

Una revisión bibliográfica de estudios sobre fachadas solares opacas y transparentes.

Quesada Ramos, Guillermo (1); Dutil, Yvan (2); Rousse, Daniel (3); Halle, Stephane (4)

(1) Chaire de recherche industrielle t3e, École de technologie supérieure, Montréal, Canada
guillermo@t3e.info

(2) Chaire de recherche industrielle t3e, École de technologie supérieure, Montréal, Canada
Yvan@t3e.info

(3) Chaire de recherche industrielle t3e, École de technologie supérieure, Montréal, Canada
daniel@t3e.info

(4) Chaire de recherche industrielle t3e, École de technologie supérieure, Montréal, Canada
Stephane.halle@etsmtl.ca

Resumen:

Los pueblos antiguos denotaban un conocimiento de los principios de la arquitectura solar, orientando sus casas al sur para aprovechar el sol durante todas las estaciones del año. En la actualidad, la arquitectura solar está experimentando una verdadera revolución producto, entre otros, del desarrollo de fachadas especiales utilizadas en los procesos de calefacción, ventilación, aislamiento térmico, sombreado, de generación de energía eléctrica y de iluminación natural de edificaciones, a las que se les ha dado el nombre de "fachadas solares". El siguiente trabajo tiene como objetivo presentar una exhaustiva revisión bibliográfica de estudios científicos efectuados sobre las fachadas solares durante los primeros 10 años del presente siglo. En total, 190 artículos fueron revisados, cuyo 75% se encuentra publicado en las revistas científicas: Energy and Buildings, Solar Energy, Building and Environment, Renewable Energy y Applied Thermal Engineering.

Palabras claves: Fachada solar, radiación solar, almacenamiento térmico, chimenea solar, fachada ventilada.

A review of opaque and transparent solar facades.

Abstract:

Ancient peoples denoted a knowledge of the principles of solar architecture, designing their houses to the south to enjoy the sun during all seasons. At present, solar architecture is undergoing a remarkable revolution product, among others, of the developing special facades used in the processes of heating, ventilation, insulation, shading, electrical power generation and natural lighting of buildings, which have been named "solar facades". The following paper aims to present a comprehensive review of scientific studies carried out on solar facades during the first 10 years of this century. A total of 190 articles were reviewed and 75% of them were published in the followings scientific journals: Energy and Buildings, Solar Energy, Building and Environment, Renewable Energy and Applied Thermal Engineering.

Keywords: solar facade, solar radiation, thermal storage, solar chimney, ventilated facade.

Introducción

En arquitectura la fachada es, por definición general, la envolvente exterior de la superficie habitable de una vivienda, y dicha envolvente se encuentra dispuesta verticalmente en la mayoría de los casos.

La fachada, además de su función estética, debe cumplir con otros requisitos: ser resistente al agua, aislar el edificio térmicamente y acústicamente, y en algunos casos, ser resistente al fuego.

Hoy en día la arquitectura solar atraviesa por una verdadera revolución a causa del desarrollo, entre otros, de fachadas solares diseñadas para la calefacción, ventilación, aislamiento, sombreado, la generación de

energía eléctrica y la iluminación natural de edificaciones. Sin embargo, su aplicación va acompañada de importantes desafíos en términos de la complejidad de los procesos y las tecnologías utilizadas y la capacidad de adaptación de estas soluciones para diferentes áreas geográficas con condiciones climáticas específicas. Este problema ha suscitado un gran interés en la comunidad científica internacional, quien ya ha llevado a cabo numerosos estudios sobre fachadas solares. La siguiente figura ilustra una clasificación general de dichas fachadas solares.

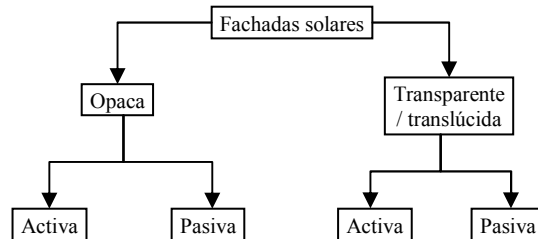


Figura 1. Clasificación general de fachadas solares

Nuestro equipo ha realizado una revisión exhaustiva del trabajo científico realizado sobre las fachadas solares durante los primeros 10 años del presente siglo. Los resultados de este estudio se resumen a continuación.

Método de investigación

En primer lugar se definió el marco dentro del cual se llevaría a cabo este estudio. Se hizo hincapié en las revistas científicas publicadas en los últimos diez años en las bases de datos: ScienceDirect, Taylor & Francis Journals y Springer.

Luego se compilaron las palabras clave encontradas en búsquedas bibliográficas preliminares, las que más adelante fueron empleadas para realizar una búsqueda exhaustiva en las bases de datos antes mencionadas.

