XVIII ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO
XIV ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO
AMBIENTE CONSTRUÍDO E USUÁRIO: PERSPECTIVAS LATINO-AMERICANAS

Otimização de Janelas para o Conforto Térmico: Abordagem Metodológica

Optimizar las Ventanas para el Confort Térmico: Enfoque Metodológico

Optimizing Windows for Thermal Comfort: Methodological Approach

Área temática: 3. Conforto térmico

De Gastines, Maureen
Doctora en Ingeniería Mención Civil-Ambiental. Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía, CONICET, Mendoza, Argentina. mdegastines@mendoza-conicet.gob.ar

Pattini, Andrea
Doctora en Medio Ambiente Visual e Iluminación Eficiente. Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía, CONICET, Mendoza, Argentina. apattini@mendoza-conicet.gob.ar

Resumo

Este estudo compara duas metodologias para a avaliação do conforto térmico interior: uma simplificada, baseada em um único ponto de análise sem considerar a radiação de onda curta, e outra detalhada, que incorpora uma grade de múltiplos pontos e os efeitos da radiação solar. O estudo de caso é um escritório em Mendoza, Argentina, onde são avaliados seis tipos de envidraçamentos com diferentes propriedades ópticas e térmicas. Os resultados mostram que a metodologia simplificada subestima o desconforto por calor e pode levar a decisões de projeto não ideais. A resolução ótima da grade foi analisada, verificando-se que uma separação de 2 m entre os pontos de avaliação é suficiente para estimar valores médios e máximos, enquanto valores mínimos exigem maior resolução. Recomenda-se avaliar o conforto térmico em múltiplos pontos, incluindo os efeitos da radiação de onda curta, especialmente em ambientes com elevada irradiância solar.

Palavras-chave: Conforto térmico. Radiação solar. Otimização de janelas. Simulação de edificações

Resumen

Este estudio compara dos metodologías para la evaluación del confort térmico interior: una simplificada, basada en un único punto de análisis sin considerar la radiación de onda corta, y otra detallada, que incorpora una grilla de múltiples puntos y los efectos de la radiación solar. El caso de estudio es una oficina en Mendoza, Argentina, donde se evalúan seis tipos de vidriados con diferentes propiedades ópticas y térmicas. Los resultados muestran que la metodología simplificada subestima el disconfort por calor y puede llevar a decisiones de diseño que no sean óptimas. Se analiza la resolución óptima de la grilla, encontrando que una separación de 2 m entre los puntos de evaluación es suficiente para estimar valores promedio y máximos, mientras que valores mínimos requieren mayor resolución. Se recomienda evaluar el confort en múltiples puntos incluyendo los efectos de la radiación de onda corta, especialmente en entornos con elevada irradiancia solar.

Palabras clave: Confort térmico. Radiación solar. Optimización de ventanas. Simulación de edificios.

Abstract

This study compares two methodologies for evaluating indoor thermal comfort: a simplified approach, based on a single analysis point without considering short-wave radiation, and a detailed approach, which incorporates a grid of multiple points and the effects of solar radiation. The case study is an office in Mendoza, Argentina, where six types of glazing with different optical and thermal properties are evaluated. The results show that the simplified methodology underestimates heat discomfort and may lead to suboptimal design decisions. The optimal grid resolution was analyzed, finding that a 2 m spacing between evaluation points is sufficient to estimate average and maximum values, while minimum values require higher resolution. It is recommended to assess thermal comfort at multiple points, including the effects of shortwave radiation, especially in environments with high solar irradiance.

Keywords: Thermal comfort. Solar radiation. Window optimization. Building simulation.

Introducción

En el contexto actual de cambio climático, el sobrecalentamiento en edificios representa una preocupación creciente en el diseño y operación de espacios habitables, particularmente en regiones con climas cálidos y elevada irradiancia solar. El incremento de temperaturas extremas y la creciente demanda de climatización artificial han puesto de manifiesto la necesidad de estrategias pasivas y de optimización en el diseño de envolventes edilicias que minimicen el consumo energético y aseguren el confort de los ocupantes.

