

# Evaluación de desempeño de edificios

## Building performance evaluation

\*\*Transcripción de la presentación de Jaya Mukhopadhyay en la Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Geografía, 26 de Octubre de 2022.

<sup>1</sup>Jaya Mukhopadhyay, <sup>2</sup>Andrea Martínez Arias

La evaluación del desempeño de los edificios (conocida como BPE, de Building Performance Evaluation, por sus siglas en inglés) es indispensable para fundamentar las decisiones de diseño. En este artículo se aborda este concepto junto a algunos estudios de casos en los que se pueden ilustrar estrategias de diseño pasivo que, aplicadas en edificios, mejoran no solo la eficiencia energética, sino que la calidad ambiental interior (o IEQ, de Indoor Environmental Quality).

La BPE es, en términos generales, el proceso de evaluar el rendimiento de un edificio para garantizar que funciona eficientemente y que provee una calidad de ambiente interior apropiada a la función que acoge. Una de las principales medidas de eficiencia es la energética. En este sentido, la operación eficiente de un edificio significa implementar medidas energéticamente eficientes desde la concepción inicial del proyecto, incluyendo estrategias en el diseño tanto de su envolvente, sistemas mecánicos de alta eficiencia o recursos de energía renovable.

Por su parte, y si bien la eficiencia energética ha sido mejor cuantificada en las últimas décadas, en el caso de la IEQ todavía se presentan desafíos en su apreciación y cuantificación. Esta contiene cuatro categorías: calidad del aire, iluminación natural, acústica y confort térmico. De esta manera, existe una relación directa entre las estrategias energéticamente eficientes y la IEQ resultante en un espacio construido. El desempeño final de una edificación es un resultado de un proceso que debe ser rico en información y trabajo interdisciplinario. Por ejemplo, si se diseña un edificio como una caja cerrada sin ventanas, quizás se pueden asegurar ciertos aspectos térmicos y energéticos; sin embargo, no se garantizaría la IEQ.

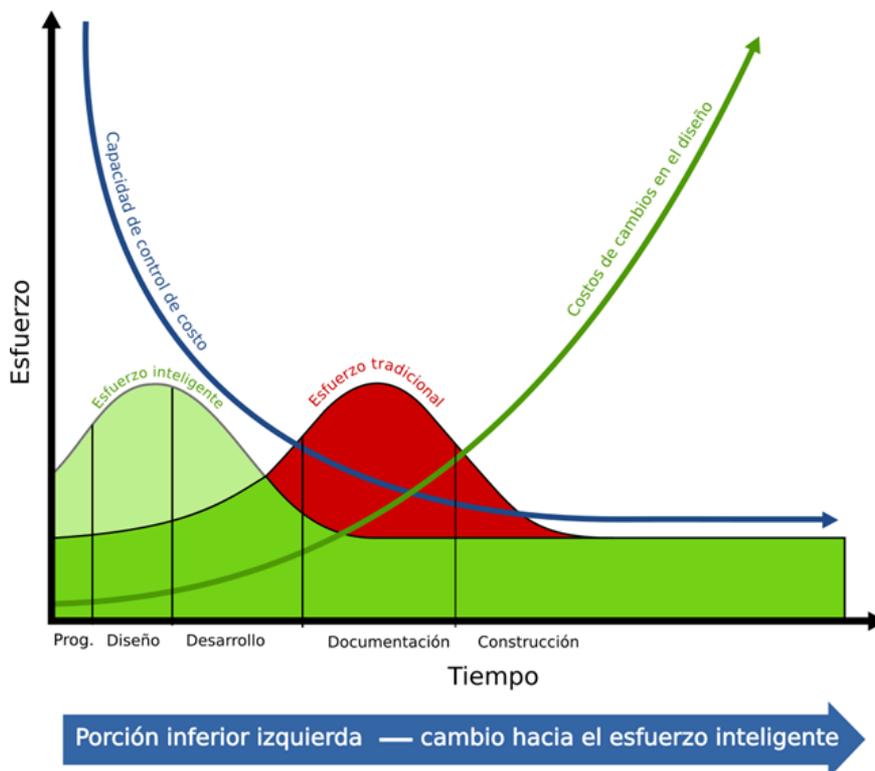
En este sentido, las dinámicas del diseño del espacio requieren no solo de arquitectos, sino de la colaboración entre ingenieros, psicólogos, sociólogos y todos quienes participan de la construcción y uso de ese espacio. Esta forma de trabajo permite entender, desde la etapa de diseño, cómo lograr edificaciones energéticamente eficientes que también contengan una IEQ apropiada.

