

Procedimiento para análisis del desempeño termoenergético y económico de estrategias pasivas para la adaptación de un edificio en Brasil

Procedure for analysis of thermo-energetic and economic performance of passive strategies for retrofitting a building in Brazil

L. Oliveira Fernandes ^{1*}, L. Chebel Labaki ^{**}, C. Matheus ^{**}, E. Lantelme ^{*}

* IMED, Passo Fundo. BRAZIL

** State University of Campinas UNICAMP, Campinas. BRAZIL

Fecha de Recepción: 06/03/2018

Fecha de Aceptación: 11/05/2018

PAG 251-262

Abstract

The construction sector is responsible for high levels of energy consumption and for environmental impacts during the life cycle of a building all over the world. Therefore, sustainability has become an inherent topic in building design, in response to the stringency of natural resources and to performance. A way to design sustainable buildings is taking advantage of the available natural resources on site to reduce the needs for artificial conditioning. Requirements of performance have become more restrictive and existing buildings must conform to them. This is possible through a retrofit process which improves their performance to comply with actual requirements, besides improving the comfort of their occupants. Most of the developed procedures for retrofitting analysis take into account only energy consumption and emission of pollutants. The aim of this paper is to demonstrate a procedure to help designers and decision makers on choosing the best retrofit strategy considering energy consumption, thermal comfort and the cost-benefit of these strategies. A computational model of a building located at the State University of Campinas was developed to simulate different passive strategies and the results obtained are presented in an easy-to-use chart as part of the procedure.

Keywords: Retrofit, passive strategies, computer simulation, energy efficiency, thermal comfort

Resumen

El sector de la construcción es responsable de altos niveles de consumo energético y de impactos ambientales durante el ciclo de vida de un edificio. La construcción sustentable se ha convertido en un tema inherente, teniendo en cuenta la poca disponibilidad de recursos naturales y a las regulaciones de desempeño. Una forma de proyectar edificios sustentables es el uso adecuado de los recursos naturales disponibles. Los requisitos de desempeño son restrictivos y los edificios existentes deben ajustarse a ellos. Esto es posible a través de un proceso de adaptación que mejora su rendimiento para cumplir con los requisitos reales, además de mejorar la comodidad de sus ocupantes. La mayoría de los procedimientos desarrollados para el análisis de adaptación tienen en cuenta únicamente el consumo de energía y la emisión de contaminantes. El objetivo de este documento es demostrar un procedimiento para ayudar en la elección de la mejor estrategia de retrofit considerando consumo de energía, comodidad térmica y costo-beneficio. Fue desarrollado un modelo computacional de un edificio ubicado en la Universidad Estatal de Campinas para simular diferentes estrategias pasivas. Los resultados obtenidos son presentados gráficamente y utilizados en el procedimiento.

Palabras clave: Retrofit, estrategias pasivas, simulación por computador, eficiencia energética, confort térmico

1. Introducción

El alto consumo de energía en el uso de edificios es uno de los mayores problemas del sector energético y posee un impacto ambiental significativo (Jiménez et al., 2011). Los edificios son responsables de casi un 50 % de la demanda energética de Brasil (Información de Procel, 2006) y de un 40 % en Europa (Comisión Europea, 2010). Con frecuencia, el material utilizado en el revestimiento, la poca ventilación o el diseño de iluminación natural hacen que sea necesario el uso de sistemas artificiales incluso cuando las condiciones no

son extremas. Desde la crisis energética global en los años 70, se han implementado los requerimientos de rendimiento para edificios residenciales y de oficinas. Para cumplir con estos requerimientos, se han desarrollado componentes y materiales de construcción así como también nuevas herramientas para ayudar a los arquitectos e ingenieros a diseñar y predecir el rendimiento de los edificios.

Para cumplir con los requerimientos actuales de desempeño, los edificios existentes pueden someterse a un proceso de retrofit (adaptación). Dentro de este contexto se puede ver el resurgimiento de las estrategias pasivas para acondicionar los edificios. Lamentablemente, aún hay falta de conocimiento sobre cómo utilizarlas y no hay datos de entrada conocidos para las herramientas de simulación por computadora para evaluar su rendimiento. Otro tema importante es qué parámetros de rendimiento se evalúan. La

¹ Autor de correspondencia:

Department of Civil Engineering, IMED, Faculdade Meridional, Passo Fundo, Brazil.

E-mail: Luciana.fernandes@imed.edu.br



mayoría de las normas de rendimiento se enfocan en el consumo de energía y la calidad de aire. Los requerimientos de confort ambiental no son tan específicos ni restrictivos.

Además de los criterios de rendimiento, la selección de una tecnología adecuada debería considerar otras variables junto con el proceso de toma de decisiones y según Asadi et al. (2014), la identificación de las acciones de retrofit representa desafíos tecnológicos y metodológicos. En cuanto al rendimiento de la construcción, no solo es importante evaluar los costos iniciales de la implementación del sistema, sino que también el costo de la operación, como el consumo de energía y el mantenimiento preventivo.

El objetivo de este documento es presentar un procedimiento simplificado para el proceso de toma de decisiones para la adaptación de edificios. El procedimiento considera tres parámetros: el confort térmico, el consumo de energía y los costos. Para ejemplificar su aplicación se estudiaron tres estrategias pasivas por simulación por computadora: techo verde, ventilación natural (ventilación diurna) y uso de la iluminación natural.

2. Marco teórico

2.1 La función de los techos verdes en los edificios

En climas de países tropicales, la necesidad de mitigar el calor es enorme, especialmente en los meses de verano y en esta área la vegetación funciona especialmente bien. Los techos verdes proporcionan protección contra la radiación solar, que es el factor principal para la refrigeración pasiva (Efthimiadou y Tzouvadakis, 2010).

El uso de la vegetación como una tecnología de acondicionamiento ambiental pasivo ha ido ganando cada vez más importancia en el ambiente urbano, dadas sus funciones multifacéticas. Estudios recientes muestran el potencial para una reducción significativa de las necesidades energéticas de calefacción y refrigeración proporcionada por los techos verdes (Cannata et al., 2018). De esta forma, es posible lograr varias funciones normativas mediante una sola tecnología, que involucra problemas tales como inundaciones urbanas, calidad del aire, islas de calor e incluso un alto nivel de estrés (Givoni, 1991; McPherson, et al., 1997; Nowak, 2006).