Dentro de esta problemática, las ventanas y fachadas vidriadas desempeñan un papel crucial debido a su alta transparencia a la radiación solar y elevada transmitancia térmica (DE GASTINES; PATTINI, 2021, 2019). Estas propiedades las convierten en elementos críticos para la transferencia de calor, influyendo tanto en las ganancias térmicas internas como en la percepción térmica de los ocupantes. En particular, la radiación de onda corta que penetra a través de las superficies transparentes puede generar variaciones significativas en la temperatura radiante media (MRT) interior (GODBOLE, 2018; NAVARRO et al., 2019), afectando el confort térmico incluso cuando la temperatura del aire interior se encuentra dentro de rangos aceptables (HWANG; FANG; CHEN, 2023; SONG; BAI; YANG, 2024).

Los modelos convencionales de confort térmico, como el Predicted Mean Vote (PMV) y los modelos adaptativos, suelen subestimar estos escenarios críticos de sobrecalentamiento, ya que no consideran los efectos de la radiación solar (ATZERI, 2017; HUANG; ZHAI, 2020). Si bien varios modelos han sido desarrollados para incluir dichos efectos en la predicción del confort térmico (PINTO; WESTPHAL, 2021) e incluso uno de ellos (ARENS et al., 2015) está incorporado en la norma ANSI/ASHRAE 55-2017, su aplicación sigue siendo limitada. La mayoría de los estudios sobre optimización multiobjetivo de ventanas en edificios adoptan un enfoque simplificado del confort térmico, evaluándolo mediante indicadores que no contemplan el efecto de la radiación de onda corta y son calculados en un único punto central del espacio interior (ABEDINI; GHOLAMI, 2025; CARLUCCI et al., 2015; ZHAI et al., 2019). Esto se debe principalmente a los altos tiempos de simulación requeridos para tomar en cuenta de manera detallada los efectos de la radiación solar y las variaciones espaciales, que dificultan integrar estas simulaciones dentro de los procesos de optimización.

Sin embargo, este enfoque simplificado (consideración de un único punto de análisis y omisión de la radiación solar de onda corta) puede subestimar los efectos localizados de disconfort térmico, especialmente en áreas cercanas a las ventanas.

En este artículo, se propone analizar la relevancia de incorporar los efectos de la radiación solar en la optimización de ventanas y predicción de su impacto en el confort térmico de los ocupantes; así como evaluar cuántos puntos de análisis son necesarios para una estimación representativa de las variaciones espaciales del confort.

Metodología

El caso de estudio es una oficina hipotética de construcción liviana, ubicada en Mendoza, Argentina. En esta región se registran niveles elevados de irradiación solar, que superan los 2000 kWh/m2 anuales. La oficina tiene una superficie de 18m^2 (6 m x 3 m) y una relación ventana-pared (WWR) del 40%. Se estudió la orientación noreste, que recibe elevados niveles de radiación directa (ZAGO; WESTPHAL, 2022). La composición de la envolvente opaca y sus propiedades se detallan en la tabla 1. Todas las paredes verticales son consideradas adiabáticas, excepto la pared con ventana. Se consideró que la oficina es ocupada todos los días del año de 9:00 a 18:00 por dos personas con una actividad metabólica 1.2 met y un nivel de aislación de vestimenta de 0.7 clo. Cada una de las dos computadoras de escritorio se asumió con un consumo de energía promedio de 180 W, operando durante el horario laboral y apagadas fuera de este horario. La densidad de potencia de iluminación se estableció en 6.9 W/m².

Se utilizó Grasshopper y los plug-ins Honeybee y Ladybug, los cuales han sido ampliamente validados (ABEDINI; GHOLAMI, 2025), para simular un año completo a partir del archivo climático TMY 2009-2023 correspondiente al aeropuerto del Plumerillo (LAWRIE; CRAWLEY, 2022) y computar los porcentajes de horas de ocupación con condiciones de confort, de disconfort por frío y de disconfort por calor, respectivamente, para seis tipos de vidriados de diferentes propiedades opticotérmicas (Tabla 2) calculadas mediante el programa WINDOW 7 del LBNL (Lawrence Berkeley National Laboratory). Se procedió en tres etapas:

1) Simulación simplificada

Se usó para ello el PMV de Fanger, calculado en un solo punto y sin considerar la radiación de onda corta.