## BPE en la cuantificación del desempeño de las edificaciones

Entonces, ¿cómo entra la BPE en el contexto del proceso de diseño de un edificio? Para responder a esta interrogante, preguntémosnos cuál es nuestra principal responsabilidad como arquitectos. La respuesta sería construir edificios eficientes y cómodos. Pero... ¿cómo nos aseguramos de esto? Como arquitectos, debemos enfocarnos en resolver problemas tangibles y cuantificar el impacto de nuestras decisiones de diseño, tanto en el ambiente como en los futuros ocupantes.

La BPE se convierte, de esta manera, en un objetivo con algunas metas tradicionales, como el aseguramiento de la calidad. En este marco,

**Figura 1.**  
*Curva MacLeamy*



**Nota:** Se ilustran las curvas de esfuerzo tradicional en rojo y un esfuerzo inteligente desplazado a etapas tempranas de programación, diseño y desarrollo, en el cual hay mayor habilidad de control costos y menor costo por cambios en el diseño. Fuente: Elaboración propia basada en Passive House California (2022).

la investigación juega un rol fundamental, ya que puede generar información valiosa mediante métodos como el estudio de casos o el uso de herramientas, como las simulaciones. Esta información permite conocer tempranamente no solo el diseño arquitectónico, sino que también todos los sistemas de control para analizar dichos antecedentes con el fin de anticiparse con soluciones ante posibles problemas futuros.

Para llevar a cabo una BPE se pueden usar diferentes softwares, como los de simulación de BPE. Además, existen software especializados para los diferentes aspectos de la BPE como el envolvente, el confort térmico, la ventilación y la iluminación natural. También se encuentran softwares extremadamente poderosos que pueden realizar simulaciones completas de un edificio en diferentes etapas.

En la Figura 1 destaca la importancia de incorporar herramientas de simulación de BPE en el diseño de edificios. Esta es la curva Macleamy e implica que los diseñadores tienen más éxito si enfrentan los problemas al inicio del proceso. En el eje X, están las etapas del proceso de diseño, el diseño esquemático, el desarrollo de diseño con la construcción, el procuramiento, etc. En el eje Y, encontrarán el esfuerzo y el efecto en BPE y costos. Como podemos ver, es más fácil cambiar el diseño en las etapas iniciales y, mientras más tiempo pasa, más difícil es modificarlo. Asimismo, el costo de hacer cambios en el diseño es bajo en las etapas iniciales, pero va subiendo mientras avanza el proceso.

En el diseño tradicional, casi todos los cambios se hacen en los documentos de construcción, pero utilizando estas herramientas lo pueden hacer en las etapas de diseño esquemático, y, por lo tanto, reducir el impacto de esfuerzo y costos. Este es el valor de emplear herramientas de simulación de BPE desde el principio.

El desempeño de un edificio que ya se encuentra construido y/o en uso, también se puede medir. Para eso, se necesitan instrumentos como medidores y registradores de datos. Por ejemplo, existen medidores para el sonido y para el dióxido de carbono y se puede usar un luxómetro para medir la iluminancia.

Si bien ha habido un desarrollo considerable en materia de regulación para la de eficiencia de recursos, aún se debe equilibrar la forma en que cumple el edificio con su intención para los ocupantes. La ocupación representa una cantidad de información que nos muestra cómo funciona un edificio en realidad. Por tanto, el desafío para el diseñador es recolectar esta información de una manera sistemática y significativa.

