

Factores que influyen en la selección de energías renovables en la ciudad

Edgar Barragán-Escandón. Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador.

Esteban Zalamea-León. Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador.

Julio Terrados-Cepeda. Universidad de Jaén, Jaén, España.

Pablo Vanegas-Peralta. Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador.

RESUMEN | El modelo energético urbano se basa en importaciones desde fuentes externas. El incremento continuo de la demanda de energía debido al desarrollo y crecimiento poblacional implica crecientes requerimientos de recursos. La alternativa es utilizar energías renovables que aprovechen recursos urbanos. La diversidad de tipologías de las ciudades en cuanto a recursos, demandas, condiciones arquitectónicas, infraestructura o densidad, hace necesario un análisis específico. En este trabajo se identifica catorce factores concernientes al proceso de planificación que permitirían escoger la tecnología más adecuada para una determinada ciudad. A través de una consulta a 78 expertos, se define que la existencia del recurso es el factor de mayor preponderancia, seguido de las condiciones económicas; en contraparte se detecta que aspectos ambientales como calentamiento global, eutrofización o acidificación, son los menos incidentes al momento de seleccionar tecnologías.

PALABRAS CLAVE | planificación urbana, servicios urbanos, sustentabilidad urbana.

ABSTRACT | *Urban energy models assume that energy is imported from outside the urban area. Forecast increases in urban population and energy use intensity will increase energy requirements. One alternative is to integrate sources of renewable energy within cities boundaries. To do so, differences in urban form, resources availability, energy requirements, condition of buildings, infrastructure, and population and building density make city-specific analysis necessary. This study identifies 14 factors that urban planners should consider to make the most appropriate technology choices for a given city. Through consultation with 78 experts, the presence of renewable energy sources was selected as the most important factor, followed by economic conditions in the city. The least important factors were environmental consequences of global warming, eutrophication and acidification.*

KEYWORDS | *urban planning, urban services, urban sustainability.*

Recibido el 11 de agosto de 2017, aprobado el 24 de octubre de 2017

E-mails: E. Barragán-Escandón, ebarragan@ups.edu.ec | E. Zalamea, esteban.zalamea@ucuenca.edu.ec | J. Terrados, jcepeda@ujaen.es | P. Vanegas, pablo.vanegas@ucuenca.edu.ec

Introducción

El principal objetivo de la planificación energética es satisfacer la demanda de una ciudad, región o país a corto, mediano o largo plazo, en forma continua, con determinados parámetros de calidad y precios aceptables. En principio, la planificación consideró exclusivamente criterios económicos para el dimensionamiento de la estructura energética. Tradicionalmente los costos asociados a la producción e implantación de la infraestructura energética fueron los principales determinantes; posteriormente, aspectos relacionados con la dimensión social y ambiental emergieron como prioritarios. Los avances tecnológicos permiten considerar la energía renovable (ER) como una opción para cambiar el modelo de aprovisionamiento energético.

En la conferencia Hábitat III (Quito, 2016) se enfatizó en la importancia de las ER integradas en el desarrollo urbano (International Renewable Energy Agency [IRENA], 2016a; IRENA, 2016b). Sin embargo, no hay soluciones únicas, dadas las diferentes configuraciones urbanas, la disponibilidad de recursos o las demandas energéticas. Se espera, entonces, que su desarrollo se potencie con la colaboración entre municipalidades y el estudio de casos exitosos.

Las municipalidades normalmente tienen autonomía para planificar el transporte, uso de suelo, edificación, provisión de agua o manejo de desechos, pero limitado control en el aprovisionamiento energético (IRENA, 2016; IRENA, 2016b). La disminución de costos de las ER facilitaría la inclusión de alternativas energéticas dentro de los límites urbanos, incentivando un modelo urbano sostenible (IRENA, 2016a). Páez (2010) propone que, además del uso de los recursos renovables, se promueva la arquitectura bioclimática, la eficiencia energética y la implementación de programas que incentiven el metabolismo urbano circular.

A diferencia de la escala regional, en la ciudad se debe analizar aspectos relacionados con la arquitectura, disponibilidad de espacio, u otros limitantes que impidan el aprovechamiento del recurso. Este artículo explora cuáles son los factores que podrían incidir para la adopción de once tecnologías que utilizan recursos renovables disponibles o que provienen de la ciudad.

El contexto latinoamericano

Más del 80% del requerimiento de energía a nivel mundial se basa en el consumo de combustibles fósiles, cifra que en Latinoamérica es del 74% (International Energy Agency [IEA], 2016). La necesidad de energía a nivel mundial se ha duplicado en el periodo 1973-2014. En Latinoamérica, el requerimiento energético en el mismo periodo se ha triplicado, con una tasa de crecimiento superior a la media global, tendencia propia de las economías en desarrollo. Por otro lado, la alta dependencia de recursos fósiles contaminantes y extinguidos ha hecho que paulatinamente se haya incrementado la participación de las ER, sobre todo a gran escala.

Para contribuir al desarrollo de las energías renovables a nivel regional, se ha requerido establecer estrategias a largo plazo que apunten a un sistema energético sostenible, basado en el aprovechamiento de recursos autóctonos. En el caso de

las ciudades en países en vías de desarrollo, el conocimiento de su situación puede ayudar a definir una agenda que incluya el tema energético, con miras a una era pospetróleo o tecnosolar (Páez, 2010). Tanto los estamentos públicos como el sector privado y los habitantes de las ciudades desempeñan un rol preponderante al respecto, pues tendrán que asimilar los diversos cambios que lleven a un rediseño de la infraestructura urbana.

Si se pretende incentivar el uso de las energías renovables en el ámbito urbano, un enfoque amplio e integral de la forma en que se entiende la ciudad puede ayudar a los entes organizacionales y administrativos a tomar decisiones correctas.

En Latinoamérica se han implementado diversas acciones tendientes a hacerse cargo de los desafíos y problemas urbanos desde un enfoque de sostenibilidad, lo que implica incluir la dimensión energética en las políticas públicas. En este ámbito, muchas de las políticas orientadas a resolver problemas locales se moldean según criterios provenientes de experiencias europeas o anglosajonas. Se requiere, sin embargo, que alternativas que promuevan la gestión urbana sostenible –como la promoción de la eficiencia energética, estrategias constructivas pasivas, sustituciones tecnológicas o el empleo de energías renovables– sean analizadas desde lo local.

