

Influencia de la geometría urbana en la demanda energética anual para enfriamiento. Estudio de caso Camagüey

Influence of urban geometry on annual energy demand for cooling. Camagüey case study

MSc. Guillermo DE LA PAZ PÉREZ*

Arq. Elier SANDIUMENGE RAMÍREZ**

*Universidad de Camagüey
e-mail: guillermo.paz@reduc.edu.cu

** Empresa de Proyectos de Ingeniería y Arquitectura No. 11 (EPIA 11), Camagüey
e-mail: sandiumenge93@nauta.cu

Recibido: 12 octubre 2019

Aprobado: 3 noviembre 2019

RESUMEN

Para evaluar la influencia de la geometría urbana en la demanda energética por climatización (enfriamiento) de los edificios se elaboró una aplicación de cálculo en Excel que permite pronosticar la demanda energética de edificios a partir de su “Factor de Forma”, coeficiente definido por parámetros geométricos (volumen y superficie expuesta). Para esto se elaboraron —con diferentes grados de exposición— modelos genéricos de edificios de tres morfologías urbanas (compacta, semicompacta y abierta) representativas de períodos históricos de desarrollo de la ciudad de Camagüey. Con la ayuda de simulaciones energéticas mediante el programa EnergyPlus vr.8.8 se calculó el pronóstico de sus demandas. Con los valores de los resultados y mediante regresión multivariable, en el software Statgraphics Centurion xv, se obtuvo una ecuación que fue utilizada para elaborar la mencionada aplicación Excel. Esta herramienta constituye una ayuda al proyectista para pronosticar el desempeño energético de su proyecto con vistas a lograr mejores soluciones energéticas desde las primeras etapas de concepción del edificio. Finalmente, para mostrar su aplicación, se realizó una mapeo morfo-energético de las tres muestras urbanas de Camagüey en 3D, con el propósito de caracterizar la influencia de la geometría urbana en la demanda de energía por climatización.

Palabras clave: factor de forma, morfología urbana, energía en edificios

ABSTRACT

In order to analyse the influence of the urban geometry in the energy demand for air conditioning (cooling) of the buildings became elaborate an Excel application that enables forecasting the energy demand of buildings from your Shape Factor, coefficient defined by geometric parameters (volume and exposed surface). For this, it was elaborated with different degrees of exposition, generic models of buildings of three urban morphologies (compact, semi-compact and open) representative of development periods historic of Camagüey city. With the help of energetic simulations using EnergyPlus vr.8.8 software the forecast of your demand was calculated. With the values of the results and by means of multivariable regression, in the software Statgraphics Centurion xv, obtained him an equation that was utilised to elaborate the Excel

application. This tool constitutes an aid to the designer to forecast the energetic performance of her project with the aim to better energetic solutions from the first stages of conception of the building. At last, in order to show your application, it was executed a mapification morfo-energetic of the three urban samples of Camaguey in 3D, in order to characterise the influence of the urban geometry in the energy demand for air conditioning.

Keywords: shape factor, urban morphology, energy in buildings

INTRODUCCIÓN

El consumo de energía en los edificios es una preocupación importante en todo el mundo, tal es así que la Agencia Internacional de la Energía (IEA) identifica la eficiencia energética en edificios como una de las cinco medidas para asegurar a largo plazo la de-carbonización del sector de la energía (Deb y Lee, 2017).

Los principales factores que influyen en los niveles de consumo de energía de los edificios incluyen al clima, el contexto urbano (principalmente su morfología), el diseño del edificio, la eficiencia de los sistemas y el comportamiento de los ocupantes (Baker y Steemers, 2005). Así, la geometría urbana constituye uno de los elementos que influye en la demanda de energía por climatización¹ en las ciudades, es por eso que es necesario tener en cuenta el impacto de la morfología de los edificios, y la trama urbana donde se insertan, en su desempeño energético.

