

Aspectos tecnológicos, estructurales y constructivos de forjados de hormigón termoactivos (TABS)

Technological, structural and construction aspects of thermally activated slabs (TABS)

Antonio Villanueva Peñalver^a, Ramón Gutiérrez Fernández-Cuervo^b, Carlos Castañón Jiménez^c y Jorge de Prado Romero^d

^aIngeniero Industrial. IDOM Consulting, Engineering, Architecture. Responsable de Sostenibilidad y Eficiencia Energética. avp@idom.com

^bIngeniero Industrial. IDOM Consulting, Engineering, Architecture. Coordinador de proyectos. rgf@idom.com

^dIng. de Caminos, Canales y Puertos. IDOM Consulting, Engineering, Architecture. Director de Estructuras. ccastanon@idom.com

^dIngeniero Técnico Industrial. IDOM Consulting, Engineering, Architecture. Coordinador de Proyectos. jdeprado@idom.com

RESUMEN

Los TABS son un sistema de climatización que permite aprovechar la inercia térmica de la estructura de hormigón para mejorar el comportamiento energético del edificio y por tanto reducir su huella de carbono, además de aportar una mejora en el confort de los usuarios, entre otras ventajas. El sistema TABS consiste en la introducción de circuitos de agua por el interior de los forjados de hormigón del edificio con el fin de poder controlar su temperatura y provocar un desacoplamiento entre producción y demanda energética en el edificio. El presente artículo explica la base teórica detrás de los TABS, recorriendo algunas realizaciones del mismo en España.

ABSTRACT

TABS is a heating and cooling control system that takes advantage of the thermal inertia of the concrete structure to improve a building's energy performance and thus reduce its carbon footprint, in addition to providing improved user comfort, among other benefits. The TABS system involves the introduction of water circuits inside the building's concrete slabs to control their temperature and create a decoupling between energy production and demand in the building. This article explains the theoretical basis behind TABS, highlighting some implementations in Spain.

PALABRAS CLAVE: TABS, estructuras activadas térmicamente, sostenibilidad, exergía

KEYWORDS: TABS, thermally activated building system, sustainability, exergy.

1. Introducción

La necesidad de reducir el carbono embebido en el sector de la edificación se ha convertido en una de las metas más importantes de las sociedades avanzadas, dado que más del 40% de las emisiones de efecto invernadero provienen de los edificios.

El aprovechamiento de la inercia térmica del hormigón por medio de TABS (Thermally Activated Building System) es una de las estrategias que permiten su reducción en los edificios. Esta tecnología ha sido hasta el momento poco utilizada en edificaciones en

España, si bien en países del norte de Europa se emplea en aproximadamente un tercio de las nuevas edificaciones.

Las exigencias de sostenibilidad del nuevo Código Técnico, además de las posibilidades intrínsecas que el propio sistema ofrece, sitúan a los TABS como una estrategia de diseño competitivo y eficiente.

Por medio de unas tuberías embebidas en el hormigón por los que se hace circular agua, se aprovecha la gran inercia térmica de la masa de hormigón para regular la temperatura del edificio. Así, la propia estructura, además de su función principal resistente, adquiere la función de transportar, distribuir y almacenar la energía de climatización (tanto para enfriar como para calentar) y regula la cantidad de calor que cede o absorbe del ambiente.

2. Aprovechamiento de la inercia térmica de la estructura

Los sistemas de forjados activos o estructuras termoactivas (TABS), utilizan la masa térmica de la estructura del edificio para mejorar su comportamiento energético. Para poder conocer las consecuencias de un aumento de la masa térmica de un edificio en su comportamiento energético es muy importante analizar en detalle los dos efectos que produce un aumento de inercia térmica en cualquier sistema dinámico, en general, ante un mismo estímulo energético externo:

- 1.- El primero de estos efectos es una disminución en la amplitud de la respuesta del sistema. Es decir, un mismo estímulo afecta en menor medida al sistema inercial frente al no inercial.

- 2.- El segundo es un retardo en la respuesta. Es decir, la consecuencia del estímulo tarda más en aparecer en un sistema inercial frente al no inercial.

