

AHORRO ENERGÉTICO EN SUPERFICIES VIDRIADAS USANDO LÁMINAS DE CONTROL SOLAR Y TÉRMICO

Natalia Muñoz¹, Luis P. Thomas², Beatriz M. Marino²

¹ Investigadora de la CICIPBA;

² Investigador del CONICET

Grupo Flujos Geofísicos y Ambientales - Centro de Investigaciones en Física e Ingeniería del Centro de la Provincia de Buenos Aires (CONICET - UNCPBA - CICIPBA) - Pinto 399, 7000 Tandil
Tel. 0249-4385650 int. 2160 / 2159 - e-mail: lthomas@exa.unicen.edu.ar

Recibido 08/2024; Aceptado 12/2024

RESUMEN.- Se presentan resultados numéricos del balance energético en un edificio ubicado en la zona Templada Fría con el objetivo de analizar el desempeño de láminas de control térmico aplicadas sobre las superficies vidriadas. Láminas de baja emisividad se colocan sobre las caras internas, y de alta reflectividad sobre las externas. Se considera un escenario en el que la temperatura interna se mantiene constante y otro en el que no se restringe el valor de la misma. Según la planta y la orientación de las fachadas, se calculan la radiación solar entrante directa y la difusa por unidad de área, y el flujo de calor a través del acristalamiento. Se encuentra que las láminas de baja emisividad generan una reducción de la energía requerida para mantener condiciones óptimas de habitabilidad todo el año, tanto cuando se las aplica a DVH como a vidrios simples, disminuyendo la radiación solar en verano a casi la tercera parte. El ahorro energético total usando láminas externas es 85% menor en comparación con el uso de acristalamientos transparentes o solo láminas de baja emisividad, generando el máximo ahorro en verano y la necesidad de mayor calefacción en invierno.

Palabras clave: flujos de calor, acristalamientos, eficiencia energética.

ENERGY SAVING IN GLAZED SURFACES BY USING SOLAR AND THERMAL CONTROL FILMS

ABSTRACT.- Energy balance numerical results corresponding to a building located in a Temperate Cold bioclimatic zone are presented. Our purpose is to analyse the performance of thermal control films applied onto glazed surfaces. Low emissivity films are placed on the internal glazed faces and high reflectivity films are placed on the external ones. One scenario in which the internal temperature remains constant and another in which the value of this temperature is not restricted are considered. According to the floor and facades orientation, the entering direct solar radiation, the diffuse radiation per surface unit, and the heat flux through the glazing are calculated. We found that the low emissivity films produce a reduction in the energy required to provide optimal habitability conditions throughout the year when they are installed on simple and double glazed windows, reducing the solar radiation to a third in summer. The total energy savings by using the external films is 85% less than that produced by using transparent windows or just low emissivity films, generating the maximum saving in summer and the need for more heating in winter.

Keywords: heat flux, glazing, energy efficiency.

1. INTRODUCCIÓN

Los elementos vidriados de un edificio pueden impactar positivamente en la calidad luminosa del ambiente interior brindando luz natural y una vista del exterior a los ocupantes. Sin embargo, los edificios con grandes superficies vidriadas tienden a sufrir sobrecalentamiento en verano debido a ganancias solares excesivas (Ávila y Arias, 2015; De Gastines et al., 2023). Los vidrios transparentes sin elementos de protección solar, como cortinas y parasoles, pueden producir niveles extremos de iluminación y deslumbramiento interiores que se traducen en incomodidad para

los ocupantes (Muraj y Ostojić, 2023). Además, la radiación ultravioleta (UV) que atraviesa el vidrio puede generar daño ocular y decoloración del mobiliario (Frederick y van Kuijk, 1991; Andrady et al., 2023). Por otra parte, los vidrios tienen mayor transmitancia térmica que las superficies opacas generando pérdidas importantes de calor lo cual redundará en una excesiva demanda de energía.

Estos problemas pueden superarse en los edificios nuevos instalando superficies vidriadas de doble o triple vidriado hermético, y/o con recubrimientos de control solar (Fernández y Garzón,

2024; Pereira et al., 2022). En los edificios antiguos, sin embargo, un cambio completo de las superficies vidriadas (y usualmente también de los marcos de las aberturas) conlleva un costo elevado. Una solución pasiva y económica para mejorar significativamente las prestaciones de los acristalamientos consiste en la instalación de películas transparentes para el control de la radiación solar en las superficies internas y/o externas de los vidrios (EWFA, 2016; Moghaddam et al., 2021). Ellas disminuyen selectivamente los niveles de luz natural y de radiación infrarroja (IR) y UV que atraviesan el acristalamiento, y reducen también la pérdida de calor en invierno. La adecuada elección de las láminas mejora el rendimiento global del edificio al optimizar el uso de energía y el confort interior de acuerdo al clima local (Bahadori-Jahromi et al., 2017; Sedaghat et al., 2020).

La energía solar que atraviesa las superficies acristaladas se caracteriza mediante el coeficiente de ganancia de calor solar SHGC (ASHRAE, 2021), por sus siglas en inglés, o g (ISO 19467, 2017) y la transmitancia total de energía solar (TSET). Hay pequeñas diferencias entre estos parámetros debidas a diferentes condiciones de referencia (en el espectro solar de referencia, si se considera el marco o no, etc.). Muchos países los han incluido en el etiquetado energético de las ventanas, aunque en Argentina aún no hay muchos estudios sobre el tema.

En este artículo se analiza el desempeño de láminas aplicadas a los acristalamientos transparentes de un edificio tomado como caso de estudio, ubicado en la zona bioclimática IVc □ Templada Fría de transición (IRAM 11603, 2012), mediante los balances energéticos obtenidos en simulaciones realizadas con el software Energy Plus (2024). Debido a los inviernos fríos de la región, el edificio fue diseñado con una importante superficie vidriada que involucra el 72 % de la fachada NO, y en menor medida en las fachadas NE y SO, para captar una buena parte de la energía solar. Los ventanales con doble vidriado hermético (DVH) disminuyen el calor perdido en invierno y no cuentan con celosías, postigos ni persianas; aleros protegen el interior parcialmente del sol durante el mediodía estival. Este tipo de diseño, habitual en la región, conlleva una excesiva ganancia solar y deslumbramiento en verano que suelen generar interiores poco confortables.

