

- ▲ **Palabras clave/** Calefacción solar, ganancia solar, pérdidas térmicas.
- ▲ **Keywords/** Solar heating, solar gain, heat loss.
- ▲ **Recepción/** 25 abril 2018
- ▲ **Aceptación/** 22 agosto 2018

Calefacción solar por ventanas: Modelado, cálculo y propuesta de diseño¹

Solar heating through windows:
Design model, calculation, and proposal¹

Luis E. Juanicó

Ingeniero Nuclear, Instituto Balseiro, Universidad Nacional de Cuyo, Argentina.
Doctor en Ingeniería Nuclear, Instituto Balseiro, Universidad Nacional de Cuyo, Argentina.
Investigador independiente, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina.
Investigador, Instituto Andino Patagónico en Tecnologías Biológicas y Geoambientales (IPATEC), CONICET y Universidad Nacional del Comahue, Argentina.
juanico@comahue-conicet.gob.ar

RESUMEN/ Se presenta un programa simple de arquitectura abierta (VENTANASOL) para el cálculo de la ganancia solar y la pérdida de calor en viviendas por acristalamientos. Se demuestra cómo, en clima frío (Bariloche), el balance energético de una ventana simple vidriada es fuertemente negativo, justificando la solución tradicional de ventanas pequeñas. Se discuten tres nuevas opciones, siendo su balance: 1) positivo o negativo con doble vidriado hermético (DVH), según su orientación; 2) fuertemente positivo, incorporando una persiana térmica al vidriado simple; 3) moderadamente positivo con DVH y persiana térmica. Se observa cómo una implantación NE-NO con dos ventanas maximiza la ganancia solar diaria en invierno y otoño-primavera, siendo hasta 50% mejor que la tradicional (norte). Se proponen dos muros vidriados con persianas térmicas y muro Trombe (18m² c/u) para calefaccionar una casa en Bariloche (13.000 kWh/año). **ABSTRACT/** A single open architecture program (VENTANASOL) is presented for the calculation of solar gains and glazing heat losses in dwellings. The project shows how –in cold weather (Bariloche)– the energy balance of a single glass window is strongly negative, justifying the traditional solution of small windows. Three new options are discussed, with their balances being: 1) positive or negative with double pane glass (DVH), based on their orientation; 2) strongly positive, introducing thermal shades to the single glass; and 3) moderately positive with DVH and thermal shades. It has been observed how a NE-NW arrangement with two windows minimizes daily sun gains during winter and autumn-spring, with up to 50% improvements compared to the traditional option (North). Two glass walls with thermal shades and Trombe wall (18 square meters each) are suggested to heat a house in Bariloche (13,000 kWh/year).

INTRODUCCIÓN. Los programas numéricos que simulan el comportamiento térmico de viviendas, como el *EnergyPlus*, son conocidos. Estos códigos complejos cuantifican el recurso solar para cualquier latitud y día del año, y calculan la potencia solar térmica que recibe una vivienda por sus diferentes acristalamientos, conocida como ganancia solar. Sin embargo, en Argentina son minoritarios los profesionales familiarizados con estos códigos y, por ende, el diseño bioclimático se suele reducir a criterios cualitativos. Así, a pesar del generoso recurso solar, en Bariloche se disponen, tradicionalmente, ventanas

pequeñas, considerando sus elevadas pérdidas de calor. Por otra parte, a partir de la difusión de los colectores solares, el recurso solar ha sido extensamente medido, pudiendo predecir la energía que recibirán en cualquier locación (Duffie y Beckman 2013). Si se asimila una ventana a un colector plano vertical, es entonces factible calcular su ganancia solar. Sin embargo, debido a que la aplicación de análisis cualitativos consiste en utilizar tablas de asoleamiento, no hacen posible cuantificar la ganancia solar ni responder si el balance energético de una ventana será positivo o negativo.

