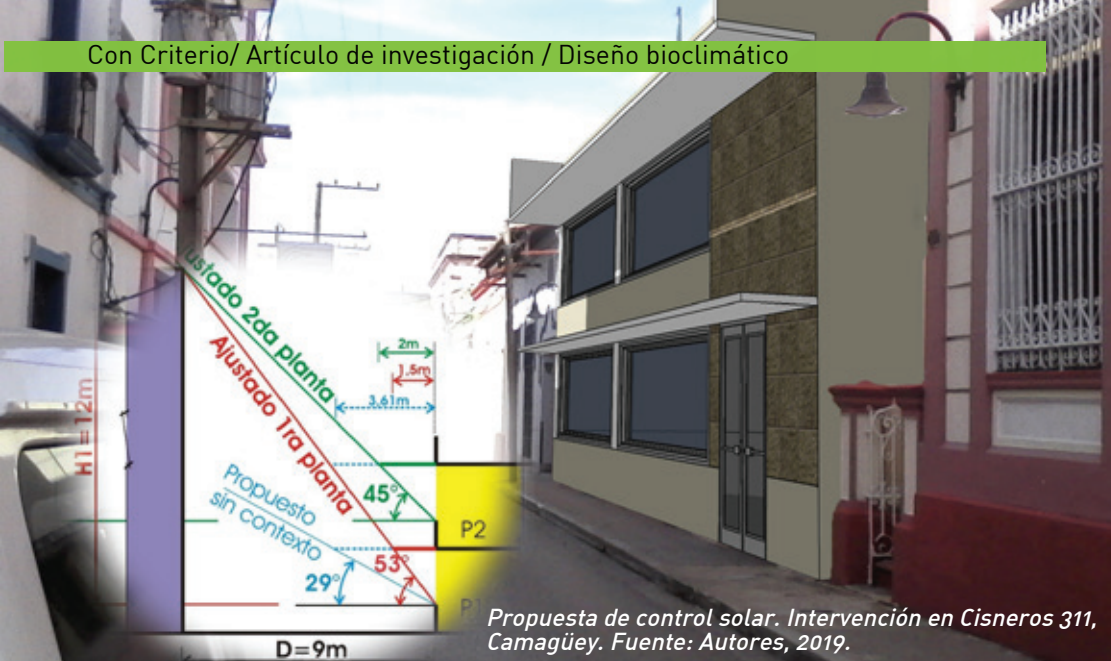




Propuesta de control solar. Intervención en Cisneros 311, Camagüey. Fuente: Autores, 2019.

Recomendaciones de diseño para optimizar la protección solar y disminuir la demanda energética de los edificios

Design Recommendations to Optimize Solar Protection and Reduce the Energy Demand of Buildings

Guillermo A. De la Paz-Pérez, Dania González-Couret,
José A. Rodríguez-Algeciras y Guillermo De la Paz-Vento

RESUMEN: A pesar de la crisis ambiental global, el desempeño energético de edificios no se corresponde con los cambios necesarios. El marco regulatorio cubano no considera el diseño urbano-arquitectónico como recurso para disminuir la demanda energética de los edificios, donde la protección solar de las aberturas es fundamental. El objetivo del trabajo fue proponer recomendaciones de diseño fundamentadas en la influencia del contexto urbano y la orientación en la protección solar y la demanda energética para enfriamiento. Se utilizó la herramienta Energy Plus para simular diferentes escenarios urbanos y orientaciones, evaluando su impacto en la protección solar y la demanda energética. Se demuestra que al considerar estos factores, es posible reducir los costos de protección solar y la demanda energética. Se destaca la importancia de diseñar cada porción de la envolvente vertical considerando su orientación y relación con el contexto inmediato para lograr una mayor eficiencia energética.

PALABRAS CLAVE: Demanda energética de edificios, protección solar, recomendaciones de diseño, clima cálido-húmedo.

ABSTRACT: Despite the global environmental crisis, the energy performance of buildings does not correspond to the necessary changes. The Cuban regulatory framework does not consider urban-architectural design as a resource to reduce the energy demand of buildings, where solar protection of openings is essential. The objective of the work was to propose design recommendations based on the influence of the urban context and orientation on solar protection and energy demand for cooling. The Energy Plus tool was used to simulate different urban scenarios and orientations, evaluating their impact on solar protection and energy demand. It is shown that by considering these factors, it is possible to reduce solar protection costs and energy demand. The importance of designing each portion of the vertical envelope considering its orientation and its relationship with the immediate context to achieve greater energy efficiency is highlighted.

KEYWORDS: Building energy demand, solar protection, requirements of design, warm-humid climate.

RECIBIDO: 19 febrero 2024

ACEPTADO: 3 marzo 2024

Introducción

El interés internacional en el ahorro de energía comenzó durante la crisis del petróleo en 1973, y desde entonces se ha considerado el alto potencial que los edificios representan en el logro de ese objetivo. 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 [1].

Varios autores [1, 2] confirman que, debido a la larga duración de los edificios, los más eficientes de nueva construcción constituyen un porcentaje muy bajo con respecto al total, por lo que, en las próximas décadas, los edificios existentes todavía serán la mayor causa de consumo de energía y de emisiones de CO₂. Por consiguiente, no solo se necesitan requerimientos para los nuevos diseños, sino que también es preciso actuar sobre los edificios existentes, evaluarlos y proponer rediseños de sus envolventes.

Para la rehabilitación energética de edificios una de las principales acciones es la reducción de la demanda mediante actuaciones sobre su envolvente. Lo antes mencionado, convierte a los edificios en un campo estratégico de actuación, siendo vital establecer prácticas de reducción de demanda de energía. Para la independencia, no solo energética, de Cuba estas prácticas son decisivas debido al impacto de la dependencia de combustibles importados para la generación energética; el costo promedio de la energía entregada, la pérdidas en las redes y la contaminación ambiental, así como la baja eficiencia en la generación térmica y la aún escasa utilización de las fuentes renovables de energía (problemas reconocidos por el Ministerio de Energía y Minas) [3].

En las condiciones climáticas de la isla, particular importancia cobra la penetración de la radiación solar directa que incrementa la carga térmica, la molesta radiación asimétrica y el deslumbramiento en el interior de los espacios. Además, no existe un adecuado aprovechamiento de la iluminación natural diurna. A pesar de lo anterior, a partir de la década de los 90's, se aprecia un aumento del uso de envolventes vidriadas sin protección solar, tanto en nuevos diseños como en intervenciones de edificios existentes. Estos patrones de actuación arquitectónica no tienen en cuenta que los factores de la envolvente pueden tener un impacto global del 60% [4] en la demanda de energía para enfriamiento.

En Cuba, existe una norma sobre eficiencia energética en edificios, acondicionados artificialmente, la cual dedica su Parte 1 (NC 220-1, 2009 [5])¹ al diseño de la envolvente, pero no se establecen los requisitos en función de la orientación específica² de cada cierre exterior, con las correspondientes diferencias en cuanto a la radiación solar incidente y sus consecuencias energéticas, ambientales (emisiones de CO₂), económicas (acondicionamiento artificial) y sociales (calidad de vida, confort humano, tradición e identidad arquitectónica). Ya se ha reconocido la importancia de profundizar en investigaciones para definir el impacto del contexto urbano construido en la demanda energética interior [6], por lo que su no consideración limita el alcance de la propia norma, donde en su objeto establece: "aplicable en el diseño de edificios nuevos, reformas y ampliaciones".

