

MEDICIÓN DE LA REFLECTIVIDAD DE LA RADIACIÓN INFRARROJA TÉRMICA DE LÁMINAS DE CONTROL SOLAR

Luis P. Thomas, Beatriz M. Marino, Natalia Muñoz

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

RESUMEN: La comprensión del desempeño de las láminas de control solar en condiciones reales de uso importa para calcular el balance de la radiación total intercambiada a través de la envolvente edilicia. El presente estudio consiste en la medición de la reflectividad especular de la radiación infrarroja térmica, a incidencia casi normal, de cuatro láminas comerciales de control solar mediante experimentos específicos de laboratorio. La metodología se basa en el uso de una fuente de radiación de cuerpo negro con temperaturas en el rango 80°C–170°C y de una cámara termográfica sensible a una banda espectral infrarroja entre 7,5 μm y 14,0 μm . Se encuentra que las láminas analizadas tienen menor reflectividad que el vidrio y por ende mayores absorptividad y emisividad de la radiación infrarroja térmica. Estos resultados contrastan con los obtenidos cuando la reflectividad de las láminas se mide en el espectro infrarrojo solar con fotómetros que usan diodos que emiten en una longitud de onda determinada.

Palabras clave: láminas de control solar, acristalamientos, flujos de calor, eficiencia energética.

INTRODUCCIÓN

Las superficies vidriadas de un edificio proporcionan iluminación natural y una vista del exterior al ambiente interior, y las propiedades térmico-radiativas de los materiales de acristalamiento son fundamentales para evaluar el rendimiento energético y el comportamiento térmico de los edificios (Muraj y Ostojić, 2023; Ramirez y Orozco, 2015; Fernández, 2023). El conocimiento de estas propiedades es necesario en numerosas aplicaciones prácticas, desde la termografía infrarroja hasta la simulación del rendimiento de edificios y las evaluaciones del confort térmico. La elección de las superficies vidriadas con las propiedades adecuadas mejora el rendimiento global del edificio al optimizar el uso de energía y el confort interior de acuerdo al clima local, la localización y las orientaciones de las superficies vidriadas (De Gastines et al., 2023; Shaker, 2024).

Las superficies vidriadas contribuyen a la pérdida y la ganancia de energía interna de los edificios mediante la transferencia de calor por conducción y radiación. La conducción puede reducirse mejorando el aislamiento térmico, como en las ventanas de doble y triple vidriado hermético (Leftheriotis y Yianoulis, 2020; Khaled y Berardi, 2021). Sin embargo, esto no cambia la transferencia de la energía solar que, en algunas ubicaciones y orientaciones, puede afectar significativamente el balance térmico de los espacios interiores. La luz visible (V), la radiación infrarroja (IR) y la radiación ultravioleta (UV) del espectro solar incidente son reflejadas, absorbidas en el vidrio, y transmitidas a los espacios interiores en diferente proporción de acuerdo con las propiedades espectrales del sistema vidriado. Los vidrios sódico-cálcico comunes son muy transparentes a la luz visible y permiten la transmisión parcial de la radiación UV e IR, mientras que son poco transmisores del calor emitido por cuerpos a temperatura ambiente. En particular, la reflexión y emisión de radiación IR puede considerarse como un fenómeno superficial y por ello se han desarrollado recubrimientos y láminas que pueden cambiar selectivamente las propiedades de los vidrios para adaptarlas al clima local (Leftheriotis y Yianoulis, 2020; Griffiths et al., 1992).



Los recubrimientos se implantan sobre la superficie de vidrio durante su fabricación y las láminas de materiales plásticos se colocan sobre las superficies vidriadas después de haber sido instaladas (Dang et al., 2020; Baetens et al., 2010). En particular, las láminas de control solar de poliéster representan una solución eficiente para mejorar el confort térmico y la eficiencia energética en espacios cerrados ya construidos al disminuir la necesidad de climatización (Pereira et al., 2022; Pereira et al., 2019; Li et al., 2015; Bahadori-Jahromi et al., 2017). Las láminas se aplican sencillamente sobre el cristal de forma adhesiva, y son más económicas que el vidrio tratado con recubrimientos metálicos. Tienen diferentes usos de acuerdo al recubrimiento; también pueden mejorar la estética de las fachadas, ya que se ofrecen en una amplia gama de colores y tonalidades, lo que permite integrarlas de manera armoniosa en el diseño arquitectónico. Algunos modelos cuentan con acabados espejados o metalizados que aportan un toque moderno y elegante al exterior. La incorporación de tintes metálicos permite reducir la transmisión de la luz visible ofreciendo un alto grado de privacidad, ya que limitan la visibilidad desde el exterior sin sacrificar la luz natural que entra al interior. Esto las convierte en una excelente opción para edificios ubicados en zonas urbanas o con mucho tránsito peatonal. También pueden actuar como una barrera térmica en climas calurosos cuando bloquean la radiación IR solar, limitando la cantidad de calor que entra en los espacios interiores (Sedaghat et al., 2020; Yin et al., 2012). Al reducir la transferencia de calor, estas láminas ayudan a mantener un ambiente más fresco disminuyendo la necesidad de sistemas de refrigeración, los puntos calientes causados por la exposición directa al sol, haciendo más agradables los interiores y protegiendo los equipos de los efectos nocivos del calor. Por otra parte, las láminas también se pueden diseñar para reducir la pérdida de calor en invierno y por ende la necesidad de calefacción contribuyendo al ahorro energético (Moghaddam et al., 2021). Esto se traduce en una disminución de los costos operativos de un edificio, algo especialmente relevante en términos de sostenibilidad, y en una reducción de la huella de carbono.

