

**INFORME**

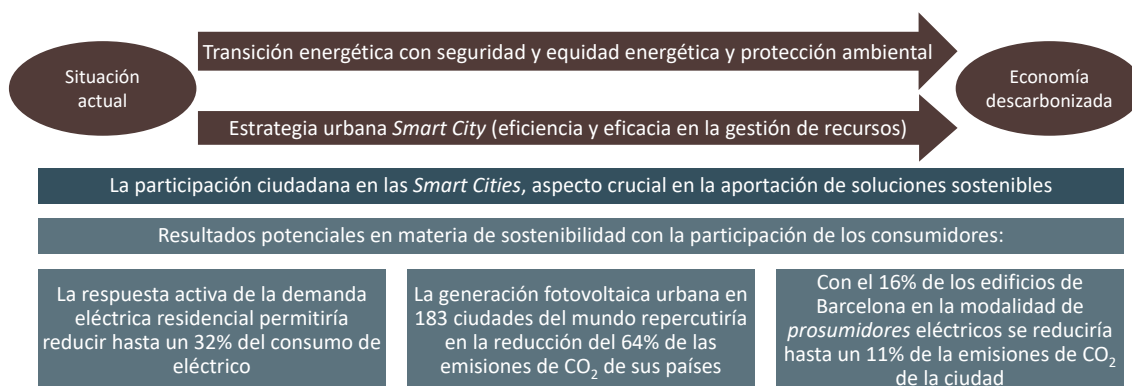
4-2021

# **EL POTENCIAL DE SOSTENIBILIDAD ENERGÉTICA DE LAS CIUDADES**

Manuel Villa-Arrieta  
Investigador de Funseam

**NOTA DE AUTOR.** Este documento ha sido realizado por Funseam -Fundación para la Sostenibilidad Energética y Ambiental-. Tanto el contenido como las conclusiones del documento reflejan la opinión de los autores. Estas opiniones no vinculan a las Empresas Patronas de Funseam.

## Resumen gráfico



## ÍNDICE

1. Introducción	3
2. La importancia de las ciudades en la transición energética	4
2.1. <i>Smart City</i> y Sostenibilidad energética como estrategias	6
2.2. Enfoque de estudio de la sostenibilidad energética ciudad-país	7
3. Mecanismos de activación de la sostenibilidad energética urbana	8
3.1. Ahorro energético	8
3.1.1. Resultados experimentales sobre el ahorro energético en el sector residencial	9
3.2. Electrificación y autoconsumo	11
3.2.1. Electrificación	11
3.2.2. Capacidad de autoconsumo energético fotovoltaico de las ciudades	12
3.2.3. Evaluación económica de la capacidad de autoconsumo	14
4. Resultados	16
5. Conclusiones	18



# EL POTENCIAL DE SOSTENIBILIDAD ENERGÉTICA DE LAS CIUDADES

## 1. Introducción

Las ciudades albergan a más de la mitad de la población mundial [1] y consumen entre el 60% y el 80% de la producción total de energía del mundo. Dado que la energía es responsable de dos tercios de las emisiones totales de gases de efecto invernadero (GEI) [2], las zonas urbanas emiten el 75% de las emisiones mundiales de CO<sub>2</sub> (principal GEI) [3]. Según las proyecciones de las Naciones Unidas para el año 2050 (proyecciones anteriores a la pandemia de COVID-19), si se mantiene la tendencia actual de crecimiento de la población urbana, la urbanización mundial representará el 67% de la población total [4], y las ciudades demandarán una mayor cantidad de energía. En este sentido, debido al aumento de la concentración de la población urbana, las ciudades tienden a ser representativas del consumo de energía y de la sostenibilidad energética de sus países; por tanto, la sostenibilidad energética depende del comportamiento del consumo energético de la población urbana.

En las primeras aglomeraciones urbanas los recursos energéticos primarios (renovables) se transformaban localmente para abastecer una demanda de energía relativamente baja. Sin embargo, con el aumento de la demanda de energía de la población urbana se necesitaron instalaciones energéticas centralizadas que aprovecharan los recursos energéticos no renovables, caracterizados por tener una mayor densidad energética que los recursos renovables. Como resultado, el consumo de los recursos energéticos no renovables ha provocado la pérdida de la sostenibilidad energética.

Paralelamente al objetivo de resolver los problemas medioambientales, mediante el uso de recursos energéticos renovables en instalaciones de generación descentralizadas, la estrategia urbana ha sido optimizar el sistema energético y flexibilizar su funcionamiento a través de la estrategia conocida como *Smart City*. Sin embargo, ante el aumento de la demanda y la necesidad de obtener un suministro energético limpio e ininterrumpido, la recuperación del potencial de sostenibilidad energética urbana depende de que el consumidor aproveche el despliegue tecnológico de la estrategia *Smart City*. En este sentido, en base a estudios sobre la participación del consumidor en el sistema eléctrico, el aumento del consumo eléctrico y el

autoconsumo energético en las ciudades, este informe aborda el potencial de la sostenibilidad energética de las ciudades en el marco de la estrategia *Smart City*.

Las conclusiones<sup>1</sup> destacan que la sostenibilidad energética no es inherente a las *Smart Cities*: depende de la participación de los consumidores. Por lo tanto, la efectividad de las *Smart Cities* debe abordar el diseño de incentivos para la participación de la población desde un enfoque holístico y estar vinculada a la heterogeneidad de los consumidores y a la gestión eficiente de los recursos. En la siguiente sección a esta introducción se discute la importancia de las ciudades en la transición energética. Posteriormente, se describen los mecanismos que utilizan las áreas urbanas para contribuir a la sostenibilidad energética y, en las siguientes secciones se discuten estos mecanismos para presentar los resultados y conclusiones de esta investigación.

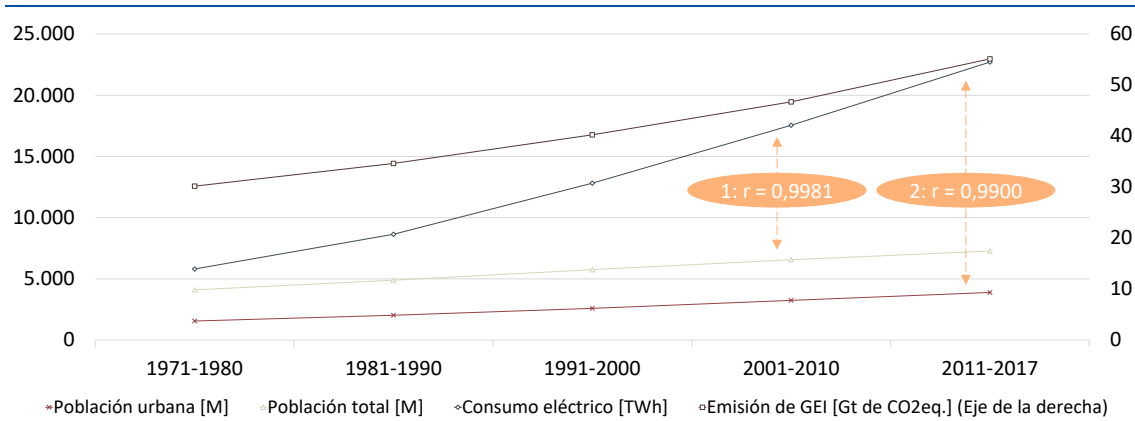
## 2. La importancia de las ciudades en la transición energética

Cubrir la demanda energética de las ciudades con el modelo actual, basado en el consumo de recursos fósiles, aumentará las emisiones de GEI y las consecuencias del calentamiento global pondrán en riesgo la sostenibilidad ambiental del planeta [7]. Por lo tanto, garantizar la seguridad y la calidad del suministro energético para prestar servicios urbanos utilizando los recursos del planeta supondrá un enorme reto en cuanto a nuestra capacidad de gestionar y restaurar los bienes naturales de los que depende toda la vida [8].