El manejo de la energía a nivel local no es el único aspecto que puede contribuir a la sostenibilidad urbana. Una visión más holística es el concepto de “ciudades inteligentes” (*smart cities*). Tal enfoque plantea mejorar la calidad de vida de los habitantes de una ciudad a través de tecnologías de información o comunicación que, entre otros aspectos, contribuyan a alcanzar eficiencia en la movilidad, proporcionen mayor seguridad y fomenten el consumo racional de recursos, o permitan alcanzar configuraciones urbanas compactas y accesibles.

Energías renovables en ciudades

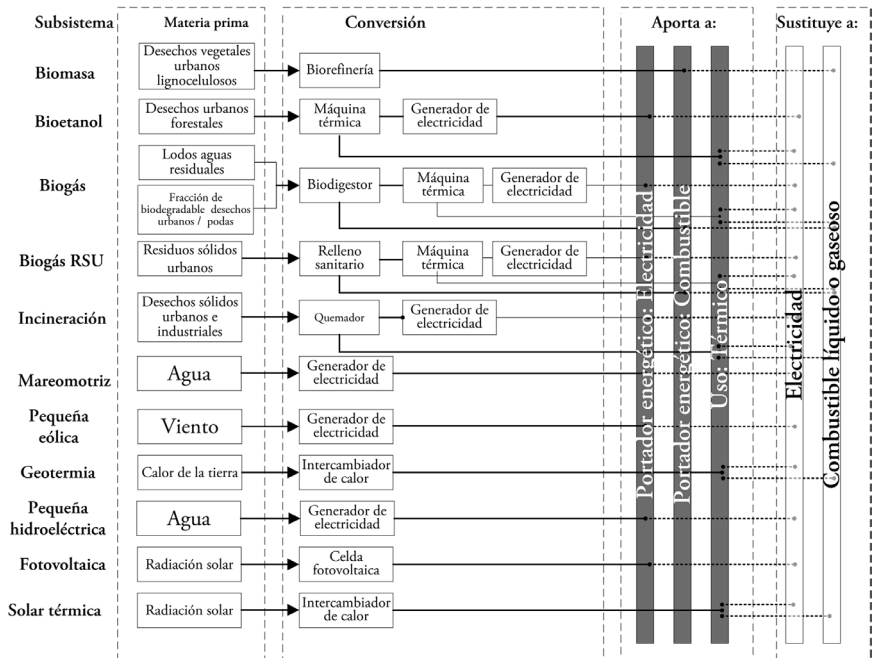
En materia de energía a nivel local, al desconocimiento del recurso renovable en las ciudades se suma la inexistencia de una infraestructura sólida destinada a la promoción de las ER. Cada ciudad debe valorar su potencial particular en este ámbito, pues las condiciones geográficas, disponibilidad de recursos o diversidad en demandas, limitan o potencian una u otra tecnología.

Varias investigaciones han detectado la capacidad de ciertos centros urbanos para autoabastecerse total o parcialmente de energía con recursos endógenos. En Tartu (Estonia) se valoró la capacidad de aprovechar residuos urbanos para obtener bioetanol, pudiéndose sustituir con ello el 60% de la demanda de combustibles (Raud, Kesperi, Oja, Olt & Kikas, 2014). En Mar del Plata (Argentina), el 4,36% de la electricidad puede abastecerse utilizando residuos forestales urbanos (Roberts, Cassula, Osvaldo Prado, Dias & Balestieri, 2015). En Tijuana (México), el 40% de iluminación artificial puede suplirse con biogás de rellenos sanitarios (Aguilar-Virgen, Taboada-González & Ojeda-Benítez, 2014). En Estocolmo (Suecia), se puede obtener el 12% de la electricidad con incineración de los desechos (Pandis Iveroth et al., 2013). En Westminster (Inglaterra), la demanda térmica de 63.000 viviendas puede suplirse desde la geotermia (Arola, Eskola, Hellen & Korkka-Niemi, 2014).

En Beppu (Japón) existe potencial mini-hidroeléctrico para dotar de energía a 29.000 viviendas (Fujiia et al., 2015). En Zernez (Suiza), el 64% de la demanda puede ser absorbida desde sistemas fotovoltaicos. En Concepción (Chile), 3.233 viviendas pueden cubrir sus necesidades energéticas de agua caliente sanitaria y electricidad desde la energía solar (Zalamea & García Alvarado, 2014). Además, los reportes de IEA (2009) o IRENA (2016b) presentan varias experiencias de políticas públicas e incentivos municipales que han permitido la promoción de ER en ciudades.

Para aprovechar los recursos urbanos, se requiere seleccionar las opciones más adecuadas en función de su disponibilidad o demanda. Con este enfoque, Barragán y colaboradores (Barragán et al., 2017) establecen once tecnologías renovables aplicables en la ciudad en el marco del metabolismo urbano. En la figura 1 se identifican sustitutos energéticos y la posible contribución de distintas fuentes internas. Además, se presentan diferentes tecnologías, aplicaciones finales y las fuentes energéticas.

FIGURA 1 | Fuentes de energías renovables urbanas



FUENTE ELABORACIÓN PROPIA

Bioetanol

Si el bioetanol proviene de residuos urbanos lignocelulosos se denomina bioetanol de segunda generación. En este caso existe un valor añadido a los desechos, que en principio carecen de valor, pero provocan contaminación y requieren gestión (Martínez, Montoya & Sierra, 2014). Tanto variaciones climáticas estacionales como sistemas de transporte, provisión de materia prima y emplazamiento de

biorrefinerías son factores necesarios de analizar para esta opción. Además, la disponibilidad de materia prima no debe entrar en conflicto con usos recreativos o paisajísticos (Kraxner et al., 2016). Los residuos urbanos lignocelulósicos pueden contribuir directamente al portador energético como sustituto o mezcla de gasolinas.

Biomasa

Mediante procesos químicos y bioquímicos, la biomasa puede ser transformada en energía secundaria, como electricidad, calor o combustible (Roberts et al., 2015). Se consideran como materia prima los desechos de podas de jardines públicos y/o domésticos. La biomasa disponible no es homogénea, requiriéndose de un procesamiento adicional para acondicionar la materia prima.