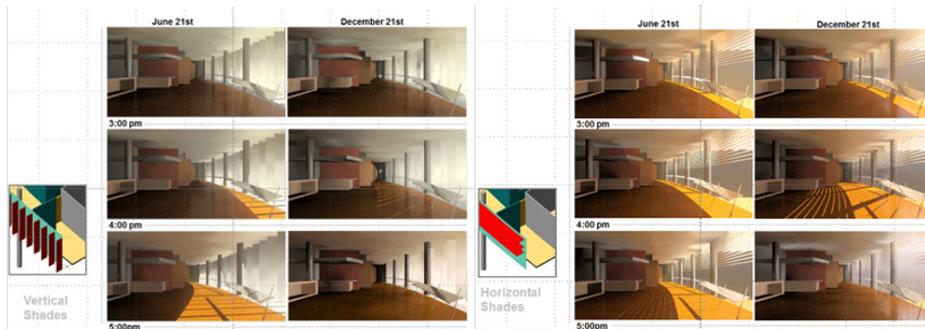
Asimismo, una de las piezas de información más importantes es la que proviene del ocupante. Para conseguirla, existe el proceso de evaluación post-ocupación, que hace uso de encuestas -una de ellas llamada ROAST, desarrollada por una firma de arquitectura con base en Filadelfia, Estados Unidos- mediante las cuales se busca asesorar y evaluar el confort térmico en un área de trabajo.

Sus resultados permiten mapear la retroalimentación, el feedback, de los ocupantes y recibir datos visuales. Así, se logran identificar tendencias que pueden enriquecer las decisiones de diseño y hacer mejoras informadas. Podemos acceder a los datos de ROAST en nuestro teléfono, donde se tabulan los resultados del feedback y se crean mapas en los planos del edificio.

Además, las evaluaciones de edificios se pueden extender al desempeño de los espacios exteriores y los alrededores de los edificios. Estos espacios normalmente se usan en campus de universidades o áreas urbanas y tienen sus propios desafíos. Por ejemplo, el clima, que no podemos controlar, lo cual complica el proceso de asesoramiento. Sin embargo, avanzar en estos estudios es fundamental porque, año a año, el clima es cada vez más extremo debido a los efectos de calentamiento global.

Las BPE también son importantes en el proceso de diseño de edificios certificados, también llamados edificios verdes, para demostrar el cumplimiento de sus sistemas. Por ejemplo, para asegurar el funcionamiento de la eficiencia energética, algunas versiones más recientes de LEED y de Living Building Challenge requieren el desempeño energético del edificio además del desempeño simulado anterior, demostrado en un periodo de doce meses después de que haya comenzado su ocupación.

**Figura 2.**  
*Imágenes de estudio lumínico de estrategias de control solar en fachada.*



Fuente: J. Mukhopadhyay

## Ejemplos (Casos Estudio) de BPE

### Proyecto del Centro de Ciencia y de Aprendizaje del Instituto Técnico de Houston

Esto es un ejemplo de cómo se puede utilizar un software de simulación efectivamente para tomar decisiones informadas de diseño. El centro consiste en residencias con laboratorios, salas de clases y salas de reunión. Todos los espacios públicos tienen una conexión visual al resto del campus. Desafortunadamente, debido a que su fachada tiene una orientación hacia el poniente, esta condición determinó algunas restricciones de diseño, para poder mantener la conexión al exterior.

Un estudio lumínico permitió analizar problemas potenciales graves de encandilamiento debido al ángulo bajo del sol. Un análisis de la luz natural en el pasillo principal permitió entregar estrategias apropiadas para controlar el encandilamiento y así crear un espacio más cómodo. Para esto, se investigaron distintas opciones (Figura 2), como la protección vertical y horizontal. Se utilizó el programa Radiance para llegar a una solución.

### Edificios certificados LEED

Realizado por estudiantes en 2017, este proyecto tuvo el desafío de analizar el criterio de encandilamiento del sistema de evaluación LEED. Los estudiantes evaluaron edificios que parecían estar cumpliendo con los criterios de LEED, pero donde, al mismo tiempo, existían quejas sobre el encandilamiento. El estudio usó una metodología mixta, que consistió en simulaciones y encuestas.