2) Simulación detallada

Se usó el PMV de Fanger calculado para una grilla de 50 puntos e incorporando al flujo de trabajo los componentes “LB Human to Sky Relation” e “Indoor Solar MRT". El primer

componente permite estimar el fbes (fracción del cuerpo expuesto a la luz solar directa) y la fracción de la bóveda celeste a la que está expuesto el usuario. El segundo usa estos datos de salida, entre otros parámetros, para calcular la temperatura media radiante (MRT) mediante el modelo de ajuste solar SolarCal (ARENS et al., 2015; ASHRAE, 2017). La MRT resultante sirve de dato de entrada para el cálculo del PMV considerando el efecto de la radiación de onda corta en los usuarios.

3) Análisis del impacto de la resolución

Luego, se analizó cuál es la cantidad de puntos necesaria para una estimación adecuada del confort en espacios irradiados, variando la resolución de la grilla entre 6 m (1 punto) y 0,6 m (50 puntos).

Tabla 1: Características constructivas de la envolvente opaca

	espesor (mm)	conductidad (W/mK)	densidad (kg/m^3)	calor específico (J/kgK)	absortancia térmica	absortancia solar	absortancia visible
muro exterior							
siding	6	0.28	1620	840	0.9	0.7	0.7
placa OSB	15	0.13	650	1700			
espuma de poliuretano	50	0.025	30	1450			
placa OSB	15	0.13	650	1700			
placa de yeso	9.5	0.37	800	1130	0.9	0.3	0.3
muro interior							
placa de yeso	12.5	0.37	800	1130	0.9	0.3	0.3
aire (R=0.18 m^{2}K/W)							
placa de yeso	12.5	0.37	800	1130	0.9	0.3	0.3
techo/piso							
piso de goma	3	0.17	1200	1400	0.9	0.7	0.7
placa OSB	15	0.13	650	1700			
espuma de poliuretano	50	0.025	30	1450			
placa OSB	15	0.13	650	1700			
placa de yeso	9.5	0.37	800	1130	0.9	0.3	0.3

Fuente: Realización propia

Tabla 2: Características de los vidrios analizados: Descripción, Transmitancia solar (Tsol), transmitancia térmica (U) y Factor Solar (FS).

Código	Descripción	Tsol	U	FS
V0	Simple vidrio claro	0.864	5.88	0.881
V1	Doble vidrio hermético claro	0.746	2.87	0.793
V2	Simple vidrio tintado	0.333	5.81	0.526
V3	Doble vidrio hermético tintado	0.298	2.85	0.422
V4	Simple vidrio reflectivo	0.115	5.66	0.201
V5	Doble vidrio hermético reflectivo low-e	0.120	2.08	0.217

Fuente: Realización propia

Los resultados se analizan en términos de Disponibilidad de Confort Térmico (TCA por sus siglas en inglés), correspondiente al porcentaje de horas de ocupación anuales con un PMV comprendido entre -0.5 y 0.5 (ATZERI et al., 2016).

