

OPTIMIZACIÓN ECONÓMICA BASADA EN SIMULACIÓN DE EDIFICIOS. ANÁLISIS DE HERRAMIENTAS DISPONIBLES.

Halimi Sulaiman¹, Celina Filippín²

Instituto Regional de Planeamiento y Hábitat (IRPHa) – Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Diseño (FAUD). Universidad Nacional de San Juan (UNSJ) – Av. Ignacio de La Roza y Meglioli – 5400 San Juan – Argentina. Tel.: +54 (0)264 423 2395 / 3259 Int. 349 – Fax: +54 (0)264 423 5397; E-mail: halimi.sulaiman@gmail.com

Recibido 11/09/15, aceptado 16/10/15

RESUMEN: Es importante considerar la complejidad que implica el concepto de diseño ambientalmente conciente, su proceso y su optimización. Un estudio exhaustivo requiere de conocimientos que tienen un determinado tiempo de aprendizaje esencialmente, por la diversidad de aspectos intervinientes pertinentes a diferentes campos disciplinares (caracterización climática, condicionantes morfológico-espaciales, recursos energéticos, termodinámica, comportamiento y modelación higrotérmica de edificios, características de los materiales, microeconomía, simulación numérica, teorías y métodos de optimización, etc.). Para una correcta interpretación de los resultados se deben conocer y relacionar las numerosas variables que involucra el proceso (climáticas, de uso y función, las características térmicas de los materiales, los consumos energéticos y los costos implicados, etc.) y la interdependencia de las mismas para lograr el diseño arquitectónico óptimo para un contexto determinado. Este artículo presenta una revisión detallada de la aplicación de la optimización en arquitectura, las diferentes herramientas disponibles, ventajas, desventajas y reflexiones finales de las tendencias actuales y desafíos. La tendencia actual considera fundamental la integración de la simulación con las rutinas de optimización del diseño arquitectónico.

Palabras clave: optimización basada en simulación, análisis de performance de edificios, métodos aplicados.

Introducción

Se presenta el estado del arte en la optimización del diseño arquitectónico estrechamente relacionado con la simulación de edificios, principalmente con los desarrollos y tendencias actuales en el campo de la arquitectura computacional. La estructura del presente artículo consiste en una introducción a los conceptos de optimización, sus primeras aplicaciones a la arquitectura, la optimización basada en simulación, qué es la optimización multivariable y multiobjetivo y las herramientas actuales disponibles, los métodos combinados o híbridos, la tendencia a programar módulos reutilizables y extensibles, discutiendo luego las dificultades para optimizar el diseño de edificios a través de una síntesis comparativa de las herramientas disponibles. Finalmente las principales conclusiones del análisis realizado.

Al principio, en las rutinas de optimización para el diseño de edificios no se incluía la simulación, por un lado, porque los métodos provienen de distintas áreas del conocimiento y por otro, dada la complejidad, no era factible con el escaso poder de cálculo de las computadoras a fines de 1970 en comparación con las actuales.

En matemáticas y ciencias de la computación, la optimización, se refiere a la elección del mejor elemento de un conjunto de alternativas disponibles. En el caso más simple, esto significa resolver problemas en los cuales se trata de minimizar o maximizar una función real a través de la elección sistemática de los valores de las variables reales dentro de un conjunto factible. Esta formulación, utilizando una función objetivo escalar, de valores reales, es probablemente el ejemplo más simple. La generalización de la teoría y técnicas de optimización en otras formulaciones comprende una gran área

¹ Investigadora Asistente CONICET. IRPHa-FAUD-UNSJ. Doctora en Arquitectura Universidad de Mendoza 2011.

² Investigadora Principal de CONICET, Centro Regional del INTA, La Pampa-San Luis

de las matemáticas aplicadas. De manera más general, significa encontrar el mejor disponible de los valores de alguna función objetivo dado un dominio definido (espacio donde se busca el valor óptimo de la variable), incluyendo una variedad de diferentes tipos de funciones objetivo y los diferentes tipos de dominios según cada variable.

Por lo general, un problema de optimización se puede representar en forma matemática como:

$$\text{Minimizar : } F(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (1)$$

Sujeto a:

$$G(x_1, x_2, \dots, x_n) \geq 0 \quad (2)$$

donde, F son vectores de las funciones objetivo y G limitaciones o restricciones funcionales. Cada variable puede estar sujeta a una condición de pertenencia a los números S_i , que se define por los valores límites o una serie de valores discretos en función del tipo de variable.

Los problemas de optimización se pueden clasificar en no restringido y con restricciones en función de la presencia de limitaciones funcionales. También pueden ser clasificados en mono-objetivo y optimización multivariada o multi-objetivo en función del número de funciones objetivo. Existen diferentes métodos y algoritmos, como los patrones de búsqueda, método de gradiente algoritmos genéticos, agentes, objetos orientados, bandada de partículas, etc., que a su vez presentan sus diferencias, si los algoritmos son evolutivos, si existe alguna jerarquización en los objetivos (en árbol o cascada), si se validan al cumplir todos los objetivos propuestos o bien evitan caer en óptimos locales (es decir, no llegan al óptimo real global). Se presentan las principales ventajas y limitaciones en su implementación en el diseño arquitectónico sustentable. Dentro de este grupo, es importante detectar si el programa de simulación otorga resultados precisos, y a la vez, que la complejidad alcanzada no lo haga inaccesible para realizar otras aplicaciones.

Primeras aplicaciones en Arquitectura

Varios autores consideran que para incrementar la utilización de sistemas solares pasivos en edificios, es necesario desarrollar herramientas de cálculo y análisis que permitan optimizar la relación entre los mayores costos derivados y los beneficios esperados (Yarke y Alonso, 2006; Al-Homoud, 1997; Caldas y Norford, 2002; Choudhary y Malkawi, 2002, Wang et al., 2005).