En este sentido, el ritmo del cambio tecnológico de los sistemas de transformación de la energía primaria a energía final ha marcado el ritmo de desarrollo y crecimiento económico de las ciudades. Esta energía final, consumida principalmente en forma de electricidad, ha mejorado la calidad de vida de la humanidad en la era moderna, pero ha provocado las consecuencias medioambientales antes mencionadas. Como se observa en la Figura 1, con datos posteriores a la crisis del petróleo de 1973, el consumo de electricidad tiene una correlación más significativa con el crecimiento de la población urbana que con el crecimiento total de la población. Se puede concluir, por tanto, que las emisiones de GEI están relacionadas con el consumo urbano de energía.

---

<sup>1</sup> Este informe está basado en el capítulo “*Smart Cities Consumers in Search of the Potential Sustainability*” del libro “*Holistic Approach for Decision Making Towards Designing Smart Cities*” [5]; capítulo que amplía las conclusiones de la tesis doctoral “*Energy sustainability of smart cities*” [6].

**Figura 1 . Correlación entre el consumo de energía eléctrica y la población urbana.**


**Nota:** Existe una mayor correlación ( $r$ : coeficiente de correlación de Pearson) entre el consumo eléctrico y la población urbana (1) que entre la población total (2). **Fuente:** Adaptado de [9].

Para hacer frente a este problema, las principales economías del mundo han puesto en marcha un proceso de transición energética para pasar del modelo económico actual a uno descarbonizado y competitivo<sup>2</sup>. Los mecanismos para promover la transición energética consisten en descentralizar y flexibilizar el sistema eléctrico para ahorrar energía, aumentar la eficiencia energética y sustituir el uso de energías fósiles por energías renovables. La flexibilidad del sistema implica su monitorización para ajustar la demanda energética a la intermitencia que caracteriza a las energías renovables. Por su parte, la descentralización busca aprovechar los recursos energéticos distribuidos y acercar la generación al lugar donde se utiliza la energía.

Esto significa que la energía solar desempeña un papel notable, dada la uniformidad de su distribución a escala mundial [11]. Por lo tanto, las ciudades desempeñan un papel fundamental en el proceso de transición energética [12], a pesar de ser el origen de un problema medioambiental mundial. Dentro de las ciudades, los edificios utilizan el 31,43% del consumo total de energía, más que la industria, el transporte y otros consumos [13]. Además de concentrarse en ellos el consumo de energía, los edificios (de viviendas o multiviviendas) tienen un gran margen de actuación para aumentar el ahorro energético, la eficiencia energética y el uso de energías renovables a través del autoconsumo energético. La flexibilización del sistema energético también busca potenciar los consumidores para que, a través de mecanismos de *Demand Side Response* (DSR), este agente pueda ampliar su participación en el mercado energético desde los edificios.

<sup>2</sup> La relación entre la pandemia de COVID-19 y la transición energética ha sido estudiada por [10] y concluye que esta crisis ha profundizado la brecha entre los países que lideran la transición energética mundial y los que avanzan más lentamente, lo que agrava los desequilibrios existentes en un panorama de transición energética desigual.

## 2.1. *Smart City* y Sostenibilidad energética como estrategias

Desde el punto de vista del desarrollo de la sociedad, avanzar en la transición energética conducirá a la sostenibilidad del suministro de energía: reducir el impacto negativo del consumo de energía en el medio ambiente nos permitirá asegurar el bienestar de las generaciones futuras. En este sentido, existe un consenso global en definir el concepto de *Smart City* como una estrategia crítica para abordar la transición energética en las ciudades y lograr la sostenibilidad energética [13].

Tanto el estudio de la sostenibilidad energética como el de las *Smart Cities* es extenso [15-17]. La sostenibilidad energética es un campo de conocimiento que ha sido estudiado en profundidad. Asimismo, las *Smart Cities* han atraído el interés económico de los sectores tecnológico, industrial y de servicios, así como de organizaciones gubernamentales y supranacionales en busca de la competitividad de las ciudades y como estrategia para afrontar el cambio climático [18,19]. En este sentido, existen diversas metodologías para evaluar las *Smart Cities* (rankings o *benchmarking* de ciudades como en los estudios [20,21]) y la sostenibilidad energética de las ciudades (ver [22]).

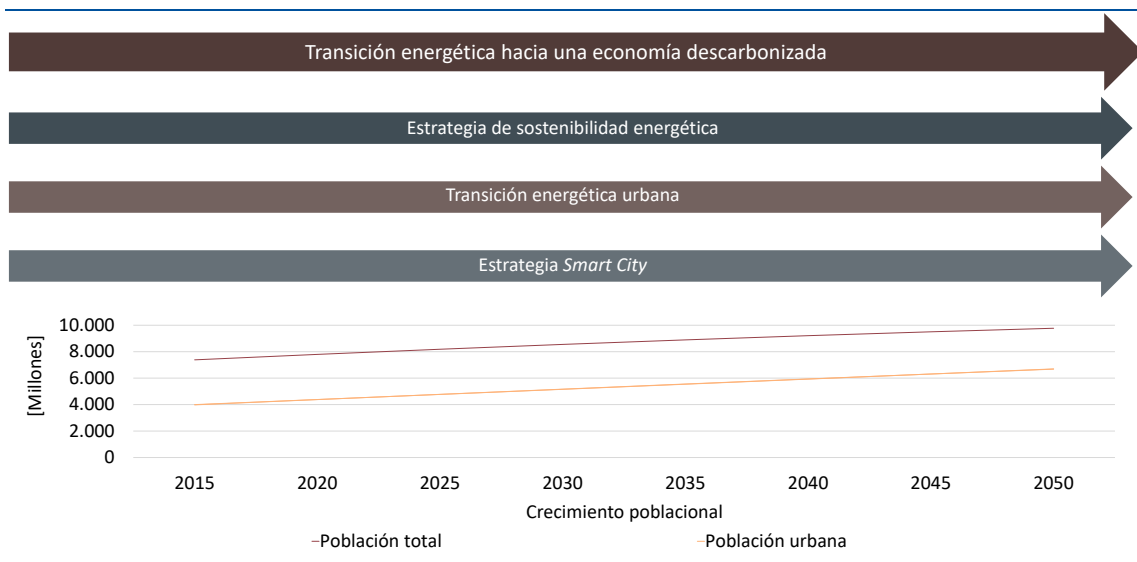
La estrategia *Smart City* busca garantizar la eficacia del servicio energético en las ciudades para prestar otros servicios, y gestionar de forma eficiente los recursos disponibles (recursos energéticos y económicos e infraestructuras) [9]. Las sinergias entre las tecnologías inteligentes (redes inteligentes, instalaciones de generación distribuida y *Smart Meters* o contadores eléctricos que remplazan a los tradicionales contadores electromecánicos, *Electromechanical Meters*, para contabilizar el consumo eléctrico en periodos de hasta cinco minutos de tiempo) permiten prestar el servicio energético que requieren los ciudadanos, así como gestionar eficientemente los recursos necesarios para su prestación [23]. En particular, el despliegue de *Smart Meters* en los hogares y el autoconsumo energético de los edificios de energía casi nula (*Nearly Zero Energy Buildings*, n/NZEB) aumentan el ahorro y la eficiencia energética y aprovechan los recursos energéticos renovables locales [24-26].