El edificio Jabs Hall, certificado por LEED, fue analizado en términos de su desempeño con la luz natural y el encandilamiento. Comparamos los resultados de los procedimientos que se hicieron para cumplir con los requerimientos, además de evaluaciones independientes de encandilamiento, utilizando simulaciones y encuestas de evaluación post-ocupación. En este caso, se concluyó que la simulación de luminancia de LEED no era suficiente para abordar el problema de encandilamiento, y recomendamos la introducción de una métrica de encandilamiento para los criterios del LEED en el proceso de evaluación de este.

**Figura 3**  
*Edificio Jabs Hall, MSU Campus, Montana, EEUU.*



Fuente: J. Mukhopadhyay

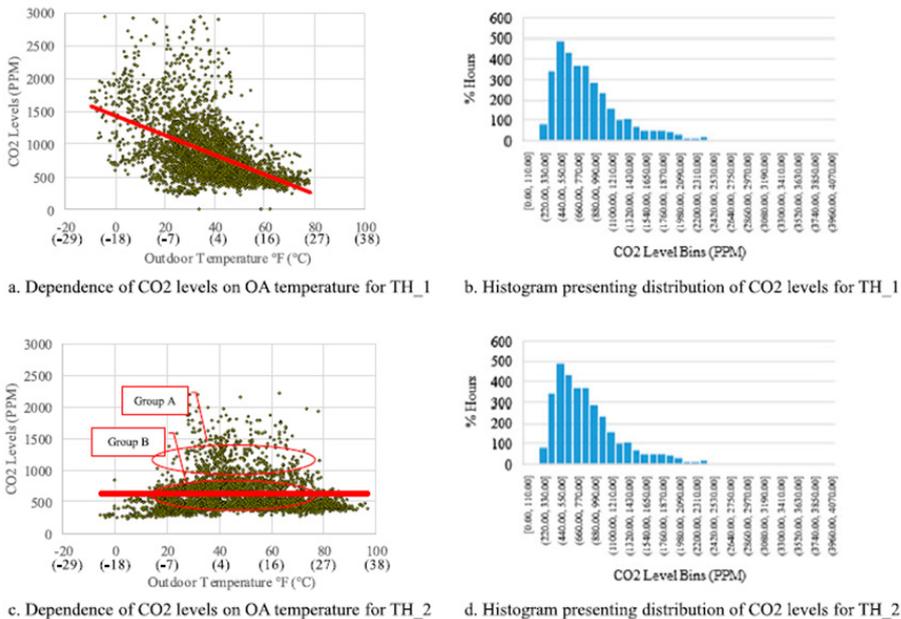
En este caso, también fue recomendable una asesoría obligatoria en encandilamiento. Con respecto al análisis, un cuestionario a los funcionarios de la facultad evaluó su satisfacción en relación con la luz natural y el encandilamiento, basándose en su ocupación durante los semestres de verano, otoño y primavera.

Un análisis point-in-time sobre el encandilamiento reportó que éste no era solo por la exposición al cielo del sur, sino también por paredes blancas y los muebles de las partes exteriores. Si bien esta evaluación es informativa, es de notar que los productos gráficos del sistema point-in-time no representan bien el rango de condiciones de encandilamiento anual en los espacios analizados.

### Tiny houses

El objeto de evaluación son edificios residenciales con un área de menos de 40 m<sup>2</sup>, las llamadas tiny houses, que se consideran un modelo potencial para viviendas accesibles que, además, podrían plantearse como una solución para los problemas de personas en situación de calle, a quienes se les podrían ofrecer estas casas como vivienda transicional. Este tipo de vivienda podría ahorrar mucho dinero en servicios, por ejemplo, de emergencia o de hospitalización, normalmente realizados por las autoridades locales.

**Figura 4**  
Representación de niveles de CO<sub>2</sub> de dos tiny houses monitoreadas.



Fuente: J. Mukhopadhyay

La escuela de arquitectura de la Montana State University está trabajando con el Consejo de Desarrollo de Recursos Humanos de Montana para proveer estas unidades a las personas en situación de calle del Estado. Ahora, con todo este entusiasmo sobre las ventajas sociales, el impacto en el medio ambiente no se ha validado científicamente, y pensando en el radio entre el área del suelo y el envolvente de estos edificios, existen desafíos únicos tanto en consumo de energía como en el impacto resultante en la calidad interior.

