por pares, se le asigna valor de 0 en la escala de prioridades)

Escala de prioridades:  $WSC_3^*=(1,0)$

Matriz de comparación de alternativas del subcriterio 5 (SC5): importancia de la percepción de inseguridad para la instalación de GDFV en función de que sea motivo de migración o existan gastos adicionales asociados a cuestiones securitarias

Alternativas:

- (A51) Segura
- (A52) Insegura

Escala de prioridades:  $WSC_5 = (0.5, 0.5)$

Matriz de comparación de alternativas del subcriterio 6 (SC6): importancia de los riesgos de fenómenos ambientales para la instalación de GDFV en unidades industriales en función de que las unidades y/o los sistemas de GD sean vulnerables y los fenómenos conlleven una afectación económica

- Alternativas:
- (A61) Inundación
- (A62) Tormenta
- (A63) Incendio
- (A64) Deslave

Escala de prioridades:  $WSC_6 = (0.142, 0.285, 0.285, 0.285)$

w(C1)						w(C2)					
0.50						0.50					
w(SC1)		w(SC2)		w(SC3)		w(SC4)		w(SC5)		w(SC6)	
0.333		0.333		0.333		0.333		0.333		0.333	
w	MP	w	MP	w	MP			w	MP	w	MP
0.666	100%	0.084	16.6%	1.0	100%			0.50	100%	0.143	14.2%
0.333	50%	0.186	37.1%	0.0	0%			0.50	50%	0.286	28.5%
		0.502	100%							0.286	28.5%
		0.228	45.3%							0.286	28.5%

Tabla 52: Niveles de jerarquía analítica para sector industrial. Elaboración propia.

nomSR	UI_PI	UCS_PTI_CIA	UCS_PII
Nombre de subregión	Potencial instalable en unidades industriales por análisis multicriterio	PIT en unidades industriales por superficie	Potencial de instalación en unidades industriales integrado
	%	W	W
Azcapotzalco	45.70%	3,949,000	1,804,824.18
Coyoacán	47.30%	3,602,000	1,703,712.56
Cuajimalpa de Morelos	52.57%	1,685,000	885,794.49
Gustavo A. Madero	47.48%	8,368,000	3,973,075.47
Iztacalco	44.81%	3,730,000	1,671,546.95
Iztapalapa	44.87%	16,243,000	7,288,093.96
Magdalena Contreras	49.65%	1,485,000	737,274.96
Milpa Alta	46.91%	1,186,000	556,331.20
Álvaro Obregón	47.14%	3,954,000	1,863,803.24
Tláhuac	44.75%	3,704,000	1,657,595.46
Tlalpan	47.97%	4,488,000	2,153,013.30
Xochimilco	47.09%	3,246,000	1,528,559.97
Benito Juárez	51.22%	3,821,000	1,957,267.78
Cuauhtémoc	45.11%	9,234,000	4,165,176.71
Miguel Hidalgo	46.45%	3,911,000	1,816,677.19
Venustiano Carranza	49.58%	3,676,000	1,822,621.72
<b>Ciudad de México</b>	<b>46.65%</b>	<b>76,282,000</b>	<b>35,585,369.12</b>

Tabla 53: Potencial instalable en unidades industriales por análisis multicriterio y potencial de instalación integrado. Elaboración propia.

### Módulo 3.2 Análisis multicriterio del sector público

Matriz de comparación de criterios (G): importancia de cada criterio para la instalación de GDFV en unidades públicas de una subregión

Alternativas:

- (C1) características de las unidades públicas
- (C2) fenómenos en la subregión

Escala de prioridades:  $WG=(0.6, 0.4)$

Matriz de comparación de subcriterios (C2): importancia de fenómenos en la

subregión que para la instalación de GDFV en unidades públicas

Alternativas:

- (SC2) Percepción de inseguridad
- (SC3) Riesgo de fenómenos ambientales

Escala de prioridades:  $WC2 = (0.8, 0.2)$

Matriz de comparación de alternativas del subcriterio 1 (SC1): importancia de la tenencia en las unidades públicas para la instalación de GDFV en función de la facilidad para la toma de decisiones sobre inversiones en infraestructura

Alternativas:

- (A11) Propia
- (A12) Rentada
- (A13) Otra, no especificada

Escala de prioridades:  $WSC1 = (0.487, 0.435, 0.078)$

Matriz de comparación de alternativas del subcriterio 2 (SC2): importancia de la percepción de inseguridad para la instalación de GDFV en función de que sea motivo de gastos adicionales que imposibiliten presupuestos locales para la instalación

Alternativas:

- (A21) Segura
- (A22) Insegura

Escala de prioridades:  $WSC2 = (0.55, 0.45)$

Matriz de comparación de alternativas del subcriterio 3 (SC3): importancia de los riesgos de fenómenos ambientales para la instalación de GDFV en unidades públicas en función de que las unidades y/o los sistemas de GD sean vulnerables y los fenómenos conlleven una afectación económica

Alternativas:

- (A31) Inundación
- (A32) Tormenta

- (A33) Incendio
- (A34) Deslave

Escala de prioridades: WSC<sub>3</sub>= (0.143, 0.286, 0.286, 0.286)

w(C1)		w(C2)			
0.6		0.4			
w(SC1)		w(SC2)		w(SC3)	
1		0.8		0.2	
W	MP	w	MP	w	MP
0.487	100%	0.550	100%	0.143	14.29%
0.435	89.39%	0.450	81.82%	0.28	28.57%
0.078	15.98%			0.286	28.57%
				0.286	28.57%

Tabla 54: Niveles de jerarquía analítica para sector público. Elaboración propia.

nomSR	UP_PI	UP_PTI_CIA	UP_PII
Nombre de subregión	Porcentaje de potencial instalable en unidades públicas por análisis multicriterio	Potencial técnico de instalación en unidades públicas por superficie	Potencial de instalación en unidades públicas integrado
	%	W	W
Azcapotzalco	70.40%	560,000	394,248.90
Coyoacán	90.81%	930,000	844,530.93
Cuajimalpa de Morelos	93.34%	350,000	326,678.04
Gustavo A. Madero	88.62%	275,000	243,699.54
Iztacalco	38.93%	1,325,000	515,814.17
Iztapalapa	88.99%	2,115,000	1,882,239.45
Magdalena Contreras	67.61%	500,000	338,035.79
Milpa Alta	89.98%	615,000	553,401.28
Álvaro Obregón	84.18%	1,080,000	909,154.45
Tláhuac	88.89%	650,000	577,810.41
Tlalpan	91.18%	2,195,000	2,001,393.81
Xochimilco	46.18%	990,000	457,217.68
Benito Juárez	93.21%	480,000	447,385.69
Cuauhtémoc	89.87%	675,000	606,635.51
Miguel Hidalgo	90.52%	1,370,000	1,240,060.73
Venustiano Carranza	91.61%	1,325,000	1,213,875.24
<b>Ciudad de México</b>	<b>81.32%</b>	<b>15,435,000</b>	<b>12,552,181.61</b>

Tabla 55: Potencial instalable en unidades públicas por análisis multicriterio y potencial de instalación integrado. Elaboración propia.