- [1] Chirag D, Siew L. Determining key variables influencing energy consumption in office buildings through cluster analysis of pre- and post-retrofit building data. *Energy and Buildings* [Internet]. 2018 [consultado: 17 de enero de 2023]; 159:228-245. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.11.007>
- [2] Brøgger M, Bjarne K. Estimating the energy-saving potential in national building stocks—A methodology review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [Internet]. 2017 [consultado: 20 de enero de 2023]; 82(Part 1):1489-1496. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.239>
- [3] Ministerio de Energía y Minas, et al. Cuba apuesta por una energía más limpia, diversa y eficiente [Internet]. MINEM, 2014 [consultado: 22 de marzo de 2022]. Disponible en: <http://www.cubadebate.cu/especiales/2014/08/14/cuba-apuesta-por-una-energia-mas-limpia-diversa-y-eficiente/#respond>
- [4] Martins T, Faraut S, Adolphe L. Influence of context-sensitive urban and architectural design factors on the energy demand of buildings in Toulouse, France. *Energy & Building* [Internet]. 2019 [consultado: 20 de marzo de 2022]; 190:262-278. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.02.019>
- [5] Oficina Nacional de Normalización. NC 220-1: Edificaciones - requisitos de diseño para la eficiencia energética - parte 1: envolvente del edificio. La Habana: ONN, CTN 40, 2009.
- [6] Garcia-Nevado E, Beckers B, Coch Roura H, Crespo I. Façade design and energy demand: fenestration indexes from an urban approach. En: Libro de Ponencias: 33rd International Conference on Passive and Low Energy Architecture PLEA. Edinburgh; 2017 [consultado: 20 de marzo de 2022]. Vol. III: p. 5230-5237. Disponible en: www.nceub.org.uk

¹ Basado en el Código Energético de Hawai y en la norma ASHRAE 90.1:1989 de la Sociedad Americana de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado.

² Ángulo entre el norte geográfico y el vector perpendicular a la superficie exterior de la fachada, medido en el sentido de las agujas del reloj cada 45°.

Esta investigación pretende demostrar que el efecto simultáneo de la orientación de la envolvente vertical del edificio³ y del contexto urbano construido⁴ contribuye a especificar y optimizar la protección solar requerida por las aberturas de los edificios; y a reducir la demanda energética de refrigeración de espacios climatizados. Se ha centrado en la envolvente vertical y, concretamente, en la protección solar de las aberturas (ventanas).

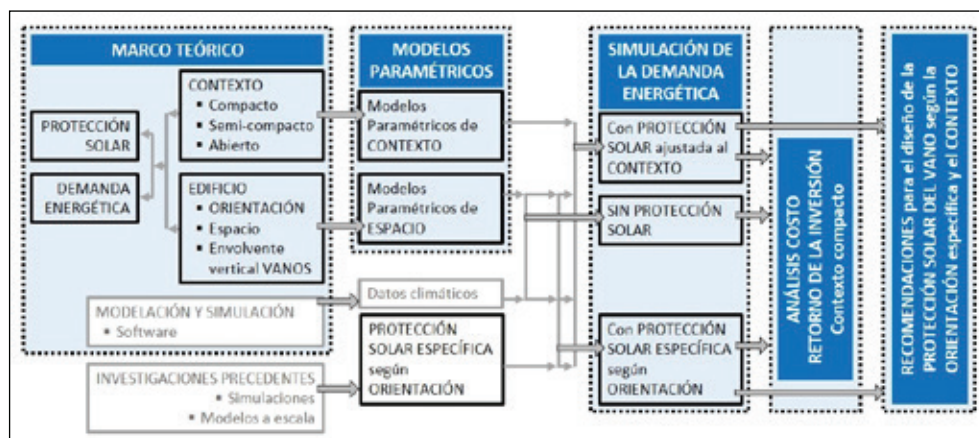
Materiales y método

Para determinar la influencia del contexto urbano y la orientación de la envolvente vertical en la protección solar de la abertura y la demanda energética de los edificios, se realizaron simulaciones automatizadas con el software EnergyPlus (E+), desarrollado por el Departamento de Energía de los Estados Unidos (DOE). Se seleccionó esta aplicación ya que es el motor de Simulación Energética de Edificios más reconocido y utilizado en mundo, lo cual se corroboró con el criterio de varios estudios de revisión [7, 8, 9] que en total analizaron 663 fuentes.

Para obtener los resultados, se simuló un espacio modular repetitivo genérico adaptable a diversas funciones (aulas, oficinas) en un edificio situado en 60 modelos paramétricos de contexto. Además, se consideraron las ocho orientaciones principales de la envolvente vertical y se tomaron como base de las simulaciones los datos climáticos de Camagüey, organizados dentro de ficheros en formato climático EPW (EnergyPlus Weather).

Además de E+8.8, se utilizó SketchUp para elaborar modelos volumétricos y LibreOffice Calc Versión: 5.0.0.5 (x64) para el procesamiento y graficado de todos los resultados numéricos. Se empleó una computadora de escritorio con procesador x64 AMD 3,6GHz; 4GB de RAM; Sistema Operativo Windows 10 Pro 2017 de 64bits.

El gráfico de la Figura 1 ilustra de forma sintética el proceso metodológico seguido en esta investigación.



- [7] Shi X, Zhichao T, Wenqiang C, Binghui S, Jin X. A review on building energy efficient design optimization room the perspective of architects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [Internet]. 2016 [consultado: 15 de junio de 2022]; 65:872–884. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.07.050>
- [8] Kheiri F. A review on optimization methods applied in energy-efficient building geometry and envelope design. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [Internet]. 2018 [consultado: 20 de enero de 2023]; 92:897–920. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.080>
- [9] Sanhudo L, Ramos N, Martins J P, Almeida R, Barreira E, Simões ML & Cardoso V. Building information modeling for energy retrofitting—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [Internet]. 2018 [consultado: 23 de febrero de 2022]; 89:249–260. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.064>
- [10] Natephra W, Yabuki N, Fukuda T. Optimizing the evaluation of building envelope design for thermal performance using a BIM-based overall thermal transfer value calculation. *Building and Environment* [Internet]. 2018 [consultado: 2 de septiembre de 2020]; 136:128–145. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.03.032>
- [11] Yoshino H, Hong T, Nord N. IEA EBC annex 53: Total energy use in buildings—Analysis and evaluation methods. *Energy and Buildings* [Internet]. 2017 [consultado: 20 de enero de 2023]; 152():124–136. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.07.038>

Figura 1. Gráfico de proceso. Fuente: Elaborado por G.A. De la Paz y D. González, 2023.

Resultados

Fundamentación de las variables objeto de estudio

Demanda energética de los edificios

Varios autores [10, 11] han definido los principales factores que influyen en los niveles de consumo de energía de los edificios, los cuales coinciden con un estudio realizado por la Agencia Internacional de la Energía [11], según el cual estos factores que influyen en el desempeño energético del edificio pueden ser clasificados en cuatro componentes: clima, envolvente del edificio, equipamiento del edificio, y comportamiento del ocupante.

³ Para esta investigación, se refiere a la orientación específica de la abertura, la cual junto a los dispositivos de protección solar forman parte de la envolvente vertical del edificio.

⁴ La influencia del contexto urbano construido inmediato y frontal a la abertura, en su relación geométrica (ángulo de obstrucción, ángulo de protección, ángulo de visión del cielo).

Eggunatum, Joseph-Akwara y Akaigwe [12] consideran que la envolvente del edificio es el elemento más significativo que afecta la eficiencia energética. También Natephra et al. [10] refieren que es ampliamente reconocida como una de las variables de diseño más importante para un ahorro efectivo de la energía y el principal factor de la cantidad de energía requerida para regular el confort térmico interior del edificio.

Orientación

Tapia-Maureira y Piderit [13] muestran como volúmenes de edificio con varias formas y orientaciones provocan demandas energéticas diferentes. En Cuba, al comparar la influencia relativa de las variables de diseño en la carga energética de edificaciones para el turismo y con ello, en el consumo de energía por este concepto, Rueda [14] demuestra que la orientación constituye la variable de diseño que mayor influencia tiene en la carga de climatización, seguida por los elementos de protección solar.