Estas dos características implícitas, por lo tanto, a un aumento en el uso de la masa térmica de un edificio son las razones principales por las

que los sistemas de forjados activos pueden suponer grandes ahorros de energía en los mismos.

La Figura 1 permite ilustrar el efecto de la inercia ante un mismo estímulo periódico (variación temperatura exterior entre el día y la noche o la variación de la carga térmica interna en función de horarios de uso del edificio) en cuatro sistemas de inercia creciente.

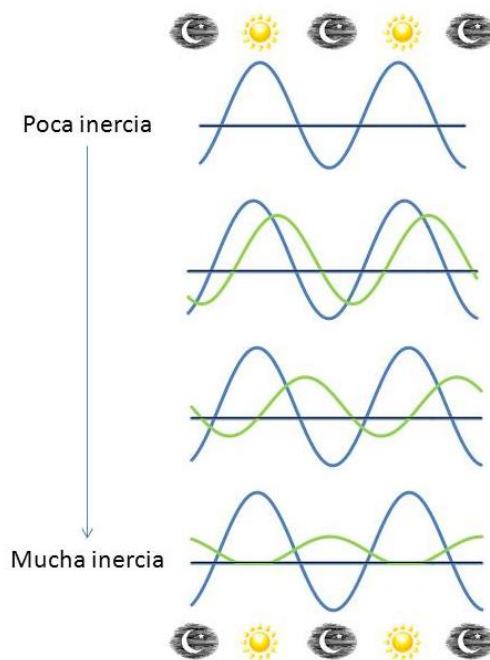


Figura 1. Efecto de la inercia ante un mismo estímulo periódico (variación de temperatura exterior diariamente)

La línea azul es el estímulo. En concreto se representa la potencia instantánea de calor que se introduce en el sistema. En este ejemplo, esta variable adquiere valores positivos durante el día y negativos, aunque menores, por la noche. Los positivos se deben a la radiación solar, a una mayor temperatura exterior diurna y a las grandes cargas internas típicas de un edificio de oficinas en horario de funcionamiento (personas, ordenadores, iluminación, etc.). Los negativos se deben a una menor temperatura exterior nocturna y a la radiación hacia la bóveda celeste durante la noche.

La línea verde es la respuesta del sistema. En concreto, representa la potencia instantánea de calor que llega al ambiente interior (en el caso de poca inercia no puede observarse la línea verde por estar superpuesta a la azul). Es, pues, la potencia a contrarrestar con el sistema de climatización del edificio.

En el eje de abscisas, como es habitual, se representa el tiempo. La distancia entre dos iconos iguales, dos soles o dos lunas, suponen 24 horas.

El primero de los efectos de un sistema inercial, la disminución de la amplitud de la línea verde, supone, para el sistema energético de un edificio, dos efectos ligados inseparablemente entre sí:

- En primer lugar, el valor máximo que alcanza la curva verde disminuye. De modo que la potencia requerida por el sistema de climatización es menor cuanto mayor es la inercia. Esto supone un ahorro en inversión de equipos y un aumento de espacios disponible en el edificio.
- En segundo lugar, se observa cómo en el ejemplo de mayor inercia no existe demanda de calor en el edificio, o lo que es lo mismo, la curva verde no pasa por debajo del eje de abscisas. Esto permite explicar por qué en edificios de oficinas, durante los meses de invierno, y en el caso de no disponer de aprovechamiento de la inercia térmica del edificio, es tan habitual comenzar el día introduciendo calor y terminarlo introduciendo frío. Así, un edificio con suficiente inercia térmica debería poder evitar este efecto. Esto puede suponer un importante ahorro energético para el mismo.

El otro beneficio de la inercia es el retardo en la respuesta. Puede observarse cómo la curva verde se va retrasando según aumenta la inercia del sistema hasta el punto en el que el edificio demanda introducir el frío durante la noche. Este efecto supone un gran beneficio energético debido a que por la noche los equipos de producción de frío tienen un rendimiento

mayor, mejorándose de este modo la eficiencia energética del sistema.