Marino et al. (2018) calcularon numéricamente y validaron experimentalmente los flujos de calor a través de todas las superficies que constituyen la envolvente del edificio (i.e., paredes, techo, piso y superficies vidriadas) para el año 2017, considerando las condiciones normales de uso y las meteorológicas y las mediciones de temperatura y humedad relativa interiores. Los valores exteriores de temperatura, humedad, velocidad y dirección del viento y radiación solar se habían obtenido de una estación meteorológica ubicada en las cercanías. Además, Marino et al. (2019) mostraron la concordancia entre la evolución de la temperatura interna del edificio obtenida numéricamente con las mediciones in situ, validando así el código numérico empleado. El objetivo del presente estudio es, aprovechando los resultados de Marino et al. (2018, 2019), analizar, para el mismo año, el desempeño energético del edificio cuando se aplican a las superficies DVH dos tipos de láminas: una exterior para reducir parcialmente la radiación visible (V) e IR, y otra interior de baja emisividad (*low-e*) para disminuir la pérdida de calor en invierno. Dado que son láminas de poliéster, ambas reducen significativamente la radiación UV. La primera lámina es aconsejable por la gran superficie vidriada del edificio y la falta de confort interior generado en verano, mientras la segunda es recomendada para los climas fríos

o templado-fríos para disminuir el consumo de calefacción. También se considera el caso en el que todas las superficies vidriadas fueran de vidrio simple (VS).

En la próxima sección se introducen los principios teóricos básicos asociados y luego se describe la metodología empleada caracterizando el edificio analizado y sus acristalamientos, y las láminas cuya eficiencia de desea determinar. También se refiere la simulación de los balances energéticos diarios determinados con el programa Energy Plus. A continuación, se presentan y discuten los resultados para distintos escenarios y, finalmente, se exponen las conclusiones.

2. BASES TEÓRICAS

El intercambio de energía entre el exterior e interior de un edificio se produce por conducción, convección y radiación. Las normas IRAM dan cuenta especialmente de los primeros dos mecanismos, pero el presente estudio se enfoca en el intercambio radiativo a través de superficies transparentes. Con cielo claro, la energía solar que llega al suelo consta de aproximadamente 3% de radiación UV, 55% de radiación IR y 42% radiación V. Cada una de estas componentes de la radiación solar corresponde a un rango de longitudes de onda:

UV: 0.28 - 0,38 μm , V: 0.38 (violeta) - 0.78 μm (rojo), IR: 0.78 -2.5 μm .

La ubicación y altura de emplazamiento del edificio, las condiciones meteorológicas y la cantidad y variedad de partículas suspendidas en el aire modifican estos valores. La radiación IR se manifiesta como calor y la UV es la que puede causar quemaduras de la piel, decoloración del mobiliario y problemas oculares.

Por otra parte, el espectro de emisión de un cuerpo a temperatura ambiente tiene un máximo próximo a 10 μm , valor que corresponde a la radiación IR con un rango de longitudes de onda diferente a la IR solar, por lo que suele llamársela IR “térmica” (i.e., emitida por cuerpos a temperatura ambiente), “de onda larga” (i.e., de longitudes de onda mayores a la de IR solar) o “lejana” (a la radiación V) para distinguirla de la IR solar (o “cercana”).

Cuando la radiación solar incide en el vidrio, en parte se refleja, en parte se absorbe en el cuerpo del vidrio y en parte se transmite. La relación entre la radiación reflejada, la absorbida y la transmitida con la radiación solar incidente definen la reflectividad, la absorbancia y la transmitancia del material, respectivamente. Estos factores son afectados por el ángulo de incidencia, la composición y espesor del vidrio y la naturaleza del recubrimiento en el caso de un vidrio con tratamiento superficial. Los vidrios comunes (silicatos sódicos) transmiten la mayor parte de la radiación solar V e IR, son parcialmente transparentes a una parte de la radiación UV y bastante opacos a la radiación IR lejana. En general, la transmitancia es del 90-92% para la radiación V, 80-85 % para la UV e IR solar, y alrededor de 10% para la IR lejana. En resumen, los vidrios dejan pasar la mayor parte de la energía solar pero solo una parte pequeña de la radiación térmica. Por lo tanto, la energía solar ingresa mayormente al interior de los ambientes por las superficies vidriadas, y se pierde solo una pequeña parte de ésta por la emisión de radiación térmica de los objetos interiores. Este efecto se conoce como “efecto invernadero”.

Otro aspecto interesante lo constituye el balance de la radiación IR térmica. Como la energía de la radiación emitida por los cuerpos

depende de su temperatura a la cuarta potencia, una diferencia pequeña entre las temperaturas externa e interna conlleva un desbalance radiativo significativo entre la energía que ingresa y la que sale. Si el exterior está a menor temperatura que el interior (como ocurre en invierno) se perderá energía por radiación térmica. Las láminas colocadas en los acristalamientos pueden mejorar este efecto reduciendo la transmitancia de la radiación IR térmica. Para ello, las láminas deben colocarse en la cara interna de los acristalamientos y tener una emisividad lo más pequeña posible; por ello se las denomina *láminas de baja emisividad* o “*low-e*”. También pueden contribuir a disminuir las pérdidas de calor por conducción si presentan baja conductividad del calor.

Debe tenerse en cuenta que los vidrios transparentes y las láminas absorben parte de la energía solar recibida y calientan las superficies internas que reemiten el calor atrapado. Por lo tanto, las láminas, especialmente las que se instalan sobre la cara interna, pueden hacer que los cristales absorban energía aumentando su temperatura y generando dilataciones y tensiones que pueden romperlos si los marcos no están convenientemente preparados.

3. METODOLOGÍA

3.1. Caracterización del caso de estudio y superficies vidriadas

El edificio modelado está ubicado en la ciudad de Tandil, Provincia de Buenos Aires; el terreno tiene pendiente y un particular entorno protegido de los vientos de SE (Muñoz et al., 2022). El clima local es templado-frío de transición según la norma IRAM 11603 (2012). El período durante el que se usa enfriamiento mecánico está comprendido entre el 22 de noviembre y el 5 de marzo (104 días), y el período de calefacción está comprendido entre el 12 de abril y el 24 de octubre (195 días) según la norma IRAM 11900.