Se asume el concepto de orientación dado en la norma ANSI/ASHRAE/IES Standard 90.1 [15], la cual la define como la dirección que un elemento de la envolvente enfrenta, por ejemplo, la dirección de un vector perpendicular a la superficie exterior del elemento y apuntando hacia fuera de esta.

En este estudio la orientación la define el ángulo formado entre el norte geográfico y la normal a la superficie exterior de la fachada, medido en sentido horario cada 45°, por lo cual se utilizan ocho orientaciones: norte (N)=0°, noreste (NE)=45°, este E=90°, sureste (SE)=135°, sur (S)=180°, suroeste (SW)=225°, oeste (W)⁵=270°, noroeste (NW)=315°.

Espacio

Para el desarrollo de esta investigación se asume un espacio genérico similar al empleado por González [16] para evaluar elementos de control solar, partiendo de que sus dimensiones se adaptan a los requerimientos de diversas funciones como aulas, oficinas y alojamiento (habitación de hotel) en Cuba. Así mismo, se asume que el espacio genérico objeto de estudio se encuentra ubicado en un nivel intermedio, por lo cual su piso y techo también pueden ser considerados como adiabáticos, ya que constituyen planos horizontales que dividen este espacio de otros de función similar.

Las características de este espacio son: dimensiones de 6,00 x 6,00 x 3,00 m (ancho, profundidad, altura) y un vano de proporciones horizontales que abarca todo el ancho del cierre exterior expuesto, con un antepecho de 1m y una altura de 2 m (Figura 2). Así quedan fijos los parámetros geométricos: volumen (108 m³), área de cada pared que limita el espacio hacia el interior del edificio (18 m²), área de piso y techo (36 m²), área de vano (12 m²) y área de antepecho (6 m²). Un espacio genérico de esas mismas dimensiones fue también empleado por Garcia-Nevado et al. [6] para evaluar la relación ventana-pared en una unidad residencial individual en el contexto del distrito Eixample de Barcelona.

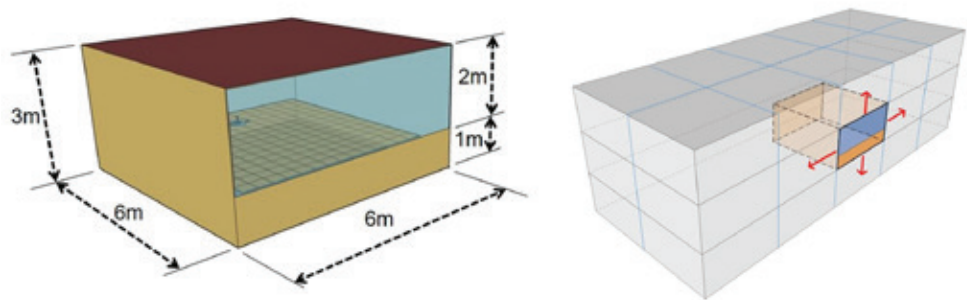


Figura 2. Espacio genérico utilizado para simular la demanda energética con E+. Fuente: Elaborado por G.A. De la Paz y D. González, 2023.

[12] Eggunatum S, Joseph-Akwara E, Akaigwe R. Optimizing energy consumption in building designs using Building Information Model (BIM). Slovak Journal of Civil Engineering [Internet]. 2016 [consultado: 15 de enero de 2021]; 24(3):19–28. Disponible en: <https://doi.org/10.1515/sjce-2016-0013>

[13] Tapia-Maureira C, Piderit M. Design Criteria to Reduce Energy Demand and Improve Thermal Comfort in Desert-coastal Climate Office-building [Internet]. En: Libro de Ponencias: 34th International Conference on Passive and Low Energy Architecture PLEA. Hong Kong; 2018 [consultado: 20 de marzo de 2022]. Vol. II: p. 676-681. Disponible en: <http://web5.arch.cuhk.edu.hk>

[14] Rueda LA. Influencia del diseño en la carga térmica y el consumo de energía en habitaciones de hoteles con “destino sol y playa” en Cuba [tesis doctoral]. Ciudad de La Habana: Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, 2003.

[15] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. ANSI/ASHRAE/IES Standard 90.1-2013, Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings (I-P Edition) [Internet]. Atlanta: ASHRAE, 2013 [consultado: 7 de enero de 2021]. Disponible en: www.ashrae.org

[16] González D, Martínez R. Sistema de elementos de protección solar para los edificios en Cuba. Estudio de caso. Arquitectura y Urbanismo [Internet]. 2014 [consultado: 7 de enero de 2019]; 35(3):5-17. Ciudad de La Habana. Cujae. Disponible en: <https://rau.cujae.edu.cu/index.php/revistaau/issue/view/45/showToc>

⁵ A los efectos de este trabajo se utiliza la letra W, del inglés west, para denotar la orientación oeste, con el objetivo de evitar confusión con los términos NO (noroeste), O (oeste) y SO (suroeste) que tienen significado en español.

Para realizar las simulaciones con E+, no solo se requirieron los factores geométricos anteriores. También fue necesario fijar factores de uso (Tabla 1), así como los materiales y elementos componentes de la envolvente, tanto los que rodean al espacio, como los del edificio en general y sus aledaños. Los materiales, abarcan los cierres del espacio y las construcciones exteriores, de los que fue preciso introducir datos como espesor, conductividad, densidad, calor específico.

Tabla 1. Condiciones del espacio para la simulación energética por climatización e iluminación con E+

Parámetro	Descripción
Temperatura de consigna	24°C (NC 220-3)
Infiltración de aire constante	0,2 ACH (cambios de aire por hora). Biblioteca E+ [17]
Infiltración de aire por ocupación	0,004 m³/s (por m²/persona). Biblioteca E+ [17]
Control de iluminación diurna	300 lux [18]. En el punto de referencia 3x3x0,9 m.
Horario de uso de iluminación*	Todos los días, 9 horas.
Número de ocupantes	20 personas (1,8m²/personas) [19].
Horario de ocupación	Todos los días, 9 horas.
Actividad de las personas Período de uso	Ganancia interna de 100W por persona (actividad lectura o escritura) [20]. Todos los días, 9 horas.
Equipamiento eléctrico	4,5 W/m² [13].
Potencia de iluminación artificial de diseño	10 W/m² [15].

(*) Marzo-octubre/ 7:00am a 4:00pm (horario de verano) y noviembre-febrero/ 8:00am a 5:00pm (horario normal). Fuente: Elaborado por autores a partir de gráficos contenidos en [30].

Envolvente

La envolvente es un separador físico entre los ambientes exterior e interior y está compuesta por piso, techo, paredes y ventanas. Además de condicionar la expresión del edificio debido a su fuerte componente cultural, influye en su ciclo de vida, durabilidad y costo de mantenimiento. De los componentes de la envolvente, la vertical es la que presenta mayor superficie permeable expuesta al ambiente exterior.

A partir de lo definición de “envolvente vertical”, establecida en varias normativas internacionales [15, 21] y la propia norma cubana NC 220-1 [5], para esta investigación se asume el término envolvente arquitectónica vertical, para el componente de la envolvente cuya inclinación es mayor o igual a 60° con respecto a la horizontal, e incluye elementos opacos, permeables y de autosombreado; así como protección solar exterior.

[17] Sole Bonet J. OpenStudio y Energy Plus [Internet]. Madrid: URSA Insulation SA, 2017 [consultado: 7 de enero de 2019]. Disponible en: <http://www.josepsole.260mb.net/Energy.html>

[18] Oficina Nacional de Normalización. NC-ISO 8995/CIE S 008: 2003. Iluminación de puestos de trabajo en interiores. La Habana: ONN, CTN 58, 2003.