Éste último efecto lo llamamos desacoplamiento entre producción y demanda. Esto es, en un edificio sin inercia, las curvas azul y verde se superponen. Es decir, es necesario producir la máxima cantidad de frío justo cuando más calor hace en el exterior y menor rendimiento te ofrecen los equipos de producción de frío. Se puede decir, entonces, que la producción de frío y su demanda están acopladas. Sin embargo, un edificio de mucha inercia permite que el frío producido por la noche absorba el calor generado durante el día. La producción de frío y su demanda están, en este caso, desacopladas.

Ha de tenerse en cuenta que para que se produzcan todos estos beneficios teóricos se ha de cumplir que el elemento inercial sea solidario al sistema, es decir, que se encuentre perfectamente conectado energéticamente al sistema o, dicho de otro modo, que entre el elemento inercial y el sistema no existan resistencias al flujo energético.

La realidad, como siempre, es compleja.

En el caso de los edificios ocupados por personas, la inercia térmica de la estructura del edificio, forma parte de un sistema energético cuyas variables más importantes son las concernientes a las condiciones de confort interior de los usuarios (temperatura interior del aire, etc.).

Hay que tener en cuenta además que existen resistencias al flujo energético que posibilitan que puedan existir diferencias entre la temperatura que vaya adquiriendo la estructura y las del ambiente interior, en concreto, la de la temperatura de ambiente interior del aire.

Por último, los flujos energéticos en los edificios no están compensados, de modo que hay épocas en las que el flujo va a ser positivo y épocas en las que el flujo va a ser negativo. En los casos en los que la estructura no está termoactivada, la estructura puede llegar a calentarse o enfriarse demasiado, de modo que

su temperatura se sale de la banda de confort establecida para los ocupantes.

De ahí la necesidad de un sistema mecánico que permita controlar la temperatura de la estructura, y de ese modo, poder optimizar y controlar la interacción entre la masa térmica de la estructura y el ambiente interior. De ahí la necesidad de las estructuras termoactivas en la edificación.

Estos sistemas son, además, especialmente interesantes en edificios que:

- Tienen unos ratios elevados de consumo energético debidos a su climatización. De modo que el potencial de mejora es muy grande.
- Requieren de unas condiciones de confort muy estables a lo largo de muchas horas.
- Se implantan en climas en los que la alternancia energética día/noche sea muy importante. Por el día requieren disipar mucho calor y por la noche llegan a enfriarse demasiado llegando a requerir una generación de calor adicional para establecer unas condiciones adecuadas de confort a primera hora de la mañana del día siguiente.



Figura 2. Foto de obra de la sede de IDOM en Madrid con estructura activa

3. TABS

El sistema TABS consiste en la introducción de circuitos de agua por el interior de la estructura

del edificio con el fin de poder controlar su temperatura. En el caso particular del sistema (TABS-CCCT: Concrete Core Temperature Control), las tuberías se introducen en el interior de los forjados de hormigón de la estructura.

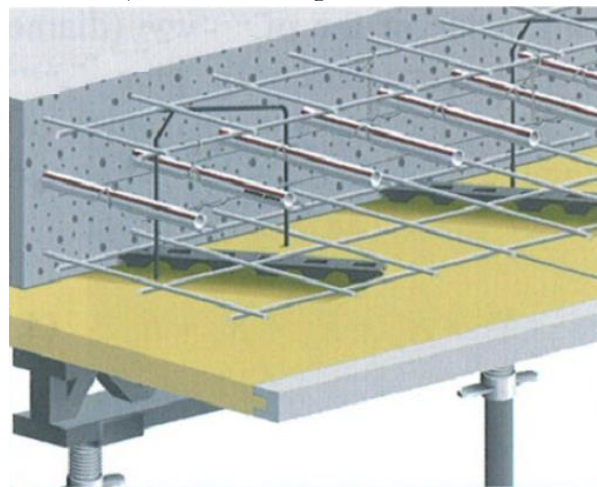


Figura 3. Sistema TABS

Estas tuberías deben ejecutarse durante la fase de estructuras de una obra. Existen varios medios de sujeción de los circuitos. En todos ellos los circuitos quedan completamente embebidos en su interior.



