

Análisis de estrategias bioclimáticas aplicadas a edificaciones nZEB

Analysis of bioclimatic strategies applied to nZEB buildings

Andrés Soto Barrionuevo

Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales y de Telecomunicación
Universidad Miguel Hernández de Elche

Correspondencia/ Correspondence:

andres.sotob@coiirm.es

Recibido/ Received:

28.02.2018

Aceptado/ Accepted:

19.03.2019

Cómo citar este trabajo | How to cite this paper

A. Soto Barrionuevo, "Análisis de estrategias bioclimáticas aplicadas a edificaciones nZEB," Revista Doctorado UMH, vol. 4,no. 2, p4, 2018 [Online].

RESUMEN

La reducción del consumo energético en las edificaciones, por la dependencia de fuentes primarias y energía eléctrica en la explotación de sus actividades, es un reto al que se enfrentan los países de la UE en su compromiso de disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero. En esta revisión del estado del arte, se analizarán diferentes estrategias bioclimáticas, que establecerán las bases de investigación para el desarrollo de modelos y soluciones eficientes en instalaciones de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC) que sirvan de premisa para los proyectistas en el diseño de edificios de consumo energético casi nulo (nZEB). Podrán ser válidas de igual modo en edificaciones existentes, aunque su aplicación estará más condicionada. De naturaleza diversa, viviendas, oficinas, comercial, industrial, etc., los procesos climáticos se ven condicionados por ciertos factores como la tipología constructiva, materiales, localización, ocupación y condiciones meteorológicas externas. El análisis de la efectividad de estos sistemas y su comportamiento, requieren de un cálculo complejo que podrá ser resuelto por herramientas de mecánica de fluidos computacional (CFD).

Palabras clave: eficiencia energética, NnZEB, climatización pasiva, estrategias bioclimáticas.

ABSTRACT

The reduction of energy consumption in buildings due to the dependence on primary sources and electric energy in the exploitation of their activities is a challenge that the EU countries face in the commitment to reduce the greenhouse gas emissions.

In this state-of-the-art review, different bioclimatic strategies will be analyzed, which will set up the basis for the development of models and efficient solutions in heating, ventilation and air conditioning (HVAC) installations that serve as a premise for the designers, in the design of buildings with near zero energy buildings (nZEB). They can be valid in the same terms of retrofitting of buildings, although their application will be more conditioned.

Of diverse nature, dwellings, offices, commercial, industrial, etc., the climatic processes are conditioned by certain factors such as the construction typology, materials, location, occupation and external weather conditions. The analysis of the effectiveness of these systems and their behavior requires a complex calculation that can be solved by computational fluid dynamic (CFD) simulation.

Keywords: energy efficiency, nZEB, passive cooling, bioclimatic strategies.

INTRODUCCIÓN

En el diseño de un nZEB se deben tener en cuenta diversos factores relacionados con los requerimientos de confort de los usuarios, mayoritariamente debido a las instalaciones de climatización que permiten la habitabilidad y la calidad de aire interior (IAQ). En la siguiente figura se esquematizan y clasifican dentro de un templo griego, diferentes términos que van a ser expuestos en el artículo, englobando la definición de nZEB.

Como pilares que sustentan el propio concepto de edificio de consumo energético casi nulo, se encuentran una serie de medidas o sistemas necesarios, que hay que tener en cuenta para justificar que en el edificio analizado se están adoptando todas las medidas necesarias de ahorro energético. Se identifican tres pilares fundamentales: las estrategias bioclimáticas (aprovechamiento de las magnitudes físicas relacionadas con el clima), simulación herramientas CFD (simulación por ordenador del problema energético, adaptado a las condiciones y requerimientos de la edificación) y energías renovables (instalaciones por fuentes de energía renovable que cubran parte de las necesidades energéticas de la edificación).

Las edificaciones tienen un gran impacto en el consumo de energía y en el medio ambiente, donde esta demanda supone un 40% de la energía primaria global y cerca del 70% de la energía eléctrica consumida [1]. La UE ha establecido como fecha límite para que todos los edificios sean de consumo energético casi nulo (nZEB), el 2020 para edificaciones residenciales y el 2018 en el caso de nuevos edificios para uso público [2].

Un nZEB puede definirse como un edificio que utiliza todas las medidas de ahorro para reducir el consumo de energía a través de la eficiencia energética e incluye sistemas de energía renovable que producen suficiente energía para satisfacer las necesidades energéticas restantes [3]. No obstante, esta definición puede verse adaptada por cada país. El indicador global para medir la demanda de energía primaria del edificio se expresa en Kwh/m^2 año.

Las instalaciones de climatización tienen gran peso en la demanda energética del edificio, en torno al 40% [4]. De acuerdo con ISO 7730:2005 [5], al evaluar la zona ocupada, se deben tener en cuenta tanto el confort térmico corporal como el confort térmico local. El confort térmico corporal puede evaluarse mediante los índices PMV y

