

Mejora de un sistema de climatización con células Peltier a partir de la colmena de abejas: una aproximación teórica

■■■■
 Javier Bermejo-Busto, César Martín-Gómez,
 Amaia Zuazua-Ros, María Ibáñez-Puy, Rafael
 Miranda-Ferreiro y Enrique Baquero-Martín
 Universidad de Navarra (España)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/7865>

1. INTRODUCCIÓN

Las instalaciones en arquitectura han sido a menudo planteadas como infraestructuras centralizadas. Aunque algunos edificios de mayor envergadura son divididos en áreas menores, es bastante común encontrar edificios con una única infraestructura para la generación de calor y/o frío, electricidad, etc. Una de las principales razones para tomar esta decisión es limitar las necesidades de mantenimiento de estas instalaciones.

Buscando inspiración para acometer el diseño de las instalaciones de una forma alternativa y novedosa, la naturaleza puede ser una fuente de ideas. El biomimetismo traslada e implementa estas ideas en un variado número de campos: sensores, robótica, materiales, textil, superficies antirreflectantes, etc. [1] También pueden ser aplicadas en la arquitectura y sus instalaciones.

Algunos animales regulan su temperatura, humedad y metabolismo de una forma muy similar al ser humano: un sistema respiratorio central (pulmones y corazón), alimentación para producir energía, un sistema neuronal central, etc. Estos animales son homeotermos ya que mantienen su temperatura constante. También son endotermos pues necesitan de recursos como la comida o el oxígeno para mantener dicha temperatura.

Los edificios actuales funcionan de una manera similar cuando son diseñados con infraestructuras centrales que permiten mantener una temperatura constante. Igualmente, hacen uso de grandes recursos para mantener una temperatura y calidad de aire habitables (gasóleo, gas natural, electricidad, etc.).

Por otra parte, algunos animales sociales no trabajan como una gran máquina. Necesitan cooperar entre numerosos especímenes para sobrevivir y mantener una temperatura específica en sus nidos. En el caso de los insectos, crean grandes colonias y comparten tareas para mantener la temperatura interior dentro de límites habitables. Son comúnmente conocidos como animales de 'sangre fría'. Además, son ectotermos ya que regulan su temperatura dependiendo de las condiciones del entorno.

2. OBJETIVOS

La aproximación del proyecto inicial, y que constituye la base para este documento, es que las instalaciones también pueden trabajar como los animales sociales, esto es, como un conjunto de máquinas más pequeñas para espacios y necesidades menores. Inicialmente, puede suponer una mayor necesidad de mantenimiento y una mayor inversión cuando el edificio es construido, pero también significa una mayor optimización de los recursos y mejor eficiencia energética ya que los espacios vacíos no necesitarían ser climatizados.

Este tipo de instalaciones con menores requisitos, generalmente funcionan de manera descentralizada. Las unidades de climatización (entendido climatización como las siglas HVAC definidas por la *American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers* 'ASHRAE') que son instaladas en fachada ya han sido desarrolladas. Puesto que la normativa de edificación obliga a renovar el aire, especialmente en oficinas y edificios públicos, y los equipos necesitan su propia refrigeración, la instalación de rejillas en fachada es prácticamente inevitable. Por tanto, un sistema integrado en fachada es más apropiado ya que puede tomar el aire limpio del exterior o disipar su calor sin necesitar conductos adicionales.

Una opción de instalación autónoma, es un sistema de climatización basado en

células Peltier integrado en fachada. Puede trabajar sin conexión a la red si es conectado a paneles fotovoltaicos. Además, elimina la necesidad de múltiples unidades al producir calor y frío con una misma unidad [2].

Gracias a la experiencia adquirida por los investigadores de este documento con un primer prototipo basado en células Peltier, un segundo prototipo se encuentra en construcción. La inclusión de paneles fotovoltaicos y baterías ya ha sido planteada en este prototipo. Esto permitiría tener una instalación desconectada de la red y completamente autónoma para suministrar energía térmica.