Figura 4. Foto de un forjado (sede IDOM Madrid) en proceso de construcción antes de la colocación de la armadura superior del mismo y previa a su hormigonado. Las vainas negras son para el postesado de la estructura. Las tuberías de TABS son de color blanco.

Tal y como hemos comentado en la introducción a este punto, el aprovechamiento de la masa térmica de la estructura de un edificio supone grandes ventajas:

- Minimización del tamaño de equipos de producción.
- Ahorro energético.
- Condiciones interiores más estables y uniformes.

- Desacoplamiento entre producción y demanda.

El sistema TABS permite controlar mecánicamente la temperatura de la masa térmica del edificio y maximizar así los beneficios de la utilización de la inercia térmica.



Figura 5. Hormigonado de un forjado con TABS en la sede de IDOM en Madrid

En los sistemas CCTC con suficiente espesor de losas de hormigón, el sistema tiene tanta inercia, que la estructura es capaz de contener toda la energía que se intercambia por radiación entre la estructura y los ambientes durante un día. Eso permite el siguiente sistema de funcionamiento:

Durante los meses en los que el edificio necesita refrigeración, los forjados actúan pasivamente durante el día, absorbiendo las cargas térmicas del interior de los espacios. Esto es, refrigeran estos espacios sin necesidad de la actuación de ningún sistema mecánico. Una subida de temperatura de 2°C de toda la masa térmica es equivalente a toda la carga de refrigeración del edificio en un día de verano.

Durante las noches de los periodos en los que el edificio necesita refrigeración, se hace pasar agua por los circuitos de TABS para refrigerar los forjados, de modo que vuelvan a estar frescos y dispuestos a calentarse de nuevo al día siguiente. Para ello, gracias a las condiciones nocturnas (más favorables en climas continentalizados como Madrid), se aprovecha la baja temperatura nocturna disponible, incluso en los peores meses de verano, para disipar el

calor absorbido por los circuitos. Para ello se utiliza el enfriamiento adiabático, directamente con una torre de refrigeración, sin necesidad de arrancar una enfriadora. Se consigue así, un sistema completo de refrigeración con un SEER real de 30.

En edificios de este tipo, se ha constatado que más de la 80% de la energía térmica retirada del edificio se realiza mediante el sistema de TABS, estando el 20% restante vinculado a los sistemas de ventilación.

La combinación del sistema de TABS con una instalación de enfriamiento evaporativo (torres de refrigeración) es una gran oportunidad de ahorro en climas continentalizados (como el de Madrid) en el que por la noche no se alcancen temperaturas de bulbo húmedo muy altas. Gracias al sistema de TABS se puede tomar ventaja de este tipo de condiciones climáticas. Por eso, lo consideramos un sistema de aprovechamiento ambiental que es donde creemos que existe el gran potencial para la eficiencia energética.

Si comparamos la potencia necesaria de los equipos de producción de frío de un edificio sin TABS con otro en el que se utilice TABS, los equipos de producción del primero deben disponer aproximadamente de entre 2 y 3 veces más potencia. Esto se debe a que un sistema de producción de frío de un edificio sin TABS ni inercia térmica alguna debe estar dimensionado para poder soportar la carga pico que las condiciones de diseño establezcan. Sin embargo, un sistema de producción de frío de un edificio con TABS debe ser capaz de refrigerar la misma cantidad de energía pero tiene para ello un número mayor de horas de trabajo disponibles.

2.1 Ejemplo de la Sede de IDOM en Madrid

La Figura 6 imagen trata de ilustrar esta ventaja del aprovechamiento de un sistema TABS. En este caso se suponen unas condiciones de control similares a las del edificio

de la sede de IDOM en Madrid en las que el sistema de producción de frío dispone de 12 horas (la noche) para disipar la energía absorbida por los forjados durante una ocupación de 8:00 a 20:00.