Durante el proyecto de un edificio, arquitectos e ingenieros deben considerar diversos requerimientos sociales, económicos, ambientales, técnicos y estéticos, pero la preocupación por el ahorro de energía y la reducción de la contaminación, generada por su producción, está impactando cada vez más el quehacer arquitectónico. Ya en la primera etapa de la concepción del edificio, los arquitectos necesitan información sobre el posible comportamiento energético de su obra, para lo cual debieran contar con herramientas simples y ágiles que le permitan dirigir su trabajo hacia soluciones de desempeño energético más eficientes.

Se sabe que la forma de los edificios, así como sus proporciones influyen en la demanda energética por las características que presenta el mismo, las cuales son: largo, ancho y altura. Por ejemplo, Yüksek y Tikansak (2017) afirman que existe una relación directa entre la forma geométrica del edificio y su desempeño energético. Existen otras variables a tener en cuenta a la hora de analizar un edificio, como son los materiales con los que está construido, los tipos, áreas, ubicación y materiales de la fenestración.

Aunque se conocen estos factores, la ciudad de Camagüey no posee un estudio que caracterice el comportamiento energético atendiendo a las diferentes tipologías urbanas. Teniendo en cuenta esta realidad, se hace necesario dotar a diseñadores, arquitectos e ingenieros, de herramientas simples que les permitan realizar mejores soluciones energéticas desde las etapas iniciales de concepción del edificio.

¹ Para calentamiento y enfriamiento. Esta última, la principal en las condiciones climáticas de Cuba.

Por tal motivo, el presente trabajo propone una herramienta informática “amigable” para pronosticar el grado de influencia de la geometría urbana en la demanda de energía por climatización (para enfriamiento), con el propósito de que se tenga en cuenta la variable energética desde las primeras etapas del proyecto urbano-arquitectónico. Inicios en que se trabaja con la volumetría y el sitio de inserción dentro de la trama de la ciudad, ya sea una nueva planta o una intervención en edificio existente.

Con la aplicación Excel que se propone, se realiza una mapificación morfoenergética, en 3D, de tres principales tipos de tramas de la ciudad de Camagüey, y se presenta una comparación de la demanda energética (pronóstico) por climatización, para enfriamiento, de esos tipos de contextos que se corresponden con tres etapas del desarrollo urbano de la ciudad.

MATERIALES Y MÉTODOS

Los principales materiales utilizados fueron: laptop Asus, procesador Intel® Core™ i7-4700HQ CPU @2,40GHz; 12GB de RAM; Sistema Operativo Windows 10 Home 2017 de 64 bits y los software SketchUp 2017, MS Excel 2013, Statgraphics Centurion xv, EnergyPlus² (E+) 8.8, ArchiCAD 20. Laser meter modelo Bosch, con alcance de 16m. Fotos satelitales de Google Earth y mapas con los lotes de diferentes zonas de la ciudad.

Los métodos fundamentales que se utilizaron fueron: la observación – abstracción – diseño y la simulación automatizada y la metodología general que se siguió fue la siguiente:

1. Seleccionar una muestra de diferentes modelos urbanos (compacto, semicompacto y abierto) en la ciudad de Camagüey teniendo en cuenta las principales etapas históricas de su evolución socio-económica (colonia, neocolonia y revolución). Utilizar fotos satelitales y planos de lotificación de la ciudad.
2. Realizar un levantamiento volumétrico de los edificios que conforman varias manzanas de cada modelo, utilizando un Laser meter.
3. Modelar en tres dimensiones las geometrías urbanas seleccionadas para su estudio volumétrico teniendo en cuenta la forma de la envolvente de los edificios, utilizando los software *ArchiCAD* y *SketchUp*.
4. Calcular los parámetros (1) área expuesta, (2) volumen y (3) coeficiente o factor de forma de cada edificio de las tres muestras.
5. Elaborar un modelo volumétrico genérico que sintetice las características geométricas más generales y comunes³ de los edificios de cada muestra urbana.
6. Calcular la demanda de energía pronóstico por climatización (enfriamiento) mediante la simulación de variaciones de superficies expuestas de cada modelo genérico (24 espacios genéricos). Utilizando el software *EnergyPlus*.
7. Obtener una ecuación, a partir de los resultados de las simulaciones, que permita pronosticar aproximadamente la demanda energética de cualquier edificio de los

² Desarrollado por el Departamento de Energía de los Estados Unidos (DOE).