Recientemente se ha estudiado el efecto de las áreas con vegetación en la temperatura de las zonas urbanas (Susca et al., 2011). Debido a los beneficios de sistemas de vegetación a escala urbana, se han desarrollado políticas mundiales con el fin de animar a los propietarios de edificios a instalar techos verdes. Se pueden encontrar ejemplos de estas iniciativas en Alemania, Canadá, EE.UU. y Japón (Townshend y Duggie, 2007). Además, según Wong et al. (2003), una vegetación ubicada estratégicamente en los techos y las paredes puede considerarse como un complemento de las superficies verdes en zonas urbanas.

No obstante, la inserción de vegetación en zonas urbanas no siempre es una tarea simple, ya que la alta demanda de uso del suelo tiende a relegarla a un segundo plano. Es debido a esta limitación que en la actualidad existen muchas investigaciones que buscan nuevas formas de incorporar la vegetación en las ciudades, evaluando su eficacia (Perini y Magliocco, 2012).

2.2 Ventilación natural para confort térmico y eficiencia energética

Diseñar un edificio tiene el desafío doble de proporcionar un buen rendimiento de ventilación así como también conservación de energía. Una forma de reducir el consumo de energía en los edificios, sin afectar el confort térmico, puede lograrse mediante el diseño de un sistema de ventilación apropiado (Chiesa et al., 2010). Esto puede proporcionar calidad del aire en interiores, confort térmico y una menor demanda de energía para refrigeración.

Investigadores de todo el mundo han demostrado que la ventilación en edificios es una estrategia pasiva eficaz para el control térmico y el ahorro de energía (Campaniço et al., 2014; Yu et al., 2015; Tong et al., 2016). Según la zonificación bioclimática brasileña (ABNT, 2008), se recomienda utilizar la ventilación natural para refrigeración en siete de las ocho zonas. Esta norma se aplica a edificios residenciales, aunque estudios demostraron el potencial de la estrategia para enfriar y reducir el consumo de energía en edificios de oficinas (Rupp y Ghisi, 2013).

Las fuerzas motrices para que el aire fluya a través de las aberturas de la fachada son la diferencia de temperatura entre el interior y el exterior y las distribuciones de la presión del viento sobre la fachada debido a los vientos locales. Por lo tanto, el éxito de esta estrategia también recae en las propiedades del edificio y su ubicación (obstrucciones de los edificios circundantes, geometría, permeabilidad, tamaño y ubicación de las aberturas).

2.3 Iluminación natural con reguladores de luz y persianas automáticas

La iluminación natural en edificios proporciona eficiencia energética al reducir la demanda de luz artificial además de permitir el confort visual de sus ocupantes (Alrubaih et al., 2013). Tiene un efecto positivo en la salud de los usuarios y su productividad (Boyce et al., 2003). Por ello, se recomienda que el diseño del edificio permita un número mínimo de horas de acceso a luz solar (Santamouris, 2001). Por otro lado, esta es una estrategia que se debe manejar con cuidado especialmente en climas tropicales, ya que la captación solar puede ser excesiva y puede necesitar ser eliminada por medios artificiales (Carlo et al., 2004).

Los controles automáticos para iluminación y persianas han mostrado buenos resultados en la reducción del consumo de energía con iluminación. Sin embargo, el comportamiento de los ocupantes es determinante para el rendimiento del edificio. (Sanati y Utzinger, 2013). El comportamiento de los ocupantes, las condiciones de la iluminación natural durante un año y su interacción con superficies interiores son variables esenciales para el diseño de la iluminación natural y en la actualidad estas variables pueden estimarse por medio de la simulación por computadora. Un algoritmo desarrollado por Reinhart (2004) basado en estudios de campo puede predecir el comportamiento de los ocupantes en edificios de oficinas y su interacción con los sistemas de iluminación y persianas. El algoritmo está incorporado a Daysim (Reinhart, 2017), un software que estima la cantidad anual de iluminación natural disponible para una ubicación determinada que fue utilizada en este documento.

2.4 Proceso de selección de tecnología

En el proceso de toma de decisiones, que involucra la selección o adopción de una tecnología, una de las preguntas

principales es cómo escoger la mejor alternativa. Para responder esta pregunta, se ha desarrollado un sinnúmero de métodos para ayudar a los responsables de la toma de decisiones durante este proceso. Con el paso del tiempo, se han propuesto muchos métodos diferentes. Estos métodos se basan en modelos matemáticos con diferentes niveles de complejidad que varían según el número de variables consideradas, los métodos matemáticos utilizados y el número de actores involucrados en el proceso de toma de decisiones.

En esta investigación, la idea es desarrollar un procedimiento simple que pueda ayudar a los diseñadores en el análisis de alternativas para la adaptación de edificios, que incluye un conjunto de parámetros limitados pero representativos: horas de incomodidad, consumo de energía y costo. Se analizaron tres métodos diferentes para definir el método más adecuado a utilizar: análisis costo-beneficio; análisis de costos del ciclo de vida y análisis de decisiones con criterios múltiples.

Análisis costo-beneficio: según Adler y Posner (1999), es una técnica que sopesa y compara los costos y los beneficios de las alternativas. Puede variar de una ponderación informal de los pros y contras descritos cualitativamente hasta un método altamente sofisticado que utiliza matemáticas y está basado en teoría económica. Consiste en determinar la viabilidad de un proyecto al descontar beneficios futuros y costos para presentar valor, siendo la mayor dificultad la estimación precisa de los costos y los beneficios y las tasas de descuento.

Análisis de costos del ciclo de vida: es un método que permite la evaluación de diferentes alternativas que consideran todos los costos a largo plazo involucrados en el ciclo de vida de un proyecto, es decir, costo de adquisición, operación, mantenimiento y reparación (Guinée et al., 2010).