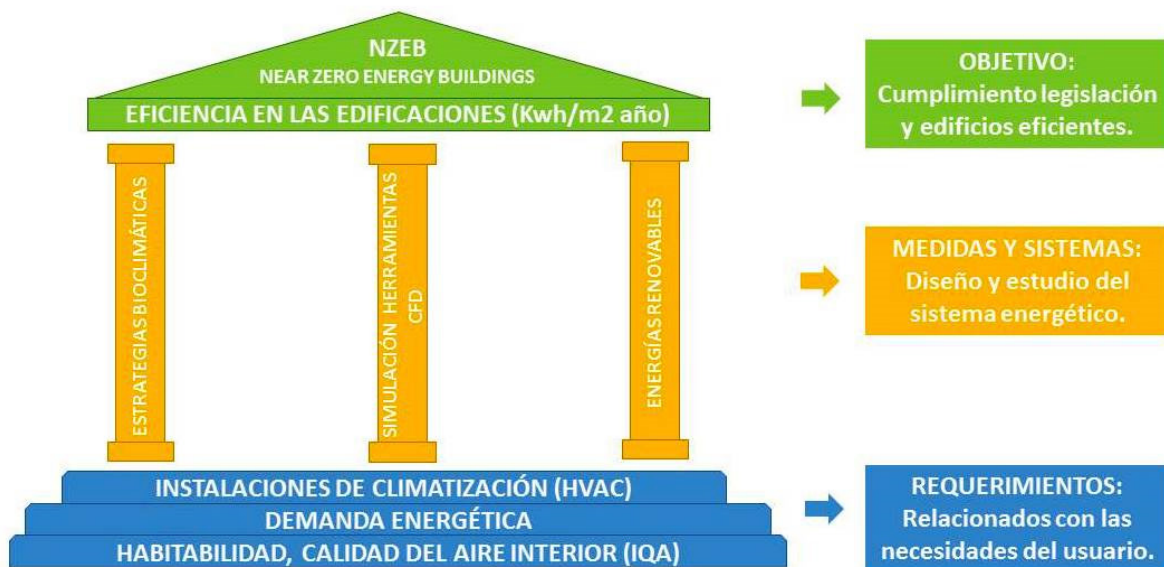


Figura 1. Requerimientos, medidas y objetivos del nZEB. Fuente propia.

PPD, y el confort térmico local se puede evaluar mediante el riesgo de corrientes de aire, la diferencia de temperatura vertical y la asimetría radiante. El PMV es un índice que predice el valor medio de los votos de un gran grupo de personas en la escala de sensación térmica de 7 puntos (de caliente a frío), y PPD da una predicción cuantitativa de insatisfacción térmica. Estos dos índices se calculan en función del balance de calor del cuerpo humano, dependiendo de las variables ambientales térmicas (temperatura del aire, humedad relativa, temperatura radiante media y velocidad relativa del aire), así como el nivel de actividad y el aislamiento de la ropa.

Un adecuado estudio de la distribución de la demanda energética en la fase de diseño de la edificación puede favorecer la implementación de medidas de ahorro energético. Los sistemas pasivos de climatización y el aprovechamiento de las magnitudes físicas de presiones y temperaturas, el óptimo diseño de las envolventes, una correcta y eficiente elección de los materiales constructivos, unidos a una predicción de las condiciones exteriores y un control sobre las instalaciones diseñadas, pueden originar significantes ahorros energéticos.

El objetivo principal de la futura investigación se basará en estudiar una edificación determinada bajo unos requerimientos de demanda energética, habitabilidad e instalaciones técnicas, donde se apliquen soluciones bioclimáticas objeto de esta revisión, apoyadas de fuentes de energía renovable. La simulación se realizará mediante el programa TRNSYS (*Transient System Simulation Tool*) con el que se obtendrá una tipología nZEB de referencia, en una zona determinada, comparable con otras tipologías similares, que permitan analizar y validar la viabilidad técnica, medioambiental y económica de las medidas de eficiencia a adoptar en futuros proyectos.

VENTILACIÓN NATURAL

Dentro de las diferentes alternativas de métodos pasivos de climatización, la ventilación natural es la que más beneficio aporta en la fase de diseño del edificio, aunque son muchas las variables que determinan su efectividad y que más adelante se analizarán.

En la ventilación natural, el movimiento del aire resulta de la diferencia de temperatura y presión entre el ambiente interior y exterior. La *American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers* (ASHRAE) define la ventilación natural como "la introducción de aire exterior en un edificio impulsado por diferenciales de presión de producción natural". Estos diferenciales, también conocidos como fuerzas motrices, son dos: la flotabilidad y la presión del viento [6].

La flotabilidad es la diferencia de densidad entre la masa de aire exterior e interior consecuencia de las diferencias de temperatura [6]. El aire más caliente se desplaza introduciéndose aire más frío. Puede ocurrir dentro de un conducto vertical o chimenea, donde se produce un flujo de aire hacia arriba debido a la temperatura más alta del aire, que tiene una densidad menor, por lo que tiende a "flotar". El flujo de aire puede darse también en una trayectoria horizontal [6].

No todos los climas y tipos de edificios son adecuados para la ventilación natural, y debido a las limitadas fuerzas naturales y la capacidad de enfriamiento del aire exterior, este tipo de ventilación establece algunos requisitos, por ejemplo, la carga térmica interna en el edificio, profundidad de las habitaciones, altura de la sala y alrededores, pero la ventilación natural es cada vez más común cuando se diseñan soluciones de ventilación en escuelas y oficinas [7].

Según recogen Chenari et al. [4], las diferen-

cias de temperatura producen fuerzas de flotación que impulsan el flujo a través de las aberturas de la fachada. Dependiendo de la ubicación de estas aberturas, el flujo entrante puede ser en forma de una pluma turbulenta que se combinará para mezclar el aire dentro del espacio, o puede ser un tipo de flujo de desplazamiento, donde el aire frío del exterior cae hacia el suelo, empuja el aire caliente hacia arriba y hacia afuera a través de las aberturas superiores. Se establece un flujo estratificado bien definido, y se ha demostrado experimentalmente que este régimen de flujo es una característica estable y predominante en los flujos impulsados por las diferencias de temperatura, según indican Heiselberg et al. [8].