*Comparación:*

<b>Sector</b>	<b>Potencial por atractivo económico del diagnóstico de transición energética de la Ciudad de México</b>			<b>Evaluación multicriterio del potencial de instalación de GDFV</b>		
	contratos	potencial de instalación (MW)	capacidad promedio por contrato (kW)	unidades	potencial de instalación (MW)	capacidad promedio por contrato (kW)
<b>Residencial</b>	79,917	542.37	6.79 kW	2,695,179	11,606	4.3 kW
<b>Agropecuario</b>				21,146	6,174,928,782.87	292.01 kW
<b>Comercial y servicios</b>	401,747	8,932.77	22.23 kW	393,598	456,919,477.39	1.16 kW
<b>Industrial</b>	7,357	1,382.54	187.92kW	34,337	35,585,369.12	1.03 kW
<b>Público</b>				3,087	12,552,181.61	4.06 kW

*Tabla 56: Comparación de resultados entre sistema de evaluación multicriterio del potencial de instalación de GDFV y potencial por atractivo económico del diagnóstico de transición energética de la Ciudad de México. Elaboración propia con datos del diagnóstico de transición energética de la Ciudad de México (Sedeco, 2022)*

## **Resultados y discusión**

Se construyó un sistema de evaluación del potencial de instalación de generación distribuida fotovoltaica en una región del territorio mexicano a partir de ponderaciones multicriterio que integran aspectos cuantitativos y cualitativos relevantes para los sectores socioeconómicos presentes en la región a evaluar. El sistema se diseñó de tal manera que el peso de cada uno de dichos aspectos sobre el potencial instalable pudiera ajustarse en función de la ubicación geográfica de las unidades evaluadas y del sector socioeconómico al que pertenezcan.

El sistema se constituyó por tres módulos en serie: el módulo de potencial del sistema fotovoltaico, el módulo de cálculo de potencial técnico de instalación y generación de cada sector y el módulo de análisis multicriterio para cada sector.

El primero permite calcular la capacidad instalable por m<sup>2</sup> en unidades de los diferentes sectores socioeconómicos en función de la eficiencia de los sistemas disponibles en cada región y sector, y el potencial de generación, integrando la capacidad instalada con la irradiación solar en dicha región.

El segundo calcula la superficie instalable en cada subregión para cada sector utilizando como insumos el tamaño de las viviendas, terrenos y unidades económicas y obtiene el potencial técnico instalable para cada sector multiplicando esta superficie por la capacidad instalable por m<sup>2</sup> obtenida en el primer módulo para cada sector. En caso de no haber insumos con información sobre el tamaño de las unidades en algún sector, este módulo permite asignar una capacidad instalable aproximada para cada unidad que podrá multiplicarse por las unidades de dicho sector en la subregión para obtener el potencial técnico de instalación del sector en las subregiones. Para ambos métodos, se excluyen las unidades que cuenten con instalación previa.

Finalmente, el tercer módulo integra la información referente a las características de las unidades y los fenómenos que ocurren en las subregiones donde se encuentran dichas unidades que inciden sobre la instalación de generación distribuida en las unidades. Este proceso se realiza a partir de definir niveles de criterios, subcriterios y alternativas para cada sector presente en la región evaluada. Cada nivel delimita las matrices de comparación necesarias bajo los supuestos de procesos de jerarquía analítica para obtener los pesos correspondientes a cada elemento que se esté tomando en cuenta para la evaluación del potencial de instalación

de generación distribuida fotovoltaica en una región.

De este módulo se obtiene el ajuste que deberá hacerse a los potenciales técnicos de instalación para cada sector en cada subregión obtenidos en el segundo módulo. El resultado del ajuste del potencial técnico de instalación calculado para cada sector en las distintas subregiones en función de la evaluación multicriterio correspondiente para cada sector, equivale al potencial de instalación de generación distribuida fotovoltaica para cada sector en las distintas subregiones. La suma del potencial sectorial de cada subregión corresponde al potencial de instalación sectorial de generación distribuida fotovoltaica a nivel regional y la suma del potencial de los sectores presentes en la región corresponderá al potencial de instalación total de la región.

Al ser un sistema que requiere de insumos informáticos de fuentes diversas, fue crucial tomar en cuenta la naturaleza de dichos insumos al momento de diseñar la integración de los datos. Sabiendo que es posible que para ciertas regiones y/o sectores no existan insumos con el nivel de detalle y especificidad recomendados, se decidió integrar métodos alternativos de cálculo, como el potencial técnico por capacidad instalable aproximada.

Los resultados que pueden obtenerse al evaluar cualquier región, no solo dependen de los insumos, sino de la ponderación ejercida por quien o quienes realicen la evaluación multicriterio, lo cual es simultáneamente una fortaleza y una debilidad. Al permitir a personas expertas en el tema, cuya experiencia no ha sido traducida a consensos gremiales, definir el peso que tienen las distintas características de las unidades en las cuales se pretende evaluar el potencial de instalación, se pueden obtener estimaciones del potencial que posteriormente sean comprobables o comparables entre distintos escenarios. La robustez de la asignación de pesos reside en la comparación uno a uno de elementos del mismo nivel de importancia, reduciendo el riesgo de una sobre o sub estimación de distintas características de las unidades o de los fenómenos subregionales.

Adicionalmente, la granularidad de la evaluación hace posible el ajuste fino, diferenciando entre unidades que comparten espacio geográfico pero difieren en sus usos, tenencias, materiales, etc. y las que coinciden en lo anterior, pero distan en su ubicación y por lo tanto, los efectos que puedan tener dichas características sobre la

instalación de sistemas de generación distribuida fotovoltaica puedan ser considerablemente distintas.