Los investigadores están preparando un tercer prototipo que será más ligero, con mejores propiedades acústicas y parámetros de seguridad contra incendios así como una estandarización constructiva entre otros criterios. El uso de células Peltier en este prototipo ha sido innovador. Debido a esta característica, no se han encontrado experiencias similares, lo que supone un gran problema ante la imposibilidad de comparar la evolución de la solución propuesta. Por ello, para diseñar el tercer prototipo, eran necesarias soluciones alternativas. Pero ¿dónde encontrarlas?

Teniendo en cuenta estas consideraciones, surge una pregunta: ¿qué pasaría si buscamos inspiración en la naturaleza? Un proyecto de investigación financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad del Gobierno de España [3] se desarrolló con este fin. Uno de los objetivos es dar respuesta a las anteriores preguntas y unir las células Peltier con el comportamiento de las abejas. Sin embargo, esta no es una relación directa ni evidente. Ha requerido de un desarrollo intelectual durante varios meses y la colaboración de investigadores de distintas áreas como la Arquitectura y Biología.

3. ANTECEDENTES ARQUITECTÓNICOS

3.1. ENVOLVENTES ACTIVAS

Durante las últimas décadas el uso de fachadas opacas ventiladas como una solución para las envolventes de edificios residenciales ha aumentado considerablemente. Una fachada opaca ventilada es generalmente definida por una capa exte-

rior compuesta de un revestimiento ligero, y una capa opaca interior que actúa como aislamiento térmico y acústico. Entre ambas capas hay una cámara de aire, drenada y siempre ventilada (sin control). El aire no es transferido nunca de la cámara de aire al interior del edificio.

Aunque es una solución muy común, la fachada ventilada no es siempre la mejor opción, pues su rendimiento energético puede variar dependiendo de las características climáticas y su orientación. Es por ello que su aplicación debe ser estudiada previamente a su instalación. Las Figuras 1 y 2 muestran el comportamiento térmico de la fachada dependiendo de las condiciones térmicas exteriores.

Teniendo en cuenta las ventajas y desventajas de la cámara de aire ventilada, la propuesta se centra en controlar esta ventilación. Así, para evitar las pérdidas de calor en invierno se propone cerrar la cámara (sin ventilación) para facilitar el almacenamiento de calor en la cámara

y, por tanto, reducir las pérdidas de calor. Sin embargo, durante el verano, la cámara se abrirá facilitando la disipación de calor.

Esto es posible con el uso de envolventes activas. Este concepto de la bioingeniería ha sido definido por Loonen *et al.* [4] como sigue: "son envolventes casi 'autosuficientes' que muestran un comportamiento dinámico e incorporan diferentes tecnologías (unidades climatizadoras descentralizadas, intercambiadores de calor, suministro de energía, almacenamiento de energía, equipamiento de iluminación, equipos protección frente al sol cámaras ventiladas...) cuyo fin es reducir la demanda de energía de los edificios por un lado y convertir energía de fuentes renovables por otro".

Con el fin de afianzar estas propuestas, los fabricantes de módulos de fachada tecnológicos han comenzado a desarrollar sistemas modulares multifuncionales. Todos ellos incorporan diferentes estrate-

gias para intentar mejorar el rendimiento energético de la fachada: control de ganancias y pérdidas térmicas, almacenamiento térmico, integración de sistemas de climatización, integración con recursos renovables, etc.

3.2. CONTROL DE EQUIPOS DE CLIMATIZACIÓN

Los sistemas descentralizados para la producción de energía en edificios son poco comunes. La mayoría son instalados en fachadas, pero dependen de tuberías que transporten el agua caliente o fría desde otra unidad central. Por tanto, se podría decir que no son autónomos ya que dependen de otra instalación para funcionar correctamente (el lazo secundario según la definición de ASHRAE).

El sistema de climatización basado en células Peltier propuesto y previamente desarrollado por los autores de este documento, puede trabajar autónomamente si es conectado a paneles fotovoltaicos