Además de depender de la velocidad del viento, la dirección del viento y las diferencias de temperatura entre el interior y el exterior, el flujo de aire en ventilación sobre una sola cara (*single-sided ventilation*), también está influenciado por las características de turbulencia (intensidad de turbulencia y escalas de longitud) en el viento y la variación en las diferencias de presión inducida, por ejemplo, las ráfagas de viento. Como estos parámetros son inestables, el flujo de aire en la ventilación de una sola cara es mucho más difícil de calcular [7].

Estos mismos investigadores [4], indican que la ventilación cruzada (*cross ventilation*) se produce en espacios que normalmente tienen aberturas en fachadas opuestas. En este caso, el aire exterior penetra al espacio desde la fachada de barlovento y sale desde el lado de sotavento [9]. La posición de apertura no solo es importante en la ventilación en una sola cara, sino que también es importante en la ventilación cruzada.

La ventilación de la pila (*stack ventilation*) se lleva a cabo cuando los flujos de aire ingresan al espacio ventilado a través de aberturas ubica-

das en diferentes fachadas y salen a través de una abertura ubicada en un nivel más alto, como una chimenea. Por ejemplo, las chimeneas solares, que tienen efectos considerables sobre la disminución de las ganancias de calor y la mejora del enfriamiento y la ventilación natural [10].

La ventilación nocturna consiste en enfriar la estructura del edificio por transferencia de calor por convección cuando no está ocupado [11], por lo que es un enfoque útil para edificios de oficinas. Mediante la ventilación nocturna se está eliminando el calor acumulado en la masa térmica de los elementos de construcción. Durante el día siguiente, estos elementos frescos, absorben las ganancias de calor, lo que evita un aumento extenso de la temperatura interior.

La ventilación controlada se puede definir como la apertura controlada de ventanas operables, respiraderos y puertas.

Centrándonos en la ventilación mediante chimenea solar, son diversos los investigadores que llegan a conclusiones similares respecto al ángulo óptimo que deben tener éstas para disponer de un mayor volumen de aire de ventilación. Según recogen Monghasemi y Vadiie [12], Mathur et al. (2016) demostraron que el ángulo óptimo de inclinación del absorbente varía de 40° a 60°, según la latitud del lugar. Mientras que Hamdy y Fikry (1998) descubrieron que el ángulo de inclinación óptimo de un colector solar requerido para proporcionar el mejor rendimiento de ventilación para su modelo experimental era de 60°, este ángulo de inclinación era de aproximadamente 45° según los experimentos de Mathur et al. (2016) [12].

La integración de un colector de aire solar de doble paso con el techo del edificio orientado al sur se muestra en la Fig. 1. Las compuertas 1, 2, 3 y 4 se instalaron para cambiar los modos de funcionamiento entre calefacción de espacios en invierno y ventilación natural en verano. Al

cerrar las compuertas 1 y 2, seguidos por de la apertura de 3 y 4, el aire interior es capaz de entrar al canal de aire 1 (AC1) a través de la tobera II, que obtiene calor de la radiación solar. Luego, fluye al canal de aire 2 (AC2) donde gana calor de la placa de absorción. Después de cerrar la tobera, fluye hacia el conducto de aire. El ventilador sopla el aire caliente hacia la habitación a través de la tobera III. El ciclo inverso proporciona ventilación natural en la habitación. Al cerrar las compuertas 3 y 4 junto a la apertura 1 y 2, el aire interior ingresa a los canales de aire 1 y 2 a través de las toberas I y II, respectivamente. El aire se calienta en el canal y se mueve hacia arriba, por lo que el efecto de pila se producirá con el tiempo. Los resultados mostraron que un colector solar de doble paso tenía un mejor rendimiento tanto para calefacción o ventilación natural. Su eficiencia instantánea fue del 10% superior que un colector solar de techo simple [12].

Una técnica innovadora para hacer circular el aire en el edificio es por medio de tuberías enterradas a varios metros bajo tierra, que utilizan

la tierra como fuente natural de temperatura constante. La temperatura 2-3 m bajo tierra se mantiene bastante inalterada. Esta temperatura es más alta que la temperatura de la superficie en invierno y más baja en verano. Este sistema que se puede aplicar para una mejor ventilación a través de un efecto de enfriamiento o calentamiento denominado *earth-air heat exchanger* (EAHX) [14]. El modelo de chimenea solar (SC) fue validado con resultados experimentales [15]. El estudio paramétrico mostró que el número mínimo requerido de SC y EAHX se obtuvo simulando el diámetro óptimo de la tubería de enfriamiento (0.5 m). El aumento de la longitud/diámetro de la tubería proporcionó mayor efecto de enfriamiento. Monghasemi y Vadiie [12] indican que Mathur et al. (2016) investigaron la recuperación de la temperatura del suelo de un sistema EAHX bajo operaciones intermitentes. Los modos de operación de invierno no solo proporcionan aire caliente en invierno, sino que también reducen la temperatura del suelo para usarlo también en la próxima temporada de verano.