Análisis de decisiones con criterios múltiples: es un método que se utiliza para ayudar a tomar una decisión entre alternativas que involucran un gran número de parámetros cuantitativos y cualitativos, técnicos y económicos, complejos y contradictorios. Además es adecuado cuando existe un gran número de alternativas que considerar durante el proceso de toma de decisiones. Hay un gran número de métodos de análisis de decisiones con criterios múltiples

propuestos en la literatura. Según Jato-Espino et al. (2014), el método AHP (del inglés Analytic Hierarchic Process, proceso jerárquico analítico) es el más utilizado en la industria de la construcción. Estos métodos incluyen procedimientos matemáticos avanzados y requieren la asistencia de un especialista o de sistemas basados en conocimiento para su aplicación (Jato-Espino et al., 2014).

El análisis costo-beneficio fue escogido como base del análisis presentado en esta investigación debido a su simplicidad y considerando que se analizó un número reducido de parámetros y estrategias pasivas para la adaptación del edificio. En el lado de los costos de la ecuación, se consideraron los costos de implementación y mantenimiento y el lado de los beneficios fue representado por la economía de la energía y el confort térmico proporcionado, utilizando la simulación por computadora.

3. Método de investigación

El propósito de este estudio es presentar un nuevo procedimiento para ayudar a los responsables de la toma de decisiones a escoger la mejor solución de retrofit. Los parámetros a elegir son: confort térmico (horas de incomodidad durante la estación de verano), costos (implementación y mantenimiento de la tecnología) y el consumo de energía anual total. Las soluciones aquí presentadas están clasificadas como estrategias pasivas, a saber: ventilación natural, iluminación natural y techo verde. Los autores enfatizan que el enfoque del documento no es demostrar la efectividad de las estrategias pasivas, sino que el propio procedimiento para comparar su rendimiento en un sentido más amplio.

Para fundamentar este estudio, se investigó un edificio existente: el edificio del Instituto de Filosofía y Humanidades (IFCH) del campus de la Universidad de Campinas (Figura 1). Es un edificio de tres pisos que presenta principalmente funciones académicas y administrativas. Está rodeado de árboles en las fachadas sudoeste y noreste. Su fachada presenta franjas verticales intercaladas de paredes ciegas y ventanas con elementos de sombreado exterior.



Figura 1. Entrada del edificio (sudoeste) (a) y detalle de la fachada (b)

La ciudad de Campinas está ubicada al sudeste de Brasil y en el verano tiene un promedio de temperaturas que superan los 30 °C y altos niveles de humedad relativa durante todo el año (Figura 2). Dentro de las estrategias de diseño para esta ubicación se incluye: ventilación natural durante el verano, radiación solar durante el invierno y un valor U para el techo menor o igual a 2 W/m².K.

Para las simulaciones, las estrategias fueron aplicadas en seis habitaciones representativas que fueron distribuidas como se detalla a continuación: dos en cada piso y

preferentemente orientadas en direcciones opuestas (noreste y sudoeste). En la Figura 3 se ilustra la ubicación de las habitaciones en el tercer piso: 23A y 21B (salas de investigadores). En el primer piso se escogieron: la secretaría, donde se desarrollan las actividades administrativas, y la sala de impresión, una muy específica, con equipos para imprimir. En el segundo piso, las habitaciones 11A y 14B son salas de clases y en el tercer piso las habitaciones 23A y 21B son utilizadas por grupos de investigación.

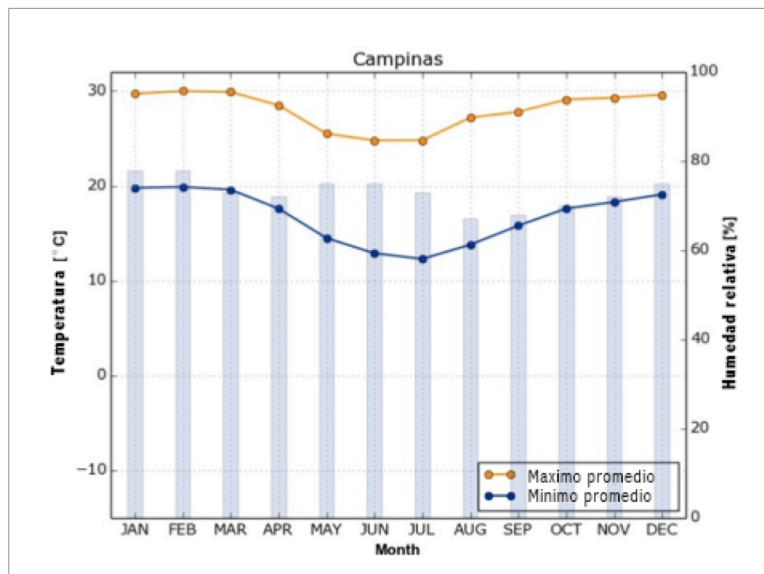


Figura 2. Perfil meteorológico de Campinas. Fuente: CEPAGRI (2017)

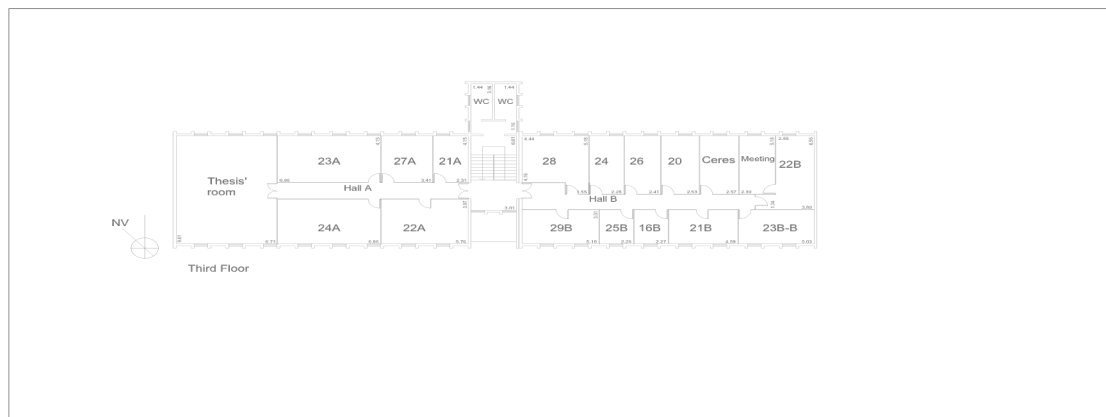


Figura 3. Plano del tercer piso

3.1 Modelado del caso base

El edificio fue modelado utilizando los software EnergyPlus (DOE, 2017) y su plug-in para SketchUp (Sketchup, 2017): "Legacy OpenStudio" (GitHub, 2017). Se le denominará caso base o modelo de referencia (Figura 4). En la Tabla 1 se describe las propiedades térmicas del edificio y los datos de entrada principales. Un sistema de aire

acondicionado hipotético fue modelado para todas las zonas para simplificar la simulación. El sistema Ideal Loads Air System (Sistema de Cargas Ideales de Aire) fue modelado para proporcionar refrigeración en las zonas para cumplir con sus cargas sin consumir energía. Luego, el consumo de energía se calculó sobre la base de la refrigeración urbana y un coeficiente de rendimiento de 3 W/W. En la Tabla 2 se