Tabla 1: Lista de palabras clave

Facade	Solar facade, Multifunctional solar facade, Active facade, Active transparent facade, Double-skin facade, Unglazed transpired solar facade
Wall	Solar wall, Trombe wall, Ventilated solar wall, Active thermal wall
Envelope	Active building envelope, Window active envelope
Collector	Unglazed perforated-absorber collector, Unglazed transpired solar collector
	Heat discharge system, Active Thermal insulators, Building-integrated Photovoltaic panel, Transparent heat insulation

Del conjunto de publicaciones científicas encontradas, las más pertinentes fueron seleccionadas y agrupadas según el tipo de fachada solar estudiada en cada publicación. A continuación, cada artículo fue analizado y reagrupado dentro de los siguientes conjuntos: estudios teóricos-experimentales, estudios de desarrollo, estudios de factibilidad y estudios de caso. Esto último se hizo para facilitar cualquier revisión bibliográfica ulterior que se desee realizar sobre el tema tratado en este trabajo.

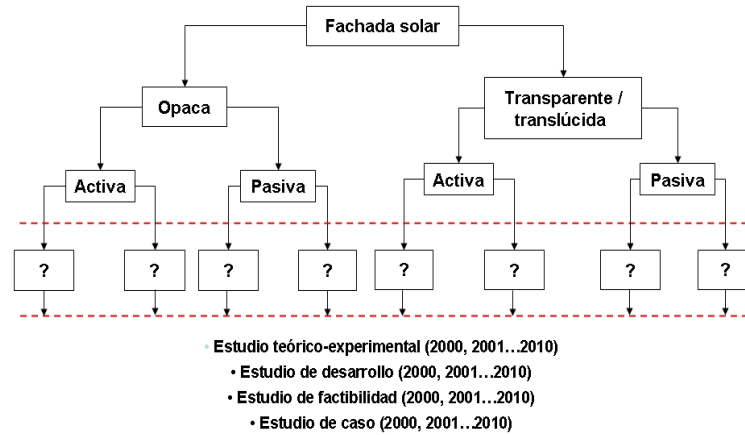


Figura 2. Esquema de la organización de la investigación

Resultados

Un total de 190 artículos pertinentes fueron encontrados, cuyo 68% fue publicado entre el 2006 y el 2010 (figura 3). En la misma figura se puede constatar un aumento significativo en el número de publicaciones a partir del 2007.

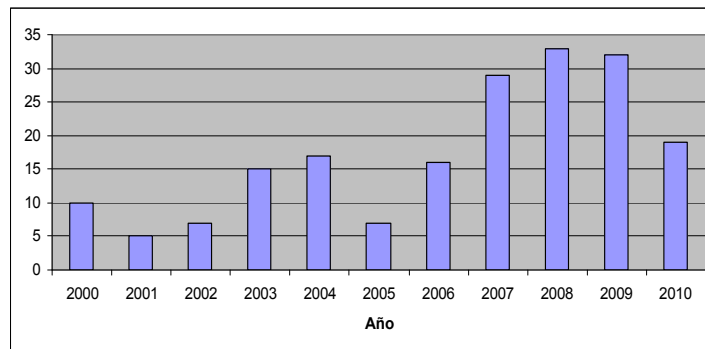


Figura 3. Distribución de artículos por año

El 75% de los artículos consultados fue publicado en las siguientes 5 revistas científicas: Energy and Buildings, Solar Energy, Building and Environment, Renewable Energy y Applied Thermal Engineering.

Tabla 2: Distribución de artículos de revista científica

Revista científica	Número de artículos
Energy and Buildings	60
Solar Energy	34
Building and Environment	21
Renewable Energy	18
Applied Thermal Engineering	9

En los siguientes epígrafes se describirán brevemente cada tipo de fachadas solares.

Fachadas solares opacas y activas

Las fachadas solares opacas absorben y reflejan la radiación solar incidente y no permiten la ganancia solar directa hacia el interior de la edificación. Si dichas fachadas son capaces de transformar la radiación solar incidente en electricidad, para su uso inmediato, o si ellas emplean aparatos eléctricos o mecánicos (bombas, ventiladores, válvulas, equipos de control) para transferir la energía térmica al edificio, entonces se está en presencia de fachadas solares opacas y activas.

Fachada solar térmica integrada al edificio [1-12]

Una fachada solar térmica integrada al edificio cumple simultáneamente la función de cubierta exterior y de colector de energía solar para fines de calentamiento. Esta tecnología ha despertado un gran interés por su relativa simplicidad tecnológica, sin embargo, aún se trabaja en optimizar su funcionamiento. Por ejemplo, el impacto del viento sobre dicha fachada no es bien comprendido. Actualmente se investiga en nuevos materiales de recubrimiento superficial para aumentar la versatilidad de esta fachada.

Fachada solar fotovoltaica integrada al edificio [13-24]

Una fachada solar fotovoltaica integrada al edificio consiste en la integración de paneles fotovoltaicos en la envolvente de la edificación, reemplazando con ello materiales de construcción tradicionales. En algunos casos, se emplea un flujo de aire detrás del panel fotovoltaico para mejorar su eficiencia energética.

