

Modelos energéticos de edificios urbanos: una revisión sistemática de literatura

Energy models of urban buildings: a systematic literature review

Modelos energéticos de edifícios urbanos: uma revisão sistemática de literatura

Washington Hipólito Tenorio Arizala

washington.tenorio.arizala@utelvt.edu.ec

Facultad de Ingenierías en la Universidad Técnica Luis Vargas Torres de Esmeraldas, Ecuador

<https://orcid.org/0000-0002-5574-0503>

RESUMEN

Los formuladores de políticas públicas y planificadores urbanos se enfrentan a problemas constantes al planificar e implementar escenarios sostenibles y energéticamente eficientes a gran escala para edificios. Los modelos energéticos de edificios urbanos pueden ayudar a mejorar el rendimiento energético de las ciudades. Con eso en mente, este trabajo muestra las tendencias actuales y características principales de la literatura de modelaje energético de edificios urbanos. Son encontradas evidencias de que se han ideado numerosos modelos de energía para múltiples aplicaciones y que el campo de investigación tiende al crecimiento y madures metodológica a partir de la implementación de los métodos ascendentes y descendentes basados en la física, datos y de orden reducido.

Palabras clave: modelos energéticos; edificios; urbanos.

ABSTRACT

Public policy makers and urban planners face constant problems when planning and implementing sustainable and energy efficient scenarios on a large scale for buildings. The energy models of urban buildings can help to improve the energy performance of a building. With this in mind, this work demonstrates the current trends and main characteristics of the literature on energy modeling of urban buildings. Evidences are found that numerous energy models have been devised for multiple applications and that the field of investigation tends to grow and methodological maturity from the implementation of ascending and descending methods based on physics, data and reduced order.

Keywords: energetic models; buildings; urban.

RESUMO

Os formuladores de políticas públicas e planejadores urbanos enfrentam problemas constantes ao planejar e implementar cenários de eficiência energética e sustentáveis em larga escala para edifícios. Os modelos energéticos de edifícios urbanos podem ajudar a melhorar o desempenho energético das cidades. Com isso em mente, este trabalho mostra as tendências atuais e as principais características da literatura de modelagem energética para edifícios urbanos. Encontram-se evidências de que inúmeros modelos de energia foram concebidos para múltiplas aplicações e que o campo de pesquisa tende ao crescimento e maturidade metodológica a partir da implementação de métodos bottom-up e top-down baseados em física, dados e ordem reduzida.

Palavras-chave: modelos energéticos; edifícios; urbano.

Introducción

Durante las últimas décadas, una gran variedad de investigaciones empleó modelos energéticos de edificios urbanos con el objetivo de alcanzar un mejor rendimiento en la construcción de edificaciones e instalaciones urbanas. Si, por un lado, los trabajos que emplean modelos energéticos de edificios urbanos ofrecen un marco sólido para la planificación energética, las modernizaciones y el desarrollo de las ciudades, por el otro, la mayoría de los artículos de revisión existentes no consiguen captar las tendencias generales de este campo al enfocarse en procesos específicos dentro del paradigma de investigación. Este trabajo intenta complementar y llenar los vacíos de revisión en la literatura de modelos energéticos de edificios urbanos al proporcionar una revisión de las tendencias de investigación, abordajes metodológicos y sus aplicaciones.

Como paso fundamental hacia este problema de investigación, este artículo pretende realizar análisis bibliométricos sobre artículos y sus referencias, autores y revistas destacadas.¹ Para lograr estos objetivos, este estudio adoptó el proceso denominado ProKnow-C (Proceso de Desarrollo del Conocimiento – Constructivista) (Ensslin et al., 2010), que parte del interés del investigador por un tema en particular, así como sus límites y restricciones intrínsecas al contexto académico.²

Así, este artículo se presenta en cuatro secciones, además de esta introducción. En la siguiente sección se presenta el marco metodológico de esta investigación. En la tercera sección se encuentra el proceso de investigación en base de datos y bibliometría, así como los resultados de la revisión de literatura. La cuarta sección presenta las conclusiones y consideraciones finales. Finalmente, el artículo finaliza con un apartado de referencias bibliográficas utilizadas a lo largo del texto.