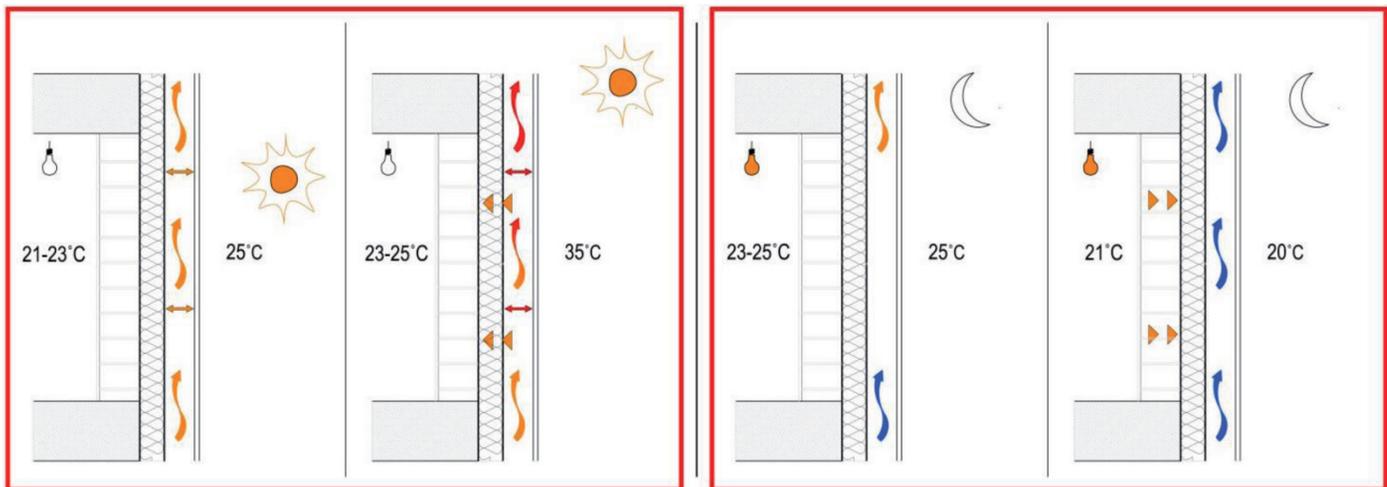


Fig. 1: Comportamiento térmico de una fachada opaca ventilada en verano con dos temperaturas exteriores diferentes. Imagen izquierda: durante el día. Imagen derecha: durante la noche. Disipación de calor. Si la temperatura interior es mayor que la exterior, tiene lugar un flujo calorífico hacia el exterior. Cuando las temperaturas son similares, las capas de la fachada, debido a sus propiedades aislantes, pueden evitar dicho flujo