³ Los modelos se basaron en el programa arquitectónico más extenso en la ciudad (la vivienda).

tres modelos urbanos. Utilizando el software Statgraphics Centurion, mediante regresión multivariable con los factores “área expuesta”, “volumen” y “factor de forma”, así como la variable respuesta “demanda energética”.

8. Realizar una aplicación Excel para que los proyectistas puedan pronosticar el comportamiento energético del edificio desde las primeras etapas de concepción volumétrica del mismo, según la trama urbana donde se planea insertar. Utilizar la ecuación obtenida en el paso 7.
9. Realizar una base de datos en Excel que contenga los campos: área expuesta, volumen, factor de forma y demanda energética pronóstico con los registros de cada edificio (total 401) de las tres muestras.
10. Realizar mapeo morfo-energético, con escala de color, de las muestras urbanas de Camagüey, para caracterizar la influencia de la geometría urbana en la demanda de energía por climatización. Definir 5 rangos y el color correspondiente.

El factor de forma en la demanda energética de los edificios

La forma de un edificio representa un factor determinante en cuanto a su aprovechamiento climático y relación con el entorno, definiendo dos de sus principales características: la superficie de la envolvente y el volumen. La primera representa el límite físico de intercambio de calor entre el interior y el exterior, mientras que el volumen del edificio puede indicar su capacidad para almacenar energía (huellasdearquitectura.wordpress.com, 2013).

El factor de forma de un edificio se define como la proporción entre el área de su envolvente y su volumen y es una medida de la compactidad del edificio. Los edificios con un factor de forma más alto son menos compactos y por consiguiente tienen una área de la superficie más grande en proporción a su volumen (Danielski, 2012).

Tianzhen (2009, citado por Danielski, 2012) refiere que como una medida para limitar el uso final de energía, China ha integrado el factor de forma de los edificios en sus normas de diseño para la eficiencia energética de edificios públicos.

Para el presente trabajo se asume el concepto dado por (Depecker, Menezo, Virgone y Lepers, 2001), el cual plantea que para calificar la forma, un “coeficiente de forma” C_f se define como:

$C_f = S_e/V$ (m^2/m^3), donde: **S_e** = superficie envolvente o superficie externa del edificio y **V** = volumen interno de la edificación.

La selección de este parámetro responde a que su definición geométrica y matemática es simple, no solo para su uso en Excel sino también para la labor del proyectista. Por lo tanto, para pronosticar la demanda energética, a partir de la morfología urbana y el grado de exposición de la envolvente de los edificios, el modelo matemático se concibió con el Factor de Forma como variable. Con este propósito se definieron varios modelos

genéricos que caracterizaran, de forma general, los patrones más comunes de las geometrías de las tramas urbanas a evaluar (Tabla 1).

Tabla 1: Variables que caracterizan la geometría de las tramas urbanas seleccionadas.

Variables	Modelo en trama lotificada (Compacta).	Modelo en trama lotificada (Semicompacta).	Modelo en trama sin lotificar (Abierta).
Ancho (m)	12	8	7
Largo (m)	10	10	10
Alto (m)	6	4	2,6
Volumen (m ³)	720	320	182
Cubierta (m ²)	120	80	70
Fachada (m ²)	60	40	26

Para cada modelo de trama se realizaron ocho variantes de exposición de superficie, desde la más desfavorable (todas las paredes y cubierta expuestas) (Fig. 1 caso A) hasta la de mínima exposición (solo fachada y pared posterior expuestas) (Fig. 1 caso H).