El principal componente de estas láminas de control solar es el poliéster, un material sintético conocido por su durabilidad, flexibilidad y resistencia a factores externos como la humedad y las altas temperaturas. Este componente reduce significativamente la radiación UV solar que es responsable del deterioro de cortinas, alfombras y otros tejidos, muebles y demás objetos expuestos al sol dentro de las edificaciones (Andrady et al., 2023; van Kuijk, 1991). Además, protegen la piel y mejoran el confort visual de los usuarios, previniendo los efectos nocivos de la exposición solar. La capa base de poliéster se combina con una serie de recubrimientos que bloquean parcialmente la radiación solar de acuerdo al uso que se quiera dar. Las láminas de baja emisividad se colocan sobre las caras internas de las superficies vidriadas para mejorar las prestaciones de los vidrios, generando un ahorro energético en invierno y también en verano, tanto en el uso de cerramientos con doble vidriado hermético (DVH) como con vidrios simples. Las láminas de alta reflectividad se colocan sobre las caras externas para reducir parcialmente la radiación V e IR, generando un importante ahorro de energía de enfriamiento en comparación con el uso de acristalamientos transparentes o de láminas de baja emisividad, aunque pueden aumentar el requerimiento de calefacción en invierno.

En un trabajo anterior, Muñoz et al. (2025) presentaron los resultados del balance energético de un edificio construido en la zona bioclimática IVc – Templada Fría de transición (IRAM 11603, 2012). Dado los inviernos fríos de la región, el edificio consta de una importante superficie vidriada en la fachada enfrentada al NO, y en menor medida en las fachadas que dan al NE y SO, para captar una buena parte de la energía solar en invierno. Los ventanales DVH disminuyen el calor perdido en invierno y no cuentan con cortinas, en tanto que aleros protegen parcialmente el interior del sol durante el mediodía estival. Este tipo de diseño, habitual en la región, involucra una excesiva ganancia solar y deslumbramiento en verano que suelen crear un interior poco confortable. Este balance se estudió por medio de simulaciones realizadas con el software Energy Plus (2024) y las consecuencias de la instalación de dos tipos de láminas de control térmico sobre las superficies vidriadas se analizaron numéricamente. Se encontró que la lámina interior reduce el calor solar ingresado al interior mejorando el confort interior en verano, genera ahorros de energía de refrigeración en comparación con el que surge de usar acristalamientos transparentes, aunque empeora ligeramente la performance en invierno al reducir la energía solar ingresada en el edificio. Por otra parte, la lámina exterior reduce significativamente la radiación solar interior y el gasto energético para mantener la temperatura

constante en verano, aunque aumenta la necesidad de una mayor calefacción en invierno por la reducción del ingreso de la energía solar.

La caracterización de las propiedades ópticas de las láminas de control solar requiere un adecuado análisis de la transferencia de energía por radiación entre el exterior y el interior en condiciones normales de uso (Echániz et al., 2015). Estos resultados dependen críticamente de las características de las láminas. En particular, se especificaron la transmitancia de la luz visible, la reflectancia en el IR cercano y la reflectancia de la radiación UV solar medidas con un fotómetro *Linshang Solar Film Transmission Meter* LS 101 (resolución 0,1% y exactitud 2% para materiales transparentes) en las longitudes de onda 0,365 μm para la radiación UV, 0,380–0,760 μm para la radiación V y 0,940 μm para la radiación IR. En este caso, la longitud de onda para la determinación de la reflectancia en el IR corresponde al rango de la radiación IR solar o “cercana” a la radiación V. Normalmente se elige la radiación de 0,940 μm para la medición de la reflectividad IR en los fotómetros porque permiten medir mejor el efecto de bloqueo infrarrojo en las películas de absorción de calor solar. Otros fotómetros miden el bloqueo de la radiación IR solar para la radiación de 1,400 μm para determinar mejor las características de películas de reflexión como las películas metálicas y las nano-películas cerámicas.