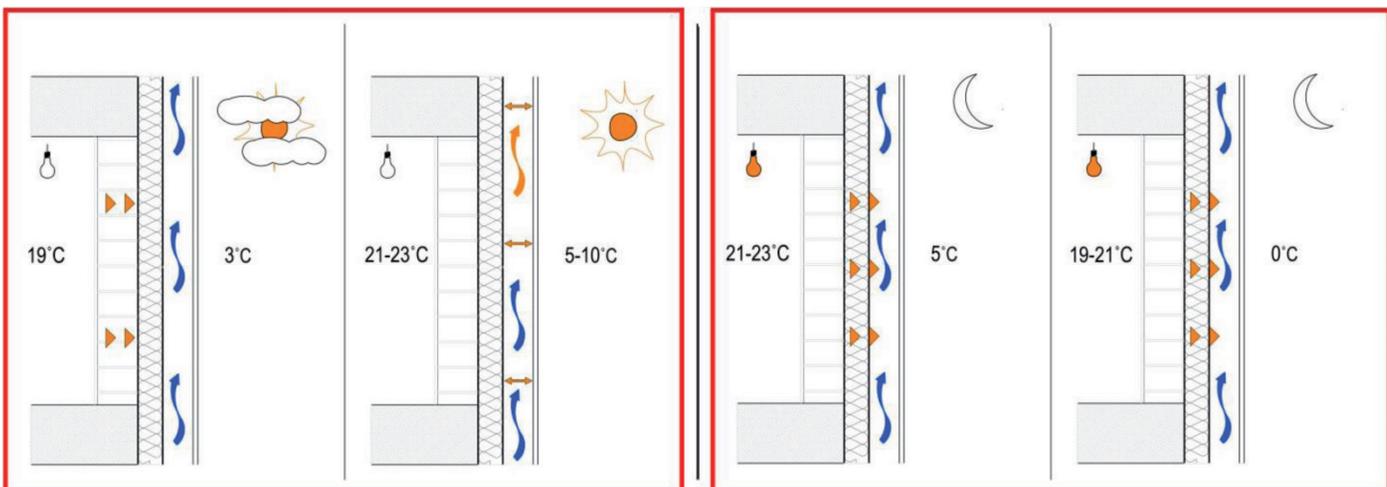


Fig. 2: Comportamiento térmico de una fachada opaca ventilada en invierno. Imagen izquierda: durante el día. Los días nublados, las pérdidas de calor aumentan. Cuanto mayor es la diferencia entre la temperatura interior y exterior, mayor es el flujo de calor entre las capas de forman la fachada. Los días soleados, se crea un colchón. / Imagen derecha: durante la noche. Las pérdidas de calor aumentan

que suministren electricidad. Estos paneles fotovoltaicos podrían ser integrados en la misma solución. Esto significa que el equipo al completo podría ser instalado como un módulo prefabricado de fachada. No necesitaría ninguna otra conexión a la red ya que el suministro eléctrico estaría asegurado con los paneles fotovoltaicos y el grupo de baterías. Este desarrollo supondría un gran paso para lograr soluciones altamente resilientes y sistemas de producción energética más eficientes.

Los edificios autónomos pueden llevar a una sociedad más eficiente. Pero uno de los factores más importantes para lograr un edificio autónomo es cómo se gestiona con un sistema de control inteligente. La eficiencia global y el ahorro energético conseguido dependerán de su correcta aplicación así como de su correcta calibración.



Fig. 3: Enfriamiento evaporativo (imagen izquierda): Las abejas genera una corriente de aire y reparten gotas de agua para reducir la temperatura interior. 'Heat shield' (imagen central): permite a las abejas 'cazar' el calor y así evitar que llegue a la zona de cría. Calefacción (imagen derecha): las abejas contraen el abdomen y los músculos torácicos para producir calor para las larvas cercanas.

Teniendo en cuenta el gran consumo de los equipos de climatización, los sistemas de control de gestión de la energía pueden ayudar a mejorar la eficiencia energética de dichos sistemas de climatización y mantener unas condiciones térmicas correctas. Los sistemas de control más comunes usados para reducir el consumo eléctrico son programados de acuerdo a numerosos modos (arranque/paro, ciclo de trabajo, reseteo de carga, limitación de la demanda eléctrica, control adaptable, optimización de enfriamiento, optimización de caldera, origen energético óptimo, etc.) procesando un gran rango de información heterogénea: sensores básicos para los parámetros de cada lugar (temperatura del aire, radiación, humedad relativa, velocidad del aire) y medidas del sistema (calor, frío), información visual o estimación para la actividad humana y el aislamiento de la ropa, información exterior, humedad relativa, actividad solar, viento (velocidad y dirección), etc. [5].

Uno de los principales problemas al diseñar un sistema de climatización es su control. El problema es aún mayor en edi-

ficios complejos donde el control depende de una unidad centralizada que recibe los datos de todas las habitaciones. Algunos de los problemas que existen son:

- Optimización de climatización: Formulación multiobjetivo (bienestar térmico, eficiencia energética, rentabilidad económica); Optimización con enteros mixtos / no lineal [5].
- Estructura tecnológica cambiante en función de los lugares o los recursos energéticos (convencional, solar, bombas térmicas, cogeneración) [5].

Algunos protocolos y tecnologías empleadas en edificios actuales necesitan de un ordenador central que recoja todos los datos de sensores y unidades y los procese (ADAM o NuDAM). La necesidad de un control centralizado hace que el sistema no sea tan autónomo.

Otros protocolos y tecnologías como KNX, X10 o LonWorks no dependen de una unidad central y reciben y envían toda la información desde los sensores y actuadores. Generalmente trabajan con un cable BUS o tecnología inalámbrica como Bluetooth, ZigBee y otros estándares 802.11 creando estructuras en árbol que no dependen de un ordenador centralizado. Aunque un ordenador, pantalla táctil o dispositivo móvil son necesarios para controlar y hacer cambios en la instalación, no es imprescindible tener una unidad central. Por tanto, nunca habrá problemas centralizados.

Así pues ¿sería posible desarrollar un sistema de climatización autónomo desconectado de la red, pero también independiente de un cerebro central?