En una primera etapa, se desarrolló un plan de medidas para una tiny house fuera del campus para monitorear las temperaturas, la humedad y los niveles de CO<sub>2</sub>. Así, se realizó un plan similar para aquellas que se construyeron en el campus. El gráfico de la Figura 4 correlaciona los niveles de CO<sub>2</sub> con la temperatura exterior:

el eje X representa la temperatura exterior y, el eje Y, los niveles de CO<sub>2</sub>. Según ASHRAE, se recomienda que los niveles de CO<sub>2</sub> estén bajo los 1500 ppm como indicador que existe una ventilación apropiada del edificio.

En la primera casa, se observó que los niveles elevados aparecieron cuando las temperaturas bajaron, indicando que el sistema de ventilación era inadecuado. En la segunda casa, los niveles de CO<sub>2</sub> eran independientes de la temperatura exterior. Complementariamente,

**Figura 5**  
*Gallatin Hall.*



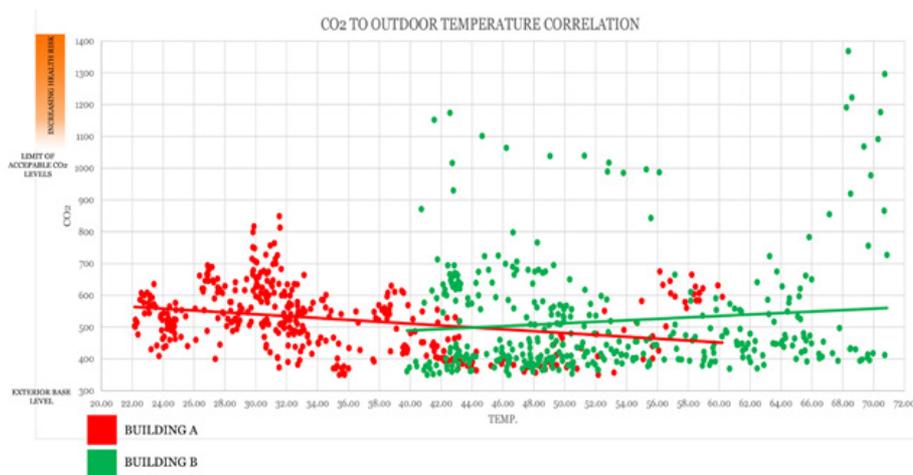
**Nota:** Uno de los edificios certificados LEED en el campus de la Universidad del Estado de Montana, EEUU. **Fuente:** J. Mukhopadhyay.

imágenes infrarrojas en ambas casas en noches de invierno revelaron condiciones de los puentes térmicos y la infiltración en las casas. Mediante esto se pudo identificar algunos problemas con la construcción que representaron mejoras posibles en las próximas reproducciones de estos edificios.

Consecuentemente, se otorgó recomendaciones para mejorar el diseño, la construcción y operación de las tiny houses que redujeran el consumo de energía y aseguraran una IEQ apropiada. Muchas de estas estrategias se adoptaron de los estándares de Passive House, entre ellas el uso de tecnologías de construcción que proveyeran aislación y mejorara las conexiones de aire, y la implementación de una ventilación pasiva para los problemas de sobrecalentamiento. También recomendamos minimizar el uso de ventanas, que estas no sobrepasaran el 10% de las paredes, e implementar de estrategias de enfriamiento pasivo en el verano.

**Figura 6**

Registro de niveles de CO<sub>2</sub> de dos edificios residenciales universitarios.



Fuente: J. Mukhopadhyay.