SPANISH VERSION.....

describe las cargas internas modeladas para las habitaciones representativas. La elección del nivel de actividad de las personas según ASHRAE (2009) se basó en las actividades reales desarrolladas en las habitaciones. Las cargas de los equipos y de la iluminación fueron recolectadas en el lugar.

A partir de este modelo de referencia, se desarrollaron y simularon más modelos con las estrategias pasivas. Esas estrategias fueron escogidas sobre la base de las estrategias de

diseño recomendadas para la ubicación y de los posibles ahorros de energía presentados por el edificio, tal como se presenta en la primera sección de los resultados. En las siguientes secciones se describe información detallada sobre las estrategias. Cada modelo fue simulado por un periodo de un año con el archivo meteorológico de la ciudad de Campinas (Roriz, 2017) desde el año 2002.



Figura 4. Perspectiva del modelo del edificio en SketchUp

Tabla 1. Propiedades del modelo de referencia

Propiedades térmicas		
	Descripción	Valor U (W/m ² .K)
Techo	Losa de hormigón, capa de aire y Teja ondulada de fibrocemento	1,15
Paredes internas	Madera terciada.	1,69
Piso	Losa de hormigón, yeso y baldosas de cerámica.	2,12
Paredes externas	Bloques de cerámica	2,45
Árboles	Elementos de sombreado que rodean el edificio con una transmitancia del 20 %.	
Ventana	Vidrio simple de 4 mm	SHGC*=0,825
	Relación entre ventanas y paredes: 17,73 %	
Sistema de refrigeración		
Tipo	Cargas ideales	
Temperatura nominal	25°C	
Control de la humedad relativa	50 %	
COP	3 W/W	
Área acondicionada del edificio	35 %	

* Coeficiente de ganancia de calor solar

Tabla 2. Cargas internas de las seis habitaciones representativas

Piso	Habitación	Cargas internas		
		Personas	Equipos	Luces
1er	Secretaría	08 (130W/persona)	855W	768W
	Impresión	02 (235W/persona)	1610W	1488W
2do	11A	22 (95W/persona)	-	256W
	14B	29 (95W/persona)	-	320W
3er	23A	01 (130W/persona)	165W	384W
	21B	02 (130W/persona)	36W	128W

3.2 Modelado del techo verde

El techo del edificio real está hecho de losa de hormigón, una capa de aire y teja ondulada de fibrocemento. El techo verde fue modelado directamente en la losa de

hormigón. En la Tabla 3 se describe sus capas y propiedades. Se utilizó el objeto "Material:RoofVegetation" para representar la vegetación y la capa de suelo.

Tabla 3. Descripción de las capas del techo verde (desde la capa externa hasta la capa interna)

Capas	Espesor (m)	Conductividad térmica (W/m.K)	Densidad (kg/m ³)	Calor específico (J/kg.K)
Capa externa				
Capa de vegetación	Altura = 1,0 m	-	-	-
Suelo	0,08 m	-	-	-
Drenaje	0,06 m	0,08	800	920
Impermeable	0,007 m	0,17	1200	920
Losa de hormigón	0,20 m	1,75	2500	1000
Capa interna				

3.3 Modelado de la ventilación natural

Se simuló la ventilación natural utilizando el módulo AirflowNetwork de EnergyPlus. Este módulo no ejecuta la ventilación natural simultáneamente con los cálculos del Ideal Loads Air System (como se observó que sucedía en el edificio real). Por lo tanto, la ventilación natural se simuló por primera vez durante la ocupación con el módulo AirflowNetwork, lo que dio como resultado un esquema de tasas de infiltración por hora. En una segunda etapa, este esquema de infiltración se utilizó como una entrada para el objeto "ZoneInfiltration:DesignFlowRate" y la simulación fue ejecutada nuevamente para calcular las cargas de refrigeración de las habitaciones.

La única intervención que habría que realizar en el edificio real, en este caso, sería abrir las ventanas existentes durante el día, mientras el sistema de aire está apagado. Las ventanas son de 1,8m² con vidrios fijos y cristales giratorios horizontales. El factor de abertura para la ventilación natural es de un 12 % y se asumió un coeficiente de descarga de 0,61.

3.4 Modelado de la iluminación natural

Se simuló la estrategia de la iluminación natural con el software Daysim. A partir de datos de entrada como: geometría, propiedades materiales de las superficies, requerimientos del sistema, perfil de ocupación y ubicación (archivo meteorológico) el programa estima la cantidad de iluminación natural disponible durante un año en una habitación. El resultado de esta simulación se utiliza como entrada en EnergyPlus para simular el consumo de energía con la iluminación y las cargas internas. En la Tabla 4 se presenta los datos de entrada para la simulación de iluminación natural. Para el retrofit de iluminación natural sería necesario cambiar las persianas actuales por unas automáticas, instalar reguladores de intensidad en las luminarias existentes y sensores de presencia.

Se aplicaron las estrategias de iluminación natural y de ventilación natural a las seis habitaciones representativas. Juntas, estas representan el 16 % del área total del edificio. El análisis del confort térmico de cada estrategia considera estas habitaciones en el periodo de verano (de enero a marzo). El análisis de costos y consumo de energía aplica a toda la instalación (Tabla 5).

Tabla 4. Datos de entrada para la simulación de luz diurna

Configuración del sistema	
Iluminación	Luminosidad necesaria en el plano de trabajo: 500 lux
Persianas	Abajo cuando la luz solar directa en el plano de trabajo es superior a 50W/m ² para evitar el resplandor, permitiendo un 25 % de iluminación difusa.
Perfil de ocupación	
Los usuarios operan el sistema eléctrico de iluminación y las persianas para evitar la luz solar directa en el plano de trabajo.	