Metodología

Esta sección pretende enmarcar metodológicamente el presente trabajo científico de revisión con el fin de permitir a los lectores contextualizar desde qué perspectiva se diseñó y llevó a cabo la investigación para alcanzar sus objetivos y resultados finales.

La revisión sistemática de la literatura fue realizada en la base de datos Web of Science (WoS), abarcando un periodo temporal de enero de 1998 a marzo de 2022. En la tabla 1, puede ser observado un cuadro detallado sobre el protocolo de revisión sistemática utilizado para la mapeamiento del campo temática abordado en este trabajo.

Tabla 1

Protocolo de revisión sistemática para la revisión de literatura del campo temática

¹ El concepto de análisis bibliométrico se basa en la divulgación cuantitativa de los parámetros de un conjunto definido de artículos (portafolio bibliográfico) para la gestión de la información y el conocimiento científico de un tema determinado. Los parámetros observables son: los artículos seleccionados, sus referencias, autores, número de citas y revistas más relevantes (ENSSLIN et al., 2010).

² La construcción de este conocimiento en el investigador está representada aquí por la selección de artículos relevantes que compondrán el portafolio bibliográfico relacionado con el tema de evaluación del desempeño en la gestión estratégica, así como el análisis bibliométrico de estos artículos.

<i>Etapa</i>	<i>Descripción de las etapas</i>
<i>P1</i>	Descomposición de la cuestión de investigación inicial en palabras llave
<i>P2</i>	Formulación, test y ajuste de los términos de búsqueda utilizando palabras llave
<i>P3</i>	Ejecución de la búsqueda en la base de datos seleccionada, con los ajustes específicos necesarios
<i>P4</i>	Criterio de inclusión 1: el ítem del resultado presenta al menos uno de los términos de búsqueda seleccionados (tabla A.1, anexos) en el título
<i>P5</i>	Criterios de exclusión 1: artículos no revisados por pares
<i>P6</i>	Criterios de exclusión 2: artículos no relacionados al modelaje energético de edificios urbanos a partir de la lectura de títulos y resúmenes
<i>P7</i>	Acceso y registro de las producciones que atiendan a los criterios anteriores
<i>P8</i>	Criterio de exclusión 3: artículos duplicados
<i>P9</i>	Criterio de exclusión 4: aplicación del método ProKnow-C.

Fuente: elaboración propia (2022)

El segundo paso de la revisión consiste en una discusión detallada de los proyectos y herramientas existentes que implementan métodos de modelado de energía urbana y además ilustra una metodología generalizada basada en la literatura actual para cada enfoque de modelado de energía urbana.

El tercer paso incluye una revisión sistemática basada en un análisis cuantitativo para identificar las tendencias en la implementación de enfoques de modelado. La revisión sistemática utiliza un enfoque de metaanálisis para determinar las estadísticas de los estudios realizados en el dominio del modelado de energía urbana.

Como el metaanálisis combina los resultados de múltiples estudios científicos, este enfoque es adecuado para comparar varios estudios del modelaje energético de edificios urbanos. Estas estadísticas se identifican a través del motor de búsqueda académico conocido como Web of Science, una base de datos muy reconocida para estudios y publicaciones académicas. Además, el motor de búsqueda realiza análisis de múltiples resultados utilizando años de publicación, autores y fuentes. Utilizamos la función de búsqueda avanzada del motor de búsqueda académico con la estructura de tópicos y palabras llave y combinaciones (tabla A.1, anexos).

Revisión de literatura

Para identificar los autores, artículos y revistas que se destacan en el contexto de la investigación en cuestión, se catalogaron 36.967 referencias citadas por los 762 artículos que componen el portafolio final. Estas referencias fueron analizadas desde las siguientes perspectivas:

