

AUGE DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES EN LAS CIUDADES

SOLUCIONES ENERGÉTICAS
PARA EL FUTURO URBANO



Respaldo por:



Federal Ministry
for the Environment, Nature Conservation
and Nuclear Safety

A menos que se especifique lo contrario, el material de esta publicación puede usarse, compartirse, copiarse, reproducirse, imprimirse o almacenarse libremente, siempre que se reconozca adecuadamente a IRENA como fuente y titular de los derechos de autor. El material contenido en esta publicación que se atribuye a terceros puede estar sujeto a condiciones de uso y restricciones independientes, y deberán obtenerse los permisos adecuados de dichos terceros antes de hacer cualquier uso de ese material.

Cita de referencia: IRENA (2020), *Rise of renewables in cities: Energy solutions for the urban future* (Auge de las energías renovables en las ciudades: soluciones energéticas para el futuro urbano), Agencia Internacional de Energías Renovables, Abu Dhabi.

ISBN 978-92-9260-329-8

Este documento es la traducción de "Rise of renewables in cities: Energy solutions for the urban future", ISBN: 978-92-9260-271-0 (2020). En caso de discrepancia entre esta traducción y el original en inglés, prevalecerá el texto inglés.

Acerca de IRENA

La Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA) sirve como la plataforma principal para la cooperación internacional, un centro de excelencia, un repositorio sobre políticas, tecnologías, recursos y conocimientos financieros y un impulsor de la acción en el campo para avanzar en la transformación del sistema energético global. Como organización intergubernamental establecida en el 2011, IRENA promueve la adopción generalizada y el uso sostenible de todas las formas de energía renovable, entre ellas la bioenergía y las energías geotérmica, hidráulica, oceánica, solar y eólica para lograr el desarrollo sostenible, el acceso a la energía, la seguridad energética y la prosperidad y el crecimiento económicos con bajas emisiones de carbono. www.irena.org

Respaldo de IKI

Este informe es parte del proyecto Soluciones Energéticas para las Ciudades del Futuro, el cual está respaldado por la Iniciativa Internacional de Protección del Clima (IKI). El Ministerio Federal del Medio Ambiente, Conservación de la Naturaleza y Seguridad Nuclear (BMU) de Alemania respalda esta iniciativa con base en una decisión adoptada por el parlamento alemán (Bundestag).

Agradecimientos

IRENA desea expresar su aprecio sincero a los expertos que revisaron el informe. Anjali Mahendra (Instituto de Recursos Mundiales), Gerhard Stryi-Hipp (Instituto Fraunhofer para Sistemas de Energía Solar), Haukur Harðarson (ArcticGreen Energy Corporation), Helen Carlström (E.ON), Li Zhu (Centro de Energía Sostenible de la APEC), Sven Teske (University of Technology Sydney), Toby Couture (E3 Analytics), Vincent Kitio (ONU-Hábitat), Weimin Xi y Changxia Zhu (Instituto de Investigación de la Ciudad y la Energía de State Grid Corporation of China) y Zhipeng Liang (Administración Nacional de Energía de China) contribuyeron con comentarios valiosos y sugerencias constructivas.

Los colegas de IRENA Arina Anisie, Asami Miketa, Celia García-Baños, Elena Ocenic, Francisco Boshell, Jinlei Feng, Luis Janeiro, Michael Renner y Prasoon Agarwal proporcionaron revisiones y aportaciones valiosas.

Se recibieron también comentarios útiles de Paul Komor, Neil MacDonald y Elizabeth Press. Lisa Mastny editó el informe.

IRENA agradece el respaldo del proyecto IKI de Alemania para la producción de esta publicación.

Autores contribuyentes: Este informe fue preparado por el equipo de energía urbana sustentable del Centro de Innovación y Tecnología (IITC) de IRENA, bajo la guía de Dolf Gielen. Fue escrito por Yong Chen, Enzia Schnyder y Jennifer Potter (IRENA) y Mashael Yazdanie (Empa) con contribuciones y con soporte adicional de Julien Marquant (IRENA), Dorine Hugenholtz (IRENA) y Alina Gilmanova (Academia China de Ciencias).

Para obtener más información o proporcionar comentarios, escriba a: publications@irena.org

Descargue de www.irena.org/publications

Exención de responsabilidad

Esta publicación y el material que figura en ella se presentan en el estado en que se encuentran. IRENA ha tomado todas las precauciones razonables para verificar la fiabilidad del material presentado en esta publicación. Sin embargo, ni IRENA ni ninguno de sus funcionarios, agentes, proveedores de datos u otros contenidos de terceros ofrecen ninguna garantía, ya sea explícita o implícita, ni aceptan responsabilidad u obligación alguna por consecuencias derivadas del uso de la publicación o el material que contiene.

La información aquí contenida no representa necesariamente los puntos de vista de todos los miembros de IRENA. La mención de empresas específicas o ciertos proyectos o productos no significa que IRENA los respalde o recomiende con preferencia sobre otros de naturaleza similar que no estén mencionados. Las denominaciones empleadas y la presentación de material en la presente publicación no implican la expresión de ninguna opinión por parte de IRENA sobre la condición jurídica de ninguna región, país, territorio, ciudad o zona, ni de sus autoridades, ni en relación con la delimitación de sus fronteras o límites.

Contenido

●	FIGURAS	4
●	TABLAS	4
●	RECUADROS	5
●	ABREVIATURAS	5
●	RESUMEN EJECUTIVO	6
<hr/>		
1.	INTRODUCCIÓN	11
●	1.1 Urbanización y cambio climático	12
●	1.2 Cómo comprender los sistemas energéticos urbanos	15
●	1.3 Papel de las energías renovables en la transformación global de la energía en las ciudades	18
●	1.4 Acerca de este informe: Objetivo, alcance y estructura	20
<hr/>		
2.	OPORTUNIDADES POSIBLES PARA ENERGÍAS RENOVABLES URBANAS	23
●	2.1 Mapeo global de los objetivos de las las energías renovables en las ciudades	24
●	2.2 Análisis espacial de los objetivos relacionados con los recursos de las energías renovables locales y las plantas de potencia	33
<hr/>		
3.	TECNOLOGÍAS DE ENERGÍAS RENOVABLES URBANAS	51
●	3.1 Energía solar	52
●	3.2 Bioenergía y desechos-a-energía	60
●	3.3 Potencia eólica urbana	65
●	3.4 Uso directo de la energía geotérmica	68
●	3.5 Desarrollo de la red inteligente a través de la innovación	70
●	3.6 Redes urbanas de energía térmica	73
<hr/>		
4.	HERRAMIENTAS DE MODELADO PARA LA PLANEACIÓN DEL SISTEMA ENERGÉTICO URBANO	76
●	4.1 Desafíos en materia de datos: Datos requeridos, granularidad temporal y espacial y accesibilidad	78
●	4.2 Herramientas de modelado	83
●	4.3 Desafíos del modelado para países en desarrollo	97
●	4.4 Proyección hacia el futuro en la planificación del sistema energético urbano	100
<hr/>		
●	REFERENCIAS	102

Figuras

Figura 1:	Crecimiento de la población mundial, 1961–2016	13
Figura 2:	Reducción global de las emisiones de carbono relacionadas con la energía hasta el 2050: Planes actuales comparados con la transformación de la energía	19
Figura 3:	Capítulos en este informe: Pasos clave para abordar los desafíos urbanos	22
Figura 4:	Distribución geográfica de objetivos de energía renovable y objetivos de energía 100 % renovables	25
Figura 5:	Mapeo global de las ciudades objetivos de energía renovable y zonas climáticas	26
Figura 6:	Objetivos de las ciudades y población urbana	30
Figura 7:	Ciudades en el 30% superior para GHI comparado con ciudades con objetivos de energía renovable	35
Figura 8:	Distribución de plantas de potencia solar FV por GHI y región geográfica	36
Figura 9:	Distribución geográfica de plantas de potencia solar cerca de las ciudades	37
Figura 10:	Ciudades en el 30 % superior para densidad de potencia eólica comparado con ciudades con objetivos de energía renovable	40
Figura 11:	Distribución de las plantas de potencia eólica cerca de las ciudades por densidad de potencia y región	41
Figura 12:	Densidad de potencia y distribución geográfica de plantas de potencia eólica cerca de las ciudades	42
Figura 13:	Distribución de energía hidroeléctrica por región	44
Figura 14:	Bioenergía y plantas de desechos-a-energía por región	45
Figura 15:	Plantas de potencia de biomasa cerca de las ciudades y ciudades con un alto potencial de recursos	47
Figura 16:	Plantas de desechos-a-energía globales cerca de las ciudades	47
Figura 17:	Distribución de las plantas de potencia geotérmica cerca de las ciudades por región	49
Figura 18:	Mediana global del tamaño del sistema de solar FV residencial instalados	53
Figura 19:	Sistema híbrido solar FV-térmico montado en la azotea	59
Figura 20:	Rotor Savonius y rotor Darrieus	67

Tablas

Tabla 1:	Número de ciudades con alto potencial solar en cada conjunto de datos	34
Tabla 2:	Número de ciudades con alto potencial eólico en cada conjunto de datos	39
Tabla 3:	Distancia media al segmento de río más cercano y potencia del segmento para cada conjunto de datos	43
Tabla 4:	Número de ciudades con alto potencial geotérmico en cada conjunto de datos	48
Tabla 5:	Características clave de los sistemas de bomba de calor geotérmica de circuito abierto y circuito cerrado	70

Recuadros

Recuadro 1:	Soluciones de energía renovable para ciudades del futuro	15
Recuadro 2:	Perspectiva de innovación: Carga inteligente para vehículos eléctricos	17
Recuadro 3:	CHP distritales y sistemas de refrigeración en Umeå y Gothenburg, Suecia	61
Recuadro 4:	Alianza Geotérmica Global	68
Recuadro 5:	Lineamientos técnicos para el desarrollo de proyectos financiables de calefacción y refrigeración con energías renovables	74
Recuadro 6:	Almacenamiento de energía térmica en calefacción y refrigeración urbanos	75

Abreviaturas

°C	grados centígrados	ALC	América Latina y el Caribe
BIPV	sistemas fotovoltaicos integrados en construcciones	LEAP	Planificación de alternativas energéticas a largo plazo
CFD	dinámica de fluidos computacional	m	metro
CHP	combinación de calor y energía	m ²	metro cuadrado
CO ₂	dióxido de carbono	MESSAGE	Modelo para alternativas de estrategia de suministros energéticos y su impacto ambiental general
CSP	energía solar concentrada	MtCO ₂ e	millones de toneladas CO ₂ -equivalente
EUR	Euro	MW	megavatio
VE	vehículo eléctrico	MW _{th}	megavatio térmico
PIB	Producto Interno Bruto	OSeMOSYS	Sistema de modelado de energía de fuente abierta
GHI	irradiación horizontal global	FV	fotovoltaico
Gt	gigatonelada	FV-T	solar fotovoltaico-térmico
GW	gigavatio	I+D	investigación y desarrollo
GW _{th}	gigavatio térmico	TIMES	Sistema integrado MARKAL-EFOM
HOMER	Optimización híbrida de recursos múltiples de energía	TWh	teravatios hora
ICT	tecnología de información y comunicaciones	CMNUCC	Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático
IPCC	Grupo Intergubernamental de Expertos Sobre Cambio Climático	USD	dólar de EE. UU.
IRENA	Agencia Internacional de Energías Renovables	ERV	energía renovable variable
kW	kilovatio	W	vatio
kWh	kilovatio hora		

RESUMEN EJECUTIVO



Resumen ejecutivo

Las ciudades son crecientemente relevantes para la mitigación y adaptación del cambio climático, no solo debido a su alta contribución a las emisiones globales de carbono, sino, más importante, debido a su gran potencial para mitigar emisiones de todo tipo, así como a la necesidad creciente de construir infraestructuras urbanas resilientes al clima para el futuro. Para el 2050, las ciudades necesitarán dar cabida a dos tercios de la población mundial en un entorno habitable y con bajas emisiones de carbono. Integrar tecnologías de energía renovable en sistemas de energía local se ha convertido en parte de la acción transformadora necesaria para alcanzar dicho potencial, respaldado por fuerte voluntad política y avance tecnológico. Las ciudades también se benefician enormemente de los impactos positivos que el desarrollo local de energías renovables tienen sobre el producto interno bruto (PIB) y el empleo.

Este informe explora tres pilares clave de conocimiento, sobre potenciales de recursos de energía renovable y objetivos de energía renovable, opciones tecnológicas y planificación de un sistema energético urbano, que permitirán que las ciudades amplíen su uso de energías renovables disponibles localmente a medida que avancen para descarbonizar sus sistemas energéticos.

Establecer objetivos de energía renovable es un componente importante de los esfuerzos de las ciudades por impulsar el despliegue de las primeras. Sin embargo, establecer el nivel adecuado de los objetivos se basa en un buen conocimiento de la disponibilidad de recursos energéticos renovables, entre otros factores clave. Un análisis de los objetivos establecidos en las ciudades en relación tanto con los recursos de energías renovables disponibles como las plantas de energía renovable ubicadas cerca de las ciudades revela que:

- Un creciente número de ciudades ha establecido objetivos de energías renovables, pero estas se concentran en Europa y América del Norte, áreas que tienen una riqueza económica superior y climas de templados a fríos. A nivel mundial, más del 80 % de las ciudades que han establecido un objetivo de energías renovables (671 ciudades en total) están en Europa y América del Norte. Mientras tanto, ciudades en Asia y África se están quedando atrás en el establecimiento de objetivos de energías renovables, incluso cuando se espera que crezca su demanda de energía.
- Las ciudades con objetivos de energía renovable recaen más comúnmente en el rango de población de 100 000 a 500 000 habitantes. La mayoría de las grandes ciudades y mega ciudades/megaciudades que tienen un conjunto de objetivos de energía renovable han perseguido solo una modesta participación de energías renovables éstas en su mezcla de energías mix energético.
- La energía hidroeléctrica, bioenergía y desecho-a-energía ya juegan un papel claro en ayudar a las ciudades a alcanzar sus objetivos de energías renovables y a descarbonizar la mezcla de energías mix energético. Está aumentando el uso de energía solar y geotérmica en las ciudades, aunque un gran potencial permanece sin explotar, mientras que la capacidad para aprovechar la energía eólica en las ciudades está progresando pero sigue siendo marginal.

La integración de tecnologías renovables locales en las ciudades enfrenta varios desafíos, entre ellos barreras legislativas, políticas, regulatorias, de financiamiento, capacidad humana, estéticas, de diseño y planeación urbana. En cierta medida, estas barreras son el resultado de una falta de conocimiento de las opciones de energías renovables y de los beneficios de aprovechar recursos renovables localmente disponibles. El conocimiento mejorado de aplicaciones de tecnologías renovables urbanas ayudará a que las ciudades planeen y desplieguen energías renovables en áreas urbanas..

Este informe también proporciona un panorama general de las tecnologías renovables más comúnmente usadas en las ciudades, que incluyen las siguientes:

- **Sistemas solares fotovoltaicos (FV):** Los sistemas solares FV urbanos son generalmente de menor escala que los sistemas montados en el piso ubicados en las afueras de las ciudades. El tamaño mediano de un sistema FV residencial instalado en 2018 fue de alrededor de 6,4 kilovatios. Estos sistemas generalmente se instalan encima o se integran a los techos y las fachadas de los edificios. Ampliar las aplicaciones FV en las ciudades enfrenta desafíos únicos, que incluyen restricciones de terrenos, el impacto potencial de participaciones crecientes de energías renovables variables en la red local, y una falta de comprensión de las implicaciones económicas de los sistemas solares FV para los proveedores de electricidad y servicios públicos locales.
- **Sistemas termosolares:** Los sistemas termosolares, que se basan en diferentes tipos de recolectores solares, generalmente se usan para calentar agua y espacios y, en algunos casos, para calor de procesos industriales. Con mayor frecuencia, las ciudades y los países han adoptado códigos para construcciones que exigen el uso de calentadores de agua solares para todas las construcciones nuevas. En algunas ciudades, grandes colectores solares distribuyen el calor producido a través de redes de calefacción urbana. La calefacción urbana solar fue habilitada por la transición de redes térmicas hacia sistemas de calefacción urbana de bajas temperaturas (por debajo de los 60 a 70 grados centígrados), conocidos como la cuarta generación. El sistema solar se puede instalar sobre el suelo o sobre el techo de una construcción para suministrar calefacción para la construcción, la comunidad, el distrito o la ciudad. Sin embargo, en los países donde el gas natural es barato y es la fuente de calefacción dominante, los sistemas termosolares son menos competitivos en ausencia de incentivos o esquemas promocionales para respaldar sus beneficios sociales y ambientales.
- **Sistema de refrigeración termosolar:** Con el crecimiento en la demanda de refrigeración global, triplicada de 600 teravatios-hora (TWh) en 1990 a 2000 TWh en 2016, y proyectada a al menos el triple de nuevo para el 2050, la energía termosolar se ha extendido gradualmente al sector de refrigeración. Para fines de refrigeración, los sistemas termosolares generalmente se combinan con refrigeración por absorción para bajar el pico de demanda de la red durante los veranos calientes, reducir los apagones y los costos para la mejora de la red.

- **Bioenergía y desechos-a-energía** Estas fuentes de energía basadas en la biomasa pueden proporcionar un suministro de energía relativamente confiable y consistente en comparación con la solar FV. Para las ciudades, el desecho-a-energía ofrece una manera prometedora de crear una economía circular. Sin embargo, las incertidumbres de obtener un suministro sostenible de materia prima necesitan abordarse y la aceptación del público permanece siendo una barrera para la adopción de tecnologías de desecho-a-energía.
- **Potencia eólica urbana:** La potencia eólica se ha usado solo marginalmente en las ciudades y enfrenta enormes desafíos para ser aprovechada. Si bien existen ejemplos de turbinas eólicas urbanas que generan electricidad, se necesita mejorar significativamente su desempeño y la implementación a gran escala es escasa. El uso de turbinas eólicas en ambientes urbanos está principalmente en la fase de investigación y desarrollo. La falta de datos experimentales es un gran inconveniente en el desarrollo de turbinas eólicas urbanas.
- **Energía geotérmica para uso directo:** Con la necesidad de descarbonizar el sector de la calefacción y reconocer el potencial y las ventajas del uso directo de la energía geotérmica, las aplicaciones en las ciudades han estado creciendo. A nivel mundial, la capacidad instalada de uso geotérmico directo se ha más que duplicado desde el 2010, al alcanzar 107 727 megavatios térmicos desplegados en 88 países en el 2019. La tecnología geotérmica se usa principalmente para la calefacción y refrigeración de espacios, así como para agua caliente en las ciudades, a través de

sistemas de calefacción independientes y distritales. Para las ciudades nuevas o para la expansión de ciudades existentes, la instalación de sistemas de energía geotérmica sería mucho más rentable que integrar sistemas en la infraestructura establecida.

Para la mayoría de las ciudades, la integración de tecnologías renovables descritas anteriormente requeriría una actualización de la infraestructura urbana para darles cabida, sin comprometer la confiabilidad y la estabilidad operativas. En este informe se destaca la importancia de desarrollar redes “inteligentes” a través de la innovación y la adopción de tecnologías propicias, tales como vehículos eléctricos, sistemas de almacenamiento de energía y sistemas inteligentes de gestión de la energía para facilitar la integración de las energías renovables en la infraestructura urbana. Las redes inteligentes presentan oportunidades para una mayor participación de energías renovables variables y para mejoras en la eficiencia del sistema. Esto es particularmente importante porque la infraestructura futura de la energía urbana estará altamente integrada entre diferentes sectores, que incluyen electricidad, calefacción, refrigeración y transporte.

De manera similar, las redes de calefacción distritales que se enfocan en la integración de energías renovables ofrecen nuevas oportunidades para que las renovables, tales como energía termosolar y geotérmica de baja temperatura, jueguen un mayor papel en el suministro de energía. A través de tecnologías de acoplamiento sectorial, tales como bombas de calor, calentadores eléctricos, almacenamiento de energía térmica, las redes de energía térmica se han integrado cada vez más a los sistemas de electricidad.

La planificación del sistema de energía urbana que se centra específicamente en la integración de las energías renovables en la infraestructura energética es fundamental para avanzar en la transformación energética global. Elegir la herramienta de modelado correcta para esta planificación es fundamental. En este informe se examinan las herramientas de modelado más comúnmente utilizadas para apoyar a la planificación del sistema energético urbano, así como los desafíos clave para la realización de dicha planificación, particularmente en países en desarrollo.

Esto incluye desafíos de datos relacionados principalmente con la accesibilidad y granularidad de los datos energéticos de las ciudades que cubren cuestiones relacionadas con la oferta y la demanda. En el informe se evalúan siete herramientas de modelado frente a un conjunto de criterios para determinar su eficacia para el uso en la planificación de sistemas energéticos urbanos centrados en las energías renovables.

En particular, la integración de sistemas de energías renovables en la infraestructura urbana de una nueva sección o área de una ciudad existente o en ciudades nuevas, sería menos costoso que integrar estos sistemas en áreas establecidas porque habría menos necesidad para renovar construcciones y redes existentes.

Por lo tanto, las ciudades existentes o planeadas necesitan cambiar el paradigma para su desarrollo de infraestructura urbana, con las energías renovables jugando un papel crucial. Esto ayudará a reducir las huellas de carbono de las ciudades, en línea con el movimiento global hacia un futuro con limitaciones de emisiones de carbono e, igualmente importante, permitirá que las ciudades mitiguen los impactos negativos del cambio climático global y local.

Para concluir, las ciudades rara vez pueden depender únicamente de las fuentes de energías renovables locales para descarbonizar sus sistemas energéticos. Sin embargo, antes de que las ciudades importen por defecto energías renovables desde fuera de sus fronteras, deben explorar las oportunidades para maximizar el uso de fuentes de energías renovables disponibles localmente.

Deben fomentar la generación de energía distribuida y un enfoque integrado para desarrollar la infraestructura urbana del futuro. Eso significa acoplar los sectores de electricidad, construcción, transporte, calefacción e industria para alcanzar una mayor eficiencia del sistema y mejorar la resiliencia climática.





1.



INTRODUCCIÓN

1. Introducción

Las ciudades son los motores económicos de nuestro planeta, el hogar del 55 % de la población mundial y representan el 80 % del producto interno bruto (PIB) (ONU DAES, 2018). La urbanización ha mejorado el bienestar social al expandir las actividades económicas y las oportunidades comerciales, pero también ha contribuido al daño ambiental y al cambio climático global, al ser los combustibles fósiles los que impulsan la mayoría de las actividades económicas y sociales, (PNUD, 2017; Kerstead y Shad, 2013).

De acuerdo con el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC), las ciudades contribuyen con el 71 a 76 % de las emisiones globales de dióxido de carbono (CO₂) relacionadas con la energía. Los combustibles fósiles y demás emisiones se asocian con serios problemas de contaminación del aire en más del 80 % de las ciudades en todo el mundo, que provocan alrededor de 7 millones de muertes prematuras cada año por enfermedades como cáncer de pulmón, infartos cerebrales y asma (OMS, 2018).

Con la previsión de que 2500 millones de personas se sumen a asentamientos urbanos a lo largo de las próximas tres décadas (ONU DAES, 2018), nuestro futuro colectivo estará determinado por las decisiones que se tomen hoy sobre cómo construir sistemas de energía sostenible para las ciudades. Necesitamos encontrar maneras innovadoras de impulsar las áreas urbanas en crecimiento y transformar a la vez los sistemas existentes. Al beneficiarse de reducciones dramáticas en el costo de la generación de electricidad renovable en los últimos años, las energías renovables podrían jugar un papel clave en la reestructuración de los sistemas energéticos urbanos.

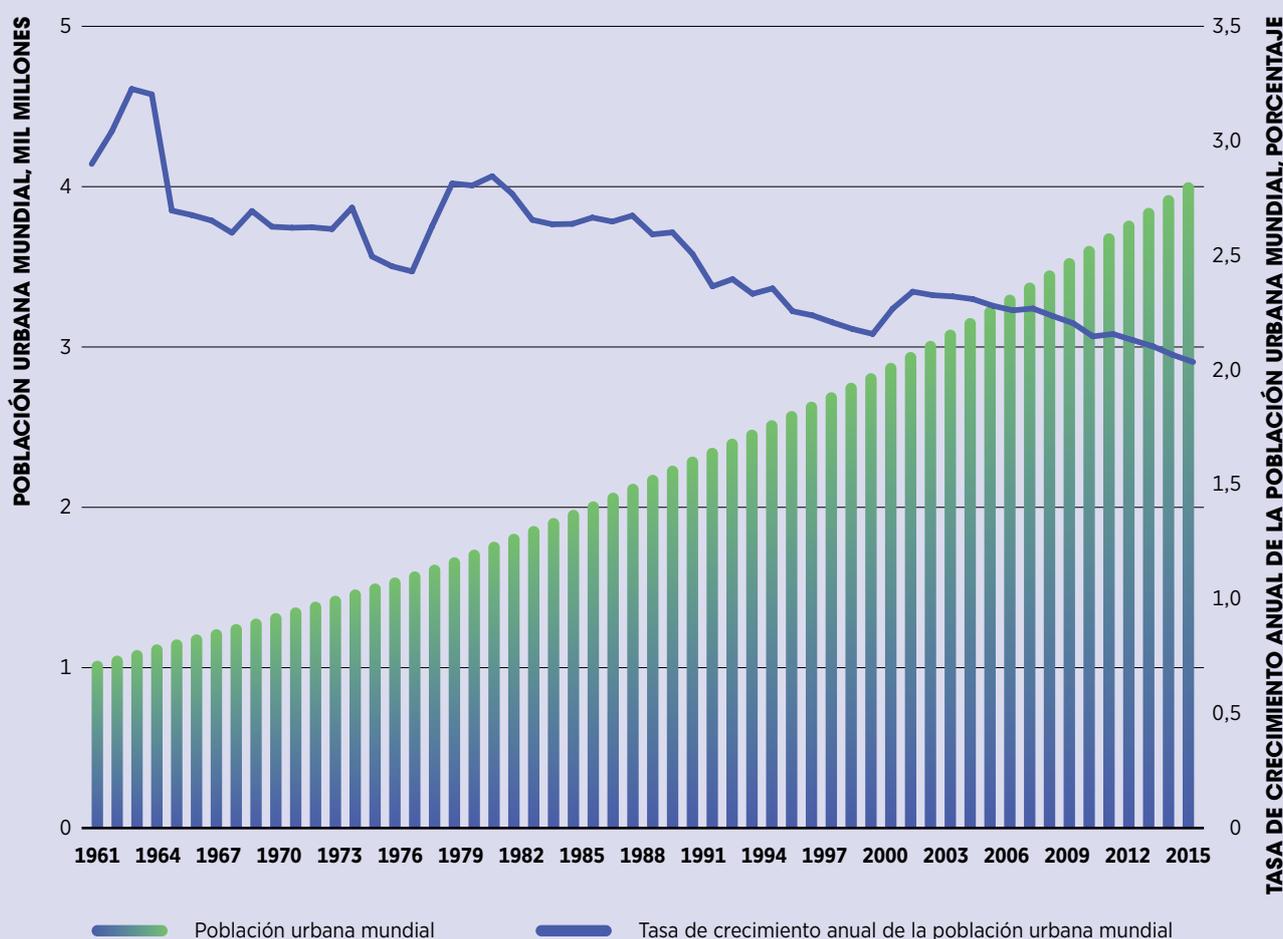
Esto también está en línea con el propósito del Objetivo de Desarrollo Sostenible 7.2 de Naciones Unidas, el cual hace un llamado a incrementar enormemente la participación de energías renovables en la combinación energética global para el 2030.

Este capítulo se refiere al contexto dominante para el auge de las energías renovables en las ciudades y su potencial para determinar nuestro futuro, y para el posicionamiento de las ciudades en la transformación energética global. Además, explora las oportunidades desaprovechadas de energías renovables disponibles localmente, dada la variedad y madurez de las aplicaciones tecnológicas en las ciudades, así como las herramientas de modelado disponibles que se pueden usar para identificar opciones factibles y para confeccionar estrategias de energía sostenible y planes de acción climática.

1.1 Urbanización y cambio climático

La población urbana mundial se ha incrementado rápidamente durante el último medio siglo, al cuadruplicarse número de habitantes en las ciudades desde 1961 (figura 1). De acuerdo con la Organización de Naciones Unidas (ONU), si bien se espera que la tasa de urbanización continúe a reducirse (con un promedio anual del 1,7 % entre 2018 y 2030 y de 1,3 % entre 2030 y 2050), se proyecta que la población urbana total crezca en más del 50 % para el 2050 (del nivel de 2015). Esto significa que para mediados de siglo, dos terceras partes de la población, o 6700 millones de personas, vivirán en ciudades, con casi todos los incrementos (90 %) esperados en Asia y África (ONU DAES, 2018).

Figura 1: Crecimiento de la población mundial, 1961-2016



Cálculos basados en datos del Banco Mundial, 2017.

Actualmente, las ciudades son responsables del 67 % a 76 % del consumo global de energía final y del 71 % a 76 % de las emisiones de CO₂ relacionadas con la energía (Edenhofer *et al.*, 2014). Durante las próximas décadas, el proceso de urbanización coincidirá forzosamente con la necesidad urgente de descarbonizar el sistema energético global, que es una tarea fundamental si pretendemos mantener el incremento promedio de la temperatura global muy por debajo de los 2 grados centígrados (°C), o 1,5 °C por encima de los niveles preindustriales (el objetivo climático establecido en el Acuerdo de París de 2015).

Desde el inicio del siglo XXI, los impactos del cambio climático se han sentido de manera creciente en las ciudades. Eventos climáticos más frecuentes y intensos, como inundaciones, vendavales y olas de calor, han dañado e incluso paralizado las áreas urbanas (UNDRR, 2016; Güneralp *et al.*, 2015). A nivel mundial, 17 de los 18 años más cálidos registrados han tenido lugar en las últimas dos décadas, según la Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio de EE. UU. (NASA, 2019).

La onda de calor de 2003 estuvo entre los desastres más graves del medio siglo pasado, al costar la vida de 30 000 personas (PNUMA, 2004). Se espera que los veranos sean cada vez más calientes y más secos (Zscheischler and Seneviratne, 2017), lo que dará lugar a un mayor uso del aire acondicionado. Esto, a su vez, aumenta las temperaturas ambientales en el entorno construido e intensifica el efecto de isla del calor urbano, lo que da como resultado áreas urbanas aún más calientes. Estos efectos combinados podrían costar a las ciudades hasta el 10,9 % del PIB para finales del siglo XXI (Estrada *et al.*, 2017).

Los efectos del cambio climático sobre el ciclo hidrológico también influyen sobre los patrones climáticos regionales. Los veranos más calurosos y más secos fueron un factor importante detrás de los incendios forestales en el estado estadounidense de California durante el 2017 y el 2018, aunque los factores humanos también fueron un contribuyente clave a este desastre. Los incendios forestales en Australia de 2019-2020 que duraron cuatro meses son otro ejemplo de los impactos regionales. En noviembre de 2019, una fuerte inundación en Venecia, Italia, sumergió el 85 % del área urbana y le costó a la ciudad 1100 millones EUR (1230 millones USD¹), con daño irreparable a algunos edificios históricos (Henley and Giuffrida, 2019).

Si los niveles del mar continúan elevándose, tendrán lugar impactos similares en otros sitios en Europa, ya que el 70 % de las ciudades más grandes de la región se ubican en la costa o cerca de ella, y la mayoría se encuentra a menos de 10 metros sobre el nivel del mar (OCDE, 2009). A nivel mundial, el IPCC advierte sobre los impactos crecientes de la elevación del nivel del mar en las poblaciones de la costa y en pequeños estados y territorios insulares (IPCC, 2019).

Las ciudades son esenciales para la mitigación del cambio climático, ya que tienen un enorme potencial

para reducir las emisiones de todo tipo. Además, la infraestructura urbana debe ser más resiliente al clima, en particular los sistemas energéticos urbanos, dado su papel fundamental para mantener la funcionalidad de otra infraestructura.

En las ciudades y sus alrededores en varios países se ha ido incrementando la instalación de sistemas energéticos descentralizados basados en renovables, con el apoyo de una mezcla de tecnologías propicias, como el almacenamiento de energía (baterías y almacenamiento térmico), la carga inteligente para vehículos eléctricos (VE), la conversión de energías renovables en calor y la producción de hidrógeno a partir de energías renovables, tecnologías digitales y gestión inteligente de la energía. Se espera que continúe esta tendencia, junto con la emergencia de modelos de negocios innovadores, tales como energía como un servicio, agregadores, comercio de electricidad entre pares, modelos de propiedad comunitaria, planificación energética urbana y de pago por uso, con el acoplamiento de diferentes sectores tales como el de construcciones, transporte e industria (IRENA, 2019a).

Al mismo tiempo, los marcos regulatorios y de políticas y el diseño del mercado se deberán orientar a facilitar el cambio a ciudades con bajas emisiones de carbono y resilientes al clima y a crear empleos locales, de conformidad con el próximo informe *Renewable Energy Solutions for Cities of the Future* (Soluciones de energía renovable para las ciudades del futuro) de la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA) (Recuadro 1). Además, las maneras innovadoras para operar los sistemas eléctricos en las ciudades contribuirán a hacer realidad la transición energética basada en energías renovables, donde los operadores del sistema de distribución jugarán un papel vital. Por ejemplo, herramientas avanzadas de predicción del clima para la generación de electricidad solar y eólica pueden ayudar a integrar estos recursos renovables en los sistemas eléctricos actuales (IRENA, 2019a).

1 Tipo de cambio: 1,12 USD/1,0 EUR (Diciembre 2019)

Recuadro 1: **Soluciones de energía renovable para las ciudades del futuro**

El próximo informe de IRENA, *Renewable Energy Solutions for Cities of the Future* (Soluciones de energía renovable para ciudades del futuro), proporciona un análisis de los papeles de las ciudades y las herramientas de políticas en el apoyo a la implantación de energías renovables en diferentes sectores que se centra en seis ciudades de tamaño mediano en China, Costa Rica y Uganda. Estos casos de estudio examinan las mejores prácticas en contextos socioeconómicos y administrativos ampliamente diferentes.

Cada caso de estudio describe las políticas a nivel nacional que enmarcan la implementación de energía renovable a nivel local, analiza las iniciativas emprendidas a nivel municipal y ofrece un resumen de las principales lecciones aprendidas y consideraciones para tomar soluciones a escala. También sintetizan los principales mensajes clave para los responsables políticos, tanto a nivel local como nacional, para ayudar a empoderar a las ciudades en su esfuerzo por contribuir a un futuro energético sostenible.

El análisis de las políticas resume los factores principales y los enfoques sectoriales para implantar energías renovables en las ciudades. Para ser exitosos, los planeadores y administradores de las ciudades necesitan una variedad de habilidades y capacidades para producir o comprar fuentes de energías renovables para integrarlas en los sistemas energéticos urbanos, como en construcciones y el sector del transporte, para mejorar la eficiencia energética y ampliar la electrificación; y para adoptar herramientas y normatividad adecuadas de planeación urbana.

Fuente: IRENA (próximo a)

Para alcanzar dicho potencial, hoy se requiere de la acción transformadora. Esta acción generará nuevas oportunidades y permitirá soluciones innovadoras para abordar desafíos energéticos urbanos. Conforme las ciudades se esfuerzan por desarrollar estrategias eficaces de infraestructura energética resiliente y respetuosa con el clima, así como planes de acción prospectivos y decisiones de inversión para el futuro, necesitarán mejorar su conocimiento sobre los recursos de energía renovable disponibles localmente y las diversas aplicaciones de las tecnologías de energías renovables urbanas, y participar en la planificación adecuada de la infraestructura energética en red utilizando una combinación energética con bajas emisiones de carbono.

1.2 Cómo comprender los sistemas energéticos urbanos

Los sistemas energéticos urbanos funcionan de manera similar a cualquier otro sistema de suministro energético, en los que la red de distribución y los sistemas de gestión energética proporcionan una variedad de servicios para satisfacer la demanda de los consumidores de energía. Sin embargo, los sistemas energéticos urbanos son únicos debido a la intensa actividad económica y social, las innovaciones en tecnologías y los modelos comerciales y los impactos ambientales directos en las ciudades. Dependiendo de la perspectiva que se tome, un sistema energético urbano se puede considerar como un sistema termodinámico, metabólico o complejo (Keirstead and Shad, 2013). Dichos sistemas se pueden analizar y comprender de muchas maneras.

Una de las características especiales de un sistema energético urbano es que sirve como una interfaz sociotécnica que conecta al sistema energético físico con sus usuarios finales, es decir, los residentes urbanos. Por lo tanto, el comportamiento del consumidor importa más que solo el sistema energético.

Este es el caso particularmente conforme surjan tecnologías revolucionarias que cambien la relación entre los productores y consumidores de los sistemas energéticos. Las innovaciones tecnológicas clave incluyen sistemas de energía FV solar en el techo con almacenamiento en baterías, medición neta de electricidad, gestión inteligente de energía, aparatos altamente eficientes, el Internet de las cosas, inteligencia artificial impulsada por *big data* y tecnología de *blockchain*.

La creciente descentralización de la generación mediante fuentes de renovables y tecnologías digitales está transformando la dinámica entre el sistema de energía física, generalmente operado por servicios públicos, y los consumidores de energía. En otras palabras, se está borrando el límite entre la producción y el consumo de energía. Además, soluciones innovadoras que combinan nuevos modelos comerciales construidos sobre dichas tecnologías, junto con las nuevas regulaciones y prácticas de operación de los sistemas innovadores para las redes de distribución, han ofrecido a las ciudades una oportunidad única para revisar su relación con el sistema energético nacional, tanto a nivel técnico como institucional.

De la misma manera, la electrificación de las aplicaciones de uso final es fundamental para la transformación energética urbana exitosa. El uso creciente de tecnologías de acoplamiento sectorial, como las bombas de calor, VE equipados con sistemas de carga inteligente que respaldan la operación de las redes de distribución de energía, así como las diversas tecnologías de almacenamiento energético, han facilitado enormemente la integración al sistema eléctrico de fuentes de energías renovables variables (ERV), tales como la energía FV solar y la energía eólica (vea *Perspectiva de innovación: Carga inteligente para vehículos eléctricos* (IRENA, 2019b), resumido en el Recuadro 2).

Las innovaciones en los sistemas energéticos han contribuido a la noción de expansión y práctica del prosumidor, un actor que es a la vez consumidor y productor de energía, generalmente usando un sistema de energía FV solar para generar electricidad. Esto está desafiando la dinámica convencional entre productores y consumidores de energía.

En el modelo convencional, las actividades de los residentes urbanos generan demanda para los servicios energéticos, que los servicios públicos de energía proporcionan a través de una infraestructura energética compleja y centralizada, y a cambio, los consumidores pagan facturas. En contraste, la electricidad generada por el prosumidor (ya sea utilizada para autoconsumo o inyectada de nuevo a la red) podría cambiar drásticamente el papel tradicional de los responsables y requerirá que el régimen regulador reconcilie esta amplia gama de participantes en diseños futuros reguladores y de mercado (Brown *et al.*, 2019; Hall and Roelich, 2016; Sioshansi, 2019).

Además de los prosumidores, están surgiendo otros nuevos actores, tales como los agregadores, que agrupan varias fuentes energéticas distribuidas en una sola entidad (una central eléctrica virtual) para participar y comercializar en los mercados de electricidad o de servicios (IRENA, 2019c).

En el campo del suministro de calefacción, el cambio a las fuentes de renovables ha sido mucho menor que en el sector eléctrico, aunque ha tenido lugar hasta cierto grado el reemplazo del gas natural con colectores de sistemas termosolares y energía geotérmica de origen terrestre. Para las redes de calefacción urbana, el flujo de calor es principalmente unidireccional. Algunos experimentos, como *ectogrid™*, han probado el concepto de redes de baja temperatura, microtérmicas para equilibrar las fuentes residuales de energía de calefacción y refrigeración entre diferentes usuarios mediante bombas de calor descentralizadas, lo que exige menos entradas de energía para compensar las pérdidas. Se han demostrado tales sistemas en varias ciudades, principalmente en Suecia, los Países Bajos y el Reino Unido (RU).

Los sistemas energéticos urbanos generalmente no pueden operar de forma independiente del sistema nacional, ni tampoco tiene sentido económico que operen totalmente por sí mismos. Las relaciones entre los sistemas energéticos urbanos y nacionales se pueden examinar de diversas maneras. Sin embargo, la dinámica de transformar dichas relaciones ha cambiado a lo largo de la última década. Las ciudades se han vuelto gradualmente más conscientes de los impactos de la producción y consumo en una amplia gama de cuestiones urbanas, desde salud pública y medio ambiente a transporte, gestión de residuos y mercado laboral.

Institucionalmente, las ciudades necesitan ejercer la autoridad que poseen en gobernanza energética, particularmente conforme participan con la comunidad internacional en el desafío climático, a la vez que reconocen los beneficios conjuntos de mejorar el ambiente local e impulsar el bienestar social. A lo largo de la última década, un creciente número de ciudades ha buscado obtener un mayor control sobre sus sistemas energéticos, en particular promoviendo el uso de renovables. Según un análisis de IRENA, en 2019, alrededor de 671 ciudades habían establecido al menos un objetivo que favorecía el uso de renovables en sus jurisdicciones, y más del 60 % de estas ciudades habían establecido un objetivo para alcanzar el 100 % de energías renovables. Las iniciativas de desarrollo bajas en carbono relacionadas con las ciudades han aumentado tanto a nivel global como regional, gracias en gran parte a los esfuerzos de organizaciones internacionales enfocadas en las ciudades, como el Covenant of Majors for Climate & Energy (Pacto de Alcaldes por el Clima y la Energía), ICLEI - Gobiernos locales para la sostenibilidad y Ciudades C40 (vea el capítulo 2).

Además, una mejor comprensión de las opciones tecnológicas y la autoridad de planeación energética a nivel local es fundamental en el cambio de combustibles fósiles centralizados (grandes estaciones de energía eléctrica ubicadas fuera de los límites de la ciudad) a fuentes de renovables descentralizadas. Las fuentes de energía locales incentivan a las ciudades a tomar responsabilidad en el sistema energético en su jurisdicción.

Recuadro 2: **Perspectiva de innovación: carga inteligente para vehículos eléctricos**

El documento de IRENA *Innovation outlook: Smart charging for electric vehicles* (carga inteligente para vehículos eléctricos) muestra que las reducciones estables en los costos de la generación de electricidad renovable están haciendo que la electricidad sea una fuente de energía de bajo costo atractiva para alimentar al sector del transporte. Aumentar la implantación de vehículos eléctricos también representa una oportunidad para el desarrollo del sistema eléctrico, con el potencial de agregar una flexibilidad muy necesaria en sistemas de electricidad y apoyar la integración de altas participaciones de energías renovables. Sin embargo, lograr el mejor uso de VE requiere ver de cerca qué casos de uso se alinearían mejor tanto para el sector de transporte como el de electricidad. De manera óptima, los VE impulsados por energías renovables pueden generar amplios beneficios para la red sin repercutir de forma negativa en la funcionalidad del transporte. Para ello, la carga inteligente y la infraestructura de ésta son claves, al proporcionar una interfaz inteligente que permita ciclos de carga que sean más adaptables tanto a las condiciones del sistema eléctrico como a las necesidades de los usuarios de los vehículos.

Entre otros aspectos, la perspectiva de innovación de IRENA trata sobre el impacto potencial de la carga de VE en los sistemas de distribución de energía eléctrica en las ciudades y exhibe cómo la carga inteligente podría reducir los costos asociados con el refuerzo de las redes eléctricas locales. El informe también destaca la capacidad de la carga inteligente de VE de facilitar la integración de recursos de ERV, incluido en las ciudades y sus alrededores. En la discusión se explora además el impacto posible de otras tecnologías perturbadoras que podrían transformar potencialmente el transporte urbano, tales como vehículos autónomos y la movilidad como un servicio.

Fuente: IRENA, 2019b

Esto puede ayudar a que las ciudades desarrollen estrategias energéticas urbanas sólidas, así como planes de inversión y esquemas de financiamiento. Estos pueden incluir la firma de contratos de compra de electricidad y la adopción de bonos verdes para la infraestructura energética que está crecientemente interconectada con otros sistemas urbanos, tales como las redes de transporte, los sistemas de gestión de residuos y las instalaciones de suministro de agua y tratamiento de aguas residuales.

Los procesos de estrategia y planeación para la energía descentralizada interactuarán inevitablemente con la planeación urbana en general. En última instancia, el consumo energético (y la producción, en el caso de los prosumidores) en sectores de uso final tales como los de construcción, transporte e industria están muy influenciados por cómo está planeada y concebida la ciudad para los objetivos de desarrollo a plazo inmediato y a largo plazo.