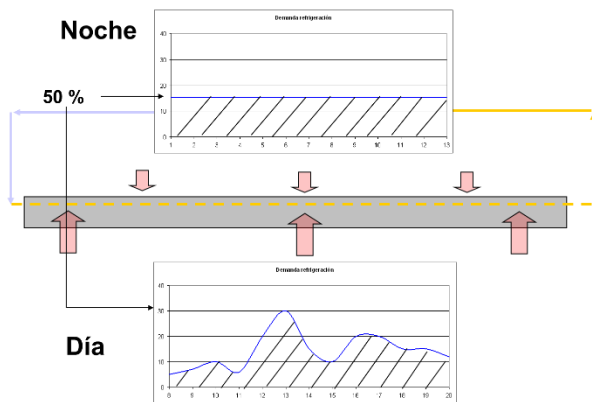


Figura 6. Reducción en el dimensionamiento del sistema de producción de frío debido al aprovechamiento de los TABS.

La respuesta de un sistema TABS ante la variabilidad de la demanda térmica (como la reflejada en la imagen anterior por una curva que puede tener una forma cualquiera) siendo pasiva (sin la necesidad de actuación de ningún sistema mecánico) es adecuada ya que absorbe una mayor cantidad de energía cuanto mayor sea la temperatura que alcanza el espacio a refrigerar.

Para unos TABS promedio se obtiene aproximadamente un ratio de 10 W/m² por cada grado de diferencia entre el ambiente y la temperatura superficial del forjado. De modo que cuanto más tienda a separarse estas temperaturas (debido, por ejemplo, a un calentamiento repentino de una sala de reuniones con una alta ocupación) más potencia absorberán los forjados.

Si un espacio bajo un mismo forjado va incrementando su temperatura y otro va disminuyéndola, el forjado de manera completamente pasiva, va refrigerando el primero y calentado el segundo sin necesidad de la actuación de ningún sistema de control. Incluso podemos tener en cuenta que, debido a que los refuerzos estructurales metálicos de los forjados, en su mayor medida, son horizontales, la conductividad térmica de los forjados en dirección horizontal es mayor. Por lo tanto,

puede llegar a hablarse de que un forjado con masa térmica en contacto con el aire es capaz de intercambiar, a demanda, energía entre espacios sin necesidad de mover aire, agua ni ningún fluido caloportador sino tan sólo mediante su funcionamiento pasivo.

Para poder aprovecharse de estas características propias del uso de la masa térmica de la estructura resulta muy conveniente eliminar resistencias al flujo de energía térmica entre el elemento masivo (en este caso los forjados) y el sistema a controlar (en este caso las condiciones interiores de confort). Un elemento que claramente se comporta como una resistencia a este flujo energético es el falso techo o el falso suelo. Es deseable la ausencia tanto de falso techo continuo como de falso suelo como puede observarse en las figuras 7 y 8:

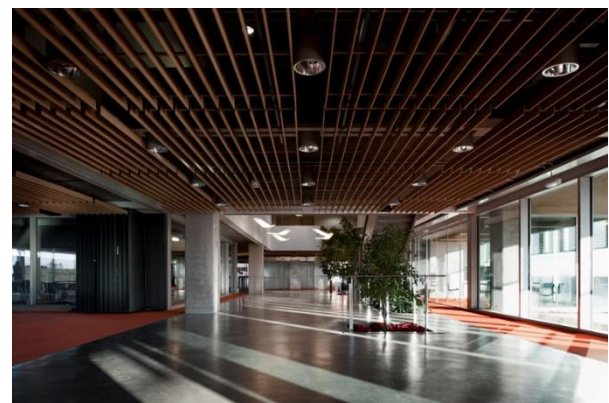


Figura 7. Diseño interior de los espacios de la sede de IDOM en Madrid evitando falso suelo y falso techo para aprovechar la masa térmica de los forjados.



Figura 8. Diseño interior de los espacios de la sede de IDOM en Madrid. Tampoco se reviste el acabado

de la fachada para poder aprovechar toda su inercia térmica

En cuanto al dimensionamiento del sistema de TABS, en las figuras 9 y 10 se incluyen esquemas tipo que definen los dos sistemas constructivos utilizados:

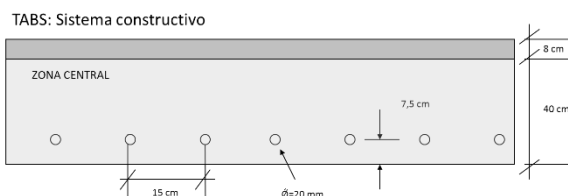


Figura 9. Sistemas constructivos de TABS en los forjados de la sede de IDOM en Madrid.

