



DISEÑO BIOCLIMÁTICO DE EDIFICIOS. UN PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN

M. Ziletti¹, A. Mendez¹, M. Pontin^{1,2}, P. Galimberti²

¹Grupo de Optimización de Procesos, ²Grupo de Energía Solar
Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional de Río Cuarto
Ruta Nacional 36 Km. 601 – CP: 5800 – Río Cuarto – Argentina
Tel – Fax: (0-54-358) 4676249 – Email: mziletti@ing.unrc.edu.ar

RESUMEN: Este trabajo presenta un procedimiento numérico para el diseño de edificios energéticamente eficientes. El proceso de optimización incluye el uso de técnicas heurísticas para encontrar el diseño óptimo de un edificio en términos de la energía y del costo. Se consideraron estrategias como la calefacción solar pasiva, enfriamiento pasivo, ventilación e iluminación natural. La radiación solar es una contribución importante al balance energético durante el día. La luz solar en edificios puede dar lugar a ahorros significativos en el consumo de electricidad para la iluminación mientras que crea un ambiente interior más confortable. La reducción en la carga térmica debido a la iluminación eléctrica permite una reducción en el correspondiente consumo de energía que se utiliza para el enfriamiento del ambiente. Se presenta un estudio de caso que muestra la aplicabilidad de este acercamiento. Se concluye que el modelo es una alternativa valiosa para el diseño energético eficiente de edificios.

Palabras clave: Diseño Solar, Diseño Bioclimático, Optimización, Conservación de Energía.

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo presenta un procedimiento numérico para la optimización energética del edificio de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Río Cuarto.

El diseño de un edificio a conciencia desde el punto de vista energético presenta gran variedad de opciones, tanto para la conservación la energía como de las tecnologías solares a elegir. Es así que, es posible reducir las necesidades energéticas. En este sentido es recomendable, para reducir costos, aplicar medidas simples de conservación energética tales como aislantes térmicos, antes de recurrir a tecnologías más costosas.

En cuanto al diseño óptimo de edificios, las variables que intervienen en el modelo, pueden dar implicaciones contradictorias. Por ejemplo, menor área de ventana produce menores pérdidas energéticas, pero puede comprometerse la luz natural del día en el interior del edificio. Por lo tanto, el diseño debe arribar a una solución óptima que combine condiciones de costos con tecnología y confort en el ambiente (Peippo, et al., 1962).

Desde esta perspectiva, es posible fijar diferentes objetivos de optimización, entre los que podemos mencionar: minimizar el costo global o total del edificio, sujeto a opciones de diseño; minimizar las pérdidas energéticas ó costos de funcionamiento o bien minimizar los costos de diseño.

Elegido el objetivo de optimización deben especificarse las alternativas factibles de diseño. Por ejemplo, si el objetivo es minimizar los costos de funcionamiento, se puede asumir como fijo las condiciones de diseño ó el costo de la estructura del edificio.

Si el objetivo es minimizar el costo total es necesario analizar un conjunto de opciones, entre las cuales podemos mencionar: la geometría del edificio, el aislamiento térmico, el diseño de las ventanas, la existencia y diseño de colectores solares y paneles fotovoltaicos.

MODELADO

El modelo planteado responde a resolver un problema de optimización. Un *problema de optimización* es aquel cuya solución implica encontrar en un conjunto de soluciones candidatas alternativas aquella que mejor satisface el ó los objetivos planteados.

El objetivo es optimizar el costo total de un edificio que tiene forma rectangular con un área lateral fija, asumiendo que un mes del año está representado por las condiciones ambientales de un día.

El modelo se reduce a minimizar el costo total, sujeto a restricciones de temperatura y de área, como se plantea a continuación.

$$\text{Minimizar } C_t \quad (1)$$

$$\text{st } 18 \leq T_o \leq 26 \quad (2)$$

$$A_{vi} \leq A_{li} \quad (3)$$

La ecuación (1) plantea minimizar el costo total que contempla el costo de diseño y el costo de funcionamiento. El costo de diseño involucra el costo de las ventanas, del área vidriada y el costo del aislante en las paredes laterales si lo hubiera.