1.3 Papel de las energías renovables en la transformación energética global en la ciudad

El panorama energético global está pasando por un cambio fundamental impulsado por el rápido crecimiento del uso de renovables gracias a las reducciones dramáticas en los costos de tecnologías y sistemas, en particular para la energía FV solar y la potencia eólica en tierra.

Los impulsores clave incluyen la digitalización del sector eléctrico, el aumento en las fuentes de energía descentralizadas y la electrificación de los sectores de uso final (la mayoría de los cuales actualmente dependen de fuentes de energía fósil). La innovación en tecnologías descentralizadas de generación de electricidad aviva aún más este cambio.

Además de la innovación sistémica impulsada por la tecnología para facilitar las tecnologías, combinado con modelos de negocios innovadores, nuevas estructuras y regulaciones de mercado y nuevas maneras de operar los sistemas de distribución de electricidad, todos los cuales están transformando la manera en que se produce, transporta, distribuye y consume la energía.

Desde 2009, los costos promedio de los sistemas solares FV han caído 80 %, mientras que los costos de las tecnologías de almacenamiento en baterías se han reducido rápidamente y podrían reducirse un 60 % más a lo largo de la siguiente década. En general, IRENA proyecta que las reducciones de costos continuarán en los años por venir y que todas las tecnologías de generación de renovables disponibles comercialmente hoy en día competirán con los combustibles convencionales (IRENA, 2020a).

Esto es de gran relevancia para las ciudades y proporciona un gran ímpetu para la implementación de energías renovables en la ciudad, ya que muchas de estas tecnologías revolucionarias están permitiendo aumentar la escala de un sistema energético descentralizado basado en renovables. Esto contribuye a que las ciudades mitiguen sus emisiones de CO₂ relacionadas con la energía, que en su mayor parte se derivan de los sectores de la construcción, el transporte y la industria. Por otra parte, las ciudades se beneficiarán enormemente del impacto positivo que tiene el desarrollo de energías renovables locales en el PIB y en el empleo.

Según la *Perspectiva global de energías renovables* de IRENA, el PIB local será 2,4 % superior en 2050 en el Escenario energético transformador, caracterizado por una adopción acelerada de renovables, que en el Escenario energético planeado, y los empleos en energías renovables alcanzarán los 42 millones, de unos 11 millones hoy en día (IRENA, 2020b). Estas cifras subrayan el papel clave que las renovables tienen en la transformación energética global en la ciudad.

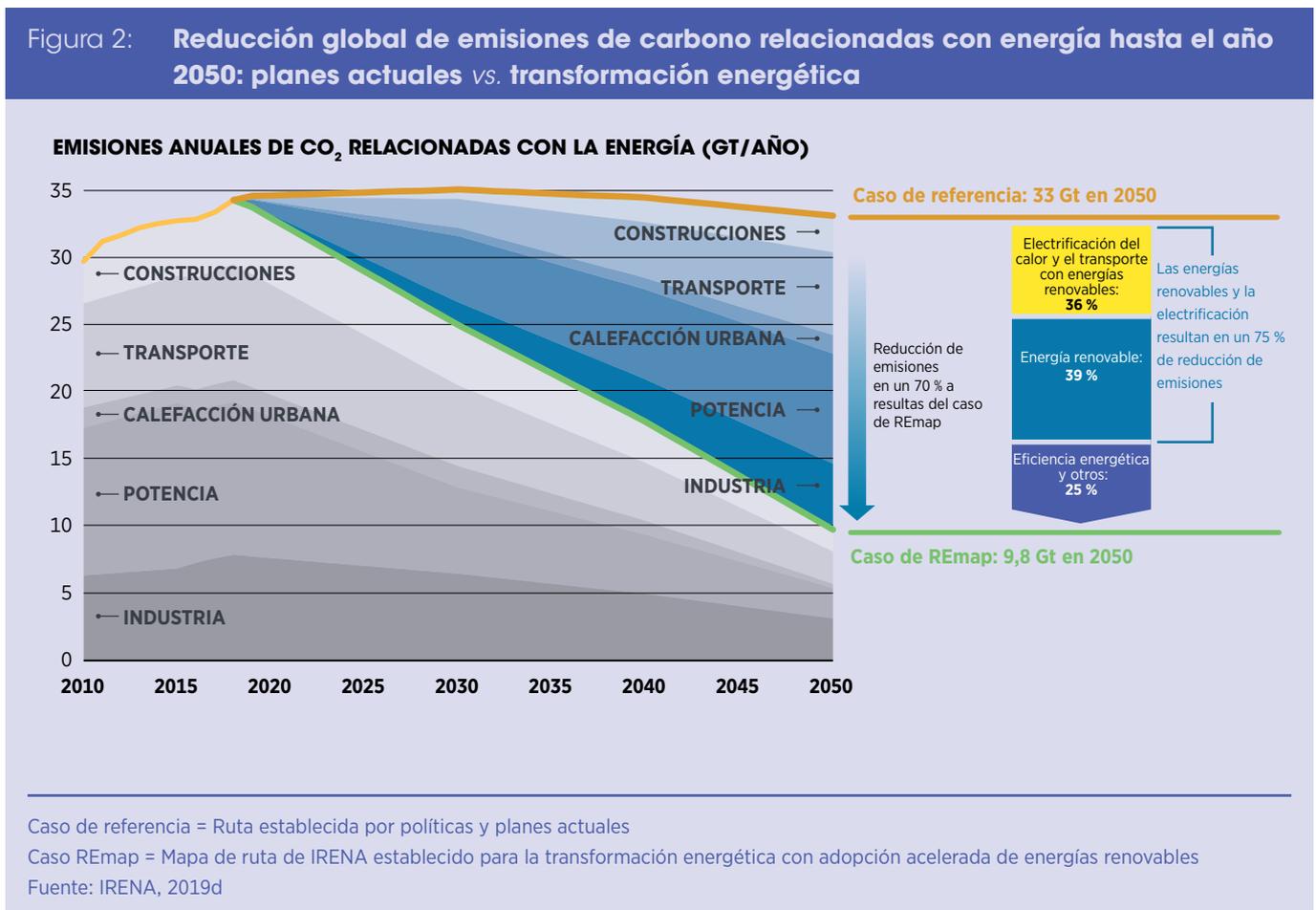
Para facilitar que dichos escenarios se materialicen, se debe reconocer el potencial para que las renovables alcancen cortes profundos en las emisiones relacionadas con la energía en cada sector. Las energías renovables actualmente representan tan solo el 20 % del uso de energías urbanas, con alrededor de dos tercios de esto en el sector de construcciones y un tercero en transporte (IRENA, 2016).

Sin embargo, como se muestra en la figura 2, las energías renovables y la electrificación pueden contribuir potencialmente con la reducción del 75 % en emisiones de carbono relacionadas con energía que se necesita (en comparación con el caso de referencia)

para el 2050 para mantener la elevación global de la temperatura bien por debajo de los 2 °C. El potencial para sustituir los combustibles fósiles en los sectores de uso final de construcción, transporte e industria, así como en la calefacción urbana, representa la mayor tajada de las reducciones (IRENA, 2019d).

Las fuentes de renovables disponibles localmente también se pueden usar para descarbonizar los sistemas energéticos urbanos en varios sectores, al integrarlos en sistemas de electricidad descentralizados a menor escala, incluidas las mini, micro y nanorredes².

2 La nanorred se define en Burmester et al. (2017).



1.4 Acerca de este informe: Objetivo, alcance y estructura

El objetivo de este informe es proporcionar conocimiento fundamental sobre los potenciales de energías renovables en la ciudad, opciones tecnológicas para las ciudades y planeación de los sistemas energéticos urbanos para permitir que los planeadores energéticos urbanos, los responsables de la toma de decisiones municipales y sus asesores persigan la transformación energética estratégica a nivel urbano. Los desarrolladores de tecnología y proyectos de energías renovables, profesionales e inversionistas de instituciones financieras, entre otras partes interesadas, también podrán encontrar útiles ciertas secciones.

En este informe se pretende contribuir a la discusión relacionada con las siguientes dos preguntas:

1. *¿Qué conocimiento sería útil para permitir que las ciudades maximicen el uso de sus recursos de energías renovables locales, si las barreras no técnicas se eliminaran totalmente y cuando esto suceda?* A través de revisiones de la literatura y discusiones con expertos y algunos profesionales de energías locales, se han identificado tres áreas como las más relevantes en la evaluación de opciones de energías renovables en las ciudades: recursos de renovables disponibles localmente, tecnologías de renovables aplicables para el entorno construido y herramientas de planeación para sistemas energéticos urbanos.

El análisis abarca la generación de energía descentralizada a partir de recursos de energías renovables disponibles localmente, cubriendo el mapeo de recursos relacionado con objetivos e iniciativas relacionados con renovables, tecnologías de renovables aplicables en las ciudades y sus alrededores y herramientas de modelado para la planeación del sistema de renovables, un proceso

importante para integrar energías renovables locales en el desarrollo de infraestructuras futuras de energía urbana.

La lógica es que las ciudades se beneficiarán de realizar sus propias evaluaciones de los recursos de energía renovable locales y cómo estos se pueden utilizar mejor antes de considerar “importaciones” de energía de fuera de los límites de la ciudad. Las evaluaciones exhaustivas anticipadas pueden ayudar a las ciudades a tomar decisiones bien informadas y vanguardistas.

Este enfoque en los recursos disponibles localmente de ninguna manera reduce la importancia de las importaciones de electricidad renovable (mediante líneas de transmisión) de áreas fuera de los límites de una ciudad. La interacción entre las redes eléctricas locales y nacionales es instrumental para facilitar que tanto los recursos de energía renovable locales y remotos se usen en las maneras más eficientes posibles, siempre que las operaciones de las redes y la capacidad de transmisión lo permita.

2. *¿Cómo la mejora del conocimiento técnico a los niveles local/subnacional ayudaría a que las ciudades establezcan objetivos realistas y alcanzables y configuren y desarrollen políticas y estrategias de energía local bien informadas y vanguardistas?* Como resultado del Acuerdo de París, las ciudades han recibido un papel mucho más importante para abordar el cambio climático global y están dispuestas a identificar oportunidades para transformar sus sistemas energéticos hacia un futuro con energías bajas en carbono o con cero carbono, capitalizando a la vez las oportunidades para el desarrollo social y económico mediante el desarrollo de energías renovables locales. Más y más ciudades están intentando ganar cierto control sobre su suministro energético a nivel local.

Con el conocimiento técnico mejorado, las ciudades pueden establecer objetivos de políticas realistas y equilibrados y tomar medidas viables para alcanzar estos objetivos, particularmente las opciones de costos de oportunidad de usar renovables locales comparado con la importación de energías renovables desde el exterior de los límites de la ciudad.

El alcance de este informe está limitado a los frentes tecnológicos y técnicos del régimen energético urbano; los análisis no cubren las políticas, la legislación, las regulaciones y los esquemas de incentivos financieros y económicos, aunque se reconoce su importancia en el informe.

Si bien el informe puede ser de gran valor para las ciudades que están considerando si han de aprovechar sus recursos locales de energía renovable, también puede apoyar a los líderes en esta área al ampliar su horizonte y profundizar su comprensión de la transformación energética urbana.

Otro objetivo de este informe es reducir la brecha de comunicación entre los líderes y los recién llegados mediante un intercambio de conocimiento y debates que inviten a la reflexión.

En general, el informe afirma que, para desarrollar opciones de energías renovables locales e integrarlas en un sistema de energías urbanas, una ciudad necesita: evaluar la disponibilidad de recursos de energía renovable disponibles localmente; comprender la pertinencia de diversas tecnologías de renovables para la implementación en ciudades y alrededor de ellas; establecer preferiblemente un objetivo realista y bien fundamentado de apoyo al desarrollo local de energías renovables; y ampliar el conocimiento sobre las herramientas de modelado que pueden usarse para desarrollar planes de sistemas energéticos urbanos.

Estos de ninguna manera son los únicos elementos clave necesarios para que una ciudad transforme sus sistemas energéticos para un futuro con emisiones de carbono bajas o nulas, dada la diversidad de ciudades por todo el mundo.



Sin embargo, sin estos elementos, una ciudad podría enfrenar desafíos para maximizar el uso de recursos de energía renovable locales, que es necesario como el primer paso hacia la descarbonización de la combinación energética.

La estructura de este informe es la siguiente (vea también la figura 3):

El capítulo 1 sirve como una introducción que presenta el contexto para el análisis y destaca el papel de las ciudades en la transformación energética global.

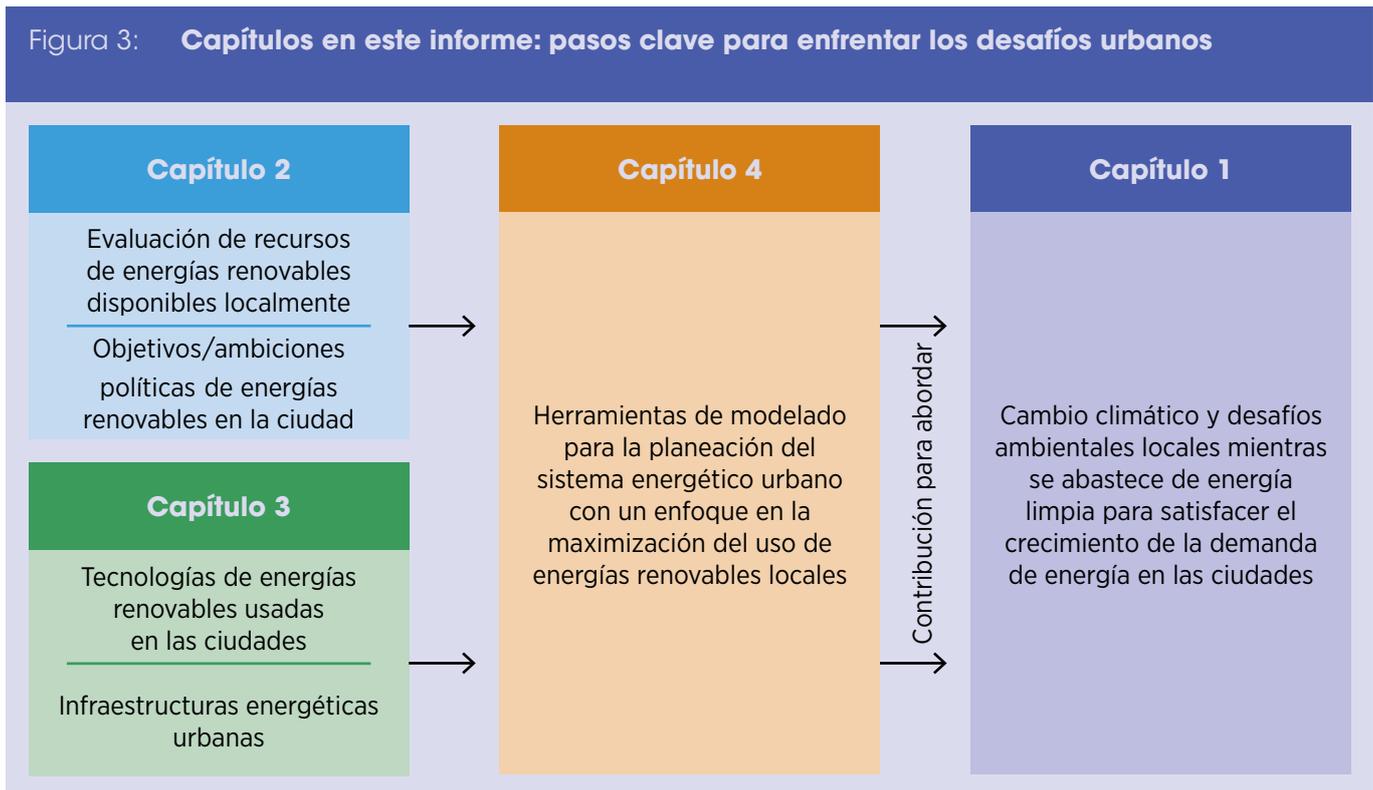
En el capítulo 2 se revelan las oportunidades potenciales para explotar los recursos energéticos renovables en las ciudades y sus alrededores, mediante el análisis de los objetivos que las ciudades han establecido en apoyo a las energías renovables, los recursos de energía renovable y las plantas eléctricas locales existentes; y las instalaciones actuales basadas en combustibles fósiles ubicadas cerca de las ciudades que potencialmente podrían ser reemplazadas por opciones alternas de energía. La evaluación de recursos de energía renovable locales en este capítulo podría ayudar a una ciudad a establecer un objetivo razonable relacionado con energías renovables, si es que aún no lo ha hecho.

En el capítulo 3 se discuten las tecnologías de conversión clave para los recursos de energías renovables urbanas, y

comprende la energía FV solar, termosolar, eólica urbana, el uso directo de energía geotérmica, bioenergía y conversión de residuos en energía. Asimismo, se abordan las redes inteligentes y las estrategias de respuesta de la demanda, así como redes de energía urbana.

En el capítulo 4 se proporciona a los profesionales y planeadores de energía locales conocimiento básico de las diversas herramientas de modelado que pueden usarse para la planeación de sistemas energéticos urbanos, así como las oportunidades y limitaciones. Específicamente, se analizan y se exploran las diferentes herramientas adecuadas para maximizar el uso de energías renovables locales. Se dispone de una amplia gama de herramientas para una variedad de aplicaciones, desde la determinación de la viabilidad de soluciones de energía renovable en las etapas tempranas de planeación a un posterior diseño del sistema (p. ej., determinación del tamaño y operación) y el desarrollo de una estrategia municipal a largo plazo de energías renovables.

El capítulo se enfoca en comprender cómo estas herramientas tratan a las opciones de energía renovable. También se exploran los desafíos en materia de datos y temas clave relacionados con la planeación en los países en desarrollo, entre otros aspectos importantes.





2.

**OPORTUNIDADES POSIBLES
PARA ENERGÍAS RENOVABLES
URBANAS**

2. Oportunidades posibles para energías renovables urbanas

En este capítulo se destacan las oportunidades para la adopción acelerada de energías renovables en la ciudad. Entre los puntos clave que las ciudades deben considerar, se encuentran:

- Un número creciente de ciudades tiene objetivos de energía renovable establecidos, pero más del 80 % de estos objetivos están en Europa y en América del Norte. Esta desigualdad geográfica de los objetivos podría ser un problema para contribuir a alcanzar, en la ciudad, el objetivo climático global establecido en virtud del Acuerdo de París, siendo que se proyecta que Asia y África experimenten el crecimiento más rápido tanto en sus poblaciones urbanas como en demanda de energía.
- Las ciudades con objetivos de energía renovable recaen más comúnmente en el rango de población de 100 000 a 500 000 habitantes. La mayoría de las grandes y mega ciudades que han establecido objetivos de energía renovable han aprovechado solo una modesta participación de energías renovables en su combinación energética.
- La mayoría de las ciudades con objetivos de energía renovable (551 de 671 ciudades o el 82 % del total) se ubican en países con un alto PIB per cápita, lo que revela una clara correlación actual entre las ciudades que tienen objetivos de energías renovables y su estado económico.
- La energía hidroeléctrica, la bioenergía y la conversión de residuos en energía ya juegan un papel evidente en ayudar a las ciudades a alcanzar sus objetivos de energías renovables y a descarbonizar la combinación energética. Está aumentando el uso de energía solar y geotérmica en las ciudades, aunque un gran potencial permanece sin explotar, mientras que la capacidad para aprovechar la potencia eólica en las ciudades está progresando pero sigue siendo marginal. En algunas ciudades, las zonas periurbanas ofrecen sitios potenciales para la generación de energía renovable.

2.1 Mapeo global de los objetivos de energías renovables en la ciudad

En general, establecer un objetivo ambicioso pero alcanzable indica el nivel del compromiso político que ha hecho un gobierno u organización y es un componente importante en el proceso de formular políticas públicas (Marsden and Bonsall, 2006; Hepburn, 2006). A lo largo de la última década y media, los objetivos de energías renovables a nivel nacional han servido como un facilitador fundamental para acelerar la implementación de energías renovables, al proporcionar señales políticas a largo plazo y dirección de políticas a todas las partes interesadas participantes, en particular fabricantes, inversionistas y desarrolladores de proyectos (IRENA, 2015a).

Los objetivos de energía renovable en la ciudad pueden, en principio, funcionar de manera similar, aún cuando, en la mayoría de los países, con frecuencia las ciudades tienen una autoridad de gobernanza limitada sobre la energía dadas sus interconexiones con los sistemas energéticos.

Durante la última década, ha aumentado más de seis veces el número de ciudades que han establecido objetivos para apoyar las energías renovables, pasando de menos de 100 ciudades en el 2010 a 671 ciudades repartidas en 70 países en el 2019. En total, las ciudades han establecido alrededor de 1000 objetivos relacionados con energías renovables de todos los tipos³, y algunas ciudades tienen más de un objetivo. La mayoría de estas ciudades están en Europa y América del Norte, mientras que en Asia y África hay retraso en el establecimiento de objetivos.

En general, las ciudades pequeñas y medianas han sido las más comprometidas, aunque algunas megaciudades han sido las líderes en la transformación energética urbana.

³ Esto incluye objetivos de energía renovables en la ciudad, municipio y comunidad, así como a nivel sectorial y específico de las tecnologías, los cuales se establecen en términos absolutos o relativos; excluye los objetivos establecidos para la reducción de las emisiones de carbono, mejoras en la eficiencia energética y objetivos de electrificación (aunque estos pueden impactar de manera indirecta en el desarrollo de energías renovables).

Las iniciativas globales y regionales que incluyen ciudades que están desarrollando soluciones con bajas emisiones de carbono han interactuado de manera positiva con el establecimiento del objetivo local de energías renovables mediante el intercambio eficaz de información y recursos y la presión social relacionada con el establecimiento de objetivos y el uso de renovables.

Sin embargo, un objetivo dedicado no es el único instrumento para aumentar el uso de energías renovables, ni los objetivos de energía renovable son el único indicador para seguir el progreso.

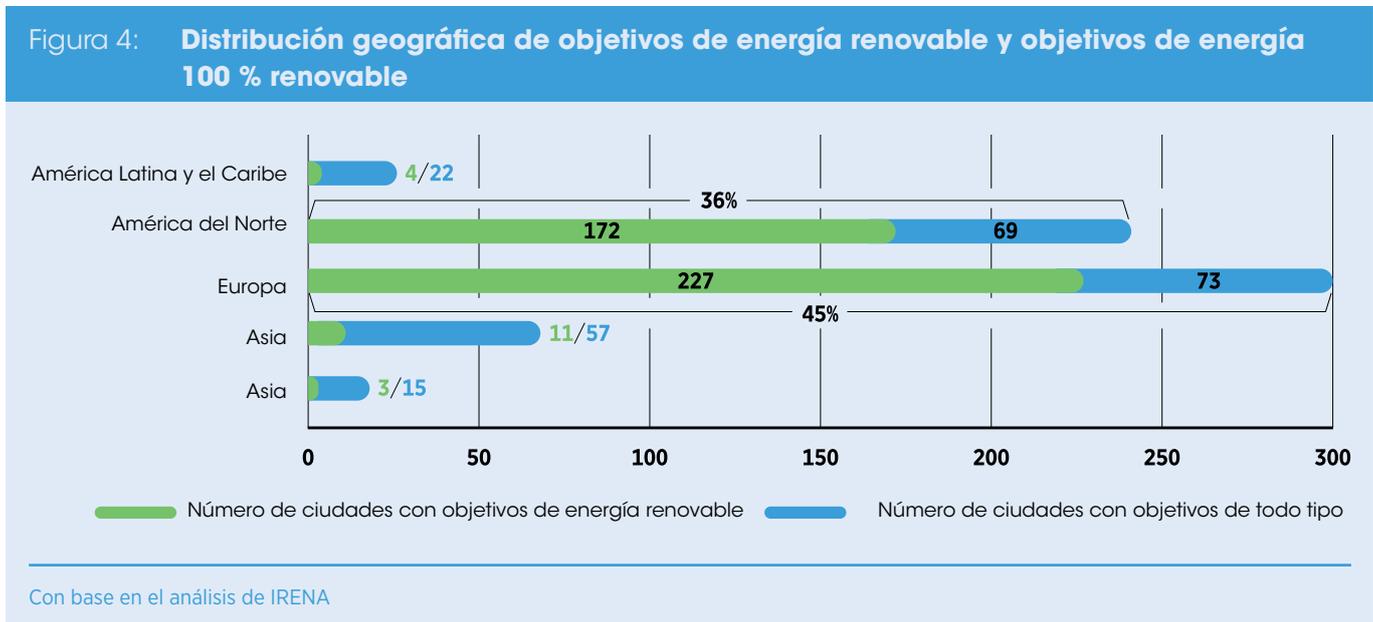
Incluso sin objetivos, las aplicaciones de energías renovables se han ampliado enormemente en la última década, gracias a rápidas reducciones de costos en los paneles solares FV y en los sistemas de almacenamiento en baterías, lo que ayuda a satisfacer la creciente demanda para la electrificación urbana y, especialmente, la rural.

Un creciente número de ciudades ha establecido objetivos de energías renovables, pero estas se concentran en Europa y América del Norte, áreas que tienen una riqueza económica superior y climas de templados a fríos.

Las ciudades que establecen objetivos para energías renovables se ubican principalmente en las regiones más ricas con climas más fríos.

De las 671 ciudades con objetivos analizados en este informe⁴, 45% está en Europa y 36% en América del Norte. El perfil geográfico es similar para el subconjunto de 428 ciudades que tienen objetivos de energía 100% renovable, tal como se muestra en la figura 4.

⁴ Se recopiló una base de datos de los objetivos de energía renovable de las ciudades usando datos de CDP (objetivos de energía renovable de las ciudades de 2015 a 2018) (CDP, 2019a) REN21 (REN21, 2019a), el Registro del Clima del Carbono (Carbon Center, 2019), la Global 100% RE Platform (100% Renewables, 2019), Alcaldes del Clima de EE. UU. (Climate Mayors, 2018), la Conferencia de Alcaldes de los EE. UU. (US Conference of Mayors, 2020), el Sierra Club (Sierra Club, 2019), UK100 (UK100, 2019) y el Atlas de energías 100% renovables (100% Renewable Energy Atlas, 2019a). Esta base de datos no es exhaustiva y no incluye los objetivos de energía de todas las ciudades.

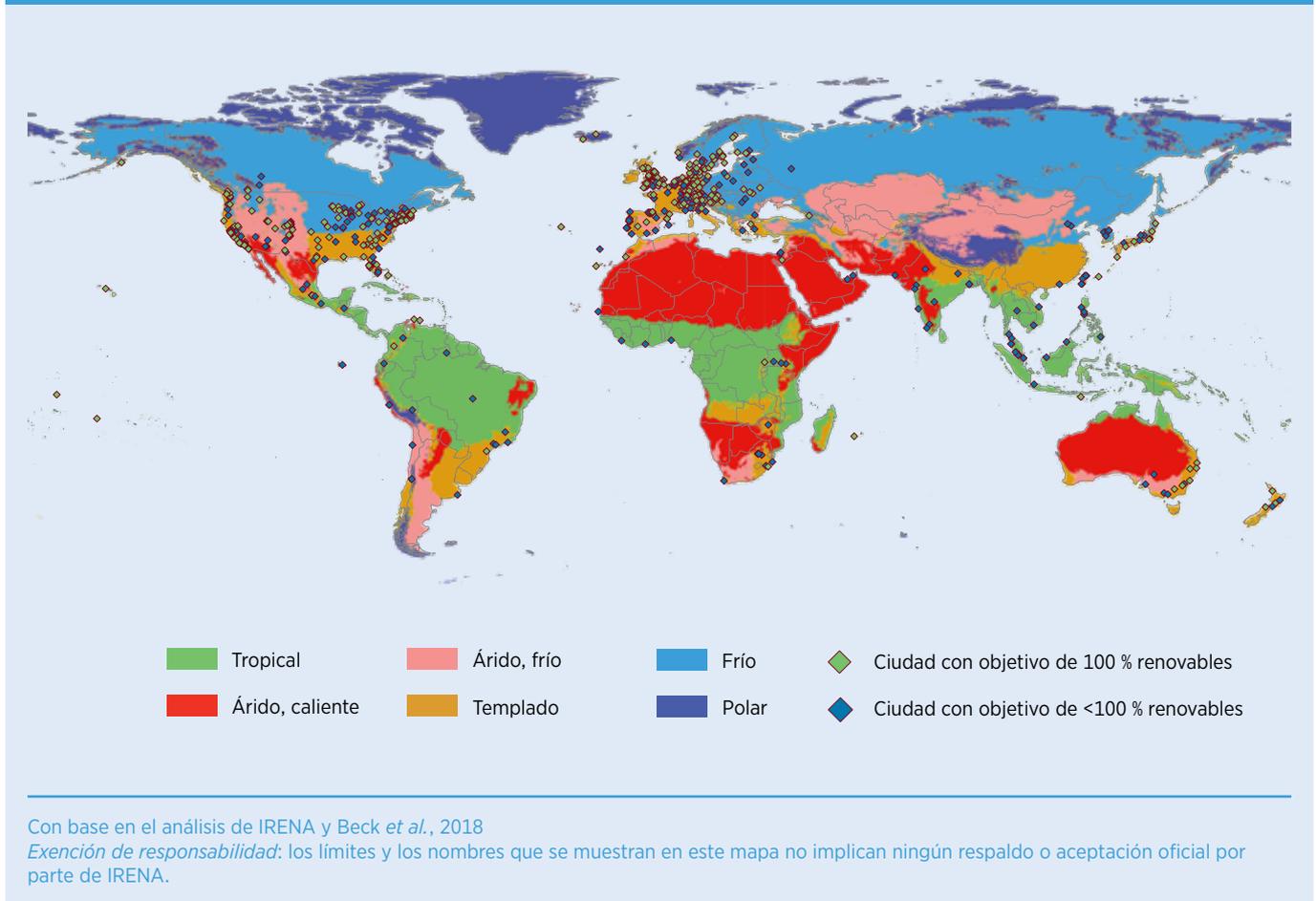


El hecho de que más del 80 % de las ciudades que tienen objetivos de energías renovables estén en Europa y América del Norte, regiones que generalmente tienen zonas de clima templado o frío (figura 5) tiene un impacto marcado sobre la demanda de energía y sobre los tipos de servicios energéticos necesarios, en particular la calefacción en el invierno. De los 980 objetivos relacionados con energías renovables (de todos los tipos) evaluados, solo alrededor de 50 son objetivos específicos de calefacción⁵, es decir menos del 5 % del total.

En comparación, 389 objetivos (40 % del total) están dirigidos a la generación de electricidad renovable. Sin embargo, el 55 % restante de los objetivos para todas las energías renovables también cubren la calefacción, lo que refleja la tendencia de electrificación en los sectores de uso final (incluida la calefacción), que se está beneficiando del rápido aumento en la generación de energía FV solar y eólica gracias a las reducciones dramáticas de costos en estas tecnologías en la última década.

⁵ Esto incluye 49 objetivos únicamente dedicados a la calefacción y 6 objetivos que comprenden la electricidad combinada ya sea con calefacción o transporte.

Figura 5: Mapeo global de las ciudades objetivo de energías renovables y zonas climáticas



El análisis de los objetivos también revela una correlación entre las ciudades que tienen objetivos de energía renovable y el estado económico general de la ciudad. La mayoría de las ciudades que tienen objetivos de energía renovable (551 de 671 ciudades, o el 82 % del total) se encuentran en 30 países con el PIB per cápita más alto, con base en la categorización del Fondo Monetario Internacional, (IMF, 2019).

Mientras tanto, diez países con el PIB per cápita más alto (Luxemburgo, Suiza, Noruega, Irlanda, Qatar, Islandia, Estados Unidos (EE. UU.), Singapur, Dinamarca y Australia) son el hogar de alrededor del 40 % de las ciudades con objetivos de energías renovables. Este es un marcado contraste comparado con los 30 países con el PIB per cápita más bajo, los cuales solo tienen cuatro ciudades con objetivos.

Mirando al futuro, el uso de fuentes de energía renovable debe ampliarse en forma masiva en ciudades nuevas o que se estén extendiendo rápidamente en países en desarrollo. Asia y África son importantes en este aspecto, dado que se proyecta que experimenten el crecimiento más rápido, tanto en sus poblaciones urbanas como en su demanda de energía. Las energías renovables pueden facilitar que los países en desarrollo eviten “encerrarse” en la trampa de los combustibles fósiles. Los objetivos de energía renovable establecidos en la ciudad, junto con otros instrumentos normativos, pueden ser útiles para proporcionar una señal política y cierto indicio de coherencia política a inversionistas y desarrolladores de proyectos potenciales para el desarrollo de energías renovables urbanas.

Las regiones con una creciente demanda de energía mantienen un gran potencial de recursos, sin embargo, la mayoría carece de objetivos de energía renovable.

Asia y África se están quedando atrás en el establecimiento de objetivos de energías renovables.

De acuerdo con la ONU, se espera que 2500 millones de personas más se conviertan en residentes urbanos en las siguientes tres décadas, el 90 % de ellas en Asia y en África: en total, se proyecta que dos terceras partes de la población mundial vivan en áreas urbanas para el 2050 (ONU DAES, 2015; ONU DAES, 2016).

África se ha estado urbanizando constantemente durante las últimas tres décadas. En 2015, el 43 % de la población de la región vivía en ciudades, un incremento del 12 % del nivel de 1990 (CEPA, 2017). Según la ONU, se espera que la tendencia de la urbanización se acelere a una tasa de entre el 2,7 % y el 3,6 % a partir de ahora hasta el 2050 (ONU DAES, 2018). Esto agregaría alrededor de mil millones de residentes urbanos en África para el año 2050, lo que representa el 40 % del incremento global en el mismo periodo.

Al igual que en países en desarrollo más avanzados, la urbanización en África ha sido impulsada principalmente por el crecimiento económico general, una productividad mejorada en el sector agrícola, la industrialización y la inversión creciente en la infraestructura urbana (Cilliers *et al.*, 2011). Todos estos impulsores tienen implicaciones para la producción y el consumo de energía. Tal como se reconoce ampliamente, el progreso económico no puede sostenerse sin un suministro confiable de energía y su infraestructura subyacente.

África continúa siendo el hogar de casi 600 millones de personas sin acceso a electricidad. La urbanización en las regiones menos desarrolladas del continente está grandemente impulsada por el crecimiento de la población y por el deseo de buscar oportunidades para una vida mejor en las ciudades. No obstante, incluso en áreas urbanas de África, el 60 % de los habitantes viven en barrios bajos con acceso limitado a la electricidad, combustibles limpios para cocinar y oportunidades de trabajo (Brookings, 2020).

Los recursos de energía renovable son abundantes en la región, con potenciales de recursos estimados que exceden los 10 teravatios de energía solar, 110 gigavatios (GW) de energía eólica, 100 GW de energía hidroeléctrica, 15 GW de energía geotérmica y una gran cantidad de biomasa que incluye residuos orgánicos municipales (Holt, 2018; IRENA, 2015b).

La energía hidroeléctrica sigue siendo importante en la mayor parte de África y en la mayoría de los países, la energía eólica y solar presentan un excelente potencial. Muchos países africanos tienen dotaciones de irradiación solar por encima de los 2200 kilovatios-hora por metro cuadrado (kWh/m²) por año, el doble de la de Alemania. En contraste, los recursos geotérmicos para la generación de electricidad están ampliamente limitados en África Oriental y el potencial más alto para la producción de biocombustible se encuentra en el África subsahariana (IRENA, 2015c).

En este contexto, la manera en que los países africanos reconcilian su explotación de los recursos de energías renovables con el desarrollo de ciudades sostenibles tiene implicaciones profundas para el desarrollo económico y social sostenible de la región.

Incluso cuando solo 18 ciudades africanas tienen objetivos de energía renovable, hasta 225 ciudades africanas (202 en África Subsahariana y 23 en África del Norte) se habían comprometido a la reducción de gases de invernadero a través del Pacto Global de Alcaldes para el Clima y la Energía en 2018 (Covenant of Mayors for Climate & Energy, 2020). La energía renovable ofrece opciones prometedoras para que los países africanos satisfagan su demanda de energía creciente, reduzcan sus huellas de carbono y ganen beneficios conjuntos, tales como una mejor calidad de aire (incluso en interiores), salud pública mejorada y una mayor resiliencia a los eventos extremos del clima, como tormentas, inundaciones e incendios sin control.

Comparados con los países desarrollados, los países africanos están mejor posicionados para permitirse tal salto tecnológico porque no están atrapados en una infraestructura energética existente, y los costos serían mucho más bajos. Se necesita establecer y comprender mejor el vínculo entre la reducción de los gases de invernadero y el uso de energías renovables, en particular entre los responsables de la toma de decisiones locales y sus asesores.

A la larga, cualquier prosperidad alcanzada en África puede no mantenerse sin un sistema energético sostenible. Si las ciudades aspiran a desarrollar sistemas energéticos sostenibles y resilientes al clima, se debe otorgar un papel central a las energías renovables.

En **Asia**, la población urbana ha aumentado rápidamente en los últimos 30 años, al pasar de 1040 millones en 1990 a 2270 millones en 2018. Se espera que alcance los 2800 millones para el 2030 y 3480 millones en el 2050. Si bien la tasa de urbanización proyectada para África para el 2050 (66,2 %) es inferior que el promedio global proyectado (68,4 %), el continente todavía representará más de la mitad de la población urbana global para dicho año (ONU DAES, 2019). Asia también es el hogar de las ciudades más grandes del mundo, que incluyen 20 de las 33 megaciudades globales, un número que se espera aumente a 27 (de 43 megaciudades) para el 2030 (ONU DAES, 2018).

La expansión de la población urbana de Asia está impulsada tanto por la globalización como por el crecimiento económico regional. La urbanización ha contribuido a sacar a mucha gente de la pobreza, aunque el número absoluto de residentes en los barrios bajos ha aumentado, destacando los problemas que surgen cuando las ciudades no están equipadas para lidiar con un rápido crecimiento de la población (ONU-Hábitat, 2010).

Las ciudades asiáticas siguen enfrentando muchos desafíos al desarrollo sostenible, que incluye su capacidad de proporcionar oportunidades económicas, desarrollar vivienda e infraestructura y gestionar la contaminación del aire y las altas emisiones de carbono (ONU CESPAP y ONU Hábitat, 2015; REN21, 2019b). El incremento en la población urbana también aumenta la demanda de energía. Muchas ciudades se enfrentan a escasez de energía (Dulal *et al.*, 2013), y los temas de seguridad energética serán más prevalentes conforme los países asiáticos pasen de exportadores a importadores de energías no renovables (Chang and Li, 2014).

Para reducir la dependencia de la energía importada, estos países se beneficiarían de una generación creciente de energía renovable local, lo que también contribuiría a reducir la contaminación de aire y las emisiones de carbono, a la vez que mejoraría el acceso a la energía en áreas más pobres (Vliet *et al.*, 2012).

Asia tiene un potencial de energía renovable rico pero en su mayoría inexplorado que varía por región, con una mayor concentración de energía solar y biomasa en el sur tropical, la eólica concentrada en el norte y la energía geotérmica abundante tanto para la generación de electricidad como para el uso directo. La energía hidroeléctrica está distribuida más uniformemente en Asia y es el recurso de energía renovable que ha sido más explotado, con una capacidad instalada total de 593 GW o 47 % de la capacidad hidroeléctrica global (IRENA, 2019e). Sin embargo, la energía hidroeléctrica tiende a prevalecer más en países montañosos como Nepal y Bután, mientras que países que están creciendo y urbanizándose rápidamente generalmente dependen más de combustibles fósiles (Dulal *et al.*, 2013).

El panorama de las políticas de energía renovable se está expandiendo lentamente, lo que es fundamental para permitir que las ciudades eviten quedarse atrapadas en vías de desarrollo de altas emisiones.

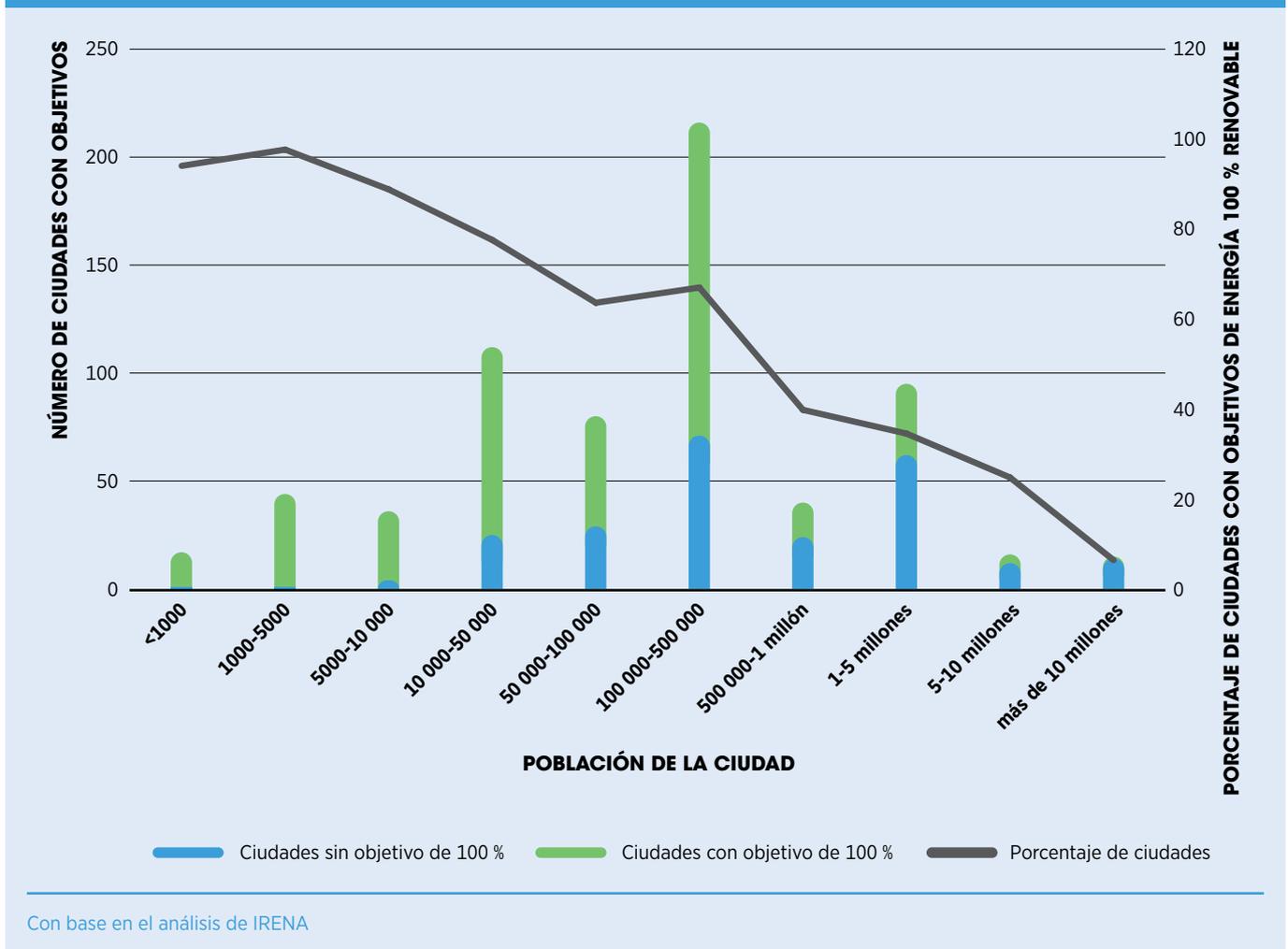
Actualmente Asia alberga 70 ciudades que tienen objetivos de energía renovable (10 % del total global), pero el nivel de ambición de estos objetivos tiende a ser bajo, con solo 11 ciudades (3 %) que aspiran a energías 100 % renovables. La Iniciativa de Desarrollo de las Ciudades para Asia (Cities Development Initiative for Asia) ayuda a que las ciudades alcancen sus objetivos al cerrar la brecha entre los planes de desarrollo de las ciudades y la implementación sostenible de proyectos de infraestructura (CDIA, 2020).

En general, tanto las ciudades existentes como futuras en Asia y África deben cambiar su paradigma de desarrollo de infraestructura urbana, en el que las energías renovables jueguen un papel fundamental con o sin objetivos específicos. Esto ayudará a reducir las huellas de carbono de las ciudades, en línea con el movimiento global hacia un futuro con emisiones de carbono limitadas y, más importante, permitirá que las ciudades mitiguen los impactos negativos del cambio climático global y local.