Al ser el período de calefacción mayor que el período de refrigeración, las recomendaciones generales de diseño de las construcciones incluyen una buena aislación de la envolvente, una orientación favorable al NO-N-NE-E, y condiciones mínimas de asoleamiento invernal para asegurar niveles mínimos de aporte de energía solar (IRAM 11603, 2012). Además, se recomienda balancear el adecuado aprovechamiento de la energía solar en invierno y el sobrecalentamiento del interior en verano usando parasoles, vegetación, etc. Para el edificio analizado, estas recomendaciones fueron implementadas mediante el uso de muros dobles con aislación interna y superficies vidriadas DVH en la envolvente vertical, cuyas áreas por fachada se muestran en la Tabla 1.

El edificio cuenta con una importante superficie vidriada con parasoles en la fachada NO con una relación vidrio/muro de 2.53. Para las otras fachadas, dicha relación es ligeramente superior a 1, excepto la planta alta (PA) de la pared orientada al SE. Esta configuración permite capturar una buena parte de la radiación solar que disminuye el uso de calefacción en invierno, aunque se verifica un sobrecalentamiento interno en verano.

El edificio consta de una estructura principal o hall central de base cuadrada y altura de dos pisos que funciona como una zona térmica única (Muñoz et al., 2014). El techo tiene buena aislación y una lucarna de 25 m² cuyo efecto sobre el balance energético se considerará en otro trabajo para simplificar el presente análisis, lo mismo que la influencia de las estructuras cilíndricas ubicadas en cada esquina del edificio.

3.2. Caracterización de las láminas

Las láminas aplicadas sobre las superficies vidriadas internas son *Termax Balance* y aquellas sobre las superficies externas son las

Tabla 1. Áreas (en m²) de las superficies vidriadas y los muros del edificio analizado. Los números que acompañan a DVH corresponden a los anchos del marco interno, del vidrio y del marco externo.

| Fachada | | | DVH 3/6/2003 | DVH 3/12/2003 | VS | Muros | Relación Vidrio/Muro |
|---------|----|------------------|-----------------|------------------|------|-------|-------------------------|
| NO | PB | Puerta principal | | | 9.36 | 25.92 | 2.53 |
| | | Paños fijos | 37.44 | | | | |
| | | Puertas | | 18.72 | | | |
| | PA | Paños fijos | 65.52 | | | 25.92 | 2.53 |
| NE | PB | Ventanas | 9.36 | | | 25.92 | 1.08 |
| | | Paños fijos | | 9.36 | | | |
| | | Puertas | | 9.36 | | | |
| | PA | Paños fijos | 18.72 | | | 40.32 | 1.04 |
| | | Ventanas | | 23.04 | | | |
| SE | PB | Ventanas | | 28.8 | | 43.92 | 1.08 |
| | | Paños fijos | 9.36 | | | | |
| | | Puertas | | 9.36 | | | |
| | PA | Paños fijos | 18.72 | | | 50.76 | 0.80 |
| | | Ventanas | | 21.96 | | | |
| SO | PB | Ventanas | | 23.04 | | 40.32 | 1.04 |
| | | Paños fijos | 18.72 | | | | |
| | PA | Ventanas | | 23.04 | | 40.32 | 1.04 |
| | | Paños fijos | 18.72 | | | | |

Termax Prisma 40 (Termax Shop, 2024). En la Tabla 2 se presentan las propiedades térmicas de los acristalamientos en el UV (en la longitud de onda de 365 nm), en el V (en 550 nm) y en el IR (en 950 nm), con y sin las láminas, medidas con un fotómetro (*Solar Film Transmission Metter*) LS 101, con resolución 0.1% y exactitud 2%. Los valores medidos confirman que la reducción de la radiación UV es escasa cuando se instalan solo VS o DVH, mientras que es muy significativa ($> 93\%$) cuando se aplica a ellos cualquiera de las láminas. Además, ambas láminas logran una importante reducción de la radiación IR solar aunque el efecto es un poco mayor con *Prisma 40*. Por su parte, *Prisma 40* reduce el ingreso de luz visible en mayor medida. Como consecuencia, la energía solar que atraviesa el vidrio disminuye a casi la tercera parte al instalarse la lámina *Termax Balance* y a la cuarta parte con la *Termax Prisma 40*.

3.3. Simulación de los balances energéticos con Energy Plus

El cálculo de los flujos de calor requiere determinar, para las superficies vidriadas, la transmitancia térmica o *U-value*, la conductividad térmica λ , la densidad ρ , la capacidad calorífica C_p y el espesor e . Al tratarse de superficies transparentes, también se deben especificar la transmitancia de la luz visible (VLT), la reflectancia en el IR cercano (IRR), la reflectancia en el UV de la radiación solar (UVR), y g (norma ISO) o SHGC (ASHRAE) así como la transmitancia de la radiación IR térmica o lejana y la emisividad ε para cada cara del vidrio puesto que la transferencia de calor por radiación entre dos cuerpos a diferentes temperaturas es proporcional a la emisividad de dichos cuerpos. Las características superficiales de los acristalamientos dependen de e , las que son modificadas con la instalación de las láminas autoadherentes. Las características de los paneles de vidrio se especifican para luz natural con incidencia normal. Los valores introducidos en el programa son: $\lambda = 1.05 \text{ W/m K}$, $\rho = 2500 \text{ kg/m}^3$, $C_p = 725 \text{ J/g K}$, $U\text{-value} = 5.85 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ y $\varepsilon = 0.92$ para la radiación IR térmica.

Todos los datos se ingresan en el programa Energy Plus especificando el "lado frontal" o el lado más cercano al exterior, y el "lado trasero" o el más cercano al interior del edificio. Los datos relacionados con las superficies DVH se ingresan especificando las características de los dos paños de vidrio y la de la cámara estanca interior.

Dos escenarios son considerados. En primer lugar, se simula aquel en el que la temperatura es constante en todas las zonas térmicas mantenida por sistemas HVAC duales (calefacción y refrigeración). La temperatura interior establecida es 24°C para el periodo estival, y 20°C para el invernal. Considerar uniforme a la temperatura interior permite establecer la misma diferencia de temperatura interior-exterior para todos los acristalamientos, y estudiar los

efectos del intercambio energético según la radiación recibida de acuerdo a la localización y orientación del acristalamiento.

El segundo escenario considera la temperatura interna variable. En este caso se emplean los valores del calor generado por la calefacción en 2017 calculados por Marino et al. (2019), necesarios para mantener el interior con un confort aceptable en invierno considerando superficies DVH. Si se usa el mismo nivel de calefacción y se cambia el tipo de acristalamiento, las condiciones térmicas interiores varían.