De estos parámetros medidos por el instrumento, se estima el coeficiente de ganancia de calor solar g considerando que la energía de la radiación solar sobre la superficie terrestre consta, aproximadamente, de 42 % de luz visible, 55% de radiación IR y 3% de radiación UV. Si bien los valores medidos en vidrios comunes concuerdan con el rango de valores de la transmisividad de la luz visible reportados en la bibliografía, las mediciones en longitudes de onda específicas con anchos de banda restringidos de las mediciones de las características en el UV e IR son discutibles dada la distribución espectral de la radiación solar. Se encontró que la reflectividad de la radiación IR solar del vidrio común es 18,6 %, 89,3 % con las láminas *Termax Balance*, 85,5 % con *Termax Diamont*, 80,1% con *Termax Tranlucent* y 95,0% con *Termax Prisma 40*. En particular, la reflectividad de la radiación IR del vidrio común medida de esta forma es menor que la reportada en la bibliografía como se verá más adelante.

En este estudio, se presentan los resultados de las mediciones de la reflectividad especular (i.e., no la hemisférica), a incidencia casi normal, de cuatro tipos de láminas de control solar de la radiación de cuerpo negro en el IR lejano. Las láminas se adosan a piezas de vidrio. La radiación de cuerpo negro tiene la ventaja de involucrar un rango espectral conocido que depende de la temperatura, de modo que se puede variar la radiación incidente al cambiar la temperatura de la fuente. La mejor caracterización de las láminas lograda mediante estas mediciones conduce al consiguiente más preciso balance de los flujos de calor entrantes y salientes de edificios con el fin de evaluar su sustentabilidad energética.

ESTUDIOS PREVIOS Y FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Existen varios trabajos asociados con la medición de la reflexión en superficies transparentes y metálicas. Rubin (1985) presentó un conjunto completo de constantes y propiedades ópticas para vidrios transparentes con bajo contenido de hierro, utilizados usualmente en ventanas, utilizando un espectrómetro de transformada de Fourier. Midió la transmitancia desde el UV cercano hasta el IR lejano (0,1–10,0 μm), y la reflectividad R con una incidencia casi normal de 3 a 50 μm (i.e. desde el IR cercano hasta el lejano). Para longitudes de onda de 3 μm es $R \sim 0,04$ y disminuye lentamente al aumentar la longitud de onda hasta casi anularse a 8 μm . Rubin (1985) encontró dos máximos de $R \approx 0,20$ y 0,25 en el IR correspondientes a las resonancias principales del Si–O centradas alrededor de 9,5 y 21,0 μm , respectivamente. Los resultados de absorción solar muestran variaciones para diferentes vidrios, mientras que las propiedades en el IR lejano son prácticamente constantes para todos los tipos de vidrio. De estas propiedades espectrales del vidrio se deduce que el resultado depende de la composición espectral de la radiación incidente. En particular, en los materiales transparentes usados en los acristalamientos interesa el comportamiento de la radiación IR solar y la emitida por los cuerpos.

El desarrollo de cámaras termográficas permitió medir la radiación reflejada integrada en un rango espectral apreciable con buena precisión. Larsen y Hongn (2014) describen una metodología para medir la reflectancia de materiales especulares para diferentes ángulos de incidencia en el rango IR entre 8 y 14 μm de una cámara termográfica y una fuente de radiación IR. Rüdissler et al. (2022) midieron la

reflectancia del vidrio con cámara termográfica, resolvieron las ecuaciones de Fresnel y realizaron la integración de Montecarlo sobre el espectro de cuerpo negro. Los cálculos se realizaron para diversas temperaturas del emisor a fin de establecer sus dependencias con su temperatura, y se analizó la transmitancia dependiente de la temperatura del vidrio. Mediante la aplicación de un algoritmo de optimización no lineal, derivaron fórmulas de ajuste para la reflectividad angular, la emisividad y la absorptividad con la mayor precisión hasta la fecha.

La fuente cuerpo negro es especialmente útil para los estudios de la radiación IR en laboratorio, ya que la emisividad $\varepsilon = 1$ y la radiación emitida tiene una composición espectral conocida que depende de la temperatura. Por lo tanto, se puede medir la respuesta a la radiación IR de una muestra variando la temperatura absoluta T_f de la fuente. El máximo de radiación de un cuerpo negro se produce a la longitud de onda λ_{max} relacionada con T_f por medio de la ley de desplazamiento de Wein:

$$\lambda_{max} = \frac{2897,6 \mu m K}{T_f} \quad (1)$$

De acuerdo a la conservación de la energía, cuando una radiación estacionaria llega a la muestra se cumple que:

$$R + \alpha + \tau = 1, \quad (2)$$

donde R es la reflectividad, α la absorptividad y τ la transmisividad del material. En medios transparentes como el vidrio común se puede ignorar la energía transmitida para la radiación IR térmica en el rango de espesores y temperaturas ambiente típicos, es decir, $\tau = 0$. Entonces, no hay una cantidad significativa de radiación que alcanza la parte posterior de la muestra y se puede considerar que el fenómeno de la reflexión de la radiación IR es superficial.