Resultados

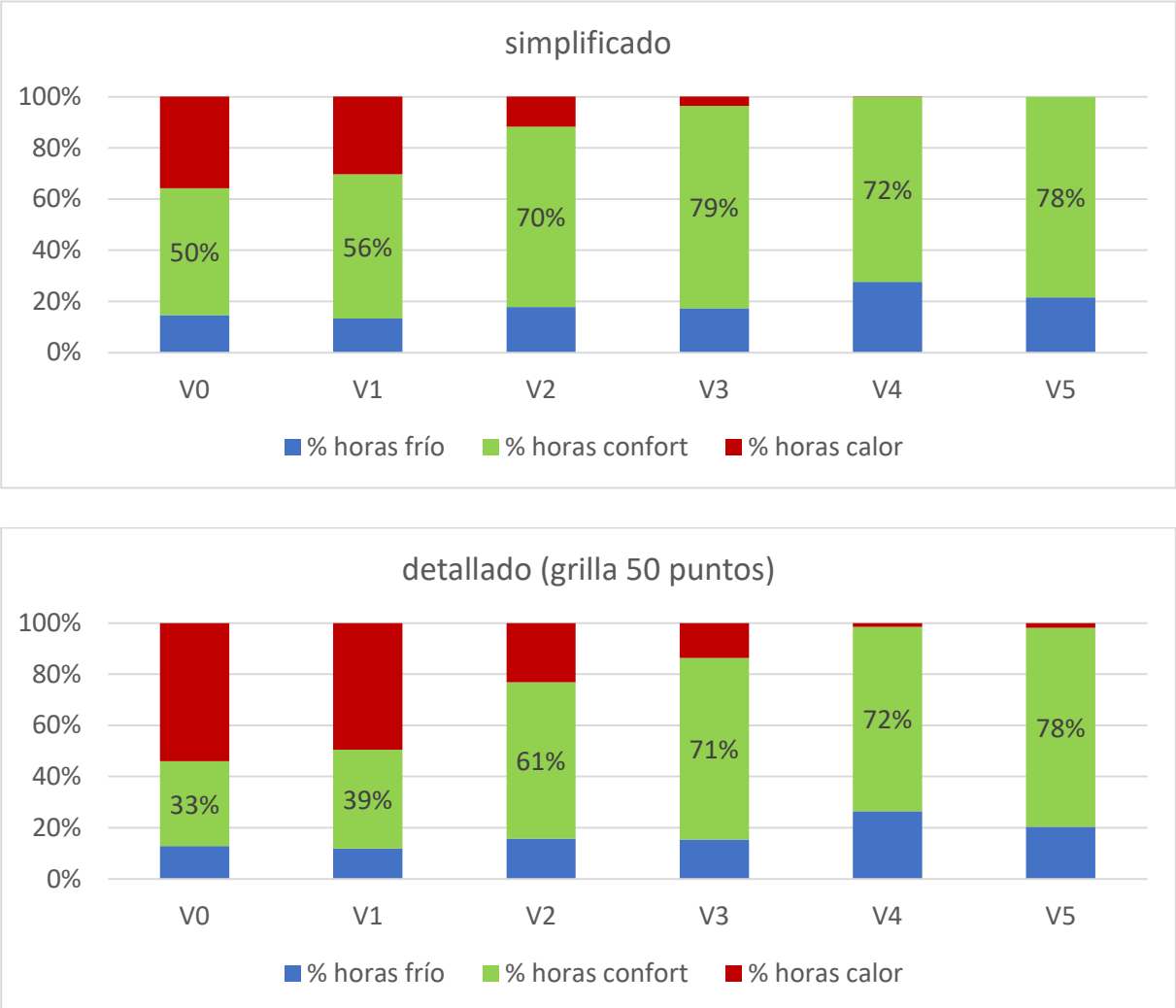
Solución óptima

La figura 1 compara los porcentajes de horas de ocupación con sensaciones de frío, neutral, y de calor, para las diferentes ventanas analizadas, estimados mediante la metodología simplificada (arriba) y mediante la metodología detallada (abajo). Se especifica el porcentaje de horas en condiciones de confort para una lectura más precisa del gráfico.

Los resultados indican que la metodología simplificada subestima las horas de disconfort por calor, indicando 18-19% menos de horas de ocupación con sensación de calor en el caso de los vidrios claros (V0 y V1), 10-11% menos en el caso de los vidrios intermedios (V2 y V3) y 1-2% menos en el caso de los vidrios oscuros (V4 y V5), a comparación con la metodología detallada. Además se sobreestiman las horas de confort en los casos de transmitancia solar elevada a intermedia (V0, V1, V2 y V3). Notablemente, el vidrio que mayor ocurrencia de horas de confort obtiene es diferente según la metodología empleada; con el método simplificado el V3 obtiene el mayor porcentaje de horas de ocupación con sensación térmica neutra, mientras que con la metodología detallada, el V5 se destaca claramente por sobre los demás, con un 78% de confort mientras que el V3 ocupa el tercer puesto con un 71% de horas de confort.