Evaluar el recurso solar a este fin requiere ingresar un gran detalle de datos y utilizar bibliotecas radiométricas. Paradójicamente, sus resultados no dejan de estar sujetos a las condiciones de un recurso muy variable. Siendo constante la radiación solar extraterrestre (1.367 W/m²), su valor a nivel del suelo, I, puede variar hasta 30 veces, yendo desde los 40 W/m² con cielo muy nublado, pasando por 200-300 W/m² (resolana), hasta 1.000 W/m² (despejado) o 1.200 W/m² en locaciones andinas (Duffie y Beckman 2013; National Aeronautics and Space Administration – NASA 2018). Considerando esta irradiación

¹ Este trabajo ha sido financiado por el proyecto CONICET PIP N° 11220130100048CO "Uso eficiente de energía y aprovechamiento del recurso solar en la Patagonia Andina".

¹ This work has been funded under CONICET PIP No.11220130100048CO Project: "Efficient energy use and solar resources in the Andean Patagonia".

sobre suelo, podemos discernir una fracción cuya dirección sigue la trayectoria aparente del sol, de radiación directa (I_d), y una fracción isotrópica de radiación difusa (I_f). Esta componente difusa varía del 10% (cielo despejado) al 100% (muy nublado) de I . Para una ventana, se suma un tercer término de radiación reflejada (I_r) desde el entorno, cuyo cálculo requiere una descripción detallada. Dada esta complejidad del problema, su simulación numérica hace necesario contar con un profesional especializado. Por otra parte, la radiometría solar disponible en general se limita a promedios mensuales de energía diaria recibida sobre suelo, G , expresados en kWh/m²/día o MJ/m²/día (1kWh=3,6MJ) mediante mapas solares (Solar Gis 2013; Grossi y Righini 2007; Righini, Grossi y Raichijk 2005; NASA 2018). A partir de aquí, y considerando la trayectoria solar aparente promedio de cada mes, es posible calcular los promedios mensuales de radiación directa constante (I_{dc}) equivalente, es decir la que a lo largo del día entregaría la misma energía diaria (G). Siendo sencillo calcular I_{dc} así, brinda una metodología sencilla para calcular la irradiación solar promedio incidente sobre una ventana. Sin embargo, esta radiación directa engloba una fracción difusa (I_{fo}) que no sigue la trayectoria solar. Por consiguiente, cuando integremos la irradiación incidente sobre una ventana a lo largo del día, mientras I_{dc} se deberá multiplicar por el coseno de ambos ángulos que forman con la normal a la ventana (la altura solar, α , y el ángulo horario, ω), I_{fo} se deberá considerar constante. Entonces, aunque este método simplificado propuesto acarreará un error sistemático, será menor por varios motivos:

- 1) La fracción difusa puede ser elevada en promedio temporal pero baja en energía. Ilustraremos este concepto considerando un mes hipotético de 24 días muy nublados ($I=40\text{W/m}^2$, 100% difusa) y 6 días muy soleados (1.000W/m^2 , 10% difusa). La meteorología lo definiría como 'muy nublado' (80%). Sin embargo, su radiación promedio sería 232W/m^2 y 22% (52W/m^2) difusa.
- 2) La integral diaria de la radiación directa incidente sobre la ventana, siendo I_{dc} constante, es la integral de sus cosenos (resultado <1), mientras que debería considerarse $=1$ para su fracción difusa (I_{fo}). Esto nos lleva en nuestro método a sobreestimar el flujo I_{dc} equivalente, pero podemos acotar este error. Como esta integral varía entre 0.6 y 0.8, y debiendo haber sido $=1$ para su fracción difusa (22%), esta simplificación daría un error por exceso del 5% al 10%.
- 3) La radiación reflejada es compleja de calcular, pero para una ventana con entorno uniforme su total diario corresponde a la mitad del albedo del entorno. Siendo este 0,2 para tierra y 0,3 para césped (más comunes), agregaría un 10% a 15% que, al no considerarse, subestima la radiación reflejada en igual medida.

Considerando la cancelación de errores entre ambos términos (radiación difusa y reflejada), que representan las mayores aproximaciones del modelo, podemos estimar la ganancia solar con error menor al 20%. Queremos subrayar que la información disponible (mapas solares), en general, no incluye mediciones de la fracción de radiación difusa, y, como discutimos antes, tampoco es posible inferirla de datos meteorológicos.

En este trabajo se desarrolla un código numérico (VENTANASOL) para calcular la ganancia solar, pérdida de calor y balance energético diario de ventanas. Se estudian diferentes tipos y orientaciones, y se propone incorporar una persiana térmica a una ventana simple, demostrando ser mejor solución (térmica y económica) que el DVH.