Tabla 5. Aplicación de estrategias y evaluación de resultados

Modelo	Aplicación de la estrategia	Evaluación de		
		Consumo de energía	Confort térmico	Costos
Techo verde	Techo	Todo el edificio	Seis habitaciones	Todo el edificio
Iluminación natural	Seis habitaciones			
Ventilación natural	Seis habitaciones			

4. Resultados y análisis

El presente procedimiento propuesto considera las horas de incomodidad en el verano, los costos (implementación y mantenimiento de las estrategias) y el consumo de energía. De esta manera, se presentarán los resultados de confort térmico y consumo de energía obtenidos de la simulación de los modelos, seguidos por una tabla de costos por implementación y mantenimiento y una descripción general del procedimiento, teniendo en cuenta que el objetivo de este documento no es analizar el

rendimiento de las estrategias en detalle sino que compararlas entre sí.

Un análisis previo del uso final del caso de referencia muestra que el edificio tiene el potencial de reducir el consumo de energía con refrigeración (35 % del área del edificio está acondicionada) y las cargas de iluminación que corresponden a un 53 % y 25 %, respectivamente, del consumo total de energía (Figura 5). Las intervenciones escogidas están relacionadas con estas categorías, por lo tanto tienen el potencial de reducir el consumo de energía del edificio. El resumen del consumo de energía anual total resultante de los modelos se presenta en la Figura 6.

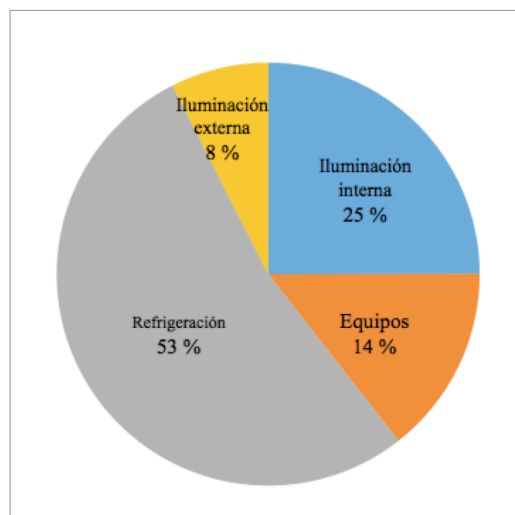


Figura 5. Uso final de energía del caso base

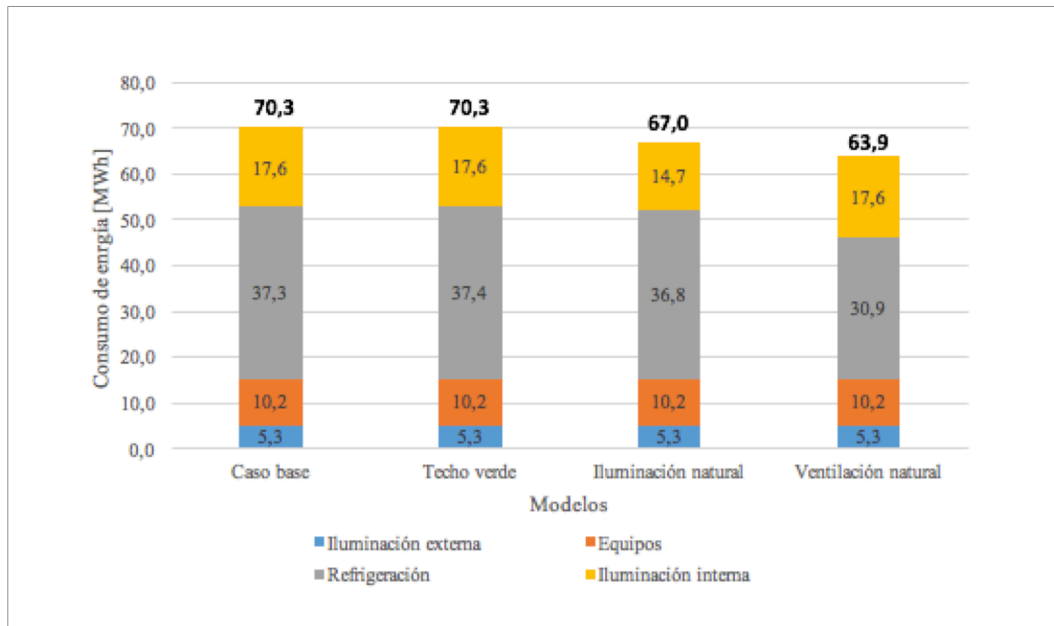


Figura 6. Consumo de energía anual total de los modelos

La iluminación natural y la ventilación natural fueron más beneficiosos desde el punto de vista del consumo de energía: reducción del 5 % y 9 % en el consumo anual, respectivamente. La disminución de las cargas de refrigeración con ventilación natural (17 %) muestra que esta estrategia fue la más beneficiosa proporcionando el consumo de energía más bajo entre los casos. El impacto del techo verde no fue significativo en el consumo de energía total. Solo el tercer piso (que representa solo el 14 % del consumo

de energía anual total de la carga de refrigeración sensible del edificio) obtiene más beneficios de este (reducción del 15 % en las cargas de refrigeración) como se muestra en la Figura 7.

Se analizó la incomodidad térmica de los meses de verano: enero, febrero y marzo, en los días que las habitaciones seleccionadas fueron ocupadas. En la Figura 8 se presenta una descripción general del rendimiento térmico de las estrategias.