Finalmente, este trabajo cumple su objetivo de proponer una sistematización de los cálculos necesarios para una evaluación regional que permite identificar las regiones y sectores con mayor potencial de instalación de sistemas de generación distribuida fotovoltaica a partir de las características técnicas, económicas, sociales y culturales de las unidades que conforman los sectores y los fenómenos subregionales que existen en donde se encuentran dichas unidades.

## Conclusiones

Ante la incertidumbre respecto al panorama energético, el estudio del potencial y de las limitaciones de la generación distribuida fotovoltaica es crucial para la planeación energética a mediano y largo plazo. Dicha planeación, comúnmente reducida a una evaluación estrictamente tecnoeconómica, debe enriquecerse con consideraciones sociales, ambientales, de economía familiar y local, culturales y políticas, entendidas como un conjunto de prácticas orientadas a la gestión y redistribución de recursos según sea necesario para garantizar el bien común en la sociedad.

A la fecha, estas consideraciones no han primado la política energética nacional, quedando relegadas por diversas razones, incluyendo el grado de dificultad de integrar aspectos tan diversos a una evaluación de carácter cuantitativo. Afortunadamente, la inmensa diversidad de herramientas que ofrecen las matemáticas hacen posible explorar diferentes propuestas de modelos capaces de integrarlas de maneras congruentes con la realidad y a la vez, manejables en términos de elementos a considerar.

Para abordar este problema se diseñó un sistema capaz de evaluar el potencial de instalación de GDFV en distintas regiones del territorio mexicano tomando en cuenta los criterios técnicos, económicos, sociales, culturales y ambientales relevantes para los sectores socioeconómicos que conforman dichas regiones. La robustez de los resultados obtenidos por este sistema dependen de la calidad y disponibilidad de los insumos informáticos utilizados y de lo acertado de los juicios que se realicen al comparar los elementos que representen las distintas características que pueden tener las unidades que conformen los sectores a evaluar en cada región, o los fenómenos socioambientales presentes en dichas regiones que puedan afectar la instalación de GDFV.

El sistema es adaptable a condiciones de baja disponibilidad informática, ya que ofrece múltiples métodos para el cálculo del potencial técnico de instalación asociado a cada sector. A su vez, la adaptabilidad del análisis multicriterio radica en la posibilidad de ajustar los criterios y subcriterios a evaluar de manera que puedan integrarse nuevas consideraciones si posteriormente se consideran relevantes, o retirar la evaluación de criterios y subcriterios si en la práctica no existen insumos o si quienes realizarán la evaluación optan por priorizar otros componentes.

Los fundamentos matemáticos que permiten estos reacomodos son:

- La estructura de partición de las subregiones que conforman la región a evaluar.
- La estructura de partición de los sectores presentes en las subregiones.
- La estructura de partición de las unidades que conforman cada sector de acuerdo a sus características de tamaño, uso o adscripción.
- La construcción de niveles de comparación entre elementos equivalentes en función de su afectación a la instalación de sistemas de GDFV a partir de procesos de jerarquía analítica.
- La condición de mantener el índice de consistencia de las matrices de comparación debajo del 10%.

De esta manera es posible hacer uso del sistema de evaluación aunque las subregiones disten de las particiones estándar de entidades federativas, municipios, localidades, etcétera. De igual manera, se pueden evaluar sectores socioeconómicos alternativos e incluso definir como unidades mínimas de evaluación espacios diferentes a los utilizados en este trabajo. Esto podrá ser particularmente útil en el mediano plazo si se llegasen a modificar las disposiciones administrativas de carácter general en materia de generación distribuida de tal forma que se incorporara la generación distribuida colectiva (o comunitaria) y por lo tanto si los espacios destinados a la instalación de sistemas de GDFV cambiaran de dimensión y características.

La evaluación del potencial de instalación permite realizar un análisis en múltiples ejes:

- Identificar regiones cuyo potencial de GDFV puede estar subaprovechado.
- Identificar las causas que llevan a una baja estimación de potencial en distintas regiones.
- Estudiar las políticas públicas que acompañan la apropiación tecnológica y cultural que supone la instalación de sistemas de GDFV en el sector social y de MiPyMEs.
- Identificar regiones de bajo potencial sobre las cuales no se pueda incidir significativamente para aumentarlo.
- Identificar las áreas de oportunidad para incrementar el potencial de GDFV: qué actividades socioeconómicas y características socio-culturales estimular o

desalentar regionalmente para poder paulatinamente incrementar su potencial.

La identificación de regiones de bajo potencial de instalación de GDFV, y de las características de las unidades y los fenómenos en la región a las que se debe dicha condición, permiten determinar las consideraciones a integrar en el diseño de sistemas alternativos de evaluación de otros potenciales energéticos.

Los principios que vuelven a la GDFV deseable, tales como la reducción de la distancia entre centros de generación y centros de consumo, el uso de fuentes de energía que no requieren de combustión de hidrocarburos directamente, el cambio cultural en el consumo pasivo de energía, la participación del sector social en la generación –rompiendo la dicotomía de estado/industria eléctrica–, entre otros, no son exclusivos a la tecnología fotovoltaica, por lo que es sumamente deseable vincular la evaluación del potencial de otras tecnologías y modalidades de generación que compartan estos principios con la GDFV a través de identificar su distribución regional.

Para que otras personas puedan validar esta propuesta, hacer uso del sistema y eventualmente colaborar en su refinamiento, la transparencia en el diseño de la herramienta, en el proceso de asignación de jerarquía de los criterios y en los insumos responde a los criterios de “ciencia abierta”, que promueven el libre acceso a los objetos de investigación, los programas o las aplicaciones informáticas (*software*), la data y los artículos en los que se difunden los resultados (S. J. E. Taylor *et al.*, 2017). La estructura modular del sistema permite adaptar y corregir las consideraciones integradas a esta propuesta, como la cantidad de supuestos bajo los que opera.

La generación distribuida fotovoltaica ha sido cada vez más reconocida como un mecanismo de generación de energía con beneficios ambientales, sociales y económicos en comparación con mecanismos de producción a mayores escalas y con otro tipo de tecnologías, particularmente en contraste con las que dependen más directamente de la combustión de fuentes fósiles. Desde la perspectiva estatal, la GDFV permite reducir el pago de subsidios para diferentes tarifas, entre ellas las siete domésticas que, por su nivel de consumo, son candidatas ideales para instalación de sistemas de GD.

