

# Modelagem generativa integrada à eficiência energética: estudo da otimização da forma de edificações institucionais

## Generative modeling integrated to energy efficiency: A study of institutional buildings form optimization

Natália Nakamura Barros<sup>1</sup>

Universidade Estadual de Campinas

natalianakamura.arq@gmail.com

Joyce Correna Carlo<sup>2</sup>

Universidade Federal de Viçosa

joycecarlo@ufv.br

**RESUMO** – Sabe-se que decisões tomadas nos estágios iniciais de projeto arquitetônico têm impacto significativo na eficiência energética e desempenho interno dos edifícios. Um processo de projeto que utilize como parâmetros os conceitos de eficiência energética desde as etapas iniciais, pode acelerar o processo de criação agregando valor ao projeto, além de contribuir de maneira eficiente para o bem-estar do usuário e melhoria do meio ambiente. O objetivo deste artigo é verificar o potencial permitido pela integração da etiquetagem à modelagem generativa, através da otimização da forma integrada ao método prescritivo de desempenho energético da envoltória do Programa Brasileiro de Etiquetagem de edifícios do Inmetro, o PBE Edifica. Para isso, utilizou-se a equação do Indicador de Consumo do RTQ-C para a zona bioclimática 3 no item envoltória, aplicada ao estudo de edificações institucionais. Inicialmente, foi realizada a programação de uma forma inicial paralelepípedica utilizando os programas Rhino/Grasshopper. As variáveis do modelo foram definidas de acordo com a equação do método prescritivo do RTQ-C, sendo estas: comprimento, largura e altura da edificação, altura das aberturas, fator solar dos vidros e ângulo vertical de sombreamento das proteções solares horizontais. A evolução automatizada foi utilizada para gerar a melhor forma que se adeque aos parâmetros de eficiência energética. Outras possibilidades volumétricas foram também estudadas, sendo estas: multiplicação horizontal, multiplicação vertical com rotação e multiplicação vertical de forma única. A partir da aplicação do método tradicional proposto pelo RTQ-C, verificou-se que as volumetrias obtiveram nível de eficiência A, o que comprova a viabilidade do método proposto. Deste modo, pode-se perceber as potencialidades da modelagem generativa aliada à eficiência energética, que pode revolucionar o modo de projetar do arquiteto preocupado com as questões ambientais.

**Palavras-chave:** modelagem generativa, RTQ-C, eficiência energética.

**ABSTRACT** – Decisions making in architectural design early stages have a significant impact on energy efficiency and internal performance of buildings. A design process that utilizes energy efficiency parameters in early stages can accelerate the creation process and adding value to the design, as well as contributing to user well-being and environment improving. The purpose is verify the potential integration generative modeling to energy efficiency, through the form optimization integrated to Inmetro PBE Edifica prescriptive method of envelope energetic performance. Therefore, an equation of RTQ-C Consumption Indicator for bioclimatic zone 3 applied to study of institutional buildings. Initial parallelepiped form was programming in Rhino / Grasshopper software. The variables was defined according to RTQ-C prescriptive method equation, such as building length, width and height, openings height, glasses solar factor and vertical shading angle. The genetic algorithm used to generate the best form to meet energy efficiency parameters. Other volumetric possibilities were studied, being these: horizontal multiplication, vertical multiplication with rotation and vertical multiplication of unique form. The forms obtained the efficiency level A from RTQ-C traditional method application, which proves a viability of proposed method. In this way, it is possible to perceive the potentialities of generative modeling integrated to energy efficiency, which can revolutionize the architect design.

**Keywords:** generative modeling, RTQ-C, energy efficiency.

<sup>1</sup> Universidade Estadual de Campinas. Rua Saturnino de Brito, 224, Cidade Universitária Zeferino Vaz, 13083-889, Campinas, SP, Brasil.

<sup>2</sup> Universidade Federal de Viçosa. Av. Peter Henry Rolfs, s/n, Campus Universitário, 36570-900, Viçosa, MG, Brasil.

## Eficiência energética no processo projetual

Sabe-se que decisões tomadas nos estágios iniciais de projeto arquitetônico têm impacto significativo na eficiência energética e desempenho interno dos edifícios (Pollock *et al.*, 2009). A avaliação energética de edifícios estendida ao projeto, construção e vida útil, permite uma quantificação adequada das implicações de energia do edifício e portanto, fornece a base para o planejamento adequado no setor (Casals, 2006). Assim, vê-se a importância da eficiência energética como um requisito para se alcançar a sustentabilidade, cujo grande potencial de aplicação em novos edifícios depende de inovação e desenvolvimento de melhorias nos modos de projetar.