Fachada solar híbrida fotovoltaica- térmica integrada al edificio [25-34]

Una fachada solar híbrida fotovoltaica- térmica integrada al edificio simultanea las funciones de una fachada solar fotovoltaica con las de una solar térmica. Esta combinación tiene como objetivo hacer un uso más eficiente de la energía solar incidente sobre la fachada. El panel fotovoltaico trabajara con mayor eficiencia a menor temperatura y a la vez suministrara calor util para la edificación.

Fachadas solares opacas y pasivas

Las fachadas solares opacas y pasivas pueden ser paredes o superficies opacas acristaladas que transforman la energía solar incidente en energía térmica para la calefacción o ventilación del edificio, sin necesidad de utilizar aparatos eléctricos o mecánicos (bombas, ventiladores, válvulas, equipos de control).

Pared de almacenamiento térmico [35-57]

Una pared de almacenamiento térmico o muro Trombe combina las funciones de colección y almacenamiento de la energía solar térmica en una sola unidad. El calor se transfiere desde la pared al aire en la oficina por radiación y convección natural. Este es el sistema que más se ha estudiado. El mismo ha demostrado su potencial en la reducción de la demanda de calefacción (40-50%). Con el empleo de la norma internacional UNE-EN ISO 13790 se pueden realizar cálculos que describen el comportamiento térmico de dicha pared.

Chimenea solar [58-67]

Una chimenea solar es una estructura que se compone principalmente de una superficie captadora acristalada para el calentamiento de aire. Cuando la energía solar calienta dicha superficie, se produce una corriente ascendente de aire en la chimenea y una aspiración natural de aire en la base de la chimenea, lo que se emplea para la ventilación del edificio. Aunque es similar al muro Trombe, la tecnología de la chimenea solar esta menos desarrollada y los estudios realizados muestran un potencial significativo para su optimización.

Fachadas solares transparentes / translúcidas activas

Las fachadas solares transparentes / translúcidas no sólo absorben y reflejan una parte de la radiación solar incidente, sino también permiten la ganancia solar directa hacia el interior de la edificación. Se denominan fachadas solares transparentes / translúcidas activas si además son capaces de transformar la radiación solar incidente en electricidad, para su uso inmediato, o si emplean aparatos eléctricos o mecánicos (bombas, ventiladores, válvulas, equipos de control) para transferir la energía térmica al edificio.

Fachada con ventilación mecánica [68-77]

Una fachada con ventilación mecánica utiliza un sistema de ventilación mecánico para proporcionar, eliminar o recircular el aire a través de una cavidad situada entre dos superficies transparentes o translúcidas que forman parte de la envolvente del edificio. El aire extrae el calor de dicha envolvente

acristalada y, recirculando o desechando este aire caliente, se reducen los costos de calefacción (invierno) y aire acondicionado (verano) del edificio.

Fachada solar fotovoltaica semitransparente integrada al edificio [78-87]

Una fachada solar fotovoltaica semitransparente integrada al edificio forma parte de la envolvente del mismo, permite la entrada de luz natural en sus espacios interiores y transforma la energía solar incidente en electricidad, con el empleo de módulos fotovoltaicos semitransparentes.

Fachada solar fotovoltaica-térmica semitransparente integrada al edificio [88-89]

Una fachada solar fotovoltaica-térmica semitransparente integrada al edificio combina las funciones de un sistema fotovoltaico con las de una fachada con ventilación mecánica. Muy pocos estudios sobre esta aplicación han sido realizados hasta el momento.

Fachadas solares transparentes / translúcidas pasivas

Las fachadas solares transparentes / translúcidas pasivas pueden ser superficies acristaladas que transforman la luz solar en energía térmica para la calefacción o ventilación del edificio. No utilizan dispositivos mecánicos o eléctricos (bombas, ventiladores, válvulas, equipos de control) y permiten la ganancia solar directa hacia el interior de la edificación.

Fachada con ventilación natural [90-102]

Una fachada con ventilación natural proporciona, evacua o recircula el aire a través de una cavidad situada entre dos superficies transparentes o translúcidas pertenecientes a la envolvente del edificio. El movimiento del aire se produce debido a la presión del viento y / o al efecto de chimenea. De modo similar a la fachada con ventilación mecánica, el aire extrae el calor de dicha envolvente acristalada y recirculando o desechando este aire caliente se reducen los costos de calefacción (invierno) y de climatización (verano) del edificio.