Por otra parte, la ley de radiación térmica de Kirchhoff establece que la superficie de un cuerpo con temperatura T en equilibrio térmico emite la misma fracción de potencia de radiación que absorbe. Por lo tanto, $\varepsilon = \alpha$ y, para un medio transparente irradiado con radiación IR, se cumple que:

$$\varepsilon = 1 - R, \quad (3)$$

ya que $\tau = 0$. La radiación detectada por el sensor de la cámara termográfica en la imagen reflejada de la fuente consta de la radiación de la fuente reflejada en la superficie del vidrio y la radiación emitida por el propio vidrio a la temperatura T_v . De acuerdo a las ecuaciones (2)–(3), la temperatura absoluta T_c medida por la cámara es:

$$T_c^4 = R T_f^4 + (1 - R) T_v^4. \quad (4)$$

Aquí se considera que la respuesta del sensor IR de la cámara es proporcional a T_c^4 , una expresión similar a la ley de Stefan Boltzmann y una de las más utilizadas en la bibliografía (ver por ejemplo, Larsen y Hongn, 2014; Rüdissler et al., 2022 y referencias allí citadas). De la Ec. (4) se observa que, por ejemplo, para el vidrio con $R \approx 0,1$, T_c depende en un 10% de T_f^4 y 90% de T_v^4 , y para valores más pequeños de R la dependencia con T_v^4 se incrementa. Por lo tanto, el mayor esmero debe ponerse en la medición de T_v . De la Ec. (4) se calcula la reflectividad como:

$$R = \frac{T_c^4 - T_v^4}{T_f^4 - T_v^4}. \quad (5)$$

DESCRIPCIÓN EXPERIMENTAL

El arreglo experimental usado para la determinación de R se muestra en la Figura 1, es similar al propuesto por Larsen y Hongn (2014) y Rüdissler et al. (2022), y probó ser práctico y eficiente. La fuente de cuerpo negro proviene de un disco en el interior de un cilindro metálico, ambos de color negro, adentro de un horno cerámico compuesto por una resistencia eléctrica y una cubierta aislante externa de lana de vidrio. El horno tiene una abertura de 1 cm en uno de sus lados por donde sale la radiación en la dirección del eje del cilindro. Las muestras consisten en diferentes piezas de vidrio comunes de 12cm×24cm de 3 y 6 mm de espesor, sobre las cuales se adhieren las láminas de control solar. Se usaron varios tipos de vidrios a fin de averiguar la dispersión de las características o posibles defectos, y no se encontraron diferencias significativas. Las temperaturas del disco y de la muestra se miden con termocuplas K y un medidor *Smartmeter* con 0,1°C de resolución y 0,25% de precisión; la temperatura ambiente se controla con un termómetro digital y otro de alcohol. La cámara termográfica Fluke TIR32 es de matriz de plano focal de 320×240 píxeles basada en microbolómetro no refrigerado. Mide en el rango de temperatura entre -20°C y 150°C con una precisión $\pm 2^\circ\text{C}$ o 2% en una banda espectral IR desde 7,5 μm a 14,0 μm que corresponde a un rango de -66°C a 113°C de acuerdo a la Ec. (1).

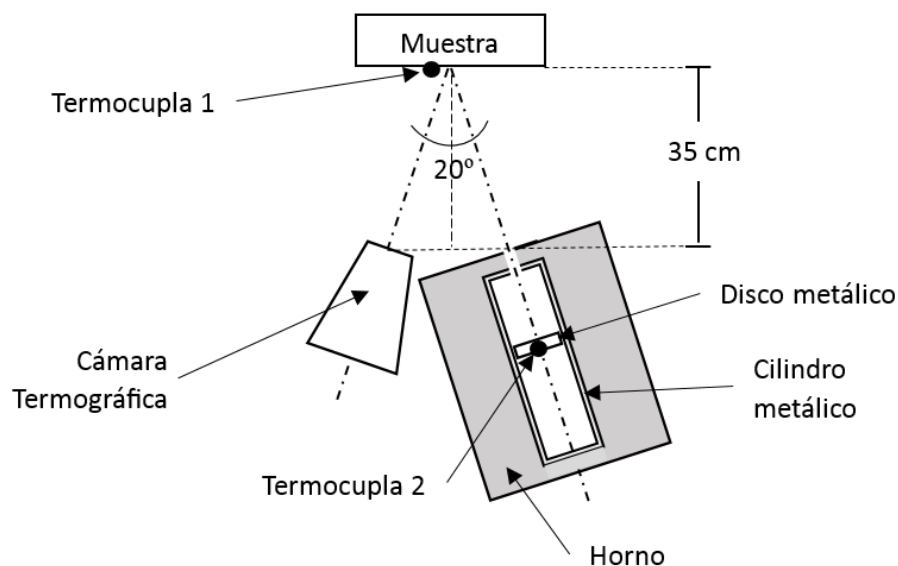


Figura 1. Disposición experimental.