[19] Ghosh A, Neogi S. Effect of fenestration geometrical factors on building energy consumption and performance evaluation of a new external solar shading device in warm and humid climatic condition. Solar Energy [Internet]. 2018 [consultado: 20 de abril de 2020]; 169:94–104. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.04.025>

[20] U.S. Department of Energy. Input Output Reference. EnergyPlus™ Version 8.8 Documentation [Internet]. Washington D. C.: DOE, 2019 [consultado: 7 de octubre de 2019]. Disponible en: <https://energyplus.net/>

[21] CITEC (Centro de Investigación en Tecnologías de la Construcción). Manual de Diseño Pasivo y Eficiencia Energética en Edificios Públicos [Internet]. Instituto de la Construcción. Universidad del Bío Bío, Santiago de Chile, 2012 [consultado: 20 de abril de 2022]. Disponible en: www.iconstruccion.cl

La protección solar o sombreado es reconocida por varios autores [22, 23] como la principal estrategia de enfriamiento y confort en climas cálidos. Es un importante elemento de la envolvente que influye en el comportamiento energético del edificio, lo cual corroboran investigaciones [19, 18] donde se demuestra que los dispositivos de protección solar mejoran el desempeño energético en condiciones cálido-húmedas. Además, ya en Cuba autores nacionales [24] evaluaron y pronosticaron, mediante simulación con E+, el impacto de propuestas de protección solar y su efectividad en las condiciones climáticas de la isla.

La protección solar de las ventanas, como componentes permeables de la envolvente vertical de los edificios, es el objeto de estudio específico en la presente investigación.

Contexto

Es el contexto⁶ urbano inmediato o la porción de este, situado frente a la envolvente vertical del espacio objeto de estudio, específicamente, el ángulo de visión del cielo que este permite y que condiciona la exposición a la radiación solar de la porción de envolvente vertical que limita al espacio interior, cuya demanda energética se está simulando. Siempre es un espacio frontal con una edificación en frente que puede ser una calle, un espacio abierto, pero está determinado por la distancia y la altura.

La influencia del contexto en la demanda energética de los edificios depende en primer lugar de su geometría y orientación, que determinan la incidencia solar en la envolvente expuesta de los espacios. La geometría está determinada por la separación entre el edificio objeto de estudio y los próximos a él, así como su altura, que condicionan el ángulo de la protección solar u obstrucción que ofrece el contexto. Este se complementa con la protección o auto-sombreado brindado por el propio edificio y ambos generan el ángulo de visión del cielo que permite la incidencia solar según la orientación.

Se asumen tres modelos geométricos de contexto (Figura 3) que caracterizan de forma general las tres etapas socioeconómicas más importantes que influyeron en el desarrollo urbano de las ciudades cubanas (colonia, república y revolución). Basado en trabajos anteriores [25, 26, 27], los tipos más comunes se agruparon y clasificaron en tres: 1) zona compacta, definida principalmente por el centro histórico, 2) zona semicompacta, referida a la expansión de la ciudad en la primera mitad del siglo XX y 3) zona abierta, relativa mayormente a las nuevas urbanizaciones en la periferia de las ciudades como parte del proceso de expansión en la segunda mitad del siglo XX.

Aunque estos modelos urbanos responden a una evolución histórica, no es esa la razón por la que han

- [22] Olgyay V. Arquitectura y clima. Manual de diseño bioclimático para arquitectos y urbanistas (Trad. J. Frontado y L. Cavet). Barcelona: Gustavo Gili; 1998.
- [23] Kirimat A, Kundakci Koyunbaba B, Chatzikonstantinou I, Sariyildiz S. Review of simulation modeling for shading devices in buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [Internet]. 2016 [consultado: 20 de enero de 2023]; 53:23-49. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.08.020>
- [24] De la Paz Pérez GA, De la Paz Vento G. Impacto energético-ambiental por climatización de un edificio de oficinas en condiciones tropicales [Internet]. En: Libro de Ponencias: Quinto Congreso Internacional MACDES. La Habana: MES; 2018 [consultado: 20 de marzo de 2022]. p. 439-450. Disponible en: https://www.academia.edu/38069843/Memorias_Congreso_Internacional_Medio_Ambiente_Construido_y Desarrrollo_Sustentable_MACDES_2018_
- [25] Oficina Nacional de Normalización. NC 219: 2002 Urbanismo - código de buena práctica para el diseño ambiental de los espacios urbanos. La Habana: ONN, CTN 40, 2002.
- [26] Díaz G, De la Peña AM. Urbanismo y medioambiente. La Habana: Efe Consultores; 2009.
- [27] González D, Martínez O, Rodríguez V, Salazar M. Outdoor thermal environment in Havana [Internet]. En: Libro de Ponencias: International Conference for Sustainable Design of the Built Environment SDBE 2018. London: University of East London; 2018 [consultado: 20 de marzo de 2022]. p. 776-784 Disponible en: http://newton-sdbe.uk/wp-content/uploads/2018/09/SDBE2018_Conference-Proceedings-.pdf

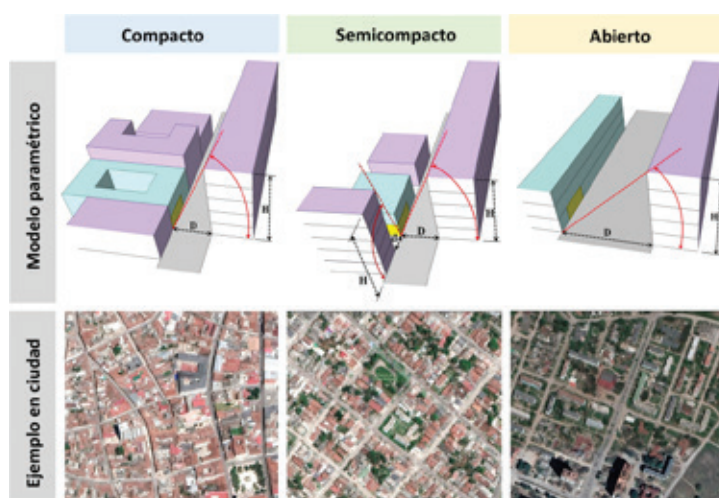


Figura 3. Modelos paramétricos de contextos. Ejemplo, imagen satelital, de cada contexto en una ciudad cubana (Camagüey). Fuente: Elaborado por autores a partir de gráficos contenidos en [30].

⁶ No se trata de un estudio morfo-tipológico de diferentes posibles contextos urbanos, ya que no se refiere a esa escala. En este trabajo, se refiere a lo que está inmediato a ese fragmento de la envolvente vertical del edificio y que está en posibilidad de arrojar sombra en dependencia de la orientación. Donde, el elemento de protección solar actúa como elemento complementario de esa sombra protectora del contexto.

sido asumidos como clasificación en la presente investigación, sino porque sus características morfológicas específicas tienen una influencia directa en el ángulo de visión del cielo [Sky View Factor, SVF] [21, 28, 29], que a su vez condiciona el acceso de los edificios al sol y por tanto, la incidencia en ellos de la radiación solar, con su correspondiente efecto en la carga térmica que se transmite hacia el espacio interior. Esta carga de enfriamiento debe ser contrarrestada por el sistema de climatización artificial, influyendo por tanto, en la demanda energética. Además, se ha asumido una altura promedio de 3m por piso, y edificios entre 1 y 5 plantas ($3m \leq H \leq 15m$), teniendo en cuenta las aturas más frecuentes en la ciudades cubanas y la regulación que limita al empleo de hasta 5 plantas sin ascensor.

Con el reconocido motor de simulación energética E+, en su versión 8,8 del 2018, se realizan 700 simulaciones automatizadas horarias del espacio genérico en 60 modelos paramétricos de contexto (Tabla 2), con 8 orientaciones y considerando los datos climáticos de Camagüey (por su condición intermedia) [30]. Este proceso permite pronosticar el comportamiento de diversos parámetros como ganancia de calor solar por ventanas, temperatura media radiante, temperatura horaria de las superficies interiores y exteriores, así como, una de las variables objeto de estudio, “demanda de energía anual” para enfriamiento e iluminación artificial.