Conclusiones

Una revisión bibliográfica de estudios científicos realizados entre los años 2000 y 2010 sobre fachadas solares fue realizada. Las fachadas estudiadas fueron agrupadas en nueve categorías (Fig. 4): fachada solar térmica integrada al edificio (STIE), fachada solar fotovoltaica integrada al edificio (SFIE), fachada solar híbrida fotovoltaica- térmica integrada al edificio (SFTIE), pared de almacenamiento térmico (PAT), chimenea solar (CS), fachada con ventilación mecánica (VM), fachada solar fotovoltaica semitransparente integrada al edificio (SFSIE), fachada solar fotovoltaica-térmica semitransparente integrada al edificio (SFTSIE) y fachada con ventilación natural (VN).

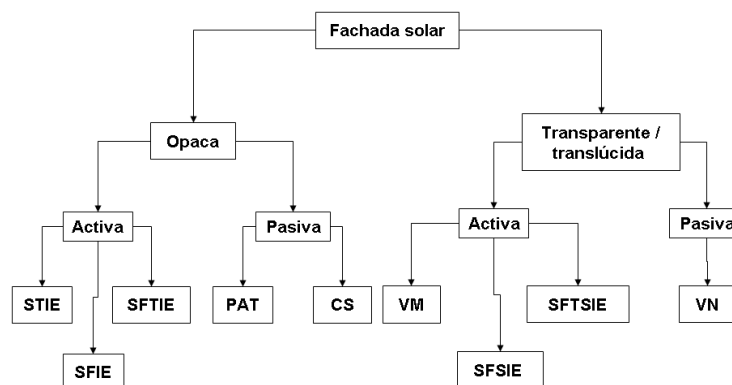


Figura 4. Clasificación de las fachadas solares

Las fachadas ventiladas están ganando un espacio notable como elemento arquitectónico en edificios de oficinas. Más allá de la estética, dichas fachadas protegen al edificio y a la vez contribuyen a reducir los costos de calefacción (invierno) y de climatización (verano) del edificio. Diversos estudios prestan especial atención al uso de dispositivos de sombreado (ej.: persianas venecianas, masa térmica de hormigón) en el conducto de ventilación de la fachada con el fin de reducir la ganancia solar directa en los edificios.

Las fachadas solar fotovoltaica semitransparente y solar fotovoltaica-térmica semitransparente integradas al edificio además de suministrar energía eléctrica, permiten el paso de la luz natural y del calor hacia el interior del edificio. Estas tecnologías se encuentran aún en una fase temprana de su desarrollo.

Los trabajos científicos revisados muestran un gran potencial en las aplicaciones de las fachadas solares en edificaciones, sin embargo, aún queda por investigar en vistas a optimizar sus rendimientos energéticos. Hoy en día, únicamente la pared de almacenamiento térmico y sus diferentes variantes muestran un avanzado grado de madurez tecnológica.

Para no sobrepasar el número exigido de páginas en este trabajo, en las referencias bibliográficas solamente aparecen 102 artículos de los 190 consultados. La lista completa de artículos consultados puede ser enviada por correo electrónico a todo aquel que se muestre interesado.

Referencias bibliográficas

- [1] VAN DECKER, G.W.E., HOLLANDS K.G.T., BRUNGER A.P., Heat-exchange relations for unglazed transpired solar collectors with circular holes on a square or triangular pitch, *Solar Energy*, 71, pp.33-45, (2001).
- [2] FLECK B.A., MEIER R.M., MATOVIC M.D., A field study of the wind effects on the performance of an unglazed transpired solar collector, *Solar Energy*, 73, pp.209-216, (2002).
- [3] GUNNEWIEK L.H., HOLLANDS K.G.T., BRUNDRETT E., Effect of wind on flow distribution in unglazed transpired-plate collectors, *Solar Energy*, 72, pp.317-325, (2002).
- [4] LEON M.A., KUMAR S., Mathematical modeling and thermal performance analysis of unglazed transpired solar collectors, *Solar Energy*, 81, pp.62-75, (2007).
- [5] BOUTIN Y., GOSSELIN L., Optimal mixed convection for maximal energy recovery with vertical porous channel (solar wall), *Renewable Energy*, 34, pp.2714-2721, (2009).
- [6] RICHMAN R.C., PRESSNAIL K.D., A more sustainable curtain wall system: Analytical modeling of the solar dynamic buffer zone (SDBZ) curtain wall, *Building and Environment*, 44, pp.1-10, (2009).
- [7] RICHMAN R., PRESSNAIL K.D., Quantifying and predicting performance of the solar dynamic buffer zone (SDBZ) curtain wall through experimentation and numerical modeling, *Energy and Buildings*, 42, pp.522-533, (2010).
- [8] OREL B., SPREIZER H., SURCA V.A., FIR M., MERLINI D., VODLAN M., KÖHL M., Selective paint coatings for coloured solar absorbers: Polyurethane thickness insensitive spectrally selective (TISS) paints (Part II), *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 91, pp.108-119, (2007).
- [9] JAPELJ B., VUK A.S., OREL B., PERSE L.S., JERMAN I., KOVAC J., Preparation of a TiMEMO nanocomposite by the sol-gel method and its application in coloured thickness insensitive spectrally selective (TISS) coatings, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 92, pp.1149-1161, (2008).
- [10] KOZELJ M., VUK A.S., JERMAN I., OREL B., Corrosion protection of Sunselect, a spectrally selective solar absorber coating, by (3-mercaptopropyl) trimethoxysilane, *Solar Energy Materials and Solar Cells*; 93, pp.1733-1742, (2009).
- [11] JERMAN I., KOZELJ M., OREL B., The effect of polyhedral oligomeric silsesquioxane dispersant and low surface energy additives on spectrally selective paint coatings with self-cleaning properties, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 94, pp.232-245, (2010).
- [12] UBERTINI S., DESIDERI U., Design of a solar collector for year-round climatization, *Renewable Energy*, 28, pp.623-645, (2003).
- [13] HENEMANN A., BIPV: Built-in solar energy, *Renewable Energy Focus*, 9:14, pp.16-19, (2008).
- [14] BRINKWORTH B.J., MARSHALL RH, IBARAHIM Z., A validated model of naturally ventilated PV cladding, *Solar Energy*, 69, pp.67-81, (2000).
- [15] YANG H., BURNETT J., JI J., Simple approach to cooling load component calculation through PV walls, *Energy and Buildings*, 31, pp.285-290, (2000).
- [16] CHOW T.T., HAND J.W., STRACHAN P.A., Building-integrated photovoltaic and thermal applications in a subtropical hotel building, *Applied Thermal Engineering*, 23, pp.2035-2049 (2003).
- [17] HUANG M.J., EAMES P.C., NORTON B., Thermal regulation of building-integrated photovoltaics using phase change materials International, *Journal of Heat and Mass Transfer*, 47, pp.2715-2733, (2004).