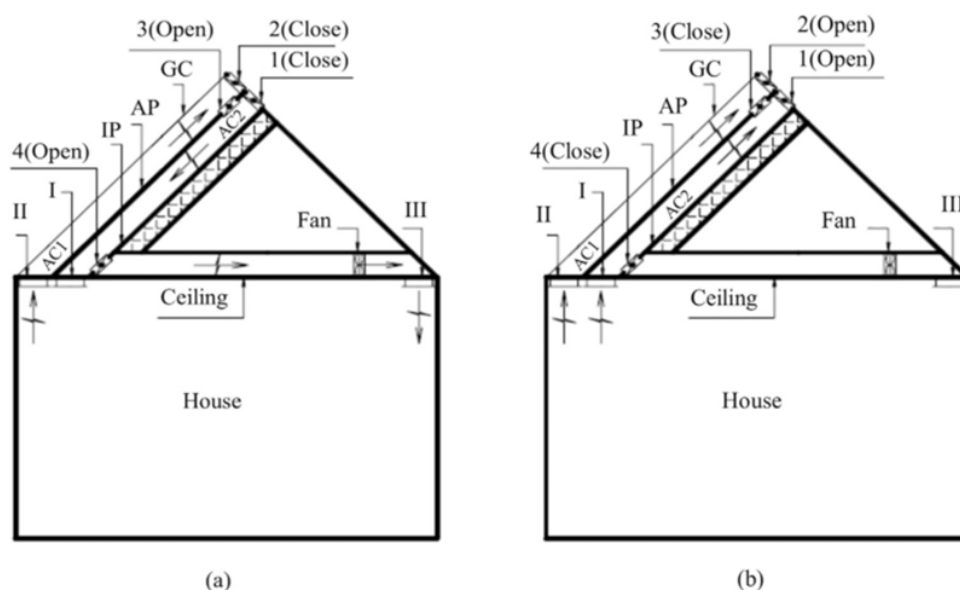


Figura 2. Tejado colector solar de estructura de doble paso. (a) Espacio modo calentamiento. (b) Espacio modo ventilación. AC1, canal de aire 1; AC2, canal de aire 2; IP, placa de aislamiento; AP, placa de absorción; GC, cristal de cubierta. Fuentes [12] [13].

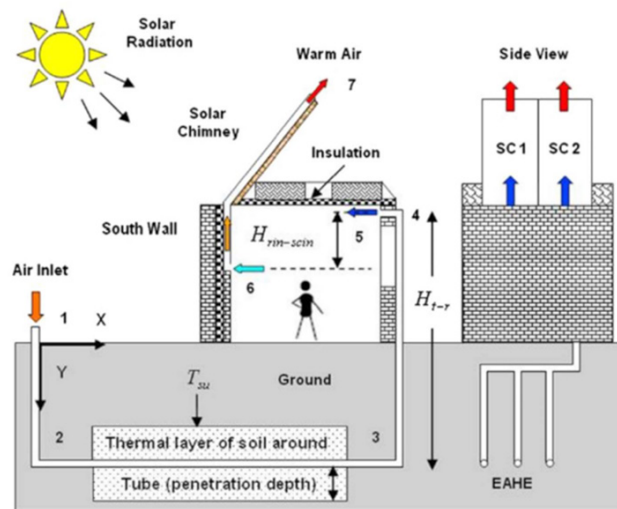


Figura 3. Esquema propuesto de EAHX y chimenea solar. Fuente [16].

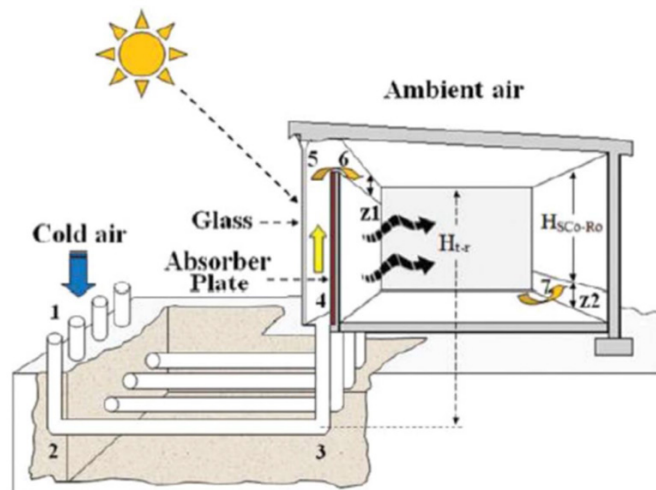


Figura 4. Esquema propuesto sistema pasivo de calentamiento. Fuente [17].

ENFRIAMIENTO EVAPORATIVO

El enfriamiento evaporativo consiste en enfriar el edificio absorbiendo aire a una temperatura determinada desde el exterior, y reducirla debido a la absorción de energía (calor sensible) para evaporar una corriente de agua inducida, de manera que se proporciona aire más frío y húmedo. La temperatura más baja que se puede lograr con enfriadores evaporativos es la temperatura del bulbo húmedo (temperatura medida por termómetro de bulbo húmedo, donde el bulbo se recubre de un paño empapado de agua, que es evaporada por contacto con el aire bajo

condiciones ambientales). Esta temperatura es igual a la temperatura de bulbo seco para un 100% de humedad relativa. Este sistema permite un rango promedio de 5-15 °C menor que la temperatura de bulbo seco, dependiendo de la presión del aire. Sin embargo, si la humedad relativa es alta, podría crear un ambiente incómodo [18].

El enfriamiento evaporativo se divide en directo o indirecto. El enfriamiento evaporativo directo evapora el agua directamente en la corriente de aire, mientras que el indirecto, evapora una corriente de aire secundario, que enfría la corriente de aire principal a través de un inter-

cambiador de calor sin agregar humedad. Debido a estas características, los niveles de confort que pueden lograr son aceptables en todas las condiciones climáticas, aunque más altos en climas cálidos y secos.