Las técnicas de optimización se utilizaron al principio en Arquitectura para resolver problemas de diseño de espacios, diseño estructural y rendimiento del edificio (Choudhary et al. 2005). La optimización del diseño del espacio se ocupa de encontrar la topología factible y las dimensiones de los objetos relacionados entre sí, que cumplen con todos los requisitos de diseño preestablecidos y de maximizar las preferencias de las diferentes alternativas de diseño (Levin, 1964; Liggett y Mitchell, 1981). La optimización de la estructura implica la configuración de los elementos estructurales y de las construcciones completas, sus características geométricas y mecánicas, y las propiedades de sus materiales para la optimización mecánica, económica y/o criterios estéticos (Brandt, 1989).

La optimización del comportamiento en los edificios tiene múltiples aristas, abarcando todos los aspectos del diseño. La misma abarca la ubicación y el tamaño de los elementos arquitectónicos, la selección de materiales, configuración del volumen y de las proporciones del espacio para definir un diseño acústico, térmico y lumínico privilegiando el máximo rendimiento en un determinado contexto. Esa optimización está significativamente influenciada por las características climáticas exteriores, los horarios de uso, operación y control del funcionamiento del edificio además de la geometría, la topología y los materiales. Las funciones que posee el modelo para resolver la optimización del rendimiento del edificio son, en su mayoría, basadas en simulación, y a menudo envuelven análisis complejos de elementos finitos (Kanters et al., 2012).

Wilson y Templeman (1976) y Gero et al. (1983) presentaron el problema del rendimiento energético incorporado a un modelo de optimización del diseño de edificios. Los primeros autores citados, encontraron decisiones de diseño (por ejemplo, la orientación o aumento de la superficie captadora de radiación solar) para reducir al mínimo los costos de inversión y operativos de un edificio de oficinas

planteando el problema de optimización como no lineal restringido. Los segundos autores incluyeron criterios de eficiencia energética entre otros rendimientos y propusieron un modelo de optimización para generar un conjunto de gráficas de Pareto que permitía comprender las interrelaciones entre múltiples criterios de performance.

Para tener una idea clara de optimización es importante mostrar qué es la Frontera de Eficiencia. En un área de posibles soluciones la Frontera de eficiencia o Pareto óptima es la línea que contiene las mejores opciones para los parámetros establecidos. La Fig. 1 es un esquema de frontera de eficiencia de Pareto y usa una posible opción de métrica para costo y rendimiento (soluciones que están arriba y a la derecha no son óptimas y las de abajo y a la izquierda no son factibles, las contenidas en la línea o frontera son óptimas). Estos resultados presentan una gama de posibles soluciones (que son todos óptimos) que se pueden utilizar para informar la toma de decisiones de los diseñadores de edificios.

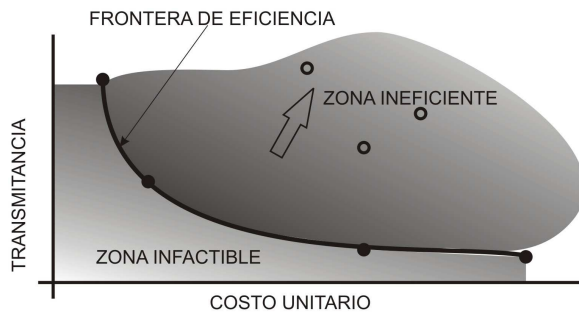


Fig.1 Ejemplo Frontera de eficiencia. Blasco, Sulaiman, 2006.

Basado en el Método del Cociente de Carga de Colector (CCC) - según sus siglas en inglés Solar Load Ratio (SLR) Balcomb et al. (1978, Reedicón 1992)- Yarke et al. (2006) desarrolla el programa OPTIMIX 3.1, el cual brinda una herramienta de cálculo amigable que puede ser usada por profesionales vinculados a la construcción de edificios que tengan un conocimiento elemental de las tecnologías posibles a ser utilizadas. Sobre la base de 3 sistemas básicos: Ganancia Directa, Muros Colectores Acumuladores y Espacios Solares, el método incluye 94 variantes, cada una de las cuales tiene características definidas dentro de un marco general de aplicación para una localidad determinada.

En los últimos años, los métodos estocásticos tales como la simulación y los algoritmos genéticos (genetic algorithms, GA) han llegado a ser muy difundidos, y se han aplicado a una serie de problemas de optimización de rendimiento térmico y de iluminación basados en la envolvente del edificio, el diseño de HVAC y la programación de control (Caldas y Norford, 2002; Choudhary y Malkawi, 2002; Coley y Schukat, 2002; Wright et al., 2002). Estos métodos son atractivos, debido principalmente a que pueden resolver una amplia gama de problemas combinatorios. Recientemente Nguyen et al. (2013) realiza una completa revisión de la optimización en el diseño de edificios.

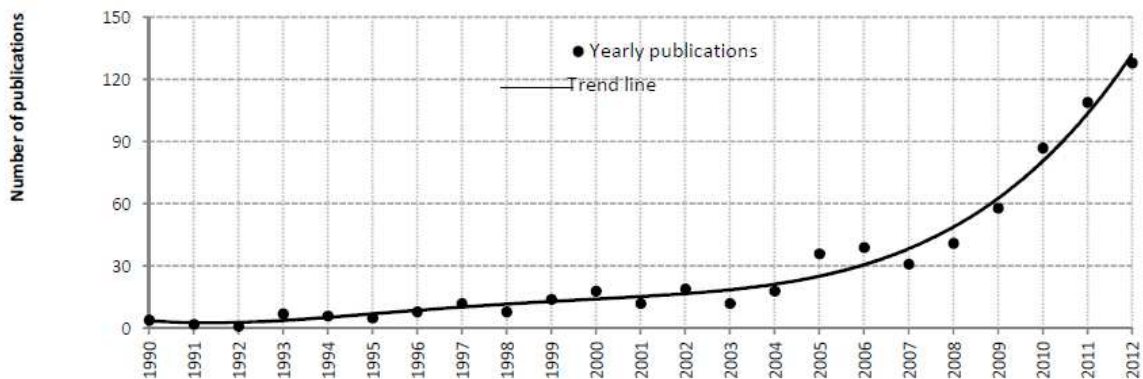


Figura 2. Tendencia creciente del número de estudios de optimización de edificios. Fuente: Nguyen et al. (2013).