En este contexto, el conocimiento del biomimetismo, y más específicamente de las abejas, puede ser útil para mejorar los sistemas de climatización autónomos existentes. Los insectos sociales como las hormigas, termitas y algunas especies de pájaros, distribuyen sus tareas automáticamente. Dejan señales como peque-

ñas marcas de comida o feromonas que permiten a otros especímenes actuar en consecuencia. Hacen estas tareas automáticas para conseguir una temperatura constante en el nido, mejorar ciertas características aerodinámicas o, simplemente, crear un camino de vuelta a casa. Es decir, trabajan individualmente para lograr un objetivo global.

4. ANTECEDENTES BIOLÓGICOS

4.1. COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE LAS ABEJAS

Continuando con lo que ha sido previamente expuesto, las abejas, y más concretamente la *Apis mellifera*, pueden regular la temperatura y otros factores como la concentración de gases dentro de la colmena. Esto es muy importante para la supervivencia de la colonia ya que la zona de cría necesita mantener una temperatura de entre 33 y 36°C [6].

Las abejas tienen hasta tres estrategias para regular la temperatura de la colmena tal y como se ve en la Figura 3. Dos estrategias son empleadas cuando la temperatura exterior es mayor que la interior. La restante, es utilizada cuando la temperatura exterior es menor que la interior.

El material que compone la colmena está principalmente formado por cera de abejas, propóleos y secreciones salivares, que dotan de aislamiento a la colmena ayudando a regular su temperatura. Además, algunas colmenas son construidas en agujeros de árboles, lo que permite tener un aislamiento aún mayor.

En la primera estrategia, algunos especímenes reparten gotas de agua y crean una corriente de aire a la entrada de la colmena, produciendo un enfriamiento evaporativo y renovando el aire y gases del interior. La segunda estrategia conocida como 'heat shield' permite que algunas abejas se posicionen entre la zona de cría y la pared de la colmena para absorber el calor que entra en la colmena y almacenarlo en sus cuerpos. Cuando no pueden absorber más calor, vuelan fuera de la colmena y lo liberan en el aire. Esta estrategia es similar a una fachada con dos capas: la primera capa es la pared exterior de la colmena, mientras que la segunda son las abejas evitando que el calor entre en la colmena.

La tercera estrategia se refiere a la protección de las larvas. Contrayendo sus abdómenes y músculos torácicos, las abejas pueden producir calor que es transferido a las larvas más cercanas. Aunque esta estrategia sólo puede ser usada en lugares