En términos de desarrollo sostenible, la sostenibilidad energética es la fuente de desarrollo y crecimiento de las sociedades sobre la base del equilibrio entre las variables económicas, sociales y medioambientales [27]. Según el *World Energy Council* (WEC), la sostenibilidad energética a nivel de país se basa en el equilibrio entre tres pilares: la seguridad energética, la equidad energética y la protección ambiental [28]. La inclusión de tecnologías inteligentes permite involucrar a quienes participan en la gestión de las ciudades para encontrar el equilibrio



entre estos tres pilares. La Figura 2 muestra las características de la Transición energética, necesarias para satisfacer la demanda energética de una población mundial y urbana en crecimiento: los conceptos de *Smart City* y sostenibilidad energética se ejecutan para alcanzar los objetivos de descarbonización.

**Figura 2 . Transición energética y perspectivas de crecimiento de la población para 2050.**

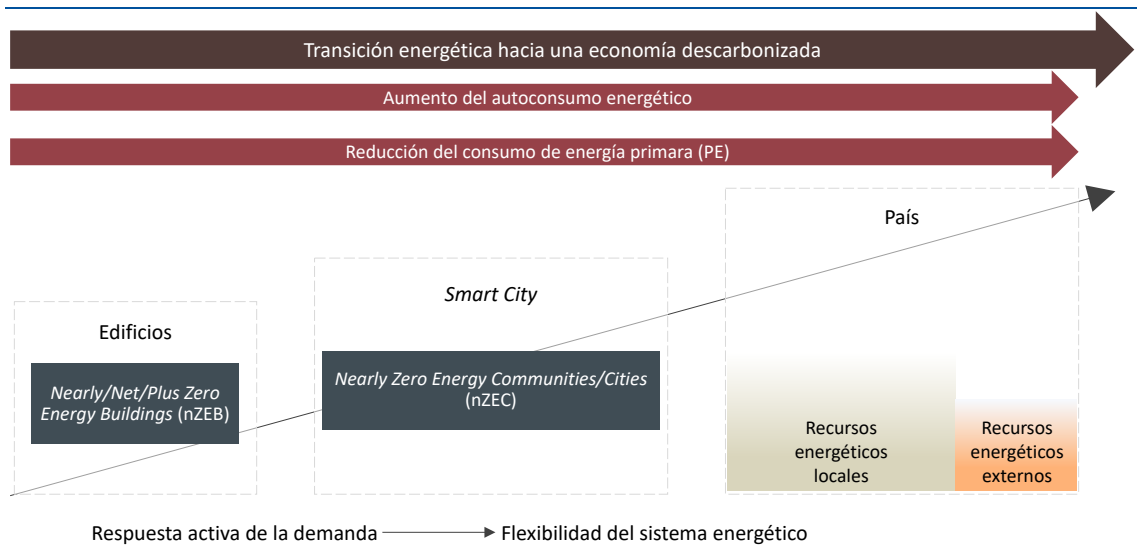


Fuente: Adaptado de [6].

## 2.2. Enfoque de estudio de la sostenibilidad energética ciudad-país

Partiendo de la estrecha relación entre las estrategias *Smart City* y de Sostenibilidad energética, a continuación se describe en las siguientes secciones la capacidad de las ciudades para avanzar en el ahorro energético y en el aprovechamiento del recurso energético solar. El objetivo es abordar la contribución de los elementos tecnológicos inteligentes al aumento de la eficiencia energética y al autoconsumo urbano de las ciudades, ambos componentes críticos de la transición energética. Todo ello, sobre un nuevo enfoque de análisis basado en la escalabilidad de la sostenibilidad energética urbana hasta el nivel de país (véase Figura 3) para analizar la representatividad de las ciudades en el consumo de energía y la emisión de GEI del país.

Figura 3 . Escalabilidad de la sostenibilidad energética.



Fuente: Adaptado de [6].

### 3. Mecanismos de activación de la sostenibilidad energética urbana

#### 3.1. Ahorro energético

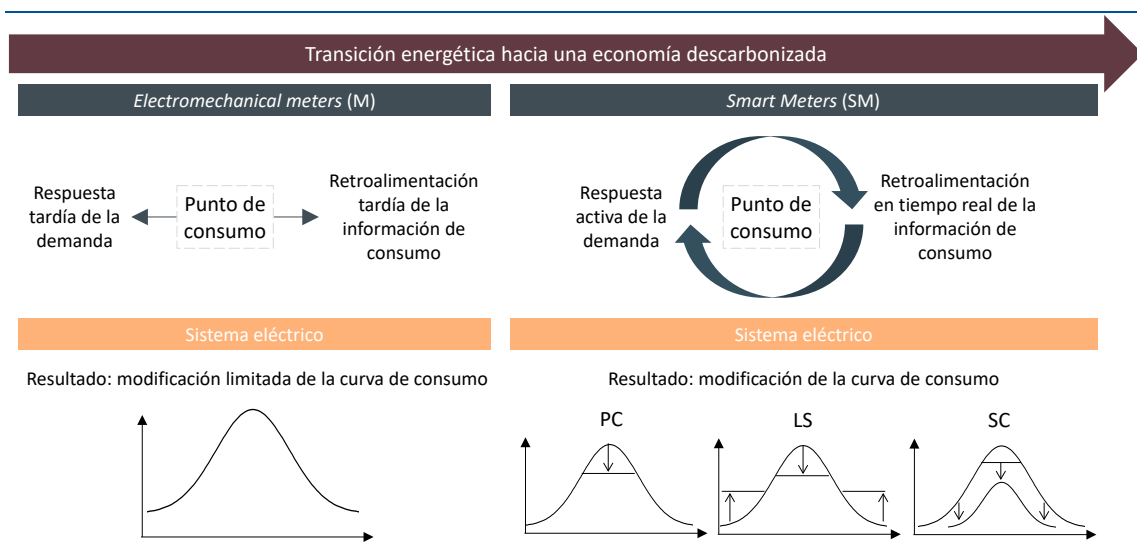
El principal inconveniente del aprovechamiento de la energía solar en el sector residencial es el desacople entre el horario de su disponibilidad y el consumo eléctrico: la radiación solar es máxima cuando muchos hogares están vacíos, y el consumo de electricidad de los hogares alcanza su máximo cuando no hay radiación solar. Sin embargo, mediante la DSR y el uso de *Smart Meters*, los consumidores ejercen una gestión activa sobre su demanda. Se trata de un proceso en el que la respuesta a la retroalimentación de información energética (señales de precios, planes gamificados o información medioambiental) puede reflejarse en la disminución de la demanda máxima (*Peak Clipping*, PC), en el cambio del consumo de los periodos punta a los periodos valle (*Load Shifting*, LS), o en el ahorro de energía (*Strategic Conservation*, SC). Por lo tanto, con el despliegue de *Smart Meters*, es posible activar las medidas de DSR (véase Figura 4) debido a que la flexibilidad del sistema eléctrico depende de los datos en torno a los consumidores [27].

La sustitución de los *Electromechanical Meters* por los *Smart Meters* es el primer paso en el proceso de empoderamiento del consumidor eléctrico en su consumo, de forma que se pueda recoger una información más significativa y mejor sobre el consumo eléctrico que conduzca a

cambios en la gestión energética de los hogares [29]. Aunque hasta ahora los usuarios finales eran actores pasivos del sistema energético, con la introducción de nuevos servicios que permiten una participación más significativa de los consumidores, los usuarios han empezado a ser una parte esencial del uso y la gestión de la energía.