Una serie de experimentos preliminares permitió calibrar las termocuplas y las medidas obtenidas con la cámara. En particular, la relación (o respuesta) entre la radiación recibida y la temperatura medida es una característica del sensor, la óptica y el software de la cámara, y normalmente no está disponible para el usuario. En nuestro caso, la respuesta se ajustó con la temperatura de la radiación de cuerpo negro captada por la cámara en forma directa desde la fuente y con la reflectividad del vidrio común de acuerdo a los resultados reportados por Rüdissler et al. (2022). Estas calibraciones redujeron al mínimo la dispersión entre medidas de temperatura del mismo objeto con diferentes instrumentos a $\pm 0,2^\circ\text{C}$. En la disposición experimental de la Figura 1, el haz emitido por la fuente incide sobre la muestra y la imagen reflejada se capta con la cámara termográfica (Figura 2). La distancia entre la fuente y la muestra es 35 cm y el ángulo entre el haz incidente proveniente del horno y el haz reflejado que llega a la cámara es 20°. Los valores medidos de R se pueden considerar como los correspondientes a un ángulo normal de incidencia ya que la reflexión especular de la radiación no polarizada no cambia significativamente para ángulos menores a 30° (Rüdissler et al., 2022). La incerteza de la medición de la reflectancia depende de las incertezas de las mediciones de la temperatura de la fuente, de la radiación reflejada y la del aire, y se calcula mediante la propagación de errores (Larsen y Hongn, 2014). Las incertezas más importantes son aquellas de la medición de la temperatura de la radiación reflejada obtenida con la cámara y la de la temperatura ambiente. Las calibraciones específicas realizadas previamente a los experimentos permitieron alcanzar una incerteza mínima total de 2% para temperaturas altas, si bien crece cuando disminuyen la reflectividad de la muestra y la temperatura de la fuente (Ecs. 4 y 5).

Los experimentos consisten en calentar el horno a 180°C, aproximadamente, durante 2 min por medio de una tensión eléctrica controlada. Luego se desconecta la alimentación del horno y se lo deja enfriar naturalmente durante unas tres horas. El intervalo útil de temperatura en los experimentos abarca el rango de la fuente (entre 80 y 170 °C). Para valores menores a 80°C surgen dispersiones entre medidas de muestras similares producto de los errores de cálculo (Ec. 5). Las temperaturas del horno, la de la muestra y la de la obtenida en el centro de la imagen captada de la cámara se registran cada 5 min. En los primeros 15 min desde la desconexión de la alimentación aparecen desviaciones de temperatura producto de la redistribución de la temperatura dentro del horno y no son analizadas aquí. Luego comienza un lento enfriamiento del horno que implica una radiación IR prácticamente estacionaria durante cada medición. La variación de la temperatura de la fuente con el tiempo permite obtener resultados con diferente radiación de cuerpo negro.

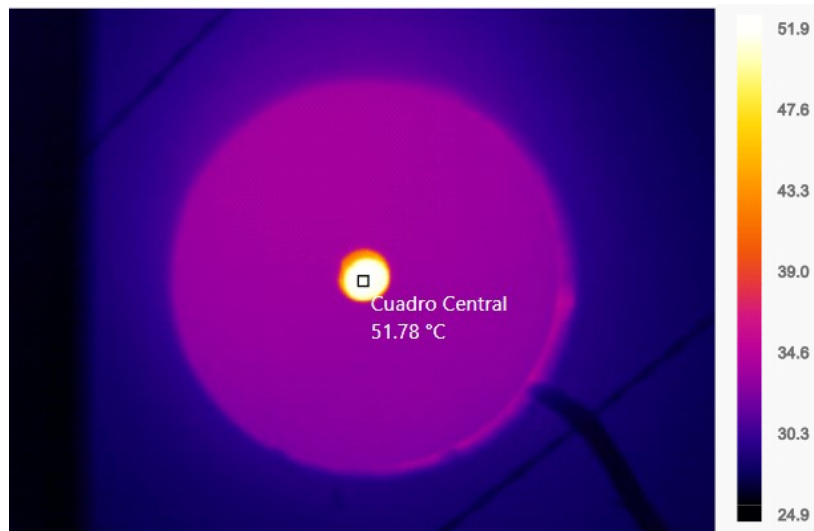


Figura 2. Imagen termográfica de la radiación infrarroja de un cuerpo negro reflejada sobre una muestra de vidrio. Las temperaturas de la escala se expresan en °C.

RESULTADOS

Los valores medidos de R de los vidrios con y sin láminas en función de la temperatura de la fuente se presentan en la Figura 3. Se realizaron tres mediciones de R por cada lámina obteniéndose valores similares, por lo que se reporta solo uno de ellos por lámina para facilitar la visualización en los gráficos. Los resultados coinciden con los reportados por Rüdissler et al. (2022) porque fueron empleados para la calibración de la respuesta de cámara. Sin embargo, las mediciones de R para los diferentes vidrios simples de 3 y 6 mm de espesor no presentan una dispersión apreciable. Se observa que todas las láminas tienen menor reflectividad en el IR térmico que el vidrio. El valor más grande de R para las láminas se obtiene con la lámina *Termax Balance* (lámina interior), un valor intermedio con la *Termax Translucent* (exterior), y los menores con *Termax Prisma 40* (exterior) y *Termax Diamont* (interior). Los resultados para estas dos últimas llaman la atención, ya que la lámina exterior es más oscura que la transparente interior. Sin embargo, cabe recordar que las propiedades de los materiales en el rango IR no guardan relación con la apariencia percibida por los ojos, es decir, en el rango V. Por otro lado, concuerdan los valores obtenidos con vidrios de 3 y 6 mm en todos los casos, de modo que las láminas no cambian la reflexión de radiación IR por el espesor del vidrio en la cual están instaladas.