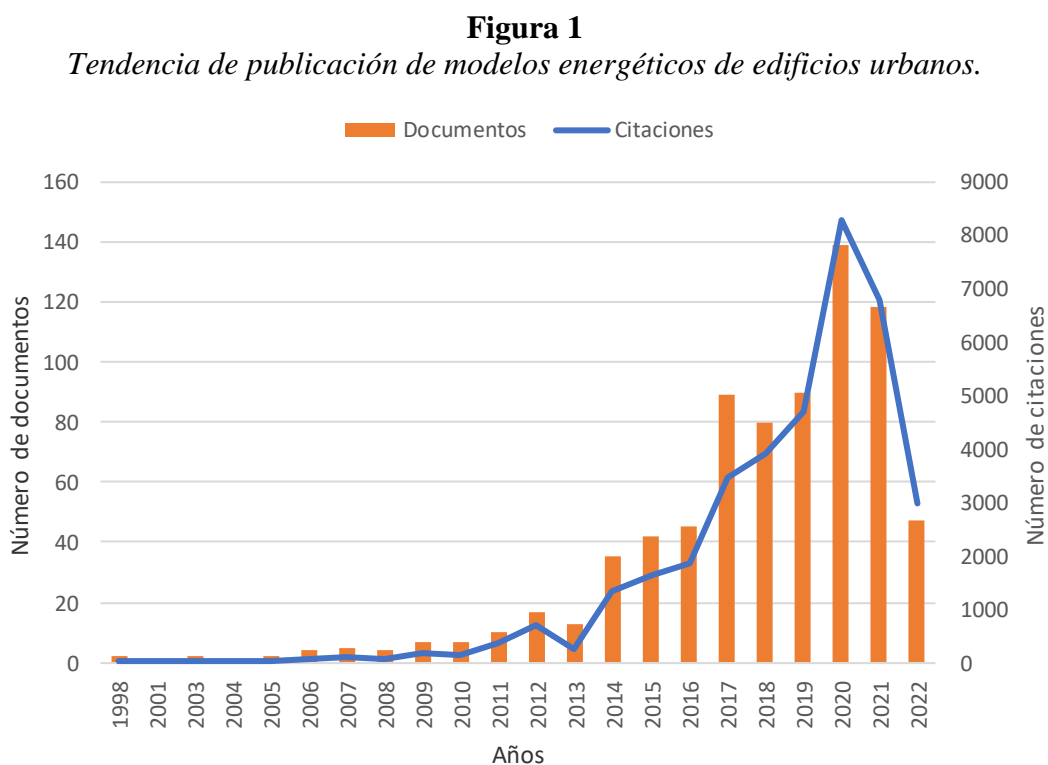
- i. Distribución por año de publicación, como se muestra en la Figura 1;

- ii. Red de tópicos y palabras llave que establecen los trabajos publicados, como se muestra en la Figura 2;
- iii. Principales publicaciones y citas por autor, como muestra la Tabla 2;
- iv. Revistas que publicaron los trabajos, como se muestra en la Figura 3;
- v. Distribución por país, como muestra la Figura 4;

En cuanto al análisis de autores y principales métodos de investigación en el modelaje energético de edificios urbanos, el proceso de análisis de las referencias bibliográficas del portafolio final destacó los aportes de Swan & Ugursal (2009), Mavromatidis et al. (2019) y Salim et al. (2020), específicamente para sus publicaciones.

Análisis bibliométrico

Con el objetivo de analizar la tendencia histórica de las publicaciones, la próxima figura muestra la cantidad de artículos publicados y el número total de citas desde 1998 hasta 2022.



Fuente: los autores a partir de datos obtenidos de la plataforma de búsqueda académica Web of Science.