Aunque las medidas de *DSR Peak Clipping* y *Load Shifting* ofrecen ventajas específicas para lograr la flexibilidad de los sistemas eléctricos, la *Strategic Conservation* es el conjunto de esfuerzos de ahorro que modifican la curva de carga en su totalidad. En lo que respecta a la DSR del sector residencial, este mecanismo agrupa los esfuerzos de los hogares para cambiar sus patrones de consumo en respuesta a la señal de consumo y/o de precio. Los resultados estudiados en esta sección se centran en el estudio de la *Strategic Conservation* por ser una de los principales medidas de ahorro energético en los países o regiones dependientes de las importaciones de energía.

**Figura 4. Transición energética y Demand Side Response (DSR).**



**Nota:** PC, *Peak Clipping*; LS, *Load Shifting*; SC, *Strategic Conservation*; M, *Electromechanical meters*; SM, *Smart Meters*; Como Puntos de consumo se refiere a edificios o viviendas. **Fuente:** Adaptado de [6].

### 3.1.1. Resultados experimentales sobre el ahorro energético en el sector residencial

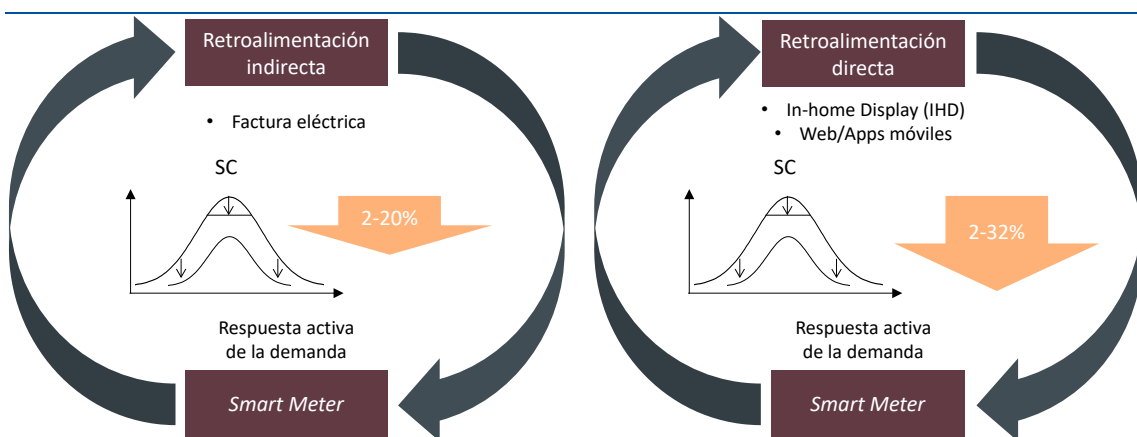
Con el despliegue de *Smart Meters* se busca permitir que los consumidores eléctricos gestionen su demanda de forma eficiente [30]. Sin embargo, a menos que los usuarios sean proactivos, no será posible que aprovechen las oportunidades que ofrece esta nueva tecnología. El consumo doméstico de energía se basa principalmente en rutinas y hábitos que son difíciles de cambiar. Por ello, será necesario profundizar en los aspectos técnicos, psicológicos, sociales y económicos

que incentiven la participación del consumidor para modificar el comportamiento de consumo que no se adapta a la disponibilidad del recurso solar [31]. Este es precisamente el campo en el que los investigadores de diferentes disciplinas tratan de identificar los aspectos que determinan la participación del consumidor mediante estudios empíricos.

Para conocer los avances en este campo se revisaron 116 estudios sobre el ahorro energético residencial desde la *Strategic Conservation* del DSR<sup>3</sup> (ver [31]). En estos trabajos se analizaron por métodos experimentales la retroalimentación indirecta y directa de la información relacionada con el consumo eléctrico a través de *Smart Meters*. La retroalimentación indirecta incluye la información entregada en las facturas eléctricas y las lecturas del consumo; por su parte, la retroalimentación directa consiste en el uso de tecnologías adicionales vinculadas a los *Smart Meters* que facilitan a los usuarios la comprobación de su consumo y la participación en programas de ahorro de energía en un tiempo más cercano al tiempo real del consumo. Según los resultados, los hogares responden al suministro de información directa e indirecta utilizando menos electricidad, pero de una mayor forma con la información directa.

La Figura 5 recopila estos resultados. La instalación de *Smart Meters* en los hogares no garantiza por sí sola la reducción del consumo de electricidad en el amplio espectro de sus condiciones socioeconómicas y es necesario aprovechar la tecnología digital para que los hogares entiendan y reaccionen a la retroalimentación directa de la información de su consumo eléctrico. Las pruebas empíricas demuestran que es posible reducir el consumo de electricidad hasta un 32% utilizando este medio.

Figura 5 . Resumen de los resultados sobre la *Strategic Conservation* (SC) de 116 trabajos empíricos revisados.



Fuente: Adaptado de [6].

<sup>3</sup> Para ver los resultados de este tipo de estudios sobre *Peak Clipping* y *Load Shifting* véase [30].

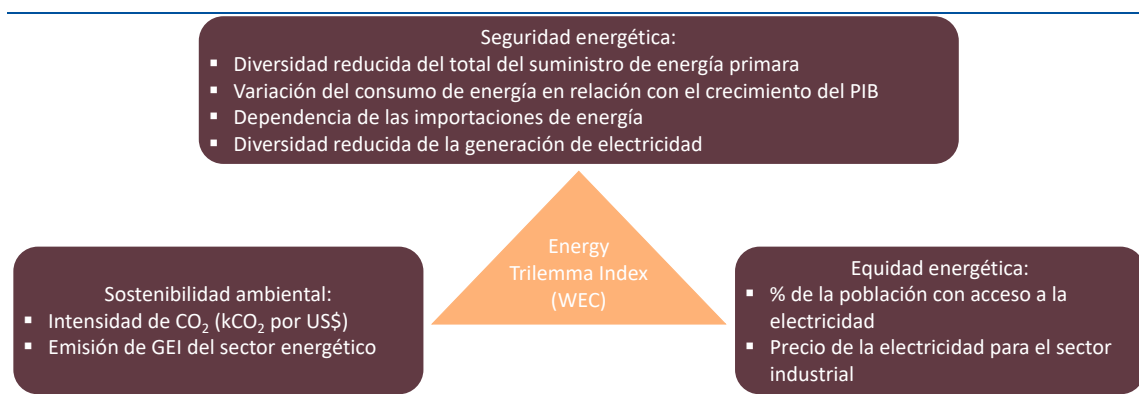
## 3.2. Electrificación y autoconsumo

### 3.2.1. Electrificación

Como se ha descrito anteriormente, el despliegue de tecnologías inteligentes permitirá a las ciudades aumentar la generación de electricidad a partir de fuentes renovables para descarbonizar la economía. Sin embargo, según el WEC, la sostenibilidad energética depende del equilibrio entre la seguridad energética, la equidad energética y la protección ambiental. Por lo tanto, dada la intermitencia de las energías renovables y dependiendo de las características de cada país y ciudad (posiblemente similares entre regiones), la electrificación *Smart* sin tecnologías de almacenamiento de energía puede conducir a un desequilibrio en la sostenibilidad energética en el sentido de que, aunque los beneficios ambientales son posibles, la seguridad energética podría estar en riesgo.