[28] Garcia-Nevaldo E, Pagès-Ramon A, Coch Roura H, Beckers B. Characterization of solar access in mediterranean cities: oriented sky factor [Internet]. En: Libro de Ponencias: 31nd International Conference on Passive and Low Energy Architecture PLEA. Bologna (Italy); 2015 [consultado: 20 de marzo de 2022]. p.1-7. Disponible en: <http://plea-arch.org/plea-proceedings/>

[29] Masoud B, Coch H, Crespo I, Beckers B. Effects of Urban Morphology on Shading for Pedestrians: Sky View Factor (SVF) as an Indicator of Solar Access [Internet]. En: Libro de Ponencias: 34th International Conference on Passive and Low Energy Architecture PLEA. Hong Kong; 2018 [consultado: 20 de marzo de 2022]. Vol. III:p.1029-1030. Disponible en: <http://web5.arch.cuhk.edu.hk>

[30] De la Paz GA. Influencia del contexto urbano y la orientación en la protección solar de los vanos y en la demanda energética de los edificios en Cuba [tesis doctoral]. Ciudad de La Habana: Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, 2019.

Tabla 2. Sesenta combinaciones de modelos paramétricos urbanos.

		Distancia entre edificios “D” (m)											
		D4.5	D6	D9	D12	D24	D37	D4.5	D6	D9	D4.5	D6	D9
Altura “H” (m)	H3	C1	C6	C11	A1	A6	A7	SC1	SC6	SC11	SC16	SC21	SC26
	H6	C2	C7	C12	A2	A7	A8	SC2	SC7	SC12	SC17	SC22	SC27
	H9	C3	C8	C13	A3	A8	A9	SC3	SC8	SC13	SC18	SC23	SC28
	H12	C4	C9	C14	A4	A9	A10	SC4	SC9	SC14	SC19	SC24	SC29
	H15	C5	C10	C15	A5	A10	A11	SC5	SC10	SC15	SC20	SC25	SC30
								d1.4	d1.4	d1.4	d3.6	d3.6	d3.6
C=compacto		A=abierto		SC=semi-compacto			Distancia lateral “d” (m)						

Fuente: Elaborado por autores a partir de gráficos contenidos en [30].

Variables y sus relaciones

El contexto urbano en el que se inserta el edificio y la orientación, son variables externas que determinan la protección solar requerida por el vano de la envolvente vertical, que limita el espacio interior, lo cual influye en su demanda energética por climatización e iluminación artificial. La optimización de la protección solar de la envolvente vertical según la orientación y el contexto urbano permitirá reducir la demanda energética del espacio, lo cual tendrá implicaciones en los costos y aportará beneficios.

Basado en estas variables y sus relaciones, se elaboraron los modelos paramétricos para simular la influencia de la orientación de la envolvente vertical y el contexto en la protección solar de la abertura y la demanda energética de refrigeración de los edificios. A partir de los conceptos

definidos y de los requisitos del software utilizado (E+), ha sido posible parametrizar los modelos a utilizar para el proceso de simulación. Los resultados demuestran la necesidad de modificar la actual norma cubana y permiten realizar recomendaciones para esta transformación.

Discusión

Influencia de la orientación

La Figura 4 muestra cómo las variaciones en la orientación del vano de vidrio, en un espacio aislado (sin contexto), provocan comportamientos diferentes en la demanda energética. Estas diferencias, se manifiestan entre las ocho orientaciones estudiadas, las cuales incluyen las cinco que agrupa la norma cubana vigente como “resto de las orientaciones” (E, SE, S, SE y W).

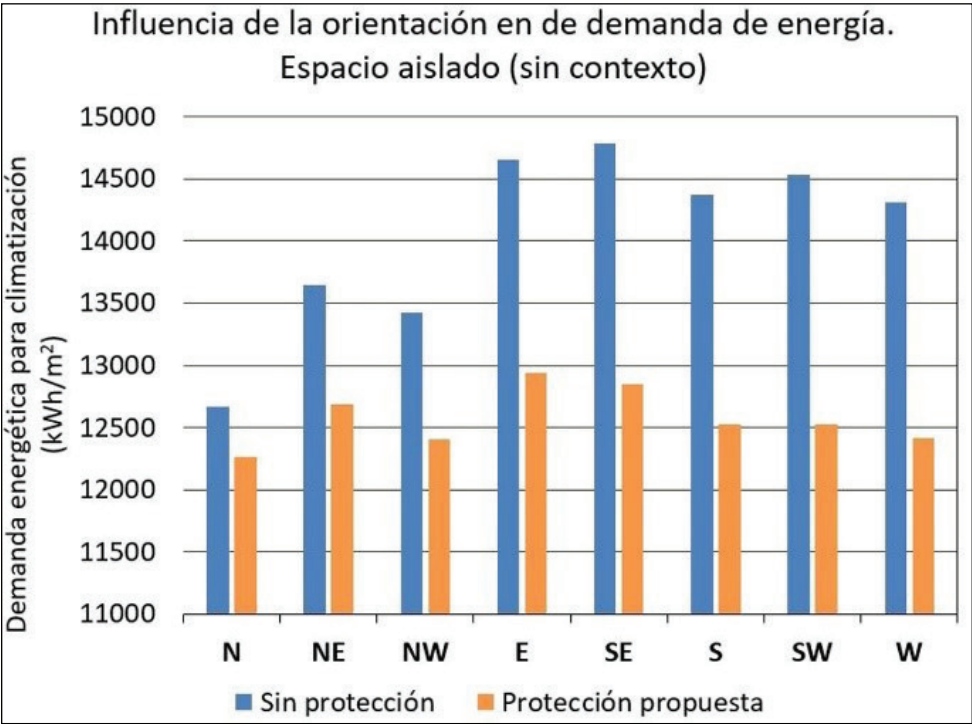


Figura 4. Demanda energética, tanto en condiciones sin protección solar como con protección solar. Fuente: Autores, 2023.

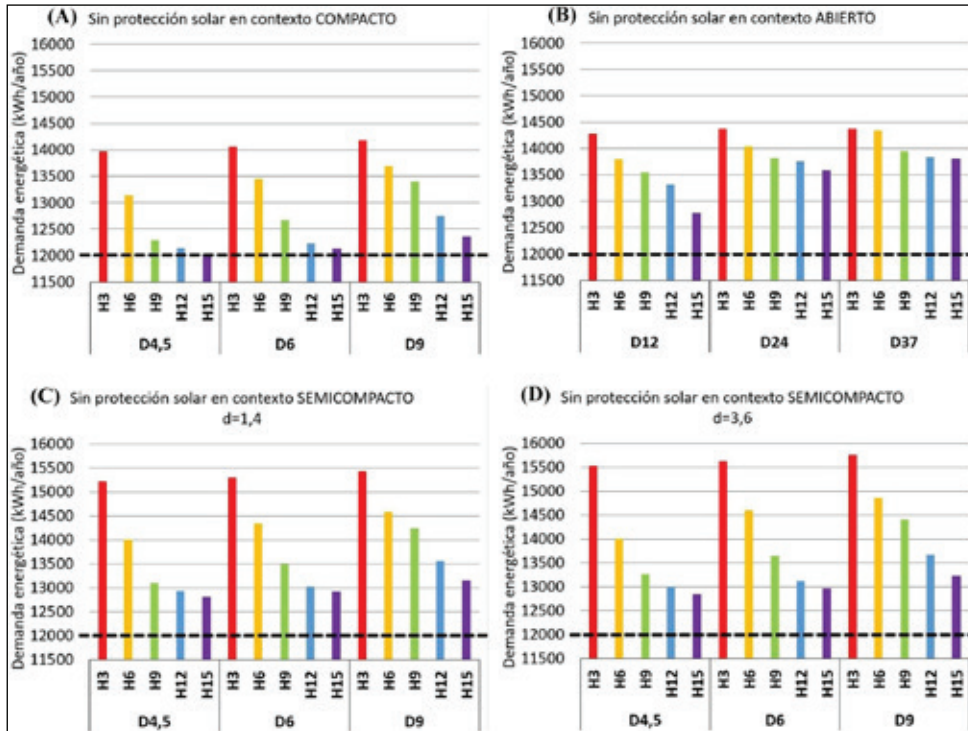
Además, la protección específica para cada orientación contribuye a una considerable reducción de la demanda energética con respecto a la envolvente expuesta.

