

Otimização geométrica de superfícies de fachada para uso fotovoltaico

Geometric optimization of facade surfaces for use of photovoltaic

Virgínia C. Vannini

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

virvannini@gmail.com

Ernesto Bueno

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

ernesto.bueno@gmail.com

Benamy Turkienicz

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

benamy.turkienicz@gmail.com

ABSTRACT

This work describes a methodology to optimize solar incidence in photovoltaic facades of multi-floor buildings. The methodology identifies and parameterizes the building volume according to geometric principles of photovoltaic capture for all facades orientations. Initially, geometric modeling is made through an algorithm developed in a graphic-algorithm editor, Grasshopper – integrated with the modeling tool, Rhinoceros – then establishing the shape restrictions and variables. Secondly, twist and taper geometric transformation is correlated with solar incidence data through the interface of genetic platform, Galapagos. The results indicate that it's possible explore the method to obtain: optimal solutions, reduced design time and better energy performance.

KEYWORDS: optimization; photovoltaic facades; genetic algorithm; parametric design.

Introdução

Edifícios fotovoltaicos podem utilizar fachadas e coberturas para a captação de radiação solar. Há predomínio de sistemas fotovoltaicos nas coberturas, pois as superfícies horizontais possibilitam maior aproveitamento dos raios solares, com exceção de implantações nas extremidades dos Pólos Sul e Norte. Com a crescente verticalização das cidades, diminui-se a disponibilidade de grandes superfícies horizontais e a cobertura torna-se ineficiente como único meio de captação solar. Assim, as superfícies verticais, *fachadas*, oferecer potencial para a inserção de painéis fotovoltaicos (PV).

Métodos projetuais existentes voltados para a utilização de painéis fotovoltaicos, consideram a latitude e longitude local para o cálculo da inclinação dos painéis (Rüther, 2004). A inclinação média é definida pela correlação entre: ângulos anuais e diários de incidência solar e localização geográfica. Métodos projetuais tradicionais tomam como premissa determinante a inclinação média e a incorporam de maneira generalizada. Tais métodos fundamentam-se em processos empíricos, englobando estratégias e procedimentos de aproximação, mais

conhecidos como processos de tentativa e erro, deixando de explorar variantes geométricas da própria forma edificada.

Cheng (2009) propôs um algoritmo genético para a otimização de superfícies fotovoltaicas curvas, onde a melhor curvatura é gerada para adequar a posição das células fotovoltaicas ao projeto arquitetônico. Kämpf e Robinson (2010) desenvolveram uma metodologia para a otimização de formas edificadas urbanas através de um algoritmo evolutivo que, a partir da definição de parâmetros e restrições dimensionais, permite gerar soluções no plano horizontal (cobertura) otimizadas em diferentes cenários. A otimização fotovoltaica também foi abordada por Vannini (2011) através da aplicação de uma metodologia de projeto para a geração de superfícies de fachada fotovoltaica, vinculando a radiação solar com a forma de edifícios, utilizando softwares de modelagem geométrica, simulação da radiação solar e rendimento fotovoltaico.

A introdução de sistemas algorítmicos e paramétricos tem servido como base para abordagens sistemáticas e estruturadas (Meredith 2008) apoiando métodos que avaliam o impacto de variações e alternativas onde as

melhores soluções podem ser selecionadas. A escassez de métodos para geração de formas edílicas voltadas para a utilização de sistemas fotovoltaicos e a influência que esta utilização pode exercer sobre a concepção da forma dos edifícios, sugere o desenvolvimento de métodos projetuais voltados para soluções onde a tecnologia fotovoltaica deve ser ingrediente de estímulo à inovação arquitetônica. O desenvolvimento de métodos envolvendo a relação entre forma e tecnologia passa, necessariamente, por transformações na maneira de se pensar e produzir arquitetura. A representação manual passou a concorrer com práticas digitais proporcionadas pelos avanços tecnológicos das últimas décadas (Righi and Celani 2008). Inicialmente empregadas na representação gráfica, as ferramentas digitais, passaram a ser introduzidas como apoio a criatividade nas fases iniciais de concepção de projeto. O desenvolvimento tecnológico de materiais, técnicas construtivas e equipamentos vêm levando a produção do projeto arquitetônico a níveis de complexidade não experimentados (Kolarevic, 2003). Os níveis de complexidade originados em associações entre formas edificadas e sistemas funcionais vêm sendo absorvidos por métodos de projeto paramétrico, vinculando alterações da geometria como estratégia para otimizar o desempenho de edificações. Neste sentido, a utilização de algoritmos genéticos e sistemas evolutivos possibilitam a geração de múltiplas soluções de projeto vinculadas a critérios de aptidão – *fitness* – das alternativas a objetivos pré-fixados.