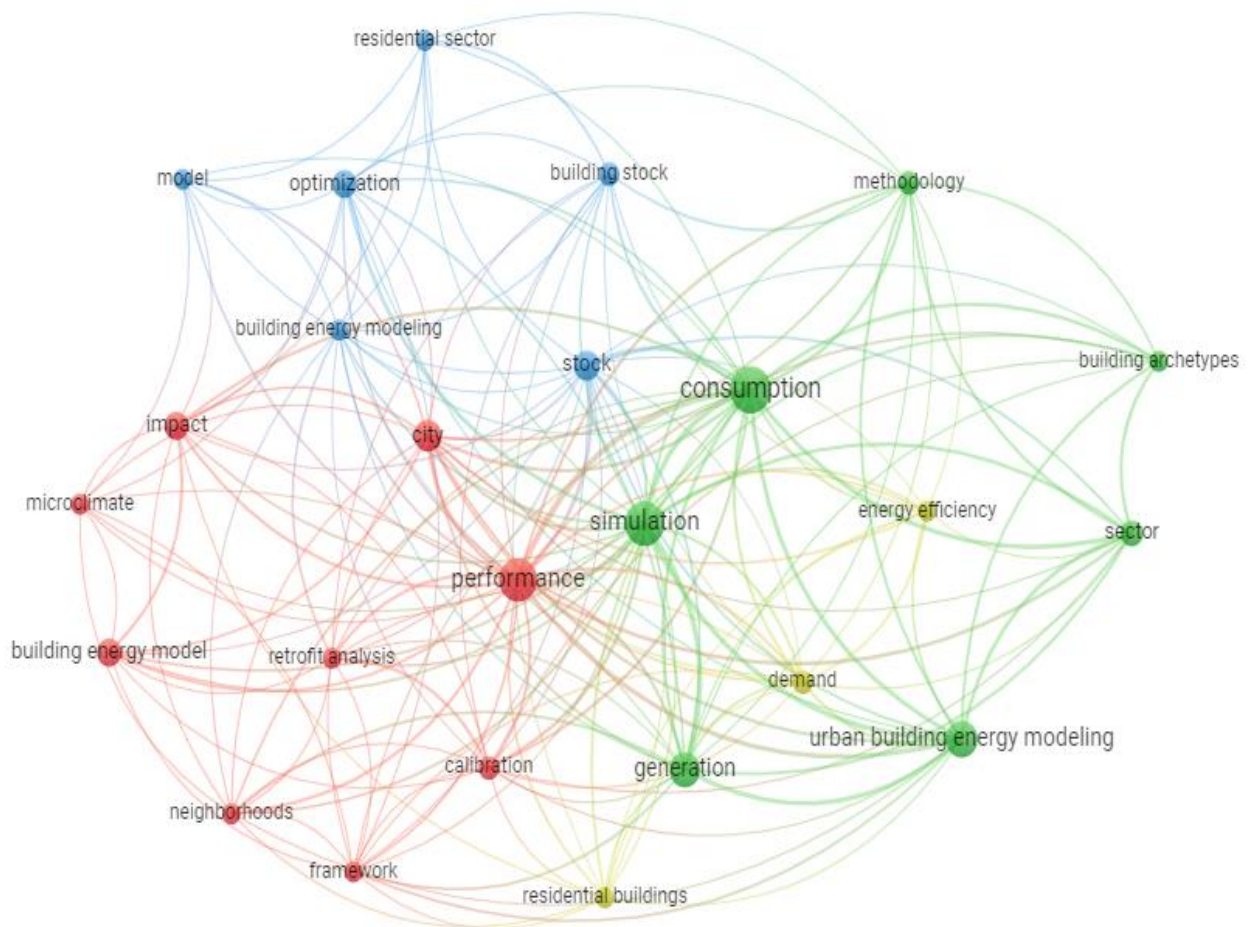
Como es posible observar, la cantidad de documentos publicados en el área modelos energéticos de edificios urbanos presentó un aumento considerable en los años 2014, 2017 y 2020. El número de citas, por su parte, presentó su número más elevado en durante 2020. Un resultado interesante es la caída en el número de publicaciones y citas en 2021.³

³ Los datos para 2022 deben ser desconsiderados, dado que este estudio trabajó con informaciones hasta marzo de ese año.

En la figura 2, podemos observar los principales tópicos y palabras llave en las publicaciones del área. Estas fueron clasificadas en cuatro grupos basados en temas de investigación estrechamente relacionados. Los principales tópicos detectados fueron “consumo”, “desempeño”, “simulación” y “optimización”, fuertemente relacionados con los métodos ascendentes de modelaje.

Figura 2

Red de palabras llave de publicaciones de modelos energéticos de edificios urbanos



Fuente: los autores a partir de datos obtenidos de la plataforma de búsqueda académica Web of Science, analizados utilizando la herramienta VOSViewer

En la tabla 2, fueron listados los 15 principales trabajos por número de citas. La lectura de estos trabajos permitió segmentar la literatura a partir de los principales métodos utilizados.