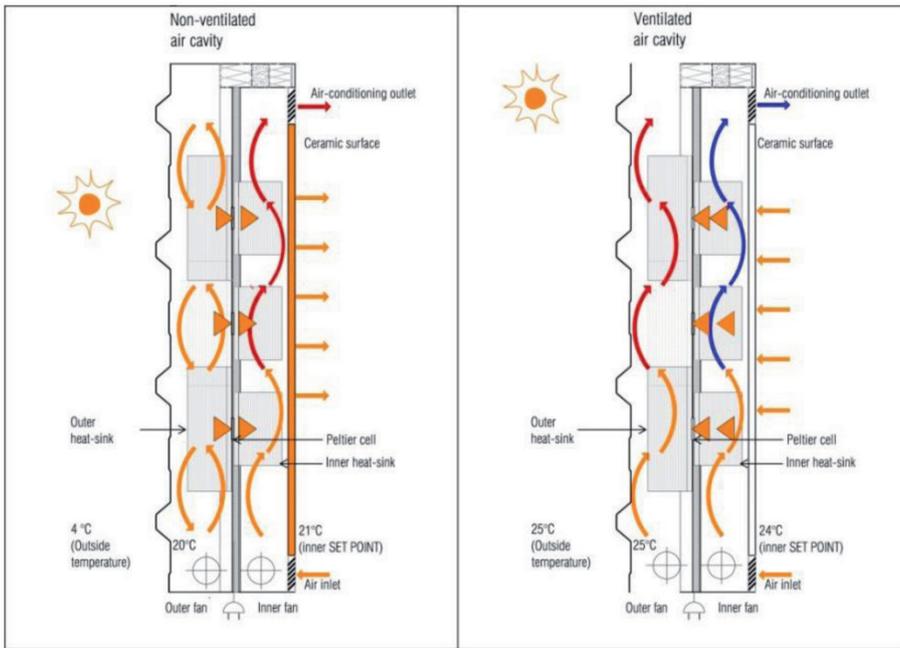


Fig. 4: Sistema termoeléctrico Peltier y comportamiento de la cámara. Imagen izquierda: configuración de invierno: Sistema de climatización Peltier en modo calefacción con la cámara de aire de la fachada cerrada para favorecer la acumulación de calor. Imagen derecha: configuración de verano: Sistema de climatización en modo refrigeración con la cámara de aire abierta, favoreciendo la disipación de calor hacia el exterior

puntuales por cada abeja, la gran cantidad de individuos que forman la colonia (hasta 5000 adultos) la hace una estrategia apropiada para contribuir a mantener la temperatura de la colmena.

4.2. ESTIGMERGIA

La palabra *estigmergia* fue definida por Pierre P. Grassé en 1959 como sigue: "La estimulación de los trabajadores por parte de las mismas actuaciones que han logrado es reseñable pues induce una respuesta adaptable y precisa, y se ha denominado *estigmergia*. La *estigmergia* explica claramente la correlación entre las áreas logradas y no requiere de mayor explicación dentro de un plan dado" [7].

Un brillante ejemplo de *estigmergia* en la naturaleza son las hormigas o termitas que cooperan para mantener la temperatura o la concentración de gases en sus nidos. Poseen una gran organización de conductos que permiten renovar el aire y tener el correcto y deseado nivel de gases.

La *estigmergia* se ha desarrollado y es aplicada en numerosos campos: arquitectura, gestión de edificios, robótica, economía o incluso atascos de tráfico. Actualmente es un concepto usado en la inteligencia artificial y es la base de algoritmos denominados '*Ant Colony Optimization*' [8]. El uso de la *estigmergia* en sistemas de control de climatización ya ha sido propuesto. Podemos encontrar ejemplos en el trabajo de Congradac *et al.* [9] o en la creación de un Sistema híbrido

inteligente propuesto para dicho control con la integración de '*Multiagent System*', '*Dynamic Ontology*' y '*Ant Colony Optimization*'. De hecho, resultados de simulaciones de sistemas de climatización simplificados demuestran cuantitativamente el efecto de hibridación.

'*Ant Colony Optimization*' es un acercamiento ingenieril para el diseño y la implementación de sistemas de software para la solución de difíciles problemas de optimización. La *estigmergia* describe la comunicación indirecta y la coordinación dentro de un campo a través del intercambio asíncrono de información entre agentes. Los principales requisitos son: compartir información de los costes y el grado de cumplimiento de objetivos para distintas alternativas; compartir información sobre la agrupación de bienes preferible para encontrar un recurso compartido.

5. MEJORAS DEL PROTOTIPO EXISTENTE

5.1. MEJORA 1: LA COLMENA DE ABEJAS O LAS ENVOLVENTES ACTIVAS

La solución de envolventes activas es muy similar a la actitud de las abejas colocándose entre los espacios intersticiales de la colmena durante la estrategia '*heat shield*'. Se podría decir que las abejas pueden 'controlar' la fachada posicionándose cerca de la pared exterior o volando de-

pendiendo de la transmisión de calor en la colmena.

Dentro de este contexto, y con el concepto del biomimetismo como fondo para los investigadores, un proyecto llamado "Desarrollo constructivo y análisis de un módulo de fachada activa con células Peltier" ha sido desarrollado. Se busca diseñar un prototipo modular a escala industrial para fachada activa con el nuevo sistema termoeléctrico Peltier.

El principio de este nuevo sistema de climatización es la transferencia de calor. Como visión global del proceso, durante períodos cálidos, el sistema termoeléctrico Peltier extrae el exceso de calor de la habitación a la cámara de aire. Por otro lado, en períodos fríos, tiene lugar el proceso inverso.

Por otro lado, se espera que el diseño pasivo de la fachada activa mejore la eficiencia del sistema termoeléctrico porque uno de los principales retos en el diseño y funcionamiento de células Peltier es el uso de corrientes de aire que colaboren en la disipación del calor extraído. Por tanto, en invierno la cámara es calentada por la radiación solar y capturada (cámara de aire cerrada), mientras que en verano puede ser efectiva extrayendo el exceso de calor (cámara de aire abierta) extraído del interior de la habitación como se representa en la Figura 4.