De parte de quien instala GDFV, existe un ahorro significativo al promediar el costo de instalación a lo largo de la vida útil del equipo. El ahorro proyectado ha tenido una tendencia al incremento con el abaratamiento de la tecnología, aunque esta baja

en los costos se ha ralentizado conforme los recursos necesarios para la fabricación comienzan a escasear. Además, quienes generan energía eléctrica a partir de recursos renovables cuentan con diversos incentivos fiscales.

La incorporación de dichos sistemas a las estructuras doméstica, agropecuaria, comercial y empresarial a pequeña escala facilita a la población participar en la producción de un recurso fundamental para garantizar una mayor calidad de vida. Además, el fomento a la GDFV incide directamente en los objetivos establecidos a través de la Ley de Transición Energética (LTE), la Ley General de Cambio Climático (LGCC) y la Ley de la Industria Eléctrica (LIE) por incrementar gradualmente la participación de las “energías limpias” en la industria eléctrica con el objetivo de cumplir las metas establecidas en materia de generación y de reducción de emisiones de una manera económicamente viable, mientras se promueven el aprovechamiento sustentable de la energía en el consumo final y los procesos de transformación de la energía.

Las características técnicas y la plasticidad y adaptabilidad de las estructuras sociales en las que pueden implementarse sistemas de generación distribuida fotovoltaica siguen dando razones de peso para considerar a esta última como parte de la caja de herramientas con las cuales construir un entramado de propuestas que puedan enfrentar los retos antes descritos, pero a la fecha aún estamos lejos de incorporar las externalidades en la evaluación de los costos asociados a la operación y expansión de la industria eléctrica, incluidos aquellos sobre la salud y el medio ambiente.

No debe perderse de vista que la cadena productiva de los componentes de que integran estos sistemas sigue dependiendo de procesos altamente contaminantes, como la minería de metales y minerales raros; y también debe considerar que, por su baja “densidad energética”, fuentes como la solar o la eólica requieren más metros cuadrados de superficie para generar la misma cantidad de energía que otras tecnologías, lo cual ha generado conflictos territoriales en distintas regiones del país (Ávila, S., Deniau, Y., Sorman, A. H., y McCarthy, J., 2022).

El sistema de evaluación del potencial de instalación de GDFV podría ser particularmente útil en el mediano plazo si llegase a haber modificaciones a las disposiciones administrativas de carácter general en materia de generación distribuida

de tal forma que se reglamentara la generación distribuida colectiva (o comunitaria) y, por lo tanto, si los espacios destinados a la instalación de sistemas fotovoltaicos cambiaran de dimensión y características. La evaluación de las características que inciden en el potencial de instalación de una región puede enriquecer el diseño de medidas que atiendan fenómenos que, en una primera instancia, pueden parecer ajenos a la planeación eléctrica, pero que al momento de cruzar la evaluación con criterios sociales destapan su interrelación, como la crisis en la tenencia de las viviendas que dificulta a las familias mexicanas volverse prosumidoras eléctricas (productoras y consumidoras).

Este trabajo responde a una doble urgencia: la de canalizar los recursos económicos y de voluntad política para crear la infraestructura necesaria para aprovechar el potencial aquí estudiado y orientar el uso de los limitados recursos energéticos y materiales para que operen en las regiones que mejor puedan aprovecharlos. Es decir, se pretende que los criterios que rigen los planes de ampliación y modernización de la Red Eléctrica Nacional tomen en cuenta las necesidades de este mecanismo para poder ser competitivo en términos tecnológicos y económicos, que sea posible coordinar un esfuerzo estatal-comunitario con el objetivo de que los metales, los minerales y demás componentes estratégicos necesarios para elaborar esta tecnología se instalen y operen maximizando el bien común.

Sin una evaluación cuantitativa de las regiones y de la gran cantidad de fenómenos que en ellas se cruzan y que dan lugar a afectaciones al potencial de la generación distribuida, no hay forma de coordinar esfuerzos que pretendan impulsar la penetración de la GDFV en la matriz eléctrica.

A pesar de haberse diseñado para el contexto mexicano, el uso de este sistema no está limitado al territorio nacional y su estructura puede ser aprovechada para evaluar mecanismos similares. El trabajo aquí presentado integra una vasta red de criterios que han sido identificados como capaces de incidir en la viabilidad a largo plazo de sistemas de GDFV. Queda la tentativa, en el futuro, de construir el conocimiento para rastrear la relación de estos criterios de una forma más metódica pues está fuera de los alcances de este trabajo profundizar en la relación empírica entre los parámetros cuantitativos y cualitativos integrados por el sistema.

El siglo XX destapó a México como un país con grandes yacimientos petroleros; el inicio del siglo XXI ha estado repleto de afirmaciones acerca de su potencial fotovoltaico (y eólico) como fuentes alternativas, a menudo desde un ingenuo entendido de que lo segundo puede existir desligado de lo primero. Si bien la intención plasmada en múltiples planes nacionales de desarrollo, compromisos internacionales, misiones y visiones de instituciones estatales y empresas privadas es transicionar hacia las energías “limpias”, las propuestas para estas hojas de ruta arrastran una pobreza conceptual sobre las relaciones existentes con distintas fuentes de energía y los procesos a través de los que la energía se genera, se transforma, se usa y se reintegra en el contexto mexicano.

A pesar de la gran disponibilidad de insumos informáticos generados a partir de distintos programas de información de diversas instituciones gubernamentales y privadas, aún hay una considerable área de oportunidad para el levantamiento de información relevante al potencial de esta modalidad de generación eléctrica. Faltan cuantiosos estudios e investigación en materia de viabilidad a largo plazo de sistemas fotovoltaicos en distintos contextos de seguridad, o acerca de los efectos de la tenencia de la vivienda y los terrenos en función de la posibilidad que tengan las potenciales personas usuarias de invertir en sistemas fotovoltaicos, así como datos más precisos en torno a la disponibilidad de azoteas y techos en unidades económicas de distintos subsectores, o que se pregunten si hay alguna tendencia entre el giro de un comercio y su capacidad de instalar y mantener sistemas fotovoltaicos.