Este artigo descreve uma metodologia para otimização de superfícies de fachada, de modo a maximizar a incidência direta da radiação solar em edifícios de múltiplos pavimentos. O método proposto permite gerar soluções que aumentam o potencial energético de prismas regulares, transformando-os, iterativamente, na busca de indivíduos – aplicações fotovoltaicas – mais aptos para uma localização geográfica pré-estabelecida. Utilizando princípios geométricos de captação fotovoltaica geram-se soluções compositivas de fachadas, considerando a articulação das formas arquitetônicas, dos componentes fotovoltaicos e incidência solar. Este artigo divide-se em cinco

partes: otimização, materiais e métodos, resultados e discussões, conclusões e futuros desenvolvimentos.

Otimização

A otimização geométrica, tanto do ponto de vista estético como funcional, é um problema complexo da formulação matemática e algorítmica. Kolarevic e Malkawi (2005) afirmam que a otimização aponta frequentemente para soluções mais eficientes ou estruturalmente minimizadas. Os algoritmos utilizados para a solução e problemas de otimização podem ser determinísticos ou probabilísticos. Algoritmos determinísticos geram soluções possíveis requerendo na maioria das vezes a primeira derivada da função objetivo, em relação às variáveis de projeto. Os algoritmos probabilísticos utilizam a função objetivo introduzindo no processo dados e parâmetros aleatórios como, por exemplo, os algoritmos evolutivos.

Uma ferramenta computacional evolutiva utiliza um algoritmo probabilístico, que consiste na interação de uma população de indivíduos, aonde cada indivíduo representa uma solução do problema em questão (Alencar et al. 1997). Cada solução é avaliada, obtendo seu grau de aptidão e posteriormente selecionam-se os indivíduos mais aptos, gerando assim uma nova população. Alguns indivíduos da nova população sofrem transformações através de operações genéticas como mutações, cruzamentos, originando novas soluções. Assim, após algumas gerações ocorre a convergência em direção as soluções ótimas.

Materiais e métodos

Com o objetivo de testar a metodologia de projeto foram elaborados dois modelos, identificados como modelo A e modelo B [Fig. 1], de análise para a cidade de Porto Alegre – latitude 30,0°S e longitude 51,1°W. A altura atribuída para os modelos consiste em um edifício de 30 andares, contextualizando a viabilidade de aplicação do sistema fotovoltaico em fachadas, pois os edifícios de pequeno porte sofrem demasiadamente com o fator sombra, de modo a diminuir o rendimento dos painéis.

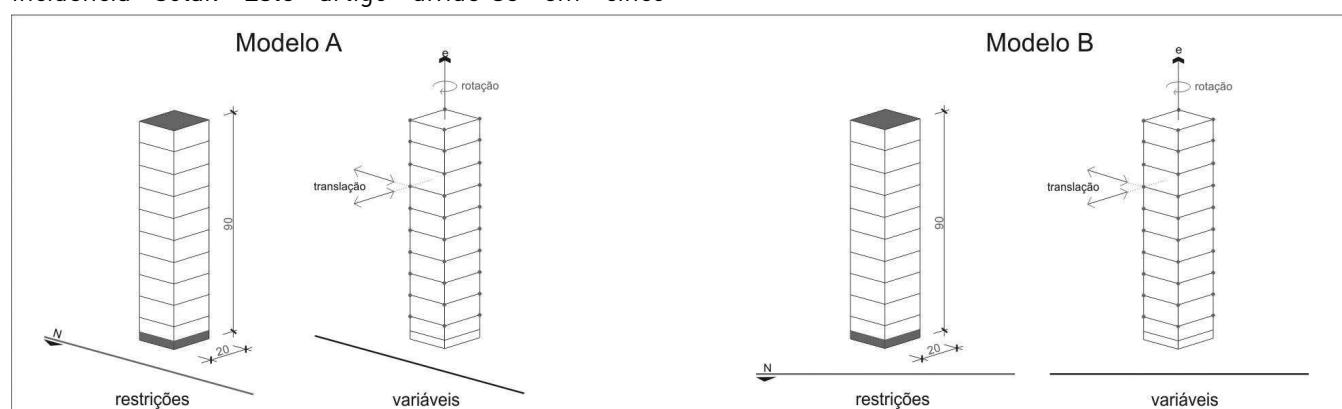


Fig. 1 Esquema gráfico das restrições e variáveis dos modelos A e B.