La demanda sin protección es máxima al sureste seguido del este, y mínima en el norte. Con protección solar los valores críticos también ocurren en esas orientaciones, aunque la mayor efectividad (disminución de la demanda) se logra al suroeste (14%), mientras que la más baja ocurre en el norte (3%).

Influencia del contexto urbano

Cuando no existe protección solar, la menor demanda energética se produce en el contexto compacto, que ofrece una mayor protección, mientras que la mayor demanda ocurre en el abierto. El contexto semicompacto representa una posición intermedia, pero llama la atención que es donde se producen las mayores demandas, con edificaciones de una y dos plantas, debido a la pared lateral expuesta al oeste que contribuye a un incremento

considerable de la carga térmica y la demanda energética. Esto corrobora investigación anterior sobre la influencia del factor de forma en la demanda energética de estos tres tipos de contexto en la ciudad de Camagüey [31]. Aunque se ha planteado [32] 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. De igual manera, la demanda se reduce con la altura de las edificaciones y aumenta con el ancho de las vías y con el incremento de la separación entre los edificios (Figura 5).



- [31] De la Paz GA, Sandiumenge E. Influencia de la geometría urbana en la demanda energética anual para enfriamiento. Estudio de caso Camagüey [Internet]. Arcada. Revista de Conservación del Patrimonio Cultural. 2019 [consultado: 25 de octubre de 2022]; 7(2):62-71. Disponible en: <https://revistas.reduc.edu.cu/index.php/arcada/article/view/3262>
- [32] González D. Uso de suelo y ambiente interior. Arquitectura y Urbanismo [Internet]. 2011 [consultado: 20 de enero de 2023]; 32(2):9-15. Disponible en: <https://rau.cujae.edu.cu/index.php/revistaau/issue/view/45/showToc>

Figura 5. Influencia del contexto. Demanda energética (climatización más iluminación artificial diurna) sin protección solar en orientación Sur. (A) compacto, (B) abierto, (C) semicompacto con $d=1,4$ m y (D) semicompacto con $d=3,6$ m. Fuente: Elaborado por autores a partir de gráficos contenidos en [30].

Reducción de la protección solar requerida y la demanda energética con la consideración del contexto

En la (Figura 6), se muestra la influencia del contexto urbano compacto como complemento de la protección solar requerida en la demanda energética por climatización en la orientación sur, según el ancho de la vía y la altura de las edificaciones. En cada caso, con gráfico de líneas, se presenta la proyección horizontal total requerida por un elemento de protección situado a la altura del techo, como prolongación de la losa de entrepiso, que podría ser un alero, un balcón superior, o un espacio de transición como portal o terraza, cuando las dimensiones necesarias son mayores. Aunque el ángulo horizontal requerido, cuando es muy bajo, puede ser satisfecho mediante diversas soluciones de diseño que incluyen los elementos múltiples, con el propósito de comparar el efecto de reducción, en este caso se muestra el resultado de la proyección total horizontal. En la práctica, la solución puede ser otra que satisfaga el mismo ángulo.

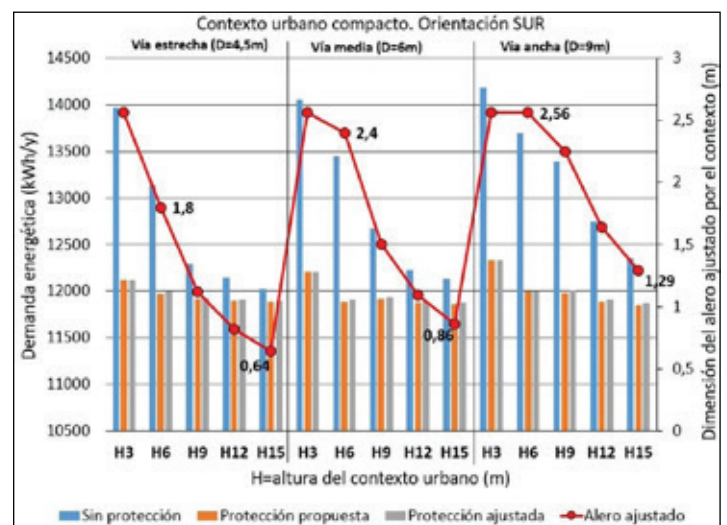


Figura 6. Influencia de las características del contexto urbano en la demanda energética y en la proyección horizontal de los dispositivos de control solar. Fuente: Elaborado por autores a partir de gráficos contenidos en [30].

El alero puede ser menor en algunas combinaciones de distancia y altura, ya que el contexto complementa la protección. La dimensión de vuelo del alero disminuye cuando aumenta la altura del contexto: para D=4,5m, el alero disminuye de 1,8 a 0,64m entre 2 y 5 pisos promedio; cuando D=6m se reduce de 2,4 a 0,86m y cuando D=9m se reduce de 2,25 a 1,29m.

El gráfico de la (Figura 7) reproduce nuevamente la proyección horizontal de los elementos de protección propuestos por los autores para cada orientación específica, así como la demanda generada en el espacio objeto de estudio cuando estos se emplean. Se han añadido las proyecciones horizontales ajustadas de los elementos de protección necesarios como complemento de la sombra arrojada en un contexto compacto con vías estrechas y edificios altos (D4,5 – H15), valores intermedios del ancho de vía y la altura de los edificios (D6 – H9). En el tercer caso (no graficado), con vías anchas y edificios bajos (D9 – H3). Para todas las orientaciones no es posible ajustar la proyección horizontal, ya que las sombras arrojadas por el contexto no son significativas, por lo que la protección deber ser resuelta con el 100% de la proyección horizontal propuesta. En la (Figura 8) se muestran posibles ejemplos, en ciudades cubanas, de las tres condiciones analizadas.