Jaber et al. [20] realizaron un prototipo, *Ener-*

gy Recovery with Exhaust air Evaporative Cooling (ERECEC), que consiste en un recuperador de energía combinado con un enfriador evaporativo indirecto que aprovecha los gases extraídos de la habitación como corriente secundaria. Esta corriente después de circular a través de una

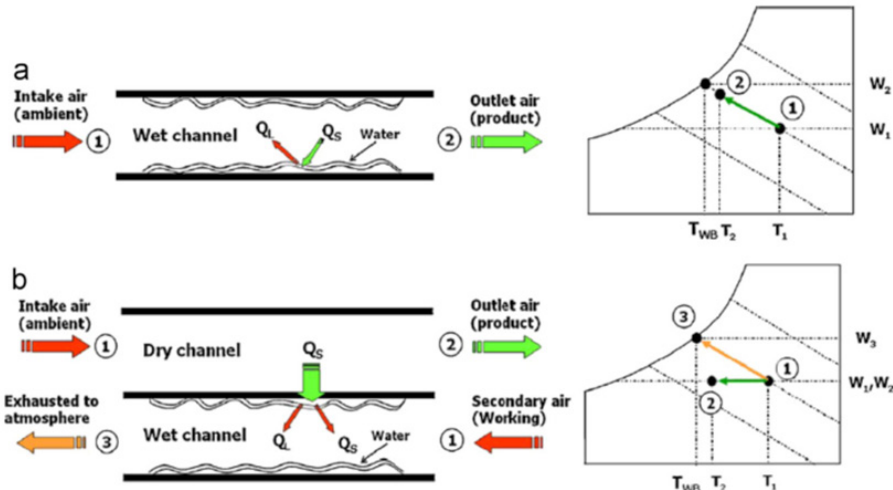
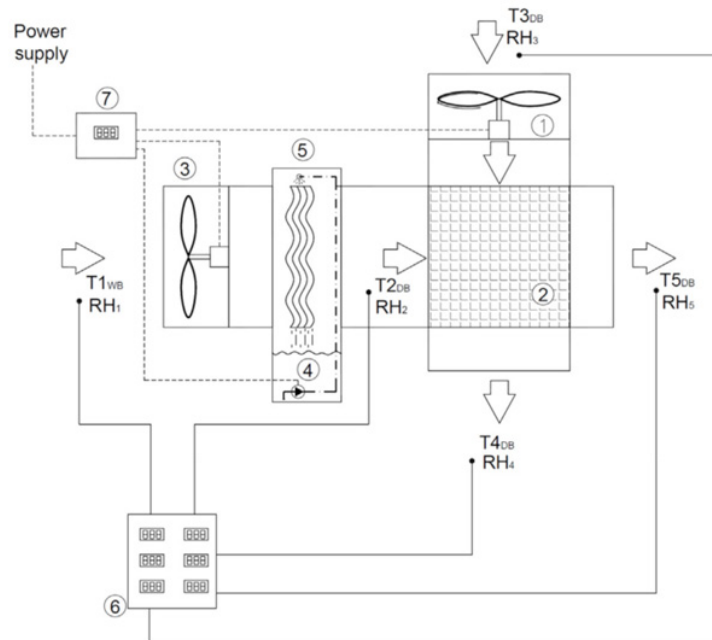


Figura 5. Principio enfriamiento evaporativo directo (a) e indirecto (b). Fuente [19]



1-Fresh Fan 2-Heat Exchanger 3-Exhaust Fan 4-Water Sump 5-Wetted Pad 6-Measuring Panel, 7- Power Meter.

T_1/RH_1 Room Air Sensor, T_2/RH_2 DEC leaving Air Sensor, T_3/RH_3 Ambient Air Sensor, T_4/RH_4 Treated Fresh Air Sensor, T_5/RH_5 Exhaust Air Sensor.

Figura 6. Esquema de principio sistema de recuperación con ventilación evaporativa. Fuente [20]

	Energy Recovery	EREEC
Annual Energy Saving (kW h)		
Heating	1120	1120
Cooling	363	999
Annual Running Cost		
Energy (kW h)	618.77	749.19
Water (m ³)	0.00	3.00
Total (JD)	53.21	67.85
CO ₂ Reduction (kg)		
Heating	400	400
Cooling	70	200
Total	470	600
Payback Period		
Payback Period (Years)	11.7	8.1

^a Measured from base load.

Tabla 1. Comparación recuperación de energía y EREEC. Fuente [20]

superficie porosa humectada, donde se produce la disminución de su temperatura, pasa por un intercambiador de calor que enfría aire introducido directamente del exterior. En el caso que la temperatura exterior sea inferior a la que se escape de la habitación, se produce un *bypass*, y el ventilador de aporte de la corriente secundaria entra en modo *free cooling* con aire directo del exterior.

De los resultados experimentales se indica que la Eficacia media es del 58.90%. EREEC reduce la temperatura ambiente desde 9.02% al 20.94%. En verano la temperatura de entrada es reducida en 2,2°C a una temperatura ambiente de 24,4°C y 7,5°C a la temperatura más alta de 35,7°C. En invierno la temperatura de entrada es incrementada en 1,5°C a la temperatura ambiente de 19,9°C y en 12,4°C a la menor tem-

peratura de -3,7°C. Por otro lado, los resultados de la simulación muestran que la carga de enfriamiento base puede reducirse hasta 13,38% al utilizar el EREEC. El consumo anual de electricidad es de 749 kWh. El consumo de agua de EREEC es de aproximadamente 3 m³ por año. El Período de retorno es de alrededor de 8 años [18].