Para cada escenario, según la planta y la orientación de las fachadas, se calculan:

- la radiación solar directa y difusa por unidad de área que ingresa al interior.
- el calor neto por unidad de área (o flujo de calor) a través del acristalamiento.

La incorporación de la luz difusa es especialmente importante para tener en cuenta la energía transmitida en las caras que no reciben luz directa, o la reciben solo algunas horas al día, sea por la posición relativa entre el sol y la superficie, o bien por las sombras generadas por parasoles, etc. Los valores negativos del flujo de calor implican flujo saliente e incluye la radiación solar transmitida, el calor convectivo y la IR neta transmitida (que incluye la IR térmica y la IR de onda corta procedente de las luces y la radiación solar interior difusa). Los valores por unidad de área permiten comparar el balance térmico independientemente del área de las aberturas vidriadas existentes. Luego, la multiplicación por las correspondientes áreas superficiales determina el aporte de energía solar al interior y el calor intercambiado por conducción.

Con el fin de obtener valores característicos que no sean afectados por eventos meteorológicos particulares, se calculan los valores de radiación solar transmitida, calor y temperatura interna del "día promedio" de cada mes promediando los valores en cada hora durante los días del mes considerado. Con ello se obtienen los valores medios desde las 0:00 h a las 23:00 h de cada mes, y la integración desde 0 a 24 h permite hallar los valores promedios diarios de cada mes. En particular, se describen los meses de diciembre y junio donde se alcanzan la mayor y la menor irradiancia solar, respectivamente.

4. METODOLOGÍA

Las Figuras 1(a) y 1(b) muestran el balance energético dado por la potencia P (o calor por unidad de superficie) en los días promedio

Tabla 2. Principales parámetros de las superficies vidriadas.

UVR: Reflectancia en el UV, IRR: Reflectancia en el IR, VTL: Transmitancia de la luz visible, g : coeficiente de ganancia de calor solar

| | UVR | IRR | VLT | g | VLT/ g |
|-----------------|------|------|------|------|----------|
| VS | 15.5 | 18.6 | 90.6 | 0.85 | 1.06 |
| VS + Balance | 93.4 | 89.3 | 64.5 | 0.33 | 1.94 |
| VS + Prisma 40 | 98.5 | 95 | 41.2 | 0.20 | 2.05 |
| DVH | 25.6 | 28.4 | 79.7 | 0.75 | 1.06 |
| DVH + Balance | 94.2 | 90.6 | 56.8 | 0.29 | 1.94 |
| DVH + Prisma 40 | 98.7 | 95.6 | 36.3 | 0.18 | 2.05 |

de diciembre y junio, respectivamente, cuando la temperatura interior es constante, considerando superficies DVH (caso 1), DVH con láminas *Termax Balance* (caso 2) y DVH con láminas *Termax Prisma 40* (caso 3). En todos los casos se observa que el balance es negativo (se pierde energía) durante la noche puesto que la temperatura interior T_i es mayor que la exterior T_e . En diciembre hay

una importante contribución de la energía solar transmitida en la fachada SO respecto a las de las otras fachadas debido a que esta orientación permite una mayor captura de la radiación solar por la tarde, Figura 1(a₁). De igual forma, la fachada NE recibe una buena contribución solar por la mañana. Por el contrario, la contribución de la radiación solar directa en la cara NO es insignificante.

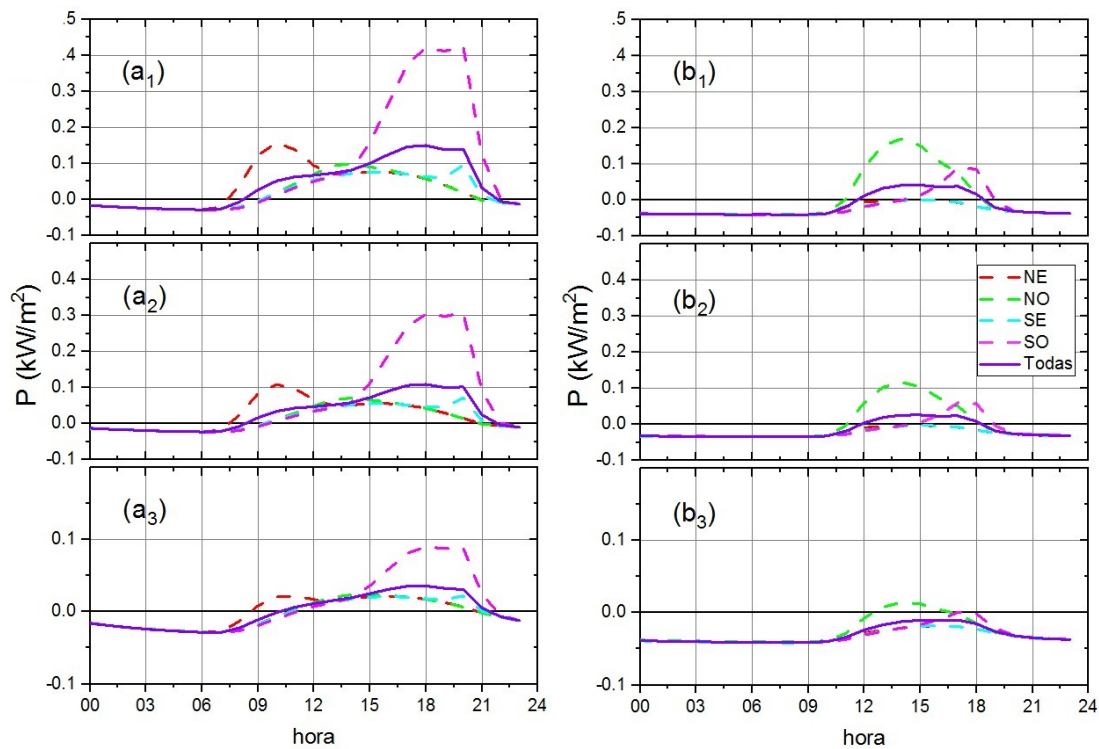


Fig 1. Flujo de calor en los días promedio de (a) diciembre y (b) junio para los acristalamientos (1): DVH, (2): DVH + Balance y (3): DVH + Prisma 40, con temperatura interior constante.