- [18] HUANG M.J., EAMES P.C., NORTON B., Phase change materials for limiting temperature rise in building integrated photovoltaics, *Solar Energy*, 80, pp.1121-1130, (2006).
- [19] BLOEM J.J., Evaluation of a PV-integrated building application in a well-controlled outdoor test environment, *Building and Environment*, 43, pp.205-216, (2008).
- [20] FOSSA M., MÉNÉZO C., LEONARDI E., Experimental natural convection on vertical surfaces for building integrated photovoltaic (BIPV) applications, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 32, pp.980-990, (2008).
- [21] JIMÉNEZ M.J., MADSEN H., BLOEM J.J., DAMMANN B., Estimation of non-linear continuous time models for the heat exchange dynamics of building integrated photovoltaic modules, *Energy and Buildings*, 40, pp.157-167, (2008).
- [22] FRILING N., JIMÉNEZ M.J., BLOEM H., MADSEN H., Modelling the heat dynamics of building integrated and ventilated photovoltaic modules, *Energy and Buildings*, 41, pp.1051-1057, (2009).
- [23] MAURUS H., SCHMID M., BLERSCH B., LECHNER P., SCHADE H., PV for buildings: Benefits and experiences with amorphous silicon in BIPV applications, *Refocus*, 5, pp.22-27 (2004).
- [24] MALLICK T.K., EAMES P.C., NORTON B., Non-concentrating and asymmetric compound parabolic concentrating building facade integrated photovoltaics: An experimental comparison, *Solar Energy*, 80, pp.834-849, (2006).
- [25] JI J., HAN J., CHOW T-t., YI H., LU J., HE W., SUN W., Effect of fluid flow and packing factor on energy performance of a wall-mounted hybrid photovoltaic/water-heating collector system, *Energy and Buildings*, 38, pp.1380-1387, (2006).
- [26] MURESAN C., MÉNÉZO C., BENNACER R., VAILLON R., Numerical Simulation of a Vertical Solar Collector Integrated in a Building Frame: Radiation and Turbulent Natural Convection Coupling, *Heat Transfer Engineering*, 27, pp.29 – 42, (2006).
- [27] CRAWFORD R.H., TRELOAR G.J., FULLER R.J., BAZILIAN M., Life-cycle energy analysis of building integrated photovoltaic systems (BiPVs) with heat recovery unit, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 10, pp.559-575, (2006).
- [28] CHOW T.T., HE W., JI J., An experimental study of facade-integrated photovoltaic/water-heating system, *Applied Thermal Engineering*, 27, pp.37-45, (2007).
- [29] JIE J., HUA Y., WEI H., GANG P., JIANPING L., BIN J., Modeling of a novel Trombe wall with PV cells, *Building and Environment*, 42, pp.1544-1552, (2007).
- [30] JIE J., HUA Y., GANG P., JIANPING L. Study of PV-Trombe wall installed in a fenestrated room with heat storage. *Applied Thermal Engineering* 2007;27:1507-1515.
- [31] JIE J., HUA Y., GANG P., BIN J., WEI H., Study of PV-Trombe wall assisted with DC fan, *Building and Environment*, 42, pp.3529-3539, (2007).
- [32] TONUI J.K., TRIPANAGNOSTOPOULOS Y., Air-cooled PV/T solar collectors with low cost performance improvements, *Solar Energy*, 81, pp.498-511, (2007).
- [33] TONUI J.K., TRIPANAGNOSTOPOULOS Y., Improved PV/T solar collectors with heat extraction by forced or natural air circulation, *Renewable Energy*, 32, pp.623-637, (2007).
- [34] TONUI J.K., Tripanagnostopoulos Y., Performance improvement of PV/T solar collectors with natural air flow operation, *Solar Energy*, 82, pp.1-12, (2008).
- [35] FANG X., LI Y., Numerical simulation and sensitivity analysis of lattice passive solar heating walls, *Solar Energy*, 69, pp.55-66 (2000).
- [36] FANG X., YANG T., Regression methodology for sensitivity analysis of solar heating walls, *Applied Thermal Engineering*, 28, pp.2289-2294, (2008).
- [37] ZALEWSKI L., LASSUE S., DUTHOIT B., BUTEZ M. Study of solar walls -- validating a simulation model, *Building and Environment*, 37, pp.109-121, (2002).
- [38] ONBASIOGLU H., EGRICAN A.N., Experimental approach to the thermal response of passive systems, *Energy Conversion and Management*, 43, pp.2053-2065, (2002).
- [39] STRITIH U., Heat transfer enhancement in latent heat thermal storage system for buildings, *Energy and Buildings*, 35, pp.1097-1104, (2003).