As questões ambientais são alvo de crescente preocupação da população, principalmente em relação ao consumo de energia. No Brasil, a questão da eficiência energética se oficializou em 2001, quando foi sancionada uma primeira lei federal que visa alocação eficiente de recursos energéticos e a preservação do meio ambiente (Brasil, 2001). Além disso, em 2009, foi publicado o Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos (RTQ-C), atualmente Requisitos Técnicos (Inmetro, 2010), como parte do Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE) do Inmetro, o que evidenciou a importância do uso da energia em edificações.

De acordo com o RTQ-C, o nível de eficiência é classificado com base em três sistemas individuais: envoltória, sistema de iluminação e sistema de condicionamento de ar. Todos os sistemas individuais têm níveis de eficiência que variam de A (mais eficiente) a E (menos eficiente). A avaliação de eficiência energética de edificações pode ser realizada por dois métodos: o método prescritivo e o método de simulação (Inmetro, 2010), sendo o primeiro desenvolvido com base em mais de 5000 simulações que, posteriormente, originaram os critérios do segundo (Carlo e Lamberts, 2008).

Em um projeto de edifício, onde o número de variáveis e problemas a serem considerados é elevada, os recursos computacionais são bem-vindos para auxiliar a tomada de decisões. Nesse sentido, a simulação termo energética paramétrica é bastante praticada na solução de problemas arquitetônicos e de engenharia relacionados ao conforto e à eficiência energética (Carlo e Lamberts, 2008).

A integração da simulação no processo de projeto arquitetônico é desejada, mas ainda precisa evoluir (Venâncio *et al.*, 2011). Ao contrário da postura de simplificação do processo de simulação devido às limitações tecnológicas, que prejudicaria a qualidade do produto edifício, a investigação desta integração deve abranger os processos mais avançados de desenvolvimento de projeto a fim de se encontrar uma solução satisfatória em termos de qualidade arquitetônica, seja estética ou tecnologicamente.

## Modelagem paramétrica

Com o advento das novas tecnologias, o processo projetual de um edifício tem sofrido grandes modificações. A ferramenta bidimensional tradicional já não consegue atender às novas exigências do mercado atual que, muitas vezes, é atraído por edifícios cujas formas cada vez mais complexas se destacam na paisagem (Arantes, 2012), aliado aos aspectos sustentáveis do ponto de vista energético.

Apesar do grande desenvolvimento de novas tecnologias, o modo de projetar do arquiteto ainda provém de métodos antigos, como a representação a partir de plantas, fachadas e cortes. As novas tecnologias, aos poucos, estão modificando esse perfil no projetar e trazendo novas possibilidades ao arquiteto, que pode utilizar-se das tecnologias digitais de modelagem e simulação, desde as etapas iniciais de projeto, para gerar edifícios cada vez mais sustentáveis (Kolarevic, 2005).

Na década de 1950, foi elaborada uma nova definição de gramática formada por um vocabulário constituído de palavras ou símbolos e um conjunto de regras que especificavam a combinação desses elementos, compondo assim uma linguagem, denominada gramática generativa. A partir dessa teoria, foi desenvolvida na década de 1970, a metodologia da gramática da forma, que constituiu a substituição dos símbolos por elementos gráficos, como linhas e pontos. Desse modo, as regras para a construção de frases foram substituídas por regras capazes de gerar composições baseadas em um vocabulário de formas primitivas e suas relações espaciais (Mitchell, 2008).

De acordo com Mitchell (2008), existem os seguintes grupos de transformação aos quais a forma pode ser submetida: verdadeiramente isométricas (translação e rotação), isométricas ou rígidas (espelhamento), similaridade (escala), afins (estiramento e projeção paralela), deformativa (projeção puntiforme).

A gramática paramétrica consiste em uma “variação da gramática da forma, na qual uma regra parametrizada equivale a um conjunto de regras” (Vaz *et al.*, 2011, p. 133). De acordo com Vaz *et al.* (2011), a gramática da forma é capaz de tornar inteligível o processo de concepção da forma através de uma abordagem de ensino não subjetiva: pela análise de regras, que torna claro os processos de elaboração de uma linguagem projetual. Tal gramática, quando parametrizada, é capaz de gerar uma grande variedade de resultados (Celani e Pupo, 2008).