En otras conclusiones obtenidas por De Angelis et al. [19], referentes al enfriamiento evaporativo, se simula un edificio industrial en diferentes ubicaciones aplicando distintos sistemas de climatización. La nave se analiza con ventilación natural, ventilación mecánica y enfriamiento evaporativo directo e indirecto. La simulación se realiza con apoyo del programa TRNSYS (*Transient System Simulation Tool*), que permite modelar los diferentes sistemas, ganancias inter-

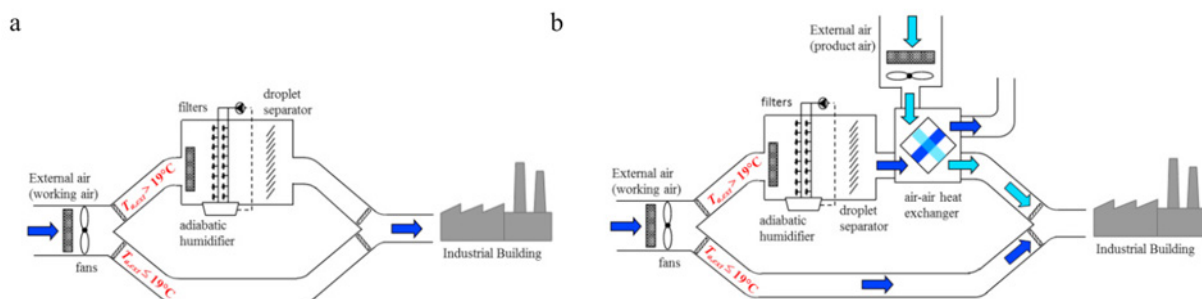


Figura 7. Diferentes sistemas enfriamiento evaporativo directo (a) e indirecto (b) propuestos. Fuente [21]

nas y horarios de funcionamiento y control. En el control se establece que en el caso de que la temperatura exterior fuera inferior a 19°C entre en funcionamiento un *bypass* permitiendo el enfriamiento gratuito de la nave industrial. La temperatura interior se supone 2°C superior a la exterior por el efecto del calentamiento del aire al pasar por el ventilador, entrando este en funcionamiento cuando la temperatura interior sea superior a 24 + 2°C.

Las conclusiones obtenidas, respecto a un sistema de climatización por compresión, donde se determina que la solución del sistema de ventilación mecánica implica un ahorro de energía muy variable, dependiendo de las condiciones climáticas. En ciudades frías (como Praga o Hamburgo) el ahorro de energía es aproximadamente igual al 50%, mientras que en las ciudades con clima cálido es inferior al 10%. Los sistemas de enfriamiento evaporativo directo e indirecto permiten un ahorro de energía de aproximadamente 50% y 40% respectivamente para todas las ubicaciones consideradas [21]. El sistema de enfriamiento evaporativo directo presenta una mayor reducción, en particular para el clima cálido, pero el indirecto es la mejor solución para el confort térmico, ya que garantiza una menor proporción de humedad interna.

PHASE CHANGE MATERIALS (PCM)

Como exponen Oropeza-Perez y Østergaard [18], el material de cambio de fase (PCM) es una tecnología en crecimiento que consiste en microcápsulas hechas de una combinación de parafina, cera u otros materiales de punto de fusión bajo, que tienen el objetivo principal de almacenar el calor para actuar como sistemas de enfriamiento gratuito, según indican Pomianowski et al. [22]. Su principio básico es el cambio de fase

del material de construcción, principalmente de sólido a sólido, de sólido a líquido y de líquido a gas y de este modo almacenar calor latente en el cambio de fase y luego liberarlo. Como el tipo de calor almacenado es principalmente latente, la variación de temperatura del material permanece casi invariable [23].

La temperatura de fusión del material debe ser lo más cercana posible al rango de confort de temperatura interior, generalmente establecido entre 20°C y 26°C [24]. Además, los diferentes estudios se centran en la mejora de la conductividad del PCM, que es baja, con el fin de almacenar tanto el calor latente como el sensible.

Monghasemi y Vadiie [12] recogen los resultados de la investigación de diferentes tipos de PCM para aplicaciones de enfriamiento pasivo. Se reveló que casi el 60% de los estudios previos se centraron en uso de la PCM de tipo orgánico. La razón de esto podría ser el alto calor de fusión, la facilidad de compatibilidad con la mayoría de los elementos de construcción y la buena estabilidad térmica.

Estos mismos autores exponen que los PCMs se pueden utilizar en edificios para estabilizar la temperatura de la habitación principalmente utilizando su calor latente. Liberan energía cuando la temperatura ambiente está por debajo de la temperatura de fusión y almacenan energía cuando la temperatura sube por encima de la temperatura de fusión. Además, la utilización de PCMs en la estructura del edificio puede mejorar significativamente su masa térmica.

En días con poca radiación solar, la eficiencia térmica de las chimeneas solares experimenta una reducción drástica. Esto normalmente ocurre durante la noche o en días nublados. Se sugiere que los PCMs como medios de almacenamiento de energía térmica acoplados con chimeneas solares mejoran estos inconvenientes, según las investigaciones de Li y Liu [25].