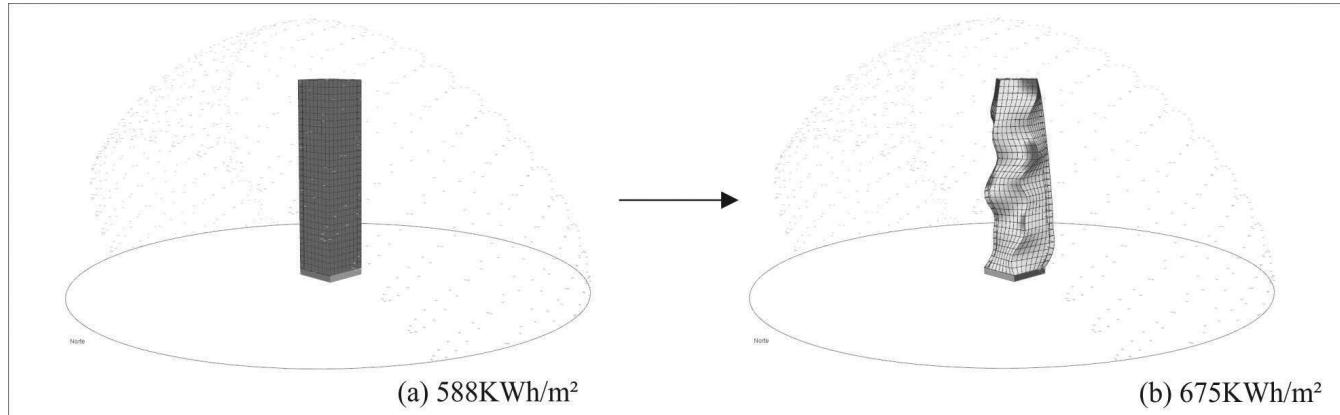


Fig. 2 Modelo elementar inicial (a) e modelo otimizado (b) perante as variáveis e restrições impostas pelo modelo A

O estudo de caso parte de um edifício elementar com base quadrada. Os dois modelos propostos diferenciam-se pelo posicionamento da base. Restringe-se a movimentação do primeiro pavimento, considerando o sombreamento de elementos de pequeno porte; e a partir do segundo pavimento as superfícies de fachada podem variar quanto à rotação e translação. A cobertura também não sofre manipulação do seu plano, e assim como o primeiro pavimento, não é computado no cálculo performático de radiação solar.

Utilizou-se a translação dos vértices do volume ao invés da translação de polígonos e empregou-se a rotação, propiciando movimentos de torção sobre o volume. Dentre as transformações geométricas: *taper*, *shear*, *twist*, *bending* (Pottmann et al. 2007), optou-se pela rotação tipo *twist* e translação dos vértices. Assim pode-se comprovar que duas transformações garantem variabilidade geométrica, podendo gerar *taper* e *shear*, além de diminuir o tempo de computação, tornando o processamento de dados eficaz. Utilizou-se o editor de algoritmos gráficos *Grasshopper* e a plataforma genética para aplicação de algoritmos evolutivos *Galapagos*, dentro do software de modelagem geométrica tridimensional *Rhinoceros*. A metodologia de projeto proposta integra os ambientes computacionais para resolver o problema da otimização de fachadas fotovoltaicas através de dois algoritmos: algoritmo de modelagem da geometria elementar (1) e um algoritmo de otimização de formas (2).

Algoritmo de modelagem da geometria elementar

O algoritmo de geração da geometria consiste na seguinte sequência:

1. Parte-se de um quadrado de 20 m de lado que, para o modelo A, está orientado ortogonal ao plano cartesiano e, para o modelo B, está rotacionado a 45° da orientação do modelo A.
2. Eleva-se o quadrado 3 m, juntando-o com o original com superfícies para formar as paredes do nível térreo.
3. Com translações verticais sequenciais gera-se um

conjunto de 30 quadrados espaçados na mesma altura, usada como pé direito constante da edificação.