A modelagem paramétrica consiste, deste modo, no agrupamento das milhares de partes individuais de um edifício e suas conexões, em componentes constituídos por parâmetros, de modo a facilitar a manipulação de acordo com a necessidade do usuário. As diferentes conexões podem ser testadas sem a necessidade de recomeçar do início, através da alteração dos parâmetros, permitindo-se a obtenção de diferentes resultados a fim de serem comparados. As relações entre os elementos e a hierarquia

são codificadas pelo próprio arquiteto e, assim, o projeto se torna o resultado de um número de condições pré-estabelecidas que irão gerar a forma final (Florio, 2009).

Para atendimento a tais demandas de modelagem, alguns programas computacionais têm como objetivo a geração de modelos tridimensionais a partir de parâmetros introduzidos pelo utilizador, como Rhinoceros (RH) e Grasshopper (GH). O Rhinoceros é um programa de modelagem tridimensional NURBS, que são descrições matemáticas que permitem um elevado grau de precisão, com a flexibilidade na modelagem de forma livre. O RH permite a edição, análise, documentação e modelagem de vários tipos de geometrias, e seu aprendizado é rápido e intuitivo. Daí ser crescente a sua utilização em escolas de arquitetura, design e animação.

Já o Grasshopper (GH) é um plug-in do RH, e consiste em um editor gráfico de algoritmos que permite gerir um fluxo de informação necessário à geração de formas, aceitando porém outros scripts. O GH permite criar algoritmos intuitivamente, onde a informação é modelada através da ligação de parâmetros, que contêm informação e componentes que agem sobre esta (Coutinho *et al.*, 2012).

### Algoritmo genético

O uso da modelagem paramétrica, porém, apresenta um entrave: qual será “a seleção da solução mais eficaz para resolver um problema, entre muitas que são possíveis de gerar em um reduzido espaço de tempo?” (Lagos, 2012, p. 48, tradução nossa). Uma das ferramentas utilizadas para encontrar a solução mais apropriada é o algoritmo genético, que consiste em um método de programação adaptativo utilizado para resolver problemas de busca e de otimização. “Sua estratégia está baseada nos processos evolutivos dos organismos vivos” (Poblete, 2010, p. 22, tradução nossa). A partir desta ferramenta, é possível escolher o modelo de edifício que melhor se adequa às exigências do clima, do local e do usuário.

São chamados assim porque se inspiram na evolução biológica e sua base genética molecular. Estes algoritmos modificam um conjunto de dados de maneira similar a uma população de indivíduos sujeitando a ações seletivas semelhantes à evolução biológica (mutações e recombinações genéticas), assim como também uma evolução de acordo com algum critério, em função do qual se decide quais são os indivíduos mais adaptados, que sobrevivem, e quais são os menos aptos, que são descartados (Lagos, 2012). O Galapagos é um programa de evolução automatizada integrado ao Rhino/Grasshopper. As variáveis são denominadas genes, cromossomos são séries de parâmetros ou valores, e população é o conjunto de potenciais soluções. Assim, os genes são combinados entre si e cada um deles passa a ter um fitness, ou uma qualidade desejada.

Os processos generativos pré-formulados, como o processo evolutivo baseado em algoritmos genéticos

permite a geração da forma integrada à busca por um desempenho desejado. Esse processo denomina-se projeto generativo baseado em desempenho, que pode ser ambiental, estrutural, acústico, local, dentre outros. Neste tipo de modelo, dados de simulações conduzem a geração e/ou os processos de formação de modo a gerar a forma (Oxman, 2006).

Os algoritmos genéticos estão entre as técnicas algorítmicas mais populares aplicadas aos problemas de otimização de edificações. No entanto, as aplicações de otimização de construção em desafios de projeto do mundo real ainda estão no início do desenvolvimento. Há uma grande quantidade de programas de simulação de edificações e de ferramentas de otimização, mas também há muitos obstáculos nas estratégias de usabilidade, flexibilidade e eficiência (ou seja, em termos de tempo e melhoria de desempenho) que inibem parcialmente a propagação de técnicas de otimização na prática de projeto (Nguyen *et al.*, 2014).