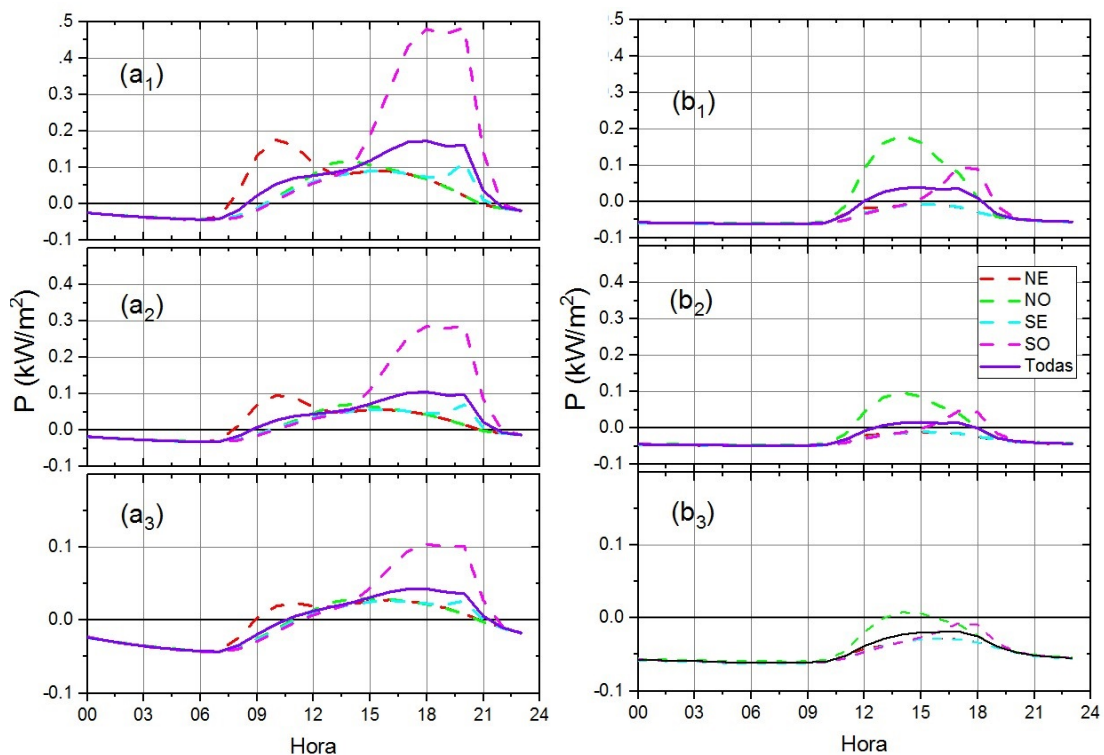


Fig 2. Ídem Figura 1 para los acristalamientos (1): VS, (2): VS + Balance y (3): VS + Prisma 40.

nificante pues los rayos solares inciden paralelos a la superficie y/o son detenidos por los aleros de la fachada principal, de modo que el aporte solar a través de estos vidrios se reduce a la radiación difusa como ocurre en la fachada SE. La situación cambia en junio, Figura 1(b₁), donde predomina la contribución solar directa de la fachada NO.

Las Figuras 1(a₂) y 1(b₂) muestran que la instalación de la lámina *Termax Balance* en los vidrios DVH reduce el ingreso de energía solar pero también las pérdidas nocturnas, tendiendo a mejorar las prestaciones de los acristalamientos tanto en verano como en invierno. Por otra parte, si se colocan las láminas *Termax Prisma 40*, el ingreso diurno de energía solar disminuye significativamente, aumentando también las pérdidas, Figuras 1(a₃) y 1(b₃), de modo que el resultado final implica una mejora apreciable del confort en

verano pero un deterioro del balance energético en invierno.

Para fines de comparación, también se simuló la evolución energética del edificio en el hipotético caso en el que todas las superficies transparentes fueran VS. Los resultados se muestran en la Figura 2. Respecto del caso de los acristalamientos DVH, las Figuras 2(a₁) y 2(b₁) muestran que instalar VS implica una mayor ganancia solar diurna pero también una mayor pérdida nocturna, resultando una tendencia a aumentar el sobrecalentamiento en verano y la necesidad de calefacción en invierno, como era de esperar. La instalación de las láminas tiende a cambiar el comportamiento energético del VS de la misma forma que con los DVH. En particular, la lámina *Balance* mejora las prestaciones de los vidrios simples tanto en verano como en invierno, mientras que la lámina *Prisma 40* las mejora en verano aunque las empeora en invierno.

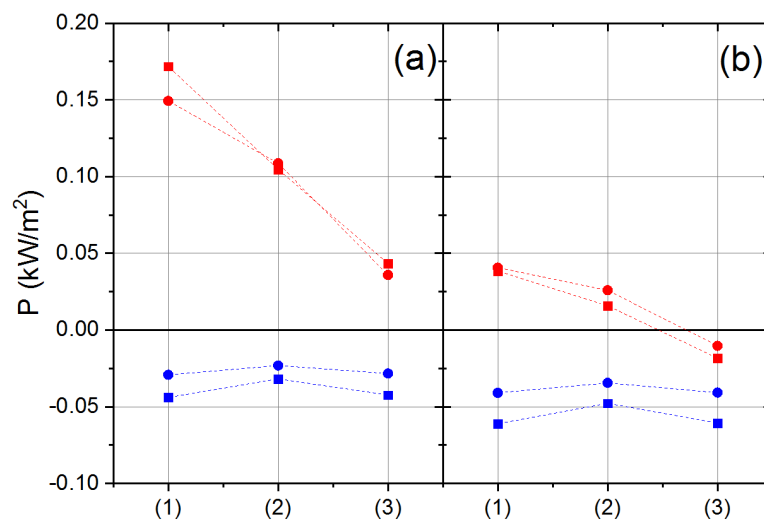


Fig 3. Flujo de calor en los días promedio máximo (puntos rojos) y obtenido a las 6:00 h (puntos azules), en diciembre (a) y en junio (b) para acristalamientos DVH (círculos) y VS (cuadrados) para los casos: (1) sin láminas, (2) con lámina Balance y (3) con lámina Prisma 40.