Para ayudar a abordar esta cuestión, se estudió el efecto que puede tener la electrificación en la sostenibilidad energética de los países utilizando la herramienta interactiva *Pathway Calculator* del indicador *Energy Trilemma Index* (ETI) del WEC. Esta herramienta puede utilizarse para determinar que se necesita para mejorar la posición en el ranking de sostenibilidad energética del WEC y comprender el impacto de la elaboración de políticas en la consecución de un futuro energético sostenible [32]. La Figura 6 presenta sus elementos. El procedimiento seguido consistió en variar los indicadores de la herramienta en valores máximos y mínimos para identificar el resultado de sostenibilidad energética de los 125 países de la ETI 2017. Este ejercicio fue el primer paso para determinar la capacidad de generación fotovoltaica (FV) de las ciudades de estos países que se abordará en la siguiente sección.

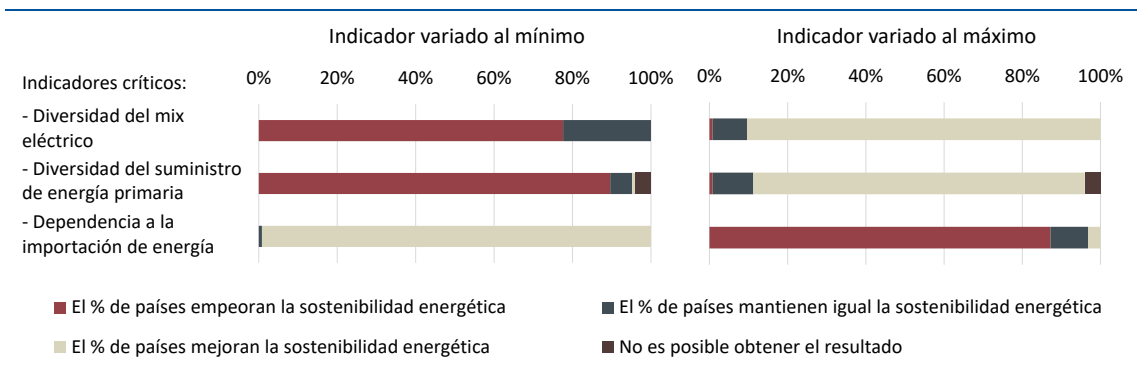
**Figura 6. Estructura de los indicadores del *Pathway Calculator* para estudiar el *Energy Trilemma Index* del *World Energy Council* (WEC).**



Fuente: Adaptado de [9].

Según los resultados obtenidos, los países podrían obtener una mejor sostenibilidad energética reduciendo las importaciones de energía y aumentando la diversidad de la generación eléctrica y la del suministro de energía primaria (EP) (véase Figura 7). Esto indica que el uso de recursos energéticos locales, como la generación de electricidad fotovoltaica, permitiría mejorar la sostenibilidad energética de los 125 países del ETI 2017.

**Figura 7. Resultados de la sostenibilidad energética por variación de los indicadores críticos de la *Pathway Calculator* para estudiar el *Energy Trilemma Index* del *World Energy Council* (WEC).**



Fuente: Adaptado de [9].

### 3.2.2. Capacidad de autoconsumo energético fotovoltaico de las ciudades

Dada la uniformidad del recurso solar, las ciudades tienen la capacidad de generar electricidad cerca de los mismos puntos de consumo. Mediante el despliegue de sistemas fotovoltaicos, las ciudades pueden cubrir parte de su demanda de electricidad y contribuir al uso de los recursos energéticos locales en sus países. Así, la generación fotovoltaica es la tecnología líder para avanzar hacia la sostenibilidad energética de las ciudades. Para avanzar en el estudio de este campo, se analizó la contribución de la generación fotovoltaica urbana a la sostenibilidad energética de los países de la ETI 2017 (véase [9]). El proceso fue el siguiente:

1. Se calculó la capacidad de generación fotovoltaica de los tejados de las ciudades más pobladas de los países del ETI 2017 (183 ciudades de 123 países) tomando como referencia la superficie útil de los tejados de la ciudad de Barcelona (tomada del mapa de recursos de energía renovable de la ciudad<sup>4</sup>), los datos de irradiación global inclinada y una eficiencia del 16% para los paneles fotovoltaicos.

<sup>4</sup> <https://www.energia.barcelona/es/mapa-cuanta-energia-puedes-generar>

2. Se calculó la distribución del mix de generación eléctrica de los países estudiados con los datos de la *U.S. Energy Information Administration* (EIA) [33], y se calcularon las emisiones de CO<sub>2</sub> utilizando los factores de emisión de la Agencia Internacional de la Energía (AIE) [34].
3. Se calculó la generación eléctrica a partir de combustibles fósiles, energía nuclear e hidroeléctrica (en ese orden) que es sustituida por la generación eléctrica solar en las ciudades de cada país.
4. Se calculó el índice *de Herfindahl and Hirschman* (HHI) con los valores de generación obtenidos de cada fuente dentro del mix eléctrico para obtener la concentración de la generación en una sola fuente (resultado alto del HHI).
5. Se normalizaron los resultados del HHI entre 0 y 100 para compararlos con los valores publicados para cada país en los resultados del ETI de 2017.

Los resultados mostraron que los 125 países del ETI 2017 varían la concentración (reducción de la diversidad) de la generación eléctrica en un promedio de -15,94% debido al hipotético aumento de su generación fotovoltaica urbana. Esto repercutiría en la reducción del 56,31% de la generación de energía eléctrica a partir de combustibles fósiles y, en consecuencia, en la reducción del 64% de las emisiones de CO<sub>2</sub> de estos países. El uso del recurso solar local permitiría a estos países mejorar su sostenibilidad debido a la reducción de la dependencia de las importaciones de energía. Aunque la diversidad del suministro de energía primaria se reduciría en algunos países, el aumento del consumo de recursos renovables les permitiría reducir las emisiones de CO<sub>2</sub>. La Tabla 1 resume los resultados obtenidos.

**Tabla 1. Resultados de la diversificación del mix eléctrico con generación fotovoltaica urbana en los países del ETI 2017.**

Indicador	Valor inicial	Resultado
Número de países analizados	125	125
Concentración promedio* de la generación de electricidad (0 - 100)	66.41	N/A
... después de la generación fotovoltaica urbana (0 - 100)	N/A	55.16
Variación promedio [%]	N/A	-15.94
Número de países que diversifican la generación de electricidad	N/A	87
Variación promedio de la concentración* [%]	N/A	-42.44
Número de países que concentran la generación de electricidad	N/A	38
Variación promedio de la concentración* [%]	N/A	44.73
Variación promedio del consumo de combustibles fósiles [%]	N/A	-56.31
Variación promedio de las emisiones de CO <sub>2</sub> [%]	N/A	-64.00

**Nota:** \*Diversidad reducida. **Fuente:** Adaptado de [9].

A partir de estos resultados se identificaron dos grupos de países: un grupo con los países que aumentan la diversidad de la generación de electricidad y otro grupo en los que se reduce. En el primer grupo, el aumento de la generación fotovoltaica permite a 87 países diversificar el mix eléctrico hasta un 43% de concentración. Por el contrario, en el segundo grupo, 38 países aumentan la concentración del mix eléctrico hasta el 97%; países con una alta proporción de generación hidroeléctrica en su mix.

### 3.2.3. Evaluación económica de la capacidad de autoconsumo

El autoconsumo energético es el mecanismo que permite aprovechar la capacidad de generación local renovable. En el caso de las ciudades, aunque cada una de ellas tiene características diferentes, cualquier uso de los recursos energéticos locales reducirá el consumo de energía primaria externa de origen fósil. En este sentido, los países importadores de energía podrán equilibrar su balanza energética con el autoconsumo energético de sus ciudades. Este tipo de generación distribuida incluye los edificios de energía casi nula (*Nearly Zero Energy Buildings*, n/NZEB), que son dependencias de los consumidores. Por tanto, el avance del autoconsumo energético en las ciudades y, en consecuencia, la reducción de las importaciones de energía en los países, si se diera el caso, depende de la inversión de los consumidores en n/NZEB.