Biogás

El biogás puede desempeñar un rol importante en la producción de energía y en la protección ambiental, debido a su rápido desarrollo (Aguilar-Virgen et al., 2014). Existen diferentes fuentes urbanas de biogás: residuos industriales, residuos de podas, desechos sólidos, fracción orgánica de los desechos sólidos, aguas residuales municipales o industriales (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía [IDAE], 2011). En este estudio se anotan dos posibilidades de producción: biogás proveniente de biodigestores, o de rellenos sanitarios:

- *Biogás de biodigestores.* La recuperación de biogás desde aguas residuales es útil para la generación eléctrica, térmica, cogeneración, combustible para vehículos o para inyectar a las redes de gas natural (Salomon & Silva Lora, 2009). El procesamiento químico, físico y biológico de las aguas residuales produce lodos, que pueden ser estabilizados en forma aeróbica o anaeróbica. Para la obtención del biogás, el metano se estabiliza de forma anaerobia (Zubizarreta et al., 2010).
- *Biogás de rellenos sanitarios.* En un relleno sanitario se sitúan cientos de toneladas al día de desechos sólidos urbanos, los que se ubican sobre una geomembrana impermeable que impide la filtración de lixiviados al suelo. En medio de las capas de desechos hay conducciones a chimeneas. Al descomponerse la materia orgánica y residuos, se producen gases que, de no someterse a filtrado, llegan a la atmósfera (Aguilar-Virgen et al., 2014). Dependiendo de su calidad y acorde a la valoración del potencial energético, el biogás puede separarse en componentes útiles suplementarios al gas natural o como combustibles para vehículos.

Incineración

A más del aprovechamiento energético de los desechos sólidos en rellenos sanitarios, también son aprovechables en incineradoras. Los desechos alimentan quemadores que impulsan turbinas a vapor (Zubizarreta et al., 2010). Se requiere una baja proporción de desechos biodegradables y bajo contenido de humedad. Este método reduce entre 80% y 90% el volumen de desechos y, en consecuencia, la necesidad de vertederos (De Souza et al., 2014). Al incinerar desechos se obtiene más energía por tonelada respecto a la obtención de biogás (alrededor del 22%), y además se reduce el volumen de CO₂ emanado (alrededor del 45%) (Tan et al., 2014).

Energía mareomotriz

Las corrientes marinas pueden aprovecharse con diferentes tecnologías: mareomotriz, corrientes, maremotérmica, olas o potencia osmótica (IDAE, 2011). La energía mareomotriz tiene mayor grado de madurez y actualmente se encuentra a escala comercial. Su infraestructura requiere una bahía y un estuario. Es de naturaleza intermitente, aunque es posible predecir la producción. El reservorio se llena con marea alta debido al movimiento gravitatorio. Se aprovecha el movimiento del mar para generar electricidad. La necesidad de reservorio es un limitante, pues el espacio no está siempre disponible; además, estas tecnologías provocan impacto ambiental relativo y requieren alto capital. Hammons (1993) considera el inconveniente de disponibilidad de sitios con condiciones geográficas propicias; los pocos existentes normalmente están lejanos a centros de consumo, por lo que difícilmente se acoplan al modelo de autogeneración urbana.

Eólico

Se estima que mundialmente ha crecido la presencia de miniturbinas eólicas en un 12% entre 2012 y 2013 (755 MW). En 2011, más del 70% de fabricantes optó por diseños de eje vertical, normalmente para sistemas sin conexión a red (Gsänger & Pitteloud, 2015). La potencia varía desde 1kW a 100kW para aplicaciones residenciales y comerciales, o de 101 kW a 2,5 MW para comercio o industria (Distributed Wind Energy Association [DWEA], 2015). Se espera que las turbinas de eje vertical prevalezcan en el mercado para la integración urbana frente a las de eje horizontal, por una mejor ocupación espacial (Ishugah, Li, Wang & Kiplagat, 2014) e integración arquitectónica. Las instalaciones eólicas permiten el empoderamiento del usuario, evitan pérdidas de transporte por la proximidad a la carga, a más de reducir la demanda de infraestructura eléctrica externa (IDAE, 2011) y evitar emisiones a la atmósfera. Pero aspectos como seguridad, sombras, ruido, vibraciones o impacto visual son sus limitantes (Ishugah et al., 2014). Esta tecnología exige investigación y desarrollo para su implementación dentro de los límites urbanos.

Geotermia

La geotermia superficial es utilizada para el calentamiento de agua o en aplicaciones de climatización. Las aplicaciones en ciudades pueden servir para aprovechamientos en proyectos urbanos e industriales (IDAE, 2011). El incremento anual de instalaciones de este tipo supera el 10%, pero los costos de instalación han provocado que su expansión se ralentice (Schiel, Baume, Caruso & Leopold, 2016). Esta tecnología requiere una bomba de calor que permite transferir energía en forma de calor de un ambiente a otro, pero consume energía auxiliar. La eficiencia del sistema es medida por el coeficiente de rendimiento (COP o *Coefficient of Performance*), que es la relación entre la energía calórica producida y la energía requerida para recolectarla. El COP puede estar entre 3 y 5, para diferencias de temperaturas comprendidas entre 0° a 35°C (Saner et al., 2010). Al requerirse energía adicional, su condición de ER solo se considera si la alimentación auxiliar no es superior a la energía primaria utilizada, o si la auxiliar también procede de ER (IDAE, 2011). En la urbe, la solución de perforación vertical es preferible (Zhang, Choudhary & Soga, 2015), pues

el emplazamiento horizontal requiere considerable ocupación. En contraparte, el sistema vertical requiere alcanzar profundidades de entre 50 y 400 metros, dependiendo de la energía por extraerse y del potencial del suelo (Schiel et al., 2016).

Hidroeléctrico

En entornos urbanos son aplicables minicentrales hidroeléctricas de potencia inferior a los 5MW (IDAE, 2011), de sencilla operación respecto a grandes centrales (Xu, Ni & Zheng, 2015); sin embargo, el costo unitario de potencia puede duplicar el de las grandes instalaciones. La posibilidad de asegurar la provisión de energía eléctrica mediante redes distribuidas ha vuelto atractivo el uso de centrales de potencias pequeñas, que podrían utilizarse cerca o en los centros de consumo. El tamaño de instalación urbana depende de la existencia del recurso y la disponibilidad de espacio. En Filadelfia (USA) se propone el uso de centrales de más de 1000 kW (Moscovici, Dilworth, Mead & Zhao, 2015), mientras en Beppu (Japón) se sugiere instalaciones menores (Fujiia et al., 2015). Redes urbanas de aprovisionamiento de agua pueden aprovecharse para la instalación de pequeñas hidroeléctricas, reduciendo hasta un 50% el costo de la infraestructura civil, e incrementando además el tiempo de operación frente a instalaciones ubicadas a pie de río (Kucukali, 2010).

Solar fotovoltaico

La inserción de fotovoltaicos en la ciudad depende de varios factores, como irradiación, capital, soporte tecnológico e institucional, aceptabilidad social, obstáculos o restricciones arquitectónicas (Jamal, Oongsakul, Singh, Salehin & Ferdous, 2014). La disponibilidad de espacio en los tejados y la accesibilidad solar son cruciales para este tipo de aplicaciones (Kabir, Endlicher & Jagermeyr, 2010). Por condiciones técnicas, sociales o políticas, para el uso de estos espacios se puede visualizar la ciudad como una planta de energía fotovoltaica. La energía suministrada por un sistema fotovoltaico está estrechamente vinculada con el espacio disponible para la colocación de las placas. La principal barrera para su integración a gran escala es la intermitencia solar y la necesidad de prever redes eléctricas con flujo bidireccional, así como centrales de distribución acondicionadas.