En este caso tipo, el plano de tuberías del sistema TAMS-CCTC está al nivel de la armadura inferior.

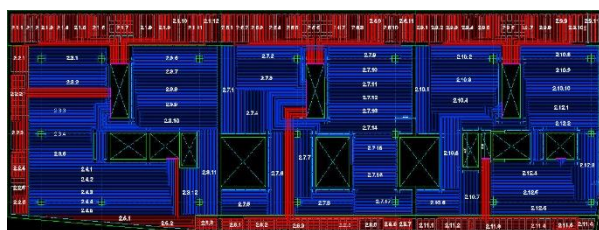


Figura 10. Plano constructivo de los circuitos de TABS de una planta completa de la sede de IDOM en Madrid.

Se observa igualmente en la Figura 10 que no se diseñan los circuitos considerando la compartimentación de los espacios. Esto sería incoherente con la filosofía de trabajo de los TABS que persigue un comportamiento térmico masivo, uniforme, constante y generalizado en todo el edificio. Además de que le restaría la enorme flexibilidad funcional absolutamente necesaria en un edificio, especialmente en ciertos usos como el de oficinas. En un edificio con TABS y con una envolvente térmica excelente, apenas se notan diferencias de temperaturas de un espacio a otro, de manera que al entrar, por ejemplo, en una sala de reuniones no es fácil reconocer si ha estado ocupada recientemente o vacía desde hace días.

En la sede de IDOM en Madrid los TABS están dimensionados para absorber más de 40 w/m² en condiciones de diseño de verano, haciendo pasar agua a 19°C a través de los forjados.

En la Figura 11 se puede observar cómo va evolucionando la temperatura de los forjados durante su funcionamiento habitual durante el verano.

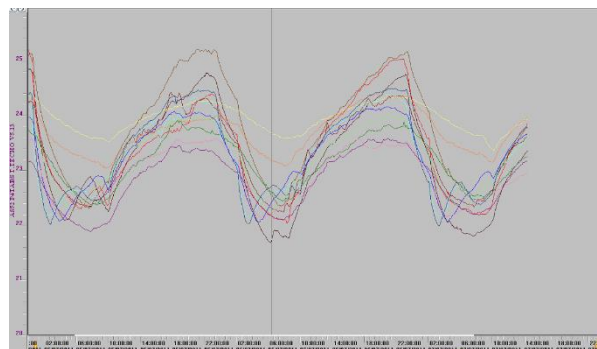


Figura 11. Salida gráfica del BMS de la sede de IDOM en Madrid. Evolución de las temperaturas de las sondas de contacto del techo de planta 4ª a lo largo de algo menos de tres días laborables de Julio.

En esta imagen el incremento de temperatura de las sondas de techo de los forjados se debe a que va absorbiendo el calor que se genera en la oficina durante el día. Una vez ha llegado la noche y las temperaturas exteriores son favorables, se hace pasar el agua de los TABS por una torre de refrigeración hasta que las sondas de techo lleguen a la temperatura de consigna (22,5 °C en la imagen). Una vez se ha alcanzado esta temperatura, los forjados están dispuestos a empezar un nuevo día.

Se observa que, aún en Julio, la temperatura del hormigón sólo varía aproximadamente 2°C.

A medida que nos alejamos de las condiciones más duras de verano, se va haciendo necesario refrigerar en menor medida los forjados durante la noche. De hecho, existen aproximadamente 3 meses al año (mes y medio en primavera y otro tanto en otoño) en los que no es necesario introducir ni frío ni calor en los TABS. En estas condiciones está resultando

suficiente con recircular el agua que pasa a través de todos los forjados para que el agua que se encuentra en la última planta (que se enfría un poco más que el del resto) refrigere al resto de los forjados sin necesidad de arrancar ni siquiera la torre de refrigeración.