Por lo tanto, utilizar una metodología simplificada puede llevar a una toma de decisión que no sea óptima. Sin embargo, el tiempo de simulación requerido para calcular el confort incorporando el efecto de la radiación de onda corta en los 50 puntos de la grilla, es significativo y puede constituir un obstáculo a la implementación de esta metodología detallada en estudios de optimización. Para discutir cuál podría ser una resolución adecuada, que balancee rapidez y precisión, se analizó el impacto de la resolución en los resultados.

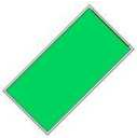
Figura 1: porcentaje de horas de ocupación con sensaciones de frío, neutral, y de calor, estimados mediante la metodología simplificada (arriba) y mediante la metodología detallada (abajo).



Fuente: Realización propia

Impacto de la resolución

Tabla 3: Mapas de TCA (disponibilidad de confort térmico) para distintas resoluciones

	6 m	3 m	2 m	1.5 m	1 m	0.75 m	0.6 m
V0							
V1							
V2							
V3							
V4							
V5							

Fuente: Realización propia

La Tabla 3 muestra las grillas de TCA calculadas considerando el efecto de la radiación de onda corta, con diferentes niveles de resolución, para los seis vidrios analizados. En la grilla de mayor resolución (50 puntos, distanciados de 0,6 m), los vidrios claros V0 y V1 presentan valores muy bajos de disponibilidad de confort térmico cerca de la ventana (alrededor del

12%), en contraste con valores de 46-53% en zonas más alejadas. Estos rangos se mantienen aproximadamente cuando la resolución se reduce progresivamente hasta alcanzar una distancia entre puntos de 2 m (grilla de 6 puntos). En el caso de los vidrios intermedios V2 y V3, los valores mínimos de TCA calculados con la grilla más detallada (33% y 41% respectivamente) se conservan hasta una resolución con distancia entre puntos de 1,5 m (18 puntos), pero a partir de allí aumentan rápidamente hasta acercarse al TCA máximo. En cambio, los vidrios oscuros V4 y V5 presentan valores más homogéneos de TCA en todo el espacio, por lo cual es menos relevante el análisis espacial detallado para estos casos.