MATERIALES Y MÉTODOS

Condiciones climáticas y demanda de calefacción.

En Bariloche (42°S) la irradiación solar anual promedio es muy alta (3,8 kWh/m²/día) y también su promedio invernal (1,5 kWh/m²/día, figura 1a) (Grossi y Righini 2007). La temperatura media anual corresponde a clima frío (8,4°C), lo que origina una demanda anual de calefacción de 3.600 grado-día (figura 1b y tabla 1) (Servicio Meteorológico Nacional de Argentina - SMN 2017). Sin embargo, con medias mensuales de 2°C a 14°C, posee inviernos más benignos que el hemisferio norte. Por ejemplo, en Okotoks Canadá, el recurso solar anual es similar a Bariloche, pero siendo muy bajo (0,5 kWh/m²/día) en invierno y con mayor fracción invernal de calefacción (55% contra 38% en Bariloche) (Sibbit, Mcclenahan, Djebbar y Kokko 2012). Esta característica común a Sudamérica, favorece aquí el empleo de la ganancia solar con ventanas simples, contra las costosas ventanas del norte.

La mayoría de las viviendas en Bariloche presentan mala calidad térmica (paredes de mampostería liviana sin aislación y techos poco aislados) y ventanas vidrio simple de baja hermeticidad, requiriendo una muy elevada demanda de calefacción (260kWh/m²/año). Como ya fue discutido por Juanicó y González (2018), esta demanda se puede reducir a la mitad (130kWh/m²/año) con cambios moderados. Entonces,

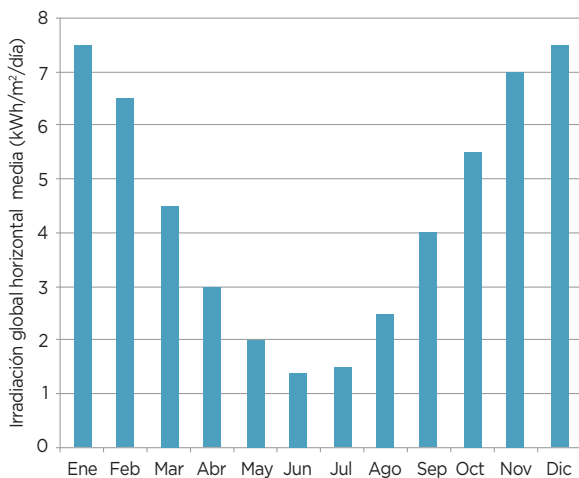


Figura 1a. Irradiación global horizontal media, (kWh/m²/día) en Bariloche (fuente: Elaboración propia).

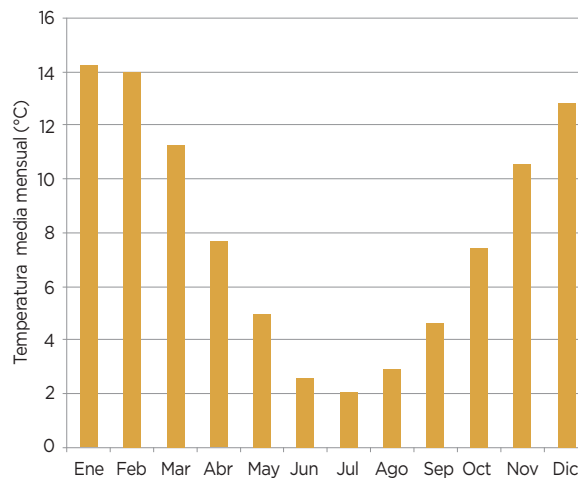


Figura 1b. Temperatura media en Bariloche (fuente: Elaboración propia).

para una vivienda standard de 50m² u otra rehabilitada de 100m² (ambas 13,000 kWh/año), obtenemos las demandas diarias de tabla 1.