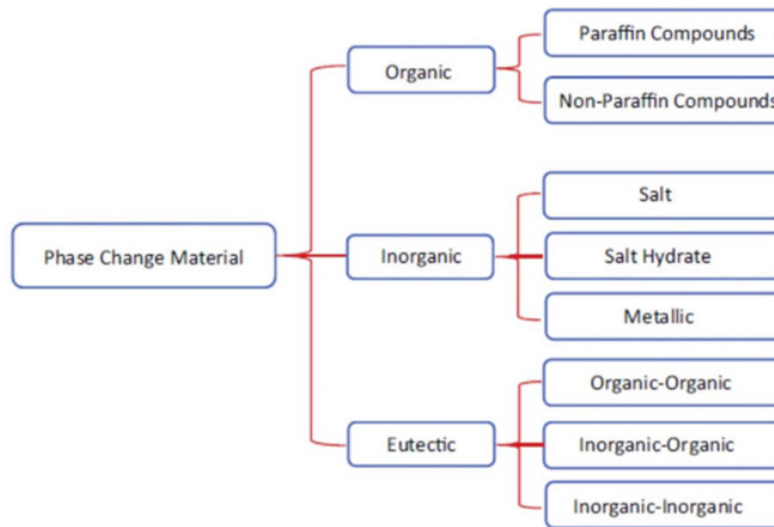


Figura 8. Clasificación de los PCMs. Fuente [26]

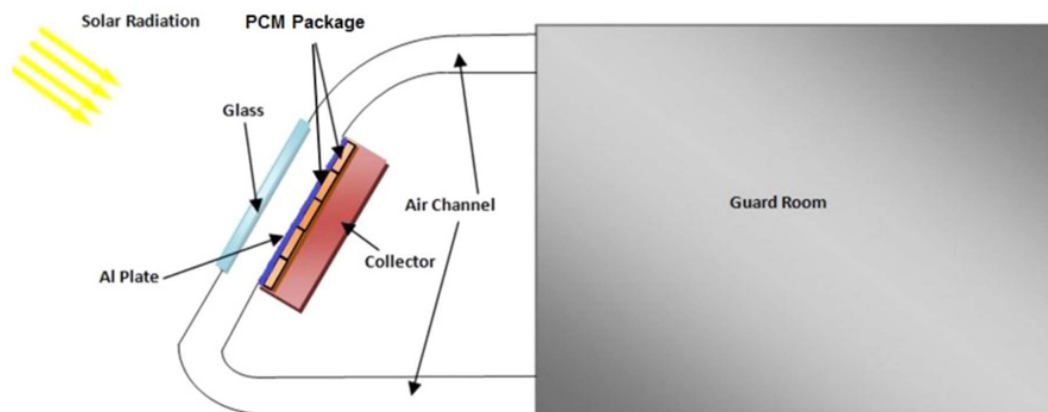


Figura 9. Esquema de integración de PCM basado en chimenea solar en una sala de guardia. Fuente [27]

DISEÑO DE LA ENVOLVENTE Y ELEMENTOS ARQUITECTÓNICOS

Los sistemas de sombreado tienen el propósito de controlar la radiación solar que eventualmente termina en ganancia de calor interna. Este control se puede llevar a cabo desde diversos enfoques, como orientación y forma del edificio, voladizos, aleros, persianas y autosombreado.

Las barreras de calor radiante es otra técnica arquitectónica que se aplica para evitar las ganancias de calor debidas a la radiación directa sobre la envolvente. Consisten en materiales colocados en la fachada exterior que no permiten, por re-

flexión, la entrada de calor por radiación. La propiedad que refleja la radiación es la reflectividad, que varía de 0 a 1 entre la medición de un estándar de caja negra (reflexión nula) y un blanco puro (reflexión total) sobre el espectro de longitud de onda de la luz visible [18].

CONCLUSIONES

En esta revisión del estado del arte, se han analizado diferentes soluciones que permiten disminuir el consumo energético de una edificación, y que acompañadas del empleo de fuentes de

energía renovable y la simulación CFD (*Computational Fluids Dynamics*) establecen las medidas a adoptar en diseño de un edificio nZEB.

La directiva 2010/31/EU presenta un reto para investigadores y proyectistas. Los estados miembros deben velar que se cumplan los requisitos mínimos de eficiencia tanto en edificios de nueva construcción como en existentes.

El diseño de las instalaciones de calefacción, ventilación y aire acondicionado como requerimiento en el confort de los usuarios, depende en gran medida de factores externos como el clima, la tipología, el aspecto económico y la localización. En edificios nuevos existen menos condicionantes constructivos y tipológicos que en edificios existentes, permitiendo un diseño y concepto inicial más eficiente.

Como se ha expuesto anteriormente, la aplicación de las medidas de eficiencia y el diseño de las instalaciones en edificaciones es particular para cada caso y condiciones, aunque para analizar la viabilidad técnica, medioambiental y económica de estas soluciones se podría recurrir a tipologías comunes de edificios en una misma zona que hayan sido previamente validadas.

Se concluye que cada sistema tiene sus propios pros y contras, que pueden ser adecuados para una región y tipología y no ser prácticos o viables en otras. Un eficiente diseño inicial, puede reducir la demanda energética del edificio, sin repercutir en el confort de los usuarios.