- [40] CHEN W., LIU W., Numerical analysis of heat transfer in a passive solar composite wall with porous absorber, *Applied Thermal Engineering*, 28, pp.1251-1258, (2008).
- [41] HERNÁNDEZ V., MORILLÓN D., BEST J.F.R., ALMANZA R., CHARGOY N., Experimental and numerical model of wall like solar heat discharge passive system, *Applied Thermal Engineering*, 26, pp.2464-2469, (2006).
- [42] THOMAS J., ALGOHARY S., HAMMAD F., SOBOYEJO W., Materials selection for thermal comfort in passive solar buildings, *Journal of Materials Science*, 41, pp.6897-6907, (2006).
- [43] SHEN J., LASSUE S., ZALEWSKI L., HUANG D., Numerical study of classical and composite solar walls by TRNSYS, *Journal of Thermal Science*, 16, pp.46-55, (2007).
- [44] ZAMORA B., KAISER A.S., Numerical study on mixed buoyancy-wind driving induced flow in a solar chimney for building ventilation, *Renewable Energy*, 35, pp.2080-2088, (2010).
- [45] RUIZ Á., DOMÍNGUEZ S.Á., FERNÁNDEZ J.A.S. Revision of the Trombe wall calculation method proposed by UNE-EN ISO 13790, *Energy and Buildings*, 42, pp.763-773, (2010).
- [46] BAKOS G., Energy management method for auxiliary energy saving in a passive-solar-heated residence using low-cost off-peak electricity, *Energy and Buildings*, 31, pp.237-241, (2000).
- [47] BILGEN E., Experimental study of massive wall systems with fins attached on the heated wall and with glazing, *Heat and Mass Transfer*, 38, pp.159-164, (2001).
- [48] ONISHI J., SOEDA H., MIZUNO M., Numerical study on a low energy architecture based upon distributed heat storage system, *Renewable Energy*, 22, pp.61-66, (2001).
- [49] TYAGI V.V., BUDDHI D., PCM thermal storage in buildings: A state of art, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11, pp.1146-1166, (2007).
- [50] NWACHUKWU N.P., OKONKWO W.I., Effect of an Absorptive Coating on Solar Energy Storage in a Trombe wall system, *Energy and Buildings*, 40, pp.371-374, (2008).
- [51] PASUPATHY A., VELRAJ R., SEENIRAJ R.V., Phase change material-based building architecture for thermal management in residential and commercial establishments, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12, pp.39-64, (2008).
- [52] SHARMA A., TYAGI V.V., CHEN C.R., BUDDHI D., Review on thermal energy storage with phase change materials and applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13, pp.318-345, (2009).
- [53] ZHU N., MA Z., WANG S., Dynamic characteristics and energy performance of buildings using phase change materials: A review, *Energy Conversion and Management*, 50, pp.3169-3181, (2009).
- [54] HEIM D., Isothermal storage of solar energy in building construction, *Renewable Energy*, 35, pp.788-796, (2010).
- [55] BLASCO LUCAS I., HOESÉ L., PONTORIERO D., Experimental study of passive systems thermal performance. *Renewable Energy*, 19, pp.39-45, (2000).
- [56] YANG H., ZHU Z., BURNETT J., Simulation of the behaviour of transparent insulation materials in buildings in northern China, *Applied Energy*, 67, pp.293-306, (2000).
- [57] RAMAN P., MANDE S., KISHORE V.V.N., A passive solar system for thermal comfort conditioning of buildings in composite climates, *Solar Energy*, 70, pp.319-329, (2001).
- [58] AFONSO C., OLIVEIRA A., Solar chimneys: simulation and experiment, *Energy and Buildings*, 32, pp.71-79, (2000).
- [59] ONG K.S., A mathematical model of a solar chimney, *Renewable Energy*, 28, pp.1047-1060, (2003).
- [60] ONG K.S., CHOW C.C., Performance of a solar chimney, *Solar Energy*, 74, pp.1-17, (2003).
- [61] BANSAL N.K., MATHUR J., MATHUR S., JAIN M., Modeling of window-sized solar chimneys for ventilation, *Building and Environment*, 40, pp.1302-1308, (2005).
- [62] GAN G., Simulation of buoyancy-induced flow in open cavities for natural ventilation, *Energy and Buildings*, 38, pp.410-420, (2006).
- [63] MATHUR J., BANSAL N.K., MATHUR S., JAIN M., ANUPMA, Experimental investigations on solar chimney for room ventilation, *Solar Energy*, 80, pp.927-935, (2006).