Solar térmico

La utilización térmica de la irradiación solar puede servir para el aprovisionamiento de agua caliente sanitaria, usos industriales y climatización (calor o frío). Hay diferentes tipos de calentadores solares; en Estados Unidos, México, China y Turquía se utilizan colectores solares planos y colectores de tubos de vacío. Los calentadores de tubos de vacío tienen mayor eficiencia con respecto a los planos en radiación difusa y clima frío, pero son un 20% más costosos (IDAE, 2011). Los colectores planos tienen mayor área de absorción, lo que les permite ser más eficientes en climas templados a cálidos o ante radiación directa (Greening & Azapagic, 2014). Para el movimiento del fluido térmico puede utilizarse circulación forzada (bombas) o natural. Para instalaciones pequeñas no es un requerimiento la disponibilidad de bombas de recirculación, pudiendo el almacenamiento estar integrado al colector (Benli, 2016). Al igual que en el caso de los fotovoltaicos, el espacio disponible en

techos, así como la orientación de los colectores, son limitantes para su operación, dependiendo de la latitud. El uso de estos dispositivos disminuye la demanda eléctrica y/o de combustibles.

Métodos

Para que los planificadores urbanos puedan seleccionar las ER más adecuadas a ciudades específicas, se propone una metodología dividida en tres fases. Una primera preselección se realiza a través de conceptos obtenidos de la literatura desde dos fuentes: i) estudios en los que se definen criterios para seleccionar ER en general; ii) investigaciones de tecnologías que se podrían aplicar en ciudades. El primer análisis identifica 59 criterios y un segundo, 11. En segundo lugar, se determinan 14 criterios adecuados, los que fueron clasificados en técnicos, económicos y ambientales. Finalmente, para la identificación de la importancia relativa de cada uno se diseñó y aplicó una encuesta a profesionales de diferentes países. Con la escala de Likert, se puntúa y ordenan los factores más influyentes para establecer medidas y políticas tendientes a integrar las ER a escala urbana.

Revisión bibliográfica

La primera revisión se enfoca en estudios referidos a Métodos de Ayuda para la Toma de Decisiones MCDA (*Multiple Criteria Decision Analysis*) o MCDM (*Multiple Criteria Decision Making*), que permiten valorar alternativas comparando criterios técnicos, económicos, ambientales o sociales. Para la búsqueda de documentos científicos se utiliza la base de datos Web of Science, con el siguiente criterio de búsqueda: “renewable energy” y “MCDA”, además de “renewable energy” y “MCDM”. La literatura muestra los criterios empleados para la selección de tecnologías o escenarios energéticos a escala nacional y regional, pero marginalmente se los ha utilizado para establecer alternativas tecnológicas en ciudades. Por ello, se procede a realizar una nueva revisión bibliográfica reuniendo estudios de las once tecnologías propuestas.¹

Criterios analizados

Con la revisión bibliográfica se definieron 59 criterios de la tabla A1 y 11 de la tabla A2. Luego se unificaron en función de similitudes. Se consideran aquellos adecuados para inserción urbana, tomándose para ello aquellos comunes a ambos estudios. Al Garni et al. (2016) sugieren el descarte de aquellos utilizados en menos del 20% de estudios. Esto permite identificar los criterios en función de la frecuencia de su uso en la literatura; además, posibilitó limitar el número de criterios a una cantidad manejable. En el tabla 1 se muestran los 14 criterios establecidos como influyentes.

1 Criterios pueden consultarse en tesis doctoral de Edgar Barragán (en curso).

TABLA 1 | Criterios para la elección de tecnologías

DIMENSIÓN	CÓDIGO	CRITERIO
Técnico	C1	Eficiencia
	C2	Disponibilidad de fuente primaria
	C3	Madurez de la tecnología
	C4	Obstáculos urbanos y disponibilidad de área
	C5	Integración arquitectónica
Económico	C6	Inversión inicial
	C7	Costo de operación y mantenimiento
	C8	Costo de energía
Ambiental	C9	Calentamiento global
	C10	Acidificación
	C11	Eutrofización
Sociopolítico	C12	Empleo
	C13	Aceptabilidad social
	C14	Compatibilidad con las políticas internacionales, regionales o locales

FUENTE ELABORACIÓN PROPIA

Dimensión técnica

Los factores señalados a continuación están relacionados con las características tecnológicas ante una posible instalación de ER en espacios urbanos.

Eficiencia: Se refiere al coeficiente entre la energía de salida y la energía contenida en la fuente primaria. Indica, por tanto, cuánta energía puede obtenerse luego de la conversión energética.

Disponibilidad de fuente primaria: Este criterio considera la existencia y potencial del recurso primario para una determinada tecnología. Cada lugar tiene particularidades, en función de su geografía, ubicación o clima, lo que supone un análisis individual.

Obstáculos urbanos y disponibilidad de área: El espacio urbano disponible es una de las condiciones que se necesita evaluar para la inclusión de las ER. La densidad urbana es esencial; generalmente, a mayor densidad menor espacio disponible para la colocación de infraestructura. Sin embargo, para tecnologías solares integradas en edificios, la concentración de superficies homogéneas de tejados puede ser favorable. Generadores que utilizan el biogás de rellenos o de aguas residuales son instalaciones que aprovechan recursos que provienen de desechos y pueden ubicarse fuera del límite urbano o en áreas industriales.

Integración arquitectónica: La intromisión de infraestructuras de generación dentro del espacio urbano modifica la configuración urbana y de edificios. Tecnologías poco invasivas como la solar, al momento de masificarse causan impacto visual y pueden ser restringidas en edificaciones de valor arquitectónico; no obstante, existen alternativas en desarrollo para mimetizarlas. La integración de las ER y la arquitectura es esencial, así como su consideración en el diseño urbano, lo cual requiere una legislación que considere estas instalaciones.

Madurez tecnológica: Indica el grado de desarrollo y nivel comercial. De encontrarse a nivel de investigación y desarrollo, la tecnología está en estado de evaluación en laboratorio. Otras tecnologías están en etapa demostrativa en plantas piloto, sin un horizonte definido de aplicabilidad. Salvo la tecnología eólica para integración urbana y el bioetanol de segunda generación, el resto de tecnologías están en etapa comercial.