### Estudos correlatos

Um método que permite a otimização da forma para integrar a eficiência energética de edificações desde as etapas iniciais do projeto está em discussão por diversos autores. Trubiano *et al.* (2013) desenvolveram um fluxo de trabalho que arquitetos e engenheiros podem utilizar no processo projetual de um edifício, para gerar volumes com proporções geométricas capazes de responder às demandas ambientais de energia e luz. Eles propuseram a combinação de quatro ferramentas paramétricas: Rhinoceros/Grasshopper, EnergyPlus, Radiance e Algoritmos Genéticos. Sherif *et al.* (2013) verificaram diferentes proteções solares em um edifício no Cairo, Egito, e simularam o nível de iluminância no Daysim através de um plugin do Rhinoceros, denominado Diva-for-Rhino. A importância e benefícios da integração do Rhino com o Daysim proporcionada por esse plugin foram mostrados por Jakubiec e Reinhart (2011), tal como a automatização do processo de simulação.

Camporeale e Czajkowski (2015) utilizaram o algoritmo genético para otimizar a geometria de um edifício alto com múltiplos usos, localizado na cidade de Buenos Aires, conforme os índices bioclimáticos de aquecimento e refrigeração para dias típicos de inverno e verão respectivamente. Para tal, utilizaram as ferramentas Rhino/Grasshopper e o Galapagos. Estas ferramentas revelaram-se eficazes para projetar e otimizar soluções arquitetônicas para arranha-céus, oferecendo ao projetista maior liberdade formal ao considerar eficiência energética de edificações.

Jin e Jeong (2014) propuseram um processo de otimização de um modelo de construção de forma livre com base em algoritmo genético, em termos de características de carga térmica para várias zonas bioclimáticas. A fachada do modelo foi dividida em elementos finitos,

gerando uma malha no Rhino/Grasshopper. A informação geométrica foi extraída de cada elemento finito e utilizada para estimar o ganho de calor e características de perda de todo o edifício.

No Brasil, o tema é incipiente, e são poucos os grupos de pesquisa que tratam sobre ele, apesar de sua grande relevância (Celani e Pupo, 2008). Com relação ao desempenho energético, Vannini (2011) realizou um estudo de integração entre os programas Rhinoceros e Ecotect para otimização da forma para captação da radiação solar sobre superfícies de edifícios. Fonseca *et al.* (2017) desenvolveram uma pesquisa a partir da aplicação da otimização baseada no método de simulação do RTQ-R (Inmetro, 2012), de uma edificação residencial unifamiliar localizada na Zona Bioclimática 3, com o objetivo de encontrar a composição que apresentasse o melhor desempenho térmico com o menor custo dos materiais construtivos. Para tal, foram utilizados os programas Rhinoceros e Energy Plus, além de plug-ins para modelagem paramétrica, o intercâmbio de informações entre os programas e a condução da otimização. Concluíram que, apesar das limitações de algumas das ferramentas, foi verificado um grande potencial de aplicação deste método no desenvolvimento de projetos arquitetônicos.

Outro estudo realizado por Santana *et al.* (2015) utilizou o método prescritivo do RTQ-R (Inmetro, 2012) para explorar tendências de desempenho em decorrência da forma. Uma linguagem inicial para criação de uma gramática da forma foi observada, o que reduziu o tempo de investigação em relação a simulações computacionais completas. Os resultados indicaram a sensibilidade da equação da Zona Bioclimática 3 à forma da edificação, principalmente durante o verão brasileiro.

Estudos ainda são raros, e grande parte deles consiste na modelagem do edifício no Rhino-Grasshopper e posterior simulação termo-energética para avaliação de desempenho do modelo final. Celani e Pupo (2008) mostram que o papel da universidade é introduzir novas tecnologias no ensino e na pesquisa, de maneira a preparar os jovens arquitetos a uma nova realidade profissional, na qual a tecnologia está presente cada vez mais nas diversas etapas do projeto.

## Objetivo e método

O objetivo principal da pesquisa é verificar o potencial permitido pela integração da etiquetagem à modelagem generativa, através da otimização da forma integrada ao método prescritivo de desempenho energético da envoltória do Programa Brasileiro de Etiquetagem de edifícios do Inmetro, o PBE Edifica.