Tabla 2

Lista de artículos más relevantes por número de citas en el campo del modelaje energético de edificios urbanos

Autores	Título	Citaciones
Swan, L. G., & Ugursal, V. I.	Modeling of end-use energy consumption in the residential sector: A review of modeling techniques. Renewable and sustainable energy reviews	1056
Mavromatidis, G; et al	Ten questions concerning modeling of distributed multi-energy systems	334
Salim, FD; et al.	Modelling urban-scale occupant behaviour, mobility, and energy in buildings: A survey	259
Gholami, M; et al.	Upscaling of spatial energy planning, phases, methods, and techniques: A systematic review through meta-analysis	244
Allegrini, J; et al.	A review of modelling approaches and tools for the simulation of district-scale energy systems	192
Birge, D; Berger, AM	Transitioning to low-carbon suburbs in hot-arid regions: A case-study of Emirati villas in Abu Dhabi	175
Fan, C; et al.	Advanced data analytics for enhancing building performances: From data-driven to big data-driven approaches	173
Langevin, J; et al.	Developing a common approach for classifying building stock energy models	163
Malhotra, A; et al.	Open-Source Tool for Transforming CityGML Levels of Detail	162
Dabirian, S; et al.	Occupant-centric urban building energy modeling: Approaches, inputs, and data sources-A review	160
Ozarisoy, B; Altan, H	Bridging the energy performance gap of social housing stock in south-eastern Mediterranean Europe: Climate change and mitigation	160
Mei, SJ; Yuan, C	Urban buoyancy-driven air flow and modelling method: A critical review	159
Reynolds, J; Ahmad, MW; Rezgui, Y	Holistic modelling techniques for the operational optimisation of multi-vector energy systems	159

Fuente: los autores a partir de datos obtenidos de la plataforma de búsqueda académica Web of Science.

Fue posible identificar que los modelos de energía de los edificios urbanos se pueden clasificar en función de su método de simulación como enfoques de arriba hacia abajo y de abajo hacia arriba, como se indica a continuación (Swan & Ugursal, 2009; Langevin, et al. 2020; Fan, et

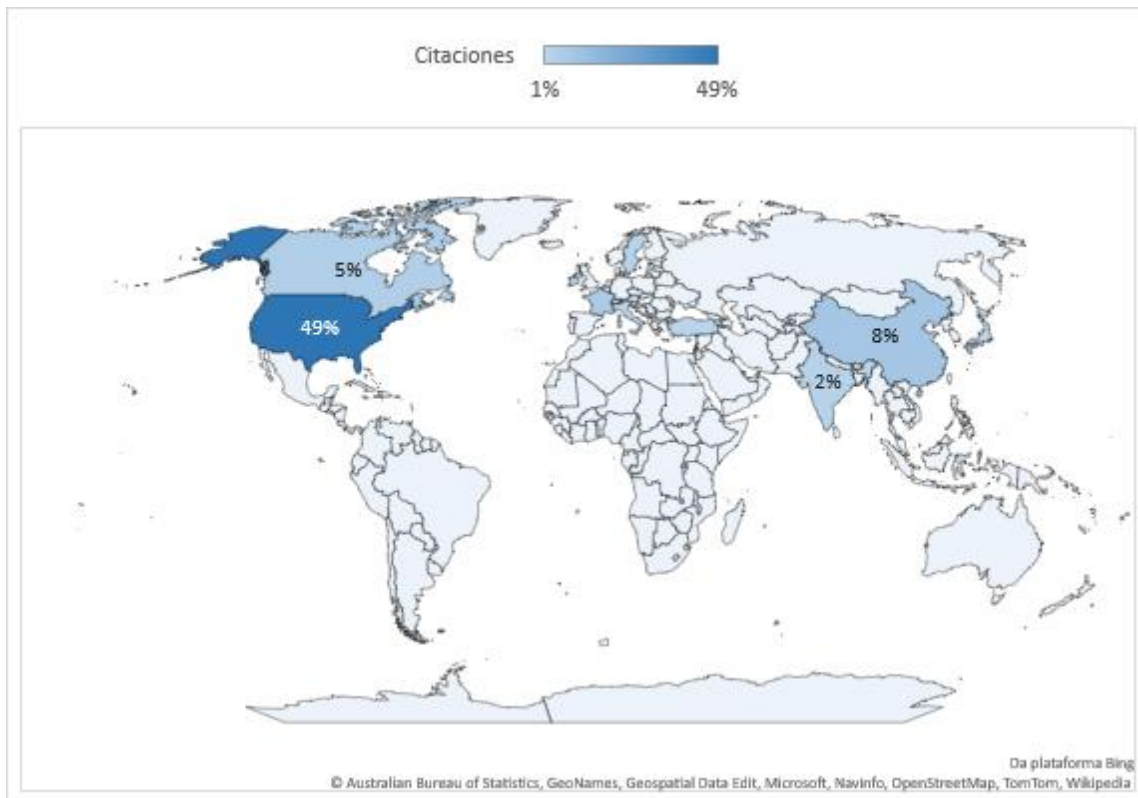
al. 2021):