En el costo de funcionamiento se contemplan: costo de iluminación, costo de calefacción y costo de refrigeración, Ec. (4). Los costos que aparecen en el modelo se calculan a partir de las necesidades energéticas (iluminación, calefacción y refrigeración) afectadas por el costo unitario de la energía.

$$C_f = C_{il} + C_c + C_r \quad (4)$$

El calor de calefacción (Q_c) involucra el calor que hay que suministrar para recuperar las pérdidas en ventanas y paredes, el calor perdido por recambio del aire, el aporte calórico de las personas y la ganancia a través de la radiación, Ec. (5). El calor por radiación (Q_{Rad}), es el calor que llega a través de las ventanas y depende de la irradiancia global (difusa y directa), ésta irradiancia cambia a lo largo del día y depende de la orientación que tiene la pared respecto del sol.

$$Q_{c \text{ por mes}} = \sum_{i=1}^4 \frac{1}{\eta} U_v A_{vi} \Delta T \Delta t + \sum_{i=1}^4 \frac{1}{\eta} U_p A_{pi} \Delta T \Delta t + n V \delta C_p \Delta T \Delta t - n_p h t_1 - Q_{Rad} \quad (5)$$

$$Q_{Rad} = A_v \tau G_{ov} \quad (6)$$

El calor de refrigeración (Q_r) involucra el calor que hay que eliminar por las ganancias en ventanas y paredes, el calor aportado por recambio del aire, el aporte calórico de las personas y la ganancia a través de la radiación, Ec. (7).

$$Q_{r \text{ por mes}} = \sum_{i=1}^4 \frac{1}{\eta} U_v A_{vi} \Delta T \Delta t + \sum_{i=1}^4 \frac{1}{\eta} U_p A_{pi} \Delta T \Delta t + n V \delta C_p \Delta T \Delta t + n_p h t_1 + Q_{Rad} \quad (7)$$

En lo referente a la iluminación, tenemos en cuenta la iluminación natural y la iluminación artificial. La iluminación natural depende del área total de ventanas, su tipo y su orientación.

Asumimos que la iluminación adecuada para lograr los niveles de confort requeridos en un ambiente es de 300 lux, el mismo será provisto por la iluminación natural y la iluminación artificial, como se expresa en la ecuación (8).

El costo de iluminación está asociado a la iluminación artificial necesaria para cubrir lo no provisto por la iluminación natural. Esta iluminación depende de varios factores, como muestra la ecuación (9). La eficiencia de la iluminación se adopta para cada orientación y cada división. Esta eficiencia tiene en cuenta una relación espacial, asociada a la distribución interna del edificio (Kirkpatrick, et. al., 1986).

En cuanto a la iluminación artificial discriminamos de acuerdo al artefacto de iluminación, si es incandescente ó fluorescente.

$$I_t = I_n + I_{ar} = 300 \quad (8)$$

$$I_n = \frac{2,25\tau}{(1-\xi^2)} G_{ov} A_v \epsilon \quad (9)$$

Finalmente, el gasto energético empleado en la iluminación artificial requerida se calculará afectando el gasto de iluminación I_{ar} por los términos expresados en la ecuación (10), donde el factor $\frac{1}{2}$ es una perdida de eficiencia en el artefacto.

$$I_{ar \text{ req}} = \left(\frac{I_{ar} \left(\frac{\text{lumen}}{\text{m}^2} \right) S_{\text{piso}} (\text{m}^2)}{E_{il} \left(\frac{\text{lumen}}{\text{Watts}} \right) \frac{1}{2}} \right) \Delta t_{il} \quad (10)$$

HEURÍSTICA

Para resolver este problema se utilizó una *metahurística de búsqueda* la cual puede afrontar una resolución realizando una búsqueda sobre un espacio cuyos elementos representan las soluciones candidatas alternativas (Melián et al., 2003).

La técnica utilizada para la resolución fue la Búsqueda Tabú (TS), que utiliza un procedimiento de búsqueda local para explorar el espacio de soluciones, junto con mecanismos de memoria adaptiva diseñados para evitar el estancamiento en mínimos locales y la visita cíclica de las mismas soluciones. La información histórica acerca del proceso de búsqueda de soluciones es almacenada en las llamadas listas tabú.