Para atingir o objetivo proposto seguiu-se as seguintes etapas:

- Parametrização da forma no programa Rhinoceros/Grasshopper com uso das variáveis da equação

do método prescritivo do RTQ-C (Inmetro, 2010) para a Zona Bioclimática 3;

- Otimização da forma condicionada ao desempenho energético por meio da evolução automatizada, através do plug-in do Rhinoceros, Galapagos; e
- Análise dos resultados formais encontrados.

A forma inicial foi programada no Grasshopper e visualizada no Rhinoceros. As variáveis do modelo foram definidas de acordo com a equação da envoltória do método prescritivo do RTQ-C (Inmetro, 2010), sendo estas: comprimento, largura e altura da edificação – que fornecem o fator de forma e o fator altura -, altura das aberturas, fator solar dos vidros e ângulo vertical de sombreamento das proteções solares horizontais. O ângulo horizontal de sombreamento, referente a proteções verticais, não foi utilizado no modelo.

Em seguida, foram verificadas outras possibilidades de otimização da forma inicial, cuja complexidade da forma aumentou gradativamente.

## Obtenção do indicador de consumo

A equação que regeu a otimização da forma pelo plug-in Galapagos, foi a equação para a envoltória do RTQ-C (Inmetro, 2010). O regulamento distribui a pontuação que define a eficiência em pesos de 30% para envoltória, 30% para o sistema de iluminação e 40% para o sistema de condicionamento de ar. Portanto, as características arquitetônicas apresentam um peso significativo no nível de eficiência final da edificação.

O item envoltória é composto de pré-requisitos para as aberturas zenitais e componentes opacos, enquanto as suas equações de desempenho referem-se a aberturas verticais envidraçadas e estão relacionadas à volumetria do edifício. A Equação 1 refere-se a edifícios cuja área de projeção é maior que 500 m<sup>2</sup> e que estejam localizados na Zona Bioclimática 2 ou 3, como as cidades de São Paulo, SP e Belo Horizonte, MG, ambos da ZB3 (Carlo e Lamberts, 2010).

$$IC_{env} = -14,14.FA - 113,94.FF + 50,82.PAFT + 4,86.FS - 0,32.AVS + 0,26.AHS - 35,75/FF - 0,54.PAFT.AHS + 277,98 \quad (1)$$

Onde:

- IC é o indicador de consumo, variável adimensional, usada para calcular o nível de eficiência da envoltória em uma escala pré-determinada pelo regulamento;
- AVS é o ângulo vertical de sombreamento, entre 0 e 45° (graus);
- AHS é o ângulo horizontal de sombreamento, entre 0 e 45° (graus);

- FF (Aenv/ Vtot) é o fator de forma, definido pela razão da área da envoltória e o volume total da edificação;
- FA (Apcob/ Atot) é o fator altura, definido pela razão da área de projeção da cobertura pela área total de piso da edificação;
- FS é o fator solar;
- PAFT é o percentual de abertura na fachada total (formato decimal para uso na equação).

O indicador de consumo da envoltório (ICenv) obtido deve ser comparado a uma escala numérica dividida em intervalos que descrevem um nível de classificação de desempenho que varia de A a E. Quanto menor o indicador obtido, mais eficiente será a envoltória da edificação. Para tal, os seguintes procedimentos devem ser realizados: (i) cálculo do indicador máximo que a edificação deve atingir para obter a classificação D (ICmáxD), por meio da equação do ICenv, com os parâmetros de entrada: PAFT = 0,60,

FS = 0,61, AVS = 0 e AHS = 0; (ii) cálculo do indicador de consumo mínimo para aquela volumetria (ICmín) por meio da equação do ICenv, com os parâmetros de entrada: PAFT = 0,05, FS = 0,87, AVS = 0 e AHS = 0; (iii) os limites ICmáxD e ICmín representam o intervalo dentro do qual a edificação proposta deve se inserir. O intervalo é dividido em 4 partes (x), cada parte se refere a um nível de classificação numa escala de desempenho que varia de A a E, conforme a Tabela 1; (iv) comparar o ICenv obtido com os limites da tabela e identificar o nível de eficiência do projeto em questão (Inmetro, 2010).