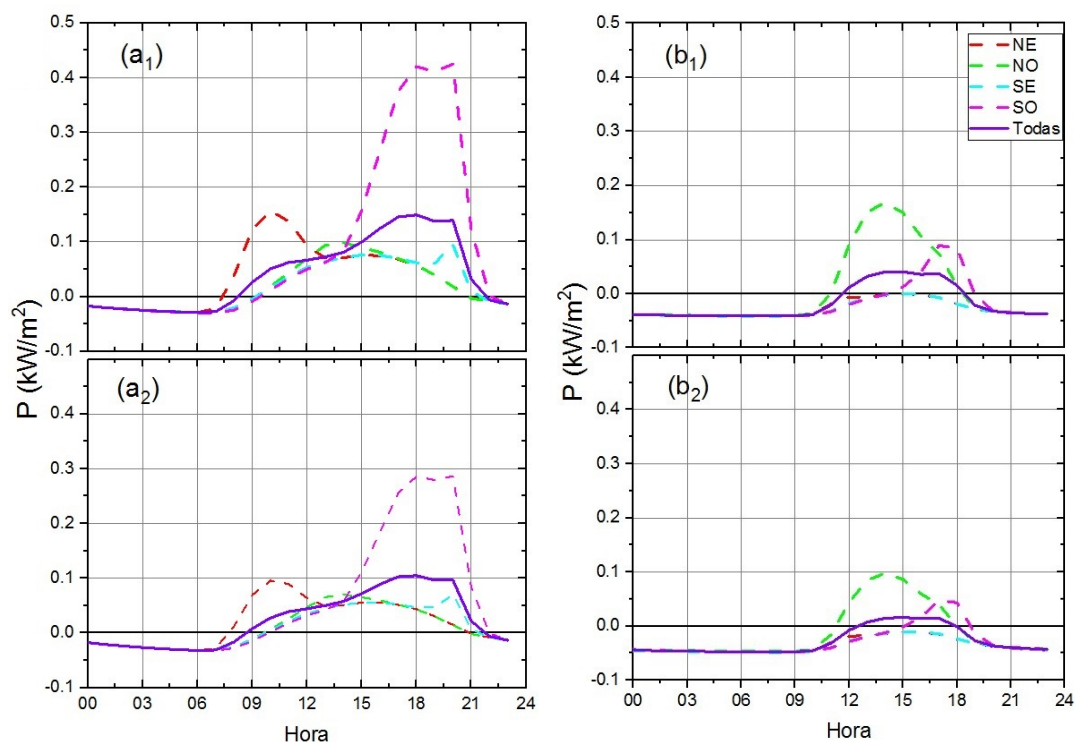


Fig 4. Flujo de calor en los días promedio de (a) diciembre y (b) junio, para los acristalamientos (1): DVH y (2): VS + Balance.

A modo de resumen, en la Figura 3 se representan los valores de P máximos y los tomados a las 6:00 h (prácticamente los valores mínimos) correspondientes a diciembre y junio. En ausencia de láminas (caso 1), se observa que los acristalamientos VS presentan un máximo más grande y un mínimo más pequeño que los DVH. La lámina *Balance* (caso 2) reduce el calor máximo que ingresa al interior en verano e invierno, y también reduce el calor que se pierde en verano e invierno durante la noche respecto del caso 1. La lámina *Prisma 40* reduce mucho más el calor máximo que ingresa al interior en verano e incluso se revierte (i. e., hay una pérdida de energía diurna) en invierno, mientras que los valores mínimos son similares a los de DVH sin láminas. Lo mismo ocurre si todas las superficies vidriadas fueran VS.

Para facilitar la comparación del desempeño térmico de los acristalamientos en los casos analizados, en la Figura 4 se reproducen los gráficos de las Figuras 1 y 2 correspondientes a DVH sin láminas y a VS con lámina *Balance* (*low-e*). Se observa una analogía en el balance energético de ambos casos para diciembre (Figuras 4a1 y 4a2) y junio (Figuras 4b1 y 4b2). La cantidad mínima de calor transmitido durante la noche por los acristalamientos DVH es similar al transmitido por los VS + *Balance* pero la ganancia de calor en las horas diurnas es mayor, tanto en diciembre como en junio. Por lo tanto, el vidrio simple con lámina *Balance* es mejor que el DVH en verano y lo inverso ocurre en invierno, independientemente de la orientación de los acristalamientos.

La Figura 5 muestra el gasto energético necesario para mantener T_i constante en todas las zonas durante todo el año. Para acristalamientos DVH y VS, la calefacción es necesaria desde abril a octubre, con un máximo en los meses de junio y julio como es de esperar, mientras la refrigeración del edificio es necesaria desde diciembre a febrero. La energía requerida es pequeña entre marzo y noviembre; por lo tanto, se podría obtener un confort interior razonable sin encender

el sistema HVAC para las condiciones meteorológicas normales en estos meses. El agregado de láminas *Balance* reduce levemente la energía requerida en los meses estivales, mientras mantiene sin cambios la necesaria en invierno. Esto último se debe a que la reducción de la energía perdida por radiación térmica compensa la reducción de la energía solar ingresada. Finalmente, la lámina *Prisma 40* reduce significativamente la energía requerida en los meses de verano, pero incrementa la calefacción necesaria en invierno. Los resultados se resumen en la Tabla 3. La instalación de la lámina *Balance* permite reducir al 98% la energía total necesaria durante todo el año para acristalamientos DVH, y al 96% para VS. La lámina *Prisma 40* aumenta (~8%) la energía total requerida en el año, a pesar de la reducción de la refrigeración necesaria en verano.

Cuando T_i se considera variable en cada zona térmica, esta temperatura alcanza en verano el valor apropiado para lograr el balance energético global del edificio de acuerdo al acristalamiento empleado y las transferencias de calor entre las zonas internas. Por brevedad, solo se muestran los resultados correspondientes a la evolución de T_i en el hall central que ocupa la mayor parte del edificio. Las Figuras 6(a) y 6(b) muestran T_i durante el día promedio de diciembre sin ningún tipo de enfriamiento mecánico (el edificio no cuenta con un sistema central de aire acondicionado). En la situación que contempla solo la instalación de DVH (línea negra continua), T_i varía entre 26.0 y 27.5°C; aplicando al DVH la lámina *Balance* T_i es aproximadamente 0.5°C menor, mientras que aplicando al DVH la lámina *Prisma 40* (línea roja continua) T_i es 2°C menor. Lo mismo se obtiene si solo se consideran acristalamientos VS (líneas discontinuas).