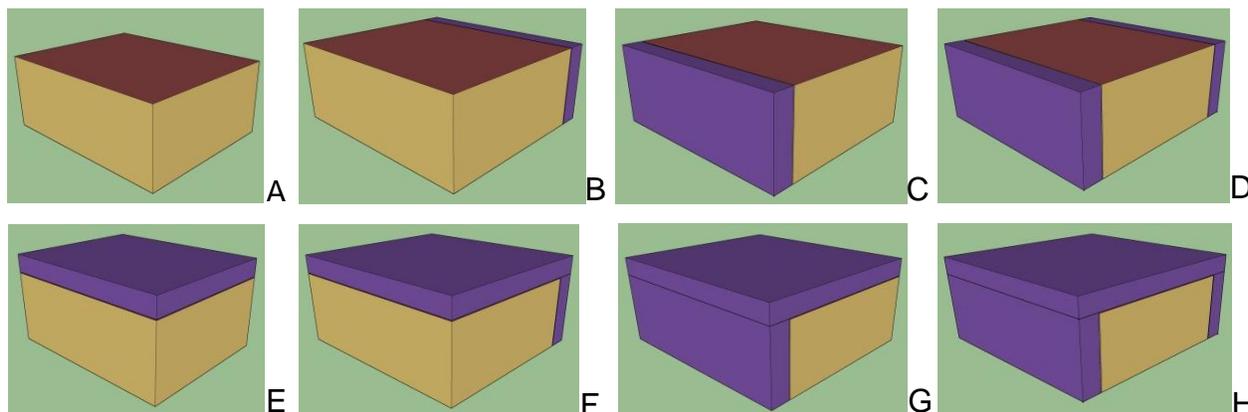


Fig. 1 Modelos genéricos definidos con ocho condiciones de exposición de superficies. Ejemplo para trama urbana compacta

Fuente: Elaborado por los autores

Para las simulaciones también se consideraron otras condicionantes, tales como: fachadas principales orientadas al norte; materiales⁴ de los elementos de la envolvente (piso, paredes y techo) con baldosas de gres cerámico de 10mm, ladrillo repellado de 0,15m y hormigón armado de 0,10m respectivamente. Para cada mes del año los horarios y períodos de tiempo utilizados fueron de lunes a viernes (8:00am-5:00pm) y sábado (8:00am - 1:00pm) y la ocupación del espacio fue *servicio de 8h media*.

⁴ De todos los materiales se especificaron varias propiedades físico-térmicas (densidad; conductividad; calor específico; absorbanza térmica, solar y visible).

También se elaboró un fichero climático con los datos de las variables que caracterizan las condiciones de Camagüey de los 12 meses del año, tomados del comportamiento de más de 20 años.

Para cada uno de los ocho modelos genéricos, de los tres tipos de contexto, se calculó Área expuesta (m^2) y Factor de forma FF (m^2/m^3), y mediante simulaciones con el software E+ se obtuvo su demanda energética (kWh/año) (Fig. 2).

	A	B	C	D	E
1					
2	MODELO Lotificado	ancho	8	m	
3	SemiCompacto	largo	10	m	
4		alto	4	m	
5	Área Exp.= área expuesta	VOL	320	m^3	
6	FF = factor de forma	Cubierta	80	m^2	
7	D. Energ.= demanda energética por climatización	Fachada	40	m^2	
8					
9			Área Exp.	FF	D. Energ
10			(m^2)	m^2/m^3	kWh/año
11			240	0,75	26186,93
12			200	0,63	24374,03
13			200	0,63	24100,98

Fig. 2 Ejemplo de los resultado de las simulaciones de una muestra de los modelos genéricos del contexto compacto
Fuente: Elaborado por los autores

A partir de los valores obtenidos se elaboró, con el software Statgraphics (utilizando regresión multivariable), una ecuación para obtener demanda energética en función de tres variables (área de superficie expuesta, factor de forma y volumen del espacio). Con

la mencionada ecuación se programó una pequeña aplicación Excel (Fig. 3) para pronosticar las demandas de energía de edificios en las diferentes morfologías más representativas de la ciudad de Camagüey. El proyectista solo tiene que introducir dos datos (*ae* y *vol*) y automáticamente la aplicación calcula el (*ff*) y la demanda energética (DEC).