A partir de una solución inicial (q_0), se define en cada iteración una vecindad de posibles soluciones, $N(q)$, modificando la solución corriente a través de una secuencia de movimientos.

Los elementos de dicha vecindad son examinados para determinar el mejor de ellos que está ausente de la lista tabú, (q'). Esta solución es seleccionada como punto de partida para una nueva iteración aún cuando no mejore la solución anterior q , a la vez que se guarda la mejor solución encontrada hasta el momento (q^*).

El método lleva un registro de los movimientos efectuados para alcanzar q' desde q en cada iteración. Esta *memoria* del proceso modifica la generación de la vecindad determinando que soluciones pueden ser alcanzadas por un movimiento a partir de la solución corriente. Normalmente esto se lleva a cabo a través de una lista de movimientos temporalmente prohibidos llamada lista tabú basada en lo reciente, la cual se actualiza en cada iteración. Pasado un cierto número de iteraciones, llamado período tabú (pt), el movimiento es nuevamente permitido. La lista tabú representa la memoria a corto plazo del proceso. El estado tabú asociado a un movimiento puede eventualmente ser revocado si se satisface algún criterio de aspiración como por ejemplo la generación de una solución de mejor calidad que cualquier otra visitada previamente durante la búsqueda (Méndez et al., 2005).

En contraste, la lista tabú basada en la frecuencia con que ciertos movimientos son realizados, representa la memoria a largo plazo de la técnica y permite la diversificación de la búsqueda al seleccionar movimientos que han sido menos utilizados o nunca se han elegido (Glover, F., 1989).

Representación de las soluciones

La representación de las soluciones $q=(q_1, q_2, \dots, q_n)$, se realiza a través de un vector, cuyas 12 componentes son las áreas de ventana distribuidas en las paredes laterales de cada punto cardinal. Para la representación del problema se impone que los componentes de este vector sean números reales y positivos.

Para que una solución sea factible el área de ventana correspondiente debe cumplir con las restricciones impuestas en el modelo.

Definición de la Vecindad

El concepto de vecindario ó vecindad (neighborhood en inglés) $N(q)$ de una solución q , se refiere al conjunto de soluciones cercanas a ella, a las que pueden llegarse por medio de una única movida u operación elemental a partir de q . El método se basa en buscar entre los elementos del vecindario de una solución actual, alguno de mejor valor, moverse hacia él, y repetir la operación hasta que se considere que no es posible encontrar una solución mejor. En este caso se dice que la solución obtenida es localmente óptima.

En el presente modelo, la elección de la vecindad a partir de una solución q , se define como el conjunto de todas las soluciones q' que se obtienen de cambiar alguno de los q_i de la solución actual en una magnitud fija. El tamaño de la vecindad será de $2n$ ya que se permiten aumentos ó disminuciones en una cantidad fija de las áreas.

Por último, dada una solución $q=(q_1, q_2, \dots, q_n)$ la vecindad de q se define como el conjunto de todas las soluciones q' que se obtienen cambiando alguno de los q_i de la solución actual q .

La aptitud de una solución se evalúa a través de la función que tiene en cuenta el costo energético total asociado a esta solución, como muestra la ecuación (11).

$$C_t = C_D + \sum_{m=1}^{12} C_f \quad (11)$$

Memorias de corto y largo plazo

La lista Tabú de memoria reciente es un vector. Una componente de valor distinto de cero indica que el movimiento asociado está prohibido dado que fue modificado recientemente. Su valor es el número de iteraciones que restan para permitir nuevamente dicho movimiento. Dicha cantidad se fija inicialmente y es denominada período tabú (pt).

La lista basada en frecuencia está representada por un vector h . La i -ésima componente de h almacena el número de movimientos de la variable i usados para generar la próxima solución durante ph iteraciones. Si el proceso de búsqueda se estanca en un área específica, es necesario dirigir la búsqueda a regiones no visitadas o visitadas con menor frecuencia. En

consecuencia el valor de la función de aptitud correspondiente al i -ésimo movimiento permitido es penalizado en proporción a h_i . Luego de ph iteraciones el vector h es reinicializado.