## Evaluación de edificios universitarios

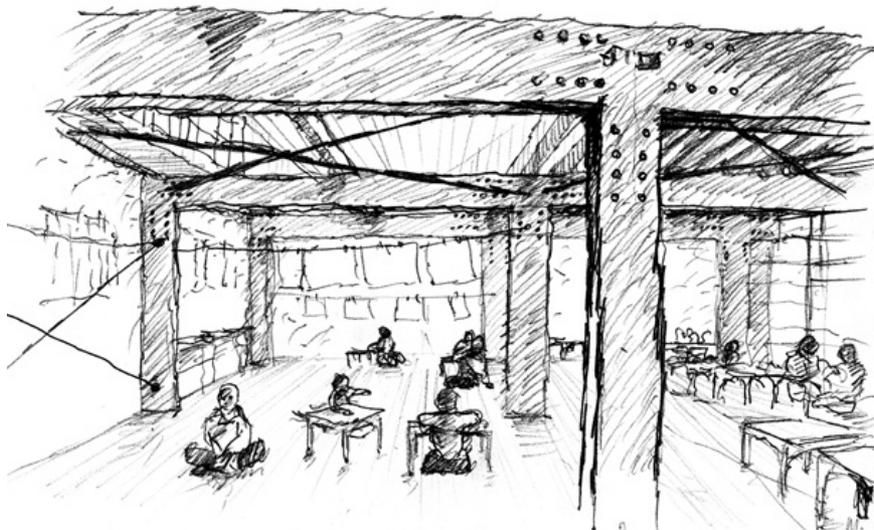
En este proyecto se monitoreó la IEQ y el consumo de energía dentro del objetivo de evaluar el desempeño de edificios verdes certificados por LEED (Figura 5). Con la participaron de estudiantes de ingeniería, quienes realizaron el estudio energético, y estudiantes de arquitectura, quienes hicieron el estudio de IEQ, el estudio usó protocolos de medida de desempeño desarrollados por ASHRAE.

El estudio mostró patrones respecto a los niveles de CO<sub>2</sub> en dos dormitorios que están ubicados en dos edificios. Como se ilustra en la Figura 6, el edificio A, con un sistema de ventilación forzada

para calefacción, mostró niveles de CO<sub>2</sub> que bajan a cierto punto y después se observan peaks. Se infirió que los ocupantes cierran las ventanas durante los periodos de temperaturas frías y que, durante los meses más cálidos, el sistema de ventilación forzada se apaga, lo cual causaría estos peaks en los niveles de CO<sub>2</sub>. Por su parte, el edificio B, no tiene un sistema de ventilación forzada, lo cual causó peaks en los niveles de CO<sub>2</sub> con cualquier temperatura exterior.

### Figura 7

Vista interior de la escuela Druk Padma Karpo.



Fuente: Rafael Moya basado en Druka White Lotus School (2010).

### Ejemplos (casos estudio) de estrategias de diseño pasivo

El desempeño del edificio no necesariamente requiere la incorporación de nuevas tecnologías o de alto grado de sofisticación. Muchas de las ideas y estrategias de diseño pasivo existen en arquitectura vernácula, que se han utilizado tradicionalmente para reducir el consumo de energía y mejorar la IEQ. Los tres proyectos a continuación están construidos en la India y los Estados Unidos, que aplican algunas de estas estrategias de diseño.

Escuela Druk Padma Karpo: es una escuela de energía cero localizada en Ladakh, India (Figura 7). Esta escuela está en una región ubicada aproximadamente 3.000 metros sobre el nivel del mar y está en el lado del gran Himalaya. Por lo tanto, el clima es árido, con intensa radiación solar, el cual es cálido y seco en el verano, y frío y seco en el invierno. Este es el mayor criterio que definió la selección de estrategias de diseño pasivo.