Optimización basada en simulación

A nivel mundial existen numerosos programas de simulación para evaluar el desempeño térmico y la eficiencia energética de los edificios y construcciones, la calidad del aire interior, iluminación, acústica, etc. (Hong et al. 2000). Los programas de simulación son particularmente necesarios en el proceso de diseño de la edificación sustentable que tiene por objeto reducir los impactos negativos sobre el medio ambiente y sus ocupantes a través de estrategias para conservar los recursos, reducir los residuos, minimizar los costos del ciclo de vida, y crear un ambiente saludable donde las personas viven y trabajan (LEED, 2001). Sin embargo, dado que estos programas de simulación no poseen ninguna rutina de optimización, los diseñadores deben buscar manualmente las posibilidades para lograr un mejor diseño de las construcciones. Se realiza un proceso iterativo, donde los parámetros de entrada se van modificando poco a poco para perfeccionar el rendimiento energético del edificio. Dado que el proceso anterior es menos eficiente y consume mucho tiempo, generalmente los profesionales hacen sólo unos pocos ensayos, quedando sin explorar numerosas soluciones que pueden ser superiores. Normalmente, el proceso exploratorio se detiene ante la primera respuesta satisfactoria para el diseñador, pudiendo ésta encontrarse aún lejos de la solución óptima. Wang et al. (2005), Al-Homoud (1997), Mechri et al. (2010), Sulaiman y Olsina, (2014) afirman que esta situación puede cambiar si un programa de optimización se une con el programa de simulación de forma automática, realizando la búsqueda de las soluciones óptimas o casi óptimas en el diseño de espacios arquitectónicos. Esto se llama optimización basada en simulación. Ellis et al. (2006) acuerdan con estos autores en cuanto al proceso de diseño prueba-error, el cual no es óptimo y afirman, al igual que Wit (2006), que con la capacidad computacional actual, el tiempo de simulación ya no es el problema principal, sino las horas hombre que se necesitan para el manejo de datos de entrada y la interpretación de los resultados de salida. La optimización computarizada tiene la cualidad de automatizar la entrada y salida de datos, evaluar muchas opciones, y realizar simulaciones suficientes para demostrar las complejas interacciones entre las diferentes combinaciones de diseño posibles.

Al-Homoud (2005b), ha desarrollado un modelo de optimización que utiliza una técnica de búsqueda discreta de optimización incorporada a un programa de simulación horaria de energía para el diseño térmico de envolventes de edificios. El mismo ha sido implementado en edificios de oficinas y residenciales con diferentes condiciones climáticas.

Wetter (2004) en su tesis doctoral trata el problema de resultados discontinuos y escalonados en la optimización de diseño de edificios, los cuales conducen a la obtención de óptimos locales. Para ello desarrolla técnicas computacionales de optimización arquitectónica, calefacción, ventilación y aire acondicionado y sistemas de iluminación donde la función objetivo es suavizada. En este problema, la evaluación de la función objetivo involucra soluciones numéricas de sistemas de ecuaciones algebraicas diferenciales (DAE, diferencial algebraic equation). Wetter desarrolla BuilOpt, un detallado programa de simulación térmica y de iluminación natural de edificios.

Kumar et al. (2008) proponen una nueva herramienta para optimizar el diseño de intercambiadores de calor tierra-aire en viviendas no acondicionadas. El método se basa en GA en conjunto con un programa de simulación térmico desarrollado por los autores en la plataforma Matlab versión 6.5. Tuhus-Dubrow y Krarti (2010) han creado una herramienta de optimización-simulación de la forma del edificio (en planta) y su envolvente, utilizando GA en la simulación para seleccionar los valores óptimos de una lista comprensible de los parámetros asociados con la envolvente para minimizar el uso de la energía en edificios residenciales. La simulación del consumo energético y el análisis de costos durante el ciclo de vida se realizaron con el programa DOE-2. Se investigaron diferentes formas de construcción, incluyendo rectángulo, L, T, cruz, U, H, y el trapecio. Por otra parte, se consideraron en la optimización, características de la construcción de muros y cubiertas, niveles de aislamiento, y tipos de ventana y regiones. Los resultados indican que los edificios de forma rectangular y trapezoidal siempre tienen el mejor desempeño (menor costo del ciclo de vida) probado en cinco climas diferentes. También se constató que el trapecio-rectángulo presenta la menor variabilidad entre el mejor y peor valor.

En Sulaiman (2011) se demuestra, mediante ejemplos sencillos por medio de técnicas de simulación, la importancia de evaluar el nivel de confiabilidad que brindan al edificio las estrategias pasivas, lo cual permite una correcta valoración económica y comparación de las variadas alternativas de diseño disponibles. Esta información se utiliza para optimizar el diseño, evitando el sobre o subdimensionamiento de las instalaciones de climatización. De esta manera se minimizan los costos incrementales por aislación en la envolvente, el aumento de masa térmica o la superficie de captación solar, satisfaciendo al mismo tiempo indicadores de riesgo de desconfort máximo admisible, que son parámetros probabilísticos del desempeño del edificio. Para este propósito se creó una serie sintética de 1000 años basadas en mediciones reales locales y se desarrolló un modelo de simulación estocástica llamado sHAMS el cual es aplicable a cualquier edificio. Los resultados de la optimización bivariada basada en simulación estocástica son contundentes por no considerar el problema como determinístico, el caso de los estudios aquí analizados. No obstante, se trabaja actualmente en incorporar optimización con GA.