- [64] NOUANÉGUÉ H.F., ALANDJI L.R., BILGEN E., Numerical study of solar-wind tower systems for ventilation of dwellings. *Renewable Energy*, 33, pp.434-443, (2008).
- [65] NOUANÉGUÉ H.F., BILGEN E., Heat transfer by convection, conduction and radiation in solar chimney systems for ventilation of dwellings, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 30, pp.150-157, (2009).
- [66] SAKONIDOU E.P., KARAPANTSIOS T.D., BALOUKTSIS A.I., CHASSAPIS D., Modeling of the optimum tilt of a solar chimney for maximum air flow, *Solar Energy*, 82, pp.80-94, (2008).
- [67] ZAMORA B., KAISER A.S., Optimum wall-to-wall spacing in solar chimney shaped channels in natural convection by numerical investigation, *Applied Thermal Engineering*, 29, pp.762-769, (2009).
- [68] BAKER P.H., MCEVOY M., Test cell analysis of the use of a supply air window as a passive solar component, *Solar Energy*, 69, pp.113-130, (2000).
- [69] MCEVOY M.E., SOUTHALL R.G., BAKER P.H., Test cell evaluation of supply air windows to characterise their optimum performance and its verification by the use of modelling techniques, *Energy and Buildings*, 35, pp.1009-1020, (2003).
- [70] SOUTHALL R.G., MCEVOY M.E., Investigations into the functioning of a supply air window in relation to solar energy as determined by experiment and simulation, *Solar Energy*, 80, pp.512-523, (2006).
- [71] ZÖLLNER A., WINTER E.R.F., VISKANTA R., Experimental studies of combined heat transfer in turbulent mixed convection fluid flows in double-skin-facades, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 45, pp.4401-4408, (2002).
- [72] SAFER N., WOLOSZYN M., ROUX J.J., Three-dimensional simulation with a CFD tool of the airflow phenomena in single floor double-skin facade equipped with a venetian blind, *Solar Energy*, 79, pp.193-203, (2005).
- [73] BALOCCO C., COLOMBARI M., Thermal behaviour of interactive mechanically ventilated double glazed facade: Non-dimensional analysis, *Energy and Buildings*, 38, 1-7, (2006).
- [74] GOSSELIN J.R., CHEN Q., A computational method for calculating heat transfer and airflow through a dual-airflow window, *Energy and Buildings*, 40, pp.452-458, (2008).
- [75] JIRU T.E., HAGHIGHAT F., Modeling ventilated double skin facade--A zonal approach, *Energy and Buildings*, 40, pp.1567-1576, (2008).
- [76] GUARDO A., COUSSIRAT M., EGUSQUIZA E., ALAVEDRA P., CASTILLA R., A CFD approach to evaluate the influence of construction and operation parameters on the performance of Active Transparent Facades in Mediterranean climates, *Energy and Buildings*, 41, pp.534-542, (2009).
- [77] FULIOTTO R., CAMBULI F., MANDAS N., BACCHIN N., MANARA G., CHEN Q., Experimental and numerical analysis of heat transfer and airflow on an interactive building façade, *Energy and Buildings*, 42, pp.23-28 (2010).
- [78] FUNG T.Y.Y., YANG H., Study on thermal performance of semi-transparent building-integrated photovoltaic glazings, *Energy and Buildings*, 40, pp.341-350, (2008).
- [79] SONG J.-H., AN Y.-S., KIM S.-G., LEE S.-J., YOON J.-H., CHOUNG Y.-K., Power output analysis of transparent thin-film module in building integrated photovoltaic system (BIPV), *Energy and Buildings*, 40, pp.2067-2075, (2008).
- [80] HAN J., LU L., YANG H., Thermal behavior of a novel type see-through glazing system with integrated PV cells, *Building and Environment*, 44, pp.2129-2136, (2009).
- [81] PARK K.E., KANG G.H., KIM H.I., YU G.J., KIM J.T., Analysis of thermal and electrical performance of semi-transparent photovoltaic (PV) module, *Energy*, 35, pp.2681-2687 (2010).
- [82] PHANI G., TULLOCH G., VITTORIO D., SKRYABIN I., Titania solar cells: new photovoltaic technology, *Renewable Energy*, 22, pp.303-309, (2001).
- [83] XU X., DESSEL S.V., MESSAC A., Study of the performance of thermoelectric modules for use in active building envelopes, *Building and Environment*, 42, pp. 1489-1502, (2007).
- [84] XU X., VAN DESSEL S., Evaluation of a prototype active building envelope window-system, *Energy and Buildings*, 40, pp.168-174, (2008).
- [85] XU X., DESSEL S.V., Evaluation of an Active Building Envelope window-system, *Building and Environment*, 43, pp.1785-1791, (2008).