Criterios de Aspiración y Detención

El estado tabú asociado a un movimiento puede ser revocado si la solución generada a partir de dicho movimiento es mejor en términos de su valor de función de evaluación que aquella correspondiente a q^* . El criterio de detención utilizado es finalizar el procedimiento cuando ha transcurrido un determinado número de iteraciones sin encontrar ninguna solución mejor que q^* .

ESTUDIO DE UN CASO

El modelo fue aplicado al caso particular del edificio central de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Río Cuarto. La forma de este edificio es rectangular, con dimensiones de 16 metros de ancho por 80 metros de largo. Se asume que sus caras no poseen inclinación con respecto a los cuatro puntos cardinales. En la figura 1 se muestra la división realizada en el edificio a los fines de considerar los distintos direcciones de iluminación natural recibida. Las oficinas de las cuatro esquinas con dimensiones de 5 metros por 5 metros reciben iluminación proveniente de dos puntos cardinales (Johnson, et al., 1990).

El rectángulo central no recibe iluminación natural y el nivel de iluminación necesario es provisto en su totalidad por la iluminación artificial.

Se obtuvieron valores globales de G_{ov} para cada orientación de pared mediante el modelo de Lui Jordan (Duffie et. al., 1991), partiendo de los valores medios mensuales de radiación global diaria en el plano horizontal (Fasulo et.al., 1994).

Iluminación del Norte y del Este	Iluminación del Norte	Iluminación del Norte y del Oeste
Iluminación del Este	Sin iluminación natural	Iluminación del Oeste
Iluminación del Norte y del Este	Iluminación del Sur	Iluminación del Sur y del Oeste

Figura 1: Esquema en planta del edificio de la Facultad de Ingeniería.

Los datos para resolver el problema se tabulan a continuación.

Coefficiente de transferencia de calor para una pared de ladrillos de 0,25 m de espesor	$U=0.0212 \text{ Joule/s } m^2 \text{ K}$
Coefficiente de transferencia de calor para vidrio simple	$U= 6 \text{ Joule/s } m^2 \text{ K}$
Renovaciones de aire por día	$n_r= 5$
Tiempo de trabajo en las oficinas	$t_1 = 12 \text{ horas}$
Calor liberado por cada persona	70 joule/ s
Transmitancia del vidrio	0.86
Reflectancia	0.53
Numero de personas que trabajan en el edificio	80

El algoritmo calcula valores de G_{ov} en las cuatro orientaciones (norte, sur, este y oeste) utilizando valores medios para cada mes del año promediando valores horarios. Los $G_{ov} [W/m^2]$ correspondientes a la zona donde se encuentra el edificio integrados en todo el año son [122,35 52,6 96,7 108,44].

El algoritmo es construido en entorno de Mat. Lab., reportando buenas soluciones para distintos valores del vector inicial probado. El vector solución $q=(q_1,q_2,..,q_n)$ contiene en sus tres primeras componentes el área de ventana correspondiente al norte, las siguientes tres al sur, este y oeste respectivamente. Los porcentajes de área total de ventana encontrados para cada orientación son: 45% al norte, 14% al sur, 19% al este y 22% al oeste.

Estas soluciones muestran que en la dirección sur el área de ventana es menor que la de la orientación norte, sugiriendo la pertinencia del modelo aplicado a esta región del país.

RESULTADOS

La concentración de los costos de las soluciones encontradas en las distintas corridas induce a pensar que el algoritmo implementado es adecuado para la resolución del problema planteado.

Los tiempos de cómputos para el tamaño del problema abordado están en el orden de los segundos, no representando una limitación.

Los resultados indican que la estrategia presentada muestra buena capacidad de exploración y explotación de regiones atractivas del espacio de búsqueda dado que obtiene una solución de calidad con un esfuerzo computacional aceptable.

Estas características hacen que la implementación de meta-heurísticas basadas en la filosofía de búsqueda tabú empleada sea valorada como apropiada.

En la proyección de trabajos futuros se prevé considerar algunos criterios que reflejen más ajustadamente la realidad, como puede ser diferentes cambios en la orientación del edificio ó bien cambios en la forma del mismo. Considerar estas variables aumentará el grado de complejidad del modelo, introduciendo otras variables como ángulos de incidencia de radiación solar. Además podrían incorporarse la satisfacción de otros criterios de bienestar que no fueron incluidos, por ejemplo la incidencia en el cálculo, de montar parasoles.