Las Figuras 6(c) y 6(d) muestran a T_i en el día promedio de junio. Puesto que la energía entregada para calefacción es la misma en todos los casos, el diferente intercambio energético entre el inte-

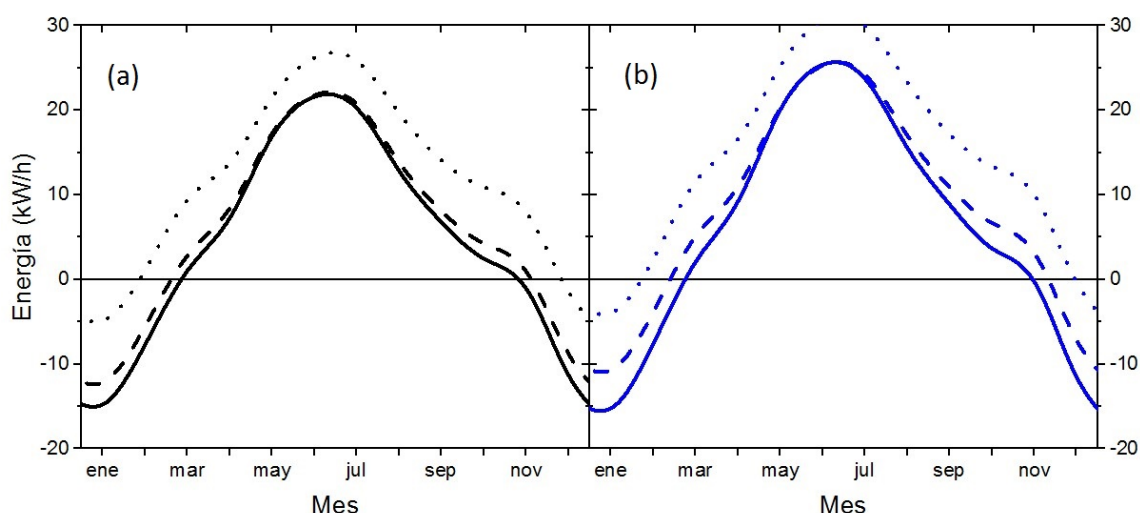


Fig. 5. Energía entregada por mes por el sistema HVAC para mantener T_i constante cuando se instalan acristalamientos (a): DVH y (b): VS. Las líneas continuas corresponden a vidrios sin láminas, las líneas de trazos a vidrios con *Balance*, y las líneas punteadas a vidrios con *Prisma 40*. La energía entregada para calefacción se representa con valores positivos mientras que la entregada para refrigeración con valores negativos.

Tabla 3. Energía (en kWh) anual requerida para mantener la temperatura interior.

| | DVH | DVH + <i>Balance</i> | DVH + <i>Prisma 40</i> | VS | VS + <i>Balance</i> | DVH + <i>Prisma 40</i> |
|---------------|-------|-------------------------|---------------------------|-------|------------------------|---------------------------|
| Calefacción | 92.1 | 102.0 | 153.9 | 112.8 | 127.6 | 183.9 |
| Refrigeración | 67.7 | 54.9 | 19.3 | 69.8 | 47.6 | 15.8 |
| Total | 159.8 | 156.9 | 173.2 | 182.6 | 175.2 | 199.7 |
| | | 98% | 108% | | 96% | 109% |

rior y el exterior se manifiesta a través de T_i . La instalación de la lámina *Prisma 40* no cambia significativamente T_i (Figura 6c) ya sea que se la aplique a superficies DVH o VS. Por otra parte, T_i alcanza 1°C más con la lámina *Balance* ya sea que se la aplique a superficies DVH o VS. Es interesante notar que VS + *Balance* reproduce aproximadamente la situación de DVH.

5. CONCLUSIONES

A través de resultados numéricos se analizan los efectos sobre el comportamiento térmico de un edificio ubicado en la zona Templada Fría de la instalación de dos tipos de láminas a los acristalamientos. Láminas de alta reflectividad se colocan sobre las caras externas para reducir parcialmente la radiación visible e infrarroja, mientras que láminas de baja emisividad se colocan sobre las caras internas que disminuyen la pérdida de calor. La lámina exterior es aconsejable por la gran superficie vidriada del edificio y el confort interior generado en verano, mientras la segunda se recomienda en general para acristalamientos de edificios ubicados en zonas con climas fríos o templado-fríos para disminuir el consumo de calefacción. Se simula el caso en el que todos los acristalamientos del edificio son DVH, y otro en el que son vidrios simples.

La aplicación de láminas sobre las superficies internas de los acristalamientos reduce el calor solar que ingresa mejorando el confort interior térmico y visual en verano, aunque empeora ligeramente el comportamiento térmico del edificio en invierno al reducir la energía solar entrante, permitiendo el ahorro de energía de refrigeración en comparación con el uso de acristalamientos transparentes. Por otra parte, la lámina exterior reduce significativamente la radiación solar en el interior, la temperatura interna y el gasto energético para mantener la temperatura constante. La contrapartida de esta característica positiva en verano es la necesidad de una mayor calefacción en invierno por la reducción del ingreso de energía solar.

El máximo ahorro energético total se obtiene con la instalación de la lámina *Balance* debido al mayor ahorro de energía, con una mejora

del confort en verano (o un ahorro para mantener T_i), pues disminuye la radiación solar a casi la tercera parte reduciendo el sobrecalentamiento (o necesidad de aire acondicionado). Por otra parte, el ahorro energético total con la lámina *Prisma 40* es aproximadamente 85% menor que en el caso anterior, y el máximo ahorro se genera en verano por la disminución de la radiación solar. Además, las láminas atenúan la radiación UV entrante previniendo el daño ocular y la decoloración del mobiliario. En resumen, de acuerdo a los resultados encontrados para este edificio emplazado en la zona bioclimática IVc, la instalación de láminas *low-e* en las superficies vidriadas resulta más conveniente para generar una mejora significativa del confort térmico en verano, logrando además una reducción de la energía requerida para mantener condiciones óptimas de habitabilidad todo el año.