Utilizando los datos (volumen, superficie expuesta y factor de forma) de cada edificio de las tres muestras urbanas, se calcularon con la aplicación Excel propuesta sus respectivas demandas energéticas. Los resultados del pronóstico obtenido, se ordenaron en hojas de cálculo (Fig. 4).

APLICACIÓN GENERAL para pronosticar la demanda energética por climatización en los tres modelos urbanos			
área expuesta	ae	148	m ²
volumen	vol	182	m ³
factor de forma	ff	0.81	m ² /m ³
Demand.Energ Climatiz	DEC	17371	kWh/a
Nota: Introducir los tres datos en las celdas azules			
Fórmula creada por regresión múltiple			
DEC = -2151,68 + 101,091*ae + 2581,14*ff + 13,5763*vol			

Fig. 3 Aplicación Excel para pronosticar la demanda energética por climatización a partir del área de la envolvente expuesta (*ae*) y el volumen del edificio (*vol*)

Fuente: Elaborado por los autores

Edif	Volumen (m3)	Sup. Expuesta (m2)	FF	DemandEnerg (kWh/a)	Dem.Energ.Final
C1	3685.43	995.07	0.27	149171.96	149171.96
C2	8043.95	1287.03	0.16	237575.73	118787.87
C3	5359.13	1018.23	0.19	174030.26	87015.13
C4	3131.96	720.35	0.23	113783.39	56891.70
C5	3155.78	946.73	0.30	137172.76	68586.38
C6	187.87	56.36	0.30	6870.83	6870.83
C7	69.00	29.67	0.43	2894.34	2894.34
C8	99.28	42.69	0.43	4621.68	4621.68
C9	1182.18	401.94	0.34	55408.18	55408.18
C10	1745.43	558.54	0.32	78833.89	78833.89
C11	9348.84	1589.30	0.17	285873.98	142936.99
C12	5553.93	1277.40	0.23	202977.84	101488.92
C13	2253.96	653.65	0.29	95275.26	95275.26
C14	601.57	156.41	0.26	22497.97	22497.97
C15	676.64	148.85	0.22	22648.95	22648.95

Fig. 4 Base de datos, a partir de los resultados medidos, calculados y simulados de todos los edificios. Fragmento del contexto compacto

Fuente: Elaborado por los autores

Con la base de datos resultante se realiza una mapeación morfoenergética, a partir de los factores de forma de los edificios en cada trama, para lo cual fue necesario establecer rangos de valores de demanda energética. Para determinar los intervalos se

dividió el rango de la serie de valores por el número de intervalos que se desea establecer. Se optó por establecer cinco rangos. Para ello se ordenaron de menor a mayor los valores obtenidos para distinguir sus extremos. Como resultado se obtuvo el rango (R) que no es otra cosa que la diferencia entre su mayor valor y su menor valor.

$$R = 499315 - 1873 = 497442$$

Con el rango, se determinó la amplitud (a) que tendría cada uno de los cinco intervalos a crear, y para ello se dividió R entre la cantidad de intervalos:

$$a = 497442/5 = 99489$$

Aunque el resultado de “a” es decimal, su valor se redondea dejándolo en una amplitud de 99489). Así, los rangos (en kWh/a) con sus intervalos quedaron de la siguiente manera: I. (1873 – 101362); II. (101362 – 200851); III. (200851 – 300340); IV. (300340 – 399829) y V. (399829 – 499318).

Wei et al. (2017) realizan una revisión sobre las metodologías de manejo de datos para predicción y clasificación del consumo de energía en edificios, donde hacen referencia a 115 trabajos que estudian la complejidad relacionada con el consumo de energía en edificios y se esfuerzan por realizar una precisa descripción de su comportamiento energético. Tal es el caso del trabajo de Fonseca y Schlueter (2015), en el cual la salida de resultados se sintetiza mediante un mapa energético espacio-temporal de demanda de calefacción espacial, a escala de distrito de ciudad en Suiza. Esta forma de representación cromática en 3D es tomada como referente en el presente trabajo para ilustrar el comportamiento de la demanda energética de las tres muestras de contextos urbanos de la ciudad de Camagüey (Fig. 5).