Dimensión económica

Corresponde al costo de provisión, operación y mantenimiento del equipamiento y producción. Estos costos dependen de impuestos, de la promoción del sistema o la importación de los equipamientos, y en general de la localidad en que se instalen. El criterio de valorar solamente tecnologías puede ser insuficiente para la toma de decisiones, pues hay alternativas como la fotovoltaica, solar térmica incluso eólica que pueden masificarse y exigir mayor inversión, mientras que las tecnologías mini-hidroeléctrica, mareomotriz, biomasa o biogás están condicionadas a pocas plantas, requiriéndose normalmente menor inversión.

Costo de inversión: Es el criterio más generalizado para comparar alternativas tecnológicas. Representa el costo de equipos, instalación, construcción de redes, servicios de ingeniería.

Costo de operación y mantenimiento: Considera los precios de operación (personal, productos o servicios) durante su vida útil.

Costo de producción: Considera el valor monetario de una unidad energética obtenida.

Dimensión ambiental

Las ER producen bajas o nulas emisiones de gases a la atmósfera durante la operación, pero la fabricación e instalación requiere insumos y energía que pueden ocasionar un impacto ambiental relacionado con el calentamiento global, lluvia ácida o eutrofización. Por ello, el análisis debe incluir todo el ciclo de vida de la tecnología.

Calentamiento global: Los gases de efecto invernadero provocan el calentamiento global. Como indicador se utiliza el CO_2 producto de la combustión y/o putrefacción.

Acidificación: El dióxido de azufre provoca lluvia ácida, causante de afecciones a ecosistemas y a la salud.

Eutrofización: La quema de combustibles fósiles produce óxidos de nitrógeno, que propician un exceso de nutrientes que se depositan en el agua o en el suelo. Esto provoca un aumento de la producción primaria o biomasa y un decremento de otras especies.

Dimensión social

Las tecnologías renovables distribuidas en ciudades deben considerarse bajo normativas y condiciones sociales, requieren ser aceptables y útiles, coherentes con demandas, espacio y tiempo.

Creación de empleo: El desarrollo, manufactura, instalación, construcción, mantenimiento y operación de la infraestructura energética requiere personal en mayor o menor medida. El empleo mejora la calidad de vida y posibilita el establecimiento de nuevos negocios, así como genera riqueza. Estudios muestran que la inserción

de fuentes energéticas incrementa la necesidad de personal con distinto grado de calificación, variable en cada tecnología, pero normalmente superior a la generación tradicional.

Aceptación social de la tecnología: Este factor considera el asentimiento de la población y relación urbana respecto a las tecnologías renovables.

Compatibilidad con las políticas públicas: La creciente participación de las ER a escala nación-región surge desde políticas que motivan su inserción tanto a gran escala como a pequeña escala. El cambio de modelo energético a uno en donde el usuario sea partícipe, requiere de la intervención política vía regulaciones, incentivos y financiamiento.

Resultados y discusión

Para establecer el grado relativo de importancia de los distintos criterios, se planteó una encuesta a 175 profesionales, utilizando formularios Google, entre noviembre de 2016 y abril de 2017. Se recibieron 79 respuestas, y se validaron 78. Los participantes pertenecen al sector académico (53%), sector público (28%), sector privado (11%) y el resto a otras instituciones. El 33% de los participantes son de España, el 27% de Ecuador y una proporción de 40% de otros países (Argentina, Chile, Honduras, Cuba).

La encuesta incluyó la descripción del marco de estudio, seguida de la pregunta relacionada con la importancia de cada criterio para el establecimiento de las ER en ambientes urbanos. Se utilizó la escala de Lickert (1-10), donde 1 es menos importante y 10 el más importante.

Con base en la metodología propuesta por Eleftheriadis y Anagnostopoulou (2015) y Zhang, Shen y Chan (2012), se valoró la importancia de los 14 criterios identificados. Se calculó el promedio de las respuestas obtenidas mediante la siguiente fórmula:

donde

P_i , es el número de puntos de calificación de la escala de Likert (1 a 10).

$$\text{Puntuación Media (M)} = \sum_i^j (P_i \times R_i)$$

R_i es la fracción de la suma de cada calificación (P_i) para la suma de todas las calificaciones para cada criterio.

Con el coeficiente de Conbrach (α) se garantiza la fiabilidad del cuestionario; α es una medida cuantitativa del grado en que los ítems están relacionados entre sí; es decir, mide el grado de “homogeneidad” interna. Mientras más se acerca a 1 se considera más adecuado, entre 0,8 a 0,9 es bueno, entre 0,7 a 0,8 aceptable, entre 0,6 y 0,7 es cuestionable. Se obtuvo un indicador de 0,88, lo que muestra que las respuestas de los participantes son homogéneas. En la tabla 2 se presenta los resultados de la encuesta y su ordenamiento según su importancia relativa.

TABLA 2 | Principales criterios que influyen en la implantación de las ER en la ciudad

DIMENSIÓN / CRITERIO*	i	1		2		3		4		5		6		7		8		9		10		SUM	M
		RI	PI	RI	PI	RI	PI	RI	PI	RI	PI	RI	PI	RI	PI	RI	PI	RI	PI	RI	PI		
DT C2.		0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	1	0,01	7	0,09	8	0,10	9	0,12	19	0,24	34	0,44	78,00	8,79
DE C8		0	0,00	0	0,00	2	0,03	0	0,00	1	0,01	3	0,04	6	0,08	15	0,19	22	0,28	29	0,37	78,00	8,71
DE C6		0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	3	0,04	4	0,05	7	0,09	19	0,24	18	0,23	27	0,35	78,00	8,62
DT C1.		0	0,00	0	0,00	0	0,00	3	0,04	4	0,05	6	0,08	16	0,21	17	0,22	19	0,24	13	0,17	78,00	7,91
DE C7		0	0,00	0	0,00	3	0,04	2	0,03	2	0,03	4	0,05	13	0,17	23	0,29	19	0,24	12	0,15	78,00	7,91
DS C14		1	0,01	1	0,01	3	0,04	3	0,04	11	0,14	6	0,08	8	0,10	7	0,09	18	0,23	20	0,26	78,00	7,55
DT C3		1	0,01	0	0,00	3	0,04	2	0,03	9	0,12	9	0,12	9	0,12	17	0,22	15	0,19	13	0,17	78,00	7,45
DA C9		1	0,01	0	0,00	3	0,04	6	0,08	9	0,12	8	0,10	10	0,13	9	0,12	17	0,22	15	0,19	78,00	7,33
DS C13		3	0,04	2	0,03	2	0,03	1	0,01	11	0,14	4	0,05	11	0,14	18	0,23	9	0,12	17	0,22	78,00	7,28
DT C4		1	0,01	1	0,01	2	0,03	3	0,04	6	0,08	12	0,15	12	0,15	23	0,29	6	0,08	12	0,15	78,00	7,24
DA C10		3	0,04	5	0,06	2	0,03	8	0,10	9	0,12	11	0,14	3	0,04	12	0,15	15	0,19	10	0,13	78,00	6,59
DS C12		4	0,05	2	0,03	5	0,06	6	0,08	9	0,12	8	0,10	11	0,14	17	0,22	7	0,09	9	0,12	78,00	6,49
DA C11		3	0,04	5	0,06	2	0,03	7	0,09	14	0,18	10	0,13	3	0,04	11	0,14	15	0,19	8	0,10	78,00	6,42
DT C5		3	0,04	0	0,00	6	0,08	7	0,09	14	0,18	13	0,17	9	0,12	19	0,24	1	0,01	6	0,08	78,00	6,17