Attia et al. (2012) quienes resumen 150 trabajos basados en simulación y encuestas a los referentes del desarrollo en esa área, la optimización es necesaria para alcanzar performances del tipo Nearly Zero-Energy Buildings (NZEB), pero los diseñadores no usan herramientas de simulación combinadas con métodos de optimización por la falta de ofertas comerciales que satisfagan sus necesidades: simpleza de uso, baja demanda de conocimiento especializado, integrables al diseño de la edificación, etc. Los siguientes modelos también se basan en simulación, pero se destacan sus principales particularidades.

Optimización Multivariable o Multiobjetivo

En principio, es deseable evaluar las decisiones de diseño que están relacionadas entre sí al mismo tiempo, de modo que sus efectos combinados puedan mantenerse en los diferentes objetivos de rendimiento. No obstante, la combinación de todas las decisiones de diseño y la evaluación de ellas a la vez es difícil porque se trata de objetivos de rendimiento múltiples y a menudo contradictorios, los cuales pueden requerir análisis de profesionales expertos a muy distintos niveles de complejidad y con información de diseño diferente (Ellis et al., 2006).

Estos autores consideran que los problemas de diseño de los edificios son inherentemente multivariados y multicriterio. La optimización multivariable es exponencialmente más compleja que el problema de reducir al máximo una sola variable. El objetivo, que en este caso es maximizar el índice de rendimiento debe incluir también la eficiencia energética y las implicancias financieras de las opciones de diseño.

En la búsqueda de optimización multicriterio o multiobjetivo, la frontera de Pareto óptima no es un área, sino una expansión de múltiples dimensiones, por lo cual no es posible representarla gráficamente. Los algoritmos de búsqueda para encontrar la función de Pareto-óptima pueden, por separado y al mismo tiempo, reducir al mínimo los costos y maximizar el rendimiento energético. El programa GenOpt implementa un gran número de algoritmos de búsqueda, pero considera como el más apropiado el llamado "patrón de búsqueda generalizada de Hooke-Jeeves" (Wetter, 2004). Según Wetter y Wright (2003) los métodos basados en gradiente no son muy adecuados para la construcción de aplicaciones de diseño y señalan que las soluciones aproximadas producidas por la simulación de energía pueden conducir a resultados discontinuos, causando problemas en estos tipos de métodos. Para los edificios, los métodos de búsqueda necesitan manejar las variables discretas y deben poder identificar una porción amplia de la función de Pareto-óptima. Los GA son aplicables a las variables observables y se han aplicados (en el contexto de los edificios) por Wright et al. (2002), Coley y Schukat (2002), Caldas y Norford (2002).

Numerosos trabajos en modelos computacionales de decisión (Jedrzejuk et al., 2002; Wright et al., 2002) han utilizado formulaciones multicriterio con o sin preferencia basados en estrategias para considerar múltiples objetivos (MO) de rendimiento. Estas aplicaciones proveen, a quien toma las decisiones, una ponderación de conjuntos de criterios de performance o alternativa de diseño. La dificultad radica en la importante extensión y complejidad de la elaboración de los modelos para ser implementados de manera conjunta. Además, diferentes objetivos de rendimiento a menudo requieren

un único análisis del diseño en diversos grados de complejidad y con otra extensión de la información requerida. Del mismo modo, las decisiones de diseño para el logro de estas metas se hacen bajo distintos grados de libertad donde las restricciones de los parámetros de decisión son cada vez más específicas y numerosas en el nivel de detalle (Choudhary et al., 2002). De este modo se desarrolla un sistema jerárquico de optimización del diseño para el análisis del desempeño de edificios. Este modelo matemático proporciona un apoyo robusto para preservar la coherencia entre las decisiones tomadas en diferentes puntos del análisis de comportamiento del edificio. En el proceso de análisis energético se aplica una estructura analítica de función objetivo en cascada (ATC, Analytic target cascading) o multiniveles de ingeniería de optimización del diseño.

Velez y Zangari, (2014) desarrollan una herramienta de optimización multiobjetivo con interfases gráficas en la plataforma MatLab que vincula de modo sistematizado la herramienta de optimización de dicha plataforma con el motor de simulación de EnergyPlus. Si bien puede utilizar otros motores de simulación la herramienta se aplica con éste por ser la mayormente utilizada a nivel mundial. Otra ventaja es que se puede optar por diferentes algoritmos como GA o (particle swarm optimization, PSO). La herramienta es modular y reutilizable, aspecto relevante en la tendencia internacional de nuevos desarrollos en la materia, la cual se detalla más adelante.

Métodos combinados o híbridos

Si bien los métodos de optimización por simulación son muy atractivos en cuanto a que otorgan solución a gran variedad de problemas, se basan en la búsqueda aleatoria y, a menudo se obtienen resultados poco fiables si no se utilizan con gran habilidad e intuición (Choudhary y Malkawi, 2002). Para superar los problemas asociados con un método particular se usaron estrategias híbridas combinando dos o más métodos, por ejemplo, Michalek et al. (2002) y Monks et al. (2000) utilizan la naturaleza global y versátil de los métodos estocásticos con el rigor y la eficiencia de los métodos de gradiente basado en un marco combinado. Recientemente Ardakani et al. (2008) realizan un nuevo método de optimización a partir de la combinación de GA con optimización por bandada de partículas PSO.

Wetter y Wright (2002) proponen combinar GA y patrón de búsqueda de Hooke y Jeeves (1961) para obtener un método híbrido que reduce el tiempo de ejecución de cómputo en problemas que involucran gran cantidad de simulaciones. Además de explorar una gama de diferentes métodos, las exigencias de los últimos años también demuestran que, con buen conocimiento de los métodos empleados, la optimización del diseño arquitectónico (incluyendo instalaciones) puede ser eficaz por un lado, para mejorar el desempeño de la construcción y a su vez proporcionar el rigor en la forma en que se utilizan las herramientas de simulación.

Caldas y Norford (2001), referentes en optimización, utilizan el concepto de diseño generativo y objetos orientados, para proponer una herramienta computacional aplicando GA que pueda ayudar a los diseñadores a generar y evaluar soluciones óptimas de comportamiento térmico y lumínico de la configuración final del edificio utilizando el programa de análisis térmico detallado DOE2.1E.