En invierno es necesario introducir algo de calor en los forjados mediante el sistema de TABS, pero durante los dos inviernos completos que ya lleva en funcionamiento el edificio, ha sido suficiente con introducir agua a 24°C para satisfacer las necesidades del edificio.

En general, recomendamos que el control de los TABS sea sencillo. En la sede de IDOM se ha ejecutado una instalación a dos tubos con una válvula de control por cada colector de circuitos. Ésta válvula se hace actuar en función de la evolución de una sonda de temperatura de techo. Esta válvula podría ser todo o nada. La temperatura de consigna actual en estas sondas es de 23°C en verano y de 23,5°C en invierno.



Figura 12. Termografía de un techo de la sede de IDOM en Madrid con los TABS en funcionamiento. Se observa que la temperatura mínima que alcanza la superficie es de 23,5°C

El confort percibido por el usuario de un edificio con TABS es mucho mayor por varias razones:

- Control de la temperatura radiante. Ambiente percibido más natural y menos artificial.
- Condiciones térmicas uniformes en todo el edificio.
- Refrigeración del edificio sin secar el ambiente.

- Refrigeración del edificio sin producir corrientes de aire.
- Ausencia total de ruido por el sistema de climatización.

2.1 Implementación de TABS en edificios existentes

Por último, destacar que los TABS también pueden implementarse en edificios existentes que se planteen una rehabilitación de gran alcance o que requieran de un refuerzo estructural. Es el caso de un proyecto de oficinas en Francia de rehabilitación en el que IDOM ha proyectado una activación de la estructura mediante la inclusión de unos circuitos de agua en el recrecido de los forjados. A continuación se incluye una imagen de esta solución técnica:

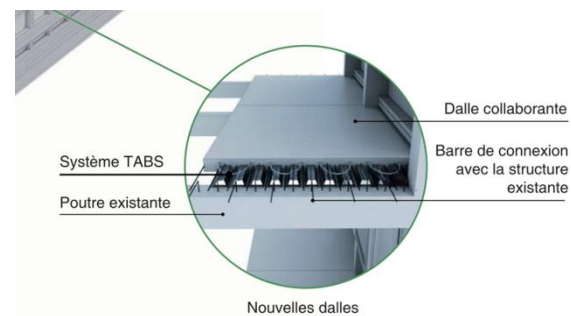


Figura 13. Activación mediante un sistema TABS de una estructura existente en un proyecto de Francia.

4. Exergía

La exergía, de manera simplificada, es la parte de la energía de un sistema que es capaz de realizar trabajo con su entorno. De manera que es como un indicador de calidad de la energía.

Pues bien, sistemas de climatización edificatoria como los TABS son conocidos como de baja exergía (en la literatura inglesa: Low-Ex systems) porque permiten el aprovechamiento de energías de bajo contenido exergético pues requieren de temperaturas de agua para su funcionamiento muy cercanas a las del ambiente.

	<u>Antes de 1990</u>	<u>Tendencias</u>	<u>TABS</u>
calor	80°C	55°C	24°C
frío	7°C	10°C	19°C

Figura 14. Evolución de las temperaturas de impulsión de agua en sistemas de climatización hidrónicos.

Esto supone los siguientes beneficios:

- Mejores rendimientos en producción. Por ejemplo, una bomba de calor tiene un rendimiento mayor si se le solicitan temperaturas templadas que extremas.
- Mayores rangos de utilización de energías renovables. En general, las energías renovables son de bajo contenido exergético. Por ejemplo, la geotermia puede utilizarse de modo directo sin necesidad de ninguna bomba de calor para temperaturas como las que utiliza el sistema de TABS de la sede de IDOM en Madrid.
- Menores pérdidas caloríficas durante el transporte.

Por otra parte, también cabe destacar, que al utilizar temperaturas tan templadas en una torre de refrigeración se reduce en gran medida el riesgo de legionella porque la temperatura alcanzada en la misma es mucho menor.