TCApromedio, mínimo y máximo

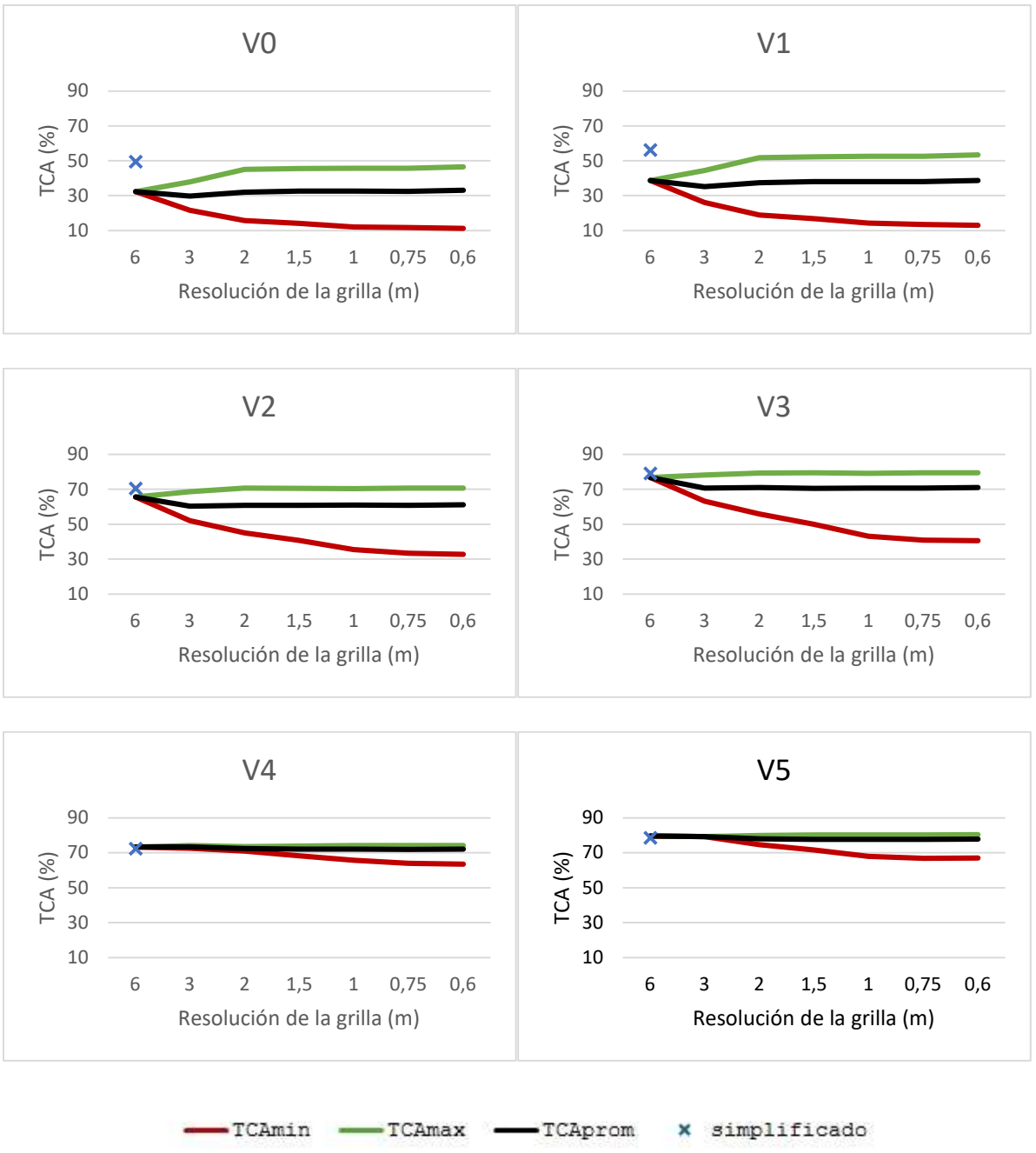
La figura 2 compara los valores mínimo, máximo y promedio (TCAmin, TCAmax y TCAprom, respectivamente) de la disponibilidad de confort térmico, en función de la cantidad de puntos de la grilla, para cada vidrio analizado. Adicionalmente, se representó mediante un punto el valor resultante de la metodología simplificada. Se observa que la estimación de TCAprom y TCAmax converge rápidamente, y que con una resolución de 2 m, se alcanza un valor próximo a la estimación con grilla de 50 puntos. En cambio, la estimación de TCAmin requiere mayor resolución (inferior a 1 m, correspondiente a 18 puntos), debido a que los valores de TCA disminuyen fuertemente a medida que el sensor se acerca a la ventana.

La figura 3 compara las curvas de TCAmin en función de la resolución de la grilla, para los seis vidrios analizados. Se observa que, independientemente de la cantidad de paños (vidrio simple o doble vidriado hermético), las curvas correspondientes a los vidrios claros presentan una curvatura distinta en comparación con las de los vidrios de control solar. En particular, la curva del vidrio V3 llega a cruzarse con la del vidrio V4, lo que altera la jerarquía de desempeño de los vidrios cuando el análisis se centra en un único punto ubicado en el centro del espacio.