Adedeji (2002) propone un enfoque diferente para optimizar minimizando los impactos ambientales durante la vida útil. Evalúa en términos de consumo de la exergía expandida acumulada que ha sido generada por los edificios a lo largo de su vida útil, resultantes de los impactos negativos debido a la emisión de residuos. La solución óptima es encontrada utilizando GA y procesos intensivos de búsqueda.

Módulos reutilizables y extensibles

Estudios como los de Coley y Schukat, (2002); Hauglustaine y Azar, (2001); Grierson y Khajepour (2002) han puesto en práctica la optimización basada en simulación para el diseño de edificios con GA. Aunque estos estudios pueden ayudar a los diseñadores a explorar de manera eficiente el espacio de diseño, se limitan a problemas fijos en términos de variables, algoritmos de optimización implementados (por Ej. Sólo GA) y programas de simulación utilizados. Por lo tanto, es difícil extender las aplicaciones desarrolladas para resolver otros problemas similares. La experiencia en la

investigación de Wang et al. (2005) ha demostrado que un sistema rígido de diseño requiere modificaciones importantes para resolver un nuevo problema aunque difieran del original sólo en el número de variables. Tales modificaciones requieren tiempo y recursos considerables en el análisis, rediseño, implementación y validación de la nueva aplicación.

Un enfoque global sería útil para facilitar la aplicación de optimización basada en simulación en la creación y diseño de nuevos edificios sustentables. Wang et al. (2005) plantean un enfoque de este tipo al hacer el diseño del software y el código reutilizable y extensible, tanto como sea posible, para facilitar aplicaciones de optimización basadas en simulación mediante el desarrollo de un sistema de objetos orientados (object-oriented programming, OOP). Este software se ha creado específicamente para satisfacer las necesidades de optimización de los proyectos de edificios sustentables utilizando modelos en programas de simulación. Según la definición de Mattsson (1996), un sistema de OOP es un paradigma de programación o arquitectura de software que usa "objetos" - que consiste en estructuras de campos de datos y métodos, junto con sus interacciones - para diseñar aplicaciones y programas informáticos. Muchos lenguajes de programación modernos ahora son compatibles con OOP. Esta estructura no considera la optimización multiobjetivo (MO), y no considera a la interconexión entre los programas de simulación y optimización. El modelo de OOP propuesto por Le Riche et al. (2003) se concentró en la interfase e interconexión de simulación-optimización.

DAKOTA (Eldred et al. 2003) es una herramienta que proporciona una interfase flexible a las simulaciones de modelos desarrollados por el usuario con un conjunto de métodos de optimización. Este conjunto de herramientas resuelve MO con técnicas de agregación ponderada. OPTIONS (Keane, 2003) es un paquete que contiene una amplia gama de los métodos de optimización más utilizados, incluyendo los GA. El mismo prioriza la diversidad de métodos disponibles más que su reutilización y personalización. GenOpt (Wetter, 2004) es una herramienta de optimización genérico para la optimización del diseño de edificios junto con programas de simulación de energía. Una ventaja particular de esta herramienta radica en su facilidad de personalización. Sin embargo, los algoritmos genéticos y la optimización MO no son compatibles con la actual versión de GenOpt. Este hecho impide el uso de GenOpt en el diseño sustentable de los edificios los cuales generalmente implican un ámbito de diseño complejo con múltiples criterios de performance.

Además de esos trabajos de investigación, también están disponibles algunos paquetes comerciales de programas de optimización que contienen GA presentados a continuación. Se diferencian los desarrollos sin costo de los comerciales, principalmente porque se considera una limitación para su aplicación en institutos de investigación sin recursos asignados para la adquisición de los mismos. La plataforma MatLab (2004) tiene un paquete de herramientas para un monobjetivo de GA. El GEATbx (Pohlheim, 2004) es otro paquete para Matlab. Una amplia gama de operadores evolutivos y los principios se aplican en la versión actual del GEATbx para utilizar GA y estrategias de evolución. AMOpt (2004) y la iSight (Koch et al. 2002) son dos ejemplos de software que proporcionan potentes funcionalidades para la optimización del diseño como el diseño experimental, optimización, metamodelización, y análisis de sensibilidad. A pesar de sus funcionalidades, los anteriores programas tienen ciertas desventajas, ya que: (1) no consideran las variables en los diferentes niveles, (2) se centran en la optimización y carece de un análisis de la simulación, y (3) no pueden ser utilizados nuevamente y personalizados a nivel de código y clases. No hay rutinas de referencia reutilizables, aunque los GA están disponibles en ese software. Por lo tanto, todavía hay una necesidad de desarrollar un marco genérico en el que se considere plenamente las características de optimización y que esté basado en simulación. (Ver cuadro síntesis en página 9).

Dificultades para optimizar el diseño de edificios

- La aplicación de la optimización para el diseño de edificios es relativamente nueva y requiere una cuidadosa formulación del problema. Si bien existe un amplio rango de técnicas de optimización, no todas ellas son factibles de ser aplicadas en el diseño edilicio y la elección de la técnica apropiada no es fácil para cada problema definido incipientemente. Muchos edificios son desafíos arquitectónicos y se caracterizan por tener problemas de optimización multivariados con

restricciones, con funciones-objetivo no diferenciales e interrelaciones no lineales. Se resume de Al-Homoud (2005) algunas de las debilidades para aplicar optimización:

- Los problemas de diseño de los edificios se caracterizan por ser parcialmente definidos, por lo cual requieren ciertos supuestos y se compromete su formulación (en especial las funciones objetivo), necesario esto para la aplicación de sistemas formales de optimización.
- En la mayoría de los casos la formulación de las funciones objetivo limitan la elección de técnicas de optimización adecuadas. Esto contribuye a la ineficiencia y la imprecisión de algunos modelos de optimización.
- Un edificio, como un sistema, se compone de una serie de componentes o subsistemas y una solución óptima global de todos los elementos de construcción no es posible. Esto sólo puede lograrse a través de una serie de decisiones óptimas separadas para estos sub-sistemas que a veces se traduciría en formulaciones complejas del problema y una incapacidad para alcanzar un óptimo verdadero.
- Algunos problemas de diseño de construcción exigen variables discretas y discontinuas (aberturas, espesores de ciertos materiales industrializados, por ejemplo) con relaciones no-lineales que es otra limitación en la elección de la técnica adecuada.
- Condicionantes económicos, sociales, legales, estéticos y restricciones técnicas tienden a limitar la gama de soluciones deseables. Como resultado se obtiene una performance del edificio que no tiene en cuenta estas limitaciones, alcanzando un óptimo global falso o que no puede ser testado o bien sólo se consigue llegar a un óptimo local.
- La aplicación de un enfoque sistemático (como el de jerarquización, Choudhary et al., 2005) ayudaría a proveer la información precisa altamente necesaria, pero no eliminaría el rol de la experiencia o el sentido común, ni sustituiría al diseñador. Sin embargo, la mayoría de los arquitectos no aceptan metodologías sistemáticas en el diseño de edificios.

Choudhary et al. (2005) coincide con Malkawi, (1994); Pohl et al. (1990); Radford y Gero, (1988); Shaviv y Kalay (1992) quienes afirman que, en general los problemas involucrados en el diseño arquitectónico, a menudo están escasamente definidos y se seleccionan elementos de diseño considerando simultáneamente numerosos criterios cuantificables como también criterios no cuantificables por ejemplo valores cualitativos estéticos, sociales del entorno, normativas locales, etc. Además, la complejidad del problema como la utilización de programas detallados de simulación para evaluar las funciones a menudo otorga propiedades no deseadas en el modelo de optimización.

Coincidiendo con los argumentos de los autores citados, es posible complementar estos análisis detectando que, si bien se utilizan métodos o técnicas de búsqueda del óptimo aleatorias (simulación, GA, SPO, OOP, etc.) el planteo del problema a optimizar, en la mayoría de los casos, se hace de modo determinístico. El análisis del desempeño del edificio se realiza bajo condiciones climáticas preestablecidas, lo cual es una simplificación dado que esas condiciones están sujetas a incertidumbre y por esta razón, la performance del edificio no puede ser conocida con precisión. Hasta 2011 no se había encontrado ningún programa o algoritmo para determinar la incertidumbre para utilizarlos en la optimización del diseño arquitectónico basada en simulación. Sulaiman (2011) da respuesta a este problema generando la optimización basada en simulación estocástica. No obstante, el método de optimización utilizado es el exhaustivo bivariado compuesto, el cual puede ser ampliamente mejorado utilizando GA o PSO. En la Tabla 1 se comparan las principales características de los desarrollos de optimización del diseño arquitectónico analizados anteriormente, donde todos los coloreados son basados en simulación.

CONCLUSIONES

- Los métodos de optimización con GA han tenido una extendida aplicación con importantes avances en la materia (Caldas y Norford, 2002; Choudhary y Malkawi, 2002; Coley y Schukat, 2002; Wright et al., 2002), pero la gran complejidad y extensión de los modelos limita su aplicación fuera del ambiente de investigación (Al-Homoud, 2001). No obstante, es el método de optimización más utilizado a nivel mundial (Nguyen et al., 2013).

- Otro factor limitante en la implementación de la optimización es la ausencia de una interfase entre el programa de simulación y el método de optimización (Wang et al. 2005, Al-Homoud 1998, Mechri et al. 2010). La tendencia actual considera fundamental la integración de la simulación con las rutinas de optimización del diseño arquitectónico.
- La capacidad computacional y el tiempo de simulación ya no es el problema principal, sino las horas hombre que se necesitan para el manejo de datos de entrada y la interpretación de los resultados de salida. (Ellis et al., 2006; Wit, 2006).
- El objetivo de rendimiento económico (performance) y los índices que se establezcan deben considerar tanto el rendimiento energético, como los costos que implican las diferentes opciones de diseño. (Ellis et al., 2006).
- La complejidad que caracteriza al problema de la optimización en edificios conduce a abordarlo como multicriterio y/o multiobjetivo (Ellis et al., 2006) es de por sí una técnica multidisciplinaria compleja que implica muchas ciencias, es decir, las matemáticas, la arquitectura, la ingeniería, las ciencias ambientales, economía, ciencias de la computación, etc.
Los métodos de gradientes pueden tener problemas para llegar al óptimo real debido que existen funciones discontinuas en el diseño de edificios (Wetter y Wright, 2003).

Optimización del diseño arquitectónico	GA	jerárquico	método de gradiente	OOP	Otros (PSO, DAE, HCLS)	hibrido	mono objetivo	multi objetivo	modificable	MatLab	Busqueda discreta
Wang et al. 2005	V			V							
Al-Homoud 1998											V
Mechri et al. 2010		V									
Ellis et al. 2006								V			V
de Wit 2006											
Yarke y Alonso 2006											V
Choudhary y Malkawi, 2002	V	V						V			
Caldas y Norford, 2002	V			V		V		V			
Coley y Schukat, 2002	V								No		
Wright et al., 2002	V							V	No		
Michalek et al. (2002)	V		V			V					
Monks et al. (2000)	V		V			V					
Ardakani et al. (2008)	V				V	V					
Riza Yildiz (2009)	V				V	V					
Wetter y Wright (2003)	V		V		V						
Wilson y Templeman (1976)											V
Gero et al. (1983)											V
Hauglustaine y Azar, (2001)	V								No		
Grierson y Khajehpour (2002)	V								No		
Wang et al. (2005)				V					Sí		
Jedrzejuk et.al., 2002	V							V			
Wall, 1996	V			V							
Krishnamoorthy et al. (2002)	V			V			V				
Le Riche et al. (2003)				V							
DAKOTA et al. 2003	V		V			V		V			
OPTIONS Keane, 2003	V	V	V					V			
GenOpt Wetter 2004	V		V		V		V		Sí		V
GA. MATLAB (2004)	V				V		V			V	
GEATbx (Pohlheim, 2004)	V									V	
AMOpt (2004)	V								No		
iSight (Koch et al. 2002)	V				V			V	No		
Tuhus-Dubrow, Krarti (2010)	V										
Adedeji (2008)	V										V
Kumar et al. (2008)	V									V	
MOBO (2013)	V							V	Sí		
modeFrontier (2003)	V				V			V	No		
Vélez y Zangari (2014)	V				V			V	Sí	V	
jEPlus+EA (2012)	V				V			V	Sí		

Tabla 1 Síntesis de las características de programas de optimización de edificios analizados.