Estas ventajas hacen que un sistema TABS sea muy fácil de combinar con energías renovables. En el caso de la sede de IDOM en Madrid se utiliza la aerotermia, sin embargo la opción geotérmica es también muy interesante. En Europa existen muchos ejemplos de esta última combinación y ha terminado por adquirir un nombre propio: GEOTABS.

Freecooling hidráulico nocturno

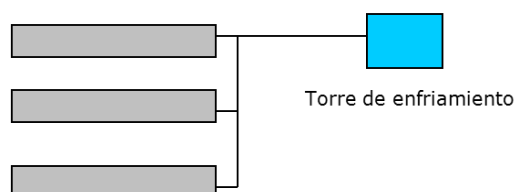


Figura 15. TABS + Aerotermia

Geotermia

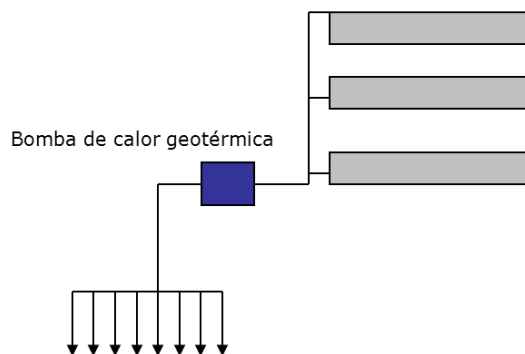


Figura 16. TABS + Geotermia

Una de las ventajas de la geotermia es que dispone de un mayor número de horas disponibles al día ya que la temperatura del terreno no tiene la variabilidad de la del ambiente. De modo que se puede reducir aún más el tamaño de los equipos de producción. Si en una instalación con aprovechamiento del enfriamiento nocturno dijimos que los equipos de producción podrían reducirse en un 50%, en un sistema que disponga de 24 h de trabajo, la reducción en el tamaño de los equipos de producción puede resultar mayor al 70%.

En climas españoles donde la severidad climática en invierno aumente considerablemente hasta conseguir que la calefacción del edificio sea un problema de mayor envergadura, resulta interesante plantearse igualmente las siguientes combinaciones que obtienen, a su vez, grandes ventajas de su aplicación en un edificio con TABS, mostradas en la Figura 17.

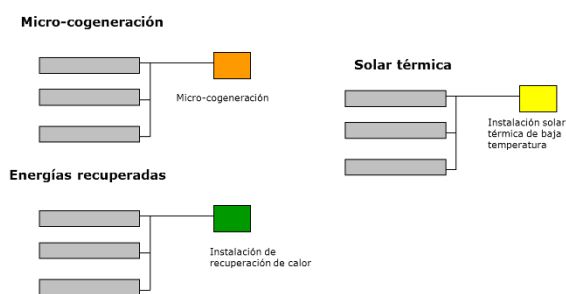


Figura 17. Esquemas de sistemas de TABS de calentamiento combinados con otras tecnologías con los que se obtiene una interacción muy interesante.

La Figura 18 muestra una relación proyectos de edificación diseñados por IDOM con TABS en España.

2010	SEDE IDOM		Primer edificio en España
2016	CUF DESCOBERTAS		Edificio hospitalario en Lisboa captación agua del tajo
2017	RED ELECTRICA 1		Termoactivación + Geotermia Piloto termoactivación estructura existente
2017	CLINICA NAVARRA		Edificio hospitalario en Madrid
2019	RED ELECTRICA 2		Incluye termoactivación completa (techos-suelos) estructura existente
2019	BODEGA OLLAURI		Termoactivación de naves de barricas y jaulones de vinos
2020	FINANZAUTO		Termoactivación estructura existente + geotermia 38 sondeos
2020	BANCO SANTANDER		Termoactivación estructura existente + geotermia lazo abierto

Figura 18. Edificios con TABS diseñados por IDOM en España

2. Conclusión

Los sistemas de forjados activos o estructuras termoactivas (TABS), utilizan la masa térmica de la estructura del edificio para regular su temperatura, permitiendo un desacople entre la demanda y la producción energética del edificio. Esto se consigue haciendo circular agua por unas tuberías embebidas en los forjados de hormigón, aprovechando la gran masa térmica ya existente en dichos forjados.