Población urbana y objetivos de energía renovable

En cierta medida, el establecimiento de los objetivos de energía renovable se correlaciona con el tamaño de la población urbana. De forma más común, las ciudades con objetivos de energía renovable recaen en el rango medio de población de 100 000 a 500 000 habitantes (figura 6). El análisis también revela que mientras más grande sea el tamaño de la ciudad, menor será la participación de los objetivos de energía 100 % renovable en comparación con el número total de objetivos. Esto es en parte debido a que las ciudades más grandes tienen una infraestructura existente extensa, lo que dificulta su descarbonización. Además, la mayoría de las ciudades más grandes del mundo se encuentran en países en desarrollo que tienen una penetración más baja de energías renovables; en 2018, solo 4 de las 33 megaciudades globales se ubicaban en Europa o en América del Norte (ONU DAES, 2018).

Figura 6: **Objetivos de las ciudades y población urbana**



La mayoría de las ciudades grandes o mega ciudades que a la fecha ya han adoptado objetivos de energías renovables han distribuido estas solo a un nivel modesto. Solo una megaciudad (Los Ángeles, con 10 millones de habitantes) tiene un objetivo de energía 100 % renovable, establecido para el 2045 (Sierra Club, 2019).

Otras megaciudades muestran niveles de ambición más bajos, al aspirar todas, menos dos (São Paulo y Shenzhen), a participaciones de energías renovables por debajo del 30 %. Solo 4 ciudades en el rango de población de 5 a 10 millones (Atlanta, Barcelona, Madrid y Toronto) y 33 ciudades en el rango de 1 a 5 millones tenían objetivos de energías 100 % renovables.

Existe una amplia variación regional en los tamaños de población de las ciudades con objetivos de energías renovables. En general, la tendencia hacia el establecimiento de objetivos en regiones nuevas la inician ciudades más grandes que tienen un flujo de información más rápido y comunicación social más activa, y entonces se difunde a ciudades más pequeñas que tienen la capacidad de establecer objetivos aún más ambiciosos. En las regiones desarrolladas como Europa y América del Norte, un gran número de ciudades tienen objetivos.

Esto contrasta tanto con África como con América Latina y el Caribe, que están en etapas de desarrollo más tempranas. Todas las ciudades africanas con objetivos tienen poblaciones superiores a los 100 000, mientras que todas las ciudades con objetivos en América Latina y el Caribe tiene poblaciones arriba de los 50 000, excepto Las Gaviotas, Colombia, una ecoaldea de 200 personas (Atlas de energías 100 % renovables, 2019b). En Oceanía y Asia, la mayoría de las ciudades con objetivos son ciudades más grandes, aunque algunas ciudades más pequeñas también han adoptado los objetivos de energías renovables.

Se ha identificado a la oportunidad económica como un impulsor clave para el establecimiento de objetivos (Martinez *et al.*, 2018; ICLEI, 2016; REN21, 2019a; REN21, ISEP e ICLEI, 2012). En general, las ciudades en Europa y América del Norte que se encuentran en el rango de población de 100 000 a 500 000 tienen economías diversas y bien establecidas, con el potencial de crecimiento continuo. La promoción de energías renovables en estas ciudades podría producir energía limpia para satisfacer la demanda energética urbana a la vez que se fomentan nuevos negocios y se crean oportunidades laborales locales.

Existen incluso mayores oportunidades en ciudades que todavía se están expandiendo. Aquí, la integración de los sistemas de energía renovable en la infraestructura urbana costaría menos debido a que habría menor necesidad de modernizar edificios y redes existentes. Establecer un objetivo para energías renovables en dichas ciudades alentaría a los gobiernos locales a desarrollar un plan de infraestructura energética urbana holístico y de largo plazo. De manera similar, aumentar la participación de energías renovables en ciudades planeadas o nuevas sería beneficioso para sus futuras reducciones de emisiones. Se proyecta que entre el año 2018 y el 2030, cada año surgirán alrededor de 18 ciudades más con poblaciones en el rango de 500 000 a 1 millón, o un total de 710 ciudades para el 2030 (de 598 en el 2018) (ONU DAES, 2018). Cómo brindar electricidad a estas ciudades o distritos nuevos con fuentes de energía sostenibles con emisiones bajas en carbono será un factor clave para determinar el éxito global en la lucha contra el cambio climático.

Iniciativas que respaldan el establecimiento de objetivos de energías renovables

Existen muchas iniciativas globales y regionales que involucran a las ciudades en el desarrollo con emisiones bajas en carbono y que los invita a adoptar objetivos y a conectar entre sí para un intercambio de información eficaz. Algunos de estos esfuerzos tienen metas y estrategias de seguimiento compartidas, mientras que otros permiten que las ciudades escojan sus propios objetivos. No obstante, facilitan el establecimiento de objetivos locales de energías renovables a través del intercambio de información eficaz, el intercambio de recursos y la presión social o la inspiración. El análisis indica que las ciudades que tienen un objetivo de energías renovables tienen tres veces más probabilidad que sus pares de actuar (C40 Cities, 2019).

Algunas de las iniciativas más grandes y ambiciosas que apoyan el establecimiento de objetivos se resumen a continuación:

- *Pacto de Alcaldes por el Clima y la Energía:* Aún cuando esta es la iniciativa más extendida, se dirige a las reducciones de emisiones más que al apoyo de las energías renovables en específico. En diciembre de 2019, 10 086 ciudades habían firmado el Pacto, acordando reducir sus emisiones de CO₂ en al menos 20 % para el 2020 o 40 % para el 2030 (en comparación con los niveles de 1990). Además, 6413 ciudades habían presentado planes de acción para alcanzar sus metas. La iniciativa comenzó en la Unión Europea (UE) pero ha crecido para incluir al Medio Oriente y partes de África (Covenant of Mayors for Climate & Energy, 2019). En un análisis de los 9120 firmantes hasta 2018 se encontró que su potencial combinado de reducción de emisiones era de 1440 millones de toneladas de equivalente de CO₂, (MtCO₂e) para el 2030 (Data Driven Yale *et al.*, 2018).
 - *Ciudades C40:* En diciembre de 2019, 94 ciudades, que representan el 25 % del PIB global y una doceava de la población mundial, habían aceptado la meta de alcanzar la neutralidad neta de carbono para el 2050 en el marco de la iniciativa C40. Las ciudades C40 deben desarrollar planes de acción climática antes del 2020 que sean coherentes con los objetivos del Acuerdo de París. Las 94 ciudades en red tienen más de 10 000 acciones planeadas (C40 Cities, 2019), muchas de las cuales incluyen la implementación de energías renovables, y el potencial de la reducción total de emisiones es de 820 MtCO₂e para el 2030 (Data Driven Yale *et al.*, 2018).
 - *Alianza de ciudades sin emisiones de carbono:* Esta red global de megaciudades está trabajando para reducir las emisiones de gas de invernadero de 80 % a 100 % para el 2050 o antes. La Alianza ha invertido USD 2,4 millones en 27 proyectos de innovación en estas ciudades (Carbon Neutral Cities Alliance, 2019).
 - *ICLEI – Gobiernos locales para el Registro Climático de carbono para la Sostenibilidad:* El Registro de carbono presenta una plataforma unificada para generar informes subnacionales de acciones climáticas. Incluye 1066 entidades (la mayoría ciudades y algunas regiones) con 1870 objetivos climáticos y 6874 acciones de mitigación y adaptación que podrían dar como resultado una reducción de 26,8 gigatoneladas (Gt) en emisiones de equivalente de CO₂ para el 2050 (carbonn Center, 2019).
 - *Sierra Club:* En diciembre de 2019, la Iniciativa Listos para RE100 del Sierra Club en los Estados Unidos incluía 145 ciudades, 12 condados y 9 estados que se han comprometido a usar electricidad 100 % renovable en al menos un sector. Seis de estas ciudades ya alcanzaron sus objetivos del 100 % (Sierra Club, 2019). La iniciativa está creciendo rápidamente. En el 2017, cuando solo incluía 50 ciudades, 4 condados y el estado de Hawaii, ya representaba una reducción potencial de 23 millones de toneladas de CO₂ y un incremento en energía renovable de 2000 megavatios (MW) de equivalente de energía eólica para el 2030 (Sierra Club, 2017).
 - *UK100:* A través de esta red, 90 líderes gubernamentales locales en el RU han prometido cambiar a energías 100 % renovables para el 2050. Están realizando campañas para aumentar la inversión en tecnologías de descarbonización, comunicar el cambio climático y eliminar la contaminación del aire. Aún cuando el UK100 representa el objetivo unificado de energías renovables más ambicioso de las iniciativas anteriores, no es vinculante (UK100, 2019).
- Otras iniciativas notables incluyen a Alcaldes del Clima de EE. UU. (400 miembros), el Acuerdo de Protección Climática de la Conferencia de Alcaldes de EE. UU. (1066 firmantes) y la Red de Ciudades del Banco Interamericano de Desarrollo en América Latina y el Caribe (más de 160 ciudades) (Climate Mayors, 2018; US Conference of Mayors, 2020; IDB, 2020).

2.2 Análisis espacial de los objetivos relacionados con los recursos de las energías renovables locales y las centrales eléctricas

En esta sección se exploran las relaciones espaciales potenciales entre ciudades que tienen objetivos de energías renovables (incluidos los objetivos para energías 100 % renovables), el potencial de energía renovable⁶ y plantas eléctricas de energías renovables locales existentes. Para fines de comparación, las centrales de energía fósil ubicadas cerca de las ciudades también se consideran frente al potencial de recursos de energía renovable y los objetivos de energías renovables existentes para presentar las oportunidades potenciales de sustitución.

La base de datos de ciudades fue la División de Estadística de la ONU (Estadísticas de la ONU, 2020), la cual recolecta datos de las ciudades globales a través de cuestionarios enviados anualmente.

Esta base de datos tiene un total de 4591 ciudades que varían en tamaños de población desde 100 000 habitantes hasta megaciudades con más de 10 millones de habitantes, lo que corresponde al intervalo de poblaciones identificadas para ciudades con objetivos de energías renovables.

La base de datos de centrales eléctricas (que incluye tanto renovables como fósiles) se construyó usando información sobre la capacidad y la ubicación de centrales eléctricas globales del World Resources Institute (Byers *et al.*, 2019), de GlobalData (GlobalData, 2019) y de la Base de datos mundial de centrales eléctricas de UDI (WEPP) (S&P Global Platts, 2018). Se aplicó un algoritmo de agrupamiento espacial para geocodificar las centrales eléctricas usando dos diferentes umbrales de proximidad al centro urbano más cercano: 20 kilómetros para granjas hidroeléctricas y de energía FV solar y 50 kilómetros para todas las demás centrales eléctricas. Además, se realizó una limpieza de la base de datos para asegurar una fusión óptima con base en las características para cada tecnología en una ciudad determinada.

⁶ Los datos de recursos usados se recolectaron de múltiples fuentes con diferentes niveles de granularidad y se usan únicamente para análisis indicativos.



ENERGÍA SOLAR

Si bien está aumentando el uso de energía solar en las ciudades, el enorme potencial sigue sin explotarse.

Irradiancia solar

Con base en el análisis, 95 % de las ciudades tienen el potencial solar más alto, (esto es, ciudades en el 10 % superior para irradiancia horizontal global o GHI, por sus siglas en inglés) no tienen un objetivo establecido para apoyar el desarrollo de energías renovables (tabla 1). Las excepciones son León de los Almadras (México), Puebla de Zaragoza (México) y Kisumu (Kenia), ninguno de los cuales tiene un objetivo ambicioso para energías 100 % renovables. Incluso entre las ciudades en el primer 30 % de potencial de energía solar, solo el 6 % (39 ciudades) tienen un objetivo de energía renovable y solo 2 % (14 ciudades) tiene un objetivo de energías 100 % renovables. En términos absolutos, esto sugiere que 582 ciudades que tienen un excelente potencial de recursos de energía solar carecen del compromiso político o la ambición para ampliar su uso de energías renovables (especialmente la solar) para satisfacer la demanda de energía.

La mayoría de las ciudades con un alto GHI se encuentran en Medio Oriente y en África, en América Latina y el Caribe y en partes de Asia, mientras que la mayoría de las ciudades que tienen objetivos de energías renovables se ubican en Europa y América del Norte y tienen un GHI promedio (figura 7).

Un enorme potencial solar permanece sin explotar en las ciudades.

Un estudio y un análisis más detallados podrían revelar oportunidades comerciales en aquellas ciudades aún sin ningún apoyo de políticas.

Dicho eso, tener un bajo potencial solar no necesariamente supone una barrera para el uso de energía solar en las ciudades ni impide alcanzar objetivos de energías renovables de manera económicamente viable. Por ejemplo, Glasgow, Escocia en el RU tiene un GHI de 2,41. A pesar de que la solar no es la fuente principal de energía renovable de la ciudad, Glasgow aún utiliza tanto energía FV solar como termosolar. El gobierno local planea incrementar la capacidad FV solar de alrededor de 3 MW en el 2014 a 9,6 GW para el 2030 (Glasgow City Council, 2014).

Tabla 1: **Número de ciudades con alto potencial solar en cada conjunto de datos**

Percentil	Suma promedio diaria de GHI (kWh/m ²)	Ciudad estudiada (conjunto de datos)	Número de ciudades con objetivos de energía renovable	Número de ciudades con objetivos de 100 %
Primeras 10	6,126	66	3	0
Primeras 20	5,851	248	17	6
Primeras 30	5,493	621	39	14

Con base en el análisis de IRENA

Figura 7: Ciudades en el primer 30 % de GHI en comparación con ciudades con objetivos de energía renovable

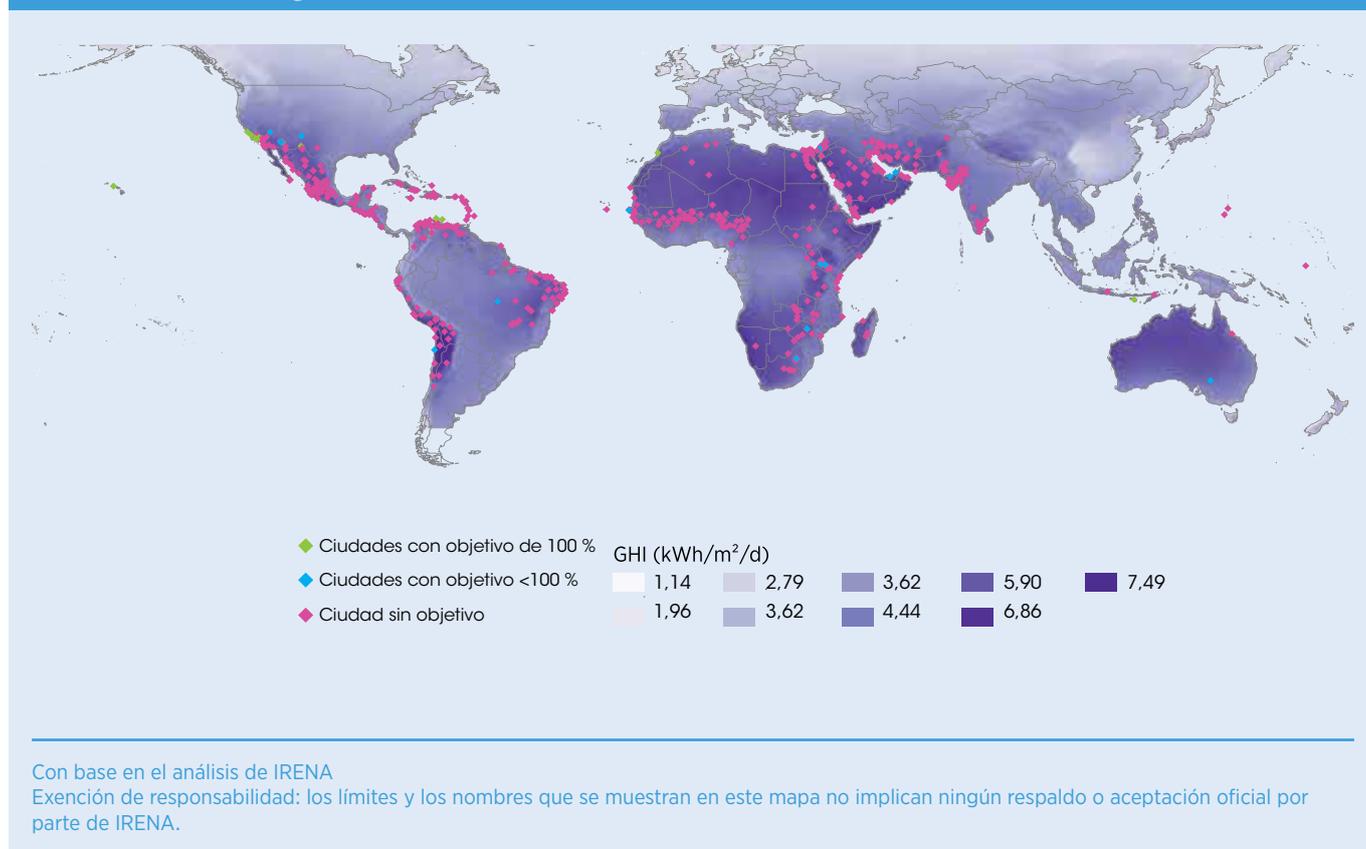
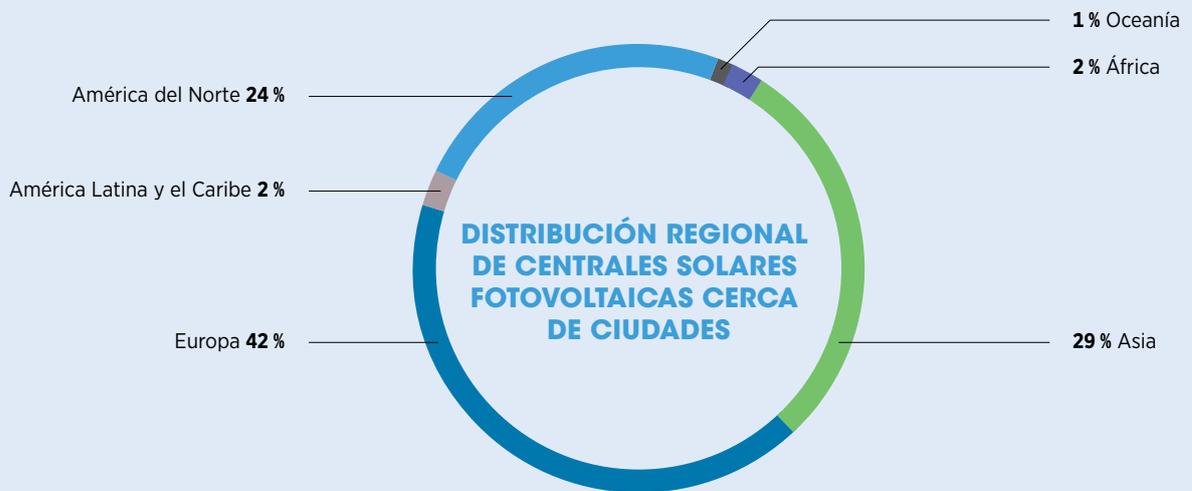
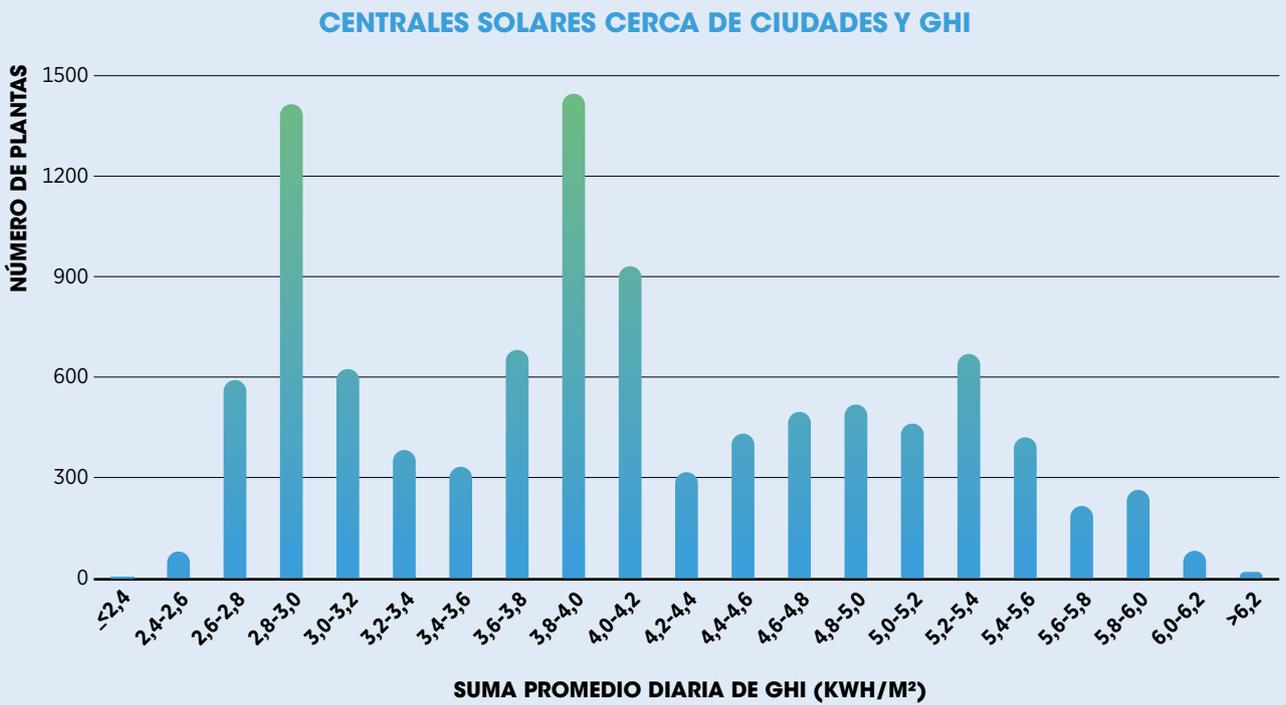


Figura 8: **Distribución de plantas de energía FV solar por GHI y región geográfica**



Con base en el análisis de IRENA

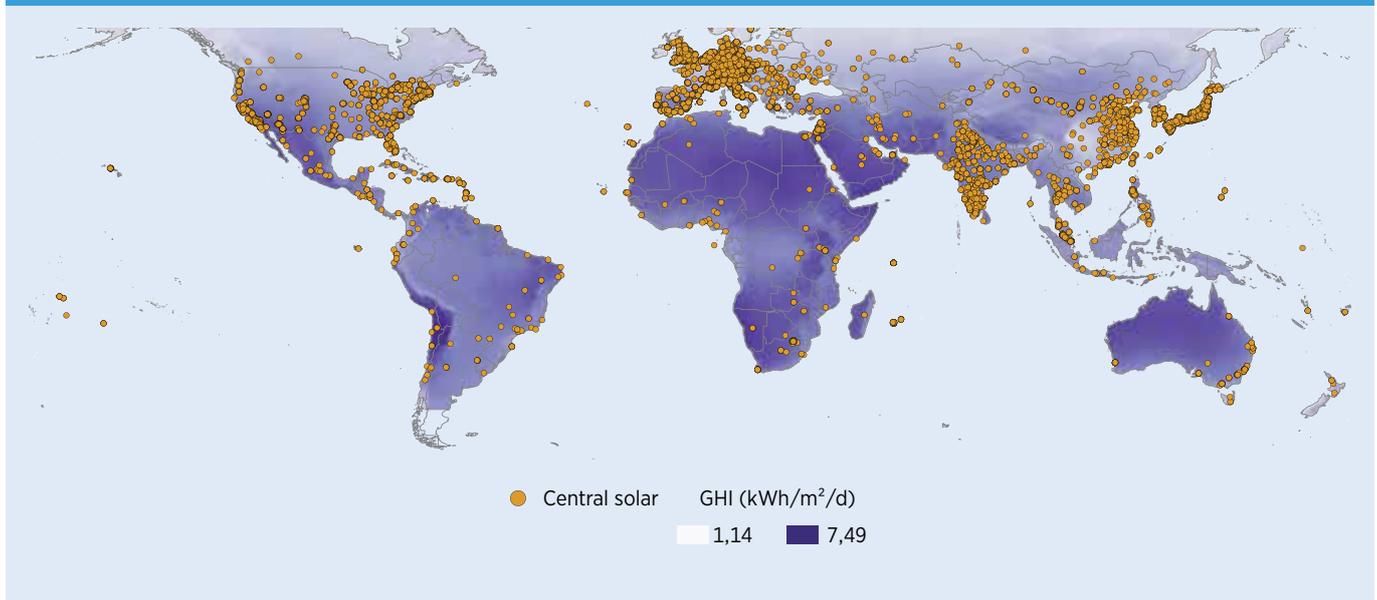
Centrales eléctricas solares

Existe menor correlación entre el potencial de recursos solares de una ciudad y la distribución existente de centrales eléctricas solares. Del total de 10 138 centrales solares FV ubicadas cerca de ciudades, alrededor del 57 % se encuentran en áreas con GHI en el rango inferior de 2,8 a 4,2 kWh/m² (figura 8). Cerca de la mitad de las centrales eléctricas solares están en Europa, a pesar del relativo bajo promedio de GHI de la región, y Asia y América del Norte, cada uno, representa alrededor de un cuarto de las centrales; combinadas, estas tres regiones representan el 95 % del total global de centrales eléctricas solares.

En Asia, los líderes en la implementación de centrales solares cerca de ciudades son China, Japón, India y varios países del sureste, tales como Filipinas y Tailandia (figura 9). En los EE. UU. y China, la mayoría de las plantas están distribuidas en las regiones costeras, las centrales eléctricas para las dos economías más grandes del mundo.

El tamaño promedio de las centrales solares cerca de ciudades en Europa, América del Norte y Asia es de entre 4,64 MW y 13,75 MW, que es bastante pequeño comparado con las centrales solares a escala de servicios públicos ubicadas en áreas remotas, que tienen capacidades de varios cientos de megavatios y más.

Figura 9: **Distribución geográfica de centrales de energía solar cerca de ciudades**



Con base en el análisis de IRENA
 Exención de responsabilidad: los límites y los nombres que se muestran en este mapa no implican ningún respaldo o aceptación oficial por parte de IRENA.

Esto sugiere que las centrales eléctricas solares FV se pueden justificar incluso en áreas que tienen recursos solares menos favorables. Factores no técnicos, tales como la ambición política de los gobiernos locales, una creciente demanda de electricidad impulsada por una actividad económica fuerte, marcos normativos y políticas de apoyo y la aceptación del público, juegan un papel importante en el incremento de las aplicaciones solares FV en las ciudades. Es más, el análisis indica que las economías de escala son una consideración menor en comparación para las plantas solares FV cerca de los centros de demanda.

Para las ciudades, por lo tanto, tiene sentido optar por sistemas solares FV descentralizados que se puedan integrar en construcciones nuevas y existentes, especialmente en áreas urbanas densamente pobladas donde escasean las plantas a escala de servicios públicos. Cada vez más, las tecnologías digitales y demás innovaciones pueden ayudar a los operadores de los sistemas de distribución y a las empresas de servicios públicos a monitorear, operar y controlar tales activos. Las ventajas adicionales de los sistemas descentralizados, como el evitar la transmisión de electricidad a larga distancia y la modularidad de la configuración de las centrales eléctricas FV, pueden contrarrestar fácilmente el factor de escala, permitiendo que las centrales FV locales se desempeñen bien a escalas más pequeñas (Skalik and Skalikova, 2019; Dhimish *et al.*, 2018).

En la región del Medio Oriente y África del Norte, el potencial de recursos de energía solar (particularmente la irradiación solar directa) es excelente. Por ejemplo, Emiratos Árabes Unidos (EAU) tiene un GHI de 6,5 kWh/m² al día, lo que promedia 10 horas de luz solar diarios a lo largo de 350 días soleados en un año típico (Masdar Institute and IRENA, 2015).

Dada la amplia área desértica, la disponibilidad de tierra rara vez representa un desafío, que es una razón clave por la que la energía solar a escala de servicios públicos está a la vanguardia de la implementación de energía renovable en la región.

Sin embargo, los países productores de petróleo y gas en la región están prestando atención cada vez más a la energía solar distribuida, en su esfuerzo por diversificar su sector energético. Según la Asociación de la Industria Solar del Medio Oriente, para 2019, Dubai tenía un total de 125 MW de instalaciones solares FV distribuidas en 1354 sitios (Publicover, 2020). Las aplicaciones de energía solar probablemente se expandirán en respuesta al compromiso de EAU hecho en la Cumbre Climática de la ONU en el 2019, de alcanzar cero emisiones de carbono de todas las construcciones para el 2030.

En contraste, África, que presume tener uno de los GHI promedio más altos del mundo con 5,815 kWh/m²/día, alberga tan solo 1 % de las centrales solares ubicadas cerca de ciudades. Esto se debe a las bajas tasas de urbanización de la región y a la falta de infraestructura eléctrica para apoyar la integración de fuentes de ERV, además de otras barreras. El mayor recurso solar de África permanece básicamente sin explotar.

Aún cuando la atención y las actividades alrededor del desarrollo de energía solar ha crecido a escala nacional (DIE, 2020), el pensamiento estratégico podría ayudar a reconciliar el desarrollo de energías renovables con el proceso de urbanización en curso. Si los países africanos pueden planear su explotación del vasto potencial solar de la región (junto con otras fuentes de energías limpias) en sintonía con la urbanización, y si pueden planear el desarrollo de redes eléctricas conjuntamente con el crecimiento económico que impulsa la demanda de energía, entonces el desarrollo energético urbano en África saltaría a lo largo de una trayectoria de energías renovables más que una basada en energías fósiles.

ENERGÍA EÓLICA

Con frecuencia, existen recursos eólicos adecuados en las ciudades o alrededor de ellas.

Recursos de energía eólica cerca de ciudades

Con la emergencia de diseños innovadores de turbinas, la capacidad de dominar a la energía eólica en el entorno construido está progresando rápidamente. Aún así, la implementación eólica urbana en la práctica actual sigue siendo marginal y rara. Sin embargo, la implementación de granjas eólicas a menores escalas o solo unas cuantas turbinas eólicas en áreas periurbanas está creciendo, particularmente en regiones donde abunda el viento.

Usando la densidad de potencia a una altura de un núcleo de 100 metros como un indicador para el potencial de energía eólica cerca de ciudades⁷, mediante el análisis realizado para este informe se encontró que muchas de las ciudades tienen objetivos de energías renovables en áreas con alto potencial de energía eólica.

7 La evaluación se basó en el Atlas Global de Vientos (Global Wind Atlas, 2019).

Los diseños innovadores de turbinas podrían facilitar un mayor uso del viento urbano.

En lugares donde no existen líneas de transmisión o donde no se puede usar la capacidad de transmisión actual, se podría justificar económicamente una línea dedicada para conectar granjas eólicas potenciales con centros de demanda, dada la limitada distancia de transmisión⁸.

El análisis encontró que 151 de las ciudades que tienen objetivos de energías renovables, o el 40 % del total, se encuentran en el primer 30 % de alto potencial eólico (tabla 2). De estas ciudades, el 86 % tiene objetivos para energías 100 % renovables. Estas proporciones son aún más altas para el primer 10 % de ciudades con el potencial eólico más alto.

8 En este estudio, se aplica un radio de 50 kilómetros.

Tabla 2: Número de ciudades con alto potencial eólico en cada conjunto de datos

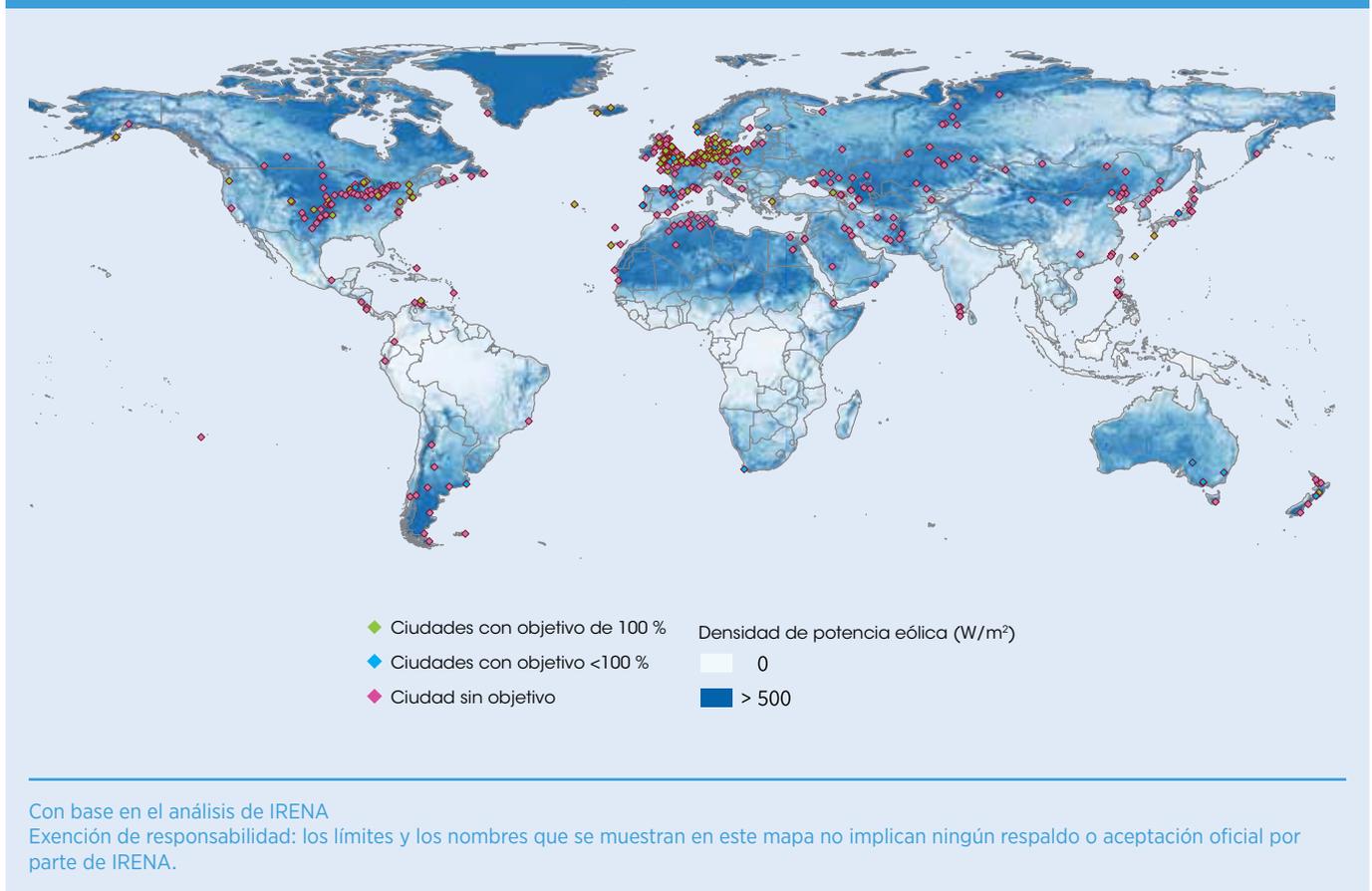
Percentil	Densidad de potencia (W/m ²)	Ciudades estudiadas (conjunto de datos)	Número de ciudades con objetivos de energía renovable	Número de ciudades con objetivos de 100 %
Primeras 10	607,0	57	29	26
Primeras 20	457,7	206	88	80
Primeras 30	381,5	394	151	130

Con base en el análisis de IRENA

La mayoría de las ciudades con objetivos y que se encuentran en el primer 30 % de potencial de energía eólica se ubican en Europa (figura 10). Sin embargo, más de la mitad de las ciudades estudiadas con buen potencial de energía eólica aún no han establecido un objetivo de energías renovables de ningún tipo.

Esto merece mayor investigación, particularmente si se acompaña con un mapa de recursos eólicos y solares combinados. En muchas ubicaciones, la energía eólica puede ser complementaria a la energía solar, dadas las características temporales de distribución de estos recursos.

Figura 10: Ciudades en el primer 30 % de densidad de potencia eólica en comparación con ciudades con objetivos de energía renovable

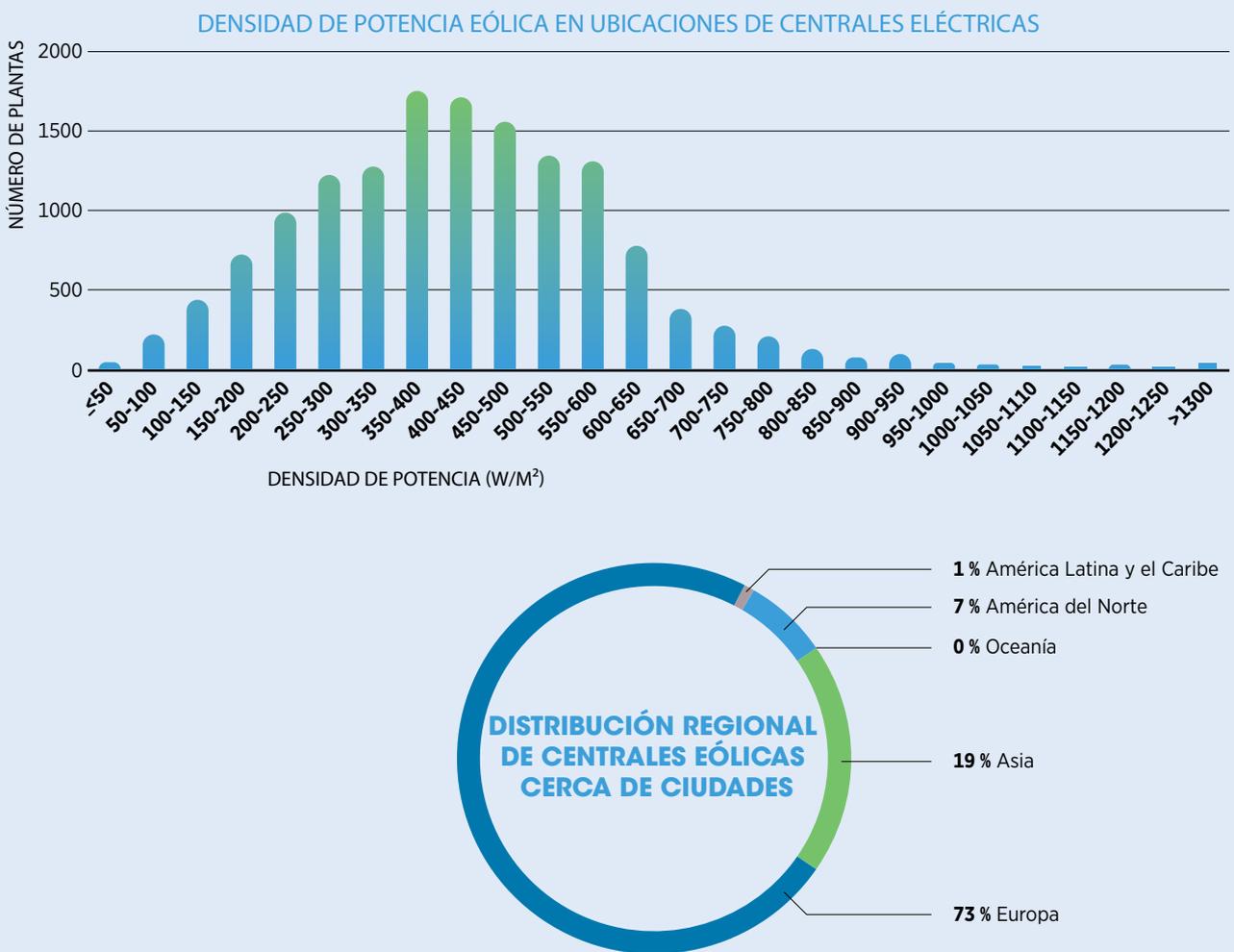


Centrales eólicas cerca de ciudades

De las 14 652 centrales eólicas ubicadas cerca de ciudades, el 27 % tiene una densidad de potencia en el rango de 350 a 500 vatios (W) por m², y 23 % tienen una densidad eléctrica en el rango de 500 a 650 W/m² (figura 11).

Cerca de tres cuartos de las plantas se encuentran en Europa, pero representan solo el 44 % de la capacidad total de generación instalada, lo que indica una capacidad de generación promedio más baja por planta.

Figura 11: Distribución de centrales eólicas cerca de ciudades por densidad de potencia y región



Con base en el análisis de IRENA

En contraste, Asia es el hogar de tan solo un quinto de las plantas totales, pero representa el 32 % de la capacidad total.

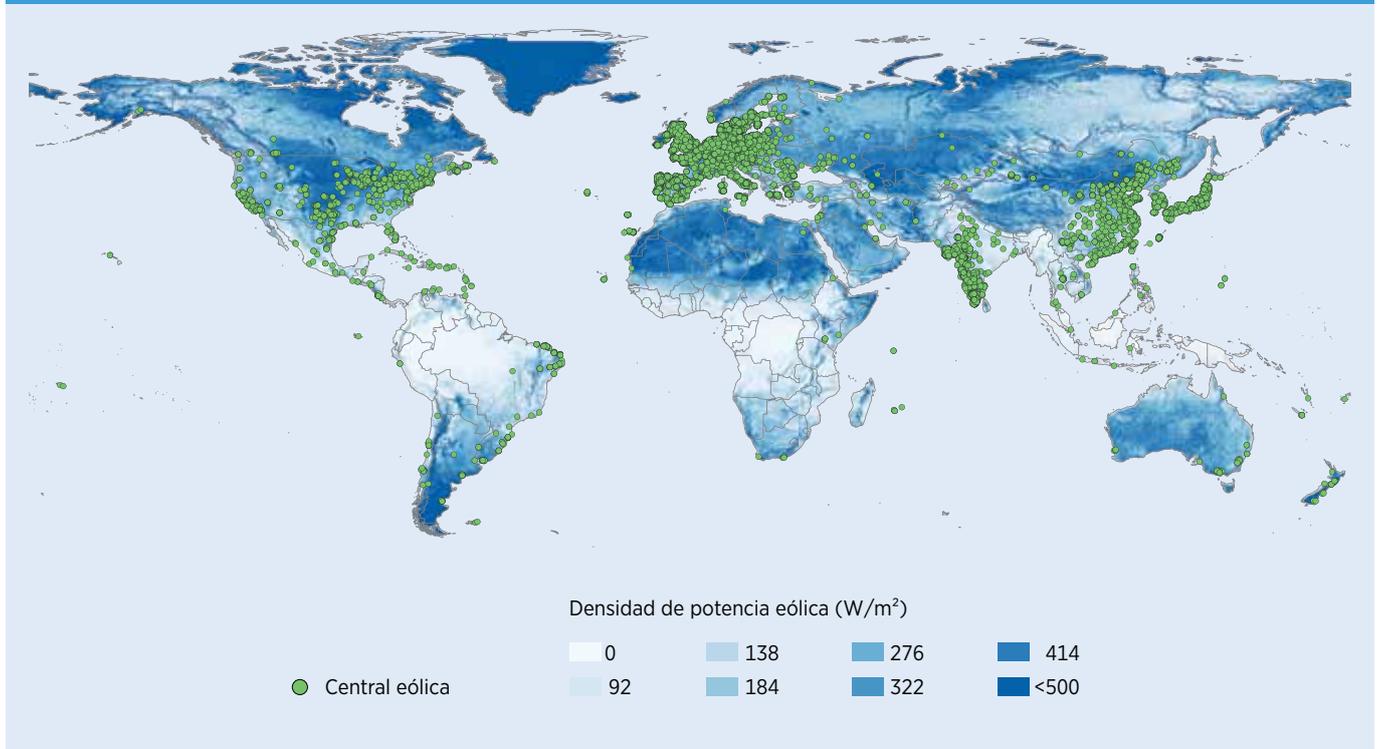
En Asia, la capacidad de generación promedio por planta es de 43 MW, comparado con 14,5 MW en Europa, debido probablemente a la mucho mayor demanda de energía en las ciudades en China e India.

Geográficamente, una alta concentración de centrales de energía eólica está en Europa, en las costas de los

EE. UU., a lo largo de la costa este de China y sobre la costa oeste de India (figura 12).

Dado que casi la mitad de las ciudades en todo el mundo que tienen objetivos de energías renovables están en Europa, y que las ciudades en las costas en los EE. UU., China e India son generalmente avanzadas en términos económicos, podría decirse que la generación de energía eólica cerca de las ciudades contribuiría en mayor medida al abastecimiento de energía limpia de estos centros urbanos.

Figura 12: **Densidad de potencia y distribución geográfica de centrales eólicas cerca de ciudades**



Con base en el análisis de IRENA
 Exención de responsabilidad: los límites y los nombres que se muestran en este mapa no implican ningún respaldo o aceptación oficial por parte de IRENA.