La Figura 4 muestra que la reflectividad de las láminas respecto a la del vidrio tiene un ligero aumento cuando se reduce T_f . Sin embargo, una extrapolación de estos resultados parece indicar que R no superaría a la del vidrio a la temperatura ambiente típica (20°C) como evidencian las rectas de mejor ajuste. Los valores extrapolados de R/R_v a 20°C a partir de las rectas de mejor ajuste son: 0,87 para la lámina *Balance*, 0,68 para la *Translucent* y 0,55 para las *Prisma 40* y *Diamont*. La incerteza adicional de estos valores estimada a partir de la incerteza de los coeficientes de las rectas de mejor ajuste es menor al 1%.

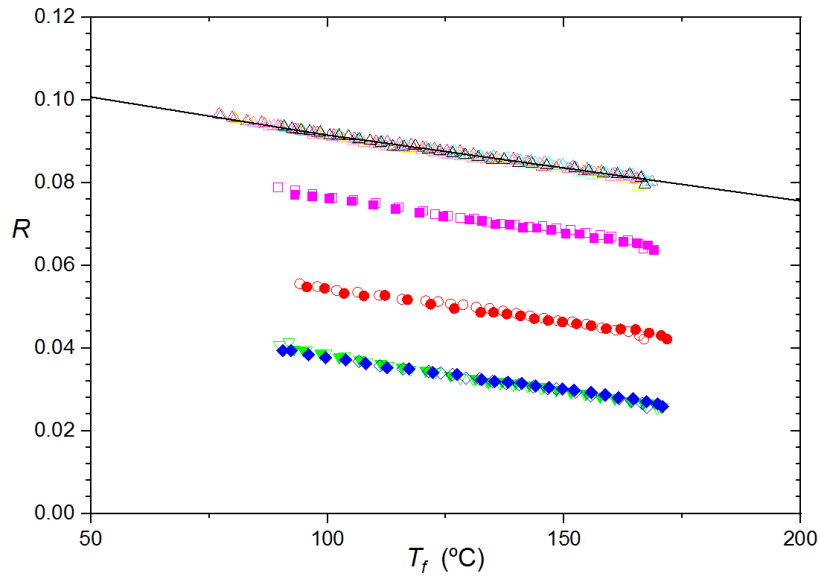


Figura 3. Reflectividad de la radiación infrarroja de cuerpo negro a temperatura T_f en vidrios simples de 3 y 6 mm (Δ), con láminas Termax Balance (\square magentas), Translucent (\circ rojos), Prisma 40 (∇ verdes) y Diamond (\diamond azules) instaladas sobre vidrios de 3 mm (símbolos abiertos) y 6mm (símbolos llenos). La línea continua representa los valores obtenidos por Rüdissler et al. (2022).

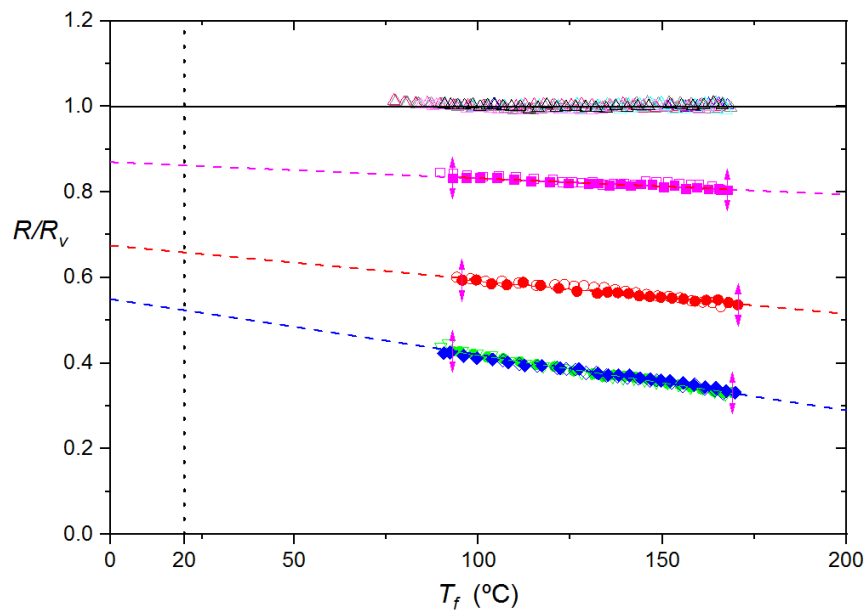


Figura 4. Resultados de la Figura 3 adimensionalizados con la reflectividad del vidrio simple. Las líneas de trazos son las rectas de mejor ajuste de los correspondientes puntos.