- [86] MERCALDO L.V., ADDONIZIO M.L., NOCE M.D., VENERI P.D., SCOGNAMIGLIO A., PRIVATO C., Thin film silicon photovoltaics: Architectural perspectives and technological issues, *Applied Energy*, 86, pp.1836-1844, (2009).
- [87] SPANOS I., DUCKERS L., Expected cost benefits of building-integrated PVs in UK, through a quantitative economic analysis of PVs in connection with buildings, focused on UK and Greece, *Renewable Energy*, 29, pp.1289-1303, (2004).
- [88] DAVIDSSON H., PERERS B., KARLSSON B., Performance of a multifunctional PV/T hybrid solar window, *Solar Energy*, 84, pp.365-372, (2010).
- [89] INFELD D., MEI L., EICKER U., Thermal performance estimation for ventilated PV facades, *Solar Energy*, 76, pp.93-98, (2004).
- [90] FAGGEMBAU D., COSTA M., SORIA M., OLIVA A., Numerical analysis of the thermal behaviour of ventilated glazed facades in Mediterranean climates. Part I: development and validation of a numerical model, *Solar Energy*, 75, pp.217-228, (2003).
- [91] BALOCCO C., A non-dimensional analysis of a ventilated double facade energy performance, *Energy and Buildings*, 36, pp.35-40, (2004).
- [92] PARK C-S., AUGENBROE G., MESSADI T., THITISAWAT M., SADEGH N., Calibration of a lumped simulation model for double-skin facade systems, *Energy and Buildings*, 36, pp.1117-1130, (2004).
- [93] PARK CSC-S., AUGENBROE G., SADEGH N., THITISAWAT M., MESSADI T., Real-time optimization of a double-skin facade based on lumped modeling and occupant preference, *Building and Environment*, 39, pp.939-948, (2004).
- [94] PÉREZ I., MESEGUER J., ALONSO G., Influence of glass properties on the performance of double-glazed facades, *Applied Thermal Engineering*, 25, pp.3163-3175, (2005).
- [95] CHOW W.K., HUNG W.Y., GAO Y., ZOU G., DONG H., Experimental study on smoke movement leading to glass damages in double-skinned façade, *Construction and Building Materials*, 21, pp.556-566, (2007).
- [96] KUZNIK F., RUSAOUEN G., Numerical Prediction of Natural Convection Occurring in Building Components: A Double-Population Lattice Boltzmann Method Numerical Heat Transfer, Part A: Applications, *An International Journal of Computation and Methodology*, 52, pp.315 – 335, (2007).
- [97] COUSSIRAT M., GUARDO A., JOU E., EGUSQUIZA E., CUERVA E., ALAVEDRA P., Performance and influence of numerical sub-models on the CFD simulation of free and forced convection in double-glazed ventilated facades, *Energy and Buildings*, 40, pp.1781-1789, (2008).
- [98] XU X-I., YANG Z., Natural ventilation in the double skin facade with venetian blind, *Energy and Buildings*, 40, pp.1498-1504, (2008).
- [99] DALAL R., NAYLOR D., ROELEVELD D., A CFD study of convection in a double glazed window with an enclosed pleated blind, *Energy and Buildings*, 41, pp.1256-1262, (2009).
- [100] KIM Y-M., KIM S-Y., SHIN S-W., SOHN J-Y., Contribution of natural ventilation in a double skin envelope to heating load reduction in winter, *Building and Environment*, 44, pp.2236-2244, (2009).
- [101] LAOUADI A., Thermal performance modelling of complex fenestration systems, *Journal of Building Performance Simulation*, 2, pp.189 – 207, (2009).
- [102] TANAKA H., OKUMIYA M., TANAKA H., YOUNG G., WATANABE K., Thermal characteristics of a double-glazed external wall system with roll screen in cooling season, *Building and Environment*, 44, pp.1509-1516, (2009).