- Se procura solucionar las limitaciones de un método en particular creando nuevas herramientas híbridas, las cuales combinan 2 o más métodos de optimización.
- La aplicación de métodos de optimización en el diseño de edificios se ha extendido a soluciones computacionales eficientes y también ha derivado en la compatibilidad de valores de dependencias entre los múltiples problemas de decisión interconectados. (Choudhary et al. 2005).
- Futuras investigaciones deben estar orientadas hacia mejorar la eficiencia de las técnicas de búsqueda y métodos de aproximación (modelos sustitutos) para problemas de optimización de edificios a gran escala, reducir el tiempo y esfuerzo para tales actividades. A su vez, es necesario poder cuantificar la incertidumbre de este método de diseño de soluciones óptimas así como mejorar la estabilidad del rendimiento de los edificios una vez construidos (Nguyen et al., 2013).

REFERENCIAS

- Yarke E.; Alonso Castillo P. (2006). Un programa de cálculo para optimizar la relación entre sustentabilidad energética y rentabilidad de sistemas solares pasivos: el programa optimix - versión 3.1. ENTAC 2006. XI Encuentro Nacional de Tecnología no Ambiente Construido. Florianópolis/SC.Brasil
- Al-Homoud, M. (1997). Optimum thermal design of air-conditioned residential buildings. *Building & Environment*, Vol. 32, 203-210.
- Caldas Lg, Norford LK. (2002). A design optimization tool based on a genetic algorithm. *Automat Constr*;11:173-84.
- Choudhary R., Malkawi A. (2002). Integration of CFD and genetic algorithms, *Proceedings of the Eighth International Conference on Air Distribution in Rooms*, Copenhagen, Denmark.
- Wang W., Rivard H., Zmeureanu R. (2005). An object-oriented framework for simulation-based green building design optimization with genetic algorithms. *Advanced Engineering Informatics* 19 5-23
- Choudhary, R., Malkawi, A., Papalambros, P.Y. (2005). Analytic target cascading in simulation-based building design. *Automation in Construction* Volume 14, Issue 4, Pages 551-568.
- Levin P.H., 1964. Use of graphs to decide the optimum layout of buildings, *Architect* 14 809- 815.
- Liggett R.S., Mitchell W.J. (1981). Optimal space planning in practice, *Computer-Aided Design* 13 (5) 277-288.
- Brandt A.M. Ed. (1989). *Foundations of optimum design in civil engineering*, M. Nijhoff Publishers, Norwell.
- KANTERS,J. et al. (2012). Tools and methods used by architects for solar design, *Energy Buildings* (2012), <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.05.031>
- Wilson A.J., Templeman A.B. (1976). An approach to the optimum thermal design of office buildings, *Building and Environment* 11 (1) 39- 40.
- Gero J.S., Neville D.C., Radford A.D. (1983). Energy in context: a multicriteria model for building design, *Building and Environment* 18 (3) 99- 107.
- Sulaiman, H. (2011). *Confiabilidad y economía en la optimización del diseño bioclimático*. Tesis Doctoral, Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Diseño, Universidad de Mendoza.
- Blasco, I, Sulaiman, H. (2006). Procedimiento de evaluación térmico-económica unitaria para envolventes edilicias de zonas áridas y sísmicas. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente (AVERMA)* Vol. 10, pp. 05.167-05.173, Salta.
- Balcomb, J.D., Mcfarland, R.D. (1978). A simple empirical method for estimating the performance of passive solar heated building of the thermal storage wall type. *Proceedings of the 2nd National Passive Solar Conference*, Philadelphia, pp. 16-18.
- Choudhary R., Malkawi A. (2002). Integration of CFD and genetic algorithms, *Proceedings of the Eighth International Conference on Air Distribution in Rooms*, Copenhagen, Denmark.
- Coley D.A., Schukat S. (2002). Low-energy design: combining computer-based optimization and human judgment, *Building and Environment* 37 (12) 1241- 1247.