FUENTE ELABORACIÓN PROPIA

Los valores ordenados de la puntuación media (M) de la tabla 2 indican que los criterios que componen la dimensión económica en conjunto son los más influyentes en la selección de tecnologías. La inversión y el costo de energía son factores decisivos para promover las ER a nivel urbano. Sin rentabilidad difícilmente se alcanzará la masificación, sobre todo de aquellas ER consideradas distribuidas, a pesar de que las fuentes solares, eólica y otras pueden abastecer en gran medida la demanda en forma limpia. Los costos asociados a la operación, mantenimiento y la falta de empatía con impactos ambientales, impiden la aceptación y masificación de las ER. De allí la importancia de políticas de promoción que reviertan los inconvenientes citados.

La disponibilidad del recurso y la eficiencia tecnológica son los criterios técnicos de mayor importancia. La existencia del recurso es el factor individual que más influye al momento de selección de una tecnología determinada. Cada ciudad tiene condiciones particulares en materia de recursos para la selección de ER, por lo que es indispensable hacer un estudio que permita la valoración de ellos. El espacio para las instalaciones, así como las fuentes energéticas, tienen limitaciones; por ello, la capacidad para un máximo aprovechamiento es otro factor técnico que los participantes en la encuesta consideran de interés. Los factores que analizan aspectos arquitectónicos, así como la disponibilidad de espacio, son considerados menos influyentes; hay tecnologías que no necesariamente requieren implantarse en áreas habitacionales, y pueden instalarse en zonas industriales (biomasa, biogás, incineración, mareomotriz), mientras que la masificación de otras puede afectar la estética de la ciudad o demandar espacio (fotovoltaica o eólica).

El factor sociopolítico de mayor interés es el relacionado con la existencia de políticas públicas. Las municipalidades, en este sentido, deben promover el desarrollo de estos proyectos con legislación y normativa técnica o con incentivos. En el caso de los factores sociales, como creación de empleo o aceptación ciudadana, la valoración es menor que en los anteriormente expuestos. Se observa que la ciudadanía considera atractivas estas tecnologías y, por tanto, si los precios son manejables, se prevé mínima oposición. Aun cuando el empleo suele ser un atractivo para la implantación de una actividad o industria, en general este factor tiene menor valoración. Ello puede deberse a una percepción de mínima influencia en los índices de empleo, más aún si los países no son fabricantes sino importadores de tecnologías y equipos.

El impacto ambiental es el factor menos influyente. Esto porque los habitantes de las ciudades no se relacionan con impactos lejanos. La relación entre la infraestructura y operación de grandes centrales eléctricas, refinerías u otros equipamientos de transporte de energético, y la afectación a la naturaleza, no se percibe.

Al fraccionar la muestra examinada por tipo de profesionales, se mantiene un alto grado de homogeneidad ($\alpha=0,87$ para la academia, $\alpha=0,89$ para el sector privado, $\alpha=0,84$ otros); sin embargo, se advierte que la percepción de cada grupo difiere (figura 2). La existencia del recurso se mantiene en importancia, seguida de las cuestiones relacionadas con los costos del equipamiento y energía. También se advierte que factores como la madurez de la tecnología, acidificación, creación de empleo, eutrofización e integración arquitectónica, guardan una estrecha similitud en las

respuestas. El resto de los factores se ubican en posiciones diferentes en importancia. Esto refleja que los aspectos económicos son los que mantienen la principal preocupación, mientras que, según este fraccionamiento, la percepción respecto a temas ambientales no es común.

FIGURA 2 | Resultados de las encuestas por grupos profesionales por actividad



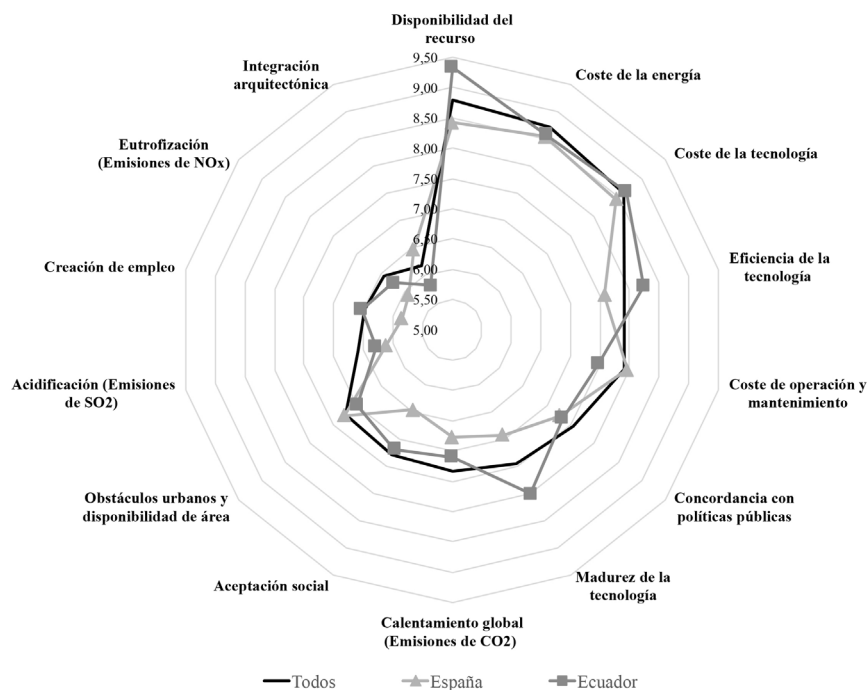
FUENTE ELABORACIÓN PROPIA

Para establecer las singularidades entre las opiniones de los participantes según su procedencia, se analizan los casos de España y Ecuador, que tienen la mayor participación. Según la clasificación del World Energy Council (2017), España se encuentra en la posición 13 en seguridad energética, equidad energética y sostenibilidad ambiental; mientras que Ecuador se encuentra en la posición 64. Puesto que la clasificación incluye el desarrollo del suministro de energía y otras fuentes energéticas bajas en carbono, los casos que se discuten representan a países que tienen disímiles condiciones económicas, sociales o tecnológicas.