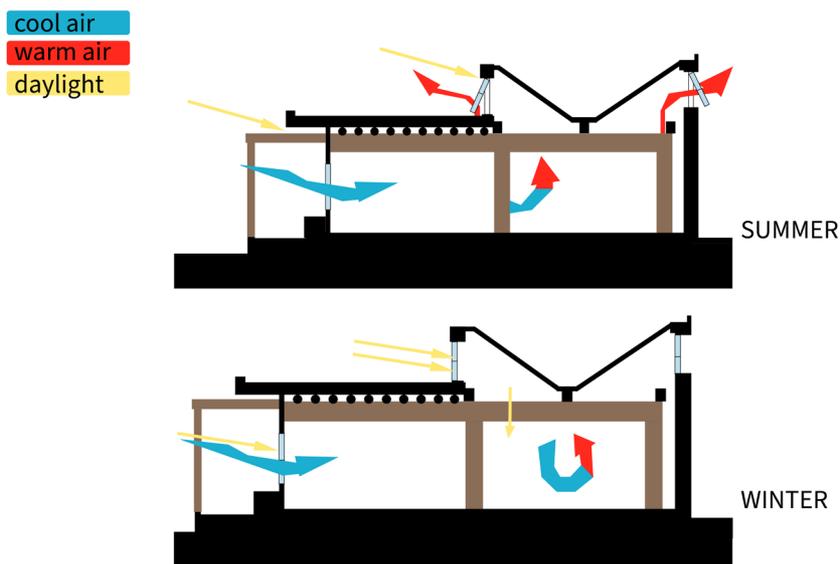
Esta es una escuela residencial, por lo tanto, hay estudiantes que pasan la noche en estos edificios. Un sistema de ganancia solar indirecto pasivo, conocido como muro trombe, fue empleado para

proveer calefacción a estos espacios. Estos muros enfrentan el sur (orientación al sol en el hemisferio norte), están envueltos con un material oscuro que absorbe calor y cubiertos con una doble capa de vidrio. Los muros se calientan durante el día y el vidrio atrapa el calor. Entonces, el calor se almacena en el muro y luego es conducido al interior en la noche.

Las actividades educativas ocurren durante la mañana, en espacios que tienen una orientación suroeste. El sistema de ganancia solar se implementó usando ventanas grandes que dan hacia el sur, lo que provoca que este espacio se caliente mucho más rápido durante la mañana. Las ventanas están cubiertas estratégicamente para evitar la entrada del sol de verano y para admitir la entrada del sol de invierno. Estas ventanas proveen una ventilación natural cruzada en las salas de clases y evitar que se sobrecaliente. Así, no solo se captura la luz solar pasivamente, sino que también se implementan estrategias para la ventilación natural cruzada, Figura 8.

**Figura 8**

*Diagrama de sistema de ventilación cruzada de Escuela Druk Padma Karpo.*



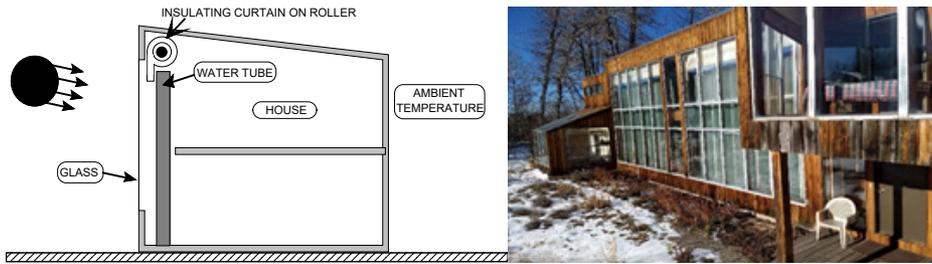
Fuente: Juliette Walsh.

Edificio Residencial, Bozeman, Montana: edificio residencial diseñado y construido por Charles y Marjorie Fowlkes en 1976. El objetivo en este edificio fue proveer calefacción utilizando energía renovable. El sol provee el 75% del calor de este espacio, y como antecedente, Bozeman es caluroso en verano y extremadamente frío en invierno, pudiendo llegar a 32°C en verano y luego en invierno a los -17°C.

No hay calefacción de aire forzado en esta casa, solo una pequeña estufa que da calor adicional. Para ello, la casa se diseñó con una fachada de vidrio que da hacia el sur (fachada con sol directo en hemisferio norte) y admite la luz solar durante días soleados. Se

**Figura 9**

Diagrama de sistema pasivo de calefacción e imagen de la Casa Fowlkes, Bozeman, Montana EEUU.