CONCLUSIONES

El modelo permite calcular el costo energético óptimo de un edificio en un año, permitiendo determinar el área de ventana que optimiza el costo total energético de un edificio.

La aplicación del modelo puede realizarse en construcciones ya terminadas para ajustar gastos con el cambio de algunas variables, o bien, para realizar valoraciones en futuras construcciones.

En este trabajo consideramos como variables básicas para la optimización a la forma del edificio, tipo y área del material de aislamiento, tipo y área de las ventanas. En trabajos posteriores podría analizarse la influencia en el costo total que tiene el incorporar colectores solares y paneles fotovoltaicos.

NOMENCLATURA

A	Área
C	Costo
T_a	Temperatura ambiente
m	Mes del año
ξ	Reflectancia
τ	Transmitancia del vidrio
ε	Eficiencia de iluminación para cada orientación y división
G_{ov}	Irradiancia vertical global
$\Delta T \Delta t$	Grados día
η	Rendimiento del equipo refrigerador ó calefactor
n_r	Número de renovación
n	Dimensión del vector solución
$V \delta$	Volumen por densidad del aire
C_p	Calor específico del aire
n_p	Número de personas que circulan en el lugar
I	Calor por iluminación
Q	Calor
h	Calor liberado por cada persona
t_l	Tiempo de trabajo
U	Coefficiente de transferencia de calor global

Subíndices:

a	Aislamiento
ar	Artificial
c	Calefacción
cr	Cristal
D	Diseño
f	Funcionamiento
h	Habitación
i	Punto cardinal i=1 (este), i=2 (oeste), i=3 (norte), i=4(sur)

il	Iluminación
j	División de orientación
L	Lateral
n	Natural
p	Pared
r	Refrigeración
rad	Radiación
req	Requerido
t	Total
v	Ventana

REFERENCIAS

- Melián B., Moreno Pérez, J. y Moreno Vega, M. (2003). Metaheuristics: A global view. *Revista Iberoamericana de Inteligencia Artificial* 19, 7-28.
- Peippo, K., Lund, P.D. y Vartiainen, E. (1962). Optimización multivariable de diseño de edificios 4, 238-252.
- Glover, F. (1989) Tabú Search. *Journal on Computing*, 190- 206.
- Méndez, A., Pontín, M., Ziletti, M. y Carnero, M. (2005). Heurísticas para la resolución de un problema de ruteo de vehículos periódico real. *Mecánica Computacional XXIV*, 212.
- Kirkpatrick, A. y Winn, S. On optimal zone heating and energy conservation in passive solar buildings. (1986) *Solar Energy* 36 , 459–464.
- Johnson, R. Besant, W. Schoenau, G.J. Economic preferred window orientation and optimum fenestration design of a non-daylit and a daylit large office building for different climatic conditions. (1990) *ASHRAE Transactions* 96 1, 23–33.
- Duffie J. A. y Beckman W. A. (1991). *Solar Engineering of Thermal Processes*, 2ª edición, pp. 54-59. Wiley Interscience, New York.
- Fasulo, A. Barral, J. , Adaro, A. Lema, A. (1994) *Actas ASADES*, Tomo II, 503 -509

ABSTRACT: This paper presents a quantitative procedure for the optimum bioclimatic building design. The optimization process includes the use of heuristic techniques to find the optimal design of a building in terms of the energy and its cost. An efficient building design will be performed using strategies like passive solar heating, passive cooling and natural ventilation, and daylighting. Solar radiation is one of the most important contribution to the energy balance during the daytime. Utilization of daylight in buildings may result in significant savings in electricity consumption for lighting while creates a higher quality indoor environment. Additional energy savings may also be realized during cooling season, when reduction of internal heat gains due to electric lighting results in a corresponding reduction of cooling energy consumption. A case study that shows the applicability of this approach is presented. As a conclusion it is verified that the model is a valuable alternative for the efficient power design of buildings.

Keywords: Solar Design, Bioclimatic Design, Optimization, Energy Conservation.