ENERGÍA HIDROELÉCTRICA

La energía hidroeléctrica contribuye a alcanzar los objetivos de energías renovables de las ciudades y a la descarbonización de la combinación energética.

La energía hidroeléctrica es parte de la combinación de fuentes de electricidad en 275 de las ciudades identificadas en la base de datos de CDP. En 43 % de estas ciudades, la energía hidroeléctrica corresponde al 25 % o más de la capacidad de generación instalada, y en 30 ciudades es la única fuente para la generación de electricidad. Entre las 43 ciudades que informan ser 100 % alimentadas por energía renovable, 26 se encuentran en Brasil, un país donde la energía hidroeléctrica aporta más de tres cuartos de toda la electricidad (CDP, 2019b).

Esto sugiere que la accesibilidad de una ciudad a energía hidroeléctrica cercana puede favorecer que el gobierno local establezca objetivos de energías renovables.

A nivel mundial, las ciudades que tienen objetivos de energías renovables se localizan más cerca de los segmentos de ríos que muestran un potencial hidroeléctrico por encima del promedio global, medido mediante el potencial hidroeléctrico mediano (kWh/año) (tabla 3).

En promedio, las centrales hidroeléctricas ubicadas cerca de ciudades en Europa y América del Norte tienen una capacidad menor que aquellas en Asia y en América Latina y el Caribe (figura 13).

La energía hidroeléctrica contribuye a descarbonizar la combinación energética y cumplir con los objetivos de energía renovable en la ciudad.

Tabla 3: **Distancia mediana al segmento de río más cercano y potencia del segmento para cada conjunto de datos**

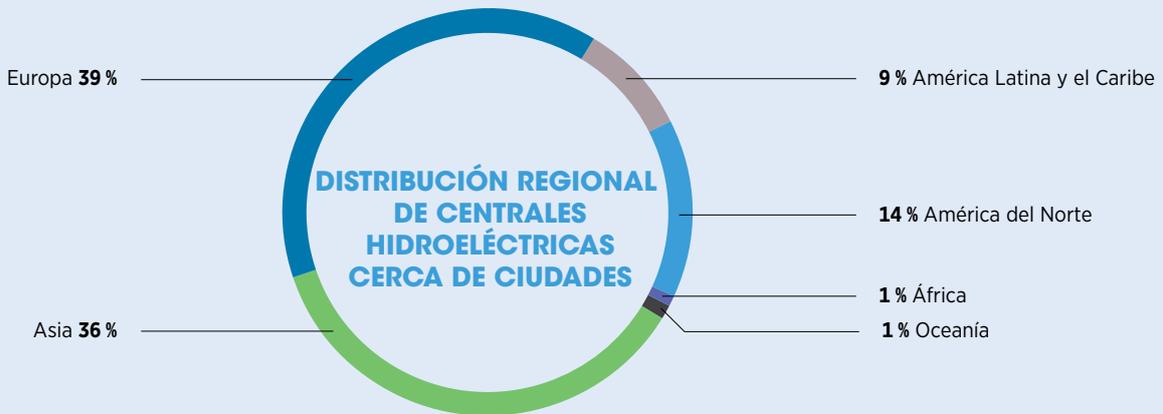
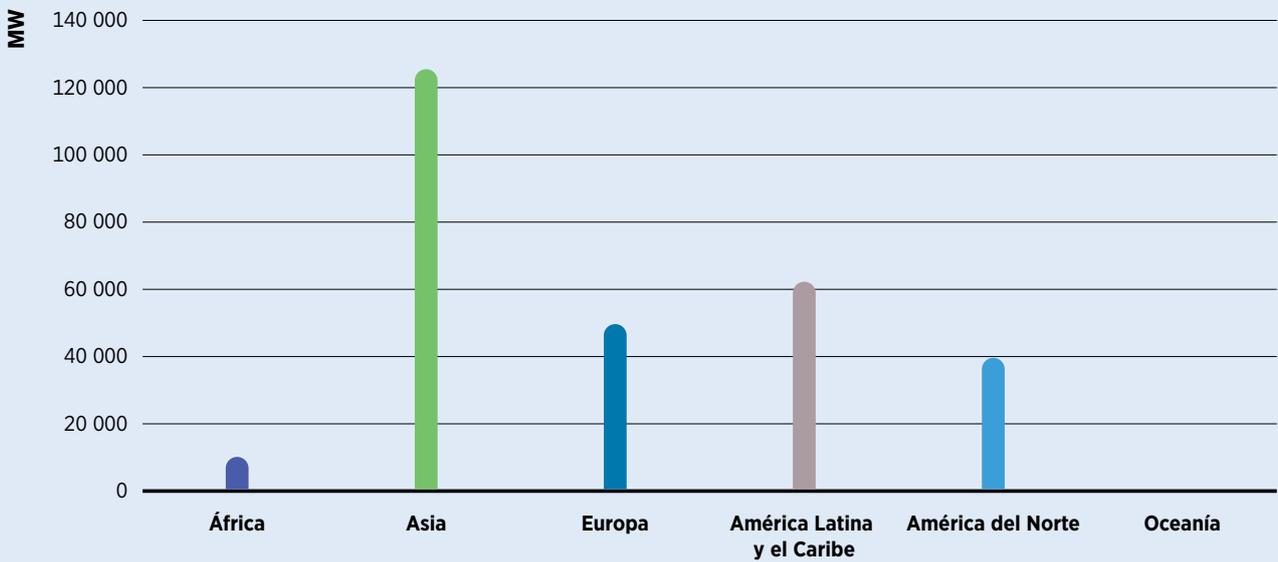
	Ciudades estudiadas (conjunto de datos)	Ciudades con objetivos de energía renovable	Ciudades con objetivos de 100 %
Potencial mediano de energía hidroeléctrica (kWh/año)	165 563	233 015	226 884
Distancia mediana al río (m)	2070	1462	1385

Nota: Hoes *et al.* (2017) calculó el potencial de energía hidroeléctrica para cuencas fluviales globales con base en la pendiente y la descarga en cada ubicación. Este conjunto de datos es espacialmente discontinuo debido a la naturaleza de las cuencas fluviales. En lugar de encontrar el potencial en cada punto, se encontró la distancia a la ubicación potencial más cercana para cada ciudad y central hidroeléctrica, así como su potencial de energía hidroeléctrica.

Con base en el análisis de IRENA

Figura 13: **Distribución de energía hidroeléctrica por región**

CAPACIDAD DE GENERACIÓN HIDROELÉCTRICA CERCA DE CIUDADES POR REGIÓN



Con base en el análisis de IRENA

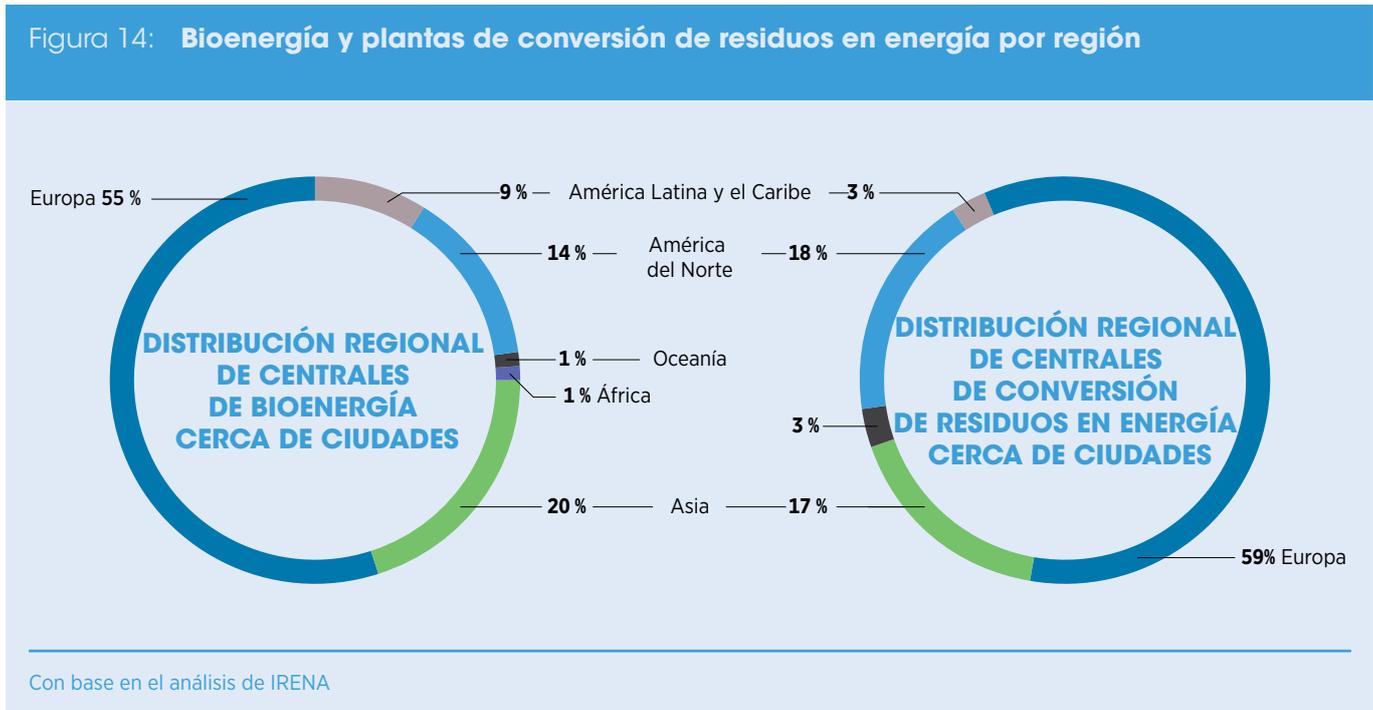
BIOENERGÍA Y CONVERSIÓN DE RESIDUOS EN ENERGÍA

La bioenergía y la conversión de residuos en energía pueden proporcionar múltiples beneficios para las ciudades.

El uso moderno de los residuos de biomasa o de las cosechas de energía y de la conversión de residuos en energía pueden proporcionar un suministro energético confiable y generar múltiples beneficios para las ciudades, siempre que la materia prima se gestione bien. A nivel mundial, más de 6000 centrales eléctricas basadas en biomasa y alrededor de 3000 instalaciones de generación de energía a partir de desechos en ciudades o sus alrededores.⁹ Las ciudades europeas poseen la mayoría de dichas instalaciones, con 55 % y 59 % respectivamente, de los dos tipos, seguidas por Asia y América del Norte (figura 14).

El acoplamiento de residuos agrícolas y urbanos con la infraestructura energética ofrece múltiples beneficios.

9 Uso de un radio de 50 kilómetros desde el centro de la ciudad.



Los EE. UU. lideran en América del Norte en plantas eléctricas basadas en biomasa, mientras que en Asia estas plantas se concentran en Japón, a lo largo de la costa este de China y en India (figura 15). En comparación, las instalaciones de conversión de residuos en energía parecen estar extendidas en todas las regiones (figura 16) porque los residuos están disponibles en todas las ciudades y han aumentado con el tiempo, desafiando los sistemas de gestión de residuos urbanos alrededor del mundo.

Muchas ciudades han adoptado tales instalaciones sin importar si la ciudad tiene un objetivo de energías renovables. Una tonelada de residuos es aproximadamente el equivalente a 500 kWh de electricidad (Porteous, 2005).

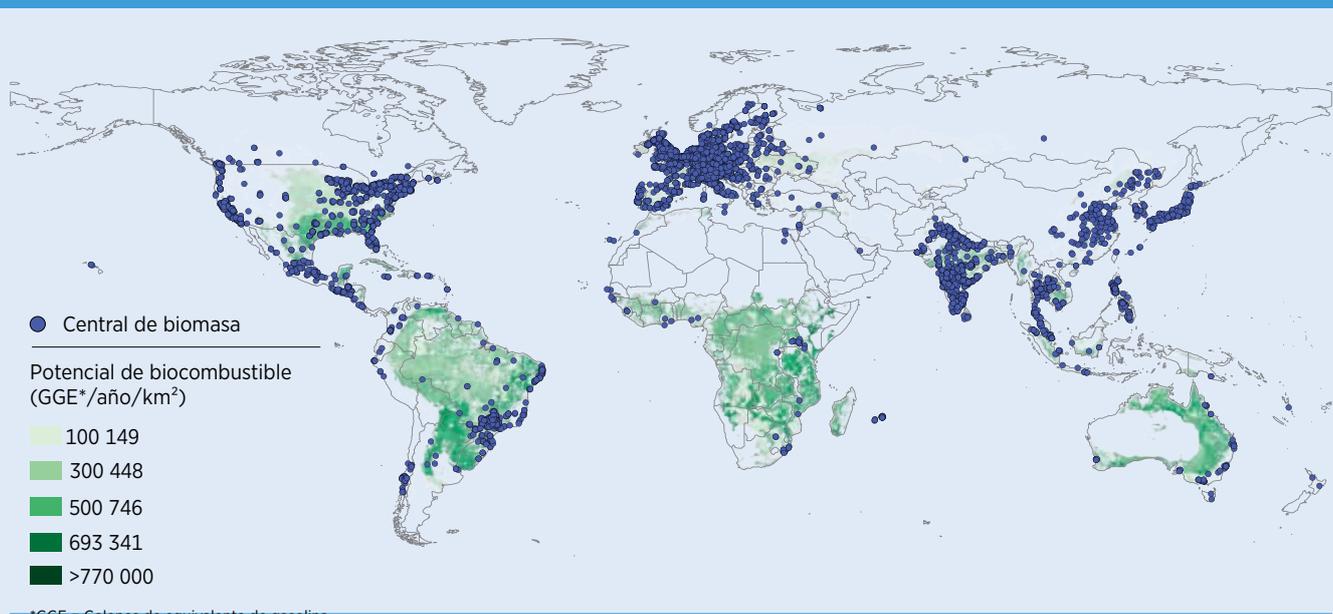
Actualmente, el 70% de los residuos sólidos municipales va a los vertederos o a basureros sin control, mientras que los materiales inorgánicos como metales, plásticos y vidrio se recolectan o reciclan en diversa medida.

La conversión de residuos en energía ayuda a que las ciudades eviten la contaminación del aire y de la tierra y las emisiones de gases de invernadero que resultan de la eliminación de residuos, a la vez que se genera electricidad en el proceso (Mavropoulos *et al.*, 2012). (Para obtener más información sobre tecnologías de biomasa y aplicaciones, vea el capítulo 3).

En los países en desarrollo, en particular los de África, el uso tradicional de la biomasa sigue siendo común, al contribuir a los desafíos ambientales y de salud, tales como la deforestación y la contaminación del aire en interiores. Aún cuando la biomasa representa una gran proporción de la combinación energética de la región, África está representada pobremente tanto en plantas eléctricas de biomasa como en instalaciones de conversión de residuos en energía.

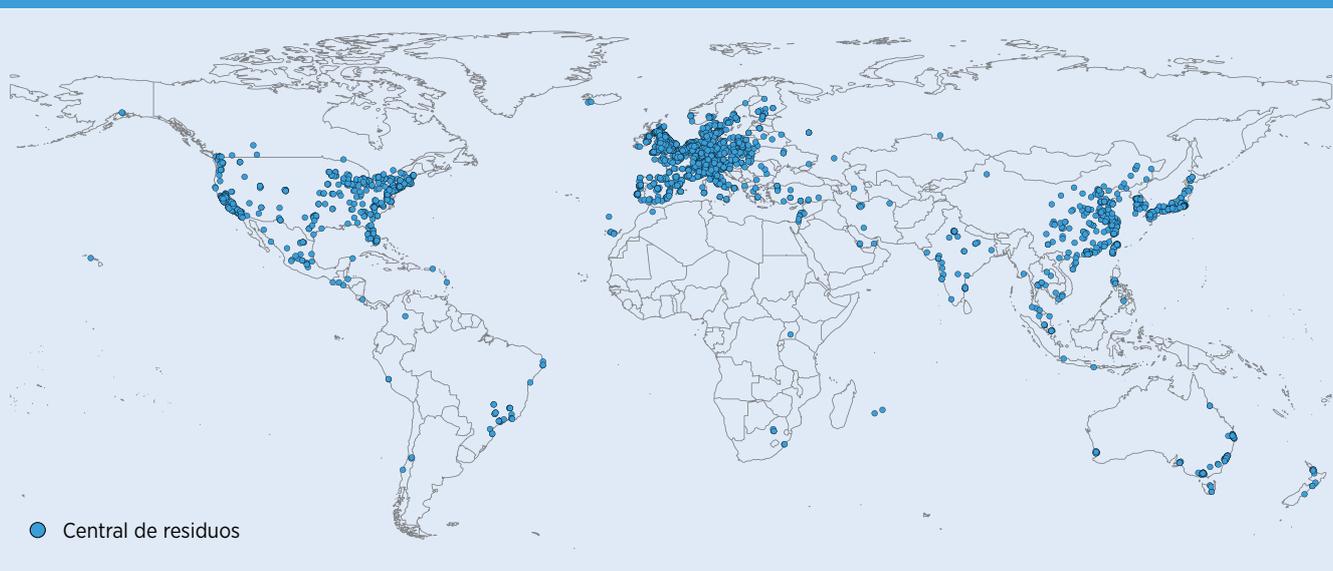
La modernización del uso de residuos y la siembra de cultivos energéticos dedicados cerca de las ciudades puede ofrecer una solución prometedora. Igualmente, como parte del proceso de urbanización, las ciudades africanas podrían construir y mejorar su gestión de residuos municipales junto con tecnologías de conversión de residuos en energía (Edo and Johansson, 2018). De acuerdo con un cálculo, en 2025, se podrían generar unos 2562 petajoules de energía de todos los residuos, incluido el gas de los vertederos en África (Scarlat *et al.*, 2015).

Figura 15: **Centrales eléctricas de biomasa cerca de ciudades y ciudades con un alto potencial de recursos a nivel mundial**



Con base en el análisis de IRENA

Figura 16: **Plantas de conversión de residuos en energía cerca de ciudades a nivel mundial**



Con base en el análisis de IRENA

Exención de responsabilidad: Los límites y los nombres que se muestran en estos mapas no implican ningún respaldo o aceptación oficial por parte de IRENA.

ENERGÍA GEOTÉRMICA

Los recursos de energía geotérmica sin explotar están disponibles por debajo de la superficie urbana para su uso directo.

El flujo del calor de la superficie se puede usar como un indicador del potencial geotérmico; sin embargo, se requiere mayor exploración para estimar de manera más precisa el potencial geotérmico de los sitios considerados. Para este análisis, los datos del flujo de calor se descargaron de la evaluación de recursos por Davies (2013). Usando la metodología de Limberger *et al.* (2017), los datos volcánicos (Global Volcanism Program, 2020) se incluyeron entonces sobre las mediciones del flujo de calor. A los volcanes activos se les dio un flujo de calor de 140 millones de vatios por m^2 (W/m^2), y a los volcanes durmientes el flujo de calor que se les dio fue de 80 millones de W/m^2 (Nagao and Uyeda, 1995).

Además del flujo de calor natural de la superficie que afecta al potencial geotérmico, con frecuencia se observa que la energía térmica es superior por debajo del entorno construido que en las áreas rurales, un fenómeno conocido como el efecto de isla de calor urbano de la subsuperficie. Esto aumenta el potencial para la energía geotérmica pero también aumenta la complejidad de estimarla.

La energía geotérmica sin aprovechar debajo de la ciudad puede estar disponible para uso directo.

No parece existir una clara relación entre el potencial de la energía geotérmica y el establecimiento de objetivos de energías renovables en las ciudades (tabla 4). A diferencia de la mayoría de los recursos de energías renovables, una evaluación precisa del potencial de energía geotérmica resulta complejo y costoso. Las reglas legislativas, normativas y ambientales también podrían obstaculizar el desarrollo de proyectos de energía geotérmica. Estos factores limitan el papel de la energía geotérmica en los objetivos de energías renovables de las ciudades. Actualmente, solo cinco ciudades especifican el uso de energía geotérmica en sus objetivos.

Tabla 4: **Número de ciudades con alto potencial geotérmico en cada conjunto de datos**

Percentil	Flujo de calor superficial (MW/m^2)	Ciudades estudiadas (conjunto de datos)	Número de ciudades con objetivos de energía renovable	Número de ciudades con objetivos de 100 %
Primeras 10	80,00	658	129	76
Primeras 20	66,75	1416	243	140
Primeras 30	63,00	1900	293	165

Con base en el análisis de IRENA

En total, se identificó que 69 plantas de energía geotérmica, o más del 60 % de la capacidad instalada global, están dentro de un radio de 50 kilómetros del centro de una ciudad, según la base de datos de la Asociación Geotérmica Internacional¹⁰. La mayoría de las plantas están en Asia (39 %) y en América del Norte (32 %) (figura 17), y estas regiones corresponden al 43 % y 28 % respectivamente, del total de la capacidad de generación de electricidad geotérmica.

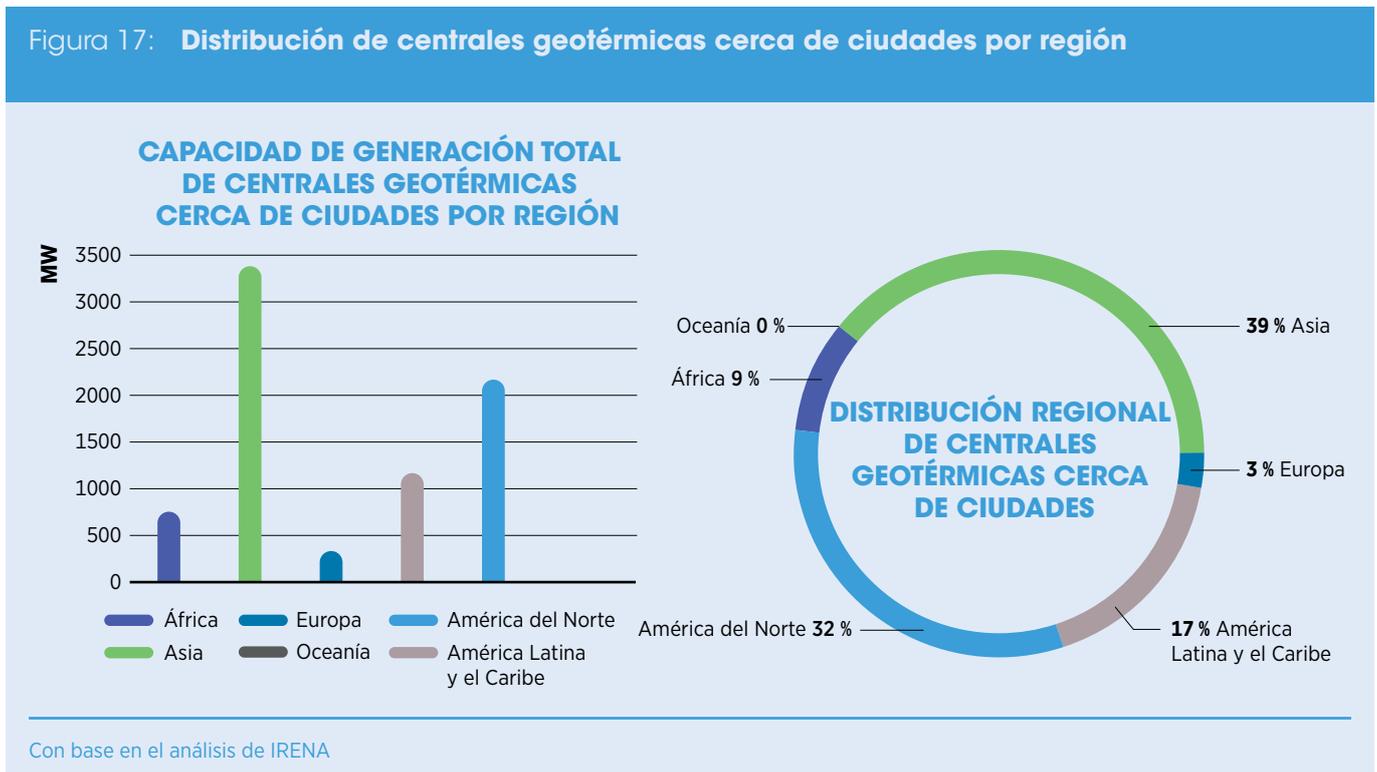
Esto sugiere que la capacidad de generación promedio por planta en estas dos regiones es, en términos generales similar, debido principalmente al tamaño más grande de las centrales geotérmicas que se requiere para la viabilidad económica.

Dado que las plantas se ubican cerca de las ciudades, la mayoría están probablemente configuradas como centrales combinadas de calor y electricidad (CHP, por sus siglas en inglés) a través de aplicaciones en cascada (con frecuencia en relación con las redes de calefacción urbana) y el desempeño económico.

Comparado con la generación de electricidad geotérmica, el uso directo de energía geotérmica es un recurso mucho más accesible, con un potencial técnico global estimado en más de 100 veces aquel de la electricidad geotérmica (Hoogwijk y Graus, 2008). El uso de la geotermia, con frecuencia junto con bombas de calor, puede beneficiarse de la energía geotérmica de temperatura más baja para satisfacer la demanda para calefacción y refrigeración; esto corresponde a casi la mitad de la producción de energía geotérmica global (Lund y Toth, 2020).

10 Vea la Base de datos de energía geotérmica, www.geothermal-energy.org/explore/our-databases/geothermal-power-database.

Figura 17: Distribución de centrales geotérmicas cerca de ciudades por región



COMENTARIOS RESUMIDOS

En general, las ciudades muestran un potencial notable dentro de sus jurisdicciones inmediatas para desarrollar uno o más recursos de energías renovables. Con independencia de que hayan establecido objetivos de energías renovables, las ciudades deberían evaluar estos potenciales tanto técnica como económicamente, ya que la implementación de energía renovable aporta más que solo vectores de energía física, sino también muchos beneficios conjuntos.

Para las ciudades que tienen altas ambiciones de energía renovable, un objetivo podría enviar una clara señal al mercado y, por tanto, atraer mayor inversión, especialmente cuando se acompaña por un marco normativo y cuando hay procedimientos administrativos establecidos. Una evaluación cuidadosa de la energía renovable local que lleve a proyectos desarrollables podría invitar a inversionistas y desarrolladores de proyectos a dirigir más recursos hacia la implementación de energía renovable urbana.

Para ciudades detrás de la curva, si tienen abundantes recursos de energía renovable y esperan crecimiento en su demanda de energía, aprovechar dichos potenciales podría traer ganancias significativas a largo plazo a través de saltos tecnológicos.

Se requiere una mayor comunicación entre los gobiernos municipales, provinciales/estatales y los gobiernos nacionales para alinear las ambiciones de energía renovable y mejorar el intercambio de conocimiento. En regiones donde no son comunes los objetivos de energía renovable, tales como África y Asia Central, los gobiernos nacionales y las iniciativas internacionales serán clave para motivar a las ciudades a establecer objetivos y proporcionarles las herramientas en información para lograrlas.

Finalmente, los esfuerzos para maximizar el uso de recursos de energías renovables locales de ninguna manera impiden la adquisición de productos de energías renovables (como electricidad renovable) de otras regiones. En la mayoría de los casos, la energía renovable disponible localmente no es adecuada para suministrar totalmente la demanda de energía de las ciudades, por lo que se necesita de energía adicional proveniente de fuera de los límites de la ciudad.

Dados estos desafíos y oportunidades, se debe integrar una clara estrategia para el uso de recursos renovables en la planeación de las ciudades. Esto es fundamental para crear una vía clara para la transición de un sistema energético urbano a un futuro bajo en carbono, sostenible y resiliente al clima. (Para obtener más información sobre planeación energética urbana, vea el capítulo 4).

3.

TECNOLOGÍAS DE ENERGÍAS RENOVABLES URBANAS



3. Tecnologías de energías renovables urbanas

La integración de tecnologías de energías renovables en las ciudades enfrenta varios desafíos, entre ellos barreras legislativas, políticas, regulatorias, de financiamiento, de capacidad humana, estéticas, de diseño y planeación urbana. Un paquete de instrumentos, que incluya compras de energías renovables, ordenanzas y mandatos, sirve como medidas de políticas efectivas para enfrentar estos desafíos, como se identifica en un conjunto de estudios de caso en *Scaling up renewables in cities: Opportunities for municipal governments* (Ampliación de las energías renovables en las ciudades: oportunidades para los gobiernos municipales) publicado por IRENA en colaboración con ICLEI y la Agencia Alemana de Cooperación Internacional (GIZ) (IRENA *et al.*, 2018).

En cierta medida, estas barreras también son el resultado de la falta de conciencia de las oportunidades y beneficios de aprovechar los recursos de energía renovable (como una seguridad de energía mejorada y la creación de oportunidades laborales locales), a una falta de conocimiento de las aplicaciones de la energía renovable en las ciudades y, en algunos casos, de una falta de aceptación pública de las centrales eléctricas en ciudades o cerca de ellas. El objetivo de este capítulo es equipar a los proveedores de tecnologías, planeadores de sistemas energéticos y responsables de la toma de decisiones municipales con conocimientos claves en torno a estos aspectos.

3.1 Energía solar

Existen dos tipos de tecnologías de conversión¹¹ para aprovechar los recursos solares para producir energía: los sistemas fotovoltaicos (FV) para generar electricidad y los colectores solares para producir energía térmica. Ambos se pueden aplicar en diversas escalas y pueden operar mediante una configuración independiente o conectados a la red. Si bien el sistema FV solar proporciona solo electricidad, el termosolar tiene muchas aplicaciones diferentes adecuadas para las áreas urbanas. En esta sección se describen las soluciones tecnológicas existentes usadas frecuentemente para áreas urbanas, como los sistemas FV, FV integrados en edificios (BIPV), varias tecnologías termosolares (que incluyen sistemas termosolares concentrados) y sistemas solares fotovoltaicos-térmicos (FV-T).

¹¹ También se ha usado ampliamente la energía solar pasiva, aunque ha sido excluida en este estudio.

ENERGÍA FV SOLAR URBANA

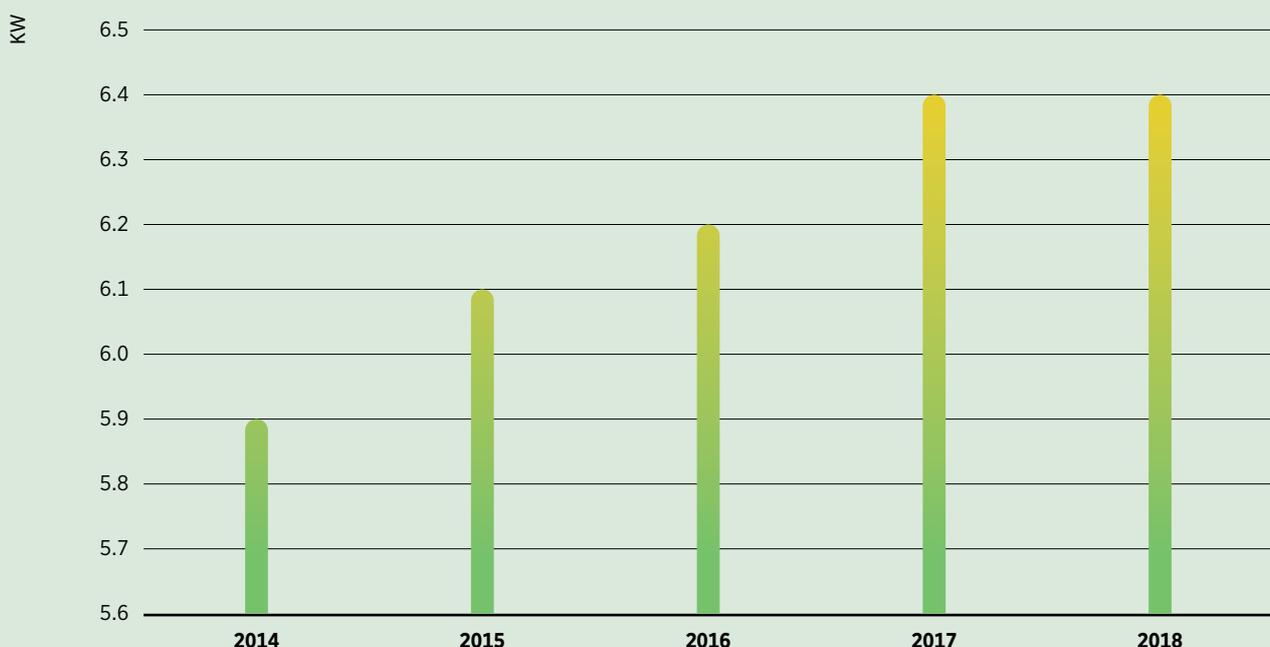
La capacidad instalada global de energía FV solar ha aumentado rápidamente durante la última década, de alrededor de 40 GW en 2010 a 580 GW en 2019 (IRENA, 2020c). La mayoría de esto son centrales eléctricas solares a escala de servicios públicos, aunque en ciertos países, como en Alemania, los sistemas solares FV distribuidos a menor escala en las ciudades y sus alrededores han dominado la implantación.

Dentro de las ciudades, los sistemas solares FV generalmente se instalan encima o se integran a los techos y las fachadas de los edificios. Estos sistemas son generalmente de menor escala que los sistemas montados en el piso ubicados en las afueras de las ciudades.

El tamaño medio de los sistemas FV residenciales instalados en 2018 fue de alrededor de 6,4 kilovatios (kW), que fue 8 % más que en 2014 debido principalmente a los costos decrecientes (figura 18).

La ventaja técnica clave de los sistemas residenciales es su proximidad a la demanda, lo que evita pérdidas de energía y las cargas de desplazamiento asociadas con la transmisión de larga distancia. Sin embargo, las ciudades también están reconociendo cada vez más los muchos beneficios conjuntos sociales y ambientales que proporcionan estos sistemas, que incluyen una mayor resiliencia a los eventos climáticos extremos y los impactos del cambio climático.

Figura 18: Mediana global del tamaño de los sistemas solares FV residenciales instalados



Fuente: Datos de Barbose and Darghouth, 2019

A pesar de las muchas ventajas que aportan a las ciudades los sistemas solares FV, existen desafíos únicos para ampliar las aplicaciones FV en áreas urbanas.

Primero que nada, está la restricción de tierras. En la mayoría de los casos, las ciudades no tienen tierra disponible adecuada para centrales solares FV sobre el piso debido a usos competitivos como agricultura o reservas ecológicas, o a que el costo de la tierra es prohibitivamente alto.

Por esta razón, integrar los sistemas solares FV en los edificios urbanos existentes o planeados u otra infraestructura seguirá siendo la práctica preferida. Sin embargo, existen ejemplos de plantas solares FV en el piso (generalmente propiedad de las comunidades o la ciudad) que se encuentran instaladas en las afueras de las ciudades como parte de las acciones para alcanzar compromisos políticos, por ejemplo, en cooperación con las comunidades rurales (Energy Cities, 2018).

Segundo, la mayoría de las ciudades están preocupadas sobre el impacto de integrar fuentes ERV, tales como FV solar, a las operaciones en la red, ya que esto puede crear desafíos para operadores de servicios públicos en la gestión de un sistema eléctrico urbano y puede afectar la estabilidad de la red. Cuando la participación del sistema FV solar aumenta hasta un cierto nivel para un sistema eléctrico de distribución determinado, el impacto en la estabilidad de la red y la flexibilidad de la red requerida se pueden examinar aplicando herramientas de simulación por computadora, como PowerFactory¹² y FlexTool¹³.

12 PowerFactory está diseñado para la conexión de redes y el análisis de impacto en redes.

13 La herramienta FlexTool de IRENA tiene como objetivo analizar las necesidades de flexibilidad de los sistemas eléctricos. Estas ventajas incluyen tiempos de estimación cortos y la facilidad de configurar la herramienta para analizar múltiples escenarios alternativos con varios niveles de integración de ERV, como la energía FV solar.

Los resultados pueden proporcionar una mejor comprensión de las implicaciones de los diferentes escenarios de instalación de FV para las redes y de las medidas disponibles para compensar las adversidades al mejorar la flexibilidad de las redes. Además, hay proyectos piloto disponibles en todo el mundo que muestran que las soluciones que combinan innovaciones en varias dimensiones pueden ayudar a integrar los recursos distribuidos en la red. Por ejemplo, las plantas solares FV agregadas acopladas con baterías podrían ayudar a los operadores del sistema al proporcionar servicios para equilibrar el sistema, siempre que existan tecnologías facilitadoras y los marcos de soporte necesarios.

Tercero, los responsables políticos y de toma de decisiones locales necesitan comprender mejor las implicaciones económicas de estos sistemas solares FV para los proveedores de electricidad y los servicios públicos locales. Se deben crear modelos de negocios innovadores para reconciliar los intereses de los responsables con aquellos de los actores emergentes. Estos recién llegados incluyen prosumidores que no solo consumen sino también generan electricidad (ya sea para autoconsumo o para venderlo de regreso a la red); agregadores que agrupan múltiples nuevos actores en el sistema eléctrico para que participen en las actividades de mercado como si fueran un solo actor; y los comerciantes entre pares que pretenden maximizar el retorno económico en la inversión en las instalaciones individuales de generación de energía distribuida (IRENA, 2019a; IRENA, 2019c).

Energía FV solar en el techo, la elección tecnológica de energía renovable más popular en las ciudades, enfrenta límites y desafíos técnicos inherentes. Estos incluyen el espacio limitado per cápita en los techos para la generación de energía en ambientes urbanos densamente poblados, las condiciones desfavorables de las estructuras de los techos, las pérdidas inesperadas por las sombras e instalaciones no calificadas.

A pesar de ello, los sistemas FV en el techo siguen siendo una solución prometedora en ciudades y se ha desarrollado un número creciente de herramientas para ayudar a las autoridades locales y a otras partes interesadas a evaluar las opciones de políticas y financiamiento para la generación en los techos. El simulador SolarCity de IRENA, por ejemplo, se puede aplicar a escalas que varían entre evaluaciones de un solo techo a nivel hogares a análisis a nivel agregado realizados por las autoridades municipales y otras entidades grandes (IRENA, 2019f).

Más allá de las FV en el techo, está surgiendo la nueva generación de tecnologías y productos solares urbanos que está destinada a capturar más de lleno el potencial de la energía solar, especialmente en edificios nuevos y planeados. La meta es cambiar el sistema FV de un generador eléctrico por un tipo de material de construcción que pueda generar electricidad pero que también pueda usarse para construir la estructura urbana. Los sistemas FV integrados al edificio son una forma de esto.

Los sistemas **FV integrados en construcciones (BIPV)** incluyen dos principales categorías de productos: integrados a la fachada (como paneles FV para pared/fachada) e integrados al techo (como tejas y azulejos FV). Los BIPV integrados a las fachadas transparentes y semitransparentes pueden ser una buena solución para las construcciones. Para asegurar el éxito de estas soluciones, tanto la transmitancia como la relación ventana/pared se deben diseñar correctamente para maximizar la generación (NC State University, 2018).

Para BIPV integrados en fachadas instalados verticalmente, la generación máxima de electricidad será diferente a la de la mayoría de los sistemas montados en el techo, por lo que se aplanará la curva de producción de todo el sistema FV en un edificio.

Las tejas y azulejos solares FV para los techos pueden usarse para proporcionar estructura al edificio a la vez que generan electricidad, en especial para construcciones donde no serían posibles los sistemas FV convencionales. Estos productos también pueden ser placenteros estéticamente y más fáciles de instalar y generalmente requieren menos mantenimiento; además, reemplazar un solo azulejo es menos costoso que reemplazar todo un panel.

Otras tecnologías BIPV en desarrollo incluyen fachadas solares adaptativas y tecnologías de seguimiento. Estas tecnologías siguen la ruta del sol a lo largo del día y ajustan su ángulo en consecuencia, aumentando así la eficiencia. Comparadas con las tecnologías BIPV fijas, pueden facilitar una mayor generación en la misma área (Nagy *et al.*, 2016).

Sin embargo, el BIPV aún está en la etapa inicial del desarrollo de la tecnología y necesita superar una variedad de barreras de mercado y tecnológicas. A pesar de su reducción del 60 % en costos de 2004 a 2015, el BIPV sigue siendo más caro que los sistemas FV convencionales (Maturi and Admi, 2018; EASME, 2019). Las principales cuestiones en la evaluación del BIPV incluyen la eficiencia general de conversión del sistema, la flexibilidad en el diseño y la resistencia y vida útil como tecnología de generación de electricidad.

Otras cuestiones se relacionan con el material de construcción, la coeficiencia de temperatura y las propiedades térmicas, la estabilidad y degradación con el tiempo, la seguridad y la rentabilidad, así como la falta de normas técnicas y procedimientos de cualificación armonizados para la evaluación y validación del desempeño (MIT, 2015; SUPSI *et al.*, 2019).

ENERGÍA TERMOSOLAR

En general, los sistemas termosolares se pueden usar para tanto para calefacción como para el suministro de electricidad. El calor del sol generalmente se convierte en electricidad mediante tecnología CSP, la cual generalmente opera a gran escala para hacerla económicamente factible, por lo que se requiere una gran superficie de tierra. Sin embargo, la mayoría de las plantas CSP están instaladas lejos de centros urbanos, en sitios que tienen excelente irradiación solar directa. Su aplicación (y relevancia) para las ciudades es limitada, excepto para tecnologías termosolares concentradas usadas para sistemas de calefacción urbana o instalaciones industriales dentro de los límites de la ciudad.

En contraste, los sistemas termosolares no concentrados, usados principalmente para proporcionar calor, se pueden usar a menores escalas que exigen menos espacio y, por lo tanto, con frecuencia se instalan en áreas urbanas. Esta tecnología incluye colectores termosolares que absorben y convierten la radiación solar en calor, con eficiencias de hasta el 80 % en función de la temperatura operativa (Tripfanagnostopoulos, 2012).

Generalmente se usan tres tipos de colectores solares para sistemas individuales o independientes en las ciudades: plato plano y colectores de tubo de vacío (para producir temperaturas de 120 °C y menos) y colectores de baja concentración (120 °C y más hasta 200 °C) (Weiss and Rommel, 2008). Cada tecnología tiene ventajas y desventajas y la elección depende de la temperatura requerida y otros criterios. Los sistemas termosolares han sido adoptados desde hace mucho para calentar agua y espacios para construcciones, pero también pueden generar calor para procesos industriales. En las ciudades, estos sistemas se pueden colocar sobre techos, fachadas, balcones y cualquier superficie exterior de la construcción.

Los colectores de calor también pueden servir como aislamiento en la cubierta de la construcción, reduciendo así las exigencias de calor y refrigeración (Maurer *et al.*, 2017; Li *et al.*, 2015; Mohajeri *et al.*, 2016; Huide *et al.*, 2017).

Sistemas solares de calentamiento de agua: Para los países en latitudes más bajas, un sistema solar individual de agua caliente puede cubrir hasta 100 % de la demanda residencial (Mathiesen and Hansen, 2017). A mayores altitudes que tengan una amplia variación estacional en la irradiación, los sistemas solo pueden proporcionar del 20 al 60 % de la demanda de calor para el agua doméstica y la calefacción de espacios en ausencia de un sistema de almacenamiento estacional (IEA Task 55, 2019).

Para construcciones comerciales y de servicio que tienen una demanda térmica alta y constante, como hoteles, hospitales y centros comerciales, dichos sistemas con frecuencia se usan para alcanzar ahorros en costos o para demostrar responsabilidad social corporativa. En California, la proporción promedio de la calefacción de agua que puede proporcionar la energía termosolar es de 70 a 80 %, con un rango estacional de 25 a 90 % (Hopkins *et al.*, 2018).

Un creciente número de ciudades y países han adaptado el uso obligatorio de calentadores solares de agua para todas las construcciones nuevas como parte del código de la construcción. China, con una capacidad instalada de calentadores solares de agua de 337,6 gigavatios térmicos (GW_{th}), o 70 % del total mundial, sigue siendo el mercado más grande para la tecnología, mientras que Europa es el segundo mercado más grande, con un sexto de la capacidad instalada en China (Weiss and Spörk-Dür, 2019).

En los países donde el gas natural es barato y es la fuente de calor dominante, los sistemas termosolares son menos competitivos en la ausencia de incentivos o esquemas promocionales para respaldar sus beneficios sociales y ambientales (Rosas-Flores *et al.*, 2016; Wang *et al.*, 2015; Sathishkumar and Balusamy, 2014).

Calefacción urbana solar: En esta aplicación, grandes colectores solares distribuyen el calor producido a través de redes térmicas urbanas. La calefacción urbana solar fue habilitada por la transición de redes térmicas hacia sistemas de calefacción urbana de bajas temperaturas (por debajo de los 60 a 70 grados °C), conocidos como la cuarta generación. El sistema solar se puede instalar sobre el suelo o sobre el techo de una construcción para suministrar calefacción para la construcción, la comunidad, el distrito o la ciudad. La proporción de calefacción urbana solar oscila entre el 10 % y el 50 % del suministro total de calor del sistema de calefacción urbana (Pauschinger, 2016).