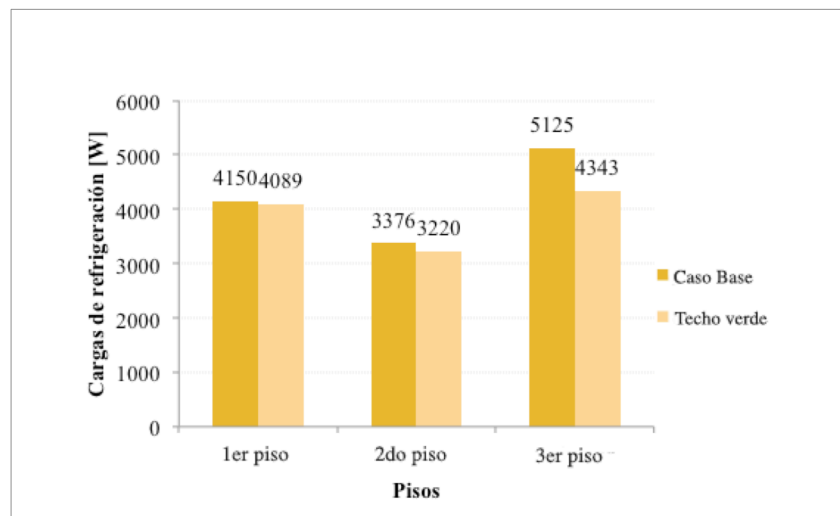


Figura 7. Cargas de refrigeración anuales estimadas para cada piso del caso base y el modelo de techo verde

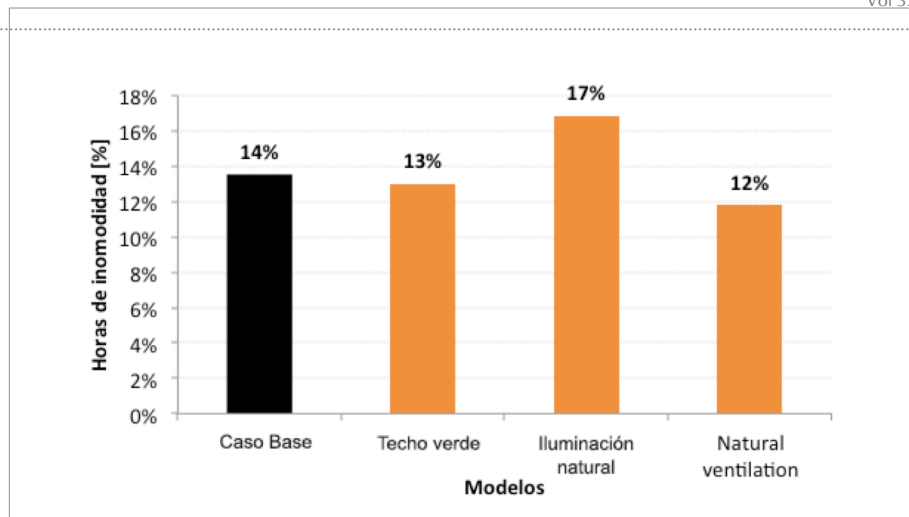


Figura 8. Porcentaje de horas de incomodidad en verano para los modelos simulados

Para la estimación de costos de las estrategias, se consideró la instalación y el mantenimiento (por un periodo de 50 años) que se basó en valores reales obtenidos de los fabricantes. En la Tabla 6 se presenta información detallada acerca de los valores estimados.

Tabla 7 y en un gráfico fácil de usar (Figura 9) que tiene el propósito de que incluso aquellos que no están familiarizados con técnicas avanzadas de análisis de datos sean capaces de leer los resultados. Este gráfico de "radar" permite que se agreguen más variables. La Figura 10 es una descripción general del procedimiento propuesto.

Tabla 6. Estimación de costos

Descripción	Costo (US\$)
Techo verde	
Instalación: 367 m ² de techo verde (techo completo). Incluye una capa impermeable, una capa de drenaje, sustrato y pasto.	9.000
Mantenimiento: sacar malezas cada 3 meses y fertilizar orgánicamente el pasto cada 6 meses.	30.000
Total	39.000
Iluminación natural	
Instalación: reguladores de intensidad, sensores y sistema automático para las persianas de las seis habitaciones seleccionadas.	5.000
Mantenimiento: 1 visita anual	11.000
Total	16.000
Ventilación natural	
No necesita intervenciones	0.000
Total	0.000

Tabla 7. Descripción general de los resultados

Modelo	Consumo de energía [GWh] en 50 años	Horas de incomodidad en el verano [%]	Costo de implementación y mantenimiento [\$] en 50 años
Caso base	3,5	14	0.000
Techo verde	3,5	13	39.000
Iluminación natural	3,4	17	16.000
Ventilación natural	3,2	12	0.000



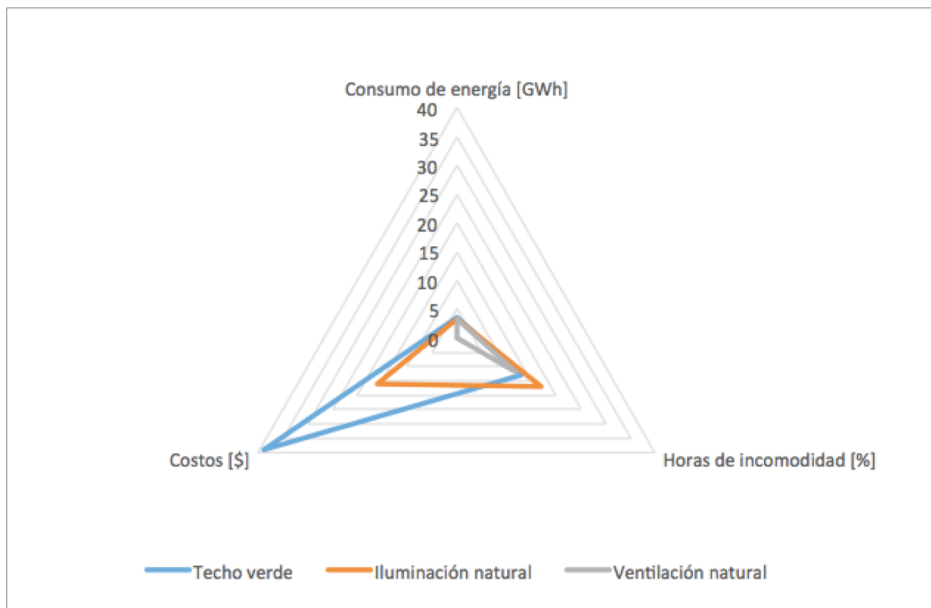


Figura 9. Gráfico que resume el análisis del rendimiento de las estrategias estudiadas