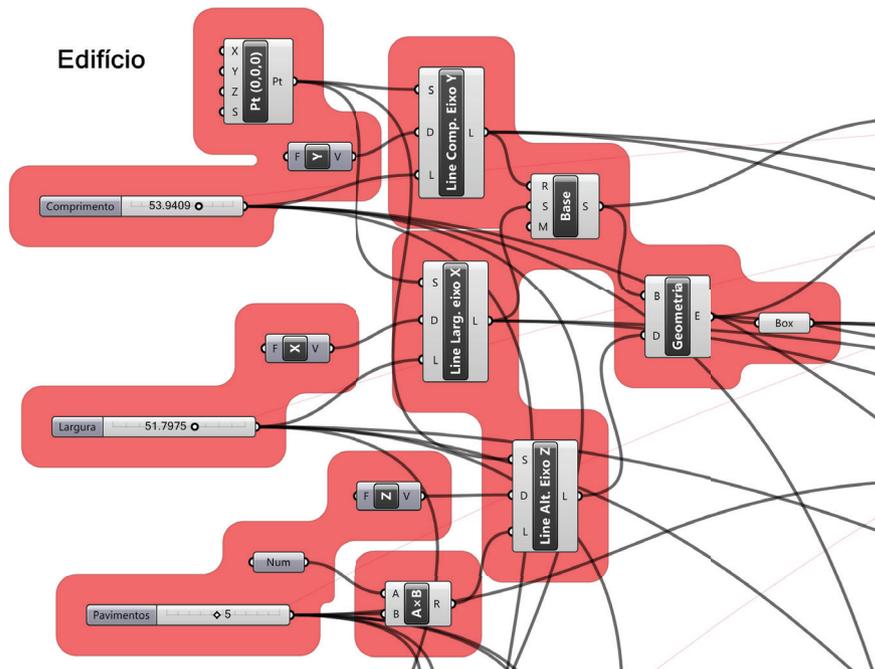
**Modelagem generativa**

Primeiramente, foi realizada a programação da forma do edifício no Grasshopper. O comprimento e a largura do edifício foram inseridos através do componente de variador numérico unidimensional, em um intervalo de variáveis discretas de 22,3607 a 70. O menor valor decimal

**Tabela 1.** Limites dos intervalos dos níveis de eficiência.  
**Table 1.** Efficiency level range limits.

Eficiência	A	B	C	D	E
Lim Mín	-	$IC_{máxD} - 3x + 0,01$	$IC_{máxD} - 2x + 0,01$	$IC_{máxD} - x + 0,01$	$IC_{máxD} + 0,01$
Lim Máx	$IC_{máxD} - 3x$	$IC_{máxD} - 2x$	$IC_{máxD} - x$	$IC_{máxD}$	-

Nota: Sendo,  $x = (IC_{máxD} - IC_{mín})/4$ .  
Fonte: Inmetro (2010).



**Figura 1.** Modelagem Paramétrica da Forma no Grasshopper.  
**Figure 1.** Parametric Shape Modeling in Grasshopper.

deve-se à área mínima aceita pela Equação 1 ser de 500 m<sup>2</sup>, sendo que  $(22,3607)^2 \cong 500$ . O número de pavimentos da edificação também foi inserido a partir deste componente, em um intervalo de variáveis discretas de 1 a 10 (Figura 1), considerando uma altura padrão de pavimentos de 3 metros.

A partir desta forma inicial foram geradas a área e o volume da edificação para o cálculo do Fator de Forma (área da envoltória/volume total) e as áreas para o cálculo do Fator de Altura (área da cobertura/área total do piso). Em relação ao Fator de Forma há uma ressalva, o RTQ-C (Inmetro, 2010) cita que para a aplicação da Equação 1 é necessário que o FF mínimo seja de 0,15. Deste modo, foi feito um componente de C# script contendo a Equação 2, conforme Figura 2.

$$A = x ? T : F \quad (2)$$

Onde:

- A = valor a ser considerado;
- x = proposição condicional (se  $x < 0,15$ );
- T = verdadeiro, caso a proposição seja verdadeira, o valor adotado será de 0,15; e
- F = falso, caso a proposição seja falsa, o valor adotado será o FF.

As aberturas foram inseridas nas quatro fachadas do modelo, distando 1 m (um metro) entre si com largura constante. Já a altura das aberturas variou de 0,24 a 24 m, cujo valor é determinado pelo componente de variador numérico unidimensional, que controla a altura de todas as aberturas da edificação. Portanto, qualquer que seja a altura determinada na modelagem, ela é a mesma para todas as aberturas.