Aun bajo el supuesto de que estas preguntas se irán respondiendo y los métodos de investigación, de la mano de herramientas matemáticas puestas al servicio de problemáticas socioambientales, puedan volverse cada vez más capaces de describir y estimar los fenómenos antes mencionados, no se debe descuidar los cuestionamientos que dan sentido a estas búsquedas: *¿Energía para quién?*, *¿Energía para qué?*, *¿Energía cómo?*

Este trabajo pretende contribuir a la gestión de las contradicciones que habitan dichas incógnitas. Estas contradicciones son la materia prima de las relaciones sociales que determinan los usos de la energía eléctrica, a la vez que son determinadas por dicho uso. Las contradicciones, a diferencia de los problemas, no tienen solución,

permanecen con nosotros a lo largo del tiempo y, por lo tanto, deben gestionarse.<sup>2</sup> Es por ello que el rol de las matemáticas en estas búsquedas no es el de construir soluciones, sino ser un área de conocimiento que abone a la gestión desde sus posibilidades.

---

<sup>2</sup>Entrevista a David Harvey el 20 de noviembre del 2021 en Jacobin. *Why Marx's Capital still matters*. Recuperado de: <https://ctxt.es/es/20211101/Politica/37891/David-Harvey-marxismo-capital-crisis-climatica-migraciones.htm>

## Índice de tablas

<i>Tabla 1: Resultados encontrados por palabras claves en motor de búsqueda especializado</i>	22
<i>Tabla 2: Capacidad instalada interconectada en el SEN hasta 2022.</i>	24
<i>Tabla 3: Generación total de energía eléctrica en 2022</i>	24
<i>Tabla 4: Escala fundamental para procesos de jerarquía analítica</i>	43
<i>Tabla 5: Estructura de la matriz de comparación entre elementos respecto a criterio</i>	43
<i>Tabla 6: Ejemplo de matrices de comparación por pares de alternativas respecto a criterios</i>	46
<i>Tabla 7: Ejemplo de matrices de comparación por pares de criterios</i>	47
<i>Tabla 8: Composición de la escala global de prioridades</i>	47
<i>Tabla 9: Unidades mínimas de evaluación por sector socioeconómico</i>	50
<i>Tabla 10: Capacidad instalable por superficie</i>	55
<i>Tabla 11: Entradas de eficiencia e irradiación solar para el cálculo de la matriz CIS</i>	55
<i>Tabla 12: Equivalencias entre número de cuartos y promedio de superficie de viviendas</i>	57
<i>Tabla 13: Insumos para cálculo de potenciales de instalación por capacidad instalable aproximada</i>	59
<i>Tabla 14: Insumos para cálculo de potenciales de instalación por tamaño de las viviendas</i>	60
<i>Tabla 15: Insumos para cálculo de potenciales de instalación por tamaño de las viviendas</i>	60
<i>Tabla 16: Insumos para cálculo del potencial de instalación por capacidad instalable aproximada en terrenos</i>	67
<i>Tabla 17: Insumos para cálculo del potencial de instalación por promedio de superficies de terrenos</i>	68
<i>Tabla 18: Insumos para cálculo del potencial de instalación por promedio de superficies de terrenos</i>	69
<i>Tabla 19: Insumos para cálculo del potencial de instalación por promedio de superficie de unidades comerciales y de servicios</i>	73
<i>Tabla 20: Insumos para cálculo del potencial de instalación por capacidad instalable aproximada en unidades comerciales y de servicios</i>	74
<i>Tabla 21: Insumos para cálculo del potencial de instalación por promedio de superficie de unidades industriales</i>	79
<i>Tabla 22: Insumos para cálculo del potencial de instalación por capacidad instalable aproximada (CIA) en unidades industriales</i>	79
<i>Tabla 23: Insumos para cálculo del potencial de instalación por promedio de superficie de unidades públicas</i>	81
<i>Tabla 24: Insumos para cálculo del potencial de instalación por capacidad instalable aproximada</i>	81
<i>Tabla 25: Criterios por sector y clusters técnicos (1-2), económico-ambientales (3-4) y socioculturales (5-6)</i>	83
<i>Tabla 26: Relación de subcriterios con variables del cuestionario ampliado del censo de población y vivienda 2020</i>	86
<i>Tabla 27: Niveles de jerarquía para análisis multicriterio de sector residencial</i>	87

<i>Tabla 28: Matriz de comparación correspondiente al subcriterio de tenencia con sus respectivas alternativas</i>	88
<i>Tabla 29: Procesamiento de escala local de prioridades del subcriterio de tenencia en unidades residenciales para obtener el factor de modificación correspondiente a cada alternativa de tenencia</i>	89
<i>Tabla 30: Matriz de comparación correspondiente al criterio características de las unidades residenciales con sus respectivas alternativas</i>	93
<i>Tabla 31: Procesamiento de escala de prioridades de cada subcriterio de características de las unidades residenciales para obtener la ponderación asociada</i>	94
<i>Tabla 32: Matriz de comparación correspondiente al criterio fenómenos en la subregión con sus respectivas alternativas</i>	94
<i>Tabla 33: Procesamiento de escala de prioridades de cada subcriterio de fenómenos en la subregión para obtener la ponderación asociada</i>	95
<i>Tabla 34: Matriz de comparación entre criterios</i>	96
<i>Tabla 35: Procesamiento de escala de prioridades de entre criterios para obtener el porcentaje del potencial instalable</i>	96
<i>Tabla 36: Niveles de jerarquía para análisis multicriterio del sector agropecuario</i>	99
<i>Tabla 37: Niveles de jerarquía para análisis multicriterio del sector comercial y de servicios e industrial</i>	102
<i>Tabla 38: Niveles de jerarquía para análisis multicriterio del sector público.</i>	106
<i>Tabla 39: Delimitación geográfica para la Ciudad de México</i>	107
<i>Tabla 40: Capacidad instalable por superficie a partir de la eficiencia de paneles para cada sector</i>	107
<i>Tabla 41: PIT por superficie de unidades residenciales, excluyendo IP y promedio de capacidad instalable por unidad residencial en la Ciudad de México</i>	108
<i>Tabla 42: PIT por superficie de unidades agropecuarias, excluyendo IP en la Ciudad de México</i>	110
<i>Tabla 43: PIT por superficie de unidades comerciales y de servicios, excluyendo IP y promedio de capacidad instalable por unidad comercial y de servicios en la Ciudad de México</i>	111
<i>Tabla 44: PIT por superficie de unidades industriales, excluyendo IP y promedio de capacidad instalable por unidad industrial en la Ciudad de México</i>	112
<i>Tabla 45: PIT por superficie de unidades públicas, excluyendo IP y promedio de capacidad instalable por unidad pública en la Ciudad de México</i>	113
<i>Tabla 46: Niveles de jerarquía analítica para sector residencial</i>	116
<i>Tabla 47: Potencial instalable en unidades residenciales por análisis multicriterio y potencial de instalación integrado</i>	118
<i>Tabla 48: Niveles de jerarquía analítica para sector agropecuario</i>	120
<i>Tabla 49: Potencial instalable en unidades agropecuarias por análisis multicriterio y potencial de instalación integrado</i>	121
<i>Tabla 50: Niveles de jerarquía analítica para sector comercial y de servicios</i>	124
<i>Tabla 51: Potencial instalable en unidades comerciales y de servicios por análisis multicriterio y potencial de instalación integrado</i>	124
<i>Tabla 52: Niveles de jerarquía analítica para sector industrial</i>	127
<i>Tabla 53: Potencial instalable en unidades industriales por análisis multicriterio y potencial de instalación integrado</i>	128
<i>Tabla 54: Niveles de jerarquía analítica para sector público</i>	130