- Wright Ja, Loosemore Ha, Farmani R. (2002). Optimization of building thermal design and control by multi-criterion genetic algorithm. *Energy Build*;34:959-72.
- Nguyen, A. T.; Reiter, S.; Rigo, P. (2014). A review on simulation-based optimization methods applied to building performance analysis. *Applied Energy* 113 1043–1058
- Hong T, Chou Sk, Bong TY. (2000). Building simulation: an overview of developments and information sources. *Build Environ*; 35(4): 347-61.
- LEED Rating System, version 2.0. (2001). US Green Building Council.
- Mechri HE et al. (2010). USE of the ANOVA approach for sensitive building energy design. *Appl Energy*, doi:10.1016/j.apenergy.2010.04.001.
- Sulaiman, H., Olsina, F. (2014). Comfort Reliability Evaluation of Building Designs by Stochastic Hygrothermal Simulation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 40 Pp. 171-184.
- Ellis P.G., Griffith B.T., Long N., Torcellini P., Crawley D. (2006). Automated Multivariate Optimization Tool for Energy Analysis. Conference Paper NREL/CP-550-40353. IBPSA SimBuild Conference Cambridge, Massachusetts.
- de Wit, M. (2006). HAMBASE Heat Air and Moisture model for Building And Systems Evaluation: Model & User Guide. Eindhoven University of Technology, the Netherlands.
- Al-Homoud, M. S., (2005). A Systematic Approach for the Thermal Design Optimization of Building Envelopes, *Journal of Building Physics*, Vol. 29, No. 2 (October 2005), pp. 95-119.
- Wetter M. (2004). GenOpt-A generic optimization program, Version 2.0.0. User Manual. Berkley, CA: Simulation research group, Lawrence Berkeley National Laboratory.
- Kumar R., Sinha A.R., Singh B.K., Modhukalya U. (2008). A design optimization tool of earth-to-air heat exchanger using a genetic algorithm. *Renewable Energy* 33. 2282-2288.
- MATLAB Genetic Algorithm and Direct Search Toolbox, version 1.0.2. The MathWorks Inc, Natick, MA, 2004.
- Tuhus-Dubrow D., Krarti M. (2010). Genetic-algorithm based approach to optimize building envelope design for residential buildings. *Building & Environment* 45. 1574-1581.
- Wetter M., Wright J. (2003). Comparison of a generalized pattern search and a genetic algorithm optimization method, *Proceedings of the Eighth International IBPSA Conference*. Eindhoven, The Netherlands.
- Wright Ja, Loosemore Ha, Farmani R. (2002). Optimization of building thermal design and control by multi-criterion genetic algorithm. *Energy Build*;34:959-72.
- Jedrzejuk H., Marks W. (2002). Optimization of shape and functional structure of buildings as well as heat source utilization example, *Building and Environment* 37 (12) 249- 1253.
- Velez, S.; Zangari, M. (2014). Optimización del Uso de la Energía en Edificios: Desarrollo de Interfaz para Energyplus. Trabajo Final de Carrera Ing. Mec. Instituto Tecnológico de Buenos Aires
- Michalek J., Choudhary R., Papalambros P.Y. (2002). Architectural layout design optimization, *Engineering Optimization* 34 (5) 461- 484.
- Monks M., Oh B., Julie D. (2000). Audioptimization: goal-based acoustic design, *IEEE Journal* 0272-1716 76- 91.
- Ardakani A. J., Ardakani F. F., Hosseinian S.H. (2008). A novel approach for optimal chiller loading using particle swarm optimization. *Energy and Buildings* 40. 2177–2187.
- Hooke R., Jeeves T.A. (1961). Direct search solution of numerical and statistical problems, *Journal of the Association for Computing Machinery* 8 (2) 212- 229.
- Adedeji, A. (2002). Thermal effects on the bearing capacity of earth wall in optimal design. *Modeling and Control B* 71 (3), 17-28
- Hauglustaine Jm, Azar S. (2001). Interactive tool aiding to optimize the building envelope during the sketch design. In: Lamberts R, Negarao COR, Hensen J, editors. *Proceedings of the Seventh International IBPSA Conference*, pp. 387-94.

- Grierson DE, Khajehpour S. (2002). Method for conceptual design applied to office buildings. *J Comput Civil Eng*; 16(2):83-103.
- Mattsson M. (1996). Object-oriented frameworks-a survey of methodological issues. Licentiate Thesis, Department of Computer Science, Lund University, Sweden.
- Le Riche R, Gaudin J, Besson J. (2003). An object-oriented simulation optimization interface. *Computers & Structures*; 81(17):1689-701.
- Eldred Ms, Giunta Aa, Waanders Bg, Wojtkiewicz Sf, Hart We, Alleva Mp. (2003). DAKOTA: a multilevel parallel object-oriented framework for design optimization, parameter estimation, uncertainty quantification, and sensitivity analysis, version 3.1, users manual. Albuquerque, NM: Sandia National Laboratories.
- Keane AJ. (2003). The OPTIONS design exploration system: reference manual and user guide, version B3.1. UK: Computational Engineering and Design Center, University of Southampton;
- Wetter M. (2004). GenOpt-A generic optimization program, Version 2.0.0. User Manual. Berkley, CA: Simulation research group, Lawrence Berkeley National Laboratory.
- Pohlheim H. (2004). GEATbx: genetic and evolutionary algorithm toolbox for use with MATLAB. Accessed in December 2004, from [http:// www.geatbx.com/docu/index.html](http://www.geatbx.com/docu/index.html).
- Koch Pn, Evans Jp, Powell D. (2002). Integration for effective design space exploration using iSIGHT. *Struct Multidisciplinary Optimization*; 23(2):111-26.
- Shaviv E., Kalay Y.E. (1992). Combined procedural and heuristic method to energy-conscious building design and evaluation, in: Y.E. Kalay (Ed.), *Evaluating and predicting design performance*, John Wiley & Sons, N Y.
- Radford A., gero J. (1988). *Design by optimization in architecture and building*, Van Nostrand Reinhold, N Y.
- Kanters, J. et al.(2012). Tools and methods used by architects for solar design, *Energy Buildings*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.05.031>
- Attia, S., et al. (2012). Simulation-based decision support tool for early stages of zero-energy building design. *Energy and buildings*. Vol. 49, pp. 2-15. Attia, S., et al. Simulation-based decision support tool for early stages of zero-energy building design. *Energy and buildings*. Vol. 49, pp. 2-15.

ABSTRACT

It is important to consider the complexity of the concept of environmentally conscious design, its process and optimization. A comprehensive study requires knowledge that has a certain learning time mainly because of the diversity of aspects involved relevant to different disciplinary fields (climate characterization, morphological and space constraints, energy resources, thermodynamics, and hygrothermal behavior modeling of buildings, materials characteristics, microeconomics, numerical simulation, optimization theories and methods, etc.). For a correct interpretation of the results should be known and to relate the many variables involved in the process (weather, use and function, the thermal characteristics of materials, energy consumption and costs involved, etc.) and the interdependence between them for optimum architectural design in a given context. This paper presents a detailed review of the application architecture optimization, the different tools available, advantages, disadvantages and final thoughts on current trends and challenges. The current trend considers it essential to integrate the simulation with optimization routines architectural design.

Keywords: simulation-based optimization, building performance analysis, methods applied.