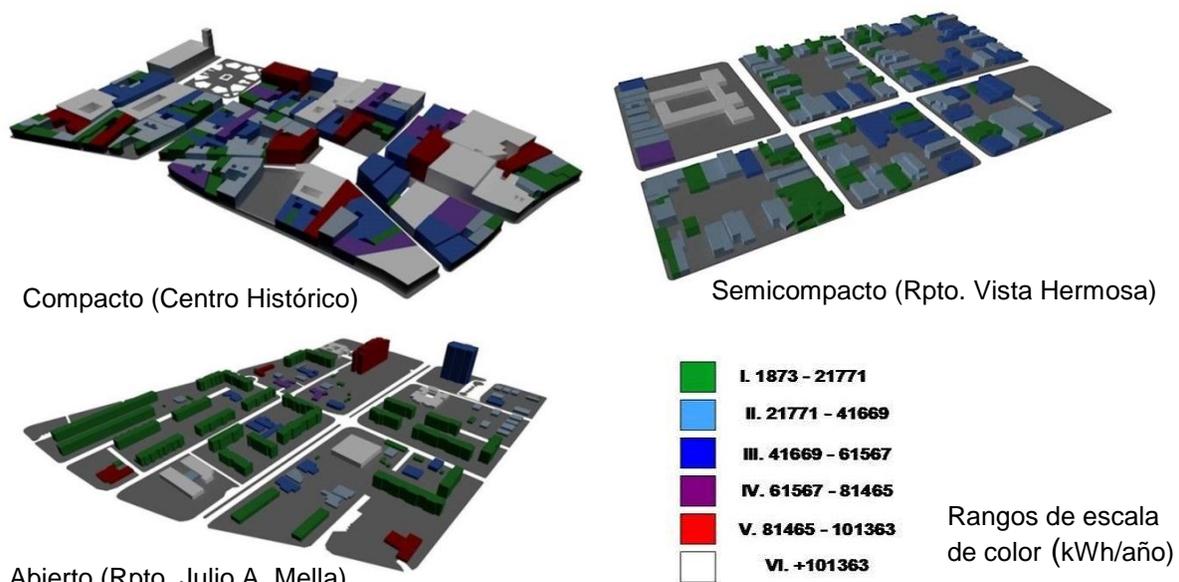


Fig. 5 Mapificación morfo-energética de tres tipos de contextos urbanos de Camagüey
Fuente: Elaborado por los autores

Cuando se compara el comportamiento general de los tres tipos de contexto (Fig. 6), el semicompacto representa una posición intermedia de COS⁵, pero llama la atención que es donde se producen las mayores demandas. Aunque se ha planteado (González Couret, 2011) que este tipo de contexto es más apropiado por la ventilación e iluminación que el compacto y el abierto, hay que tener en cuenta que está más expuesto, lo cual debe ser resuelto con protección solar, vegetación y colores claros, entre otras posibles soluciones.

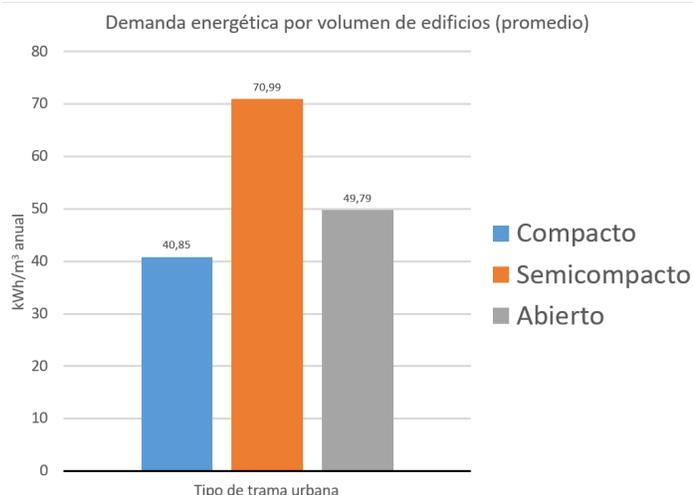


Fig. 6 Diferencia de la demanda energética para enfriamiento según el tipo de trama urbana
Fuente: Elaborado por los autores