<i>Tabla 55: Potencial instalable en unidades públicas por análisis multicriterio y potencial de instalación integrado</i>	<i>130</i>
<i>Tabla 56: Comparación de resultados entre sistema de evaluación multicriterio del potencial de instalación de GDFV y potencial por atractivo económico del diagnóstico de transición energética de la Ciudad de México</i>	<i>131</i>

## Índice de figuras

<i>Figura 1: Estructura de una celda solar</i>	24
<i>Figura 2: Clasificación de centrales eléctricas con capacidad menor a 0.5 MW por régimen de contraprestación y tecnología</i>	33
<i>Figura 3: Capacidad instalada y contratos por rango de capacidad de centrales eléctricas</i>	34
<i>Figura 4: Mapa de recurso solar: irradiación directa normal en México</i>	37
<i>Figura 5: Esquema de la construcción de jerarquías de análisis</i>	41

## **Glosario**

AP	Actividad Principal
AJE	Ajuste de Escala
CE	Central Eléctrica
CI	Capacidad Instalada
CIA	Capacidad Instalable Aproximada
CFE	Comisión Federal de Electricidad
CRE	Comisión Reguladora de Energía
DT	Derechos Sobre la Tierra
FM	Factor de Modificación
GDFV	Generación Distribuida Fotovoltaica
GE	Generador Exento
IP	Instalación Previa
LIE	Ley de la Industria Eléctrica
RGD	Redes Generales de Distribución
SB	Subsector
SC	Subcriterio
SEN	Sistema Eléctrico Nacional
ST	Estrato de personal
SI	Superficie Instalable
SP	Superficie Promedio
TEN	Tenencia
UA	Unidad Agropecuaria
UCS	Unidad Comercial y de Servicios
UE	Unidad Económica
UI	Unidad Industrial
UME	Unidad Mínima de Evaluación
UP	Unidad Pública
UR	Unidad Residencial
PIT	Potencial de Instalación Técnico

## Referencias

Aguilar, E. y Rátiva, S. (2022). “La chispa de la vida: el trabajo cooperativo energético como búsqueda para la reproducción de la vida digna”. *Tramas y Redes*, (2), pp.79-95, 216a. doi: 10.54871/cl4c201a.

Alternative Energy Tutorials [AET] (2014). *Solar Photovoltaic Panel*. Alternative Energy Tutorials. Recuperado el 7 de octubre del 2023 de <https://www.alternative-energy-tutorials.com/photovoltaics/photovoltaic-panel.html>

Asolmex (2017) *Iniciativa Solar para el impulso de la energía solar fotovoltaica de gran escala*.

Ávila, S., Deniau, Y., Sorman, A. H. & McCarthy, J. (2022). “(Counter) mapping renewables: Space, justice, and politics of wind and solar power in Mexico”. *Environment and Planning E: Nature and Space*, 5(3), pp.1056-1085.

Binz, R., Anderson, A., Coddington, M., Hale, E., Ingram, M., Martin, M., Mendoza, I., Normark, B., Olofsson, M., O’Neill, B., Statwick, P., y Speer, B. [Binz, R. *et al.*]. (2019). *A Report on the Implementation of Smart Grids in Mexico*.

Boschma, R. (2005). “Proximity and innovation: a critical assessment”. *Regional studies*, 39(1), pp. 61-74.

Carlos, M. S., y Celsa, C. R. (2017). “Panorama de los ejidos y comunidades agrarias en México”. *Agricultura, sociedad y desarrollo*, 14(1), 125-152.

Centro Nacional de Control de Energía [Cenace], (2023) *Programa de Ampliación y Modernización de la Red Nacional de Transmisión*

Coenen, L., Benneworth, P. & Truffer, B. (2012). “Toward a spatial perspective on sustainability transitions”. *Research policy*, 41(6), pp. 968-979.

Comisión Federal de Electricidad [CFE] (2021). *Autoabasto, una figura que genera pérdidas a tu bolsillo*. Portal CFE. Recuperado el 7 de octubre del 2023 de <https://app.cfe.mx/Aplicaciones/OTROS/Boletines/boletin?i=2419>

Comisión Federal de Electricidad [CFE] (2023). *Momentos de la CFE*. Portal CFE. Recuperado el 7 de octubre del 2023 de <https://www.cfe.mx/nuestraempresa/pages/historia.aspx>

Comisión Reguladora de Energía [CRE] (2017). *Resolución de la Comisión Reguladora de Energía por la que expide las disposiciones administrativas de carácter general, los modelos de contrato, la metodología de cálculo de contraprestación y las especificaciones técnicas generales, aplicables a las centrales eléctricas de generación distribuida y generación limpia distribuida*.

Comisión Reguladora de Energía [CRE] (2022) *Acuerdo por el que la comisión reguladora de energía emite las disposiciones administrativas de carácter general*

*en materia de centrales eléctricas con capacidad instalada neta menor a 0.5 mw, generación distribuida y generación limpia distribuida.*

Comisión Reguladora de Energía [CRE] (2023). “Solicitudes de interconexión de centrales eléctricas con capacidad menor a 0.5 MW”. *Estadísticas al segundo semestre de 2023*. Recuperado de [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/850976/Estadísticas\\_GD\\_2023\\_Primer\\_Semestre\\_2023.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/850976/Estadísticas_GD_2023_Primer_Semestre_2023.pdf) el 9 de octubre del 2023

Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos de 1917 [CPEUM] (1917). Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, que reforma la del 5 de febrero de 1857. 5 de febrero de 1917; Número 30, Tomo V. D.O. 05021917

Correa-Henao, G. J., & Rojas-Zerpa, J. C. (2017). Marco de referencia para la planificación de generación distribuida en zonas no interconectadas. *Iteckne*, 14(1), 70-87.