NOMENCLATURA

| | |
|---------------|---|
| C_p | capacidad calorífica |
| DVH | doble vidriado hermético |
| e | espesor |
| g | coeficiente de ganancia de calor solar (norma ISO) |
| IR | (radiación) infrarroja |
| IRR | reflectancia en el infrarrojo cercano |
| low-e | baja emisividad |
| PA / PB | planta alta / planta baja |
| SHGC | coeficiente de ganancia de calor solar (norma ASHRAE) |
| T_i | temperatura interna |
| TSET | transmitancia total de energía solar |
| UV | (radiación) ultravioleta |
| V | (radiación) visible |
| VLT | transmitancia de luz visible |
| VS | vidrio simple |
| U-value | transmitancia térmica |
| UVR | reflectancia en el ultravioleta |
| ε | emisividad |
| λ | conductividad térmica |
| ρ | densidad |

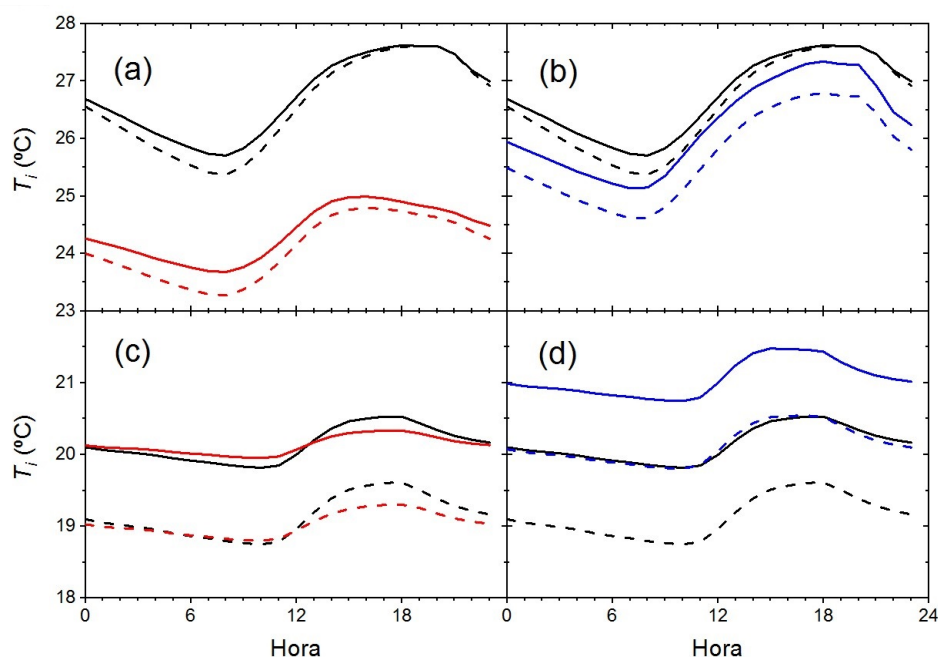


Fig. 6. Evolución de la temperatura interna del hall central en los días promedios de diciembre (panel superior) y de junio (panel inferior). Las líneas negras continuas corresponden a acristalamientos DVH, las líneas negras de trazos a VS, las azules de trazos a DVH o VS con la incorporación de láminas *Balance*, y las rojas de trazos a *Prisma 40*.

REFERENCIAS

- Andrady A. L., Heikkilä A. M., Pandey K. K., Bruckman L. S., White C. C., Zhu M., Zhu L. (2023). Effects of UV radiation on natural and synthetic materials. *Photochemical & Photobiological Sciences* 22, 1177-1202.
- ASHRAE (2021) American Society of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning Engineers. Handbook: Fundamentals. Atlanta, GA, Estados Unidos de América.
- Ávila Ramirez D. C., Arias Orozco S. (2015). La envolvente arquitectónica y su influencia en la iluminación natural. *Hábitat Sustentable* 5, 44-53.
- Bahadori-Jahromi A., Rotimi A., Mylona A., Godfrey P., Cook D. (2017). Impact of window films on the overall energy consumption of existing UK hotel buildings. *Sustainability* 9(5), 731.
- De Gastines M., Correa E., Pattini A. (2023). Etiquetado Energético de ventanas en Argentina: análisis crítico de la norma IRAM 11507-6 (2018) y propuesta alternativa. *Energías Renovables y Medioambiente* 56, 41-49.
- EnergyPlus Documentation (en línea) (2024). Input Output Reference. Version 24.1.0 En <https://energyplus.net/documentation>. Recuperado de URL el 5 de agosto de 2024.
- European Window Films Association – EWFA. Energy performances of window films in European climates. (2016). En: <https://ewfa.org/papercategory/tech-paper/>
- Fernández, A., Garzón, B. S. (2024) Incidencia de las superficies vidriadas en la eficiencia energética de viviendas: dos casos en Tucumán. *ARQUISUR* 13, 94–103.
- Frederick J. G., van Kuijk M. (1991). Effects of ultraviolet light on the eye: role of protective glasses. *Environmental Health Perspectives* 96, 177-184.
- IRAM 11603 (2012). Instituto Argentino de Normalización y Certificación. Acondicionamiento térmico en Edificios: Clasificación Bioambiental de la República. Buenos Aires, Argentina.
- Marino B. M., Muñoz N., Thomas L. P. (2018). Estimation of the surface thermal resistances and heat loss by conduction using thermography. *Applied Thermal Engineering* 114, 1213-1221.
- Marino B. M., Muñoz N., Thomas L. P. (2019). Análisis del Comportamiento Térmico de un Edificio Complejo del Centro Bonaerense a Partir de Simulaciones con EnergyPlus. *Energías Renovables y Medioambiente* 44, 29 – 38.
- Moghaddam S. A., Mattsson M., Ameen A., Akander J., Gameiro Da Silva M., Simões N. (2021) Low-Emissivity Window Films as an Energy Retrofit Option for a Historical Stone Building in Cold Climate. *Energies* 14, 7584.
- Muñoz N., Marino B. M., Thomas L. P. (2014). Caracterización Térmica de un Edificio del Centro Bonaerense Mediante Mediciones. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 18, 19-28.
- Muñoz N., Thomas L. P., Marino B. M. (2022). Infiltración en un edificio complejo. *Anales AFA* 33, 71-76.
- Muraj I., Ostojić S. (2023). An environmental quality assessment of office buildings: the impact of a glass façade on users in different climate contexts in Croatia. *Buildings* 13, 3092.
- Pereira J., Teixeira H., Gomes M. G., Moret Rodrigues, A. (2022). Performance of Solar Control Films on Building Glazing: A Literature Review. *Applied. Science* 12, 5923.
- Sedaghat A., Alkhatib F., Sabri F., Salem H., Oloomi S. A. A., Sabati M., Zafar W. J., Malayer M. A., Negahi A. (2020). Experimental study on the performance of solar window films in office buildings in Kuwait. *Journal of Nanoparticle Research* 22, 85.
- Termax Shop (2024). En: <https://termax.shop/productos/> Recuperado de URL el 5 de agosto de 2024.