El sistema se puede configurar en combinación con una instalación de almacenamiento (como un almacenamiento térmico estacional) para proporcionar calor siempre que se necesite. Debido a la escala de estos sistemas, normalmente tienen menores costos específicos de inversión que las aplicaciones más pequeñas.

Europa ha tomado la delantera con cientos de plantas solares de calefacción urbana y una capacidad total superior a 1,1 GW_{th} en 2019. Dinamarca, Austria, Alemania y Suecia son los que llevan la delantera, seguidos por otros países europeos, los cuales son empoderados por el programa Horizonte 2020 de la UE (SDH, 2019). Los principales beneficios de la calefacción urbana solar son que el sistema se puede instalar con bajos recursos solares, proporciona un costo estable durante al menos 25 años y ya usa tecnología madura y disponible con cero emisiones.

Refrigeración termosolar: Las aplicaciones de la energía termosolar se han extendido gradualmente al sector de refrigeración, acoplados con enfriadores de absorción. Debido a la alta temperatura requerida, generalmente se adoptan los tubos de vacío o colectores solares de concentración que absorben la radiación directa. En la mayoría de las condiciones ideales, los sistemas solares de refrigeración pueden reducir 50 % de la energía primaria requerida para producir energía de refrigeración (Bellos *et al.*, 2016). Para mejorar las tasas de eficiencia y utilización, los sistemas híbridos parecen ser más prometedores. En verano, la energía termosolar se puede usar para enfriar, mientras que en invierno se puede usar para calentamiento de espacios o suministro de agua caliente (Buonomano *et al.*, 2016).

Una ventaja principal de la refrigeración solar, además de ser una opción más ecológica, es el potencial de reducir la demanda máxima en la red durante los veranos calurosos, lo que disminuye los apagones y los costos para la mejora de las redes (Lim, 2017). En Australia, el número creciente de días con pico de demanda durante los días calurosos del país ha casi duplicado el consumo de electricidad y llevó al pico de demanda al punto de requerir la mejora de las redes. Sin embargo, según la Organización de Investigación Científica e Industrial de la Mancomunidad (CSIRO, Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation) el costo marginal para la mejora de las redes para dar cabida a cada unidad de aire acondicionado adicional se estima que sea tres veces el costo de la unidad (Lewis, 2016). Por lo tanto, desde una perspectiva de costos del sistema, tiene sentido que la refrigeración termosolar juegue un mayor papel en el futuro.

La demanda global de refrigeración para las construcciones se triplicó, de 600 teravatios-hora (TWh) en 1990 a 2000 TWh en 2016, y se proyecta que al menos se triplique una vez más para el 2050¹⁴. Con el desarrollo económico social, se espera que la demanda de refrigeración en el sector residencial corresponda al 70 % del aumento total en la demanda de refrigeración durante las siguientes tres décadas y que sobrepase la demanda de calor residencial dos décadas después (IEA, 2018; Dreyfus *et al.*, 2020). Con más ciudades posicionadas para ampliar el uso de energías renovables, se espera que las soluciones de refrigeración impulsadas por energías renovables tengan alta demanda.

Calor solar para procesos industriales: Los sistemas termosolares podrían proporcionar calor para muchos procesos industriales, tales como químicos, industrias textiles, alimentos y agricultura, etc. Los sistemas de calefacción existentes para los procesos industriales usan principalmente combustibles fósiles como petróleo, gas natural y carbón (IRENA, 2015d). Los sistemas termosolares pueden suministrar parte de la demanda de calefacción de una planta en función de la disponibilidad del recurso solar y del tamaño del sistema. Generalmente, el sistema requiere almacenamiento de energía térmica o combustible de respaldo para evitar la interrupción cuando no está disponible la radiación solar. El diseño óptimo del sistema podría simularse con una de varias opciones de software: TRNSYS, T*SOL, POLYSUN y SOLTERM¹⁵.

Un ejemplo de dicho sistema es el sistema COPAG instalado en Marruecos, que usa 61 kilovatios térmicos de energía térmica instalada para suministrar calor a 80 °C a 90 °C para la pasteurización de productos lácteos¹⁶.

SISTEMAS SOLARES FOTOVOLTAICOS-TÉRMICOS (FV-T)

La tecnología FV-térmica es un sistema híbrido con diseño integrado y características de operación para proporcionar tanto energía eléctrica como calor. Su objetivo es alcanzar una eficiencia general de conversión de energía de la radiación solar más alta y abordar el desafío de superficies de tierra disponibles limitadas en las ciudades. El fluido de contacto puede enfriar los paneles FV para mejores eficiencias eléctricas durante las altas temperaturas del verano, a la vez que el calor absorbido se usa para la calefacción directa.

Las nuevas tecnologías híbridas FV-T incluyen el uso de calentadores de aire para precalentar el aire y el uso de nanopartículas y agua como el fluido base (Al-Waeli *et al.*, 2017). Además, el panel solar híbrido de segunda generación Ecomesh es un sistema solar híbrido para el techo que está especialmente equipado con un frente aislante transparente para evitar pérdidas de calor (Figure 19). El objetivo del proyecto es abastecer las necesidades de agua caliente de múltiples edificios de apartamentos (del Amo *et al.*, 2017).

14 Vea <https://climate.nasa.gov/vital-signs/global-temperature>.

15 Para comprender mejor las diferencias entre el software y cuál es mejor usar, vea <https://task49.iea-shc.org/article?NewsID=246>.

16 Para consultar más ejemplos y una base de datos para todos los sistemas solares de calor industriales, vea <http://ship-plants.info>.

Otro desarrollo nuevo en los sistemas híbridos solares FV-T es un modulo que produce electricidad y que está montado con un sistema de recuperación de calor. El sistema de recuperación de calor es una capa sobre el fondo que produce agua caliente mientras el sistema FV solar aún suministra la electricidad (Natasti y Di Matteo, 2016).

Debido a que la investigación de los sistemas híbridos está todavía en su infancia, se siguen ignorando ciertos aspectos. Los altos costos de inversión y la falta de conocimiento e implementación de los sistemas siguen siendo las principales barreras al potencial crecimiento del mercado (Ramos *et al.*, 2017).

Figura 19: Sistema híbrido FV solar-térmico montado en el techo



Fuente: del Amo *et al.*, 2017

3.2 Bioenergía y conversión de residuos en energía

Para el uso de bioenergía urbana, las materias primas preferidas desde las perspectivas ambiental y logística son aquellas que están disponibles localmente. La biomasa local para la producción de energía se puede obtener de los flujos de residuos urbanos, como los residuos sólidos municipales, las plantas de tratamiento de aguas negras y árboles/forestales urbanos¹⁷, así como de áreas agrícolas periurbanas y forestales, en forma de residuos, leña y desechos de granjas de ganado ubicadas cerca de las ciudades. Todos estos se pueden categorizar ampliamente como materias primas de biomasa para conversión de residuos en energía (contrario a la plantación de cultivos energéticos dedicados). La conversión de residuos en energía es particularmente importante para las ciudades, ya que ofrece un medio práctico para incentivar actividades de reciclado de desechos y para minimizar el volumen de desechos, cuyos beneficios ambientales con frecuencia pueden ser mayores a aquellos de la recuperación de energía. Para las ciudades, el valor agregado de la bioenergía urbana es triple:

- La bioenergía puede ofrecer un suministro relativamente confiable y constante de energía gracias a su naturaleza de la energía almacenada, en contraste con la energía FV solar o eólica, que son energías renovables variables.
- La conversión de residuos en energía ofrece una solución prometedora para la gestión de desechos urbanos, a la vez que genera energía para las ciudades. Ofrece una ruta a una economía circular, en particular en la UE, la cual ha establecido objetivos para 2030 para la reducción de vertederos¹⁸ (Ecoprog, 2018). A través de la combustión, el volumen de los residuos sólidos urbanos puede reducirse generalmente en un 85 % a 90 %, dependiendo de la composición de la materia prima (Chaliki *et al.*, 2016; Rogoff and Screve, 2019).

¹⁷ Los árboles/bosques urbanos también podrían ser parte del suministro, usando árboles o ramas que estén muriendo o hayan sido dañados por las tormentas e insectos y enfermedades infecciosas.

¹⁸ El Paquete de Economía Circular (Circular Economy Package) establece que el vertido de las fracciones biodegradables de los residuos sólidos municipales (RSM) debería reducirse en un 65 %, y que el vertido general de los RSM se deberán reducir en un 90 %.
Vea <https://ec.europa.eu/environment/circular-economy>.

- La combinación de lo anterior puede, a su vez, reducir las emisiones de gases de invernadero y demás contaminantes ambientales.

Sin embargo, las aplicaciones de la bioenergía tienen limitaciones. Garantizar un suministro sostenible de materias primas puede ser desafiante, dadas las incertidumbres en el sistema de gestión de residuos y el radio limitado de recolección de residuos agrícolas y forestales. El emplazamiento también puede suponer desafíos relacionados con la disponibilidad de tierra para instalaciones de conversión de residuos en energía a gran escala y relacionados con la aceptación pública, dados los impactos potenciales sobre la calidad del aire y la salud (vea a continuación).

Abordar estos temas requerirá el emparejamiento del sector energético y el sector de gestión de residuos para asegurar acciones concertadas. La conversión *in situ* de la materia prima de biomasa bruta en gránulos y briquetas de madera mediante tecnologías de densificación ofrece una manera eficaz de mejorar la economía de transportar la materia prima a consumidores urbanos, así como incrementar la calidad de la materia prima para una incineración controlada y limpia (IRENA, 2018). Para impulsar la aceptación pública de las plantas de conversión de residuos en energía, son importantes el conocimiento y la educación, así como regulaciones ambientales estrictas. Estos aspectos son fundamentales para el éxito de las aplicaciones de bioenergía en las ciudades. Sin embargo, están fuera del alcance de la discusión actual y merecen su propio análisis independiente.

Las tecnologías de conversión clave para la conversión de residuos en energía urbana incluyen la combustión/incineración directa, la digestión anaeróbica y la gasificación. A través de estos medios, las materias primas se convierten en fuentes de energía, tales como energía térmica para el uso directo como una fuente de calefacción, o en vectores de energía, como electricidad y biogás. En general, dichas tecnologías de conversión están bien desarrolladas y han madurado en las décadas recientes.

Sin embargo, aún existe la necesidad de hacer ajustes técnicos y de configuración del sistema para diferentes composiciones de materias primas, y los contextos de uso con frecuencia son necesarios, dadas las ventajas y desventajas, así como los perfiles de costos de las diferentes aplicaciones (WBA, 2016; Rogoff and Screve, 2019). Las emisiones de polvo fino local suponen un desafío si las calderas están ubicadas dentro de las ciudades y las tecnologías para reducir aún más estas emisiones están en desarrollo. En el futuro, la incineración de madera en las ciudades solo podría tener lugar en calderas más grandes que suministren a las redes de calefacción urbana.

COMBUSTIÓN/INCINERACIÓN DIRECTA

La tecnología de combustión directa, también conocida como incineración, incluye la incineración de biomasa de desechos y la fracción inorgánica de combustible de los residuos en presencia de oxígeno para producir vapor. Los incineradores a gran escala con frecuencia se usan junto con unidades CHP o de cogeneración que puedan suministrar calor y electricidad, alcanzando así una mayor eficiencia energética del sistema. En algunos casos, como con las plantas Dåva de Suecia, la cogeneración también puede proporcionar energía de refrigeración mediante enfriadores de absorción (Recuadro 3).

Recuadro 3: CHP urbana y sistemas de refrigeración en Umeå y Gothenburg, Suecia

Suecia prohibió el vertido de combustible y residuos orgánicos en el periodo 2002-2005, optando en cambio por desviar los residuos mediante reciclado e incineración (Milios, 2013). Con estos esfuerzos intensificados, se ha convertido en el país europeo líder en conversión de residuos en energía per cápita, al convertir 7,6 millones de toneladas de desechos en energía en el 2017 (Crouch, 2019).

En la ciudad de **Umeå**, la empresa de servicios públicos municipales Umeå Energi ha operado dos plantas CHP de conversión de residuos en energía desde 2000 y 2010, respectivamente. Las plantas de cogeneración Dåva 1 y 2, ubicadas a 9 kilómetros al noreste del centro de la ciudad, proporcionan electricidad y energía de calefacción y refrigeración a residentes urbanos a través de sus redes de energía local. La instalación utiliza desechos domésticos e industriales, residuos agrícolas y forestales y otros tipos de biomasa

de desecho como su principal materia prima. El uso de los desechos, acoplado con una alta eficiencia energética del sistema y controles de emisión muy estrictos, han hecho de Dåva una de las plantas más ecológicas y de más bajo consumo en el mundo.

Con una capacidad total de generación instalada de 175 MW y un consumo de alrededor de 1000 toneladas de materia prima al día, las plantas de Dåva proporcionan calefacción a casi 50 000 hogares promedio y suministran electricidad a más de 20 000 hogares anualmente. Las plantas también ayudan a que la municipalidad aborde su creciente problema de desechos, además de facilitar el reciclado de metales pesados y otros materiales de la ceniza de fondo. Finalmente, las plantas está impulsando a Umeå hacia una economía circular.

Fuente: Smart City Sweden, 2020a; Umeå Energi, 2019

Gothenburg, Suecia adoptó conversión de residuos en energía ya desde 1974. Durante las últimas décadas, la ciudad ha construido el parque para convertir 345 000 toneladas de desechos urbanos producidos anualmente por sus sectores municipal, industrial y comercial en calor y electricidad. Esto ha ayudado a Gothenburg a evitar más de 200 000 toneladas de emisiones de CO₂ anualmente, o un cuarto del total las emisiones de CO₂ relacionadas con energía.

Se espera que una decisión de 2017 del Consejo de la Ciudad extienda la aplicación de conversión de residuos en energía para la refrigeración urbana centralizada. Esto requerirá la expansión significativa de la red y la adopción de refrigerantes, sacando provecho de las plantas de conversión de residuos en energía durante el verano, cuando sus capacidades son subutilizadas, así como de los recursos de refrigeración gratuitos, como el río local.

El sistema está programado para empezar a suministrar energía de refrigeración a edificios de

oficinas, hospitales e industrias en Gothenburg en 2035.

Una vez construido, el sistema no solo descarbonizará enormemente el sector de refrigeración de la ciudad, sino que también reducirá las facturas de servicios públicos de los usuarios finales mediante el uso de recursos sostenibles y energía renovable. Esto también reducirá la presión de demanda máxima en las redes de distribución de electricidad durante los veranos calientes, al desbordar la demanda eléctrica de las unidades de aire acondicionado convencionales. Finalmente, la empresa de servicios públicos propiedad de la municipalidad, Göteborg Energi, podrá generar energía limpia a partir de energías renovables locales y a la vez crear oportunidades laborales locales y traer beneficios sociales y ambientales al lograr este objetivo libre de energías fósiles.

Fuente: Smart City Sweden, 2020b; C40 Cities, 2011

Comúnmente se emplean pequeñas calderas de biomasa independientes alimentadas con *pellets* y briquetas de madera, así como estufas de madera modernas, para calentar hogares residenciales en países desarrollados. En contraste, las estufas de madera tradicionales son más típicas para calentar y cocinar en países en desarrollo, en particular en África (incluso en las ciudades). las aplicaciones de pequeña escala¹⁹, en particular estufas sin dispositivos de limpieza de gas de combustión, se asocian a altas emisiones de material particulado y otros constituyentes de emisión importantes (IEA, 2008). Por ejemplo, el nivel de material particulado por megajoule generado por estufas de madera tradicionales puede ser 1000 veces mayor que el de las calderas de lecho fluidizado a gran escala (van Loo and Koppejan, 2002). Así, el uso de aplicaciones de combustión de biomasa a menor escala generalmente no sería recomendable en áreas urbanas sin medidas de control de emisiones.

Las instalaciones de combustión de escala media a más grande generalmente usan tecnologías de combustión avanzadas con mayores eficiencias de combustión, procedimientos operativos adecuados y medidas eficaces de limpieza de gases de combustión, como un precipitado electrostático, cámara de filtro o depurador de gas ácido. Incluso así, los niveles de emisión tienen que monitorearse periódicamente, anotando las afecciones de variaciones en la composición de la materia prima, entre otros factores (Nussbaumer, 2010; Mikus *et al.*, 2016). Como un producto derivado de la limpieza del gas de combustión, la ceniza volátil emitida a través de la chimenea contiene material de particulado fino, metales pesados tóxicos y contaminantes orgánicos persistentes, como la dioxina, que siguen siendo un problema sin resolver. Solo en Europa, las plantas de conversión de residuos en energía emiten más de 2 millones de toneladas métricas de ceniza volátil al año, o alrededor del 1 % de la producción total anual de desechos de la región. Se ha hecho cierto progreso en este frente: por ejemplo, NORSP está probando un proceso para convertir la ceniza volátil tóxica en residuos no tóxicos y materias primas para otras industrias (EEA, 2016; Crouch, 2019).

19 La combustión incompleta en aplicaciones a menor escala es una causa principal de mayores emisiones de material particulado.

En comparación con la ceniza volátil, del proceso se genera una mayor cantidad de ceniza en el fondo del incinerador. Normalmente, del 18 % al 25 % de los desechos sólidos municipales mixtos termina como ceniza de fondo, una porción variada de la cual (incluidos elementos féreos y no féreos) puede reciclarse técnicamente dependiendo de la composición del desecho y de la legislación en un país determinado (ISWA, 2105). La escoria restante generalmente se usa para hacer materiales de construcción, sujeto a regulaciones y la economía.

Entre la variedad de tecnologías de combustión/incineración directas, aquellas usadas más comúnmente en las instalaciones de conversión de residuos en energía son la incineración masiva, los incineradores modulares y los sistemas de combustibles derivados de residuos. Sus características tecnológicas clave se describen a continuación.

Las aplicaciones de **incineración masiva** han sido utilizadas ampliamente —en particular en Europa, los EE. UU. y Japón— desde 1876, donde se construyó la primera planta de incineración en Nottingham, RU (German Environment Agency, 2008). Existen miles de sistemas de incineración masiva en el mundo, con capacidades de desechos diarias que varían desde menos de 100 toneladas hasta más de 2000 toneladas (Mikus *et al.*, 2016).

La tecnología generalmente se usa para incinerar residuos sólidos sin procesar, la composición de los cuales varía de una descarga a otra. Maximizar la combustión completa requeriría cantidades excesivas de aire para asegurar un mezclado y una turbulencia suficientes en la cámara de combustión. Para alcanzar una mayor eficiencia de combustión, se han hecho mejoras en el diseño de los incineradores. Sin embargo, la eficiencia general del sistema está determinada no solo por el desempeño de la conversión térmica, el cual puede ser de hasta 60 % en el caso del incinerador de agua-pared, sino también por la eficiencia eléctrica, la cual generalmente es mucho más baja. La eficiencia promedio neta del sistema varía entre el 18 % y el 27 %, mientras que los sistemas altamente eficientes pueden llegar hasta un 32 % (Mikus *et al.*, 2016; ISWA, 2013; US EPA, 2018).

El proceso de **incineración modular** (también conocido como incineración con falta de aire) también quema residuos sin procesar en cámaras de dos etapas, pero, en la mayoría de los casos, esto ocurre en condiciones de falta de aire. Sin embargo, algunas configuraciones pueden operar con aire en exceso. A diferencia de la incineración masiva, los incineradores tienden a tener un tamaño más pequeño, con capacidades de 10 a 200 toneladas al día. Pueden moverse de un sitio a otro cuando hay pocos desechos y entonces aumentar su capacidad cuando incrementan los desechos. Los incineradores modulares también tienen ventajas en cuanto a los costos gracias a su manufactura prefabricada y el menor tiempo necesario para la instalación, aunque su vida útil es de solo entre un tercio y la mitad de los sistemas de incineración masiva (Mikus *et al.*, 2016).

En contraste, un sistema de combustión de **combustible derivado de residuos** está diseñado para incinerar desechos combustibles procesados en configuraciones de combustión dedicadas²⁰ usando calderas de suspensión o semisuspensión y calderas de lecho fluidizado, entre otras. Aún cuando el tratamiento previo de desechos contribuye a mejorar las eficiencias térmicas, supone desafíos técnicos y logísticos principalmente asociados con la medida en la que se extrae el metal y el vidrio del flujo de desechos. Los requisitos del tratamiento previo difieren en función de la aplicación del combustible derivado de residuos, por ejemplo, si se utilizará como combustible para una planta CHP o para producir calor para procesos industriales (Giugliano and Ranzi, 2016; Mikus *et al.*, 2016).

En general el tratamiento previo de los desechos parece ser una buena aproximación para mejorar la propiedad térmica de las materias primas/combustibles, pero causa problemas que en muchos casos son difíciles de resolver de manera rentable.

²⁰ En la mayoría de los casos, la combustión conjunta con otros combustibles como el carbón en una cámara de combustión convencional tiene un bajo rendimiento y provoca problemas mecánicos como escorificación o daños a la pared del horno.

DIGESTIÓN ANAERÓBICA PARA PRODUCIR BIOGÁS URBANO

La digestión anaeróbica es otra tecnología de conversión de residuos en energía bien establecida que se usa comúnmente en las ciudades. En este proceso, los residuos biodegradables se convierten en energía mediante una serie de procesos de digestión bacteriana en condiciones anaeróbicas en un biodigestor. El principal producto energético, el biogás, es un vector de energía gaseosa que generalmente consta de 55 % a 75 % de metano, según la composición de la materia prima y el diseño del biodigestor. El biogás se puede usar para la generación de electricidad, como un combustible de calefacción o vehículo, o para la inyección en las tuberías de gas natural después de actualizarse a la calidad del gas natural al eliminar las impurezas²¹ (Mikus *et al.*, 2016).

En las ciudades, la tecnología de digestión anaeróbica se ha aplicado comúnmente en plantas municipales de tratamiento de aguas residuales y en instalaciones de tratamiento de desechos afiliadas con las industrias de alimentación o de ganado. El biogás es un producto derivado del sistema de manejo de desechos que requiere el tratamiento de lodos residuales y la fracción que se descompone de los residuos sólidos municipales. El biogás también se puede recolectar de instalaciones de vertederos gestionados de manera adecuada y generalmente se usa para la generación de electricidad más que para otros fines, principalmente debido a la ubicación remota de los sitios de los vertederos.

Los sistemas de digestión anaeróbica en las industrias, como el procesamiento de alimentos, ganado, sacrificio de animales y producción farmacéutica son una parte fundamental de los esfuerzos por asegurar que los desechos descargados de las instalaciones sigan las regulaciones ambientales.

La producción de biogás como un producto derivado puede mejorar la economía de dichas instalaciones en esas industrias (Al Seadi *et al.*, 2008; Bachmann, 2015). La utilización del biogás producido de estas instalaciones no solo mejora la eficiencia del sistema de la gestión de recursos al producir energía de los desechos, sino que también mitiga el cambio climático al convertir el metano en CO₂²².

Muchos países europeos, entre ellos Austria, Alemania y los Países Bajos son líderes en esta área. Por ejemplo, en Meepel, Países Bajos, el biogás generado de la planta de tratamiento de aguas residuales se usa como combustible para una planta CHP que sirve a una red de calefacción urbana de 3400 hogares (van Leeuwen *et al.*, 2015).

La producción de biogás urbano a gran escala de las plantas municipales de tratamiento de aguas residuales, las plantas municipales de desechos sólidos y el procesamiento de alimentos ha dominado el mercado global, con más de 20 000 instalaciones de biogás en todo el mundo y la adición anual de alrededor de 1000 proyectos. En el otro extremo del espectro, los biodigestores de pequeña y micro escala, con frecuencia diseñados específicamente para hogares individuales, están siendo adoptados cada vez más como una tecnología emergente para el tratamiento de residuos orgánicos urbanos. Por ejemplo, en más de 90 países se han instalado alrededor de 1000 biodigestores HomeBiogas tamaño hogar que utilizan hasta 12 litros de desechos de la cocina (Lemonde, 2020).

21. Consta principalmente de CO₂ y cantidades ínfimas de vapor de agua, oxígeno, nitrógeno y sulfuro de hidrógeno.

22. El factor de emisión de gas invernadero del metano es hasta 25 veces el del CO₂.

3.3 Potencia eólica urbana

Aún cuando la energía eólica se ha desarrollado de manera significativa durante la última década, a duras penas ha penetrado el entorno construido. Las barreras a las aplicaciones urbanas de energía eólica incluyen el tamaño de las turbinas eólicas prevaletientes y su incapacidad de capturar bajas velocidades del viento y flujos turbulentos, la escasa comprensión de la aerodinámica del viento en las ciudades y la perturbación visual y acústica, entre otras.

Si bien existen algunos ejemplos de turbinas eólicas urbanas que generan electricidad, aún se necesita mejorar significativamente su desempeño y la implementación a gran escala está ausente. El uso de turbinas eólicas en ambientes urbanos está principalmente en la fase de investigación y desarrollo (I+D). La falta de datos experimentales es un gran inconveniente en el desarrollo de turbinas eólicas urbanas.

Sin embargo, conforme se implementen nuevos diseños de turbinas y su desempeño sea evaluado, se podrá progresar hacia soluciones comercialmente factibles (Dilimulati *et al.*, 2018). La investigación necesaria para la optimización de las turbinas eólicas se realiza usando simulaciones computacionales de dinámicas de fluidos (CFD, por sus siglas en inglés) del viento. Con esta tecnología, se pueden hacer cálculos adecuados relacionados con el comportamiento del viento alrededor de los edificios. Posteriormente, se puede calcular el potencial del viento y se pueden realizar optimizaciones para alturas de buje y los costos (Yang *et al.*, 2016). Sin embargo, estas simulaciones toman tiempo y requieren de computadoras potentes, ya que las áreas urbanas pueden ser muy complejas. Se están realizando investigaciones para simplificar los modelos. Además, muchos estudios de CFD se centran en un solo edificio o en entornos urbanos simplificados, lo que puede causar incertidumbres de hasta el 45 %. Solo 14 % de los informes revisados por Toja-Silva *et al.* (2018) se ocuparon de ambientes urbanos reales (Simoes and Estanqueiro, 2016; Toja-Silva *et al.*, 2018).

Hay tres opciones principales para las aplicaciones de turbinas eólicas en las ciudades: independientes, actualizadas en construcciones existentes e integradas en términos arquitectónicos a la construcción. Las dos últimas están agrupadas con el término turbinas eólicas integradas a la construcción (Stathopoulos *et al.*, 2018). Las turbinas en sí se pueden dividir en dos tipos generales: eje horizontal o eje vertical. Las turbinas con eje horizontal han dominado en décadas recientes, mientras que las turbinas con eje vertical se han estado desarrollando en los últimos cinco a ocho años, y su participación de mercado sigue siendo relativamente más baja.

La capacidad nominal promedio de una turbina eólica con eje vertical es de alrededor de 7 kW, mientras que en el caso de las turbinas con eje horizontal, es mucho menor (Pitteloud and Gsanger, 2017; Stathopoulos *et al.*, 2018). Las investigaciones más recientes indican que las turbinas con eje vertical son muy prometedoras para aplicaciones urbanas, ya que pueden producir electricidad a partir de vientos turbulentos y multidireccionales en las ciudades (Dilimulati *et al.*, 2018).

En todo el mundo (no solo para aplicaciones en las ciudades), la capacidad instalada de pequeñas turbinas eólicas tuvo un total de alrededor de 948 MW en el 2015. Los líderes del mercado en la producción e instalación son China, los EE. UU. y el RU (Pitteloud and Gsanger, 2017). Sin embargo, las aplicaciones urbanas son limitadas debido en parte a la aceptación social. No obstante, los muchos beneficios de las turbinas eólicas urbanas incluyen la capacidad de generar electricidad en la misma ubicación que el consumo (lo que da lugar a cero transmisión o pérdidas de distribución), dependencia reducida de una red, reducción de los gases de invernadero y soporte para el desarrollo sostenible. Pequeños éxitos han tenido lugar en las décadas recientes, que indican un movimiento en dirección positiva (Kumar *et al.*, 2018).

En 2015, Grieser *et al.* encontraron que las pequeñas turbinas eólicas actuales solo pueden ser rentables en situaciones específicas e ideales. Su factibilidad económica depende, entre otros factores, de la velocidad promedio del viento, la altura del buje y la densidad de la construcción, ya que estas son las principales características que influyen sobre la potencia de salida de las turbinas. Para los hogares privados, las inversiones en pequeñas turbinas eólicas solo son rentables con velocidades promedio del viento de 4 a 4,5 metros por segundo. Es más, la densidad de construcciones afecta negativamente la rentabilidad de las turbinas. Además, Grieser *et al.* encontraron que la inclusión de un sistema de baterías aumentaba el valor neto presente de una inversión en una pequeña turbina eólica. También, las tarifas de alimentación hacen que las inversiones para los hogares privados sean más atractivas (Grieser *et al.*, 2015).

Las turbinas con eje horizontal son mucho menos eficaces en las ciudades que en áreas abiertas. La eficiencia de las turbinas se reduce rápidamente con la creciente turbulencia del viento. Para turbinas convencionales, la producción se puede optimizar usando difusores o bordes verticales (Stathopoulos *et al.*, 2018). Las aplicaciones urbanas también enfrentan desafíos relacionados con la producción de ruido, perturbaciones visuales y seguridad pública (Kumar *et al.*, 2018).

Las turbinas con eje horizontal se basan en el principio de elevación del viento. Los diseños pueden volverse complejos debido a los muchos componentes diferentes involucrados, que incluyen la torre, el rotor, los mecanismos de viraje y frenado, aspas, núcleo, caja de engranajes y más. La altura de la torre también es una consideración importante en el diseño de la turbina. Mientras más alta la turbina, mejor la eficiencia y mayor la producción de potencia. Sin embargo, con una mayor potencia eólica también aumenta el ruido. Las principales ventajas de las turbinas con eje horizontal son su alta eficiencia y capacidad, y el poder de ampliarlas fácilmente para una producción de potencia a gran escala.

Las desventajas son, además de las mencionadas arriba, el riesgo de golpear a la vida silvestre, interferencia de radares, mantenimiento y uso de la tierra (Óskarsdóttir, 2014).

Entre las tecnologías existentes de las turbinas eólicas, las turbinas con eje horizontal operan de mejor manera con un flujo de aire estrictamente horizontal y una rugosidad de la superficie lo más pequeña posible. Pueden alcanzar eficiencias muy bajas con vientos unidireccionales y son las más eficientes para la recolección de energía eólica a gran escala en campos abiertos (Dilimulati *et al.*, 2018; Óskarsdóttir, 2014).

Las turbinas con eje vertical son una tecnología prometedora para aplicaciones urbanas, en parte debido a que son independientes de la dirección del viento, y los vientos en los entornos urbanos son muy turbulentos y multidireccionales. El diseño con eje vertical elimina la necesidad de un mecanismo de viraje y las turbinas ofrecen un diseño simple, bajo mantenimiento y producción simple. En varios tipos de turbinas con eje vertical, se pueden usar aspas rectas, lo que reduce grandemente los costos de producción. Las turbinas con eje vertical son fáciles de usar por módulos como unidades independientes o, cuando están integradas en redes eléctricas (Saeidi *et al.*, 2013).

Las turbinas eólicas con eje vertical muestran mejores resultados en los techos que en los campos abiertos, a pesar de cualquier dificultad técnica o económica. También producen menos ruido y tienen diseños más atractivos. Las principales desventajas son que las turbinas tienden a dejar de operar en condiciones de viento racheado, tienen un par de arranque deficiente, un mal encendido automático y sufren inestabilidades dinámicas. Además, las turbinas están diseñadas para operar a bajas alturas, así que están limitadas a las condiciones de velocidad de vientos más bajos (Óskarsdóttir, 2014). Actualmente, las turbinas eólicas con eje vertical son más comunes en aplicaciones remotas fuera de la red (Óskarsdóttir, 2014).

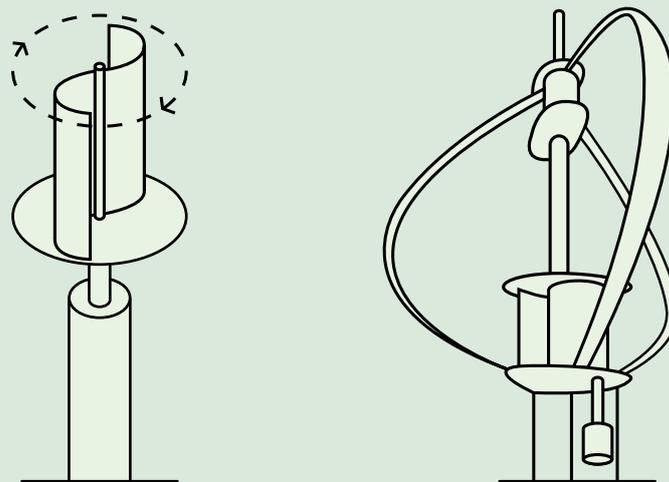
Las tecnologías con eje vertical mejor conocidas son las turbinas Savonius y Darrieus (figura 20). En lugar de elevación, las turbinas están diseñadas con el principio de arrastre del viento. La turbina Savonius parece ser muy adecuada para las aplicaciones urbanas, ya que tiene un diseño de microturbina simple y funciona con velocidades de arranque del viento relativamente bajas. La turbina Darrieus es muy adecuada para instalaciones en el techo y presenta baja perturbación acústica y visual (Dilimulati *et al.*, 2018; Óskarsdóttir, 2014).

A primera vista, las características descritas anteriormente hacen que las turbinas con eje vertical sean más adecuadas que las turbinas con eje horizontal para aplicaciones en las ciudades. Sin embargo, las turbinas con eje horizontal son más eficientes, incluso en las ciudades, lo que ha dado lugar a su uso más prevalente.

Además, la velocidad de corte de las turbinas con eje horizontal es inferior en promedio que para las turbinas con eje vertical, lo que es más favorable en un entorno urbano, y los pares de arranque son bajos (Stathopoulos *et al.*, 2018; Tummala *et al.*, 2016; Toja-Silva *et al.*, 2013).

Las dificultades operativas de las turbinas con eje vertical podrían superarse usando controles para turbinas. Cuando el comportamiento del viento en las ciudades se comprende totalmente, estos mecanismos de control podrían diseñarse para cambios rápidos en las velocidades del viento y el par (Dilimulati *et al.*, 2018). Conforme el desarrollo y las tecnologías de las turbinas con eje vertical sigan progresando, es probable que su aceptación y sus costos tiendan a mejorar (Kumar *et al.*, 2018).

Figura 20: Rotor Savonius (izquierda) y rotor Darrieus (derecha)



Fuente: www.reuk.co.uk/wordpress/wind/savonius-wind-turbines/ (izquierda) y www.reuk.co.uk/wordpress/wind/darrieus-wind-turbines/ (derecha)

3.4 Uso directo de la energía geotérmica

La energía geotérmica se puede usar directamente para satisfacer la demanda de servicios térmicos, principalmente calefacción y refrigeración de espacios, así como agua caliente en las ciudades. Esto puede hacerse extrayendo energía almacenada en la roca o tierra debajo del suelo (a profundidades que oscilan entre los 10 metros a cientos de metros o más profundo²³), dependiendo de la temperatura de suministro y la calidad de los recursos geotérmicos. Los expertos industriales generalmente concuerdan en que la energía geotérmica a menor temperatura (alrededor de 10 °C a 150 °C) es más adecuada para uso térmico directo que para la generación de electricidad, lo que requeriría una temperatura mucho más alta para alcanzar la eficiencia y economía deseadas; existen recursos geotérmicos a bajas temperaturas en la mayoría de los países (Lund, 2016; ESMAP, 2012; Moya *et al.*, 2018).

La energía geotérmica a baja a mediana temperatura también es ideal como una fuente de calor para la calefacción urbana y, en muchos casos, puede usar los sistemas de calefacción urbana simplemente reemplazando la fuente de calor de combustible fósil con una fuente de calor geotérmica. La calefacción urbana geotérmica ha probado ser una alternativa renovable, para mínimos de demanda y rentable a la calefacción con energías fósiles en las ciudades.

Con la necesidad de descarbonizar el sector de la calefacción y reconocer el potencial y las ventajas del uso directo de la energía geotérmica, las aplicaciones en las ciudades han estado creciendo. La capacidad instalada global del uso geotérmico directo se ha más que duplicado desde el 2010, al alcanzar 107 727 megavatios térmicos (MW_{th}) implementados en 88 países en el 2019. Este aumento se debe en gran parte al aumento de la generación mediante bombas de calor geotérmicas (de fuente terrestre), que representan el 71,6 % de la capacidad instalada total, seguida por aplicaciones de calefacción de espacios al 12 % (Lund and Toth, 2020). Se espera que continúe la tendencia ascendente conforme la Alianza Geotérmica Global aspira a lograr un crecimiento de más del doble en calefacción geotérmica para el 2030 (cuadro 4).

23 No hay una definición clara del umbral entre geotérmico superficial y profundo. En general, lo que sea que se encuentre a una profundidad de entre 15 y 400 metros se considera como un recurso geotérmico superficial. Vea <https://geothermalcommunities.eu/assets/elearning/6.22.Shallow%20Geothermal%20Systems.pdf>.

Recuadro 4: Alianza Geotérmica Global

Lanzada en diciembre de 2015 en la XXI Conferencia de Partes de la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático (COP21 de CMNUCC), la Alianza Geotérmica Global ofrece una plataforma de múltiples partes interesadas inclusiva y neutral para un diálogo mejorado, cooperación y acción coordinada entre los actores públicos, privados, intergubernamentales y no gubernamentales que comparten una visión común de acelerar la implantación de electricidad geotérmica para la generación de electricidad y el uso directo.

La Alianza ha tenido una meta aspiracional de alcanzar un crecimiento de cinco veces en la capacidad instalada para la generación de electricidad geotérmica y un crecimiento de más del doble en la calefacción geotérmica para 2030.

Más específicamente, la Alianza aspira a:

- promover un ambiente propicio para atraer inversiones en energía geotérmica;
- proporcionar soporte personalizado a regiones y países con potencial de mercado geotérmico;
- facilitar el intercambio de conocimientos y experiencia entre las partes interesadas clave junto con la cadena de valor geotérmico;
- identificar y promover modelos para compartir y mitigar riesgos para atraer inversión privada e integrar instalaciones geotérmicas en mercados energéticos; y
- promover la visibilidad de energía geotérmica en los debates globales de energía y clima.

Actualmente, la Alianza reúne alrededor de 70 estados miembro e instituciones socias de la industria geotérmica, socios de desarrollo e instituciones financieras internacionales y academia. Para obtener más información, visite www.globalgeothermalalliance.org.

En términos de aplicaciones, el uso directo de la energía geotérmica se puede integrar en los sistemas de calefacción y/o refrigeración urbano en las ciudades o instalarse como un sistema independiente para una construcción individual o un bloque de construcciones en casos donde la demanda de calor es inadecuada para justificar la inversión en nuevas redes térmicas. La calefacción urbana geotérmica se apoya en pozos que miden en promedio 2 kilómetros de profundidad pero que requieren poca área superficial, y los pozos y las centrales de calor que los acompañan pueden tejerse fácilmente en el paisaje urbano, prácticamente de manera invisible. Tan solo en Europa, al menos el 25 % de la población vive arriba de recursos geotérmicos que son ideales para la calefacción urbana geotérmica, con lo que se reemplazaría la calefacción urbana a partir de combustibles fósiles de la actualidad²⁴.

En general, la instalación de un sistema de energía geotérmica para el uso directo es mucho más fácil (y por tanto menos costosa) en un edificio, bloque o barrio de la ciudad nuevos, en lugar de adaptarlo a las estructuras existentes. Sin embargo, esto no significa que los sistemas no puedan implementarse en arquitecturas o barrios existentes. Por ejemplo, Suiza que tiene una capacidad geotérmica de 5,32 MW_{th} por 100 kilómetros cuadrados y la más alta densidad del mundo de intercambiadores de calor de pozo, clasificó en el primer lugar en el uso directo de energía geotérmica por superficie de tierra en 2019. Desde 2011, más del 30 % de todas las perforaciones en el país se realizaron para las construcciones existentes, lo que llevó a unos 700 a 800 kilómetros de nuevos intercambiadores de calor de pozo (Scanner, 2017; Lund and Toth, 2020).

Los sistemas de bombas de calor geotérmico (de fuente terrestre) —los sistemas más comúnmente adoptados— constan del sistema terrestre y una bomba de calor adjunta, con el otro extremo de la bomba de calor conectado a la red de distribución de calor dentro de las construcciones para proporcionar servicios térmicos.

Para el sistema terrestre, los tipos más comunes son los sistemas de circuito abierto y circuito cerrado, y el último puede dividirse en dos categorías: horizontal y vertical. Sus principales características se describen en la tabla 5.

En la mayoría de los casos, se requiere la perforación de pozos geotérmicos; sin embargo, los sistemas horizontales de bombas de calor de fuente terrestre generalmente solo requieren que se retire la tierra o zanjas superficiales de menos de cinco metros de profundidad. Ambas son costosas y representan la mayor proporción del costo total del proyecto, aunque la configuración horizontal es comparativamente más barata, pero requiere una mayor superficie de tierra para las zanjas, lo que puede ser un desafío en las ciudades.

Dado que la energía geotérmica se puede usar tanto para la calefacción como para la refrigeración durante diferentes estaciones o momentos, un sistema híbrido puede usar el terreno superficial como almacenamiento de energía térmica, compensando fundamentalmente el reabastecimiento natural de la energía geotérmica. Los sistemas de almacenamiento de energía térmica en sondeos (BTES, por sus siglas en inglés) y los sistemas de almacenamiento de energía térmica en acuíferos (ATES, por sus siglas en inglés) son dos tecnologías comúnmente adoptadas (Bayer *et al.*, 2019).

Finalmente, debe considerarse que el calor residual descargado de las centrales eléctricas geotérmicas con frecuencia se usa para satisfacer una variedad de servicios de calefacción en cascada, desde la calefacción urbana a la cría de peces, mejorando así la eficiencia energética del sistema y el desempeño económico cuando los recursos geotérmicos con alta entalpía se pueden explotar en una ciudad o sus alrededores (Moya *et al.*, 2018). A nivel mundial, la capacidad instalada de generación de electricidad geotérmica tuvo un total de 14 GW en el 2019, gran parte de la cual está configurada como CHP (IRENA, 2020c).

24 Veá www.geodh.eu en "Potencial".

Tabla 5: Características clave de los sistemas de bomba de calor geotérmica de circuito abierto y circuito cerrado

Sistema terrestre	Fuente de calor	Fluido de transferencia de calor	Escala	Profundidad	
Circuito abierto (restringido por la disponibilidad de acuíferos adecuados)	Acuífero (agua subterránea)	Agua subterránea como medio de intercambio de calor con la tierra	Grande (p. ej., 10 MW _{th} en Louisville, Kentucky, EE. UU.)	En la mayoría de los casos dos pozos/doblete, menos de 50 metros de profundidad	
Circuito cerrado	Horizontal	Radiación solar absorbida/almacenada en la capa superior de la tierra	Refrigerante circulado en los evaporadores de la bomba de calor	Pequeña escala	Generalmente menos de 5 metros de profundidad
	Vertical	Radiación solar en la parte superior, con energía geotérmica en la parte más profunda	Fluido transportador de calor sintético	Pequeño y grande dependiendo del número de intercambiadores de calor de pozo (BHE, por sus siglas en inglés); más alto por densidad de la planta en Europa: 154 BHE cada uno con una profundidad de 70 metros; en el mundo: 400 BHE cada uno con una profundidad de 130 metros	De 15 a 20 metros a varios cientos de metros de profundidad usando BHE, generalmente alrededor de 100 metros
Otros:	Pozo con columna de soporte	Igual que el circuito cerrado vertical	Igual que el circuito cerrado vertical	Grande	Varios cientos de metros
	Nuevo concepto	Agua de minas y túneles			

Basado en Scanner, 2005

3.5 Desarrollo de la red inteligente a través de la innovación

Para implementar las opciones de energía renovable anteriores en las ciudades, la infraestructura de energía urbana, en particular las redes de distribución de electricidad, deben ser flexibles para permitir altas participaciones de energías renovables variables en las ciudades (especialmente solar PV, pero también potencialmente energía eólica cerca de las ciudades). Al mismo tiempo, la infraestructura energética debe ser “inteligente” para integrar aplicaciones en otros sectores, como el de transporte y calefacción y refrigeración.

Las tecnologías digitales avanzadas, las cuales se han adoptado cada vez más en sistemas de energía eléctrica, demuestran un fuerte potencial para maximizar los beneficios y la integración de las tecnologías de energías renovables al automatizar el monitoreo y la operación de activos (Hossain *et al.*, 2016).