- 1- Enfoque de modelos de abajo hacia arriba (ascendentes)
 - a. Basado en la física
 - b. Basado en datos
 - c. De orden reducido
- 2- Enfoque de modelos de arriba hacia abajo (descendentes)

Con relación a la distribución geográfica de las citas, la figura 3 muestra los países en los que se concentra la investigación en el área en cuestión. De esa forma, podemos observar que los países con mayor concentración de citas son Estados Unidos, China, Francia, Irlanda y Canadá.

Figura 3

Citaciones sobre modelos energéticos de edificios urbanos por país (% del total)

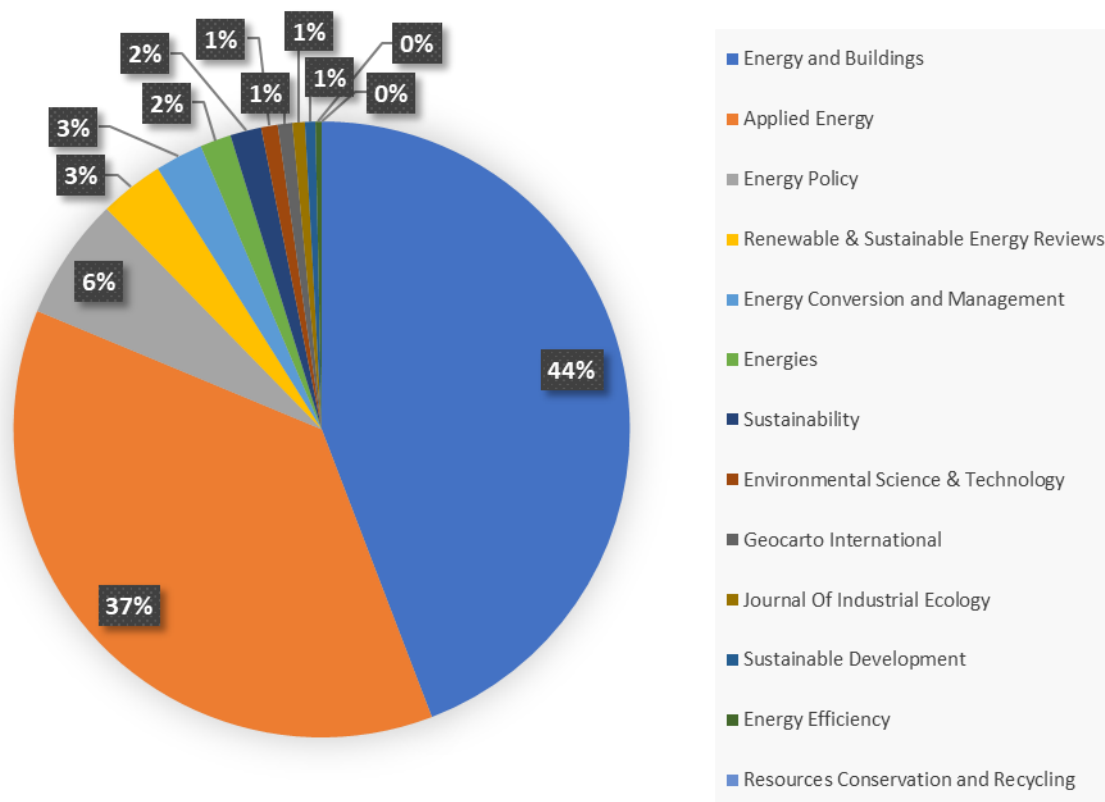


Fuente: los autores a partir de datos obtenidos de la plataforma de búsqueda académica Web of Science.

La figura 4, por su parte, permite observar cuáles son las revistas científicas que concentran el mayor número de citas relacionadas al modelaje energético de edificios urbanos. En este sentido, “Energy and Buildings”, “Applied Energy” y “Energy Policy” son los periódicos más relevantes, ocupando casi el 90% de todas las citas en el área.