Para que a altura das aberturas não ultrapassasse a altura da edificação, foi inserido um componente de C# script (Figura 3), utilizando a equação 2. No entanto, a proposição condicional é: se  $x < \text{altura do edifício}$ , o valor adotado será a altura da abertura; se falso, o valor adotado será a altura do edifício menos dois metros.

A área das aberturas e das fachadas foi calculada para obtenção do Percentual de Aberturas da Fachada Total

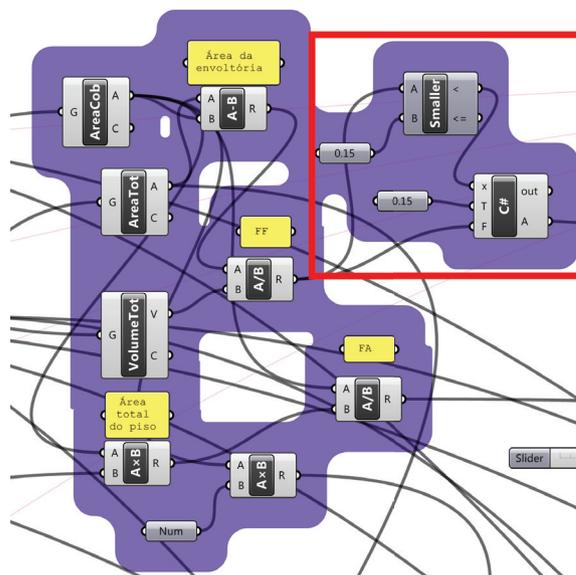


Figura 2. Cálculos FF e FA, com destaque para a proposição condicional.

Figure 2. Calculations of FF and FA, with conditioning proposition highlighted.

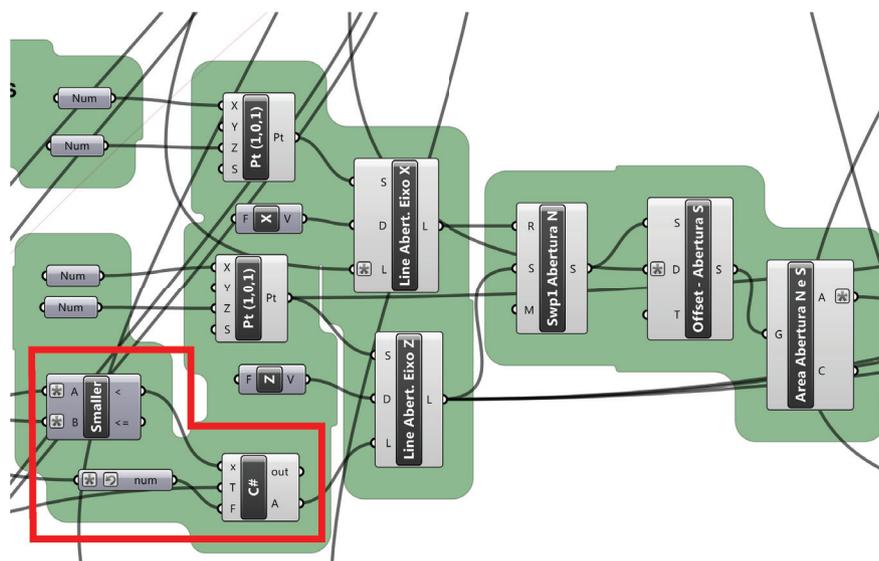
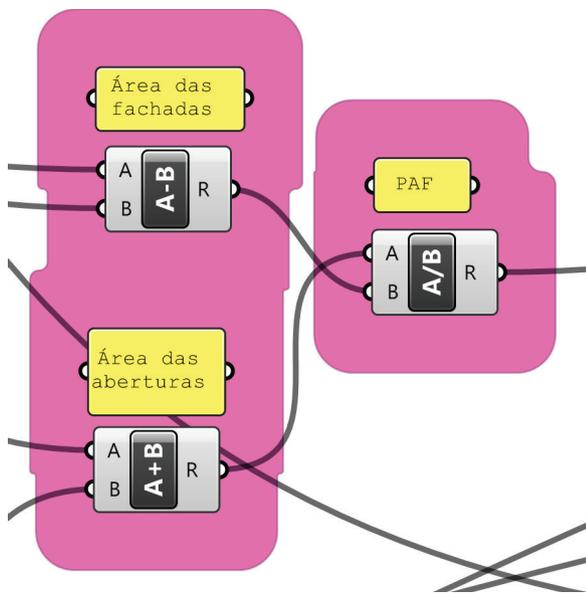


Figura 3. Modelagem das Aberturas com destaque para o componente condicionante.