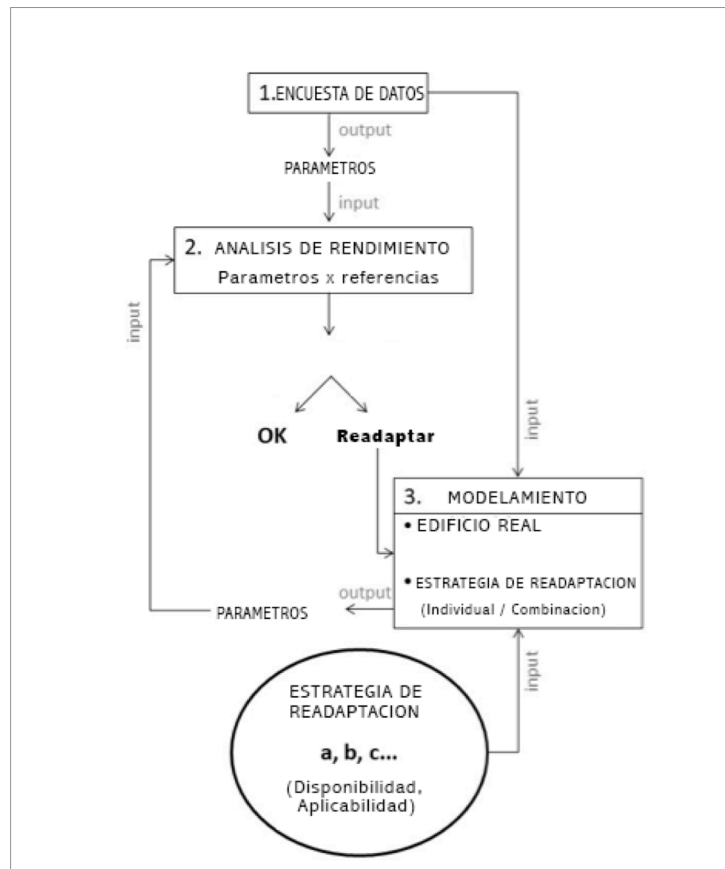


Figura 10. Diagrama del procedimiento para evaluar estrategias de retrofit

El procedimiento desarrollado comienza con una encuesta de datos para recopilar parámetros para la comparación de requerimientos además de la identificación de posibles ahorros de energía en el edificio. Algunos ejemplos de parámetros son: temperatura de bulbo seco, porcentaje de humedad, demanda o consumo de energía, etc. Si los datos recopilados no cumplen con los requerimientos (por ejemplo, horas de incomodidad, demanda energética contratada, normas de rendimiento térmico) comienza la fase de planificación de retrofit.

Este procedimiento se basa en el modelado del edificio real como caso de referencia en que se pueden aplicar las opciones de estrategias de retrofit. Estas estrategias de retrofit se pueden escoger según su disponibilidad, aplicabilidad u otros criterios. Los resultados de la simulación de las estrategias deben contener los mismos parámetros recolectados durante la encuesta de datos por razones comparativas. Considerando que los parámetros tienen el mismo grado de importancia en el proceso de decisiones, estos serán comparados con los requerimientos de interés utilizando el gráfico de radar. Mientras más pequeña sea el área, mejor será la solución.

El objetivo de este procedimiento es ayudar a los responsables de la toma de decisiones a optimizar el rendimiento de un edificio minimizando las funciones objetivas que en este caso fueron: consumo de energía, incomodidad en el verano y costo, otorgándoles la misma importancia. En este caso en particular, la ventilación natural fue la mejor solución. A pesar de que la incomodidad en el verano es un poco más alta que en el caso del techo verde, esta solución sería mucho más barata.

5. Conclusiones

Las normas de rendimiento exigen diferentes estrategias de intervención cuando se adaptan edificios. Se necesita un procedimiento simplificado para ayudar a los diseñadores y a los responsables de la toma de decisiones a escoger las acciones de retrofit. Este documento propuso un procedimiento en que el consumo de energía, el confort térmico y los costos de implementación y mantenimiento tienen la misma importancia y fueron analizados en conjunto. El estudio se basó en un edificio existente a partir del cual se desarrolló un modelo por computadora como caso base para investigaciones futuras de estrategias pasivas de acondicionamiento.

Aquí se enfatiza que el propósito del documento no era demostrar la efectividad de las estrategias sino que la metodología de análisis que destaca la importancia de los parámetros. Los resultados de la simulación (consumo de energía y horas de incomodidad) junto con los costos estimados de instalación y mantenimiento se demostraron en un gráfico de radar. Esta opción de gráfico fue escogida porque entrega una descripción general más intuitiva de los resultados y la posibilidad de agregar más datos. Se pretende que este procedimiento aliente a los diseñadores a realizar un acercamiento más profundo en el análisis de rendimiento de los edificios.

6. Agradecimientos

Los autores desean agradecer a CNPq, FAPESP, CAPES y Fundação Meridional por financiar esta investigación.