CONCLUSIONES

Se realiza un levantamiento volumétrico de muestras de tres tramas urbanas seleccionadas de la ciudad de Camagüey (lotificada compacta, lotificada semicompacta y sin lotificar o abierta), abarcando una área de estudio total de 252 531 m² con 401 edificios.

Se evalúa la influencia de la geometría urbana en la demanda de energía por climatización de edificios, según las variables Factor de Forma, volumen de edificio y área expuesta. Auxiliado del software de simulación energética de edificios más reconocido internacionalmente por su nivel de precisión (E+).

Se obtiene una ecuación para el cálculo pronóstico de la demanda energética de edificios para la ciudad de Camagüey, a partir de sus parámetros geométricos específicos. El resultado se expresa en la unidad más utilizada y conocida, el kWh/año.

Con el modelo matemático obtenido se realiza una aplicación en Excel para que de forma muy simple los proyectistas cuenten con una herramienta que les permita considerar el comportamiento energético de sus propuestas desde las primeras etapas de proyecto.

Se realizan en representación cromática 3D una mapeación morfo-energética de las tres muestras de trama urbana de la ciudad de Camagüey, para obtener una primera aproximación del comportamiento de la influencia de la geometría urbana en la demanda de energía por climatización. Lo cual por primera vez se podrá tener en cuenta en la labor de proyecto.

⁵ Coeficiente de ocupación del suelo.

REFERENCIAS

- Baker, N. y Steemers, K. (2005). *Energy and Environment in Architecture. A Technical Design Guide*. Londres: Taylor & Francis e-Library.
- Danielski, I. (2012). Large variations in specific final energy use in Swedish apartment buildings: Causes and solutions. *Energy and Buildings*, 49, 276–285.
- Deb, C. y Lee, S. E. (2017). Determining key variables influencing energy consumption in office buildings through cluster analysis of pre- and post-retrofit building data. *Energy and Buildings*, 159, 228-245.
- Depecker, P., Menezo, C., Virgone, J. y Lepers, S. (2001). Design of buildings shape and energetic consumption. *Building and Environment*, 36, 627–635.
- Fonseca, J. A. y Schlueter, A. (2015, marzo). Integrated model for characterization of spatiotemporal building energy consumption patterns in neighborhoods and city districts. *Applied Energy*, 142, 247–65.
- González Couret, D. (2011). Uso de suelo y ambiente interior. *Arquitectura y Urbanismo*, 32(2), 9-15.
- huellasdearquitectura.wordpress.com. (2013). *El factor de forma como estrategia de diseño*. Recuperado el 14 de febrero de 2019, de Huellas de Arquitectura. Evolución de la arquitectura moderna, bioclimática y sostenibilidad: <https://huellasdearquitectura.wordpress.com/2013/05/24/el-factor-de-forma-como-estrategia-de-diseno/>
- Tianzhen, H. (2009). A close look at the China Design Standard for energy efficiency of public buildings. *Energy and Buildings*, 41(4), 426–435.
- Wei, Y., Zhang, X., Shi, Y., Xia, L., Pan, S., Wu, J. y otros. (2017). A review of data-driven approaches for prediction and classification of building energy consumption. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 1027-1047.
- Yüksek, I. y Tikansak Karadayi, T. (2017). Energy-Efficient Building Design in the Context of Building Life Cycle. En E. H. Yap (Ed.), *Energy Efficient Buildings* (págs. 93-123). [s.l.]: IntechOpen. Recuperado el 12 de enero de 2019, de https://pdfs.semanticscholar.org/c91e/e7534bc828c029ab944cdc02fd6b11e5da99.pdf?_ga=2.110721029.1857333169.1573747252-733317223.1573747252