El grado de homogeneidad según el estadístico utilizado es $\alpha=0,80$ para España y $\alpha=0,88$ para Ecuador. Según la figura 3, el costo de la energía, disponibilidad del recurso y el costo de la tecnología son los tres factores más puntuados en los dos casos. Aspectos como la eficiencia tecnológica, concordancias con las políticas públicas, calentamiento global, aceptación social, acidificación, eutrofización mantienen un similar interés. Esto indica que los aspectos económicos y ambientales son comunes. En lo que se refiere a la dimensión técnica y sociopolítica, la

madurez de la tecnología, obstáculos urbanos, arquitectura y empleo difieren. Estas diferencias pueden estar dadas como resultado del uso e impulso de las tecnologías renovables en España, frente a Ecuador, en donde se encuentran subsidiados los combustibles fósiles. Adicionalmente, el conocimiento de los encuestados respecto a los factores técnicos o disponibilidad de la tecnología en el mercado local lleva a que las percepciones de estos aspectos difieran.

FIGURA 3 | Resultados de las encuestas por grupos profesionales por países



FUENTE ELABORACIÓN PROPIA

El desarrollo de nuevas posibilidades que permiten la producción descentralizada aprovechando recursos que dispone la ciudad, viabiliza que la urbe no solo sea receptora de energía. Sin embargo, se requiere estudiar las diferentes posibilidades en cada localidad, pues no existen recetas únicas. Como se advierte, de los resultados de las encuestas, la percepción varía de acuerdo con el perfil laboral, así como de la localidad de los participantes.

Como requisito, se requiere que la planificación energética sea concebida no solo a nivel nacional o regional, sino a nivel urbano, manteniéndose un adecuado balance entre las dimensiones técnica, social, económica y ambiental. Las ciudades, entonces, dejan de ser receptoras de energía y alcanzan cierta independencia y democratización energética. Esto supone la planeación energética también desde las municipalidades (IEA, 2009; IRENA, 2016b; Sveinbjörnsson, Ben Amer-Allam,

Hansen, Algren & Pedersen, 2017). El cambio de paradigma lleva a ciudades que aprovechen recursos disponibles o desechos problemáticos. Para conseguirlo, se requiere de una planificación energética nacional que considere la producción de cada zona urbana. Estos criterios engloban diversas aristas, y aunque no existen soluciones generales, se intenta establecer condiciones que permitan cambiar el modelo energético existente a uno que incluya las ER en la ciudad.

Conclusiones

Se ha propuesto un conjunto de factores y criterios cuyo análisis y medición permitirían replantear la manera de planificar una ciudad, de forma que se incluya el autoabastecimiento energético —por lo menos parcialmente— utilizando ER endógenas. Los factores analizados no necesariamente son los únicos; sin embargo, los autores consideran que pueden contribuir a la discusión en este ámbito, puesto que el uso de las ER en la ciudad es un planteamiento relativamente nuevo.

A través de una inspección bibliográfica se identificó 14 factores que se puede valorar al momento de identificar qué ER es más efectiva en una determinada urbe. Los factores económicos en conjunto son los que se consideraron más importantes. La existencia del recurso y la eficiencia resultan determinantes en función del aprovechamiento de la materia prima para producir energía. Por su parte, los factores ambientales y sociales se perciben como menos influyentes al momento de optar por una u otra opción. También se revela una baja empatía social respecto a la afectación a la naturaleza y al cambio climático.

Al fraccionar la muestra entre procedencia y perfil laboral, se advierte que existe una variación en el posicionamiento de los factores. Sin embargo, se destaca que en general la dimensión económica despierta el mayor interés.

Para la implementación de ER se requerirá de un cambio socio tecnológico que difícilmente será inmediato, cuya metamorfosis demandará innovación en aspectos tanto económicos como sociales. Se necesita evaluar varios recursos renovables disponibles por caso. Asimismo, se deben identificar mecanismos de financiamiento, crear normativas adecuadas, impulsar el compromiso y aceptabilidad de la ciudadanía, a más de establecer una estructura municipal sólida que incluya la energía como uno de sus ejes de desarrollo.

Se podría fortalecer el planteamiento propuesto extendiendo la investigación bibliográfica de forma que se incluya un análisis más profundo, incluso comparativo, de casos exitosos, o a través de consulta a expertos, para identificar nuevos factores que incidan en la materia.

Referencias bibliográficas

- Aguilar-Virgen, Q., Taboada-González, P. & Ojeda-Benítez, S. (2014). Analysis of the feasibility of the recovery of landfill gas: A case study of Mexico. *Journal of Cleaner Production*, 79, 53-60. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.05.025>
- Al Garni, H., Kassem, A., Awasthi, A., Komljenovic, D. & Al-Haddad, K. (2016). A multicriteria decision making approach for evaluating renewable power generation sources in Saudi Arabia. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 16, 137-150. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2016.05.006>
- Arola, T., Eskola, L., Hellen, J. & Korkka-Niemi, K. (2014). Mapping the low enthalpy geothermal potential of shallow Quaternary aquifers in Finland. *Geothermal Energy*, 2(1), 9. <https://doi.org/10.1186/s40517-014-0009-x>
- Barragán, E. & Terrados, J. (2017). Sustainable cities: An analysis of the contribution made by renewable energy under the umbrella of urban metabolism. *International Journal of Sustainable Development and Planning*, 12(3), 416-424. <https://doi.org/10.2495/SDP-V12-N3-416-424>
- De Souza, S. N., Horttanainen, M., Antonelli, J., Klaus, O., Lindino, C. A. & Nogueira, C. E. (2014). Technical potential of electricity production from municipal solid waste disposed in the biggest cities in Brazil: landfill gas, biogas and thermal treatment. *Waste Management & Research: The Journal of the International Solid Wastes and Public Cleansing Association, ISWA*, 32(10), 1015-23. <https://doi.org/10.1177/0734242X14552553>
- Distributed Wind Energy Association (DWEA). (2015). *DWEA Distributed Wind Vision – 2015-2030*. Durango, CO: DWEA. En <http://distributedwind.org/wp-content/uploads/2012/08/DWEA-Distributed-Wind-Vision.pdf>
- Eleftheriadis, I. M. & Anagnostopoulou, E. G. (2015). Identifying barriers in the diffusion of renewable energy sources. *Energy Policy*, 80, 153-164. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2015.01.039>
- Fujiia, M., Tanabeb, S., Yamadad, M., Mishimae, T., Sawadateb, A. & Ohsawae, S. (2015). Assessment of the potential for developing mini/micro hydropower: A case study in Beppu City, Japan. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 11, 107-106. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2015.10.007>
- Greening, B. & Azapagic, A. (2014). Domestic solar thermal water heating: A sustainable option for the UK? *Renewable Energy*, 63, 23-36. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.07.048>
- Gsänger, S. & Pitteloud, J.-D. (2015). *2015 Small Wind World Report Summary*. Bonn, Germany. En http://small-wind.org/wp-content/uploads/2014/12/Summary_SWWR2015_online.pdf
- Hammons, T. J. (1993). Tidal Power. *Proceedings of the IEEE*, 81(3), 419-433. <https://doi.org/10.1109/5.241486>
- Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía [IDAE]. (2011). *Plan de Energías Renovables 2011 2020*. Madrid: IDAE. En <http://www.idae.es/index.php/id.670/mod.pags/mem.detalle>
- International Energy Agency (IEA). (2016). *Key World Energy Statistics 2016*. París: IEA. https://doi.org/10.1787/key_energ_stat-2016-en