Modelo térmico-solar. Las ecuaciones (1-7) describen la trayectoria aparente del sol (Juanicó, Di Lalla y González 2017; Monroy 1995; Braun y Mitchell 1983). La ecuación 1 calcula el ángulo de declinación solar para un día dado del año ($d=1,2,...365$) y la ecuación 2 calcula el ángulo horario del sol (ω) para una hora dada del día ($\omega=0^\circ$ al norte, negativo al E y positivo al O). A partir de estas, y con la latitud de la locación (ϕ , negativa en hemisferio sur), se calculan cuatro parámetros auxiliares (C_1 , C_2 , S_1 y S_2) en ecuaciones (3-6) y la altura solar sobre el horizonte (α) en ecuación 7. De aquí podemos, para un plano vertical (ventanas) orientado en un dado ángulo azimutal ψ_0 (0° al norte), calcular (ecuación 8) su área normal proyectada (A_n), siendo H y W el alto y ancho del acristalamiento (Juanicó y Dilalla 2016). Multiplicando A_n por el flujo de irradiación solar directa constante promedio (I_{d0} , en W/m²), como ya fue explicado, podemos calcular (ecuación 9) la potencia solar irradiada sobre la ventana, P_{solar} (W), y con esta y considerando la transmisividad solar (τ_s) del acristalamiento

	% DEMANDA CALEFACCIÓN	DEMANDA DIARIA (kWh)	I_{d0} (W/m ²)
ENERO	3,3	13,8	875
FEBRERO	3,2	14,9	860
MARZO	5,6	23,5	740
ABRIL	8,0	34,7	690
MAYO	10,8	45,3	655
JUNIO	12,1	52,4	580
JULIO	13,1	54,9	600
AGOSTO	12,6	52,8	670
SEPTIEMBRE	10,7	46,4	750
OCTUBRE	8,7	36,5	790
NOVIEMBRE	6,7	29,0	850
DICIEMBRE	5,2	21,8	850
ANUAL	100%	13.000	742

Tabla 1. Fracción mensual y demanda diaria de calefacción (para 13,000 kWh/año) e irradiación solar directa equivalente para Bariloche (fuente: Elaboración propia).

escogido, podemos calcular (ecuación 10) la potencia captada por el hábitat, P_{gain} (ganancia solar). Luego, calculamos (ecuación 11) la potencia de pérdida de calor (P_{lost}) que sufre el hábitat (de temperatura T_i) por la ventana sujeto a una temperatura exterior (T_{amb}). Para ello, debemos definir la calidad térmica de la ventana (tabla 2) con su transmisividad térmica, U ($W/m^2/^\circ C$). Finalmente, consideramos el ciclo diario de T_{amb} por una senoide (ecuación 12), dada por su promedio (T_a) y amplitud (ΔT_a).

$$\begin{aligned} \delta &= 23,45 \operatorname{sen}(360(d-81)/365), & \text{siendo } d &= 1, 2, \dots, 365 & (1) \\ \omega &= 360^\circ t/24h - 180^\circ, & \text{para } 0 < t < 24h & & (2) \\ C_1 &= \operatorname{sen}(\delta) \operatorname{sen}(\phi) & & & (3) \\ C_2 &= \operatorname{cos}(\delta) \operatorname{cos}(\phi) & & & (4) \\ S_1 &= C_1 + C_2 \operatorname{cos}(\omega) & & & (5) \\ S_2 &= \sqrt{1 - C_1^2} & & & (6) \\ \alpha &= \operatorname{arctan}(S_1/S_2) & & & (7) \\ A_n &= H W \operatorname{cos}(\alpha) \operatorname{cos}(\omega - \psi_0), & \text{si } \alpha > 0 \text{ (día), o } A_n = 0 \text{ si } \alpha < 0 \text{ (noche)} & & (8) \\ P_{solar} &= A_n I_{d0} & & & (9) \\ P_{gain} &= \tau_s P_{solar} & & & (10) \\ P_{lost} &= U A_n (T_i - T_{amb}) & & & (11) \\ T_{amb} &= T_a + \Delta T_a \operatorname{cos}[\pi(t-14)/12] & & & (12) \end{aligned}$$