Figura 4

Principales revistas en citaciones sobre modelajes energético de edificios urbanos (% de citaciones total)



Fuente: los autores a partir de datos obtenidos de la plataforma de búsqueda académica Web of Science.

Revisión de los métodos utilizados en la literatura

A través de la revisión del portafolio de artículos final, observamos que los enfoques de los modelos energéticos de abajo hacia arriba se centran en edificios individuales y usos finales y estiman el consumo de energía de edificios individuales o grupos de edificios (Li, W, et al. 2017). Los modelos ascendentes que funcionan a un nivel desagregado pueden clasificarse además como métodos basados en la física, basados en datos y de orden reducido (Hong, et al. 2020; Dabirian, Panchabikesan, & Eicker, 2022).

El método basado en la física, también conocido como método de ingeniería o de simulación, utiliza técnicas de simulación, características del edificio, datos de construcción, climáticos y del sistema para calcular el consumo final de energía. Los modelos basados en la física de la construcción de abajo hacia arriba brindan información útil a los legisladores para mejorar la eficiencia de la construcción del usuario final (Kavgic, et al. 2010; Reinhart & Davila, 2016).

El método ascendente basado en datos se utiliza en los modelos de energía urbana para predecir y estimar el consumo de energía de los edificios (Tardioli, et al. 2015; Bourdeau, et al.

2019). Estos métodos se basan en los datos disponibles existentes, como datos de encuestas y variables socioeconómicas. En general, el modelaje basado en datos comprende enfoques estadísticos y de inteligencia artificial (Abbasabadi & Ashayeri, 2019).⁴

Los modelos de orden reducido requieren menos insumos que los enfoques basados en la física y en datos (Hong, T. et al. 2020). Uno de los procesos específicos de este enfoque es la determinación de los valores de los parámetros del modelo, que podrían estimarse utilizando varios estándares de cálculo desarrollados por la Organización Internacional de Normalización (ISO, por sus siglas en inglés).

Por otro lado, los modelos de arriba hacia abajo consideran todo el sector de la construcción como una sola entidad energética para estimar el consumo de energía a escala (Swan & Ugursal, 2009). El enfoque de modelado de arriba hacia abajo proporciona una visión general integrada del flujo de trabajo de la energía urbana que incluye efectos sociodemográficos y económicos de mercado a largo plazo (Li, W, et al. 2017). Dado que los modelos de arriba hacia abajo se basan únicamente en los datos históricos agregados de energía disponibles, estos modelos pueden ayudar a predecir el comportamiento del consumo de energía a largo plazo en ausencia de cualquier discontinuidad (Swan & Ugursal, 2009).

Consideraciones finales

El campo del modelaje energético de edificios urbanos ha experimentado un enorme crecimiento en las últimas décadas y ofrece numerosas oportunidades innovadoras, especialmente en los países emergentes, donde todavía la investigación en este campo no es abundante. Las revisiones de estudios de vanguardia indican que estos modelos brindan oportunidades significativas para capturar o estudiar variaciones complejas del sistema urbano para mejorar la precisión del sistema.

Los enfoques de arriba hacia abajo se utilizan ampliamente a escala nacional para las proyecciones a largo plazo de la demanda de energía. Por otro lado, las técnicas de abajo hacia arriba se enfocan en una demanda de energía de construcción detallada y granular. Además, una cantidad significativa de investigación en este dominio implementa el modelado basado en la física de abajo hacia arriba. Los enfoques avanzados basados en datos que utilizan algoritmos de inteligencia artificial pueden considerarse técnicas prometedoras para modelar edificios urbanos nuevos o existentes.

Los enfoques del modelaje energético de edificios basados en datos de abajo hacia arriba han atraído una atención significativa de la investigación para aplicaciones futuras. Existen diferentes herramientas y metodologías en la literatura, que se formula para diferentes propósitos, alcances y escenarios utilizando conjuntos de datos y características específicas de cada caso. La investigación futura debería centrarse en desarrollar una solución generalizada en estos campos que funcione con diferentes datos y escenarios.

⁴ En el modelaje energético de edificios urbanos, el enfoque estadístico tiende a involucrar métodos de regresión para determinar los modelos matemáticos inversos correspondientes al diseño del edificio.

Los planificadores urbanos y los encargados de formular políticas a escala urbana se enfrentan a problemas importantes al planificar e implementar escenarios sostenibles y energéticamente eficientes a gran escala. Los modelos energéticos de edificios pueden ayudar a optimizar y analizar varios escenarios de diseño para mejorar el rendimiento energético de un edificio.