4. A partir dos seus centros, os 30 quadrados são rotacionados gradativamente com valores que vão desde 0° até uma variável R que define a rotação do último andar, gerando uma transformação de torção no edifício que pode variar entre -90 e 90°.
5. Interpolam-se os vértices dos quadrados e as linhas resultantes se dividem em 10 partes iguais, identificando os subconjuntos de 11 pontos divisores como pontos de controle.
6. Com exceção dos primeiros pontos, aplica-se uma translação específica para cada um dos 10 pontos de controle restantes, para a qual se formatam oito listas (posteriormente identificadas como $T_{x1}, T_{y1} \dots T_{x4}, T_{y4}$) de 10 variáveis numéricas, delimitando os seus valores entre -3,0 e 3,0 m, que são atribuídas aos componentes x e y dos vetores de translação.
7. Os pontos de controle transladados são reordenados para construir cinco polígonos quadrangulares horizontais.
8. Os polígonos são interpolados com superfícies de transição, formando as fachadas volumétricas, que junto com as paredes do nível térreo e a superfície plana conformada pelo último polígono, descrevem a volumetria base do modelo de edificação do estudo.
9. Juntam-se as malhas num só elemento de saída.

Algoritmo de otimização de formas

Após o algoritmo de modelagem da geometria iniciar-se o processo de manipulação da forma através da radiação solar, buscando a maximização da radiação solar incidente nos planos de fachada:

1. Da malha poligonal preparada para análise, extraem-se as Normais dos seus vértices.
2. Calcula-se o conjunto de vetores da posição acumulativa do sol durante o ano, utilizando o algoritmo

de posição solar e determinando as informações geográficas, latitude e longitude.

3. Usando as Normais da malha e o conjunto de vetores de posição solar, aplica-se o cálculo da radiação incidente para cada vértice.

4. Acha-se a média de radiações incidentes da malha, identificando-a como função de aptidão F .

5. Aplica-se o algoritmo genético para maximizar o valor de fitness F , usando como genoma o ângulo de rotação final R e as listas de parâmetros de translação $T_{x1}, T_{y1} \dots T_{x4}, T_{y4}$.

Resultados e discussões

Modelo A

O modelo A partiu de uma forma elementar (Fig.2a), sem transformações geométricas e ortogonal ao plano cartesiano, com 588 KWh/m² de radiação solar incidente e após 350 gerações, a forma resultante (Fig.2b) consentiu 675 KWh/m² de radiação solar incidente diante as fachadas norte, sul, leste e oeste.

O resultado encontrado demonstra que as formas mais aptas tendem a convergir os planos para a direção norte, através da torção resultante dos 45 graus que o plano de cobertura rotacionou. Os vértices sofrem transformações quanto à escala, de modo que as superfícies norte, leste e oeste inclinaram-se em relação ao plano inicial da fachada. O modelo obteve um aumento de 13% na eficiência do edifício, determinando que as zonas fotovoltaicas mais propícias para implementação de PV são a fachada norte, leste e oeste; identificadas, pelos zonas: vermelhas, laranjas e amarelas. A fachada norte tem mais pontos ótimos, enquanto a fachada leste e oeste concentram a área mais otimizada no topo do edifício. A fachada sul possui as zonas com menor incidência solar, constatando que o uso de PV neste plano não é viável.

Modelo B

Partindo de uma forma elementar (Fig. 3a) rotacionada 45° em relação ao plano cartesiano (fachada norte) e com 609KWh/m² de radiação solar incidente foi possível alcançar após 350gerações, 675KWh/m² (Fig. 3b). Todas as fachadas são consideradas no cálculo de radiação, inclusive a fachada sul.

As restrições atribuídas ao modelo B permitiram um resultado mais otimizado que o modelo A, dentro do mesmo número de gerações. No entanto, o modelo B aumentou, somente, 10% o índice de radiação solar anual. Isso ocorreu devido à forma inicial estabelecida no modelo B ser mais eficiente que a forma inicial do modelo A. A base e o topo posicionados 45° em relação ao plano cartesiano, demonstram a tendência que as formas otimizadas têm em aumentar a área exposta ao quadrante Norte. As áreas mais aptas para o sistema fotovoltaico localizam-se em zonas próximas a cobertura e aonde os vértices sofrem transformações de modo a inclinar os planos para pontos externos à geometria elementar, como as cores quentes demonstram na Fig.3.

Conclusões

A crescente busca por soluções energeticamente eficientes requer mudanças na maneira de pensar e produzir arquitetura. A metodologia para otimizar incidência solar em fachadas fotovoltaicas, através de algoritmo genético demonstra o potencial que métodos de otimização podem ter no processo projetual, disponibilizando ferramentas paramétricas que auxiliam na tomada de decisões e exploração de formas. O método apresentado utilizou a translação dos vértices para manipular a geometria pontualmente e a rotação para transforma a geometria elementar, promovendo variabilidade geométrica e eficiência energética. Comparado com a metodologia de Vannini (2011) que utilizou três transformações geométricas e gera formas empiricamente, a presente metodologia utiliza: a) duas transformações geométricas, resultando em menos computação e b) avalia a manipulação de formas integrada a uma plataforma algorítmica para a geração de formas.