Las tecnologías digitales se pueden usar para equilibrar la variabilidad de ciertas energías renovables —en particular energías renovables variables con demandas, como FV solar en pequeña escala y micro turbinas eólicas— mediante tecnologías de predicción basadas en datos, sistemas de almacenamiento de energía, VE y otras tecnologías acopladas al sector, permitiendo así una mayor integración de las ERV en redes energéticas locales (Hossain *et al.*, 2016).

Aún así, el desarrollo continuo de redes inteligentes y su operación y gestión optimizados requiere de innovaciones en tecnologías de facilitación y operación del sistema de distribución de energía, como baterías detrás del medidor, carga inteligente de VE y herramientas avanzadas de predicción del clima; al mismo tiempo, son igualmente importantes nuevos modelos de negocios y diseño y regulación de mercados, como los esquemas de facturación neta y las tarifas de tiempo de uso (IRENA, 2019a). Esto es cada vez más fundamental conforme, con el tiempo, los sistemas energéticos urbanos se vuelven más complejos, basados en energías renovables y descentralizados.

A cambio, las redes inteligentes presentan nuevas oportunidades no solo para mayores participaciones de energías renovables variables, sino también para la mejora de la eficiencia del sistema. Se podría ahorrar un consumo de energía estimado en 20 % a 30 % en construcciones a través de la operación y gestión optimizados, sin cambios de equipo importantes en las construcciones. Igualmente, una red inteligente con estrategias sólidas de respuesta a la demanda —respaldadas por una variedad de tecnologías relacionadas con incentivos y esquemas de precios de tiempo de uso— integrarían mejor mayores participaciones de ERV al cambiar el consumo de energía (o producción) a periodos de baja (o alta) demanda y usar de manera eficiente los sistemas de almacenamiento (si estuvieran instalados), a la vez que reduciría el consumo de electricidad. En la mayoría de los casos, un esquema eficaz de respuesta a la demanda podría reducir la demanda máxima de electricidad en un 10 % a 15 % estimado. (Reynolds *et al.*, 2017).

Sin embargo, para implementar soluciones innovadoras concretas, las redes inteligentes en las redes de distribución necesitarían estar complementadas con cambios al diseño y regulación del mercado, así como protocolos para redes inteligentes para la interoperabilidad entre los activos y los sistemas (DNV GL, 2019a).

Gracias a la digitalización, se están facilitando nuevos modelos de negocios que generan oportunidades tanto para consumidores como para operadores de sistemas. Por ejemplo, el surgimiento de nuevos actores, como los agregadores, que agrupan los recursos energéticos distribuidos en una sola planta eléctrica virtual pueden ser una parte integral de la solución para facilitar el aumento de ERV en las ciudades (IRENA, 2019c). Otra solución innovadora que es altamente relevante para las ciudades, especialmente en los sectores eléctricos no agrupados, es la creación de mercados locales de flexibilidad, en los cuales el operador del sistema de distribución puede adquirir flexibilidad de un mercado en línea que reúne todos los recursos disponibles al nivel de la distribución. Varias partes interesadas están poniendo a prueba iniciativas en curso en el RU y Alemania (IRENA, 2019g).

Con sectores de uso final cada vez más digitalizados, los avances tecnológicos en inteligencia artificial con miras al futuro, al ser integrados en sistemas de gestión de redes inteligentes, ofrecerían una oportunidad prometedora para maximizar la eficiencia de los sistemas energéticos futuros y del mercado, con altas participaciones de fuentes de ERV acopladas con sistemas de almacenamiento de energía y otras tecnologías acopladas al sector (DNV GL, 2019b).

La carga inteligente para VE es un buen ejemplo de esto. Con el número creciente de VE, el cobro descontrolado supone un desafío creciente a la operación de redes de distribución porque puede crear un incremento rápido en la demanda de electricidad y dar como resultado una alta congestión de la red. Esto da lugar a preguntas sobre cómo se deberían manejar las demandas de carga máximas y qué políticas y marcos regulatorios se necesitarían implementar para asegurar una integración efectiva de los sectores de los sectores eléctrico y del transporte en un contexto urbano.

El documento de IRENA *Innovation outlook: Smart charging for electric vehicles* (Perspectiva de innovación: carga inteligente para vehículos eléctricos) muestra que la carga inteligente apoyada por tecnologías digitales puede facilitar la integración de altas participaciones de generación renovable variable. La carga inteligente aprovecha la capacidad de almacenamiento en baterías con la que los VE deben mejorar la flexibilidad de la red, al mismo tiempo que reduce el pico de demanda en comparación con lo que sería de otra manera, y reduce el costo de la carga (IRENA, 2019b).

Algunas de las tecnologías digitales ahora disponibles son relativamente nuevas y necesitan estar mejor integradas en los sistemas energéticos urbanos. Las redes inteligentes continúan enfrentándose a las tecnologías de digitalización no estandarizadas y escasamente distribuidas, así como con regulaciones subdesarrolladas. En un informe de Eurelectric se identifican brechas regulatorias que inhiben la inversión en redes inteligentes en la UE (Rodrigues da Costa *et al.*, 2011), que incluyen tasas de retorno subóptimas e inestabilidad normativa.

Los reguladores también están utilizando esquemas limitados de evaluación de rentabilidad, los cuales se considera que penalizan el gasto en I+D o los proyectos piloto de las redes inteligentes y, en cambio, fomentan los gastos habituales (Rodrigues da Costa *et al.*, 2011).

Además, la falta de claridad percibida en los roles y las responsabilidades de los actores individuales en el mercado ha ralentizado el despliegue de medidores inteligentes, un dispositivo clave para proporcionar información detallada a los actores sobre los patrones de consumo de electricidad de los usuarios finales y, por lo tanto, un componente esencial para la red inteligente y para nuevos modelos de negocios (Rodrigues da Costa *et al.*, 2011). Reynolds *et al.*, 2017). Una evolución clave observada en los países de Europa del Norte es la creación de los denominados concentradores de datos para datos de medición de electricidad, puestos a disposición en igualdad de condiciones para varios actores del sector energético, incluidos los consumidores (IRENA, 2019g).

Existen opciones para enfrentar estos desafíos. El primer paso es reconocer la necesidad de combinar requisitos técnicos para equipo, software y protocolos de comunicación, facilitando políticas y requisitos normativos de apoyo, así como en términos de roles y responsabilidades claramente definidos entre los actores establecidos y emergentes en los sistemas eléctricos municipales. Por ejemplo, para facilitar el desarrollo y la implementación de redes inteligentes, se deben poner en práctica y perfeccionar estrategias unificadas de control y gestión mediante un proceso de aprendizaje iterativo entre la teoría y la aplicación, que incluya operadores del sistema, consumidores, proveedores de tecnología y generadores de electricidad, entre otros.

3.6 Redes urbanas de energía térmica

La calefacción urbana se ha aplicado en todo el mundo desde hace mucho tiempo. Es adecuada para áreas urbanas que tienen altas densidades lineales de calor, donde la inversión en la infraestructura de la red térmica se puede justificar financiera y económicamente y donde se pueden alcanzar mayores eficiencias energéticas. Hasta recientemente, el 90 % de la demanda de la calefacción urbana se satisfacía con combustibles fósiles (mediante CHP) y mediante plantas de suministro de calor que generalmente producen agua caliente a temperaturas más altas (Werner, 2017).

En años recientes, la energía renovable ha asumido un papel más importante en la calefacción urbana. Esto se debe en gran medida a una nueva generación de tecnología de redes térmicas que permite el uso de fuentes de calor a temperaturas más bajas (con frecuencia por debajo de los 70 °C), como energías renovables (que incluye la termosolar y geotérmica junto con sistemas de almacenamiento térmico y bombas de calor eléctricas). Cuando se requiere un suministro de baja temperatura para la red de calefacción urbana, se pueden usar bombas de calor para mejorar la eficiencia del sistema y el desempeño económico resultante.

Cada vez más, los sistemas de conversión de electricidad en calor renovable excedente que utilizan tecnologías convencionales, como calderas eléctricas y bombas de calor, ofrecen otra opción para la generación de calor. Esto se puede integrar a las plantas de CHP conectadas a los sistemas de calefacción urbana, lo que da lugar a una reducción del 30 % en el consumo de combustible en promedio. También se puede operar como una instalación de suministro de calor independiente cuando los sistemas de almacenamiento de energía térmica están equipados para asegurar un suministro de calor constante. En las generaciones actuales de las tecnologías de calefacción urbana, la conversión de residuos en energía y el calor residual del CHP o de los procesos industriales podrían jugar un papel mucho mayor como parte de las medidas para descarbonizar la combinación energética urbana.

La refrigeración urbana se utiliza menos comúnmente que la calefacción urbana debido a la falta de madurez tecnológica y las desfavorables economías de escala. Sin embargo, la situación está cambiando ya que se espera que la demanda de refrigeración aumente rápidamente en las décadas por venir. Si la demanda de refrigeración sigue el enfoque habitual de uso del aire acondicionado eléctrico, el aumento resultante en la demanda máxima significará un enorme desafío para los sistemas de energía eléctrica. Por lo tanto, deben buscarse soluciones alternas. En este contexto, la refrigeración urbana impulsada por energías renovables ofrece un enorme potencial.

Recursos de refrigeración gratuitos, como ríos, lagos y aire ambiental se pueden explotar como la fuente de energía de refrigeración. Además, los enfriadores de absorción impulsados por sistemas termosolares pueden producir energía de refrigeración para suministrar agua fría a través de redes de distribución de refrigeración para satisfacer la demanda para la refrigeración de espacios o la refrigeración para procesos industriales en las ciudades, en particular en grandes construcciones públicas y de servicio, como edificios de oficinas y hoteles.

La distribución del agua fría se realiza usando una pequeña diferencia de temperatura de diseño entre la temperatura de suministro fría y la temperatura de retorno más caliente. Por lo tanto, las tuberías de refrigeración urbanas son más anchas que las tuberías de calefacción urbana a la misma demanda de capacidad. Las pérdidas de frío son muy pequeñas en Europa, mientras que las temperaturas terrestres promedio anuales son casi iguales a las temperaturas de distribución. Las temperaturas terrestres más altas en el Medio Oriente exigen un mayor aislamiento de las tuberías.

Las entregas frías son gestionadas en subestaciones en cada construcción conectada, con o sin intercambiadores de calor. Debido a que la diferencia de temperaturas entre las tuberías de suministro y de retorno es muy pequeña, en las subestaciones se utilizan intercambiadores de calor con largas longitudes térmicas para no reducir la capacidad de transferencia en las redes de distribución de frío. Las longitudes térmicas más cortas dan lugar a temperaturas de retorno más bajas y a una diferencia de temperatura más baja en la red de distribución.

En un próximo producto de información de IRENA, *Technical Guidelines for the Development of Bankable*

Renewable Energy Heating and Cooling Projects (Lineamientos técnicos para el desarrollo proyectos rentables de calefacción y refrigeración con energías renovables), se proporcionarán más detalles sobre los fundamentos de las redes de calefacción y refrigeración y cómo diseñarlas junto con unidades/plantas de producción de calefacción y refrigeración (Recuadro 5). En un segundo informe por venir, *Thermal Energy Storage in District Heating and Cooling* (Almacenamiento de energía térmica en calefacción y refrigeración urbanos), se ofrecerá una revisión integral sobre tecnologías, casos ejemplares y perspectiva (Recuadro 6).

Recuadro 5: **Lineamientos técnicos para el desarrollo de proyectos financiables de calefacción y refrigeración con energías renovables**

Los lineamientos del próximo documento, *Technical Guidelines for the Development of Bankable Renewable Energy Heating and Cooling Projects* (Lineamientos técnicos para el desarrollo de proyectos financiables de calefacción y refrigeración con energías renovables) (IRENA, próximo b) apoyarán el desarrollo de soluciones de calefacción y refrigeración con energías renovables para aplicaciones relacionadas con las ciudades, incluidos los usos finales residenciales, industriales y comerciales.

Los lineamientos se centran en alternativas de proyectos financiables para cada configuración y requisito de demanda con detalles prácticos, como auditorías de energía, integración de procesos, selección de tecnología, diseño técnico, estimación de costos y modelado financiero. El informe cubre los principales pasos en el ciclo de desarrollo de proyectos, desde la identificación del proyecto hasta la puesta en práctica.

Recuadro 6: Almacenamiento de energía térmica en calefacción y refrigeración urbanos

El almacenamiento de energía térmica (AET) puede acelerar de manera significativa la descarbonización de los sistemas de energía térmica, en particular en ciudades donde la densidad de la población es lo suficientemente alta para adoptar sistemas de calefacción y refrigeración. Con el AET que permite desvincular la generación de calor/frío del consumo, dicha función se podría amplificar. Además, el AET puede mejorar la eficiencia del sistema en la calefacción y refrigeración urbanos en una gama de escalas temporales, desde breve (por hora) hasta largo (estacional), para proporcionar flexibilidad, para vincular mejor el suministro de calor/frío a la demanda real.

El AET también contribuye a aprovechar la electricidad fuera de horas pico generada de manera renovable. También puede reducir los costos de capital para nuevas capacidades de calefacción y refrigeración que de otra manera se necesitarían instalar.

Una perspectiva próxima de IRENA sobre el AET (IRENA, próximo c) considera las diferentes tecnologías y los casos de los usuarios para sistemas de calefacción y refrigeración y proyecta las perspectivas para diferentes tecnologías de AET en el corto, mediano y largo plazo a partir de un análisis de las direcciones de investigación y desarrollo actuales y futuras.

En contraste con el enfoque convencional de proporcionar servicios de calefacción y refrigeración a través de dos redes de tuberías térmicas independientes, un diseño innovador que se incorpora a la siguiente generación de redes térmicas, como el ectogrid™, usa una sola red térmica que se conecta con diferentes usuarios finales para desplazarse refrigeración en torno a la energía térmica desperdiciada (p. ej., el calor residual descargado de los sistemas de refrigeración, como aquellos usados en centros de datos, hospitales y edificios de oficinas). Mientras tanto, las bombas de calor se pueden usar para aprovechar la energía térmica de baja temperatura como una manera de incrementar las temperaturas requeridas, mientras que las máquinas de refrigeración o bombas de calor con ciclo inverso se pueden utilizar para reducir las temperaturas a un nivel deseado.

La principal ventaja de dicho enfoque es la mayor eficiencia energética general que resulta de reutilizar la energía térmica desperdiciada descargada de diferentes usuarios finales en el sistema antes de agregar energía adicional donde sea necesaria.

Además, gracias a la energía térmica de baja temperatura en la tubería, este enfoque reduce, si no es que elimina, las pérdidas de distribución y facilita la aplicabilidad de la energía térmica basada en energía renovable como una fuente complementaria.

Dicha red térmica puede operar de manera independiente con la conexión a más de dos instalaciones de uso final, con la capacidad de expandirse conforme crezca la demanda, gracias a su configuración modular.

Aún cuando tal sistema también se puede integrar a redes térmicas existentes para aportar una mayor eficiencia energética y flexibilidad del sistema a áreas urbanas existentes, su justificación económica depende altamente de los precios de los combustibles energéticos, en especial del gas natural. Para áreas nuevas y países que tengan altos precios de gas natural, la ventaja económica es aparente cuando se compara con sistemas energéticos térmicos convencionales.

4.

HERRAMIENTAS DE MODELADO PARA LA PLANEACIÓN DEL SISTEMA ENERGÉTICO URBANO

4. Herramientas de modelado para la planeación del sistema energético urbano

Los sistemas energéticos urbanos son únicos en cuanto a que incluyen no solo la infraestructura de la energía física, sino también elementos sociales como la aceptación pública, preferencias y comportamientos del consumidor, voluntad para pagar y asequibilidad. El establecimiento de la generación eficaz de electricidad local y la satisfacción de los objetivos de energías renovables depende del empleo de un proceso sólido y herramientas para la planeación del sistema energético urbano.

El proceso de planeación permite la formulación de un plan bien informado de un sistema energético urbano sostenible. Muchas instituciones han desarrollado marcos eficaces y herramientas prácticas para guiar a las autoridades locales en el proceso de planeación (Saheb *et al.*, 2014; Hemis, 2017; UN-Habitat and ICLEI, 2009).

Además, la planeación energética debe ser integrada en la planeación urbana tan pronto como sea posible, conforme las formas urbanas, las funcionalidades y la zonificación tengan impactos significativos sobre la demanda de energía y de manera creciente también sobre la producción de energía, en particular con la proliferación de prosumidores (Zanon and Verones, 2013; Rickwood *et al.*, 2008; Nuorkivi and Ahonen, 2013). Además, para la mejora de la resiliencia urbana en respuesta al cambio climático se tiene que considerar la planeación a largo plazo, ya que la infraestructura energética urbana generalmente tiene una vida de hasta 50 años o más (Reckien *et al.*, 2018; Mirakyan and De Guio, 2015).

Un proceso sólido también requiere las herramientas de planeación correctas para el desarrollo del sistema energético urbano. Aún cuando una amplia gama de herramientas de modelado están disponibles para apoyar la planeación del sistema energético urbano, las herramientas varían en su capacidad de abordar problemas asociados con diferentes escalas espaciales y temporales, así como en sus representaciones tecnológicas, metodologías subyacentes y alcances analíticos. Las participaciones crecientes de energías renovables locales en los sistemas energéticos urbanos también requieren una comprensión cada vez mayor de las herramientas disponibles para la planeación del sistema energético urbano. Estas contribuyen a determinar la viabilidad de las soluciones de energías renovables en las etapas tempranas de planeación, el diseño de los sistemas energéticos renovables (*p. ej.*, dimensiones y funcionamiento) en fases de planeación posteriores con un enfoque especial en energías renovables.

Las autoridades locales y los expertos en energía deben, por lo tanto, obtener una mejor comprensión de las herramientas de modelado más adecuadas para la planeación del sistema energético urbano, identificadas y evaluadas contra sus capacidades para considerar, identificar, integrar y ampliar las tecnologías de energía renovable en las ciudades. Además de explorar las herramientas disponibles, en este capítulo se discuten los posibles desafíos en materia de datos al aplicarlos, así como las vías para enfrentar estos desafíos. Finalmente, los desafíos de modelado se discuten en el contexto de países en desarrollo, ya que se espera que el 90 % del crecimiento de la población urbana en las próximas tres décadas provenga de estos países, principalmente de Asia y África (ONU DAES, 2018).

4.1 Desafíos en materia de datos: Datos requeridos, granularidad temporal y espacial y accesibilidad

Todos los modelos del sistema energético requieren al menos algunos datos y muchos requieren grandes conjuntos de datos de entrada. La calidad de salida de cualquier modelo está, en gran medida, dictada por estos datos de entrada. Los conjuntos de datos de referencia pueden abordar en cierta medida brechas de datos, pero prevalecen desafíos significativos. En la planeación del sistema energético urbano, se requieren más datos detallados que en los modelos a gran escala, los cuales con frecuencia son más difíciles de recolectar u obtener. Las brechas de datos existen debido a la disponibilidad y accesibilidad limitadas de los datos por diversas razones, que van desde la inexistencia a la no publicación.

En las secciones a continuación se describen conjuntos de datos clave necesarios en el modelado del sistema energético urbano, junto con desafíos comúnmente encontrados en la planeación del sistema energético urbano y renovable.

DATOS DE LA DEMANDA

Los modelos de energía urbana a escala horaria requieren perfiles de demanda horaria que cubran al menos un periodo de un año. Los datos de la demanda incluyen perfiles horarios por uso final de la energía (que incluye electricidad, calefacción y refrigeración de espacios, agua caliente doméstica y calor para procesos) y por sector de zonificación (*p. ej.*, residencial, comercial e industrial y de transporte). Dentro de los sectores de zonificación, los datos de la demanda también se requieren en diferentes patrones de consumo de energía a escalas espaciales variables (*p. ej.*, para diferentes tipos de construcciones residenciales, tales como hogares uni o multifamiliares y para diferentes tipos de negocios comerciales, industrias y modos de transporte). Los modelos a largo plazo requieren proyecciones de demanda para años futuros. Estas proyecciones también deben considerar los impactos locales del cambio climático (*p. ej.*, creciente demanda de refrigeración y reducida demanda de calefacción debido a la elevación de las temperaturas).

Asimismo, se requieren los datos de elasticidad y flexibilidad de la demanda en los modelos de gestión de la demanda. La elasticidad de la demanda en el contexto de los sistemas energéticos se refiere a qué tan sensible es la demanda de energía a cambios en variables económicas, tales como el precio de la energía. Los modeladores requieren factores de elasticidad de la demanda para productos energéticos (como calor, electricidad, gas natural y otros combustibles), por aplicación (*p. ej.*, electricidad para diferentes aparatos, carga de VE y refrigeración) y por sector de zonificación (*p. ej.*, los sectores residencial, comercial, industrial y de transporte exhiben diferentes elasticidades de demanda de electricidad).

La flexibilidad de la demanda se refiere a la capacidad del usuario de privarse de ciertas demandas, cambiarlas o sustituirlas. Por ejemplo, los usuarios pueden tener la flexibilidad de renunciar a la demanda de calefacción o cambiarla (*p. ej.*, encendiendo un dispositivo de calefacción en un momento diferente) en función de la capacidad térmica y las características de aislamiento de las construcciones y de si hay almacenamiento térmico disponible. Los usuarios también pueden renunciar a la demanda al ajustar los niveles de comodidad en las construcciones. En el caso de sustitución, un usuario puede cambiar a fuentes de energía y tecnologías alternas en respuesta a señales de precios a largo plazo (como cambiar de calderas basadas en combustibles fósiles a bombas de calor, cambiar a aparatos con mayor eficiencia o cambiar a vehículos con combustible alternativo).

Las medias de eficiencia también afectan la demanda de energía, incluyendo los potenciales de renovación de las construcciones para diversos niveles de modernización (*p. ej.*, reemplazo de ventanas, aislamiento mejorado y modernización total de la construcción). Estos datos se requieren por tipo de construcción, junto con datos de costos y tasas de modernización factibles a lo largo del tiempo.

Los modelos de largo plazo que consideran medidas de eficiencia también requieren datos sobre tendencias futuras en tecnología de uso final y ganancias y costos de eficiencia de convertidores (*p. ej.*, para iluminación, electrodomésticos de cocina, refrigeración, lavadoras de trastes y otros aparatos y tecnologías de uso final en los sectores comercial/de servicios e industrial).

DATOS DE SUMINISTRO

Los perfiles de suministro por hora proporcionan información sobre la generación de energía y suministro de combustibles (potencial) (*p. ej.*, electricidad de la red, gas natural, madera, biocombustible, combustibles para transportes y demás combustibles) por sector de zonificación y aplicación de uso final. La combinación de oferta de electricidad existente (*es decir*, participaciones de diferentes centrales de energía renovable y no renovable) también es parte de los datos de la oferta como una base para calcular la combinación futura, con diferentes requisitos de escalas temporales y espaciales en función del tipo de recurso energético.

Para la energía solar y eólica, se necesitan datos de generación de al menos cada hora en todo el año, mientras que la energía hidroeléctrica se puede estimar estacionalmente, y los potenciales de madera y residuos pueden ser suficientes en una escala anual. La información espacial es particularmente relevante para los recursos solar, eólico e hidrológico.

También se requieren detalles sobre las tecnologías de suministro en modelos energéticos urbanos. Esto incluye información sobre capacidades instaladas, eficiencias y factores de disponibilidad para tecnologías de energías renovables descentralizadas existentes, plantas de generación de calor y electricidad y soluciones de almacenamiento, así como las capacidades que potencialmente podrían ser instaladas. Estos datos también incluyen tecnologías de suministro máximo y capacidades de reserva.

Para las aplicaciones de energía solar a nivel de construcción, también se requieren datos como los potenciales de instalación en el techo o fachada; la generación de sombra de las construcciones circundantes, árboles y demás infraestructura; y restricciones de zonificación de las construcciones (*p. ej.*, construcciones protegidas por patrimonio) para estimar el suministro de energía solar potencial.

Se requieren datos sobre el potencial de instalación para estimar también la capacidad de instalaciones más grandes de energía renovable distribuida. Estos incluyen recolectores solares FV montados sobre el piso y térmicos, plantas de biomasa o de conversión de residuos en energía CHP, bombas de calor de fuentes terrestres a gran escala, sistemas de almacenamiento de energía a nivel urbano (*p. ej.*, para almacenamiento estacional de energía térmica y almacenamiento en baterías a gran escala), turbinas eólicas y pequeñas plantas hidroeléctricas. Estas últimas con frecuencia se ubican en las afueras de una ciudad/distrito o se desarrollan junto con desarrollos de zonas industriales.

DATOS DE INFRAESTRUCTURA URBANA

Los datos de infraestructura urbana incluyen diseños de red de redes de distribución de electricidad (capacidades de las líneas, transformadores, subestaciones y sus configuraciones); calefacción urbana, redes de refrigeración y gas (capacidades y temperaturas de las tuberías); redes de transporte (carreteras, líneas ferroviarias, líneas de metro, líneas de autobús, estaciones de servicio y estacionamientos) y pérdidas de la red y datos de por vida. Estos datos son fundamentales para determinar la cantidad de ERV que se pueden adaptar a la infraestructura urbana existente y para estimar la necesidad de inversión para la mejora de la infraestructura.

Las construcciones, como parte de la infraestructura urbana, determinan la forma urbana. Se requieren bases de datos sobre la función y la estructura de las construcciones (*p. ej.*, número de pisos, número de ocupantes, fecha de construcción, renovaciones anteriores, área con calefacción, área del techo, área de la fachada, etc.), convertidores existentes de energía (*p. ej.*, tecnologías de calefacción y generación de electricidad *in situ*) y acceso a las redes de energía (*p. ej.*, gas natural, distribución de la electricidad y acceso a la red de transporte).

Los modelos de transporte urbano requieren información sobre la flota de transporte, como el número y tipos de vehículos (composición de la flota), edad, kilómetros de pasajeros y vehículos, perfiles de manejo y tasas de consumo de combustible.

Los datos de infraestructura urbana incluyen también información espacial (sistema de información geográfica o SIG). Sin embargo, las bases de datos detalladas de infraestructura espacial y de redes son generalmente grandes y muchas ciudades enfrentan grandes desafíos con la recolección de datos y el procesamiento para la planeación de sistemas energéticos urbanos (Zhou *et al.*, 2016). Asimismo, muchas herramientas de modelado carecen de representación espacial y de redes, las cuales normalmente se manejan en etapas de planeación posteriores usando herramientas especializadas (p. ej., modelos de sistemas energéticos y modelos de construcción basados en SIG).

DATOS DE TECNOLOGÍAS ENERGÉTICAS

Las tecnologías de generación de energía que emplean tanto combustibles renovables como no renovables, así como datos de tecnología de almacenamiento, forman una parte central de los modelos de energía urbana. Los requisitos de los datos incluyen costos locales (p. ej., inversión, operación y mantenimiento y costos de eliminación) y factores de desempeño (p. ej., eficiencias, factores de disponibilidad y pérdidas) para diferentes tamaños de sistemas (p. ej., de un solo hogar en kW a pequeñas centrales eléctricas a escala de ciudades en MW). También se necesitan tendencias futuras estimadas en costos y factores de desempeño

en los modelos a largo plazo, en particular para tecnologías de energías renovables y soluciones de almacenamiento, donde los costos han caído más rápidamente de lo proyectado en años recientes, de acuerdo con estudios realizados por IRENA.

MICROCLIMA Y DATOS METEOROLÓGICOS

Los microclimas urbanos se refieren a áreas donde las condiciones climáticas locales difieren de la región circundante. Pueden impactar temperaturas locales, precipitación, presión de aire, formación de nubes y patrones de viento. Los modelos de planeación de sistemas energéticos urbanos a largo plazo también necesitan reflejar cómo las proyecciones climáticas globales impactarán en el futuro estos aspectos del microclima.

Los efectos de la isla de calor urbano son parte de los microclimas urbanos. Se refieren a temperaturas aumentadas en las ciudades con respecto a las áreas circundantes debido a la modificación de la superficie terrestre y la generación de energía térmica residual. Los efectos de las islas de calor urbano subterráneas se deben considerar cuando se incluye a la energía geotérmica en el portafolio tecnológico.

El microclima y los datos meteorológicos son necesarios para apoyar la gestión inteligente de energía en las ciudades. El aislamiento solar, la cobertura de las nubes, la velocidad del viento y los datos de temperatura se pueden usar en los modelos para predecir la generación de electricidad renovable, predecir la demanda y la identificación de fallas del sistema (Zhou *et al.*, 2016).

GRANULARIDAD TEMPORAL Y ESPACIAL DE LOS DATOS

Granularidad temporal

Para la planeación del sistema energético urbano con enfoque especial en ERV, generalmente se requieren mayores resoluciones temporales. Según la aplicación, esto varía de escalas por hora para la planeación detallada del sistema energético a escalas estacionales para tecnologías de energía hidroeléctrica en la planeación de sistemas energéticos urbanos. Los datos por hora con frecuencia se usan en las herramientas de planeación, aunque muchas de estas herramientas ofrecen la capacidad de modificar la duración o representación del intervalo de tiempo.

Sin embargo, con frecuencia los datos están disponibles/son recolectados en una resolución temporal inferior que la requerida para el modelado. Las organizaciones relacionadas con la energía (p. ej., agencias de energía, oficinas gubernamentales, institutos nacionales de estadística y operadores y distribuidores del sistema energético) generalmente proporcionan estadísticas de suministro de energía a nivel anual, pero no a resoluciones temporales mayores. Por lo tanto, se pueden usar métodos de desagregación para reducir los datos (p. ej., estimar o simular la demanda por hora con base en datos anuales de demanda de energía y otras estadísticas).

Con la implementación creciente de medidores inteligentes y de sensores a nivel de la planta de potencia, con suerte las brechas de datos de demanda y oferta se pueden cerrar. Los medidores inteligentes recolectan datos en intervalos desde horas hasta multiseundos (Stegner *et al.*, 2016; FERC, 2008). Estos datos son adecuados para el modelado de la energía urbana, dada su alta resolución temporal y espacial.

Sin embargo, no todos los datos se requieren con alta granularidad.. Los datos anuales o absolutos son adecuados para la planeación del sistema energético urbano en varios casos, como potenciales de instalación de capacidad renovable total, algunos potenciales de recursos de energía renovable (p. ej.,, residuos anuales, potenciales de madera y estiércol), potenciales de renovación de construcciones y datos de infraestructura urbana.

Granularidad espacial

Se necesitan datos con una alta resolución espacial para la planeación de energías renovables para sitios específicos en los sistemas energéticos urbanos. Como en el caso temporal, con frecuencia se carece de datos con alta granularidad, tanto de oferta como de demanda en los sistemas energéticos urbanos. Se pueden aplicar métodos de desagregación y agregación para estimar brechas de datos en estos casos, o se pueden utilizar resoluciones de modelado más imprecisas que lo deseado.

Cuando los modelos energéticos urbanos emplean altas resoluciones espaciales y temporales (p. ej., representar construcciones individuales con perfiles de demanda por hora), los modeladores se deben asegurar de que los perfiles de demanda de la construcción representen de manera colectiva condiciones de diversidad realista. En términos técnicos, el factor de simultaneidad (o de diversidad) del sistema debería ser razonablemente mayor que 1²⁵. Esto asegura que el sistema energético urbano no será demasiado grande para satisfacer las demandas máximas sobreestimadas.

²⁵ El factor de simultaneidad o diversidad se define como la relación de la suma de las demandas individuales máximas de un grupo de consumidores dentro de un periodo especificado, a la demanda simultánea máxima (máxima en todo el sistema) de estos consumidores dentro del mismo periodo. El valor es ≥ 1 .

Existen herramientas de planeación especializadas que pueden proporcionar mayor profundidad espacial, según su alcance. Por ejemplo, las herramientas enfocadas en planeación urbana más que en planeación energética (*p. ej.*, UMI), y las herramientas de análisis de sistemas especializadas (*p. ej.*, modelos de redes de flujo de energía) requieren información espacial significativa (*p. ej.*, modelos 3D de todos los componentes en el entorno urbano y mapas detallados de las redes de distribución). Sin embargo, dichas herramientas generalmente tienen una visión / análisis limitado del sistema energético holístico.

DISPONIBILIDAD Y ACCESIBILIDAD DE DATOS

En la mayoría de los países, las estadísticas de energía en la ciudad aún no se han establecido de manera sistemática, simplemente porque el gobierno central no lo ha requerido en muchos países. Mientras tanto, rara vez se han recopilado datos sobre potenciales de recursos de energía renovable y potenciales de instalación de tecnología a niveles de construcción, distrito o ciudad. Los datos de la elasticidad de la demanda también son raros, incluso en ciudades europeas (Silva *et al.*, 2018). Los datos sobre potenciales de renovación de las construcciones también son escasas.

A nivel mundial, la mayoría de las ciudades tienen tecnologías de información y comunicaciones (TIC) limitadas, como medidores inteligentes, para recolectar datos, aún cuando las inversiones en medidores inteligentes están aumentando rápidamente, particularmente en Europa y Asia.

La infraestructura de TIC adecuada es particularmente relevante en el caso de la integración de energía renovable descentralizada, donde se requieren conjuntos de datos nuevos y previamente no monitoreados (*p. ej.*, relacionados con la recolección de datos de generación, consumo e intercambio de prosumidores en redes energéticas locales).

Las bases de datos de infraestructura, tales como los datos de inventarios de construcciones consolidados, no están necesariamente disponibles para las ciudades. Se espera que sea un problema más marcado en países en desarrollo, donde es posible que una participación significativa de la población urbana viva en barrios pobres —por ejemplo, alrededor del 30 % de los residentes de las ciudades en la región de Asia-Pacífico actualmente viven en zonas de barrios pobres (Heyzer, 2014).

Aún cuando se recolecten los datos, los formularios de datos varían ampliamente debido a una falta de normas y medidas regulatorias centralizadas sobre cómo se deben recolectar, manejar e informar dichos datos. Los datos también pueden ser de propiedad privada a través de múltiples fuentes, lo que limita la accesibilidad debido a preocupaciones y restricciones regulatorias relacionadas con la privacidad y el mal uso de los datos.

La privacidad, la propiedad, las normas métricas y demás temas de gestión de datos se deben abordar en paralelo con la aceleración de la implementación de tecnologías digitales para recolectar datos de energía que se puedan usar para la planeación del sistema energético urbano.

4.2 Herramientas de modelado

Una amplia gama de modelos y herramientas están disponibles para la planeación de sistemas energéticos urbanos, abarcando diferentes escalas espaciales, escalas temporales, representaciones tecnológicas, metodologías subyacentes y alcances analíticos. Se realizó un estudio integral para evaluar estos modelos y herramientas, identificar brechas y desafíos prevalecientes en el campo y proponer recomendaciones para mejorar las herramientas/métodos y su implementación por parte de los planeadores de energías urbanas.

Con base en la evaluación completa de las herramientas pertinentes para las aplicaciones de energías renovables a escala local (es decir, desde la escala de proyecto hasta toda la ciudad), destacan siete como ampliamente adecuadas y comúnmente utilizadas: OSeMOSYS, Balmorel, EnergyPLAN, HOMER, TIMES, MESSAGE y LEAP. Estas herramientas —discutidas más a fondo en las secciones siguientes— se han identificado y evaluado con base en sus capacidades de considerar, identificar, integrar y ampliar tecnologías de energía renovable en las ciudades.

OSeMOSYS

Descripción básica: OSeMOSYS (Sistema de modelado de energía de fuentes abiertas, por sus siglas en inglés) ha estado en desarrollo de fuente abierta desde el 2010. Es un programa de optimización lineal de costo mínimo que proporciona inversión a largo plazo y apoyo a las decisiones operativas. Los usuarios pueden definir intervalos (desde valores por hora) y horizontes de modelado. El programa puede modelar todas las tecnologías de energía renovable, tecnologías de energía convencional y tecnologías de almacenamiento (Groissböck, 2019).

Consideraciones: OSeMOSYS proporciona un alto grado de flexibilidad en el modelado de energías renovables y demás tecnologías de energía. Cualquier tecnología se puede definir como un proceso de una o varias entradas/salidas con eficiencias de conversión y participaciones de entrada/salida. Se pueden especificar factores de disponibilidad por intervalo de tiempo (facilitando la representación de planeación de mantenimiento y condiciones operativas de demanda parcial) y también se pueden modelar las tasas de rampa. Los usuarios tienen la flexibilidad de personalizar la longitud de los periodos de tiempo (intervalos de tiempo) para su aplicación hasta de horas, lo que es apropiado para tecnologías de ERV (*p. ej.*, que aprovechan la energía solar y eólica). Sin embargo, no es posible tener periodos de tiempo menores a una hora.

Todos los recursos de energía renovable se pueden representar y la generación de energía renovable se puede verter. El modelo está diseñado para especificar fácilmente los objetivos de generación de energía renovable mediante restricciones. Se pueden representar todos los costos, y los costos futuros pueden variar por año. Sin embargo, una desventaja es que parece que no se pueden especificar los costos variables por intervalo de tiempo (*p. ej.*, subanualmente). Esto dificulta la implementación de los precios de electricidad por tiempo de uso/máximo. Otra desventaja del modelado es que las condiciones ambientales o de demanda parcial no pueden repercutir en el desempeño de la tecnología de energías renovables (*p. ej.*, temperatura ambiente en el desempeño de sistemas FV). Sin embargo, se puede modelar la degradación/maduración de la tecnología.

Identificación: OSeMOSYS usa un acercamiento de optimización lineal que reduce al mínimo los costos totales del sistema. Es un modelo perfecto de previsión que supone perfectas condiciones de mercado y tiene un solo objetivo de minimización de costos, lo que puede limitar ciertos tipos de análisis (*p. ej.*, análisis de decisiones con criterios múltiples).

Estas son limitaciones del acercamiento subyacente, común a muchas herramientas de modelado de energía. (Todos los modelos, en general, modelan de manera deficiente el comportamiento social y la toma de decisiones irracional). OSeMOSYS no se enfoca en el análisis estocástico y de incertidumbre, aunque se ha desarrollado una extensión estocástica y siempre se pueden realizar análisis de sensibilidad. Dentro de este marco de optimización, la herramienta es útil para la planeación óptima de inversiones a largo plazo para tecnologías de energías renovables; la dimensión de las tecnologías puede suponer valores de variables enteras o reales.

Se pueden usar los escenarios para evaluar diferentes políticas y objetivos para alentar la implementación de tecnologías de energía renovable (*p. ej.*, impuestos al carbono, objetivos de emisiones y participaciones de generación de energías renovables); sin embargo, no todos los mecanismos de políticas se pueden modelar fácilmente (como tarifas de alimentación y precios variables de la electricidad).

Integración: OSeMOSYS se puede usar para modelar el sistema energético de toda una ciudad, integrando todos los sectores y las interacciones del sistema para identificar dónde se pueden integrar de manera óptima tecnologías de energías renovables. También se pueden modelar segmentos de la ciudad como regiones individuales que interactúan entre sí.

Todos los recursos de demanda y oferta de energía (*p. ej.*, renovables) se pueden representar. Sin embargo, la demanda se define de manera exógena y la elasticidad de la demanda no se puede modelar. Las conexiones de las redes y las importaciones/exportaciones de energía se pueden modelar, aún cuando OSeMOSYS no es un modelo de flujo de energía y la mayoría de los detalles operativos (*p. ej.*, la tensión de las líneas) no se representan de manera explícita.

Se puede modelar una gama de tecnologías de almacenamiento (importantes para la integración de EVR) con suficiente detalle técnico (*p. ej.*, profundidad de descarga y eficiencia de almacenamiento), pero algunos parámetros (como pérdidas en espera) no están incluidos.

Escalas: OSeMOSYS es un marco flexible que se puede adaptar a cualquier escala, desde una sola construcción a una gran ciudad. Es adecuado para la inversión en energías renovables y la planeación operativa tanto en terrenos no urbanizados como en antiguas zonas industriales (es decir, para segmentos urbanos nuevos y existentes) en el corto plazo (*p. ej.*, un año) como en el largo plazo (*p. ej.*, 50 años). Los usuarios también pueden representar economías de escala para tecnologías de energías renovables.

Facilidad de uso: OSeMOSYS es una herramienta libre de fuente abierta con un alto grado de transparencia. Sin embargo, como es el caso con muchas herramientas de fuente abierta, esto se traduce en una falta de soporte técnico para los usuarios. Se requiere formación en modelado de optimización y habilidades informáticas (*p. ej.*, GAMS y Python) para usar OSeMOSYS, aunque se ha desarrollado una interfaz gráfica de usuario básica para ayudar a cerrar esta brecha. Es posible que OSeMOSYS requiera más capacitación que otras herramientas y los usuarios deben proporcionar todos los datos de modelado.

En general: OSeMOSYS es una herramienta de optimización potente y gratuita que se puede usar para modelar el sistema energético de toda una ciudad. Los usuarios pueden identificar vías rentables para la integración de energías renovables en el largo plazo al considerar una variedad de escenarios climáticos, tecnológicos y de políticas. La herramienta no ofrece tanta flexibilidad como el modelo estructurado de manera similar de TIMES (vea a continuación); sin embargo, OSeMOSYS es relativamente joven y está en desarrollo continuo. Su principal desventaja puede ser que no es adecuada para modeladores sin experiencia.

BALMOREL

Descripción básica: Balmorel es un modelo de equilibrio parcial que apoya tanto la inversión a corto y largo plazo como la toma de decisiones operativas. Se implementa como un problema lineal de mínimo costo. Se desarrolló en el 2001 y se ha mantenido como un modelo de fuente abierta desde entonces. Balmorel puede modelar una amplia variedad de tecnologías de energías renovables y demás opciones tecnológicas. Se ha aplicado principalmente para analizar y expandir sistemas energéticos existentes, como la integración de bombas de calor en el sistema de calefacción urbana de Copenhague o para analizar el sistema CHP de dicha ciudad. La mayoría de los estudios existentes se enfocan en la integración de energías renovables y en la eficacia de los mecanismos de políticas para mejorar la implementación de tecnologías de energía renovable.

Consideraciones: Balmorel puede modelar casi todas las tecnologías de energías renovables (salvo la mareomotriz). Proporciona la flexibilidad para representar tecnologías de entradas/salidas múltiples y se pueden especificar los parámetros tecnológicos clave, además de factores y todos los costos (incluidos costos de equilibrio). Sin embargo, no se pueden especificar costos que varían según intervalos de tiempo o año. Los usuarios tienen la flexibilidad de definir los intervalos de tiempo de divisiones de una hora a cinco años. Las fuentes de energía renovable se pueden verter, pero no se degradan con el tiempo y las condiciones ambientales y de demanda parcial no afectan el desempeño tecnológico.

Identificación: Balmorel es otro modelo de optimización lineal y equilibrio parcial limitado por una previsión y supuestos de mercado perfectos. La herramienta es útil para el modelado de escenarios energéticos urbanos a largo plazo para identificar vías rentables de energía renovable.

La mayoría de las medidas de políticas climáticas (p. ej., impuestos al carbono, objetivos de emisión, participaciones de energías renovables, medidas de autosuficiencia y límites de consumo de combustibles fósiles) se pueden evaluar para promover tecnologías renovables, pero no se pueden representar ciertos instrumentos de políticas (p. ej., políticas de precios de la electricidad que varían con el tiempo). Balmorel es útil tanto para la planeación de capacidad como la operativa para tecnologías de energías renovables y las tecnologías se pueden dimensionar como variables de enteros o reales.

Integración: Balmorel se puede usar para modelar el sistema energético de toda una ciudad, pero hay una agregación sectorial significativa fuera de los sectores residencial y de transporte. La herramienta se enfoca en la electricidad y la calefacción urbana para la integración de energías renovables, pero también se pueden representar otras demandas. La elasticidad y respuesta de la demanda también se pueden modelar. Balmorel puede representar una variedad de dispositivos de almacenamiento, entre ellos almacenamiento a corto y largo plazo para electricidad, calor, hidrógeno e incluso la captura y almacenamiento de carbono. Las conexiones de las redes se pueden representar como simples procesos de transporte (p. ej., entre segmentos de un modelo de ciudad con múltiples distritos), y también se puede contabilizar el comercio de energía (importaciones/exportaciones).

Escalas: Balmorel permite la planificación operativa y de inversiones de varios años para tecnologías de energías renovables a través de escenarios a largo plazo (hasta 50 años). Se puede usar para representar segmentos de ciudades en cualquier escala, pero está mejor adecuado para análisis de antiguas zonas industriales. También se pueden representar las economías de escala en el marco de modelado.