- International Renewable Energy Agency (IRENA). (2016a). *Habitat III high-level forum on Renewable Energy in Urban Settings*. Quito, Ecuador, 18 October 2016. En http://habitat3.org/wp-content/uploads/RE-Energising-Cities_Outcomedoc_26Oct2016.pdf
- International Renewable Energy Agency (IRENA) (2016b). *Renewable Energy in Cities*. Abu Dhabi: IRENA. En http://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2016/IRENA_Renewable_Energy_in_Cities_2016.pdf
- Ishugah, T. F., Li, Y., Wang, R. Z. & Kiplagat, J. K. (2014). Advances in wind energy resource exploitation in urban environment: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 37, 613-626. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.053>
- Kabir, M. H., Endlicher, W. & Jagermeyr, J. (2010). Calculation of bright roof-tops for solar PV applications in Dhaka Megacity, Bangladesh. *Renewable Energy*, 35(8), 1760-1764. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.11.016>
- Kraxner, F., Aoki, K., Kindermann, G., Leduc, S., Albrecht, F., Liu, J. & Yamagata, Y. (2016). Bioenergy and the city – What can urban forests contribute? *Applied Energy*, 165, 990-1003. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.12.121>
- Kucukali, S. (2010). Municipal water supply dams as a source of small hydropower in Turkey. *Renewable Energy*, 35(9), 2001-2007. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.01.032>
- Martínez, J. A., Montoya, N. & Sierra, M. (2014). The energy of the future: Bioalcohols from urban solid residuals (USR). *Revista EAN*, (77), 64-81. Retrieved from http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-81602014000200003&lng=en&nrm=iso&tlng=es
- Moscovici, D., Dilworth, R., Mead, J. & Zhao, S. (2015). Can sustainability plans make sustainable cities? The ecological footprint implications of renewable energy within Philadelphia's *Greenworks* Plan. *Sustainability: Science, Practice and Policy*, 11(1), 32-43. <https://doi.org/10.1080/15487733.2015.11908137>
- Páez, A. (2010). Energy-urban transition: The Mexican case. *Energy Policy*, 38(11), 7226-7234. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.07.053>
- Raud, M., Kesperi, R., Oja, T., Olt, J. & Kikas, T. (2014). Utilization of urban waste in bioethanol production: potential and technical solutions. *Agronomy Research*, 12(2), 397-406. En http://agronomy.emu.ee/vol122/2014_2_11_b5.pdf
- Roberts, J. J., Cassula, A. M., Osvaldo Prado, P., Dias, R. A. & Balestieri, J. A. P. (2015). Assessment of dry residual biomass potential for use as alternative energy source in the party of General Pueyrredón, Argentina. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 568-583. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.08.066>
- Salomon, K. R. & Silva Lora, E. E. (2009). Estimate of the electric energy generating potential for different sources of biogas in Brazil. *Biomass and Bioenergy*, 33(9), 1101-1107. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2009.03.001>
- Saner, D., Juraske, R., Kübert, M., Blum, P., Hellweg, S. & Bayer, P. (2010). Is it only CO₂ that matters? A life cycle perspective on shallow geothermal systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(7), 1798-1813. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.04.002>
- Schiel, K., Baume, O., Caruso, G. & Leopold, U. (2016). GIS-based modelling of shallow geothermal energy potential for CO₂ emission mitigation in urban areas. *Renewable Energy*, 86, 10231036. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.09.017>

- Sveinbjörnsson, D., Ben Amer-Allam, S., Hansen, A. B., Algren, L. & Pedersen, A. S. (2017). Energy supply modelling of a low-co₂ emitting energy system: Case study of a Danish municipality. *Applied Energy*, 195, 922-941. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.03.086>
- Tan, S. T., Hashim, H., Lim, J. S., Ho, W. S., Lee, C. T. & Yan, J. (2014). Energy and emissions benefits of renewable energy derived from municipal solid waste: Analysis of a low carbon scenario in Malaysia. *Applied Energy*, 136, 797-804. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.06.003>
- World Energy Council. (2017). *Energy Trilemma Index*. En <https://trilemma.worldenergy.org/#/energy-index>
- Xu, J., Ni, T. & Zheng, B. (2015). Hydropower development trends from a technological paradigm perspective. *Energy Conversion and Management*, 90, 195-206. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.11.016>
- Zalamea, E. & García Alvarado, R. (2014). Roof characteristics for integrated solar collection in dwellings of Real-Estate developments in Concepción, Chile. *Journal of Construction*, 36(133), 36-44. <https://doi.org/10.4067/S0718-915X2014000300005>.
- Zhang, X., Shen, L. & Chan, S. Y. (2012). The diffusion of solar energy use in HK: What are the barriers? *Energy Policy*, 41, 241-249. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.10.043>
- Zhang, Y., Choudhary, R. & Soga, K. (2015). Influence of GSHF system design parameters on the geothermal application capacity and electricity consumption at city-scale for Westminster, London. *Energy and Buildings*, 106, 3-12. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.07.065>
- Zubizarreta, J., Rodrigues, M., Gómez, A., Zubizarreta, J., Rodrigues, M., Dopazo, C. & Fueyo, N. (2010). Potential and cost of electricity generation from human and animal waste in Spain. *Renewable Energy*, 35(2), 498-505. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.07.027>

| TRIBUNA