DISCUSIÓN

Los resultados muestran baja dispersión y buena consistencia entre sí. Los valores determinados en los experimentos realizados con diferentes vidrios y a distintas temperaturas de las muestras coinciden dentro del error experimental. Claramente, la reflectividad de la radiación IR térmica de todas las láminas es menor a la del vidrio común, a diferencia de la reflectividad de la radiación IR solar como la medida con el fotómetro LS 101 descrito en la Introducción. Cabe señalar que el rango de sensibilidad de la cámara termográfica está en la banda espectral IR desde 7,5 μm a 14,0 μm y que la cámara capta solo una parte del espectro de la radiación reflejada. La existencia de bandas espectrales significativas por fuera de este intervalo, si existiesen, podría influir en los valores determinados de reflectividad,

dependiendo de la sensibilidad de la cámara que no es proporcionada por el fabricante. Para hallarlas se requiere de experimentos y equipamiento específico que están fuera del alcance de este trabajo.

Las mediciones obtenidas usando vidrios de 3 y 6 mm concuerdan entre sí, tengan o no láminas adosadas. Por lo tanto, la reflexión de la radiación IR es un fenómeno básicamente superficial y no es afectada por el espesor y las características de la cara trasera del vidrio. Así, este resultado conocido en el caso de los vidrios es aplicable también a las láminas y se confirman las hipótesis introducidas. De la ley de Kirchoff (Ec. 3) se deduce que la emisividad aumenta si se instala cualquiera de las láminas en vidrios comunes. Considerando que R disminuye aproximadamente un 85% con la *Termax Balance*, un 60% con la *Termax Translucent*, y un 45 % con la *Termax Prisma 40* y *Diamont* respecto el vidrio a temperaturas superiores a la del ambiente, la absorptividad y la emisividad de dichas láminas es 92%, 94% y 96%, respectivamente. El aumento de la absorptividad implica que la energía de radiación es captada en mayor medida por la lámina y el calor absorbido puede aumentar la temperatura superficial del vidrio sobre el que está instalada. No se detectó tal aumento en los experimentos probablemente por la baja intensidad de la fuente dada la escasa superficie irradiada, y porque la distribución del calor en toda la muestra hace que este aumento sea del orden de la incerteza experimental. Sin embargo, es de esperar que las superficies vidriadas grandes sometidas a la intensa radiación IR de verano estén expuestas a calentamientos, dilataciones y tensiones diferenciales que rompan los acristalamientos.

CONCLUSIONES

Se midió la reflectividad con incidencia casi normal de láminas de control de la radiación solar IR de cuerpo negro en el rango de temperatura 80°C–170°C con una cámara termográfica. Aunque el equipamiento disponible permitió mediciones en un rango acotado y a temperaturas mayores que la del ambiente usual, los resultados son sugestivos. Se encuentra que todas las láminas tienen menor reflectividad en el rango de la radiación IR térmica que el vidrio y por ende mayor emisividad. Estos resultados contrastan con los obtenidos cuando se mide la reflectividad en el rango de la radiación IR solar con fotómetros que usan diodos que emiten en una longitud de onda determinada. Las diferencias sustanciales se hallan en la longitud de onda de la máxima intensidad de la radiación y en la distribución espectral de la emisión de cuerpo negro empleada aquí. En un próximo estudio se intentará medir la reflectividad de las láminas con radiación de cuerpo negro con temperaturas más próximas a la del ambiente, y la emisividad en forma directa. La estimación del posible impacto del aumento de temperatura en los vidrios en condiciones estivales y las recomendaciones prácticas para los diseñadores serán analizadas en un próximo trabajo.

REFERENCIAS

- Andrady A.L., Heikkilä A.M., Pandey K.K., Bruckman L.S., White C.C., Zhu M. y Zhu, L. (2023). Effects of UV radiation on natural and synthetic materials. *Photochemical and Photobiological Sciences* 22, 5, 1177–1202.
- Baetens R., Jelle B.P. y Gustavsen A. (2010). Properties, requirements and possibilities of smart windows for dynamic daylight and solar energy control in buildings: A state-of-the-art review. *Solar energy materials and solar cells* 94, 2, 87–105.
- Bahadori-Jahromi A., Rotimi A., Mylona A., Godfrey P. y Cook, D. (2017). Impact of Window Films on the Overall Energy Consumption of Existing UK Hotel Buildings. *Sustainability* 9, 5, 731.
- Dang S., Yi Y. y Ye H. (2020). A visible transparent solar infrared reflecting film with a low long-wave emittance. *Solar Energy* 195, 483–490.
- De Gastines M., Correa E. y Pattini A. (2023). Etiquetado energético de ventanas en Argentina: análisis crítico de la norma IRAM 11507–6 (2018) y propuesta alternativa. *Energías Renovables y Medio Ambiente* 52, 41–49.
- Echániz T., Setién-Fernández I., Pérez-Sáez R.B., Prieto C., Galindo R.E. y Tello M.J. (2015). Importance of the spectral emissivity measurements at working temperature to determine the efficiency of a solar selective coating. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 140, 249–252.
- 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.