Programamos en Excel (VENTANASOL) las ecuaciones (1-12) a lo largo del día para cuatro ventanas. Los parámetros climáticos latitud (θ), día del año (d), irradiación solar constante (I_{d0}), temperatura ambiente media y amplitud diaria (T_a y ΔT_a), y temperatura del hábitat (T_i) se introducen en celdas B4-B9. Luego, en las celdas B11-B33 se cargan los datos de cada ventana: orientación azimutal, ψ_0 , anchura y altura (W y H), transmisividad solar, τ_s , y térmica, U . Nótese en tabla 2 que el DVH provee más aislación que el vidrioado simple, pero también reduce 30% su ganancia solar. Aquí la transmisividad solar fue medida sobre vidrios comerciales de Bariloche, y para U se aplicaron valores bibliográficos reconocidos (Cengel 2003), quedando el lector en libertad de ajustar estos valores según datos específicos provistos por fabricantes. El programa calcula la trayectoria aparente del sol (columnas B-E) y la temperatura exterior (columna F) para cada hora del día (columna A), siguiendo las ecuaciones (1-7). Para la primera ventana se calcula lo siguiente: el área normal proyectada al

sol (columna G), la potencia solar recibida (columna H), la potencia solar ganada (columna I) y la potencia de pérdida de calor (columna J); la columna K calcula (integrando a lo largo del día) la insolación de esa ventana. Se repite este proceso para las ventanas restantes (columnas L a Z), y entonces se calcula (columna AA) la potencia total neta (sumando las potencias ganadas y restando las pérdidas de calor), la cual se grafica.

Antes indicamos que la irradiación solar (I_{d0}) es un dato a ingresar (Excel "horizontal"), habiendo calculado (tabla 1) sus promedios mensuales a partir de los promedios de energía diaria irradiada (E_d) sobre suelo. Para esto utilizamos la ecuación 13 (Juanicó 2018), que calcula el flujo normal proyectado sobre plano horizontal por la radiación solar normal a este (I_n). Integrando luego I_n durante todo el día, obtenemos la energía total recibida, y siendo ésta conocida ajustamos el valor de I_{d0} .

$$I_n = I_{d0} [\operatorname{sen}(\delta) \operatorname{sen}(\phi) + \operatorname{cos}(\delta) \operatorname{cos}(\phi) \operatorname{cos}(\omega)] \quad (13)$$

Comparando ambas magnitudes (I_{d0} y E_d), se observa un efecto interesante. Los promedios estivales de energía sobre suelo son 5 veces mayores a los invernales (figura 1a), pero esta diferencia se reduce al 45% en I_{d0} (tabla 1), debido a las diferentes horas de insolación (9h a 15h en Bariloche) y la baja altura solar invernal que reduce su proyección horizontal, pero la aumenta sobre ventanas.

	τ_s	U ($W/m^2/^\circ C$)
Vidrio simple	0,7	6,5
DVH	0,5	3,0

Tabla 2. Transmisividad solar y térmica de ventanas (fuente: Elaboración propia).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN.
Ventanas de simple vidriado.

Según su orientación (E=-90°, N=0°, etc.), estudiaremos la ganancia solar de una ventana (10m²) de vidrio simple durante todo el día y la mañana para el mes de julio (tabla 3), considerando el recurso solar ($d=196$, $I_{d0}=600W/m^2$) y temperatura ambiente ($T_a=2°C±7°C$) promedios. Además, fijando la temperatura interior ($T_i=21°C$), podemos calcular las pérdidas de calor y la ganancia neta (diaria y matinal). En tabla 3, destacamos la ventana NE (-45°), la cual brinda una ganancia matinal neta equivalente a un tercio de la demanda de calefacción (tabla 1). Nótese que estos resultados se repiten para orientaciones simétricas al oeste, cambiando mañana por tarde.

Las tablas 4 y 5 ilustran similarmente los resultados para abril ($d=105$, $I_{d0}=690W/m^2$, $T_a=8°C±8°C$) y enero ($d=15$, $I_{d0}=875W/m^2$, $T_a=12°C±14°C$). Respecto de julio, en abril se reduce la ventaja en ganancia diaria a favor de la orientación N, y en enero se invierte a favor de la NE (-45°). Esto se debe a que las ventanas captan mejor el recurso solar cuando la altura solar es baja, siendo, por el contrario, máxima al norte y en verano. Además, en abril se observa que la orientación NE obtiene una ganancia neta matinal 50% superior a la N, y que representa el 63% de la demanda de calefacción (tabla 1).