5.2. MEJORA 2: ESTRATEGIAS DE LA ESTIGMERGIA O UN CONTROL DE LA CLIMATIZACIÓN SIN ORDENADOR CENTRAL

Teniendo en cuenta las oportunidades de evolución propuestas por los estudios basados en la *estigmergia*, el grupo de investigadores plantea el concepto de 'interacción con el vecino'. Esto supone que el control del sistema de climatización es independiente para cada local, sin un control centralizado, aunque recibiendo las señales comunes de bienestar interior y los diferentes factores exteriores incorporando, además, las señales recibidas de los equipos instalados en habitaciones adyacentes. El funcionamiento del sistema se explica esquemáticamente en la Figura 5.

Por ejemplo, si la habitación contigua empieza a aumentar su temperatura, mandará una señal a sus vecinos para que enciendan un status de alerta. Hasta ese momento, estarían apagados, consiguiendo un importante ahorro y un rápido inicio cuando sea necesario. Si el módulo de fachada detiene la ventilación porque la concentración de CO₂ lo permite, la correspondiente señal será enviada a los vecinos. Si un módulo detecta un incendio,

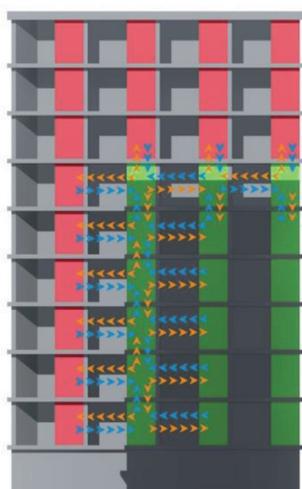


Fig. 5: La imagen representa la configuración de los módulos en primavera u otoño, cuando una calefacción continua no es necesaria. Los módulos rojos están apagados, pues la radiación solar es suficiente para calentar dichas viviendas. Los módulos verdes están encendidos ya que están en sombra (producida por un edificio cercano por ejemplo) y necesitan generar calor. Las flechas azules y naranjas representan la información intercambiada entre los módulos: temperatura y humedad interior, concentración de gases, presencia de humo, etc.

los vecinos recibirán dicha señal para, por ejemplo, cerrar los conductos comunes de ventilación que pudieran plantearse.

6. CONCLUSIÓN

Dentro del contexto planteado para mejorar el prototipo, es importante resaltar que no existe una solución ideal. Para resolver el problema, el diseño, costes de ejecución y mantenimiento llevarán a elegir qué tipo de instalación realizar.

Teniendo en cuenta que las condiciones exteriores están en continuo cambio en el tiempo y espacio, es necesaria una variación en el diseño de las envolventes. La envolvente es generalmente diseñada como un elemento estático, teniendo en cuenta sólo las peores condiciones, por lo que el rendimiento energético nunca está optimizado.

En cuanto a la evolución de los sistemas de control, hay tres paradigmas mayores: estrategia evolutiva, programación evolucionada y algoritmos genéticos [10], por lo que un amplio rango de estrategias del biomimetismo podrían ser aplicadas para mejorar el rendimiento energético de las envolventes: ganancias solares, control de pérdidas térmicas, almacenamiento de energía térmica y la integración de sistemas de climatización del edificio o con fuentes de energías renovables. Esta es la razón por la que considerar que las envolventes activas y adaptables podrían ser

la solución para cumplir los actuales retos energéticos.

Sin embargo, el acercamiento de los investigadores nace de la arquitectura y la biología, profundizando en el proceso de diseño intelectual para diseñar el funcionamiento del nuevo sistema, y dejando su desarrollo a ingenieros informáticos.

Las propuestas presentadas implican un rediseño evolutivo de los dos prototipos construidos, con la confianza de que los futuros diseños impliquen una confirmación empírica de los conceptos propuestos. Estas propuestas nunca habrían sido realizadas sin los conceptos de biomimetismo y estigmergia.