DECRETO por el cual se fijan las condiciones a que se sujetará el otorgamiento de concesiones para la introducción, generación, transmisión, distribución y venta de energía eléctrica de 1937 [Dec], (1937). Decreto por el cual se fijan las condiciones a que se sujetará el otorgamiento de concesiones para la introducción, generación, transmisión, distribución y venta de energía eléctrica. 18 de enero de 1937. D.O. 18011937

DECRETO que reforma los artículos 30, 37, 73, fracción XVI y 133 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos de 1934 [Dec] (1934). Decreto que reforma los artículos 30, 37, 73, fracción XVI y 133 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos. 18 de enero de 1934. D.O. 18011934

Delgado, A., Paez-Varela, A. (2023) *Izquierda 1923-2023: La terca travesía* (1a ed.). Penguin Random House

Ferrari, L., Flores, J.R., y Hernández, D. (en prensa). “A 20 años del pico del petróleo en México: análisis del sector hidrocarburos e implementaciones para el futuro energético nacional”. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*.

Friedberg, S. (2014) *Linear Algebra*. Pearson Education. 4th Edition

Fundación Tosepan (2023) *Foro futuras comunidades de energía mexicanas*. Cuetzalan, Puebla. 1 y 2 de septiembre 2023

Garza, E., Melgoza, J., Garza, L., Laviada, E., Trujillo, M., Sánchez, V., Corral, R., Amezcua, H., Reyes, R., y Rojo, G. [Garza, E. *et al.*] (1994). *Historia de la industria eléctrica en México*. Colección CSH. Universidad Autónoma Metropolitana, México.

Geels, F. W., & Schot, J. (2010). The dynamics of transitions: a socio-technical perspective. *Transitions to sustainable development: New directions in the study of long term transformative change*, 1, 11-104.

GeoComunes (2021). *Alumbrar las contradicciones del Sistema Eléctrico Mexicano y de la transición energética: Preguntas clave para entenderlos y construir otros modelos energéticos*, Ciudad de México: Rosa Luxemburg Stiftung, oficina para México, Centroamérica y El Caribe

Global Solar Atlas 2.0 (2019) Mapa de recurso solar. Recuperado el 7 de octubre del 2023 de: <https://solargis.com/es/maps-and-gis-data/download/mexico>

Griffiths, David J. (1981). *Introduction to Electrodynamics* (4a ed.). Pearson

Hancevic, P. I., Nuñez, H. M. & Rosellon, J. (2017). "Distributed photovoltaic power generation: possibilities, benefits, and challenges for a widespread application in the Mexican residential sector." *Energy Policy*, 110, pp. 478-489. doi: 10.1016/j.enpol.2017.08.046

Hernández-Escobedo, Q., Fernández-García, A., y Manzano-Agugliaro, F. (2017). Solar resource assessment for rural electrification and industrial development in the Yucatan Peninsula (Mexico). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76, 1550-1561. doi: 10.1016/j.rser.2016.11.200

Hodson, M. & Marvin, S. (2010). "Can cities shape socio-technical transitions and how would we know if they were?". *Research policy*, 39(4), pp.477-485.

Instituto de Energías Renovables UNAM [IER], (2017) *La industria fotovoltaica y fototérmica en México*, Proméxico.

Instituto Mexicano para la competitividad A.C. [IMCO], (2015) *Hacia la transformación del mercado eléctrico mexicano: generación distribuida*.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], (2016) *Glosario de Actualización del Marco Censal Agropecuario 2016*

Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], (2018) *Sistema de Clasificación Industrial de América del Norte 2018*, México.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], (2019) *Censos económicos 2019: Metodología*.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], (2019a) *Glosario de Censo Económico 2019*

Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], (2020) *Glosario de censo de población y vivienda 2020*

Junta de coordinación política de la cámara de diputados LXV legislatura [Cámara de diputados] (7 de enero de 2022). *Foros de parlamento abierto de la reforma energética*. Recuperado el día 7 de octubre del 2023 <https://url.comhttps://www.diputados.gob.mx/parlamentoreformaelectrica/foros.html>

Laboratorio de Innovación Financiera [LAB] (2021) *Hoja de ruta propuesta para la generación distribuida con fuentes renovables en conjunto con instituciones*

*financieras privadas y la banca de desarrollo*. Marzo, 2021

León-Trigo, L. I., Reyes-Archundia, E., Gutiérrez-Gnecchi, J. A., Méndez-Patiño, A., & Chávez-Campos, G. M. [León-Trigo, L. *et al.*]. (2019). “Smart Grids en México: Situación actual, retos y propuesta de implementación”. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 20(2), 0-0.

Lawhon, M. & Murphy, J. T. (2012). “Socio-technical regimes and sustainability transitions: Insights from political ecology.” *Progress in human geography*, 36(3), pp.354-378.

Ley de la Industria Eléctrica [LIE] (2014). “Decreto por el que se expiden la Ley de la Industria Eléctrica, la Ley de Energía Geotérmica y se adicionan y reforman diversas disposiciones de la Ley de Aguas Nacionales”, *Diario Oficial de la Federación*, DOF: 11082014.

Ley de Servicio Público de Energía Eléctrica de 1975 [LSPEE] (1975). Ley de Servicio Público de Energía Eléctrica. 22 de diciembre de 1975. D.O. 22121975.

Ley que crea la Comisión Federal de Electricidad [LCFE] (1937). Ley que crea la Comisión Federal de Electricidad. 24 de agosto de 1937. DOF: 24081937.

Ley Orgánica de la Administración Pública Federal [LOAPF] (2021) DOF: 20102021

Mandoki, L. (Director) (2006). *¿Quién es el señor López?* [Documental]. Astillero Films.

Mathieu, H. Fanet, H. (2013) *Física de semiconductores y componentes electrónicos*. Dirección General de Publicaciones y Fomento Editorial. 1a edición.