ÁNGULO ORIENTACIÓN VENTANA	ENERGÍA DIARIA		ENERGÍA MAÑANA	
	GAN (kWh)	NETA (kWh)	GAN (kWh)	NETA (kWh)
-90° (E)	10,1	-19,7	10,1	3,2
-60°	17,8	-12	15,9	9
-45° (NE)	21,4	-8,4	17,3	10,4
-30°	24,7	-5,1	17,5	10,5
0° (N)	28,2	-1,6	14,3	7,4

Tabla 3. Energía solar para 10m² vidrio simple en julio (fuente: Elaboración propia).

ÁNGULO ORIENTACIÓN VENTANA	GAN (kWh)	NETA (kWh)	GAN (kWh)	NETA (kWh)
-60°	22,6	2,2	20,7	16,3
-45° (NE)	25,9	5,5	21,7	17,3
-30°	28,7	8,3	21,2	16,8
0° (N)	31,6	11,2	16,0	11,5

Tabla 4. Energías para 10m² vidrio simple en abril (fuente: Elaboración propia).

ÁNGULO ORIENTACIÓN VENTANA	ENERGÍA DIARIA		ENERGÍA MAÑANA	
	GAN (kWh)	NETA (kWh)	GAN (kWh)	NETA (kWh)
-90° (E)	25,9	14,9	18,2	1,7
-60°	29,6	18,6	22,5	20,8
-45° (NE)	29,7	18,7	22,4	20,7
-30°	28,8	17,8	20,8	19,1
0° (N)	26,7	15,7	13,5	11,8

Tabla 5. Energías para 10m² vidrio simple en enero (fuente: Elaboración propia).

ÁNGULO ORIENTACIÓN VENTANA	ENERGÍA DIARIA		ENERGÍA MAÑANA	
	GAN (kWh)	NETA (kWh)	GAN (kWh)	NETA (kWh)
-90° (E)	7,2	-6,4	7,2	4,1
-60°	12,7	-1	11,4	8,2
-45° (NE)	15,3	1,6	12,3	9,2
-30°	17,6	4,0	12,5	9,3
0° (N)	20,2	6,5	10,2	7,0

Tabla 6. Energías para 10m² DVH en julio (fuente: Elaboración propia).

ÁNGULO ORIENTACIÓN VENTANA	ENERGÍA DIARIA		ENERGÍA MAÑANA	
	GAN (kWh)	NETA (kWh)	GAN (kWh)	NETA (kWh)
-90° (E)	10,5	1,1	10,5	8,5
-60°	16,1	6,8	14,8	12,8
-45° (NE)	18,5	9,2	15,5	13,5
-30°	20,5	11,1	15,1	13,1
0° (N)	22,6	13,2	11,4	9,4

Tabla 7. Energías para 10m² DVH en abril (fuente: Elaboración propia).

ÁNGULO ORIENTACIÓN VENTANA	ENERGÍA DIARIA		ENERGÍA MAÑANA	
	GAN (kWh)	NETA (kWh)	GAN (kWh)	NETA (kWh)
-90° (E)	18,5	13,5	13,0	12,2
-60°	21,2	16,1	16,1	15,3
-45° (NE)	21,2	16,2	16,0	15,2
-30°	20,6	15,5	14,8	14,1
0° (N)	19,1	14,0	9,6	8,9

Tabla 8. Energías para 10m² DVH en enero (fuente: Elaboración propia).

Ventanas de doble vidrio hermético (DVH).

Repetiremos en las tablas 6-8 el estudio anterior para una ventana DVH. Se observan aquí comportamientos diferentes del vidrioado simple:

- 1) El DVH obtiene balances diarios positivos en invierno (del NE al NO), pero sus ganancias matinales son menores.
- 2) El DVH también mejora (+67% al NE) el balance diario otoñal, pero nuevamente sus ganancias matinales son peores (-23% para NE).
- 3) El DVH presenta en verano un peor desempeño diario (-15%) y matinal (-36%).

Sintetizando, la ventaja del DVH se traduce en un mejor balance energético diario pero no durante las mañanas (o tardes al oeste). En cambio, el vidrioado simple permite obtener mayores ganancias matinales, que permitirían calefaccionar la vivienda si se resolviese adecuadamente su protección térmica el resto del día.