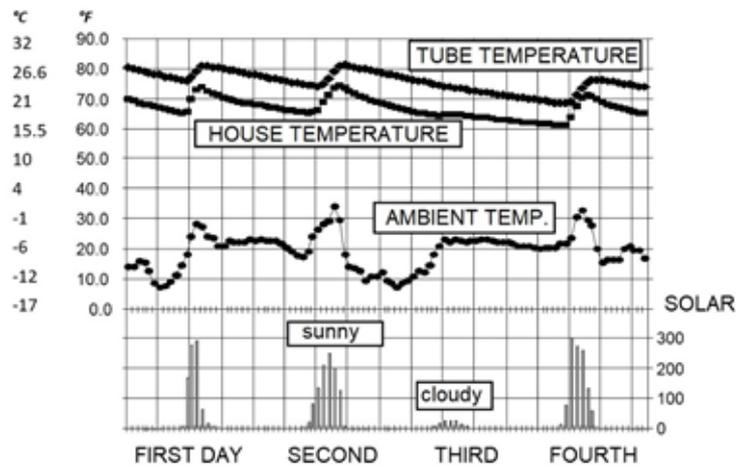
Fuente: Marjorie y Charless Fowlkes.

instalaron tubos con agua, la cual almacena algo de esta energía térmica. Un termostato cierra la cortina de aislamiento en la noche, y durante días nublados en invierno. Esta cortina se mantiene abierta en verano, por lo que la casa se mantiene estratégicamente protegida del sol y el sobrecalentamiento no es un problema en verano, porque el sol está alto.

La Figura 10, describe el desempeño del edificio durante una medición de 4 días sin ocupantes y su correspondiente registro de radiación solar, temperatura exterior e interior. Se pueden comparar la radiación solar y la temperatura exterior, la temperatura del aire interior, y la de los tubos de agua. Las temperaturas medidas demostraron que el sistema de la pared de agua logra mantener temperaturas agradables dentro de la casa. Esto indica la efectividad de este sistema de agua en Bozeman, (Figura 10).

**Figura 10**

Registro de temperaturas para cuatro días (sin ocupantes) con diferentes condiciones climáticas.



Fuente: Marjorie y Charless Fowlkes.

## Parque Nacional Zion, Utah, Estados Unidos

Este edificio hace uso de la estrategia del muro trombe. En el verano, se produce encandilamiento sobre el muro trombe que está estratégicamente diseñado, de modo de tapar el sol de verano y entregar sombra al muro trombe. Durante el invierno, el sol está en un ángulo bajo que llega a la pared que está detrás del vidrio. Esta pared se calienta, el vidrio atrapa el calor, y luego el muro irradia el calor almacenado hacia el espacio adyacente. También hay ventilación en la parte inferior del muro, el aire caliente en la cavidad entre la pared y el vidrio sube y va los espacios adyacentes, y luego, a través de esta ventilación inferior, tenemos aire frío. A medida que entra a este espacio entre el vidrio y la pared, el aire comienza a calentarse, sube y entra.

## PALABRAS FINALES

El compromiso de Chile con la carbono-neutralidad se ha visto reflejado en la ratificación del país en acuerdos internacionales y en el anuncio de planes de descarbonización del sector eléctrico para lograr la neutralidad de carbono para el año 2050. Para lograrlo, la eficiencia energética es fundamental. Asimismo, los edificios consumen aproximadamente el 22% de toda la energía del país (Ministerio de Energía, 2022).

Por esta razón, incorporar eficiencia energética en el diseño de los edificios es importante, pero sin perder de vista que los ocupantes de las edificaciones se mantengan cómodos, saludables y productivos para asegurar que tanto la eficiencia energética como la IEQ sean considerados. En todo esto, la BPE es un factor clave que siempre se debe tener en cuenta.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Druka White Lotus School. (2010). *Project. Solarpedia*. [http://www.solaripedia.com/13/280/3066/druk\\_white\\_lotus\\_school\\_composting\\_latrines.html](http://www.solaripedia.com/13/280/3066/druk_white_lotus_school_composting_latrines.html)

Ministerio de Energía (2022). *Plan Nacional de Eficiencia Energética 2022-2026*.

Passive House California. (2022). EpiPHany Corner: The Logic of the MacLeamy Curve. *Passive House California*. <https://passivehousecal.org/epiphany-corner-the-logic-of-the-macleamy-curve>

Charles Fowlkes. (2021). Comunicaciones via correo electronico.