McAdam, R. & McCreedy, S. (1999). “A critical review of knowledge management models”. *The Learning Organization*, Vol. 6 No. 3, pp. 91-101.

McLaren, Peter G. (1984), *Elementary Electric Power and Machines*, Ellis Horwood, pp. 182–83, ISBN 0-85312-269-5

Mendoza, M. (2018). “Luces de la ciudad”. *Km Cero*. No. 117. Septiembre del 2018.

Massachusetts Institute of Technology [MIT] (2016). *The Future of Solar Energy. An Interdisciplinary MIT Study*.

Molina Pfennig, P. D., & González-Baheza, A. (2020). “Evaluación de los recursos de radiación solar en los municipios de Baja California Sur, México, mediante un modelo de aptitud socioambiental”. *Región y sociedad*, 32.

Nick Lucid. [The Science Asylum] (4 de enero 2019). *How Do Solar Panels Work? (Physics of Solar Cells)* [Video]. Youtube. <https://www.youtube.com/watch?v=8RjGHmlOu58>

Palacios, R. (2020). “¿Cuál transición energética?”. *América Latina en movimiento*, 550, pp. 23-25.

Palacios, R., (en prensa). “Evolución de la legislación de la industria eléctrica”. En L. Ferrari, O. Maser y A. Straffon (coords.), *Transición energética justa y sustentable. Contexto y estrategias para México*. Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías / Fondo de Cultura Económica.

Plataforma Nacional de Energía Ambiente y Sociedad [Planeas] (2022) Capacidad y generación. Recuperado el 7 de octubre del 2023 de: <https://energia.conacyt.mx/planeas/electricidad/generacion>

Pv magazine (2023) *Podría crecer hasta en un 20%, la generación distribuida en México en 2023*, Pv magazine, recuperado el 7 de octubre del 2023 de <https://www.pv-magazine-mexico.com/2023/01/02/podria-crecer-hasta-en-un-20-la-generacion-distribuida-en-mexico-en-2023/>

Rauschenbach, Hans S. (2012). *Solar Cell Array Design Handbook: The Principles and Technology of Photovoltaic Energy Conversion*. Springer Science & Business Media. ISBN 978-94-011-7915-7.

Rota, G. (1964) "The Number of Partitions of a Set," *American Mathematical Monthly* 71(5): 498–504.V

Saaty, R. W. (1987). “The analytic hierarchy process -what it is and how it is used.” *Mathematical modelling*, 9(3-5), pp. 161-176. doi: 10.1016/0270-0255(87)90473-8

Saaty, T. L. (1986). Absolute and relative measurement with the AHP. The most livable cities in the United States. *Socio-Economic Planning Sciences*, 20(6), 327-331.

Saaty, T. L. (1990). “How to make a decision: the analytic hierarchy process.” *European Journal of Operational Research*, 48(1), pp. 9-26. doi: 10.1016/0377-2217(90)90057-I

Saaty, T. L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *International journal of services sciences*, 1(1), 83-98.

Saaty, T. L., & Vargas, L. G. (2012). “Models, methods, concepts & applications of the analytic hierarchy process.” *New York: Springer Science & Business Media*. doi: 10.1007/978-1-4615-1665-1

Salim, J., Yahya, Y., Othman, M. y Mohd, N. (2007). The Use of Holistic Approach to Knowledge Management Initiative in Managing Information in Higher Learning Institution: A Perspective. 6th WSEAS International Conference on E-ACTIVITIES, (pp 347-352). Tenerife. Spain. December 14-16

Sanchez, S. (26 mayo, 2020) *La energía solar contamina más de lo que crees*. Ecosiglos. Recuperado el 7 de octubre del 2023 de <https://ecosiglos.com/la-energia-solar-no-es-tan-verde-como-crees/>

Sanjeev H. Kulkarni, Bhairu J. Jirage & T.R. Anil (2017) Alternative Energy Options for India—A Multi-criteria Decision Analysis to Rank Energy Alternatives using Analytic Hierarchy Process and Fuzzy Logic with an Emphasis to Distributed Generation, *Distributed Generation & Alternative Energy Journal*, 32:2, 29-55, DOI: 10.1080/21563306.2017.11869108

Savaget, P., & Acero, L. (2018). Plurality in understandings of innovation, sociotechnical progress and sustainable development: an analysis of OECD expert narratives. *Public Understanding of Science*, 27(5), 611-628.

Secretaría de Desarrollo Económico [Sedeco] (2022) *Diagnóstico de Transición Energética de la Ciudad de México*. p. 59-61

Secretaría de energía [Sener] (2023). *Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional 2023-2037*. Recuperado de <https://www.gob.mx/sener/articulos/programa-de-desarrollo-del-sistema-electrico-nacional-2023-2037> el 8 de octubre del 2023

Shimura, F. (2012). *Semiconductor silicon crystal technology*. Elsevier.

Shorabeh, S. N., Firozjaei, M. K., Nematollahi, O., Firozjaei, H. K., & Jelokhani-Niaraki, M. (2019). A risk-based multi-criteria spatial decision analysis for solar power plant site selection in different climates: a case study in Iran. *Renewable Energy*, 143, 958-973. doi: 10.1016/j.renene.2019.05.063

Soler, N. G., Moss, T. & Papasozomenou, O. (2018). “Rain and the city: Pathways to mainstreaming rainwater harvesting in Berlin”. *Geoforum*, 89, pp. 96-106.

Taniguchi, H., (lun 11 octubre 2010) *Luz y Fuerza desapareció por motivos políticos: líder de electricistas*. Expansión

Taylor, S. J., Anagnostou, A., Fabiyi, A., Currie, C., Monks, T., Barbera, R., & Becker, B. [Taylor, S. J. *et al.*] (2017). “Open science: Approaches and benefits for modeling & simulation”. *2017 Winter Simulation Conference*, pp. 535-549. IEEE.

Vargas, L.G., "Reciprocal matrices with random coefficients", *Mathematical Modeling* 3 (1982) 69-81.

Vattuone, X. R., & Moreno, A. V. (2023). “México en la Geopolítica del Litio en la Transición Energética”. *Revista Conjeturas Sociológicas*, 149-167.

Zangeneh, A., Jadid, S., & Rahimi-Kian, A. (2009). A hierarchical decision making model for the prioritization of distributed generation technologies: A case study for Iran. *Energy Policy*, 37(12), 5752-5763.