Este trabajo mostró evidencias de que se han ideado numerosos modelos de energía para múltiples aplicaciones impulsadas por la energía, y que el campo de investigación tiende al crecimiento y madures metodológica.

Referencias

- Abbasabadi, N., & Ashayeri, M. (2019). Urban energy use modeling methods and tools: A review and an outlook. *Building and Environment*, 161, 106270.
- Bourdeau, M., qiang Zhai, X., Nefzaoui, E., Guo, X., & Chatellier, P. (2019). Modeling and forecasting building energy consumption: A review of data-driven techniques. *Sustainable Cities and Society*, 48, 101533.
- Dabirian, S., Panchabikesan, K., & Eicker, U. (2021). Occupant-centric Modeling for Urban Building Energy Simulation: Approaches, Inputs, and Data Sources-A Review. *Energy and Buildings*, 111809.
- Ensslin, L. et al. (2010) ProKnow-C, knowledge development process - constructivist. Processo técnico com patente de registro pendente junto ao INPI.
- Fan, C., Yan, D., Xiao, F., Li, A., An, J. y Kang, X. (2021). Análisis avanzado de datos para mejorar el rendimiento de los edificios: desde enfoques basados en datos hasta enfoques basados en big data. En *Building Simulation* (Vol. 14, No. 1, pp. 3-24). Prensa de la Universidad de Tsinghua.
- Hong, T., Chen, Y., Luo, X., Luo, N., & Lee, S. H. (2020). Ten questions on urban building energy modeling. *Building and Environment*, 168, 106508.
- Kavgic, M., Mavrogianni, A., Mumovic, D., Summerfield, A., Stevanovic, Z., & Djurovic-Petrovic, M. (2010). A review of bottom-up building stock models for energy consumption in the residential sector. *Building and environment*, 45(7), 1683-1697.
- Langevin, J., Reyna, J. L., Ebrahimigharehbaghi, S., Sandberg, N., Fennell, P., Nägeli, C., ... & Camarasa, C. (2020). Developing a common approach for classifying building stock energy models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 133, 110276.
- Li, W., Zhou, Y., Cetin, K., Eom, J., Wang, Y., Chen, G., & Zhang, X. (2017). Modeling urban

building energy use: A review of modeling approaches and procedures. *Energy*, 141, 2445-2457.

Mavromatidis, G., Orehounig, K., Bollinger, L. A., Hohmann, M., Marquant, J. F., Miglani, S. & Carmeliet, J. (2019). Ten questions concerning modeling of distributed multi-energy systems. *Building and Environment*, 165, 106372.

Reinhart, C. F., & Davila, C. C. (2016). Urban building energy modeling—A review of a nascent field. *Building and Environment*, 97, 196-202.

Salim, F. D., Dong, B., Ouf, M., Wang, Q., Pigliautile, I., Kang, X., ... & Yan, D. (2020). Modelling urban-scale occupant behaviour, mobility, and energy in buildings: A survey. *Building and Environment*, 183, 106964.

Swan, L. G., & Ugursal, V. I. (2009). Modeling of end-use energy consumption in the residential sector: A review of modeling techniques. *Renewable and sustainable energy reviews*, 13(8), 1819-1835.

Tardioli, G., Kerrigan, R., Oates, M., James, O. D., & Finn, D. (2015). Data driven approaches for prediction of building energy consumption at urban level. *Energy Procedia*, 78, 3378-3383.

Anexos

Tabla A.1

Descripción de los criterios de búsqueda, filtros utilizados y número de artículos encontrados

Búsqueda	Filtros	n. artículos
("urban" OR "city" OR "cities" OR "region") AND ("building" OR "house" OR "non-residential" OR "residential" OR "office" OR "commercial") AND ("energy model*")	-	1023
("urban" OR "city" OR "cities" OR "region") AND ("building" OR "house" OR "non-residential" OR "residential" OR "office" OR "commercial") AND ("energy model*")	Paper Type: Article or Review	893
("urban" OR "city" OR "cities" OR "region") AND ("building" OR "house" OR "non-residential" OR "residential" OR "office" OR "commercial") AND ("energy model*")	Método ProKnow-C	762