Las conclusiones tienen un doble acercamiento, referidas al acondicionamiento de edificios con células Peltier y al campo biológico. Primero, sobre el desarrollo del sistema de climatización Peltier:

- Las células Peltier suponen una alternativa para conseguir sistemas de climatización realmente autónomos.
- Se propone una estrategia de control adaptable para regular el funcionamiento del sistema de climatización durante las horas ocupadas. Dicha estrategia es fácilmente aplicable para controlar la regulación de la temperatura.
- Se propone una estrategia de encendido, complementando las acciones de control tradicional, que depende de la diferencia de temperatura entre el interior y el exterior, la temperatura inicial del edificio, la temperatura del aire impulsado, la masa térmica del edificio, etc., con el conocimiento del comportamiento de las unidades de climatización vecinas.

Finalmente, sobre biología:

- El uso del conocimiento del biomimetismo para desarrollar conceptos en arquitectura e ingeniería. Este proyecto confirma el uso del biomimetismo como iniciador para encontrar acercamientos alternativos.

Aunque los biólogos tenían un gran y valioso conocimiento muy útil para muchos campos de trabajo como la arquitectura o la ingeniería, no eran conscientes de ello. Tras numerosas conversaciones, se percataron de las oportunidades que la biología podría ofrecer en cuanto al ahorro y la eficiencia energética. Estos resultados respaldan cómo los investigadores del proyecto Peltier han podido mejorar el diseño de un sistema de climatización no común con el uso de estrategias provenientes del biomimetismo en la ar-

quitectura gracias a la colaboración con biólogos.

AGRADECIMIENTOS

Este proyecto ha sido financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad del Gobierno de España bajo el proyecto de investigación BIA2013-49838-EXP.

PARA SABER MÁS

- [1] J.M. Benyus, *Biomimicry. Innovation inspired by nature*, Harper Collins, 1997.
- [2] C. Martín-Gómez, M. Ibanez-Puy, J. Bermejo-Busto, J.A. Sacristan Fernandez, J.C. Ramos, A. Rivas, Thermoelectric cooling heating unit prototype, *Build. Serv. Eng. Res. Technol.* (2015) 1–19. doi: <http://dx.doi.org/10.1177/0143624415615533>.
- [3] C. Martín-Gómez, J. Bermejo-Busto, A. Zuazua-Ros, R. Miranda, E. Baquero, Redesign of the integration of building energy from metabolisms of animals: the RiMA project, in: *Proc. CISBAT 2015 Int. Conf. Futur. Build. Dist. - Sustain. from Nano to Urban Scale - Vol. II*, Lausanne, 2015; pp. 699–704. doi: <http://dx.doi.org/10.5075/epfl-cisbat2015-699-704>.
- [4] R.C.G.M. Loonen, M. Trčka, D. Cóstola, J.L.M. Hensen, Climate adaptive building shells: State-of-the-art and future challenges, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 25 (2013) 483–493. doi:10.1016/j.rser.2013.04.016.
- [5] M. Hadjiski, V. Sgurev, V. Boishina, HVAC control via hybrid intelligent systems, *Cybern. Inf. Technol.* 7 (2007) 77–94.
- [6] A. Stabentheiner, H. Kovac, R. Brodschneider, Honeybee colony thermoregulation-regulatory mechanisms and contribution of individuals in dependence on age, location and thermal stress., *PLoS One.* 5 (2010) e8967. doi: <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0008967>.
- [7] P.P. Grassé, La reconstruction du nid et les coordinations interindividuelles chez *Bellicositermes natalensis* et *Cubitermes* sp. la théorie de la stigmergie: Essai d'interprétation du comportement des termites constructeurs, *Insectes Soc.* 6 (1959) 41–80. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/BF02223791>.
- [8] S. Shaukat, R.A. Bhatti, K.I. Qureshi, S.A. Shad, Ant Colony Optimization: A Review and Comparison, *Res. J. Appl. Sci. Eng. Technol.* 8 (2014) 435–438.
- [9] V. Congradac, F. Kulic, HVAC system optimization with CO2 concentration control using genetic algorithms, *Energy Build.* 41 (2009) 571–577. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.12.004>.
- [10] K.F. Fong, V.I. Hanby, T.T. Chow, HVAC system optimization for energy management by evolutionary programming, *Energy Build.* 38 (2006) 220–231. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2005.05.008>.