Discusión

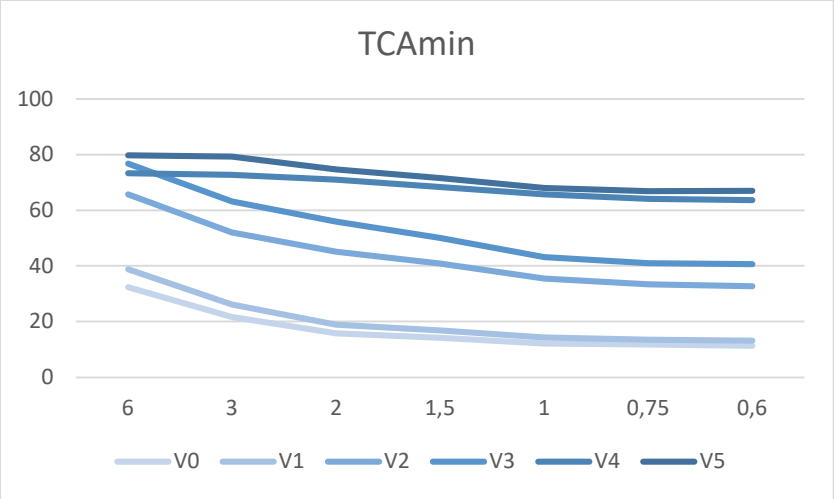
La magnitud del error asociado a la metodología simplificada se relaciona con el factor solar del vidrio. Para los vidrios reflectivos de bajo FS, el resultado es comparable con el valor TCAprom obtenido con el método detallado; en cambio, se sobreestima la disponibilidad de confort térmico promedia, en un 11-15% para los vidrios tintados y 44-52% para los vidrios claros. Además, se evidenció una variación espacial significativa de los valores de TCA para los vidrios V0 a V3, con contrastes importantes entre los puntos más cercanos a la ventana y los puntos más lejanos. Esto remarca la necesidad de analizar el confort en varios puntos del

Figura 2: Impacto de la resolución (en metros) sobre los valores mínimo, máximo y promedio de TCA, para los 6 vidrios analizados. El punto azul representa la estimación del TCA mediante el método simplificado.



Fuente: Realización propia

Figura 3: Curvas de TCA mínimo en función de la resolución, para los 6 vidrios analizados



Fuente: Realización propia

espacio. Si bien una resolución de 2 metros permitió en este caso estimar adecuadamente los valores promedio y máximo de TCA, el valor mínimo de TCA presenta fuertes variaciones a proximidad de la ventana y su correcta evaluación mediante una grilla requiere una resolución elevada. Una alternativa podría ser evaluar dos puntos elegidos de manera a evaluar las condiciones extremas del espacio (uno cerca de la ventana y otro lejos de la misma), o simplemente un punto cercano a la ventana (caso más desfavorable) de manera a asegurar condiciones de confort mínimas en todo el espacio. En caso de conocer la ubicación de los puestos de trabajo, se debería evaluar la disponibilidad de confort térmico específicamente para estos puntos.

Conclusión

Este trabajo resalta la necesidad de metodologías que permitan una evaluación más precisa y localizada del confort térmico en espacios interiores. Destaca la importancia de considerar los efectos de la radiación de onda corta para no subestimar las horas de disconfort en entornos de elevada irradiación solar. Además, dada la significativa variación espacial del confort cuando el factor solar del vidrio es intermedio a elevado, se recomienda un análisis detallado o la evaluación de puntos críticos, que pueden ser las ubicaciones precisas de los puestos de trabajo, o puntos cercanos a las ventanas.

Tal procedimiento permitirá guiar el diseño y selección de aventanamientos en edificios de oficinas y otros espacios con altas demandas de confort térmico, favoreciendo espacios más confortables. La metodología expuesta se podrá integrar en estudios de optimización multi-objetivo de fachadas vidriadas y sistemas de control solar asociados, de manera a analizar en profundidad el efecto de los mismos tanto en el confort térmico interior como en la calidad de la iluminación natural y los consumos energéticos edilicios. Además, estos resultados pueden servir de base de reflexión para desarrollar normativas y criterios de diseño que consideren de manera más precisa la influencia de las ventanas en la calidad del ambiente interior, promoviendo soluciones arquitectónicas que optimicen tanto la eficiencia energética como el bienestar de los ocupantes.