Ventanas de vidrio simple con persianas térmicas para calefacción solar.

Del estudio anterior, observamos que las ventanas simples obtienen mejores ganancias netas matinales que DVH, pero su balance diario es peor debido a sus elevadas pérdidas de calor. Una solución superadora consiste en sumar una persiana térmica exterior a cada ventana simple (imagen 1), cerrándola cuando no recibe insolación. Estas modernas persianas se pueden incorporar a cualquier ventana con precios competitivos. Una de aluminio de 5m² cuesta 350 dólares y se instala fácilmente. En cambio, sustituir por DVH cuesta seis veces más (sacar ventana, acondicionar contramarcos e instalar DVH). Además, estas persianas proporcionan excelente aislamiento (1cm de poliuretano y cámara de aire con ventana, $U_{persiana} \sim 0,3W/m^2\circ$), que modelaremos despreciando sus pérdidas de calor (error<10%) cuando no recibe insolación, para lo cual modificaremos la columna de pérdidas de calor de ambas ventanas (J y O), poniendo en cero los valores correspondientes.

Comparando la máxima demanda diaria (julio, 54,9kWh) con la ganancia neta matinal de una ventana 10m² vidrio simple al NE (17,3kWh), inferimos que podríamos satisfacerla triplicando la superficie vidriada y sumando persianas térmicas. Proponemos dos muros de 18m² al NE y NO, de forma de captar el recurso solar matinal y vespertino, ilustrando la figura 2 la evolución de su ganancia neta para julio ($d=196$, $I_{d0}=600W/m^2$, $T_a=2\circ C \pm 7\circ C$) con ganancia total 54,9kWh.

Dado que durante el día se generarán excedentes, se podrían aprovechar para cubrir la demanda nocturna mediante sistemas pasivos de acumulación (muros Trombe). Un diseño conceptual del mismo, que otorga buenas visuales y mayor privacidad, consiste en revestir la franja inferior (1,5m) de cada muro con una cámara de agua estanca de 10cm, almacenando 53kWh en un ciclado confortable (40°C-65°C). Repitiendo el análisis anterior en abril ($d=105$, $I_{d0}=690W/m^2$, $T_a=8\circ C \pm 8\circ C$), obtenemos una ganancia diaria neta (78,9kWh) muy superior a la demanda (34,7kWh).

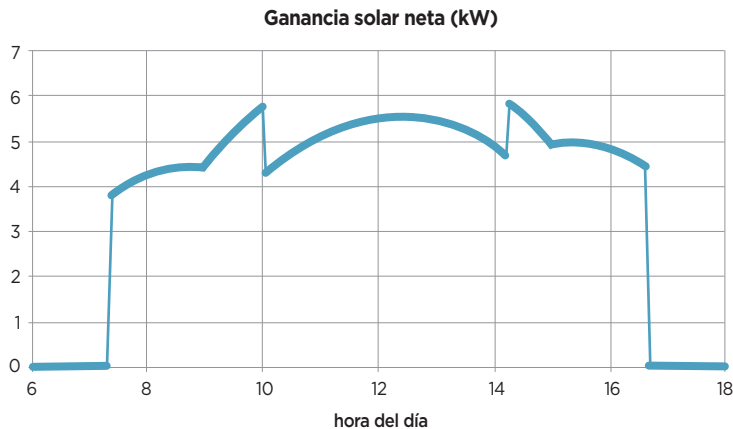


Figura 2. Evolución de la ganancia neta (2x18m²) en julio (fuente: Elaboración propia).



Imagen 1. Persiana térmica exterior (fuente: El autor).