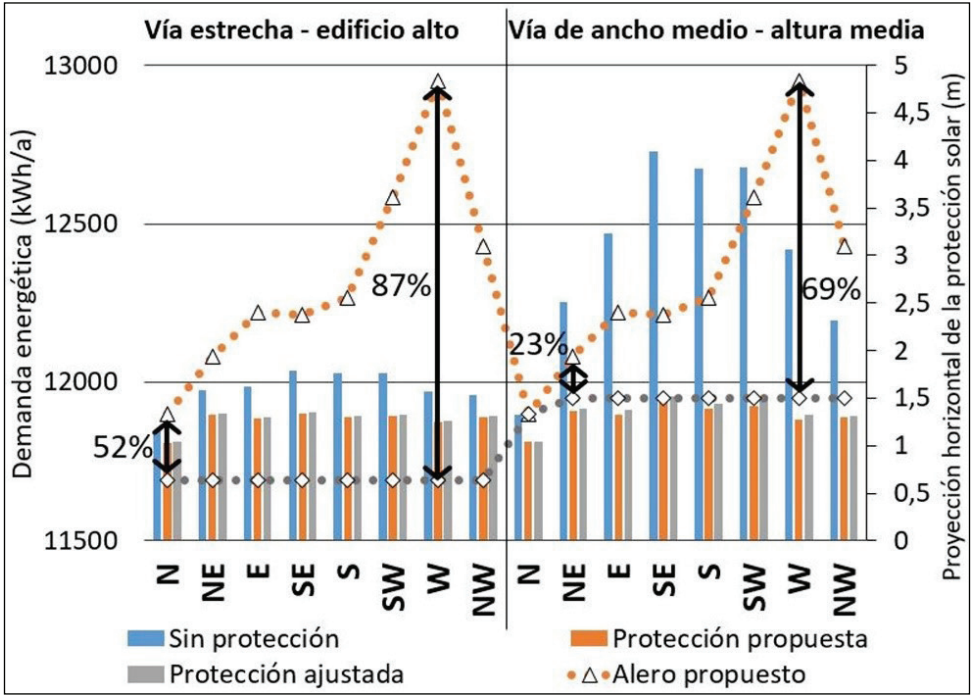
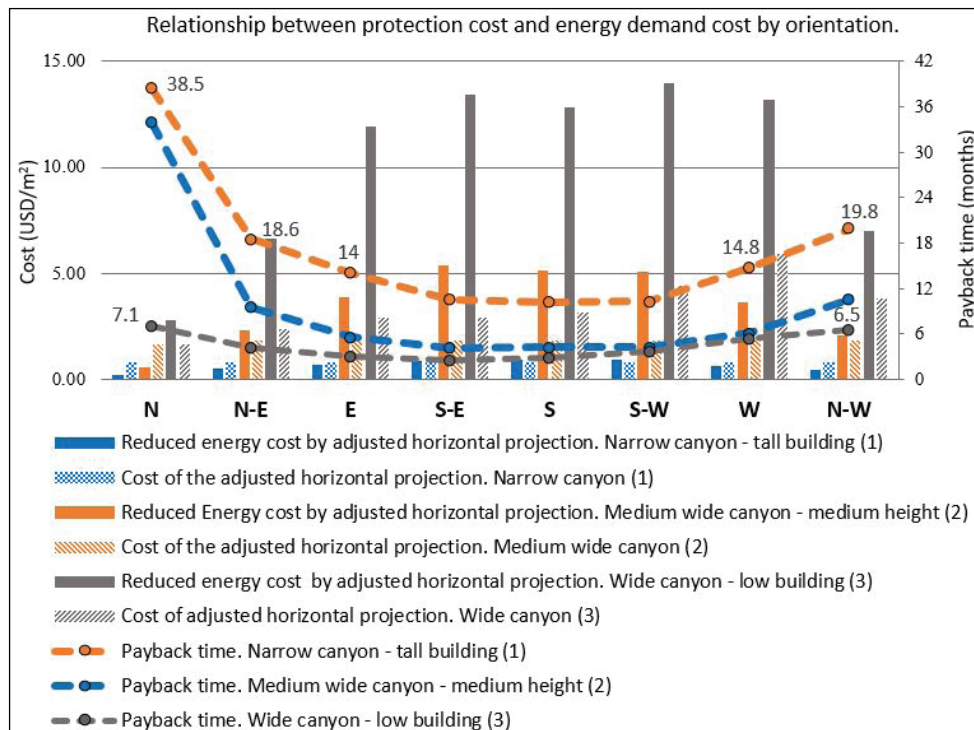


Figura 7. (Izquierda). Influencia del contexto en la proyección horizontal de la protección solar. Ajuste de esta protección debido al contexto. Fuente: Elaborado por autores a partir de gráficos contenidos en [30].

Figura 8. (Abajo). Ejemplos que ilustran, a partir de la relación distancia (D) altura (H), tres posibles condiciones de contexto compacto en ciudades cubanas. Fuente: Elaborado por autores a partir de gráficos contenidos en [30].



Como se muestra en la Figura 9, debido a la influencia del contexto, la proyección horizontal de los elementos de protección solar se corrige con una reducción que va desde 52% al norte hasta 87% al oeste, en un contexto compacto caracterizado por vía estrecha-edificio alto. En ese mismo contexto pero con vía de ancho medio y altura media la reducción de los elementos de protección solar pasa de 23% al noreste a 69% al oeste. En todos los casos esta reducción se genera con respecto a la protección solar específica propuesta para cada orientación, en la condición de espacio aislado sin contexto. (Figura 9)



[33] De la Paz Pérez GA, González Couret D, Rodríguez-Algeciras J.A, De la Paz Vento G. Influence of the urban context on solar protection of the vertical envelope and the cooling energy demand of buildings in Cuba. *Journal of Building Engineering* [Internet]. 2023 [consultado: 20 de enero de 2023]; 76:107224. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2023.107224>

[34] De la Paz G. Brise-soleil, recurso arquitectónico de control solar: Evolución y propuesta de diseño optimizado para Camagüey. *Arquitectura y Urbanismo* [Internet]. 2012 [consultado: 12 de enero de 2023]; 33(2):79-94. Disponible en: <https://rau.cujae.edu.cu/index.php/revistaau/article/view/201/196>

Figura 9. Comparación entre el costo de la proyección horizontal ajustada y la reducción generada de la demanda energética, según la orientación del vano en el contexto urbano construido compacto [33].

En estas tres condiciones de contexto compacto, por orientación, se realiza una comparación del costo⁷ de la proyección horizontal ajustada y el costo de la demanda energética disminuida por esta proyección. Los resultados mostraron (Figura 9) que el retorno de la inversión del elemento de protección solar en todos los casos con orientaciones E, SE, S, SW y W era inferior a 14 meses, lo que indica la factibilidad de la estrategia de control solar en las condiciones climáticas de Cuba.

Los resultados demuestran la influencia del contexto urbano y la orientación en la protección solar de la envolvente vertical y en la demanda de energía en los edificios en Cuba, así como la necesidad de optimizar las soluciones de diseño de los elementos de control solar como componente importante de la envolvente vertical arquitectónica. Para lograr este propósito es necesarios que los proyectistas tengan en cuenta algunas recomendaciones.

Recomendaciones para el diseño de la protección solar del vano

En primer lugar la protección solar específica, para determinada orientación, debe diseñarse mediante un ángulo horizontal requerido, el cual depende de la orientación de vano, así como del período de uso y el nivel de protección que requiera la actividad del espacio. Determinado el ángulo específico se procede a diseñar el o los elementos de protección.

⁷ Para estimar los costos se asumió un alero de hormigón armado (resistencia de 20 MPa) como continuidad de la losa de entrepiso, con un peralte de 10 cm y se utilizaron los precios de venta mayorista a empresas no estatales (cooperativas no agropecuarias) establecidos por Ministerio de Finanzas y Precios en 2016.

Por ejemplo, para un ángulo requerido de 54° las soluciones de diseño D1, D2 o D3 pueden tener diferentes proyecciones V1, V2, V3, según criterios formales, materiales, así como las condiciones locales y los recursos disponibles para la ejecución o intervención de un edificio. (Figura 10)

Para este primer criterio se considera el espacio aislado o sin influencia del contexto urbano inmediato y frontal a la ventana, lo cual no siempre se comporta así, pues la mayoría de los edificios se insertan en un contexto urbano. Por tal motivo, el segundo factor que se debe considerar es la altura (1er piso, 2do piso, etc) donde se ubica la abertura a proteger, así como la distancia (D) y altura del contexto (H), (Figura 11).

Para ilustrar estas relaciones geométricas, que fundamentan los criterios de diseño recomendados anteriormente, se selecciona como caso de estudio la escuela de idiomas “Mijail V. Lomonosov”, ubicada en la zona compacta (Centro Histórico) de la ciudad de Camagüey (Figura 12).

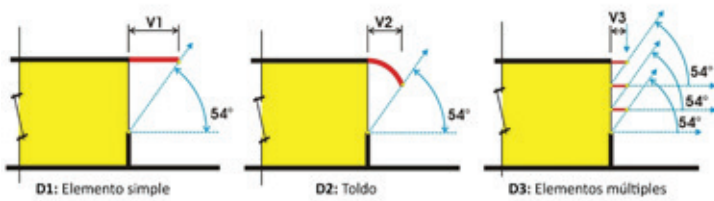


Figura 10. Tres soluciones de diseño para un mismo ángulo horizontal requerido. Fuente: Elaborado por G. A. De la Paz, 2019.