Futuras investigaciones podrían enfocarse en seguir afinando las metodologías de evaluación del confort térmico, explorando modelos más detallados que incluyan el impacto de factores dinámicos como el movimiento del aire y la adaptabilidad de los ocupantes. Asimismo, sería valioso validar estos hallazgos mediante estudios en edificios operativos, analizando datos en tiempo real para fortalecer la aplicabilidad de los resultados en proyectos reales.

Referencias

ABEDINI, M. H.; GHOLAMI, H. Multi-objective Optimization of Window and Shading Systems for Enhanced Office Building Performance : A Case Study in Qom , Iran. **Journal of Daylighting**, v. 12, p. 91–110, 2025.

ARENS, E. et al. Modeling the comfort effects of short-wave solar radiation indoors. **Building and Environment**, v. 88, p. 3–9, 2015.

ASHRAE, A. Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy: ANSI/ASHRAE Standard 55-2017. **American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers Inc, USA**, 2017.

ATZERI, A. M. et al. Comfort metrics for an integrated evaluation of buildings performance. **Energy & Buildings**, v. 127, p. 411–424, 2016.

ATZERI, A. M. **Energy Efficiency, Thermal and Visual Comfort -- Integrated Building Performance Modelling and Measurement**. [s.l: s.n.].

CARLUCCI, S. et al. Multi-objective optimization of a nearly zero-energy building based on

thermal and visual discomfort minimization using a non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA-II). **Energy and Buildings**, v. 104, n. 2015, p. 378–394, 2015.

DE GASTINES, M.; PATTINI, A. Fachadas vidriadas: cálculo de transmitancia térmica. **Hábitat Sustentable**, v. 11, n. 1, p. 8–19, 2021.

DE GASTINES, M.; PATTINI, A. E. Propiedades energéticas de tecnologías de ventanas en Argentina. **Hábitat Sustentable**, v. 9, n. 1, p. 46–57, 2019.

GODBOLE, S. **Investigating The Relationship Between Mean Radiant Temperature (MRT) And Predicted Mean Vote (PMV) A case study in a university building**. [s.l.] KTH Royal Institute of Technology, 2018.

HUANG, L.; ZHAI, Z. (JOHN). Critical review and quantitative evaluation of indoor thermal comfort indices and models incorporating solar radiation effects. **Energy and Buildings**, v. 224, p. 110204, 2020.

HWANG, R.; FANG, P.; CHEN, W. Impact of solar radiation on indoor thermal comfort near highly glazed façades in a hot-humid subtropical climate : An experimental evaluation. **Building and Environment**, v. 243, n. August, p. 110725, 2023.

LAWRIE, L. K.; CRAWLEY, D. B. Development of Global Typical Meteorological Years (TMYx). https://climate.onebuilding.org. **(paper in progress).**, 2022.

NAVARRO, A. L. et al. **Occupant-Centred Control strategies for Adaptive Facades : A preliminary study of the impact of shortwave solar radiation on thermal comfort**. International Building Performance Simulation Association - IBPSA. **Anais**...2019

PINTO, M. M.; WESTPHAL, F. S. **Avaliação de conforto térmico em estações de trabalho localizadas próximo a fachadas envidraçadas: Modelos de ajuste solar**. XVI ENCAC/XII ELACAC. **Anais**...2021

SONG, B.; BAI, L.; YANG, L. The Effects of Exterior Glazing on Human Thermal Comfort in Office Buildings. **Energies**, 2024.

ZAGO, A. C.; WESTPHAL, F. S. **Influência da absorção de vidros de controle solar no consumo de energia para climatização de um edifício de escritórios**. XIX Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. **Anais**...2022

ZHAI, Y. et al. A multi-objective optimization methodology for window design considering energy consumption, thermal environment and visual performance. **Renewable Energy**, v. 134, p. 1190–1199, 2019.