Facilidad de uso: Balmorel es una herramienta libre de fuente abierta con alta transparencia. Como tal, el soporte técnico es limitado. No tiene una interfaz gráfica de usuario bien desarrollada y los usuarios deben ser técnicamente versados. Los usuarios avanzados pueden construir sobre el código de fuente abierta y el periodo de capacitación recomendado es generalmente de una semana.

En general: Balmorel ha estado en desarrollo durante casi dos décadas, lo que lo constituye en uno de los modelos evaluados más antiguos gratuito y de fuente abierta. No permite tanta desagregación sectorial como otras herramientas y no modela tecnologías mareomotrices, pero de otra forma, Balmorel es una herramienta muy capaz para una capacidad de energía renovable rentable y una planificación de despacho en las ciudades.



ENERGYPLAN

Descripción básica: EnergyPLAN es una herramienta de simulación ascendente diseñada para evaluar sistemas energéticos tanto en terrenos no urbanizados como en antiguas zonas industriales (es decir, tanto nuevos como existentes). Permite que los usuarios exploren escenarios de sistemas energéticos por un periodo de un año con resolución de tiempo por hora.

EnergyPLAN ha sido desarrollado y mantenido por Aalborg University desde 1999, y está bien documentado el papel evolutivo de las tecnologías de energías renovables. En 2004, la herramienta se enfocó en modelar solo tecnologías eólica, solar y de bombas de calor. Sin embargo, para 2009, se agregaron opciones de almacenamiento (p. ej., baterías, almacenamiento de energía de aire comprimido y almacenamiento de hidrógeno), junto con opciones de transportes, electrolizadores y tecnologías de refrigeración. Para 2012 se agregaron tecnologías de conversión de residuos en energía, geotérmicas, bombas de calor de absorción, conversión de biomasa y gas sintético, junto con consideraciones de la red. Para 2017, también se agregaron características adicionales de desalinización, captura de carbono y refrigeración urbano.

En la actualidad, EnergyPLAN modela todas las tecnologías de energías renovables clave, tecnologías de energía convencional y tecnologías de almacenamiento.

Una amplia gama de estudios, de escalas urbanas a internacionales se han realizado en el marco del EnergyPLAN (Aalborg University, 2018). La mayoría de los estudios se enfoca en la integración de tecnologías de energía renovable a sistemas energéticos. El enfoque geográfico está principalmente en países europeos, pero existen aplicaciones en EE. UU., África (p. ej., Kenia y Tanzania), Centroamérica (México) y China (Hong Kong).

Con respecto a los estudios de escalas urbanas, en el caso de Dinamarca se desarrollaron estrategias para energía 100 % renovable para Aalborg, Copenhague y Samsø, y se investigó la transformación de la calefacción urbana para usar fuentes renovables para Frederikshavn. También se investigaron los sistemas energéticos integrados y los mercados energéticos locales daneses. Otros estudios se han enfocado en la integración de energías renovables para hacer que los barrios sean autosuficientes en los Países Bajos, en la integración de energías renovables en Humboldt, California, EE. UU. y en escenarios de energía renovable en Hong Kong.

Consideraciones: EnergyPLAN representa todas las tecnologías energéticas renovables, pero con detalles técnicos limitados en comparación con la mayoría de las demás herramientas recomendadas de modelado y planeación de energías urbanas. Puede representar procesos de múltiples entradas/salidas con parámetros básicos (p. ej., eficiencia), pero no considera la disponibilidad (p. ej., para planeación de mantenimiento o cortes forzados), vertido, tasas de rampa, asignación de unidades o la posibilidad de retirar activos subóptimos, entre otros. El intervalo de tiempo está establecido en una hora, lo que es adecuado para muchas de las aplicaciones de energías renovables. Sin embargo, EnergyPLAN representa todos los costos, incluida la posibilidad de tener costos de materias primas fijos y variables (p. ej., por hora). Todos los recursos de energías renovables se pueden especificar también del lado del suministro.

Identificación: EnergyPLAN es un modelo de simulación determinista ascendente, diseñado para ayudar a que los usuarios exploren diferentes escenarios de energía con un fuerte enfoque en tecnologías de energías renovables. Su principal uso es analizar la operación de estas tecnologías más que optimizar inversiones.

Para tal fin, se pueden representar diferentes mecanismos de políticas y estrategias de regulación dentro de horizontes de tiempo relativamente limitados y de corto plazo. La herramienta no está diseñada para análisis de largo plazo, aunque el modelador puede vincular ejecuciones individuales de un año para simular un largo plazo. Tampoco es adecuado para incorporar incertidumbre o análisis de ciclos de vida y solo se consideran las emisiones de CO₂. La omisión de estos aspectos limita la gama de aplicaciones de EnergyPLAN; sin embargo, su habilidad de evaluar rápidamente y comparar varios escenarios energéticos se ha aprovechado para trazar vías de energías renovables para varias ciudades.

Integración: EnergyPLAN puede representar todos los sectores de una ciudad en un modelo de una sola región. La integración de energía renovable también se puede evaluar con una variedad de dispositivos de almacenamiento de calor y electricidad, aunque los modelos de almacenamiento no son tan detallados en otros modelos evaluados. Se consideran todas las demandas de uso final, pero la demanda de calor está agregada (es decir, no se dispone de un desglose por diferentes tipos de calefacción, como agua caliente doméstica y calor para procesos). Sin embargo, se puede especificar la elasticidad de la demanda. Aún cuando las interacciones del sistema se representan en un modelo energético de la ciudad, la representación de las redes se modela de manera muy simple. Se consideran las importaciones y exportaciones, pero los elementos o capacidades de las redes no se pueden representar.

Estos factores limitan qué tan minuciosamente los usuarios pueden evaluar la viabilidad de la integración de energías renovables en el sistema energético de una ciudad.

Escalas: EnergyPLAN es adecuado tanto para estudios de terrenos no urbanizados como para antiguas zonas industriales en las ciudades, aunque no puede representar todos los detalles del sistema energético de una ciudad (p. ej., redes). El modelo realiza simulaciones de un año a la vez, lo suficiente para evaluar u optimizar un diseño de sistema energético con el objetivo de ampliar las tecnologías de energías renovables hacia el futuro; sin embargo, se pueden combinar varias simulaciones anuales para aproximarse a un escenario de mediano plazo.

Facilidad de uso: Una de las fortalezas de EnergyPLAN es su facilidad de uso. Es una herramienta gratuita con una interfaz gráfica de usuario bien desarrollada y documentación transparente. Como herramienta gratuita, el soporte técnico es limitado, pero la herramienta se usa ampliamente en todo el mundo y requiere tan solo unos cuantos días de capacitación para empezar. No viene con una base de datos de soporte, pero ayuda a que los usuarios empiecen con sugerencias predeterminadas para parámetros tecnológicos.

En general: EnergyPLAN puede ser una herramienta útil para planeadores de energía urbana para que exploren rápidamente una variedad de escenarios y políticas de energías renovables dentro de un horizonte de poco tiempo. Las percepciones operativas de tecnologías de energía renovable de EnergyPLAN se pueden combinar de manera poderosa con otras herramientas (p. ej., usando EnergyPLAN para analizar el desempeño operativo de una combinación óptima de tecnologías en cada año con base en resultados de un modelo de optimización de la capacidad a largo plazo, como OSeMOSYS). EnergyPLAN también es fácil de usar para profesionales y expertos.

HOMER

Descripción básica: HOMER (Optimización híbrida de múltiples recursos energéticos, por sus siglas en inglés) es una de las herramientas más populares para el modelado de sistemas energéticos a escala local. Proporciona una simulación de abajo hacia arriba y una herramienta de optimización enumerativa, lo que significa que simula todas las configuraciones posibles del sistema con determinadas restricciones y características, y enseguida identifica soluciones óptimas. HOMER se dirige al modelado de sistemas de energía independientes y conectados a la red y permite simulaciones con intervalos de minutos por un periodo de un año.

La importancia creciente de las tecnologías de energías renovables, las soluciones de almacenamiento y las preocupaciones ambientales en los sistemas energéticos actuales se evidencia en la evolución continua de HOMER a lo largo del tiempo. En el 2000 se agregó al modelo la capacidad de dar cuenta de las emisiones y para 2005, las adiciones incluían nuevas tecnologías (convertidores de energía hidroeléctrica, biomasa e hidrógeno) modelado mejorado del almacenamiento en baterías, almacenamiento de hidrógeno, precio de las redes en tiempo real, restricciones y sanciones de emisiones y resultados más detallados para todas las tecnologías de energías renovables. Dado su enfoque en la integración de energías renovables, HOMER facilitó la simulación de intervalos de tiempo mínimos de hasta un minuto en el 2007, junto con la capacidad de modelar efectos de temperatura en los parámetros FV y de control de nuevas redes/baterías.

Para el 2015, la herramienta había hecho notables mejorías de modelado del almacenamiento, incluida la capacidad de modelar el almacenamiento por volantes de inercia, especificando el estado de carga inicial de la batería y agregando más de 50 nuevos modelos de baterías. Las mejoras de modelado también se hicieron para sistemas de energía solar y eólica (*p. ej.*, capacidades ampliadas de seguimiento del punto de máxima potencia para los efectos solares y de temperatura en recursos eólicos). Desde el 2015 se agregó un nuevo módulo de hidrógeno, junto con

características avanzadas de la red (*p. ej.*, cortes programados y opciones por tarifa) y una biblioteca de componentes muy ampliada.

Innumerables estudios de alrededor del mundo han utilizado HOMER. Se presentan ejemplos de planificación óptima de tecnologías de energías renovables para nuevos sistemas, incluidas aplicaciones de microrredes y sistemas híbridos para comunidades urbanas en India (Fulzele and Dutt, 2012; Phurailatpam *et al.*, 2018; Kumar and Bhimasingu, 2014). En China, se investiga un sistema de energía híbrida solar-eólica para una microrred conectada a la red en Liu *et al.* (2013). Las aplicaciones en África incluyen la integración de tecnologías de energías renovables para áreas urbanas que padecen problemas de agua en el África subsahariana (Brandoni and Bošnjaković, 2017).

Hay estudios en los EE. UU. que incluyen el diseño óptimo de un sistema de almacenamiento híbrido FV-eólico para la Isla Catalina, integración del almacenamiento con la energía eólica en varios sitios en California y una integración de energía renovable distribuida en hogares en Boulder, Colorado (Huang *et al.*, 2011; Lipman *et al.*, 2005; Johnson *et al.*, 2011).

Finalmente, en Europa se investigaron sistemas urbanos de triple generación y telecalefacción para una comunidad cercana a Roma, Italia (Salata *et al.*, 2015).

Los modelos del sistema necesitan reflejar el aumento del uso de energías renovables y soluciones de almacenamiento, junto con las crecientes preocupaciones ambientales a lo largo del tiempo.

Consideraciones: HOMER emplea uno de los acercamientos más altamente detallados para el modelado de tecnologías de energías renovables en este estudio. Es una de las pocas herramientas que permite el análisis con intervalos menores a una hora (de hasta minutos), lo que es útil para análisis detallados de despacho de energías renovables. También considera detalles tecnológicos de bajo nivel; por ejemplo, seguimiento del máximo punto de energía, efectos de la temperatura sobre el desempeño y orientación de paneles (p. ej., azimut y pendiente) para la energía FV solar; cabezal y caudales para la energía hidroeléctrica; y la altura del buje, la densidad del aire y las distribuciones de Weibull para turbinas eólicas.

Las opciones de vertido de energías renovables y los modelos con costos detallados también están incluidos. La fortaleza de HOMER en el modelado está estrechamente vinculada a sus limitaciones. HOMER es útil para el análisis de proyectos urbanos de energías renovables, pero no está diseñado para modelar toda una ciudad o para el análisis de largo plazo. Asimismo, se enfoca en la generación de electricidad distribuida y no modela todas las tecnologías de energía convencionales. Aún así, HOMER es una herramienta analítica poderosa para los planeadores de energía urbana que deseen estar detrás de un proyecto de energía renovable en la ciudad y requieran de inversión y soporte en la toma de decisiones operativas.

Identificación: HOMER está diseñado para ayudar a los planeadores a identificar la dimensión y operación óptimas de un sistema de energía renovable mediante un método de optimización enumerativa. Con su método también admite el análisis de la incertidumbre. HOMER permite que los usuarios evalúen una variedad de medidas de políticas (que incluyen impuestos al carbono, objetivos de emisión y esquemas de tarifas) pero solo durante un año. No está diseñado para el modelado de escenarios, más bien, su fortaleza radica en la dimensión y operación del proyecto.

Integración: Como HOMER se enfoca en el análisis de sistemas de tecnologías de energía renovable, es atípico en el conjunto de herramientas consideradas. Se enfoca en el sector eléctrico y no modela de manera explícita múltiples sectores de la ciudad y sus interacciones.

Una de las fortalezas de HOMER en el análisis de cómo las tecnologías de energía renovable se pueden integrar en sistemas energéticos radica en el modelado de almacenamiento. Varios tipos de dispositivos de almacenamiento de electricidad se pueden modelar con detalles técnicos significativos (p. ej., pérdidas dependientes de tarifas, cambios en la capacidad con temperatura, profundidad de descarga variable para la vida del ciclo y una tasa de degradación aumentada a mayores temperaturas). HOMER también tiene un modelo de redes, el cual no es un modelo de flujo de energía, pero considera factores como seguridad (p. ej., cortes, resiliencia de la red y confiabilidad), lo que no hace la mayoría de las herramientas de planeación y modelado de energía urbana.

Escalas: HOMER es adecuado para análisis tanto de terrenos no urbanizados como de antiguas zonas industriales para proyectos de energía renovable en ambientes urbanos. Aún cuando no es adecuado para modelar el sistema energético de toda una ciudad, no se limita el tamaño de un proyecto. Sus cortos intervalos de tiempo hacen que la herramienta sea adecuada solo para análisis a corto plazo (hasta un año).

Facilidad de uso: HOMER tiene una interfaz gráfica de usuario bien desarrollada con recursos de soporte y bibliotecas/bases de datos de componentes. Como herramienta comercial, viene con un fuerte soporte técnico y, aunque su código no es de fuente abierta, los cálculos subyacentes son transparentes en cuanto a su documentación. El periodo de capacitación recomendado para que los usuarios empiecen a usarlo es corto (1 a 2 días).

En general: HOMER es una herramienta potente para analizar proyectos urbanos de energía renovable, al proporcionar apoyo en profundidad a las decisiones operativas y de inversión a los planeadores de energía. La mayoría de las demás herramientas en este estudio se enfocan en el modelado de sistemas energéticos en toda la ciudad y la integración de tecnologías de energía renovable, pero estos acercamientos no ofrecen el nivel de detalle técnico que ofrece HOMER. HOMER llena esta brecha y es, por lo tanto, un activo como parte de un conjunto de herramientas más amplio para planeadores de energía urbana. Puede proporcionar análisis de bajo nivel después de que se hayan completado estudios de nivel más alto y una ciudad haya decidido implementar un proyecto de energías renovables.

TIMES

Descripción básica: TIMES (Sistema integrado MARKAL-EFOM, por sus siglas en inglés) es parte de la familia MARKAL de modelos, desarrollado y mantenido por la Agencia Internacional de Energía desde 1980. Es otra de las herramientas de modelado de planeación energética más ampliamente utilizadas, aplicada en todas las escalas, desde local a global. Más de 300 instituciones en más de 80 países actualmente usan TIMES.

TIMES es un modelo de optimización lineal de costo mínimo y equilibrio parcial que se puede usar para una amplia gama de análisis. El marco de modelado proporciona a los usuarios la libertad de definir cualquier proceso, incluido todo tipo de tecnología para intervalos de tiempo desde una hora y para cualquier cantidad de años en el futuro. Es parcialmente adecuado para la planeación y el análisis de políticas de sistemas energéticos a largo plazo.

Varios estudios a escala local han usado TIMES. En Europa, la herramienta ha sido aplicada para investigar vías de descarbonización de largo plazo mediante la implementación local aumentada de tecnologías de energía renovable para municipios suburbanos y urbanos en Suiza. También se usó para modelar el impacto del comportamiento de los hogares en los sectores residenciales y de transporte de Francia, para modelar escenarios energéticos para un poblado costero en Italia y para reducir emisiones en un modelo del sector de transporte urbano (Cayla and Maïzi, 2015); Forsberg & Krook-Riekkola, 2017). En EE. UU. se usó TIMES para investigar el impacto ambiental y económico de introducir un impuesto al carbono en Long Island y para vías de energía renovables/bajas en carbono en la ciudad de Nueva York (Cayla and Maïzi, 2015; Bhatt *et al.*, 2010).

Consideraciones: TIMES, en gran medida como OSeMOSYS, ofrece opciones de modelado altamente flexibles para tecnologías de energías renovables y otras energías. Ofrece todas las fortalezas de modelado técnico para el modelo de OSeMOSYS (ya que OSeMOSYS se basa en gran medida en TIMES), lo que incluye tecnologías de entrada/salida múltiple personalizadas, factores de disponibilidad por intervalo de tiempo, tasas de rampa, intervalos de tiempo flexibles de hasta horas, vertido de energías renovables y maduración de la tecnología. También se puede especificar el modelado de costo total, precios variables por hora (*p. ej.*, para electricidad) y tarifas de alimentación, las cuales son importantes para analizar tecnologías de energías renovables. Como con OSeMOSYS, los efectos ambientales sobre el desempeño tecnológico no están modelados en TIMES.

Identificación: El método de optimización lineal de mínimo costo de TIMES es como el de OSeMOSYS, junto con sus supuestos limitantes de previsión perfecta, mercados perfectos y un solo objetivo de minimización de costos. Sin embargo, TIMES tiene una extensión estocástica para análisis de incertidumbre y puede incorporar impactos del ciclo de vida mediante materias primas auxiliares, los cuales son aspectos analíticos interesantes al considerar tecnologías de energías renovables. TIMES es útil para la planeación óptima de capacidad de energía renovable a corto o largo plazo y la planificación de despacho, y puede usar programación lineal y programación lineal de enteros mixtos para dimensionar las tecnologías. La idea detrás de TIMES (como de OSeMOSYS) es explorar vías futuras de energía a través de diferentes escenarios (*p. ej.*, escenarios de bajas emisiones de carbono y altas energías renovables). TIMES se puede usar para investigar una amplia variedad de escenarios de políticas para alentar la energía renovable, lo que incluye el uso de impuestos al carbono, objetivos de emisiones, subsidios, tarifas de alimentación y tarifas de tiempo de uso.

Integración: TIMES comparte las mismas ventajas que OSeMOSYS en este respecto. Todos los sectores de la ciudad, escalas, tecnologías e interacciones se pueden modelar para proporcionar un análisis holístico de la integración de la energía renovable. Se puede representar cualquier recurso de demanda y oferta (incluso energías renovables), y una ciudad se puede modelar como varias regiones interactivas. Aún cuando se pueden representar conexiones de redes y comercialización de energía, el TIMES no es un modelo de flujo de energía detallado (ni en términos de escalas de tiempo ni en detalles de las redes). Los modelos de almacenamiento están más avanzados en TIMES que en OSeMOSYS. Sin embargo, aún están limitados por los detalles técnicos (p. ej., los efectos de la temperatura y las pérdidas dependientes de las tarifas no están incluidos) y por la flexibilidad limitada del ciclo de almacenamiento entre niveles de intervalos de tiempo (p. ej., entre niveles diarios y mensuales).

Escalas: Como con OSeMOSYS, TIMES se puede usar para crear un modelo energético para cualquier escala, desde construcciones hasta sectores agregados de la ciudad. Es útil tanto para la capacidad a largo plazo como para la planeación de expedición, y para análisis de terrenos no urbanizados y antiguas zonas industriales. También se pueden incorporar a los modelos las economías de escala para tecnologías de energías renovables.

Facilidad de uso: Quizás la mayor diferencia entre TIMES y OSeMOSYS es su costo de uso. TIMES es una herramienta más desarrollada, la cual ofrece una mayor flexibilidad de modelado y características. Sin embargo, una licencia para usar interfaces de usuario pueden costar hasta 20 000 USD al año. Aún cuando tiene una interfaz de usuario, TIMES generalmente requiere más capacitación que la mayoría de las herramientas de modelado para aprovechar su pleno potencial, y es del agrado de modeladores con sólida experiencia técnica y habilidades. El código del TIMES en sí está escrito en GAMS y es de fuente abierta, lo que permite que usuarios expertos lo desarrollen aún más. Los usuarios pueden presentar todos los datos de entrada del modelo y hay soporte técnico disponible principalmente a través de foros de la comunidad.

En general: TIMES es una herramienta de optimización potente y comercial que puede modelar el sistema energético de toda una ciudad a fin de identificar las vías de integración rentables y políticas para tecnologías de energía renovable en el largo plazo. La herramienta está más desarrollada y tiene más capacidades que OSeMOSYS, pero esto viene con un costo que puede ser prohibitivo para usuarios con restricciones presupuestarias. También está diseñado para modeladores con más experiencia, que hayan tenido el periodo de capacitación recomendado más largo de todos los modelos en este estudio (de uno a tres meses).

MESSAGE

Descripción básica: MESSAGE (Modelo para alternativas de estrategia de suministros energéticos y su impacto ambiental general, por sus siglas en inglés) es una herramienta de modelado de evaluación integrada ampliamente usada. Fue desarrollada por el Instituto Internacional de Análisis de Sistemas Aplicados (IIASA, por sus siglas en inglés) y ha estado en uso desde la década de 1980.

MESSAGE es un modelo de optimización lineal de costo mínimo y equilibrio parcial que respalda la evaluación de escenarios a largo plazo y la toma de decisiones de inversión. Hay diversas variantes de MESSAGE. Más recientemente, se desarrolló el modelo MESSAGEix, el cual es una implementación más versátil y de fuente abierta de MESSAGE. MESSAGEix permite el modelado de todas las tecnologías de energía hasta una escala por horas y es adecuado para el modelado a escala urbana.

El modelo MESSAGE ha sido adaptado a las tecnologías de energía en evolución y crecientes preocupaciones ambientales en el transcurso de cuatro décadas (Huppmann *et al.*, 2019). En ese tiempo también se desarrolló una implementación estocástica para analizar riesgos. En 2006, IIASA desarrolló una contabilidad detallada de contaminantes para el análisis de emisiones, y a mediados de la década de 2010 los investigadores desarrollaron metodologías para abordar los desafíos con las tecnologías de ERV (Johnson *et al.*, 2017).

Tradicionalmente, MESSAGE ha sido aplicada a nivel nacional y mundial. Sin embargo MESSAGEix es una herramienta flexible que se aplica en cualquier escala. Se describen aplicaciones a nivel local de MESSAGE para India para la región del Indo y para estudiar el consumo de energía en los hogares (IIASA, 2018).

Consideraciones: MESSAGE (MESSAGEix) puede permitir el modelado detallado de tecnologías de energía renovable con detalles técnicos similares a los mencionados para la herramienta TIMES. Como con muchos otros modelos de energía, el desempeño técnico de las tecnologías no se ve afectado por las condiciones ambientales, como la temperatura o las condiciones de demanda parcial. Los intervalos de tiempo se pueden definir de manera flexible hasta un nivel por hora y se consideran los costos de todas las tecnologías.

Identificación: MESSAGE también es un modelo de optimización de costos lineales y previsión perfecta con el débil supuesto inherente de condiciones perfectas. Sin embargo, el modelo central de MESSAGE puede hacer interfaz con varios otros paquetes y módulos, que incluyen el marco robusto para la toma de decisiones de MESSAGE para tomar decisiones con incertidumbre. MESSAGE, como TIMES, es útil para identificar vías de planeación de capacidad óptimas en función del costo para tecnologías de energía renovable al evaluar diferentes escenarios de largo plazo en ciudades, lo que incluye objetivos de emisiones y una amplia gama de políticas energéticas. Puede, también, representar economías de escala con el tiempo y dimensionar los sistemas usando programación lineal o de enteros mixtos.

Integración: MESSAGE se puede usar para modelar un sistema de energía completo de una ciudad, con todos los sectores, cualquier materia prima de demanda energética y todos los recursos de suministro, para evaluar minuciosamente la integración de tecnologías de energía renovable. Las ciudades se pueden modelar como múltiples regiones interactivas que intercambian energía y tienen conexiones de red básicas. La elasticidad y la respuesta de la demanda también se pueden analizar con MESSAGE. Todos los tipos de almacenamiento se pueden modelar para ayudar a la integración de tecnologías renovables, pero estos modelos no son tan detallados a nivel técnico como en HOMER. MESSAGEix también incorpora un emulador de modelo de uso de la tierra genérico que puede ser útil para estudiar las restricciones del uso de la tierra en la integración de sistemas de energías renovables en las ciudades.

Escalas: MESSAGE es adecuado para el análisis de terrenos no urbanizados y antiguas zonas industriales para las ciudades en cualquier escala (sin embargo, los análisis a baja escala de construcciones/barrios son raros). La herramienta se enfoca en la inversión multianual a largo plazo y la planeación operativa le permite escalar adecuadamente las tecnologías de energía renovable en sistemas de energía urbana.

Facilidad de uso: MESSAGEix es una herramienta nueva, gratuita, de fuente abierta, que se basa en el modelo básico de MESSAGE. (El modelo original de MESSAGE es gratuito solo para académicos y estados miembros de la Agencia Internacional de Energía Atómica). La herramienta se desarrolló para “permitir flujos de trabajo científicos más eficientes y dirigir la integración con fuentes de datos externos y otros modelos o herramientas”, así como para proporcionar a los usuarios la flexibilidad para agregar nuevas ecuaciones y parámetros para casos de uso específico (como la representación de energías renovables, contabilidad de emisiones o evaluaciones del ciclo de vida) (Huppmann *et al.*, 2019).

Por lo tanto, MESSAGEix proporciona una flexibilidad técnica considerable. Tiene una interfaz basada en la web, aunque se espera que los usuarios tengan una sólida formación técnica. Se estima que el periodo de capacitación sea de alrededor de dos semanas.

En general: MESSAGEix es otra herramienta de optimización gratuita y potente que usuarios alrededor del mundo puedan usar para apoyar la planeación a largo plazo de energías renovables y políticas en las ciudades. También es única, al ofrecer la capacidad de evaluar escenarios para el uso de tierra mediante su emulador de uso de tierra.

MESSAGEix es particularmente interesante para usuarios avanzados, quienes disfrutan una libertad técnica considerable al personalizar e integrar la herramienta con otras plataformas (incluidos otros modelos de MESSAGE) y herramientas para aprovechar su potencia analítica total. Asimismo, tiene un periodo de capacitación más corto que TIMES.



LEAP

Descripción básica: El modelo LEAP (Planeación de alternativas energéticas a largo plazo) es una de las herramientas de modelado de sistemas energéticos más utilizados actualmente, con más de 36 000 usuarios en 195 países (SEI, 2019). Principalmente es una herramienta de simulación usada para explorar escenarios a largo plazo, pero también ofrece capacidades de optimización al hacer interfaz con la herramienta OSeMOSYS.

LEAP es empleado por una gran variedad de usuarios (entre ellos usuarios gubernamentales, no gubernamentales, investigadores, consultores y de servicios públicos energéticos) para políticas energéticas y análisis de estrategias para la mitigación del cambio climático, desde la escala local a la global. Fue desarrollada por el Instituto Ambiental de Estocolmo en 1980 y ha visto varios cambios durante las últimas cuatro décadas. Conforme el impacto ambiental de los sistemas energéticos se convirtió en una creciente preocupación en la década de 1990, LEAP agregó una base de datos ambiental (financiada principalmente por la ONU) y se convirtió en una de las primeras herramientas en abordar este tema en el modelado de sistemas energéticos. Para mediados de la década de 1990, se desarrollaron aún más las capacidades de evaluación de mitigación de gases de invernadero de LEAP, y esta fue usada por numerosos países en sus comunicaciones con el CMNUCC. En 2004, se introdujeron capacidades de modelado multirregionales.

Existen muchas aplicaciones a escala local de LEAP. A continuación, se describe una pequeña selección de ellas. En China, LEAP se ha usado para explorar vías de transición bajas en carbono (incluidas las energías renovables) para Pekín y para descarbonizar el sector del transporte en Tianjin (Zhang *et al.*, 2011; Yu *et al.*, 2015; Peng *et al.*, 2015).

Se han investigado estrategias de descarbonización de transporte urbano para metrópolis indias y se desarrollaron escenarios del sector residencial y de electricidad con bajas emisiones de carbono para Delhi y Maharashtra (Kadian *et al.*, 2007; Kale and Pohekar, 2014). Nepal ha investigado vías de transporte urbano sostenible para Katmandú (Dhakal, 2006). LEAP también se ha aplicado en África, donde el proyecto SAMSET lo usa para apoyar a las municipalidades africanas en el desarrollo de estrategias de energía sostenible, incluso vías de desarrollo sostenible para dos municipalidades en Uganda (Kasese y Jinja) (Mann *et al.*, 2015). En EE. UU. y Europa se ha usado LEAP para desarrollar estrategias y planes de acción en materia de energía y clima para alcanzar la neutralidad del carbono a nivel subnacional (Beaton, 2015; Lazarus *et al.*, 2011).

Consideraciones: LEAP puede modelar todas las tecnologías de energía renovable y sus características tecnológicas fundamentales. No es tan extensa ni flexible en su representación técnica como otras herramientas; por ejemplo, los usuarios están restringidos por opciones de menú desplegable y están limitados a características tecnológicas básicas, como eficiencia y disponibilidad anual. Los costos tecnológicos incluyen costos de capital, costos de operación y mantenimiento fijos y variables y costos no previstos y de recuperación. LEAP está diseñada para análisis de simulación usando intervalos de tiempo anuales, pero también se integra con OSeMOSYS para proporcionar análisis de optimización hasta un nivel por hora. Se pueden especificar parámetros tecnológicos adicionales mediante la interfaz de OSeMOSYS (p. ej., factores de disponibilidad de mayor resolución). Cuando se usa como una herramienta de simulación sin OSeMOSYS, el análisis de las tecnologías de ERV está limitado por un intervalo de tiempo anual.

Identificación: LEAP es una herramienta de simulación diseñada para explorar escenarios energéticos de mediano a largo plazo. Varias ciudades y regiones (p. ej., Copenhague, Seattle y el estado de Massachusetts en EE. UU.) han usado LEAP para desarrollar planes de acción concretos en materia de energía y clima para sus ciudades.

LEAP permite a los planeadores de energía urbana evaluar una serie de políticas energéticas y objetivos de reducción de emisiones de carbono para promover energías renovables. Sin embargo, la herramienta está limitada por supuestos de previsión perfecta (como lo están la mayoría de los modelos) y no está diseñada para el análisis estocástico o de incertidumbre (aunque se pueden realizar análisis de sensibilidad).

Su intervalo de tiempo anual y métodos subyacentes de simulación y contabilidad también significa que no se pueden planear ciertas políticas (p. ej., precios de electricidad por tiempo de uso) ni hacer una planeación energética óptima sin el apoyo de otros módulos o herramientas (como OSeMOSYS). Un intervalo de tiempo anual limita el análisis de tecnologías ERV, almacenamiento y demás interacciones del sistema energético.

Integración: LEAP se puede usar para construir un modelo para toda la ciudad para evaluar el papel de tecnologías de energías renovables en escenarios a largo plazo. El modelo puede incluir todos los sectores, demandas de uso final y recursos de suministro (incluidas las energías renovables), aunque los usuarios deben escoger entre categorías predefinidas (es decir, los usuarios no pueden especificar materias primas personalizadas). Una ciudad también se puede dividir en múltiples regiones.

LEAP no está diseñada para el modelado de almacenamiento (dada su resolución de periodos anuales), aún cuando se pueden incorporar modelos de almacenamiento usando la extensión OSeMOSYS. Las especificaciones de las redes también son muy básicas (es decir, como pérdidas netas más que tecnologías explícitas). Sin embargo, se puede rastrear la comercialización energética neta (importaciones/exportaciones).

El análisis de la integración de tecnologías de energía renovable en una ciudad serán limitadas por estos

factores al usar LEAP; sin embargo, la herramienta es muy adecuada para el análisis del “panorama completo”, mediante el cual los usuarios pueden explorar diversos escenarios para una ciudad, con frecuencia sin la necesidad de tener un conjunto de datos de entrada completo y detallado (se trata más en la sección de Facilidad de uso a continuación).

Escalas: LEAP es más adecuado para el análisis de antiguas zonas industriales en escalas para toda la ciudad, más que para proyectos de energías renovables en terrenos no urbanizados en el corto plazo en pequeñas zonas urbanas. Además, también se pueden evaluar bloques de la ciudad más pequeños. El modelo base, sin embargo, no parece permitir el aumento o variación de costos futuros o de la representación de economías de escala.

Facilidad de uso: LEAP es una herramienta fácil de usar con una interfaz gráfica de usuario bien desarrollada y una amplia comunidad de soporte en línea. Es gratuita para todos los estudiantes y organizaciones sin fines de lucro, gobiernos y académicos en países en desarrollo; sin embargo, no es de fuente abierta y la documentación que explica sus ecuaciones y supuestos subyacentes parece ser limitada. Una de las fortalezas de facilidad de uso de LEAP es que sus requisitos de datos iniciales (con frecuencia una de las barreras clave en el modelado de energía) son bajos. Los usuarios con datos limitados pueden empezar a construir modelos usando métodos de contabilidad simples y pueden incluir gradualmente complejidad de datos de acuerdo con sus necesidades y disponibilidad de datos. LEAP también apoya a los usuarios con una base de datos tecnológica y ambiental. Se interconecta bien con otras herramientas y generalmente requiere menos de una semana de capacitación.

En general: LEAP es una herramienta de modelado de simulación y escenarios popular entre los estrategas de climas y energía urbanos. Tiene buen soporte, es fácil de usar y es adecuada para muchos profesionales y expertos de la planeación de energías urbanas. Está limitado en su alcance analítico debido a su uso de intervalos de tiempo anuales y una falta de detalles tecnológicos; sin embargo, proporciona opciones para análisis más detallados al interactuar con herramientas potentes como OSeMOSYS y mediante sus propias extensiones.

4.3 Desafíos del modelado para países en desarrollo

La mayoría de los modelos de sistemas energéticos en países en desarrollo adoptan métodos de modelado de países industrializados. Ya que estos acercamientos están diseñados en su mayoría por y para países desarrollados, con frecuencia tienden a descuidar varias características pertinentes a los países en desarrollo. Desatender estos factores limita la eficacia de estos modelos para fines de planeación energética. En las secciones a continuación se detallan los diversos desafíos que enfrentan métodos existentes para representar sistemas energéticos (incluidos los sistemas energéticos urbanos) en países en desarrollo. Al final de la sección se proporciona un resumen de factores y barreras coadyuvantes.

MODELADO DEL BAJO DESEMPEÑO DEL SECTOR ELÉCTRICO

Muchos países en desarrollo lidian con una gestión y un desempeño deficientes del sector eléctrico. Las configuraciones del sistema eléctrico con frecuencia son subóptimas y no pueden satisfacer la demanda local, aún cuando exista exceso de capacidad. Esto se puede deber a la planeación defectuosa y la operación y el mantenimiento realizados de forma deficiente que causa averías en las plantas, fluctuaciones de tensión y frecuencia, cortes eléctricos, desbordamiento de carga y otros temas de seguridad de las redes. El desempeño inadecuado de la oferta también se puede atribuir a un rápido crecimiento de la demanda cuando la capacidad de generación es insuficiente, el financiamiento es escaso, las pérdidas técnicas y no técnicas son altas y hay otros problemas organizacionales.

Los mecanismos de precios mal diseñados provocan pérdidas significativas en el sector eléctrico de muchos países en desarrollo. En ocasiones las tarifas pueden caer por debajo de los costos marginales de producción a largo plazo o incluso costos operativos promedio.

La falta de una recolección de ingresos eficaz también produce grandes pérdidas; una parte significativa de facturas de electricidad sin pagar no se cobra debido a que los departamentos gubernamentales y empresas propiedad del gobierno gozan de protecciones gubernamentales, lo que significa que pueden evitar las repercusiones de facturas de servicios públicos sin pagar.

En India, el robo de electricidad mediante facturas sin pagar, líneas de la red intervenidas y la pérdida de transmisión y distribución representa casi el 30 % de la generación de electricidad (comparado con una pérdida promedio del 6 % en países miembros de la Organización para Cooperación y Desarrollo Económico); esto ha colocado al sector eléctrico indio en grave riesgo de insolvencia (Urban *et al.*, 2007).

El uso inadecuado de subsidios también genera desafíos de financiamiento, como distorsiones de mercado y competencia limitada. Los mecanismos de financiamiento, como los subsidios, también están destinados a incentivar la adopción de energías renovables en las ciudades, pero su eficacia se ve obstaculizada cuando la gestión es deficiente.

Muchos marcos de modelado y planeación energética urbana asumen perfectas condiciones, mercados y previsión (e.g., OSeMOSYS, TIMES, MESSAGE, LEAP, Balmorel y EnergyPLAN). Estos supuestos generan dudas en el mejor de los casos, sin mencionar cuando se tienen las condiciones mencionadas anteriormente. Para desarrollar resultados significativos, los modelos de los sistemas energéticos necesitan representar los problemas del sector eléctrico ya sea de manera explícita en las representaciones técnicas (p. ej., mediante factores de baja disponibilidad u otras especificaciones de desempeño) o implícitamente en escenarios de modelado de energía.

REPRESENTACIÓN DE ECONOMÍAS INFORMALES Y EN TRANSICIÓN

La economía informal consiste en todas las transacciones no oficiales (monetarias y no monetarias) que no son capturadas en descripciones económicas oficiales como PIB o valor agregado. Su tamaño puede ser significativo en países en desarrollo. Sin embargo, pocos, si acaso, modelos de sistemas energéticos consideran de manera explícita la economía informal al describir sistemas económicos energéticos. La consideración de factores informales resulta importante para estimar la demanda futura, representar las economías del sistema energético y generar resultados significativos para informar la toma de decisiones.

Con frecuencia, se asume que los países en desarrollo seguirán la misma vía de desarrollo que los países industrializados actuales, —es decir, pasar de una reducción en agricultura a un gran sector industrial y luego hacia el sector de servicios. Sin embargo, muchos países en desarrollo en Asia han seguido un camino de intensidad energética menor a lo esperado mediante un cambio temprano al sector de servicios (por ejemplo, en India). Esta es una consideración importante en escenarios de demanda de energía de largo plazo para países y ciudades en desarrollo.

El mayor desafío en la representación de economías informales en transición en los países en desarrollo es la falta de datos. Es difícil recolectar datos ya que una economía informal puede incluir actividades ilegales, evasión o elusión fiscal y transacciones monetarias y no monetarias. También puede haber voluntad política limitada para recolectar datos en este sentido.



MODELADO DE DESAFÍOS E INTEGRACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE

Los modelos energéticos para desarrollar planes de sistemas energéticos urbanos que no consideran los factores señalados anteriormente están limitados en su capacidad para proporcionar sugerencias de planeación significativas para tecnologías de energías renovables.

Se ha analizado en estudios una amplia variedad de fracasos de proyectos locales y a mayor escala en países en desarrollo, los cuales se atribuyen, entre otros factores, a la mala gestión de los proyectos, corrupción, fallas operativas, mantenimiento deficiente, fallas de inversión, apoyo gubernamental inadecuado y una construcción con capacidad insuficiente a la escala local (Okereke, 2017; Ikejemba *et al.*, 2017).

Dadas estas insuficiencias, la integración de energías renovables en las ciudades, particularmente en combinación con tecnologías innovadoras y estrategias de gestión (como redes inteligentes y gestión del lado de la demanda), requiere un modelado cuidadoso y un análisis para determinar costos, beneficios y riesgos realistas de la implementación.

Esto también es importante para atraer a inversionistas a proyectos de energía renovable, quienes estarán mejor convencidos de los resultados de un modelado que tome en cuenta los factores/riesgos sociales, técnicos y económicos. Dicho esto, las ciudades no se deberían preocupar de más por problemas de confiabilidad y estabilidad de la red planteados por su primer lote de proyectos ERV, ya que los servicios públicos generalmente deberán enfrentar los desafíos operativos asociados. Conforme crezcan las participaciones de energías renovables variables a ciertos niveles, el modelado se volverá más útil y necesario.

Existen varios factores detrás de las brechas y desafíos señalados anteriormente en el modelado para países en desarrollo. La mayoría de los modelos energéticos de países en desarrollo adoptan acercamientos establecidos por países desarrollados y aplicados en estos. Debido a que estos últimos países no experimentan estos factores tan agudamente, con frecuencia no se incluyen en el modelado. La literatura destaca la existencia de estas brechas de modelado para países en desarrollo, pero los métodos para modelarlos están subdesarrollados. Hay una falta de investigación colaborativa entre los países desarrollados y en desarrollo para establecer métodos que incluyan estos aspectos en los modelos del sistema energético.

4.4 Proyección hacia el futuro en la planificación del sistema energético urbano

Viendo hacia el futuro, con urbanización rápida y el impacto creciente del cambio climático global a nivel local, las ciudades deberían poner mayor atención a los siguientes elementos en la planeación de sistemas energéticos urbanos a largo plazo, entre ellos la densificación urbana, la integración de recursos energéticos locales, la eficiencia en el entorno construido, los microclimas y el cambio climático, así como los cambios en la infraestructura de transporte.

DENSIFICACIÓN URBANA

Se espera que las ciudades futuras experimenten una densidad urbana en constante aumento. Ciudades más densas se traducen en un uso más eficiente de los terrenos, lo que reduce la necesidad de automóviles privados y da lugar a sistemas de transporte masivo más estrechamente integrados. También reducen la demanda de energía y emisiones de gases de invernadero en toda la ciudad, tanto en países desarrollados como en desarrollo (Güneralp *et al.*, 2017). Sin embargo “densificación” también puede conducir a una mayor congestión y una mayor contaminación del aire localizada. Los modelos de transporte de uso de terrenos combinados con las herramientas de planeación y modelado de energía urbana pueden ayudar a los investigadores a evaluar los efectos de la densificación urbana y sus impactos energéticos.

INTEGRACIÓN DE RECURSOS ENERGÉTICOS LOCALES

Con el incremento de las poblaciones urbanas y la densificación, la gestión de recursos locales y su integración en los sistemas energéticos también se volverán cada vez más relevantes. Los flujos de recursos, como aguas residuales, aguas negras y demás residuos sólidos generados por los habitantes, se deberán integrar en la planeación del sistema energético urbano. Esto es particularmente importante en ciudades en países en desarrollo donde del 60 % al 80 % de los residuos sólidos son orgánicos. Un 90 % estimado de sus residuos se podría convertir en algo útil, como biogás; sin embargo, los gobiernos locales actualmente gastan un 30 % a 40 % de sus presupuestos en sistemas de gestión de residuos que proporcionan pocas de dichas ganancias (Heyzer, 2014). Dichos flujos de recursos sin aprovechar se deben integrar en los modelos de planeación de energías renovables urbanas.

EFICIENCIA EN EL ENTORNO CONSTRUIDO

Otra característica clave de las ciudades del futuro es una mayor eficiencia del uso de energía en el entorno construido (mediante modernización, renovaciones y mayores normas de eficiencia para construcciones nuevas). Muchas herramientas de planeación y modelado de energía urbana no modelan de manera explícita medidas de eficiencia en construcciones, aunque los modeladores las pueden representar usando revisiones visuales (*p. ej.*, mediante el modelado de renovaciones de construcciones como tecnologías de suministro artificial para reducir la demanda de uso final de las construcciones). Aún así, estas herramientas se beneficiarían de acercamientos más explícitos para representar las medidas de eficiencia de las construcciones en los modelos.

MICROCLIMAS Y CAMBIO CLIMÁTICO

Los microclimas y los efectos de la isla de calor urbana con frecuencia no se consideran en los modelos de sistemas energéticos, sin embargo, pueden tener impactos locales significativos. Los efectos de la isla de calor urbana pueden elevar las temperaturas de la ciudad en varios grados centígrados, lo que impacta la demanda de energía para refrigeración y calefacción de las construcciones (Masson *et al.*, 2014; Santamouris, 2014). Así, desatender los efectos de la isla de calor urbana en los modelos puede dar lugar a subestimaciones de las demandas de refrigeración y sobreestimaciones de las demandas de calefacción. Esto conduce a resultados no precisos y decisiones de planeación subóptimas de las herramientas de planeación y modelado de energía urbana.

Los impactos del cambio climático global sobre los sistemas energéticos locales también se necesitan considerar en los modelos de energía a largo plazo. El efecto inmediato de la elevación de la temperatura global es un incremento significativo de la demanda de refrigeración de las construcciones; por ejemplo, Ortiz *et al.* (2018) encontró que la demanda de refrigeración durante el verano en la ciudad de Nueva York podría ser casi 30 % más alta para finales del siglo en comparación con el periodo entre 2006 y 2010. Además de los cambios en la demanda, las ciudades deben lidiar con impactos climáticos sobre el crecimiento económico urbano, la escasez de recursos y los cambios demográficos.