- Fernández A. (2023). Incidencia de las superficies vidriadas en la eficiencia energética de viviendas: dos casos en Tucumán. *Arquisur Revista* 13, 24, 94–103.
- IRAM 11603 (2012). Instituto Argentino de Normalización y Certificación. Acondicionamiento térmico en Edificios: Clasificación Bioambiental de la República. Buenos Aires, Argentina.
- Khaled K. y Berardi U. (2021). Current and future coating technologies for architectural glazing applications. *Energy and Buildings* 244, 111022.
- Griffiths P., Batty W.J., Probert S.D. y Knight C. (1992). Solar-control films. *Applied energy* 41, 4, 261–284.
- Larsen S.F. y Hongn M. (2014). Determining the infrared reflectance of specular surfaces by using thermographic analysis. *Renewable Energy* 64, 306–313.
- Leftheriotis G. y Yianoulis P. (2020). Glazings and Coatings. Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences. doi:10.1016/b978--12-819727-1.00022-4 10.1016/B978--12-819727-1.00022-4
- Li C., Tan J., Chow T.T. y Qiu, Z. (2015). Experimental and theoretical study on the effect of window films on building energy consumption. *Energy and buildings* 102, 129–138.
- Moghaddam S.A., Mattsson M., Ameen A., Akander J., Gameiro Da Silva M. y Simões N. (2021). Low-emissivity window films as an energy retrofit option for a historical stone building in cold climate. *Energies* 14, 22, 7584.
- Muñoz N., Thomas L.P. y Marino B.M. (2025). Ahorro energético en superficies vidriadas usando láminas de control solar y térmico. *Energías Renovables y Medio Ambiente*. En prensa.
- Muraj I. y 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, 12, 3092.
- Pereira J., Gomes M.G., Rodrigues A.M. y Almeida M. (2019). Thermal, luminous and energy performance of solar control films in single-glazed windows: Use of energy performance criteria to support decision making. *Energy and buildings* 198, 431–443.
- Pereira J., Teixeira H., Gomes M. ., Moret Rodrigues A. (2022). Performance of Solar Control Films on Building Glazing: A Literature Review. *Applied. Science* 12, 5923.
- Ramírez D. y Orozco S. (2015). La envolvente arquitectónica y su influencia en la iluminación natural. *Hábitat Sustentable* 5, 1, 44–53.
- Rubin M. (1985). Optical properties of soda lime silica glasses. *Solar Energy Materials* 12, 4, 275–88.
- Rüdissler D., McLeod R.S., Wagner W. y Hopfe C.J. (2022). Numerical derivation and validation of the angular, hemispherical and normal emissivity and reflectivity of common window glass. *Building and Environment* 207, 108536.
- Shaker L.M. (2024). Evaluating UV-Protective Low-Emissivity Window Films: Implications for Thermal and Visual Comfort in Luminous Office Buildings. *AUIQ Complementary Biological System* 1, 2, 46–60.
- Sedaghat A., Alkhatib F., Oloomi S.A., Sabri F., Salem H., Sabati M., ... y Negahi A. (2020). Experimental study on the performance of solar window films in office buildings in Kuwait. *Journal of Nanoparticle Research* 22, 4, 85.
- van Kuijk F.J. (1991). Effects of ultraviolet light on the eye: role of protective glasses. *Environmental health perspectives* 96, 177–184.
- Yin R., Xu P. y Shen P. (2012). Case study: Energy savings from solar window film in two commercial buildings in Shanghai. *Energy and Buildings* 45, 132–140.

MEASUREMENT OF THE REFLECTIVITY OF THE THERMAL INFRARED RADIATION IN SOLAR CONTROL FILMS

ABSTRACT: Understanding the performance of solar control films under real conditions of use is important for balancing the total radiation exchanged through the building envelope. The present study deals with the measurement of the specular reflectivity of the thermal infrared radiation, at almost normal incidence, for four commercial solar control films in specific laboratory experiments. The methodology is based on the use of a black body radiation source with temperatures between 80°C and 170°C, and a thermal imaging camera that is sensitive to an infrared spectral range between 7.5 µm and 14.0 µm. It is found that the analysed films have lower reflectivity than glass and, consequently, upper

absorptivity and emissivity of thermal infrared radiation. These results contrast with those obtained when the reflectivity of the films is measured in the infrared solar spectrum with photometers that use diodes emitting in a specific wavelength.

Keywords: solar control films, glazing, heat fluxes, energy efficiency.