Figura 11. Optimización del ángulo específico de diseño al considerar la influencia del contexto y altura del vano. Fuente: Elaborado por G. A. De la Paz, 2019

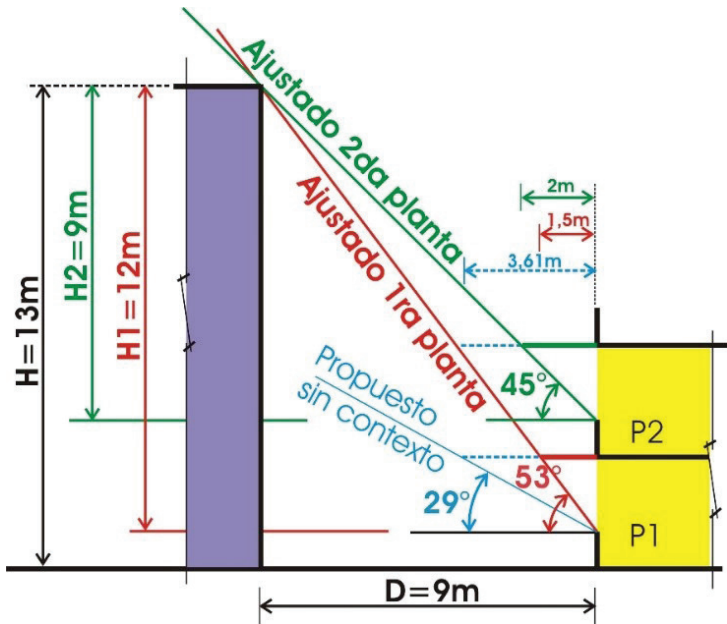


Figura 12. Caso de estudio que muestra dos soluciones de elementos de protección solar en las que se tuvo en cuenta la influencia del contexto urbano [30]. Fuente: Elaborado por G. De la Paz, 2019.

Si se diseñara la protección solar requerida, para la orientación este (E) del vano, sin tener en cuenta la protección complementaria del contexto del lugar (como edificio aislado), el ángulo de diseño sería 29°, resultando un alero simple de 47m² en cada piso. Al comparar la anterior solución con las dadas en d) y e), que consideran las condiciones del contexto, se aprecia una disminución de los costos de un 51,6% (Tabla 3).

Tabla 3. Costos de las diferentes soluciones (una sin considerar contexto, y dos considerando contexto).

Protección solar (condición)	Ángulo	Piso	Área de proyección horizontal necesaria por piso (m ²)	Área total de proyección horizontal del edificio (m ²)	Porcentaje de costo (solo área de elementos de protección necesarios) (%)
Elemento requerido (sin contexto)	29°	Primero	47	94	100
		Segundo	47		
Elemento simple ajustado (contexto)	53°	Primero	19,5	45,5	51,6
	45°	Segundo	26		
Elemento múltiple ajustado (contexto)	53°	Primero	19,5	45,5	51,6
	45°	Segundo	26		

Fuente: G. A. De la Paz, 2019.

Este estudio demuestra que el efecto simultáneo de la orientación de la envolvente vertical del edificio (donde se ubican las ventanas) y del contexto urbano construido (frontal e inmediato a esos vanos) contribuye a especificar y optimizar la protección solar requerida por las aberturas de los edificios; y a reducir la demanda energética de refrigeración de espacios climatizados.

Conclusiones

De acuerdo con los objetivos de este trabajo, se resumen las implicaciones y conclusiones más destacadas con repercusión directa en la planificación urbana y arquitectónica:

- Teniendo en cuenta la influencia del contexto urbano construido y la orientación de la envolvente vertical de la edificación, es posible reducir el costo de la protección solar y la demanda de refrigeración de los edificios.
- El uso de protecciones solares específicas y optimizadas permite reducir la demanda energética hasta un 4% en la orientación Oeste respecto a la propuesta por la Norma Cubana.
- El contexto urbano construido tiene un impacto adicional en los cañones urbanos con orientación Oeste y baja relación de aspecto. Permiten reducir la demanda anual de energía hasta 56 kWh/año/m², lo que representa un costo de 14,00 USD/m², 63kg/m² en generación de CO₂ y un consumo de petróleo de 16,8 kg/m².
- En contextos con edificios de 5 plantas, la protección solar requerida en la primera planta puede reducirse hasta un 87% hacia el Oeste y un 75% hacia el Sur, en comparación con la requerida sin tener en cuenta el contexto urbano construido.

⁸ Los costos son expresados solamente en términos de área total de la proyección horizontal de los elementos necesarios para la protección solar de los vanos en ambas plantas del edificio educacional utilizado.

- Teniendo en cuenta el impacto del contexto urbano construido, los costos de la protección solar recomendada pueden reducirse, dependiendo de la orientación, entre un 52-87% para cañones estrechos/edificios altos y entre un 23-69% para relaciones de aspecto medias.
- Es necesario que el proyectista conozca que cada porción de la envolvente vertical deberá ser diseñada de acuerdo con su orientación y su relación con el contexto inmediato, lo cual también varía para cada planta del edificio objeto de estudio.

La investigación evaluó el impacto de la orientación de la envolvente vertical, el contexto urbano construido y la protección solar de las aberturas en la demanda energética de los edificios en Cuba. Sin embargo, es necesario continuar la investigación empírica monitorizando el ambiente térmico y la energía en espacios edificados con diferente orientación y protección solar, situados en diversos contextos urbanos. Por otra parte, la simulación debería ampliarse para explorar el comportamiento de diferentes áreas, proporciones, ubicaciones y tipos de ventanas, así como los materiales de construcción y el acabado de las paredes opacas expuestas. Se recomiendan futuras investigaciones para estudiar las variables que se han supuesto fijas en el trabajo.

Agradecimientos

A Josep Solé (arquitecto español de URSA Insulation SA) y Guillermo Barrios (Dr. del Instituto de Energías Renovables de UNAM) por sus recomendaciones y revisión de simulaciones. Además, a los doctores de la Universidad de Camagüey Gaspar Barreto, por su asesoría y Julio Madera por posibilitar el acceso a recursos informáticos avanzados.

DECLARACIÓN DE CONFLICTOS DE INTERESES

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses que pudieran representar un riesgo para la publicación del artículo.

DECLARACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Guillermo A. De la Paz-Pérez: Conceptualización, curación de datos, investigación, metodología, recursos, redacción (borrador original, revisión y edición).
Dania González-Couret: Conceptualización, investigación, metodología, visualización, redacción (borrador original, revisión y edición).
José A. Rodríguez-Alguciras: investigación, redacción (borrador original, revisión y edición).
Guillermo De la Paz-Vento: investigación, redacción (borrador original, revisión y edición).



Guillermo Antonio De la Paz-Pérez
Arquitecto, Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor Titular. Universidad de Camagüey, Camagüey, Cuba.
Email: guillermo.paz@reduc.edu.cu
<https://orcid.org/0000-0001-6626-6301>



Dania González-Couret
Arquitecta, Doctora en Ciencias, Profesora Titular- Emérito. Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, CUJAE, La Habana, Cuba.
Email: daniagcouret@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-1406-4588>



José Abel Rodríguez-Alguciras
Arquitecto, MSc. Escuela Técnica de Arquitectura de Barcelona, Barcelona, España.
Email: joserodriguezalgeciras@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-6715-0543>



Guillermo De la Paz-Vento
Arquitecto, MSc. Escuela Técnica de Arquitectura de La Coruña, La Coruña, España.
Email: guillermo.paz2019@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0003-2145-1188>