CAMBIOS EN LA INFRAESTRUCTURA DEL TRANSPORTE

Los cambios de tecnología en el sector del transporte tienen impactos significativamente potenciales sobre la planeación urbana. Por ejemplo, con la adopción incrementada de movilidad eléctrica en los países en desarrollo, las ciudades necesitarán construir nueva infraestructura de carga, la cual idealmente sería impulsada por recursos de energías renovables. Los programas de conducción autónoma y coche compartido también se pueden integrar con sistemas de transporte masivo para aliviar la congestión y reducir la demanda de vehículos privados, junto con su uso asociado de tierra y combustible. Las futuras redes de transporte también se pueden gestionar de manera inteligente usando sensores y drones; estos sistemas se integrarían con vehículos y otros sistemas de transporte para mejorar la congestión de tráfico, la eficiencia energética y la seguridad.



Referencias

- 100% Renewable Energy Atlas (2019a)**, “City, town, village”, www.100-percent.org/city-town-village (accessed 3 December 2019).
- 100% Renewable Energy Atlas (2019b)**, “Las Gaviotas, Colombia”, www.100-percent.org/las-gaviotas-colombia (updated 20 February 2019).
- 100% Renewables (2019)**, “100% renewables map”, go100RE, www.go100re.net/map (accessed September 2019).
- Aalborg University (2018)**, “EnergyPLAN—all case studies”, Aalborg University, Aalborg, www.energyplan.eu/category/allcasestudies.
- Al Seadi, T. et al. (2008)**, *Biogas Handbook*, University of Southern Denmark Esbjerg, Esbjerg, Denmark, www.lemvigbiogas.com/BiogasHandbook.pdf.
- Al-Waeli, A.H.A. et al. (2017)**, “Photovoltaic thermal PV/T systems: A review”, *International Journal of Computation and Applied Sciences*, Vol. 2/2, Sutton, Surrey, pp. 62–67.
- Bachmann, N. (2015)**, *Sustainable biogas production in municipal wastewater treatment plants*, International Energy Agency Bioenergy, Paris, www.iea-biogas.net/files/daten-redaktion/download/Technical%20Brochures/Wastewater_biogas_grey_web-1.pdf.
- Barbose, G. and D. Darghouth (2019)**, *Tracking the sun: Pricing and design trends for distributed photovoltaic systems in the United States*, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, California, <https://emp.lbl.gov/publications/tracking-sun-pricing-and-design>.
- Bayer, P. et al. (2019)**, “The geothermal potential of cities”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 106 (May), Elsevier, Amsterdam, pp. 17–30.
- Beaton, M.A. (2015)**, *Massachusetts clean energy and climate plan for 2020*, Executive Office of Energy and Environmental Affairs, State of Massachusetts, Boston, Massachusetts.
- Beck, H. et al. (2018)**, “Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution”, *Scientific Data*, Vol. 5, Springer Nature, London.
- Bellini, E. (28 April 2020)**, “Abu Dhabi’s 1.5 GW tender draws world record low solar bid of \$0.0135/kWh”, *pv magazine*, www.pv-magazine.com/2020/04/28/abu-dhabis-2-gw-tender-draws-world-record-solar-bid-of-0-0135-kwh.
- Bellos, E. et al. (2016)**, “Exergetic, energetic and financial evaluation of a solar driven absorption cooling system with various collector types”, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 102 (June), Elsevier, Amsterdam, pp. 749–759.
- Bhatt, V. et al. (2010)**, “Integrated energy and environmental systems analysis methodology for achieving low carbon cities”, *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, Vol. 2/3, AIP Publishing, Melville, New York, p. 031012.
- Brandoni, C. and B. Bošnjaković (2017)**, “HOMER analysis of the water and renewable energy nexus for water-stressed urban areas in Sub-Saharan Africa”, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 155 (July), Elsevier, Amsterdam, pp. 105–118.
- Brookings (2020)**, *Foresight Africa: Top priorities for the continent 2020–2030*, Brookings Institution, Washington, D.C., www.brookings.edu/wp-content/uploads/2020/01/ForesightAfrica2020_20200110.pdf.

- Brown, D., S. Hall and M.E. Davis (2019)**, “Prosumers in the post subsidy era: an exploration of new prosumer business models in the UK”, *Energy Policy*, Vol. 135 (December), Elsevier, Amsterdam, p. 110984.
- Buonomano, A. et al. (2016)**, “Experimental analysis and dynamic simulation of a novel high-temperature solar cooling system”, *Energy Conversion and Management*, Vol. 109 (February), Elsevier, Amsterdam, pp. 19–39.
- Burmester, D. et al. (2017)**, “A review of nanogrid topologies and technologies”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 67 (January), Elsevier, Amsterdam, pp. 760–775.
- Byers, L. et al. (2019)**, *A global database of power plants* (database), World Resources Institute, Washington, D.C., www.wri.org/publication/global-power-plant-database.
- C40 Cities (2019)**, “About”, www.c40.org/about (accessed 23 October 2019).
- C40 Cities (2011)**, *Case study: Waste to energy cuts 200,000 tCO₂ annually in Gothenburg*, C40 Cities, London, www.c40.org/case_studies/waste-to-energy-cuts-200000-tco2-annually-in-gothenburg.
- Carbon Neutral Cities Alliance (2019)**, “Carbon Neutral Cities Alliance Members”, <https://carbonneutralcities.org> (accessed 23 October 2019).
- carbonn Center (2019)**, “The carbonn Center”, <https://carbonn.org> (accessed 23 October 2019).
- Cayla, J.M. and N. Maïzi (2015)**, “Integrating household behavior and heterogeneity into the TIMES-Households model”, *Applied Energy*, Vol. 139 (February), Elsevier, Amsterdam, pp. 56–67.
- CDIA (2020)**, “What is CDIA”, <https://cdia.asia/who-we-are/what-is-cdia> (accessed 31 March 2020).
- CDP (2019a)**, “2018 – Cities Renewable Energy Targets”, <https://data.cdp.net/Renewable-Energy/2018-Cities-Renewable-Energy-Targets/eai5-mrwy> (accessed November 2019).
- CDP (2019b)**, “Explore city, state and regional energy data and discover their progress towards low-carbon economies”, <https://data.cdp.net/browse?category=Renewable%20Energy> (accessed 12 March 2019).
- Chaliki, P., N.J. Themelis and C.S. Psomopoulos (2016)**, “WTE plants installed in European cities: A review of success stories”, *Management of Environmental Quality: An International Journal*, Vol. 27/5, Emerald Publishing, Melbourne, pp. 606–620.
- Chang, Y. and Y. Li (2014)**, *Non-renewable resources in Asian economies: Perspectives of availability, applicability, acceptability, and affordability*, Economic Research Institute for ASEAN and East Asia, Jakarta.
- Cilliers, J., B. Hughes and J. Moyer (2011)**, *African futures 2050: The next forty years*, Institute for Security Studies and Pardee Center for International Futures, Pretoria and Denver.
- Climate Mayors (2018)**, *Cities climate action compendium*, US Climate Mayors, Washington, D.C.
- Covenant of Mayors for Climate & Energy (2020)**, “Our cities”, www.globalcovenantofmayors.org/our-cities (accessed 20 January, 2020).
- Covenant of Mayors for Climate & Energy (2019)**, “Covenant community”, www.covenantofmayors.eu/about/covenant-community/signatories.html (accessed 3 December 2019).
- Crouch, D. (11 March 2019)**, “Nordics tackle ‘Achilles heel’ of incineration power schemes”, *Financial Times*, www.ft.com/content/21777666-248f-11e9-b20d-5376ca5216eb.

- Data Driven Yale, NewClimate Institute and PBL (2018)**, *Global climate action from cities, regions and businesses*, Data Driven Yale, NewClimate Institute, PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, https://datadrivenlab.org/wp-content/uploads/2018/08/YALE-NCI-PBL_Global_climate_action.pdf.
- Davies, J.H. (2013)**, “Global map of solid Earth surface heat flow”, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, Vol. 14/10, Wiley, Hoboken, New Jersey, pp. 4 608–4 622.
- del Amo, A. et al. (2017)**, “An innovative urban energy system constituted by a photovoltaic/thermal hybrid solar installation: Design, simulation and monitoring”, *Applied Energy*, Vol. 186, Elsevier, Amsterdam, pp. 140–151.
- Dhakai, S. (2006)**, *Urban transportation and the environment in Kathmandu Valley, Nepal: Integrating global carbon concerns into local air pollution management*, Institute for Global Environmental Strategies, Kanagawa.
- Dhimish, M. et al. (2018)**, “Preliminary assessment of the solar resource in the United Kingdom”, *Clean Energy*, Vol. 2/2, Oxford University Press, Oxford, UK, pp. 112–125.
- DIE (2020)**, *NDC Explorer* (database), German Development Institute, Bonn, www.die-gdi.de/en/ndc, (accessed March 2020).
- Dilimulati, A., T. Stathopoulos and M. Paraschivoiu (2018)**, “Wind turbine designs for urban applications: A case study of shrouded diffuser casing for turbines”, *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, Vol. 175 (April), Elsevier, Amsterdam, pp. 179–192.
- DNV GL (2019a)**, *Energy transition outlook 2019: A global and regional forecast to 2050*, DNV GL, Oslo, <https://eto.dnvgl.com/2019/index.html>.
- DNV GL (2019b)**, *Digitalisation and the future of energy*, DNV GL, Oslo, www.dnvgl.com/power-renewables/themes/digitalization/index.html.
- Dreyfus, G. et al. (2020)**, *Assessment of climate and development benefits of efficient and climate-friendly cooling*, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, California, https://eta-publications.lbl.gov/sites/default/files/ilovepdf_merged_11.01.02_am.pdf.
- Dulal, H.B. et al. (2013)**, “Renewable energy diffusion in Asia: Can it happen without government support?” *Energy Policy*, Vol. 59 (August), Elsevier, Amsterdam, pp. 301–311.
- EASME (2019)**, “Overview: Building integrated photovoltaics (BIPV) as a viable option among renewables”, Executive Agency for Small and Medium-sized Enterprises, Brussels, www.buildup.eu/en/news/overview-building-integrated-photovoltaics-bipv-viable-option-among-renewables.
- Ecoprog (2018)**, “Dynamic development of waste-to-energy market continues”, Ecoprog, Cologne, www.ecoprog.com/fileadmin/user_upload/pressemitteilungen/ecoprog_press_release_Waste_to_Energy_2017-2018.pdf.
- Edenhofer, O. et al. (2014)**, “Technical summary”. In: *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ipcc_wg3_ar5_technical-summary.pdf.
- Edo, M. and I. Johansson (2018)**, “International perspectives of energy from waste—challenges and trends”, *IRRC Waste-to-Energy Conference*, Vienna, pp. 47–61.
- EEA (2016)**, *Air pollutant emission inventory guidebook 2016*, European Environment Agency, Brussels, www.eea.europa.eu/themes/air/air-pollution-sources-1/emep-eea-air-pollutant-emission-inventory-guidebook/emep.
- Energy Cities (2018)**, *Cities heading towards 100% renewable energy*, Energy Cities, Brussels, https://energy-cities.eu/wp-content/uploads/2018/11/publi_100percent_final-web_en.pdf.

- ESMAP (2012)**, *Geothermal handbook: Planning and financing power generation*, Energy Sector Management Assistance Program, World Bank, Washington, D.C., www.esmap.org/sites/esmap.org/files/DocumentLibrary/FINAL_Geothermal%20Handbook_TR002-12_Reduced.pdf.
- Estrada, F. et al. (2017)**, "A global economic assessment of city policies to reduce climate change impacts", *Nature Climate Change*, Vol. 7/6, Springer Nature, London, pp. 403–406.
- FERC (2008)**, *Assessment of demand response and advanced metering*, US Federal Energy Regulatory Commission, Washington, D.C.
- Forsberg, J. and A. Krook-Riekkola (2017)**, "Supporting cities' emission mitigation strategies: Modelling urban transport in a TIMES energy system modelling framework", *WIT Transactions on the Built Environment, Urban Transport XXIII*, WIT Press, Southampton, UK, pp. 15–25.
- Friedman, D.S. et al. (2012)**, "Environmental and economic impacts of a carbon tax: An application of the Long Island market model", *Middle States Geographer*, Vol. 44, Middle States Division of the Association of American Geographers, pp. 18–26.
- Fulzele, J.B. and S. Dutt (2012)**, "Optimum planning of hybrid renewable energy system using HOMER", *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, Vol. 2/1, Institute of Advanced Engineering and Science, Yogyakarta, Indonesia, pp. 68–74.
- German Environment Agency (2008)**, *The role of waste incineration in Germany*, German Environment Agency, Dessau-Roßlau, www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/3872.pdf.
- Gilmanova, A. and Y. Chen (24 February 2020)**, "China shapes future of global CSP development: From an international perspective", China Energy News (中国能源报), http://paper.people.com.cn/zgnyb/html/2020-02/24/content_1973108.htm (in Chinese).
- Giugliano, M. and E. Ranzi (2016)**, "Thermal treatments of waste. Waste to energy (WtE)", *Reference Module in Chemistry, Molecular Sciences and Chemical Engineering*, Elsevier, Amsterdam.
- Glasgow City Council (2014)**, *Sustainable Glasgow*, Glasgow, www.smartcities-infosystem.eu/files/step-up_energy_and_carbon_masterplan_-_sustainable_glasgow.pdf.
- Global Volcanism Program (2020)**, *Volcanoes of the World* (database), Smithsonian Institution Global Volcanism Program, <https://doi.org/10.5479/si.GVP.VOTW4-2013> (accessed 27 February 2020).
- Global Wind Atlas (2019)**, "Global Wind Atlas 3.0 map of wind power density at 100m dataset", <https://globalwindatlas.info/downloads/gis-files> (accessed 14 December 2019).
- GlobalData (2019)**, "Power plants", <https://power.globaldata.com/PowerPlants/PowerPlantsGrid> (accessed October 2019).
- Grieser, B. et al. (2015)**, "Economics of small wind turbines in urban settings: An empirical investigation for Germany", *Renewable Energy*, Vol. 78 (June), Elsevier, Amsterdam, pp. 334–350.
- Groissböck, M. (2019)**, "Are open source energy system optimization tools mature enough for serious use?" *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 102 (March), Elsevier, Amsterdam, pp. 234–248.
- Güneralp, B. et al. (2017)**, "Global scenarios of urban density and its impacts on building energy use through 2050", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Vol. 114/34, US National Academy of Sciences, Washington, D.C., pp. 8 945–8 950.
- Güneralp, B., I. Güneralp and Y. Liu (2015)**, "Changing global patterns of urban exposure to flood and drought hazards", *Global Environmental Change*, Vol. 31 (March), Elsevier, Amsterdam, pp. 217–225.
- Hall, S. and K. Roelich (2016)**, "Business model innovation in electricity supply markets: The role of complex value in the United Kingdom", *Energy Policy*, Vol. 92 (May), Elsevier, Amsterdam, pp. 286–298.

- Hemis, H. (2017)**, *Integrating energy in urban planning processes – insights from Amsterdam/ Zaanstad, Berlin, Paris, Stockholm, Vienna, Warsaw and Zagreb*, Synthesis report of Work Package 4 “Innovative governance solutions for integrative urban energy planning”, Urban Learning, European Commission, Brussels, www.urbanlearning.eu/fileadmin/user_upload/documents/D4-2_Synthesis-report_upgraded_processes_final_170807.pdf.
- Henley, J. and A. Giuffrida (13 November 2019)**, “Two people die as Venice floods at highest level in 50 years”, *The Guardian* (UK), www.theguardian.com/environment/2019/nov/13/waves-in-st-marks-square-as-venice-flooded-highest-tide-in-50-years.
- Hepburn, C. (2006)**, “Regulation by prices, quantities, or both: An update and review”, *Oxford Review of Economic Policy*, Vol. 22/2, Oxford University Press, Oxford, UK, pp. 226–247.
- Heyzer, N. (2014)**, “Six challenges for the future of our cities”, World Economic Forum, www.weforum.org/agenda/2014/02/six-challenges-future-cities.
- Hoes, O. et al. (2017)**, “Systematic high-resolution assessment of global hydropower potential”, *PLOS ONE* (8 February), PLOS, San Francisco.
- Hoogwijk, M. and W. Graus (2008)**, *Global potential of renewable energy sources: A literature review*, REN21, Utrecht.
- Hopkins, A.S. et al. (2018)**, *Decarbonization of heating energy use in California buildings*, Synapse Energy Economics, Inc., Cambridge, Massachusetts, www.synapse-energy.com/sites/default/files/Decarbonization-Heating-CA-Buildings-17-092-1.pdf.
- Hossain, M.S. et al. (2016)**, “Role of smart grid in renewable energy: An overview”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 60 (July), Elsevier, Amsterdam, pp. 1 168–1 184.
- Hott, A. (31 May 2018)**, “Energy as an engine of Africa’s industrialization”, African Development Bank, <https://blogs.afdb.org/energy-engine-africas-industrialization>.
- Huang, R. et al. (2011)**, “Optimal design of hybrid energy system with PV/wind turbine/storage: A case study”, *2011 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm)*, Brussels, pp. 511–516.
- Huide, F. et al. (2017)**, “A comparative study on three types of solar utilization technologies for buildings: Photovoltaic, solar thermal and hybrid photovoltaic/thermal systems”, *Energy Conversion and Management*, Vol. 140 (May), Elsevier, Amsterdam, pp. 1–13.
- Huppmann, D. et al. (2019)**, “The MESSAGEix Integrated Assessment Model and the ix modeling platform (ixmp): An open framework for integrated and cross-cutting analysis of energy, climate, the environment, and sustainable development”, *Environmental Modelling & Software*, Vol. 112 (February), Elsevier, Amsterdam, pp. 143–156.
- ICLEI (16 November 2016)**, “Why are cities setting 100% renewable energy targets?” CityTalk, ICLEI–Local Governments for Sustainability, <https://talkofthecities.iclei.org/why-are-cities-setting-100-renewable-energy-targets>.
- IDB (6 March 2020)**, “Connecting Latin American and Caribbean cities for sustainable urban development”, Inter-American Development Bank, Washington, D.C., www.iadb.org/en/urban-development-and-housing/idb-cities-network.
- IEA (2018)**, *The future of cooling: Opportunities for energy-efficient air conditioning*, International Energy Agency, Paris.
- IEA (2008)**, *Particulate emissions from biomass combustion in IEA countries*, International Energy Agency, Paris.
- IEA Task 55 (2019)**, *Solar heat for cities: The sustainable solution for district heating*, International Energy Agency Task 55, International Energy Agency, Paris, <http://task55.iea-shc.org/Data/Sites/1/publications/Solar-Heat-for-Cities--The-Sustainable-Solution-for-District-Heating.pdf>.

- IIASA (2018)**, “MESSAGE-basin Model applied to Indus”, International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, https://iiasa.ac.at/web/home/research/iswel/4_MESSAGE_Basin_Model_Applied_to_Indus_-_Adriano_Vinca_-_IIA.pdf.
- Ikejemba, E.C.X. et al. (2017)**, “The empirical reality and sustainable management failures of renewable energy projects in Sub-Saharan Africa (part 1 of 2)”, *Renewable Energy*, Vol. 102 (March), Elsevier, Amsterdam, pp. 234–240.
- IMF (2019)**, “GDP per capita, current prices”, International Monetary Fund, www.imf.org/external/datamapper/NGDPDPC@WEO/AUS/CAN/FRA/DEU/GBR/USA/JPN.
- IPCC (2019)**, *IPCC special report on the ocean and cryosphere in a changing climate*, Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, www.ipcc.ch/srocc/chapter/summary-for-policymakers.
- IRENA (forthcoming a)**, *Renewable energy solutions for cities of the future*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- IRENA (forthcoming b)**, *Technical guidelines for the development of bankable renewable energy heating and cooling projects*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- IRENA (forthcoming c)**, *Thermal energy storage in district heating and cooling*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- IRENA (2020a)**, *Renewable power generation costs in 2019*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- IRENA (2020b)**, *Global renewables outlook: Energy transformation 2050*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- IRENA (2020c)**, *Renewable energy capacity statistics 2020*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- IRENA (2019a)**, *Innovation landscape for a renewable-powered future: Solutions to integrate variable renewables*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- IRENA (2019b)**, *Innovation landscape brief: Smart charging for electric vehicles*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- IRENA (2019c)**, *Innovation landscape brief: Aggregators*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- IRENA (2019d)**, *Global energy transformation: A roadmap to 2050*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- IRENA (2019e)**, *Renewable energy statistics 2019*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- IRENA (2019f)**, *Solar simulators: Application to developing cities*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- IRENA (2019g)**, *Innovation landscape brief: Innovative ancillary services*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- IRENA (2018)**, *Bioenergy from Finnish forests: Sustainable, efficient and modern use of wood*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- IRENA (2016)**, *Renewable energy in cities*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- IRENA (2015a)**, *Renewable energy target setting*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- IRENA (2015b)**, *Africa 2030: Roadmap for a renewable energy future*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- IRENA (2015c)**, *Renewable energy zones for the African Clean Energy Corridor*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- IRENA (2015d)**, *Solar heat for industrial processes*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- IRENA and IEA-ETSAP (2015)**, *Technology brief: Solar heat for industrial processes*, International Renewable Energy Agency and International Energy Agency Energy Technology Systems Analysis Programme, Abu Dhabi and Paris.

- IRENA, ICLEI and GIZ (2018)**, *Scaling up renewables in cities: Opportunities for municipal governments*, International Renewable Energy Agency, ICLEI–Local Governments for Sustainability and German Agency for International Cooperation (GIZ), Abu Dhabi.
- ISWA (2015)**, *Bottom ash from WTE plants: Metal recovery and utilisation*, International Solid Waste Association, Rotterdam.
- ISWA (2013)**, *Alternative waste conversion technologies*, International Solid Waste Association, Rotterdam.
- Johnson, N. et al. (2017)**, “A reduced-form approach for representing the impacts of wind and solar PV deployment on the structure and operation of the electricity system”, *Energy Economics*, Vol. 64 (May), Elsevier, Amsterdam, pp. 651–664.
- Johnson, N. et al. (2011)**, “Modeling distributed premises-based renewables integration using HOMER”, *Grid-Interop 2011*, 5–8 December, Phoenix, Arizona.
- Kadian, R. et al. (2007)**, “Energy-related emissions and mitigation opportunities from the household sector in Delhi”, *Energy Policy*, Vol. 35/12, Elsevier, Amsterdam, pp. 6 195–6 211.
- Kale, R.V. and S.D. Pohekar (2014)**, “Electricity demand and supply scenarios for Maharashtra (India) for 2030: An application of long-range energy alternatives planning”, *Energy Policy*, Vol. 72 (September), Elsevier, Amsterdam, pp. 1–13.
- Keirstead, J. and N. Shad (eds.) (2013)**, “Chapter 2: Conceptualizing urban energy systems”, in *Urban Energy Systems: An Integrated Approach*, Routledge, Abingdon-on-Thames.
- Kumar, R. et al. (2018)**, “A critical review of vertical axis wind turbines for urban applications”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 89 (June), Elsevier, Amsterdam, pp. 281–291.
- Kumar, Y.V. and R. Bhimasingu (2014)**, “Optimal sizing of microgrid for an urban community building in south India using HOMER”, *2014 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*, Mumbai, pp. 1–6.
- Lazarus, M. et al. (2011)**, *Getting to zero: A pathway to a carbon neutral Seattle*, prepared for Project Team: Scenario for a Carbon Neutral Seattle, Seattle, Washington.
- Lemonde, M. (28 May 2020)**, “What is the future of small-scale anaerobic digestion?” BiogasWorld, www.biogasworld.com/news/future-small-scale-anaerobic-digestion.
- Lim, X. (2017)**, “How heat from the Sun can keep us all cool”, *Nature*, 31 January, Springer Nature, London.
- Limberger, J. et al. (2017)**, “Geothermal energy in deep aquifers: A global assessment of the resource base for direct heat utilization”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 82 (February), Elsevier, Amsterdam, pp. 961–975.
- Lipman, T.E. et al. (2005)**, *An assessment of battery and hydrogen energy storage systems integrated with wind energy resources in California*, University of California at Berkeley, Berkeley, California.
- Liu, S. et al. (2013)**, “Optimal configuration of hybrid solar-wind distributed generation capacity in a grid-connected microgrid”, *2013 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT)*, Washington, D.C.
- Lund, J. and A. Toth (2020)**, “Direct utilization of geothermal energy 2020 worldwide review”, *Proceedings World Geothermal Congress 2020*, Reykjavik, Iceland, 26 April–2 May, www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/WGC/2020/01018.pdf.
- Lund, J.W. (2016)**, “Geothermal energy utilization”, in Kaltschmitt, M. et al. (eds.), *Renewable Energy Systems*, Springer, New York, New York.
- Mann, D. et al. (2015)**, *Taking the LEAP in Uganda: Reflections on developing urban energy baseline and futures models for Kasese and Jinja municipalities*, SAMSET, Uganda.
- Marsden, G. and P. Bonsall (2006)**, “Performance targets in transport policy”, *Transport Policy*, Vol. 13/3, Elsevier, Amsterdam, pp. 191–203.

- Martinez, H., K. DeFrancia and A. Schroder (2018)**, *Moving towards 100% renewable energy: Drivers behind city policies and pledges*, 76th Annual Midwest Political Science Association Conference, Chicago.
- Masdar Institute and IRENA (2015)**, *Renewable energy prospects: United Arab Emirates, REmap 2030 analysis*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- Masson, V. et al. (2014)**. “Adapting cities to climate change: A systemic modelling approach”, *Urban Climate*, Vol. 10 (December), Elsevier, Amsterdam, pp. 407–429.
- Mathiesen, B.V. and K. Hansen (2017)**, *The role of solar thermal in future energy systems: Country cases for Germany, Italy, Austria and Denmark*, Aalborg University, Aalborg.
- Maturi, L. and J. Admi (2018)**, *Building Integrated Photovoltaic (BIPV) in Trentino Alto Adige*, Springer International Publishing, Switzerland.
- Maurer, C. et al. (2017)**, “Progress in building-integrated solar thermal systems”, *Solar Energy*, Vol. 154 (September), Elsevier, Amsterdam, pp. 158–186.
- Mavropoulos, A. et al. (2012)**, *Globalization and waste management. Phase 1: Concepts and facts*, International Solid Waste Association, Vienna.
- Mikus, M., K. Dziedzic and M. Jurczyk (2016)**, “Flue gas cleaning in municipal waste-to-energy plants”, *Infrastructure and Ecology of Rural Areas* (October), Index Copernicus, Warsaw, pp. 1 179–1 193.
- Milios, L. (2013)**, *Municipal waste management in Sweden*, Paper for the European Environment Agency, Brussels.
- Mirakyan, A. and R. De Guio (2015)**, “Chapter 2: Energy infrastructure planning in cities and territories, quality factors of methods for infrastructure planning”, in *Three Domain Modelling and Uncertainty Analysis, Energy Systems*, Springer International Publishing, Switzerland.
- MIT (2015)**, *The future of solar energy*, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, <http://energy.mit.edu/wp-content/uploads/2015/05/MITEI-The-Future-of-Solar-Energy.pdf>.
- Mohajeri, N. et al. (2016)**, “Effects of urban compactness on solar energy potential”, *Renewable Energy*, Vol. 93 (August), Elsevier, Amsterdam, pp. 469–482.
- Moya, D., C. Aldas and P. Kaparaju (2018)**, “Geothermal energy: Power plant technology and direct heat applications”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 94 (October), Elsevier, Amsterdam, pp. 889–901.
- Nagao, T. and S. Uyeda (1995)**, “Heat-flow distribution in Southeast Asia with consideration of volcanic heat”, *Tectonophysics*, Vol. 251/1–4, Elsevier, Amsterdam, pp. 153–159.
- Nagy, Z. et al. (2016)**, “The adaptive solar facade: From concept to prototypes”, *Frontiers of Architectural Research*, Vol. 5/2, Elsevier, Amsterdam, pp. 143–156.
- NASA (2019)**, “Global temperature”, US National Aeronautics and Space Administration, <https://climate.nasa.gov/vital-signs/global-temperature>.
- Nastasi, B. and U. Di Matteo (2016)**, “Solar energy technologies in Sustainable Energy Action Plans of Italian big cities”, *Energy Procedia*, Vol. 101 (November), Elsevier, Amsterdam, pp. 1 064–1 071.
- NC State University (2018)**, *Energy storage options for North Carolina*, North Carolina State University, Raleigh, North Carolina, <https://energy.ncsu.edu/storage/wp-content/uploads/sites/2/2019/02/NC-Storage-Study-FINAL.pdf>.
- Nuorkivi, A.E. and A-M. Ahonen (2013)**, “Urban planners with renewable energy skills”, *TeMA – Journal of Land Use, Mobility and Environment*, Vol. 6/2, University of Naples, Naples, pp. 159–170.
- Nussbaumer, T. (2010)**, *Overview on technologies for biomass combustion and emission levels of particulate matter*, prepared for Swiss Federal Office for the Environment, Geneva, <https://pdfs.semanticscholar.org/4f8a/bc2e42c41d1a2be4c18f68af8972ff404712.pdf>.
- OECD (2009)**, *Competitive cities and climate change*, Kamal-Chaoui, L., Robert, A. (eds.), Regional Development Working Papers No. 2, Organisation for Economic Co-operation and Development, Paris, www.oecd.org/cfe/regional-policy/44232251.pdf.

- Okereke, O.C. (2017)**, “Causes of failure and abandonment of projects and project deliverables in Africa”, *PM World Journal*, Vol. 6/1, PM World, Addison, Texas.
- Óskarsdóttir, M.Ó. (2014)**, *A general description and comparison of horizontal axis wind turbines and vertical axis wind turbines*, MSc Thesis, School of Engineering and Natural Sciences, Faculty of Industrial Engineering, Mechanical Engineering and Computer Science, Reykjavik, Iceland.
- Pauschinger, T. (2016)**, “Solar thermal energy for district heating”, in Wiltshire, R. (ed.), *Advanced District Heating and Cooling (DHC) Systems*, Woodhead Publishing Series in Energy, Elsevier, Amsterdam, pp. 99–120, www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9781782423744000057.
- Peng, B. et al. (2015)**, “Urban passenger transport energy saving and emission reduction potential: A case study for Tianjin, China”, *Energy Conversion and Management*, Vol. 102 (September), Elsevier, Amsterdam, pp. 4–16.
- Phurailatpam, C. et al. (2018)**, “Planning and optimization of autonomous DC microgrids for rural and urban applications in India”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 82 (February), Elsevier, Amsterdam, pp. 194–204.
- Porteous, A. (2005)**, “Why energy from waste incineration is an essential component of environmentally responsible waste management”, *Waste Management*, Vol. 25/4, Elsevier, Amsterdam, pp. 451–459.
- Publicover, B. (27 January 2020)**, “Solar is gaining traction in MENA region—but plenty of obstacles remain”, *pv magazine*, www.pv-magazine.com/2020/01/17/mesia-outlines-past-progress-future-promise-in-sweeping-look-at-solar-across-middle-east-and-north-africa.
- Ramos, A. et al. (2017)**, “Hybrid photovoltaic-thermal solar systems for combined heating, cooling and power provision in the urban environment”, *Energy Conversion and Management*, Vol. 150 (October), Elsevier, Amsterdam, pp. 838–850.
- Reckien, D. et al. (2018)**, “How are cities planning to respond to climate change? Assessment of local climate plans from the 885 cities in the EU-28”, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 191 (August), Elsevier, Amsterdam, pp. 207–219.
- REN21 (2019a)**, *Renewables 2019 global status report*, Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, Paris.
- REN21 (2019b)**, *Asia and the Pacific renewable energy status report*, Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, Paris.
- REN21, ISEP and ICLEI (2012)**, *Global status report on local renewable energy policies*, Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, Institute for Sustainable Energy Policies and ICLEI–Local Governments for Sustainability, www.ren21.net/Portals/0/documents/Resources/REN21_Local_Renewables_Policies_2011.pdf.
- Reynolds, J. et al. (2017)**, “Upscaling energy control from building to districts: Current limitations and future perspectives”, *Sustainable Cities and Society*, Vol. 35 (November), Elsevier, Amsterdam, pp. 816–829.
- Rickwood P., G. Glazebrook and G. Searle (2008)**, “Urban structure and energy—a review”, *Urban Policy Research*, Vol. 26/1, Taylor & Francis, London, pp. 57–81.
- Rodrigues da Costa, M. et al. (2011)**, *Regulation for smart grids*, Eurelectric, Brussels.
- Rogoff, M.J. and F. Screve (2019)**, *Waste-to-Energy: Technologies and Project Implementation* (3rd edition), Elsevier, Amsterdam.
- Rosas-Flores, J.A. et al. (2016)**, “Potential energy saving in urban and rural households of Mexico by use of solar water heaters, using geographical information system”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 53 (January), Elsevier, Amsterdam, pp. 243–252.
- S&P Global Platts (2018)**, *UDI World Electric Power Plants Database (WEPP)* (database), Platts, Washington, D.C.

- Sadhishkumar, S. and T. Balusamy (2014)**, “Performance improvement in solar water heating systems—a review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 37 (September), Elsevier, Amsterdam, pp. 191–198.
- Saeidi, D. et al. (2013)**, “Aerodynamic design and economical evaluation of site specific small vertical axis wind turbines”, *Applied Energy*, Vol. 101 (January), Elsevier, Amsterdam, pp. 765–775.
- Saheb, Y. et al. (2014)**, *Guidebook: How to develop a Sustainable Energy Action Plan (SEAP) in South Mediterranean Cities*, Science and policy report of the European Union Joint Research Centre, Brussels, <https://e3p.jrc.ec.europa.eu/publications/guidebook-how-develop-sustainable-energy-action-plan-seap-south-mediterranean-cities>.
- Salata, F. et al. (2015)**, “Method for energy optimization with reliability analysis of a trigeneration and teleheating system on urban scale: A case study”, *Energy and Buildings*, Vol. 86 (January), Elsevier, Amsterdam, pp. 118–136.
- Santamouris, S. (2014)**, “On the energy impact of urban heat island and global warming on buildings”, *Energy and Buildings*, Vol. 82 (October), pp. 100–113.
- Scanner, B. (2017)**, “Ground source heat pumps—history, development, current status, and future prospects”, 12th IEA Heat Pump Conference 2017, Rotterdam, <http://hpc2017.org/wp-content/uploads/2017/05/K.2.9.1-Ground-Source-Heat-Pumps-history-development-current-status-and-future-prospects.pdf>.
- Scanner, B. (2005)**, “Shallow geothermal systems”, <https://geothermalcommunities.eu/assets/elearning/6.11.Shallow%20Geothermal%20Systems.pdf>.
- Scarlat, N. et al. (2015)**, “Evaluation of energy potential of municipal solid waste from African urban areas”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 50 (October), Elsevier, Amsterdam, pp. 1 269–1 286.
- SDH (2019)**, “Solar District Heating. The European Union’s Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement No 691624”, www.solar-district-heating.eu/en/about-sdh.
- SEI (2019)**, “LEAP”, Stockholm Environment Institute, <https://leap.sei.org> (accessed 6 March 2019).
- Sierra Club (2019)**, “100% commitments in cities, counties, & states”, www.sierraclub.org/ready-for-100/commitments (accessed 12 February 2019).
- Sierra Club (2017)**, *Ready for 100%—2017 case study report*, www.sierraclub.org/files/blog/RF100-Case-Studies-Report-2017.pdf.
- Silva, S. et al. (2018)**, “Electricity residential demand elasticities: Urban versus rural areas in Portugal”, *Energy*, Vol. 144 (February), Elsevier, Amsterdam, pp. 627–632.
- Simoës, T. and A. Estanquero (2016)**, “A new methodology for urban wind resource assessment”, *Renewable Energy*, Vol. 89 (April), Elsevier, Amsterdam, pp. 598–605.
- Sioshansi, F. (2019)**, *Consumer, prosumer, prosumager: How service innovations will disrupt the utility business model*, Academic Press, Cambridge, Massachusetts.
- Skalik, L. and I. Skalikova (2019)**, “Long-term global radiation measurements in Denmark and Sweden”, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 471/10, IOP, Bristol.
- Smart City Sweden (2020a)**, “Dåva cogeneration plants”, <https://smartcitysweden.com/best-practice/216/dava-cogeneration-plants> (accessed 20 May 2020).
- Smart City Sweden (2020b)**, “Gothenburg smart district cooling”, <https://smartcitysweden.com/best-practice/386/gothenburg-smart-district-cooling> (accessed 20 May 2020).
- Stathopoulos, T. et al. (2018)**, “Urban wind energy: Some views on potential and challenges”, *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, Vol. 179 (August), Elsevier, Amsterdam, pp. 146–157.
- Stegner, C. et al. (2016)**, “First year of smart metering with a high time resolution—realistic self-sufficiency rates for households with solar batteries”, *Energy Procedia*, Vol. 99 (November), Elsevier, Amsterdam, pp. 360–369.

SUPSI et al. (2019), *Standardization, performance risks and identification of related gaps for a performance-based qualification in BIPV*, lead author: University of Applied Sciences and Arts of Italian Switzerland (SUPSI), contributing authors: Tecnalia Research & Innovation and Scientific and Technical Centre for Building (CSTB), www.bipvboost.eu.

Toja-Silva, F. et al. (2018), “A review of computational fluid dynamics (CFD) simulations of the wind flow around buildings for urban wind energy exploitation”, *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, Vol. 180 (September), Elsevier, Amsterdam, pp. 66–87.

Toja-Silva, F. et al. (2013), “Urban wind energy exploitation systems: Behaviour under multi directional flow conditions—opportunities and challenges”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 24 (August), Elsevier, Amsterdam, pp. 364–378.

Tripanagnostopoulos, Y. (2012), “Solar thermal system: Components and applications”, in Sayigh, A. (ed.), *Comprehensive Renewable Energy*, Elsevier, Amsterdam.

Tummala, A. et al. (2016), “A review on small scale wind turbines”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 56 (April), Elsevier, Amsterdam, pp. 1 351–1 371.

UK100 (2019), “About UK100”, www.uk100.org (accessed 22 October 2019).

Umeå Energi (2019), “A short introduction to Umeå Energi and Dåva CHP”, www.unece.org/fileadmin/DAM/timber/meetings/2019/20190603/5th-tos-we-2-xxx-umea-energi-dava.pdf.

UN DESA (2019), *World urbanization prospects: The 2018 revision*, United Nations Department of Economic and Social Affairs, Population Division, New York.

UN DESA (2018), *The world's cities in 2018—data booklet*, United Nations Department of Economic and Social Affairs, Population Division, New York, www.un.org/en/events/citiesday/assets/pdf/the_worlds_cities_in_2018_data_booklet.pdf.

UN DESA (2016), *The world's cities in 2016—data booklet*, United Nations Department of Economic and Social Affairs, Population Division, New York, www.un.org/en/development/desa/population/publications/pdf/urbanization/the_worlds_cities_in_2016_data_booklet.pdf.

UN DESA (2015), *World urbanization prospects: The 2014 revision*, United Nations Department of Economic and Social Affairs, Population Division, New York, <https://esa.un.org/unpd/wup/publications/files/wup2014-report.pdf>.

UNDP (2017), “Rapid urbanisation: Opportunities and challenges to improve the well-being of societies”, United Nations Development Programme, New York, <http://hdr.undp.org/en/content/rapid-urbanisation-opportunities-and-challenges-improve-well-being-societies>.

UNECA (2017), *Urbanization and industrialization for Africa's transformation*, United Nations Economic Commission for Africa, Addis Ababa, Ethiopia.

UNEP (2004), “Impacts of summer 2003 heat wave in Europe”, Environment Alert Bulletin, United Nations Environment Programme, www.unisdr.org/files/1145_ewheatwave.en.pdf.

UN ESCAP and UN-Habitat (2015), *The state of Asian and Pacific cities*, United Nations Economic and Social Commission for Asia and the Pacific and United Nations Human Settlements Programme, Bangkok and Nairobi.

UN Statistics (2020), “City population by sex, city and city type”, UN Data, <http://data.un.org/Data.aspx?d=POP&f=tableCode:240> (accessed 3 March 2020).

UN-Habitat (2010), *Cities for all: Bridging the urban divide*, United Nations Human Settlements Programme, Nairobi.

UN-Habitat and ICLEI (2009), *Sustainable urban energy planning: A handbook for cities and towns in developing countries*, United Nations Human Settlements Programme and ICLEI—Local Governments for Sustainability, Nairobi and Bonn, <https://sustainabledevelopment.un.org/index.php?page=view&type=400&nr=293&menu=1515>.

- UNISDR (2016)**, *United Nations international strategy for disaster reduction. Annual report 2015*, United Nations Office for Disaster Risk Reduction, Geneva, www.unisdr.org/files/48588_unisdrannualreport2015evs.pdf.
- Urban, F. et al. (2007)**, “Modelling energy systems for developing countries”, *Energy Policy*, Vol. 35/6, Elsevier, Amsterdam, pp. 3 473–3 482.
- US Conference of Mayors (2020)**, “Mayors climate protection center”, United States Conference of Mayors, www.usmayors.org/mayors-climate-protection-center (accessed 8 February 2020).
- US EPA (2018)**, “Energy recovery from the combustion of municipal solid waste (MSW)”, US Environmental Protection Agency, www.epa.gov/smm/energy-recovery-combustion-municipal-solid-waste-msw#HowWorks.
- van Leeuwen, R.P. et al. (2015)**, “Upscaling a district heating system based on biogas cogeneration and heat pumps”, *Energy, Sustainability and Society*, Vol. 5, Springer, Berlin, p. 16.
- van Loo, S. and J. Koppejan (eds.) (2002)**, *Biomass: Combustion and Cofiring*, Twente University Press, The Netherlands.
- Vliet, O.V. et al. (2012)**, “Synergies in the Asian energy system: Climate change, energy security, energy access and air pollution”, *Energy Economics*, Vol. 34 (December), Elsevier, Amsterdam, pp. 40–480.
- Wang, Z. et al. (2015)**, “Solar water heating: From theory, application, marketing and research”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 41 (January), Elsevier, Amsterdam, pp. 68–84.
- WBA (2016)**, *The role of bioenergy in European cities*, World Bioenergy Association, Stockholm, https://worldbioenergy.org/uploads/WBA%20Report_Bioenergy%20in%20European%20Cities_lowres.pdf.
- We Are Still In (2020)**, “Who’s in”, www.wearestillin.com/signatories (accessed March 2020).
- Weiss, W. and M. Rommel (2008)**, *Process heat collectors*, AEE–Institute for Sustainable Technologies and Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, Gleisdorf, www.iea-shc.org/data/sites/1/publications/task33-Process_Heat_Collectors.pdf.
- Weiss, W. and M. Spörk-Dür (2019)**, *Solar heat worldwide: Global market development and trends in 2019*, International Energy Agency Solar Heating & Cooling Programme, Paris, www.iea-shc.org/Data/Sites/1/publications/Solar-Heat-Worldwide-2020.pdf.
- Werner, S. (2017)**, “International review of district heating and cooling”, *Energy*, Vol. 137 (October), Elsevier, Amsterdam, pp. 617–631.
- WHO (2018)**, *WHO Global Ambient Air Quality Database (database)*, World Health Organization, Geneva, www.who.int/airpollution/data/cities/en.
- World Bank (2017)**, “Population growth (annual %)”, <https://data.worldbank.org/indicator/SP.POP.GROW>.
- Yang, A-S. et al. (2016)**, “Estimation of wind power generation in dense urban area”, *Applied Energy*, Vol. 171 (June), Elsevier, Amsterdam, pp. 213–230.
- Yu, H. et al. (2015)**, “Urban energy consumption and CO₂ emissions in Beijing: Current and future”, *Energy Efficiency*, Vol. 8/3, Springer, Berlin, pp. 527–543.
- Zanon B. and S. Verones (2013)**, “Climate change, urban energy and planning practices: Italian experiences of innovation in land management tools”, *Land Use Policy*, Vol. 32 (May), Elsevier, Amsterdam, pp. 343–355.
- Zhang, L. et al. (2011)**, “Alternative scenarios for the development of a low-carbon city: A case study of Beijing, China”, *Energies*, Vol. 4/12, MDPI, Basel, pp. 2 295–2 310.
- Zhou, K. et al. (2016)**, “Big data driven smart energy management: From big data to big insights”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 56 (April), Elsevier, Amsterdam, pp. 215–225.
- Zscheischler, J. and S. Seneviratne (2017)**, “Dependence of drivers affects risks associated with compound events”, *Science Advances*, Vol. 3 (June), American Association for the Advancement of Science, Washington, D.C., p. e1700263.