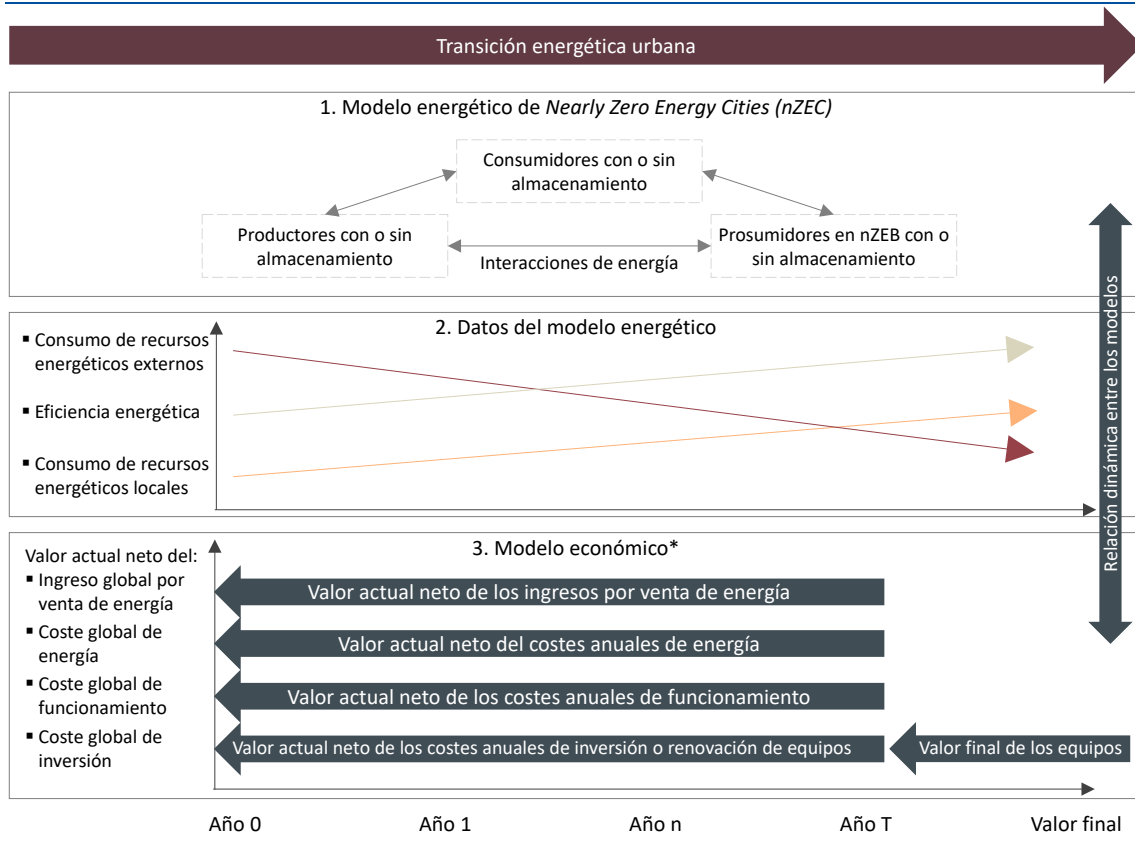
Para estudiar el avance de las n/NZEB en las ciudades desde el punto de vista de la inversión, se utilizó un modelo de enfoque técnico-económico para analizar el autoconsumo energético en edificios hasta la escala de ciudades (*Nearly Zero Energy Cities*, NZEC). Los resultados se presentan a continuación.

#### Modelo de evaluación

El modelo, denominado nZEC-EATEP (véase [35]), permite evaluar el desempeño económico del proceso de autosuficiencia energética de las ciudades. Además, permite evaluar conjuntamente instalaciones de generación distribuida, o n/NZEB o barrios con excedentes energéticos (barrios energéticos positivos). La figura 8 contextualiza su metodología, basada en, *i)* la relación entre la transición energética, *ii)* la transición energética urbana, *iii)* el aumento del consumo de recursos energéticos locales en detrimento de los externos por el avance de las n/NZEB, y *iv)* el cálculo del valor actual neto de los costes incurridos e ingresos percibidos a lo largo de un periodo de evaluación económica T (incluyendo el valor final de los equipos posterior al año T).



**Figura 8. Modelo de evaluación técnico-económica de *Nearly Zero Energy Cities* (nZEC) por integración de *Nearly Zero Energy Buildings* (nZEB).**



**Nota:** \* El sistema nZEC (paso 1), es simulado y sus resultados horarios (paso 2) conectan dinámicamente con el modelo económico (paso 3). Este modelo económico es una adaptación dinámica de la Norma Europea EN 15459-2007 Eficiencia energética de los edificios - Procedimiento de evaluación económica de los sistemas energéticos de los edificios. **Fuente:** Adaptado de [35].

### Caso de estudio: Barcelona ciudad

El objetivo de este estudio fue analizar el alcance de la inversión en el autoconsumo fotovoltaico de los edificios para promover comunidades de prosumidores (agente del sistema eléctrico que consume y produce energía eléctrica para autoconsumirla y exportar los excedentes a la red). El modelo incluyó 82.652 edificios y simuló 37 (T) años (2013-2050) de desempeño energético y económico: en 38.700 (el 34,7% de los 238.213 edificios con datos de capacidad de generación fotovoltaica) se estudió la inversión de seis paquetes de medidas de rehabilitación energética<sup>5</sup> y autoconsumo fotovoltaico (edificios *Prosumer*), y en 43.952 se estudió la inversión en generación fotovoltaica (generación extra fotovoltaica). Cruzando con datos públicos de la ciudad<sup>6</sup>, se identificó la capacidad de generación FV de los 82.652 edificios, el consumo eléctrico

<sup>5</sup> Presentados en el informe del Instituto Institut Català d'Energia (ICAEN) Rehabilitació energètica d'edificis de 2026. [http://icaen.gencat.cat/web/.content/10\\_ICAEN/17\\_publicacions\\_informes/04\\_coleccio\\_QuadernPractic/quadern\\_practic/arxiu/10\\_rehabilitacio\\_edificis.pdf](http://icaen.gencat.cat/web/.content/10_ICAEN/17_publicacions_informes/04_coleccio_QuadernPractic/quadern_practic/arxiu/10_rehabilitacio_edificis.pdf)

<sup>6</sup> Mapa de recursos de energía renovable de Barcelona <https://www.energia.barcelona/es/mapa-cuanta-energia-puedes-generar-y-el-Anuario-Estadístico-de-la-ciudad-de-Barcelona> <http://www.bcn.cat/estadistica/castella/dades/anuari/index.htm>

de los Prosumidores y el coste de inversión en los paquetes de medidas de rehabilitación energética, así como el consumo eléctrico de los edificios que permitían una generación FV extra sin tener la configuración de Prosumidores (PV\_Extra). La Tabla 2 resume estos resultados.