CONCLUSIONES. Se desarrolló un modelo solar-térmico que hace posible cuantificar la ganancia solar y el balance energético de ventanas, permitiendo estudiar diferentes orientaciones, tamaños y tipo de acristalamientos. Siendo un modelo simple que considera una única irradiación solar (directa), es sencillo proveer sus parámetros sin datos radiométricos especiales. Se implementó un código numérico abierto (VENTANASOL), el cual se provee. Utilizando el mismo, realizamos estudios de sensibilidad para un clima frío de buen recurso solar (Bariloche). Se discute cómo el potencial solar captado por ventanas puede ser muy diferente de la inferencia directa de datos meteorológicos y/o del

recurso solar sobre suelo (mapas solares). Así, en Bariloche el recurso promedio varía 5 veces ($1,5\text{kWh/m}^2$ a $7,5\text{kWh/m}^2$), pero su irradiación solar solo un 45% (600W/m^2 a 875W/m^2). Esta discrepancia, sumada al hecho de que la baja altura solar invernal favorece su captación por ventanas (verticales), brinda un gran potencial de ganancia solar. Se estudió la mejor implantación de la vivienda, siendo esta NE-NO con una ventana NE (ganancia matinal) y otra NO (ganancia vespertina). Para el diseño propuesto (dos muros vidriados 18m^2 con muro Trombe inferior y persiana térmica exterior), se cuantificaron sus ganancias energéticas y se compararon con las demandas de calefacción para

una vivienda promedio en Bariloche (13.000kWh/año), encontrándose que la calefacción solar pasiva podría solventarla revirtiendo el paradigma tradicional que desaconseja el uso de grandes ventanas. También observamos que las nuevas persianas térmicas exteriores brindan una solución para mejorar cualquier ventana simple, superadora de su sustitución por DVH. Cabe reflexionar que en el Cono Sur, donde se presentan climas templados a fríos y donde es frecuente el uso de ventanas pequeñas, la aplicación de este diseño sustentable podría acarrear, además, otros beneficios medioambientales, como la menor contaminación por quema de leña y/o combustibles fósiles.

REFERENCIAS

- Braun, J. y Mitchell, J., 1983. "Solar geometry for fixed and tracking surfaces." *Solar Energy*, 31: 439-444.
- Cengel, Y., 2003. *Transferencia de calor*. McGraw-Hill (2nd Ed.).
- Duffie J. y Beckman W., 2013. *Solar Engineering of Thermal Processes*. Nueva Jersey: John Wiley & Sons (4th Ed.)
- Grossi, H. y Righini, R., 2007. *Atlas de energía solar de la República Argentina*. Disponible en: http://www.gersol.unlu.edu.ar/Atlas_Solar/index.html
- Juanicó, L. y Di Lalla, N., 2016. "The pulsed-flow design: A new low-cost solar collector." *Renewable Energy*, 87, (1): 422-429.
- Juanicó, L., Di Lalla, N. y González, D., 2017. "Full thermal-hydraulic and solar modeling to study low-cost solar collectors based on a single long LDPE hose." *Journal of Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 73: 187-195.
- Juanicó, L. y González, A., 2018. "Calefacción solar en edificaciones con acumulación en gran reservorio de agua." *Revista INVI*, 33, (93): 153-172.
- Juanicó, L., 2018. "Modified vacuum tubes for overheating limitation of solar collectors: A dynamical modeling approach." *Solar Energy*, 171: 804-810.
- Monroy, M., 1995. *Comportamiento térmico de cerramientos soleados. Un modelo de simulación por diferencias finitas* (Tesis para optar al grado de Doctor en Arquitectura, Universidad Las Palmas, Gran Canaria, España). Disponible en: http://editorial.cda.ulpgc.es/ambiente/9_anexo/2_tesis/tesis.pdf
- National Aeronautics and Space Administration (NASA), 2018. *NASA's Space Science Data System*. Disponible en: <http://ssds.nasa.gov/>
- Righini R., Grossi, H. y Raichijk C., 2005. "Approach to drawing new global solar irradiation contour maps for Argentina." *Renew. Energy*, 30: 1241-1255.
- Servicio Meteorológico Nacional de Argentina (SMN), 2017. *Sección Climatología-Datos estadísticos*. Disponible en: www.smn.gov.ar
- Sibbitt B., Mcclenahan D., Djebbar, R. y Kokko, J., 2012. "The performance of a high solar fraction seasonal storage district heating system - five years of operation." *Energy Procedia*, 30: 856-865.
- Solar Gis, 2013. *Mapa Solar Chile*. Disponible en: <https://acesol.cl/index.php/noticias/item/413-mapa-de-irradiacion-C3%B3n-solar-de-chile.html>