7. Referencias

- ABNT (2008)**, NBR 15220-3: Desempenho Térmico de Edificações, Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).
- Adler M. D., Posner E. A. (1999)**, Rethinking cost-benefit analysis. *The Yale law journal*, 109(2), 165-247. doi: 10.2307/797489.
- Alrubaih M. S., Zain M. F. M., Alghoul M. A., Ibrahim N. L. N., Shameri M. A., Elayeb O. (2013)**, Research and development on aspects of daylighting fundamentals. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 21, 494-505. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.12.057>.
- Asadi E., da Silva M. G., Antunes C. H., Dias L., Glicksman L. (2014)**, Multi-objective optimization for building retrofit: A model using genetic algorithm and artificial neural network and an application. *Energy and Buildings*, 81, 444-456. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.06.009>
- ASHRAE (2009)**, Handbook of Fundamentals. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. (ASHRAE).
- Boyce P., Hunter C., Howlett O. (2003)**, Lighting Research Center. Rensselaer Polytechnic Institute. The Benefits of Daylight through Windows. http://www.lightingassociates.org/i/u/2127806/f/tech_sheets/daylight_benefits_through_windows.pdf.
- Campaniço H., Hollmuller P., Soares P.M.M. (2014)**, Assessing energy savings in cooling demand of buildings using passive cooling systems based on ventilation. *Applied Energy*, 134:426–438, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.08.053>.
- Cannata M., Detommaso M., Evola G., Gagliano A., Marletta L., Nocera F. (2018)**, Sustainable low CO2 emission retrofit strategies of public building in Mediterranean area: a case study. In: *Seismic and Energy Renovation for Sustainable Cities*. Catania.
- Carlo J. C., Pereira F. O. R., Lamberts R. (2004, 18-21 July)**, Iluminação Natural para Redução do Consumo de Energia de Edificações de Escritório Aplicando Propostas de Eficiência Energética para o Código de Obras do Recife. In: *X Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído*. São Paulo: ANTAC.
- CEPAGRI. (2017)**, Centro de Pesquisas Meteorológicas Climáticas Aplicadas à Agricultura. Weather of Campinas. <http://www.cepagri.unicamp.br/outras-informacoes/clima-de-campinas.html>. Date viewed: 2017, 9 August.
- Chiesa G., Ramponi R., Adhikari R. S. (2010, 29 September – 1 October)**, Energy impact of ventilation in building design - A literature review. In: *3rd Passive & Low Energy Cooling for the Built Environment*. Rhodes Island: Heliotopos Conferences.
- DOE. (2017)**, U. S. Department of Energy. EnergyPlus Energy Simulation Software. <https://energyplus.net/>. Date viewed: 2017, 9 August.
- Efthimiadou A., Tzouvadakis I. (2010, 1 October)**, The role of Green Roofs in big cities. Are Green Roofs a solution for better climatic conditions? Case study: Athens. In: *3rd Passive & Low Energy Cooling for the Built Environment*. Rhodes Island: Heliotopos Conferences.
- EUROPEAN COMMISSION (2010)**, Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast). Strasbourg.



- GitHub Inc. (2017)**, Legacy OpenStudio SketchUp Plug-in. <https://github.com/NREL/legacy-openstudio>. Date viewed: 2017, 9 August.
- Givoni B. (1991)**, Impact of planted areas on urban environmental quality: a review. *Atmospheric Environment. Part B. Urban Atmosphere*, 25(3): 289–299, doi: [https://doi.org/10.1016/0957-1272\(91\)90001-U](https://doi.org/10.1016/0957-1272(91)90001-U).
- Guinée J. B., Heijungs R., Huppes G., Zamagni A., Masoni P., Buonamici R., Ekvall T., Rydberg T. (2010)**, Life Cycle Assessment: Past, Present, and Future. *Environmental Science & Technology*, 45(1): 90-96, doi: 10.1021/es101316v.
- Jato-Espino D., Castillo-Lopez E., Rodriguez-Hernandez J., Canteras-Jordana J. C. (2014)**, A review of application of multi-criteria decision making methods in construction. *Automation in Construction*, 45: 151-162, doi: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2014.05.013>.
- Jiménez M. J., Enriquez R., Heras M. R. (2011, May)**, System identification applied to energy analysis in a bioclimatic office building in semidesertic weather in the south of Spain. In: DYNASTEE international workshop on Whole Building Testing, Evaluation and Modelling for Energy Assessment (pp. 18-19). Lyngby.
- McPherson E. G., Nowak D., Heisler G., Grimmond S., Souch C., Grant R., Rowntree R. (1997)**, Quantifying urban forest structure, function, and value: the Chicago Urban Forest Climate Project. *Urban Ecosystems*, 1(1): 49–61, doi: <https://doi.org/10.1023/A:1014350822458>.
- Nowak D. J. (2006)**, Institutionalizing urban forestry as a “biotechnology” to improve environmental quality. *Urban Forestry & Urban Greening*, 5(2): 93-100, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2006.04.002>.
- Perini K., Maglioco A. (2012)**, The Integration of Vegetation in Architecture, Vertical and Horizontal Greened Surfaces. *International Journal of Biology*, 4(2): 79-91, doi: <http://dx.doi.org/10.5539/ijb.v4n2P79>.
- Procel Info. Centro Brasileiro de Informação de Eficiência Energética (2006)**, Selo Procel Edificações. <http://www.procelinfo.com.br/main.asp?View={8E03DCDE-FAE6-470C-90CB-922E4DD0542C}>. Date viewed: 2017, 6 September.
- Reinhart C. F. (2004)**, Lightswitch-2002: A model for manual and automated control of electric lighting and blinds. *Solar Energy*, 77(1): 15-28, doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2004.04.003>.
- Reinhart C. F. (2017)**, DAYSIM. Advanced daylight simulation software. <http://daysim.ning.com/>. Date viewed: 2017, 6 September.
- Roriz Bioclimática. Conforto Térmico e Eficiência Energética. (2017). Dados de Clima. http://www.roriz.eng.br/epw_9.html. Date viewed: 2017, 6 September.
- Rupp R. F., Ghisi E. (2013)**, Potencial de economia de energia elétrica através do uso da luz natural e da ventilação híbrida em edifícios comerciais em Florianópolis. *Ambiente Construído*, 13(4): 75-86.
- Sanati L., Utzinger M. (2013)**, The effect of window shading design on occupant use of blinds and electric lighting. *Building and Environment*, 64:67-76, doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.02.013>.
- Santamouris M. (2001)**, Energy and climate in the urban built environment, p. 402, London: James & James.
- Sketchup. (2017)**, The easiest way to draw in 3D. <http://www.sketchup.com/>. Date viewed: 2017, 6 September.
- Susca T., Gaffin S. R., Dell’Osso G. R. (2011)**, Positive effects of vegetation: Urban heat island and green roofs. *Environmental Pollution*, 159:2119–26.
- Tong Z., Chen Y., Malkawi A., Liu Z., Freeman R. B. (2016)**, Energy saving potential of natural ventilation in China: the impact of ambient air pollution. *Applied Energy*, 179: 660-668, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.07.019>.
- Townshend D., Duggie A. (2007)**, Study on green roof application in Hong Kong. Architectural services department.
- Wong N.H., Chen Y., Ong C.L., Sia A. (2003)**, Investigation of thermal benefits of rooftop garden in the tropical environment. *Building and Environment*, 38(2): 261–270, doi: [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(02\)00066-5](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(02)00066-5).
- Yu T., Heiselberg P., Leia B., Pomianowskib M., Zhang C. (2015)**, A novel system solution for cooling and ventilation in office buildings: a review of applied technologies and a case study. *Energy and Buildings*, 90: 142–155, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.12.057>.