**Tabla 2. Número de edificios y consumo de energía eléctrica del modelo nZEC para Barcelona ciudad.**

Ítem	Número de edificios	Consumo de energía eléctrica [GWh/año]
Prosumidores	38,700	969.363
Consumidores (domésticos, comerciales y servicios, y otros servicios)	N/A	3,225.927
PV_Extra	43,952	N/A
Total	82,652	4,189.32

**Fuente:** Adaptado de [5] y [35].

Con el modelo nZEC estudiado, la ciudad de Barcelona tendría la hipotética capacidad de reducir hasta un 9,68% de su demanda de energía primaria, lo que supone una reducción de hasta un 12,25% en los costes energéticos y de hasta un 11,43% en las emisiones de CO<sub>2</sub>. La inversión total necesaria para conseguir este ahorro incluye el valor inicial y la sustitución de los sistemas fotovoltaicos y las medidas de rehabilitación. Esta inversión puede ser 1,32 veces el coste energético total de la ciudad en los 37 años de evaluación.

## 4. Resultados

Los resultados de los estudios resumidos en este informe han demostrado la notable capacidad que tienen las ciudades para contribuir a la sostenibilidad energética de sus países, con el despliegue de tecnologías *Smart*. La Tabla 3 resume los resultados obtenidos.

**Tabla 3. Recopilación de resultados.**

Capacidad de...	Países	Ciudades	Resultados
Ahorro de energía	>19	>19	Reducción de entre el 2% y el 32% del consumo de electricidad
Electrificación	125	N/A	113 mejoran la sostenibilidad energética
Autoconsumo fotovoltaico en las ciudades	125	183	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Todos los países reducen una media del 64% de las emisiones de CO<sub>2</sub></li> <li>• 87 países diversifican el mix eléctrico hasta un 43%</li> </ul>
nZEC	1: España	1: Barcelona	<p>Con el 34,7% de los edificios con generación fotovoltaica y el 16,2% de los edificios <i>Prosumer</i>:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Reducción de hasta un 9,68% de la demanda de energía primaria</li> <li>• Reducción de hasta un 12,25% de los costes energéticos</li> <li>• Reducción de hasta un 11,43% de las emisiones de CO<sub>2</sub></li> </ul>

**Fuente:** Adaptado de [5] y [6].

En cuanto a la activación de la capacidad de ahorro energético de las ciudades, los resultados recogidos en los trabajos empíricos revisados mostraron la importancia de la retroalimentación de la información energética para reducir el consumo de electricidad en el sector residencial: el suministro de información directa e indirecta ayuda a los hogares a utilizar menos electricidad (véase [31]). En cuanto a la capacidad de electrificación, la reducción de la concentración de la generación de electricidad permitiría a 113 de los 125 países de diferentes regiones económicas del mundo obtener un mayor equilibrio en su seguridad de suministro, equidad energética y protección del medio ambiente (estrategia de Sostenibilidad energética). Si este proceso de electrificación se introduce e incorpora el uso de la capacidad de generación fotovoltaica de los tejados de los edificios de sus ciudades, estos países podrían mejorar la sostenibilidad gracias a la reducción de la dependencia de las importaciones de energía (véase [9]). En el caso concreto de una ciudad de estudio (Barcelona ciudad), el aprovechamiento de esta capacidad de autoconsumo eléctrico a través de la generación distribuida, la creación de Prosumidores y barrios energéticos positivos ayudaría a reducir el consumo de energía primaria y las emisiones de CO<sub>2</sub> con la inversión conjunta en medidas de rehabilitación energética de los edificios (ver [35]).

Esto significa que las estrategias *Smart City* y de Sostenibilidad energética permitirían avanzar en la transición hacia una economía descarbonizada. Uniendo los pilares de estas estrategias, se puede afirmar que las tecnologías *Smart* permiten a las ciudades ser eficaces en la prestación del servicio energético urbano, gestionando eficientemente los recursos locales disponibles para lograr un equilibrio entre la seguridad y la equidad energética y la protección del medio ambiente. Sin embargo, según los resultados descritos anteriormente, sin la participación de los consumidores no es posible ahorrar energía ni aprovechar la capacidad de autoconsumo energético de las ciudades mediante la inversión en edificios de consumo energético casi nulo (nZEB). Figura 9 resume la dependencia entre estas capas de la transición energética.

**Figura 9 . Capas del vínculo entre la transición energética y la participación de los consumidores.**



Fuente: Adaptado de [6].

## 5. Conclusiones

Los estudios recopilados en este capítulo se han basado en el estudio de la escalabilidad de la sostenibilidad energética a través de la estrategia tecnológica de las *Smart Cities*, desde el nivel de los edificios hasta el de país. Este enfoque de estudio es una propuesta novedosa para abordar el hecho de que, debido al aumento de la concentración de la población urbana, las ciudades tienden a ser representativas de la sostenibilidad energética de sus países. Las tecnologías inteligentes, *Smart*, son elementos cruciales para mantener el equilibrio entre la seguridad energética, la equidad energética y la sostenibilidad medioambiental de las ciudades y sus países. La efectividad de las *Smart Cities* es la prestación eficaz del servicio energético urbano y la gestión eficiente de los recursos energéticos. Las *Smart Cities* permiten que la población urbana participe en su propia sostenibilidad, lo que en el contexto del actual proceso de transición energética significa empoderar al consumidor en cuanto a su demanda para flexibilizar el funcionamiento del sistema y optimizar la gestión eficiente de los recursos locales.

Por supuesto, existen incentivos globales que animan a los consumidores a participar en la consecución de metas sociales y medioambientales a gran escala, como los Objetivos de Desarrollo Sostenible. Sin embargo, a partir de estrategias específicas de incentivo del consumo energético responsable, los consumidores ejercerán su participación en las *Smart Cities*, ayudando a la sostenibilidad de los marcos geográficos locales que, en última instancia, repercutirán en la sostenibilidad global. Como se ha presentado en este informe, los incentivos de información para activar la respuesta activa de la demanda y la posibilidad como de verter la energía sobrante a la red, en sistemas de autoconsumo, son estrategias concretas que impulsan en la sostenibilidad energética. Pero este es el caso particular del sector energético y el incentivo del consumo responsable es más amplio.

Son varias las conclusiones que se pueden extraer de los estudios recopilados en este informe. La primera es que la sostenibilidad energética no es inherente a las *Smart City*: depende de la participación del consumidor para ser efectiva en este modelo de ciudad. Así, la sostenibilidad energética debe activarse a nivel urbano para incluir a los consumidores en la gestión de la demanda y el consumo de los recursos energéticos locales. Trasladar esta responsabilidad a los consumidores los convierte en consumidores inteligentes, o *Smart City Consumers* (SCC) a nivel de ciudad. El SCC es, por tanto, el futuro de la sostenibilidad energética y, en consecuencia, un promotor del desarrollo sostenible. La filosofía que subyace a la existencia de los SCC es fomentar el consumo responsable: es decir, promover el uso eficiente de los recursos

(energéticos y de otro tipo) y la adquisición efectiva de productos y servicios con un impacto positivo en la sociedad y el medio ambiente.

Una segunda conclusión es que la dificultad para alcanzar el potencial de sostenibilidad del SCC está relacionada no sólo con la diferencia entre los sistemas que existen en las ciudades (diferentes actividades económicas, sistemas de movilidad, tipos de edificios, características urbanas, etc.) sino también con la heterogeneidad de los consumidores. En las ciudades no sólo hay propietarios de edificios y viviendas, sino también inquilinos, personas mayores, población estudiantil y residentes de corta duración. Por lo tanto, la descarbonización de la economía debe ir más allá de la innovación tecnológica y abordar la innovación social para incluir la heterogeneidad de los consumidores y sus diferentes condiciones de vida. Del mismo modo, debe haber una innovación regulatoria además de la innovación social y tecnológica en los mercados donde existen barreras regulatorias que impiden nuevos modelos de negocio disruptivos dentro de la transición energética. El objetivo es conseguir incentivos y mecanismos de protección para los diferentes tipos de consumidores.