REFERENCIAS

- [1] N. Bajenaru, A. Damian, y R. Frunzulica, "Evaluation of the Energy Performance for a nZEB Office Building under Specific Climatic Conditions," *Energy Procedia*, vol. 85, pp. 26-34, 2016.
- [2] EU Institutions. European Parliament and Council, *Directive 2010/31/EU on the energy performance of buildings (EPBD)*. May 19, 2010.
- [3] EEUU. US Department of Energy, *A Common Definition for Zero Energy Building*. The National Institute of Building Sciences; Sep., 2015. [En línea]. Disponible: <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2015/09/f26/A%20Common%20Definition%20for%20Zero%20Energy%20Buildings.pdf>
- [4] B. Chenari, J. Dias Carrilho, y M. Gameiro Da Silva, "Towards sustainable, energy-efficient and healthy ventilation strategies in buildings: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 59, pp. 1426-47, 2016.
- [5] International Organization for Standardization, *ISO 7730:2005: Ergonomics of the thermal environment, Analytical Determination and Interpretation of Thermal Comfort Using Calculation of the PMV and PPD Indices and Local Thermal Comfort Criteria, International Standard*. Ginebra: ISO, 2005.
- [6] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Condition and Engineers, Inc., *ASHRAE handbook of fundamentals*. Atlanta, EEUU: ASHRAE, 2009.
- [7] T. S. Larsen y P. Heiselberg, "Single-sided natural ventilation driven by wind pressure and temperature difference," *Energy and Buildings*, vol. 40, no. 6, pp. 1031-1040, 2008.
- [8] P. Heiselberg, K. Svidt, y P. V. Nielsen, "Characteristics of air flow from open windows," *Building and Environment*, vol. 36, pp. 859-69, 2001.
- [9] A. D. Stavridou y P. E. Prinos, "Natural ventilation of buildings due to buoyancy assisted by wind: investigating cross ventilation with computational and laboratory simulation," *Building and Environment*, vol. 66, pp. 104-19, 2013.
- [10] X. Q. Zhai, Z. P. Song, y R. Z. Wang, "A review for the applications of solar chimneys in buildings," *Renewable and Sustainable Energy*, vol. 15, pp. 3757-67, 2011.
- [11] N. Artmann, R. L. Jensen, H. Manz, y P. Heiselberg, "Experimental investigation of heat transfer

- during night-time ventilation," *Energy and Buildings*, vol. 42, no. 3, pp. 366-74, 2010.
- [12] N. Monghasemi y A. Vadiiee, "A review of solar chimney integrated systems for space heating and cooling application," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 81, pp. 2714-2730, 2018.
- [13] X. Zhai, Z. Song, y R. Wang, "A review for the applications of solar chimneys in buildings," *Renew Sustain Energy Rev*, vol. 15, pp. 3757-67, 2011.
- [14] M. Khabbaz, B. Benhamou, K. Limam, P. Hollmüller, H. Hamdi, y A. Bennouna, "Experimental and numerical study of an earth-to-air heat exchanger for air cooling in a residential building in hot semi-arid climate," *Energy Build*, vol. 125, pp. 109-21, 2016.
- [15] J. Mathur, N. Bansal, S. Mathur, y M. Jain, "Experimental investigations on solar chimney for room ventilation," *Sol Energy*, vol. 80, pp. 927-35, 2006.
- [16] M. Maerefat y A. Haghighi, "Passive cooling of buildings by using integrated earth to air heat exchanger and solar chimney," *Renew Energy*, vol. 35, pp. 2316-24, 2010.
- [17] A. Haghighi y M. Maerefat, "Design guideline for application of earth-to-air heat exchanger coupled with solar chimney as a natural heating system," *Int J Low- Carbon Technol*, vol. 10, pp. 294-304, 2015.
- [18] I. Oropeza-Perez y P. A. Østergaard, "Active and passive cooling methods for dwellings: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 82, pp. 531-44, 2017.
- [19] B. Rianguvilaikul y S. Kumar, "An experimental study of a novel dew point evaporative cooling system," *Energy Build*, vol. 42, pp. 637-44, 2010.
- [20] S. Jaber y A. W. Ezzat, "Investigation of energy recovery with exhaust air evaporative cooling in ventilation system," *Energy and Buildings*, vol. 139, pp. 439-48, 2017.
- [21] A. De Angelis, O. Saro, y M. Truant, "Evaporative cooling systems to improve internal comfort in industrial buildings," in *Energy Procedia of the 72nd Conference of the Italian Thermal Machines Engineering Association, ATI 2017, Lecce, Italia, Septiembre, 2017*. Vol. 16, pp. 313-20.
- [22] M. S. Pomianowski, P. Heiselberg, y Y. Zhang, "Review of thermal energy storage based on PCM application in buildings," *Energy Build*, vol. 67, pp. 56-69, 2013.
- [23] A. Waqas y Z. Ud Din, "Phase change material (PCM) storage for free cooling of buildings-a review," *Renew Sustain Energy Rev*, vol. 18, pp. 607-25, 2013.
- [24] J. Shao, J. Darkwa, y G. Kokogiannakis, "Development of a novel phase change material emulsion for cooling systems," *Renew Energy*. vol. 87, pp. 509-16, 2016.
- [25] Y. Li y S. Liu, "Experimental study on thermal performance of a solar chimney combined with PCM," *Appl Energy*, vol. 114, pp. 172-8, 2014.
- [26] A. Sharma, V. Tyagi, C. Chen, y D. Buddhi, "Review on thermal energy storage with phase change materials and applications," *Renew Sustain Energy Rev*, vol. 13, pp. 318-45, 2009.
- [27] M. Safari y F. Torabi, "Improvement of thermal performance of a solar chimney based on a passive solar heating system with phase-change materials," *Energy Equip Syst*, vol. 2, pp. 141-54, 2014.