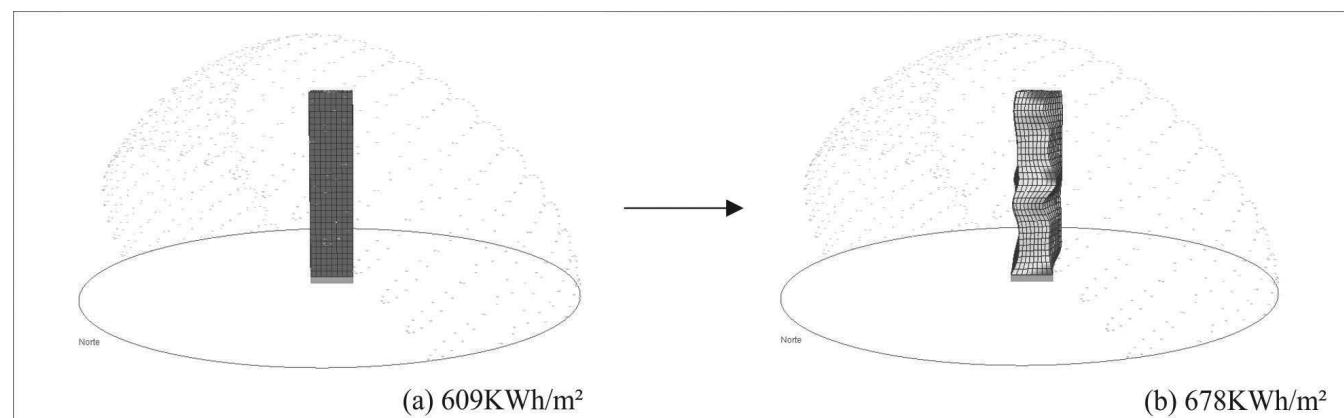


Fig. 3 Modelo elementar inicial (a) e modelo otimizado (b) perante as variáveis e restrições impostas pelo modelo B

Futuros desenvolvimentos

A radiação solar incidente poderia ser aprimorada através do uso de transformações geométricas em menor escala. Ou seja, a partir de uma forma de edifício eficiente, explorar a inclinação de cada painel de modo a otimizar ainda mais o sistema. Trabalhos futuros no campo de conforto térmico e acústico também poderiam aperfeiçoar o método para geração de formas. Restrições e variáveis vinculadas aos materiais e suas características performáticas poderiam ser consideradas de modo a criar zonas fotovoltaicas, zonas de fechamento opaco, zonas translúcidas e zonas de ventilação, aberturas. Explorar formas orgânicas, de modo a inserir a cobertura como meio de captação fotovoltaica, incluindo outros parâmetros, como: entorno edificado e elementos urbanos que possam causar sombra nos painéis, características dos módulos fotovoltaicos, entre outros.

Referências

Alencar, P. F. Ribeiro A. V. R. Freitas, M. A. S. 1997. Modelos Computacionais Baseados na Biologia: Algoritmos Genéticos e Redes Neurais Artificiais. Revista Tecnologia Fortaleza, 92 (18), 92-98.

Kolarevic, B. 2003. Architecture in the digital age: design and manufacturing. New York: Taylor & Francis.

Kolarevic, B. e Malkawi, A. M. 2005. Performative Architecture – Beyond Instrumentality. New York: Spon Press.

Meredith, M. 2008. From Control to Design: Parametric/Algorithmic Architecture. Barcelona: Actar-D.

Pottmann, H. Asperl A. Hofer, M. e Kilian, A. 2007. Architectural Geometry. Bentley Institute Press. (pp.454-458)

Righi, T. e Celani, G. 2008. Esboços na era digital – Uma discussão sobre as mudanças na metodologia de projeto arquitetônico. Congresso Iberoamericano de gráfica digital SIGRADI, 44 (104), 1-5.

Rüther, R. 2004. Edifícios solares fotovoltaicos. Florianópolis: UFSC.

Vannini, V. 2011. A otimização da forma para captação de radiação solar sobre superfícies de edifícios: um exercício de integração entre os programas Rhinoceros e Ecotect. Porto Alegre: Dissertação UFRGS (pp. 57-74).