Por último, podemos concluir aspectos relacionadas con las implicaciones políticas que se desprenden de las conclusiones anteriores. Existe una necesidad muy clara de diseñar políticas, facilitadores, métricas de seguimiento e incentivos para la sostenibilidad energética con un enfoque holístico y ascendente para la economía y la sociedad, desde los consumidores hasta los países. Al igual que la sostenibilidad es transversal a toda la actividad económica, los incentivos para participar en la sostenibilidad también deben ser transversales a la economía, interconectando diferentes sectores y objetivos, y empoderando de forma clara a las personas. En este sentido, un nuevo tema debe ser abordado en el estudio de la transición energética: la inclusión efectiva del consumidor en los objetivos globales de sostenibilidad energética.

## REFERENCIAS

- [1] United Nations. World Urbanization Prospects: The 2018 Revision, Key Facts. 2018. doi:(ST/ESA/SER.A/366).
- [2] OECD/IEA, IRENA. Perspectives for the Energy Transition: Investment Needs for a Low-Carbon Energy System. 2017.
- [3] United Nations Environment Programme (UNEP). 21 Issues for the 21st Century - Results of the UNEP Foresight Process on Emerging Environmental Issues. vol. 2. Nairobi, Kenya: 2012. doi: 10.1016/j.envdev.2012.03.005.
- [4] United Nations: Department of Social and Economic Affairs. World population prospects: The 2012 revision, Key findings and Advance Tables. Popul Div 2013 2013: Working Paper No. ESA/P/WP.227.
- [5] Villa-Arrieta, M, Sumper A. *Smart Cities Consumers in Search of the Potential Sustainability. Holistic Approach for Decision Making Towards Designing Smart Cities*; Future City - Springer International Publishing, Lazaroiu, G, Roscia, M, Dancu, V. 2022. ISSN 1876-0899 <https://link.springer.com/book/9783030855659>
- [6] Villa-Arrieta M. Energy sustainability of smart cities. Universitat Politècnica de Catalunya, 2019. <http://hdl.handle.net/2117/340988>
- [7] IPCC. Global Warming of 1.5°C. vol. 265. 2018th ed. Geneva: 2018.
- [8] OCDE. OECD Environmental Outlook to 2050: The Consequences of Inaction. 2012. doi:10.1787/9789264122246-en.
- [9] Villa-Arrieta M, Sumper A. Contribution of Smart Cities to the Energy Sustainability of the Binomial between City and Country. Appl Sci 2019; 9:3247. doi:10.3390/app9163247.
- [10] Quitzow R, Bersalli G, Eicke L, Jahn J, Lilliestam J, Lira F, Marian A, Süsser D, Thapar S, Weko S, Williams S, Xue B. The COVID-19 crisis deepens the gulf between leaders and laggards in the global energy transition. Energy Res Soc Sci 2021; 74:101981. doi: 10.1016/j.erss.2021.101981.
- [11] Check R, Space-based PS, Percent K, Shingles E. The Future of Solar Energy. Mit 2015:3–6. doi:10.1002/yd.20002.
- [12] Kammen DM, Sunter DA. Urban Planet: City-integrated renewable energy for urban sustainability. Science (80- ) 2016; 352:922–8. doi:DOI: 10.1126/science.aad9302.
- [13] International Energy Agency (OECD/IEA). World Energy Outlook 2018. 2018th ed. Paris: IEA Publications; 2018.
- [14] IRENA. Renewable Energy in Cities, International Renewable Energy Agency (IRENA). Abu Dhabi: 2016.
- [15] EIB, UPM. Assessment Methodology for Smart City Projects - Application to the Mediterranean Region (ASCIMER). Luxembourg: 2017.
- [16] Sustainable Cities Index. Sustainable Cities Index 2016. Arcadis Glob 2016:10.
- [17] World Health Organization. The Rise of Modern Cities. Hidden Cities Unmask Overcoming Heal Inequities Urban Settings 2010:3–10.
- [18] Caragliu A, Del Bo C, Nijkamp P. Smart Cities in Europe. J Urban Technol 2011; 18:65–82. doi:10.1080/10630732.2011.601117.

- [19] Bakici T, Almirall E, Wareham J. A Smart City Initiative: The Case of Barcelona. *J Knowl Econ* 2013; 4:135–48. doi:10.1007/s13132-012-0084-9.
- [20] IESE Business School. *IESE Cities in Motion Index 2014*. Pamplona: 2014.
- [21] JLL and The Business of Cities. *The Universe of City Indices 2017 Decoding - Decoding City Performance*. Chicago: 2017.
- [22] International Telecommunications Union. *United for Smart Sustainable Cities (U4SSC)*. Geneva: 2019.
- [23] Lund H, Østergaard PA, Connolly D, Mathiesen BV. Smart energy and smart energy systems. *Energy* 2017; 137:556–65. doi: 10.1016/J.ENERGY.2017.05.123.
- [24] International Energy Agency (IEA). *Digitalization & Energy*. Paris: 2017.
- [25] International Energy Agency (IEA). *World Energy Outlook 2017*. 2017th ed. Paris: IEA Publications; 2017.
- [26] Ackermann T, Andersson G, Söder L. Distributed generation: a definition. *Electr Power Syst Res* 2001; 57:195–204. doi:10.1016/S0378-7796(01)00101-8.
- [27] Council HR, Germany MTO. *General Assembly 2007*; 11759:1–38. doi:10.1093/oxfordhb/9780199560103.003.0005.
- [28] Kim YD, Meyers K, Statham B, Ward G, Frei C. *2013 Energy Sustainability Index 2013*.
- [29] Barbu AD, Griffiths N, Morton G. *Achieving energy efficiency through behaviour change: what does it take? Technical report No 5/2013*. 2013.
- [30] Frederiks ER, Stenner K, Hobman E V. Household energy use: Applying behavioural economics to understand consumer decision-making and behaviour. *Renew Sustain Energy Rev* 2015; 41:1385–94. doi: 10.1016/j.rser.2014.09.026.
- [31] Batalla-Bejerano J, Trujillo-Baute E, Villa-Arrieta M. Smart meters and consumer behaviour: Insights from the empirical literature. *Energy Policy* 2020; 144:111610. doi: 10.1016/j.enpol.2020.111610.
- [32] World Energy Council. *WEC Trilemma: Pathway calculator*. Pathw Calc 2017. <https://trilemma.worldenergy.org/#!/pathway-calculator> (accessed May 28, 2019).
- [33] Meyer S. *International Energy Statistics Sourcebook. CO2 Emiss FROM FUEL Combust Highlights 1991*. [https://www.eia.gov/beta/international/data/browser/#/?pa=0002&c=rurvvvvfvtnvv1urvvvvfvvvvvfvvvo20evvvvvvvvvnvvvo&ct=0&tl\\_id=2](https://www.eia.gov/beta/international/data/browser/#/?pa=0002&c=rurvvvvfvtnvv1urvvvvfvvvvvfvvvo20evvvvvvvvvnvvvo&ct=0&tl_id=2) (accessed May 23, 2019).
- [34] Ecometrica. *Electricity-specific emission factors for grid electricity*. *Ecometrica* 2011:1–22. doi: 10.13044/j.sdewes.2014.02.0030.
- [35] Villa-Arrieta M, Sumper A. *Economic evaluation of Nearly Zero Energy Cities*. *Appl Energy* 2019; 237:404–16. doi: 10.1016/j.apenergy.2018.12.082.