Figure 3. Glazing Modeling with the conditioning component highlighted.

(área das aberturas/área das fachadas), conforme Figura 4. Para o Fator Solar, foi inserido um componente de variador numérico unidimensional, variando de 0,17 a 0,87, cujo intervalo foi definido de acordo com a disponibilidade dos vidros no mercado brasileiro. Proteções horizontais foram inseridas na parte superior de todas as aberturas da edificação. Sua profundidade está condicionada ao ângulo vertical de sombreamento, que varia de 0 a 45° no RTQ-C (Inmetro, 2010).

Esta modelagem resultou em uma volumetria inicial paralelepípedica (Figura 5), com as seguintes variá-



**Figura 4.** Cálculo do PAF.  
**Figure 4.** Calculation of PAF.

veis: largura, comprimento, número de pavimentos, altura das aberturas, fator solar dos vidros e ângulo vertical de sombreamento das proteções solares horizontais. Por fim, a equação do Índice de Consumo (Equação 1) foi inserida através do componente C# script, tendo como variáveis de entrada os valores de FF, FA, FS, PAF e AVS, e como variável de saída, o IC.

### Evolução automatizada

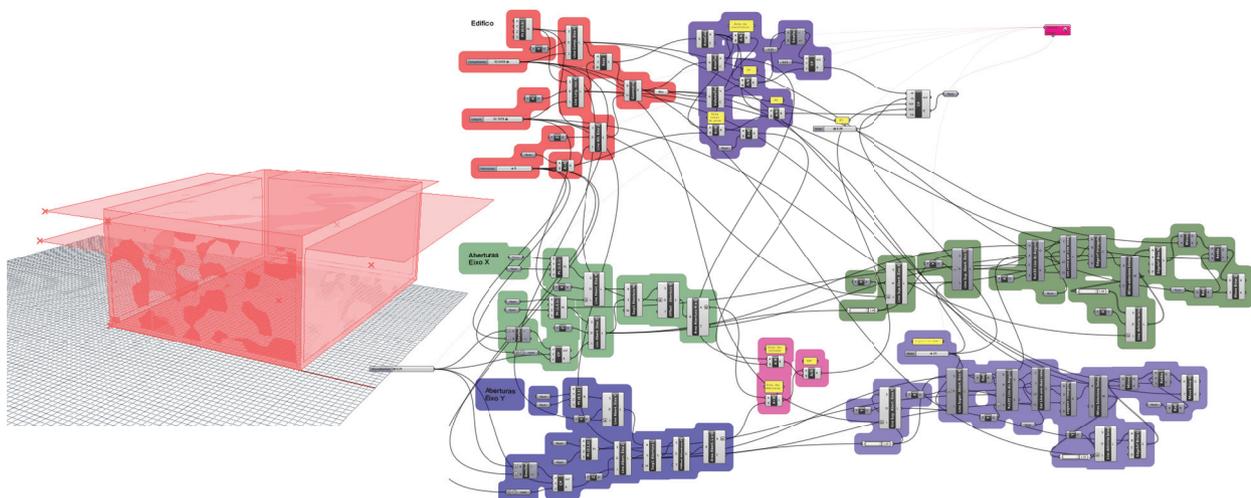
A evolução automatizada do modelo foi realizada por meio do plugin Galapagos para gerar a melhor forma que se adequasse aos parâmetros de eficiência energética para a zona bioclimática 3. A partir da aplicação do algoritmo genético foi possível obter a forma com o menor ICenv, pois deste modo a envoltória do edifício se aproximava do nível de eficiência A.

Em seguida, foram estudadas outras possibilidades volumétricas com intervenção do simulador, visto que era esperado que a equação do RTQ-C para esta volumetria inicial básica iria tender a uma volumetria muito simplificada. Três testes com aumento gradativo da complexidade da forma foram executados, conforme descrito a seguir.

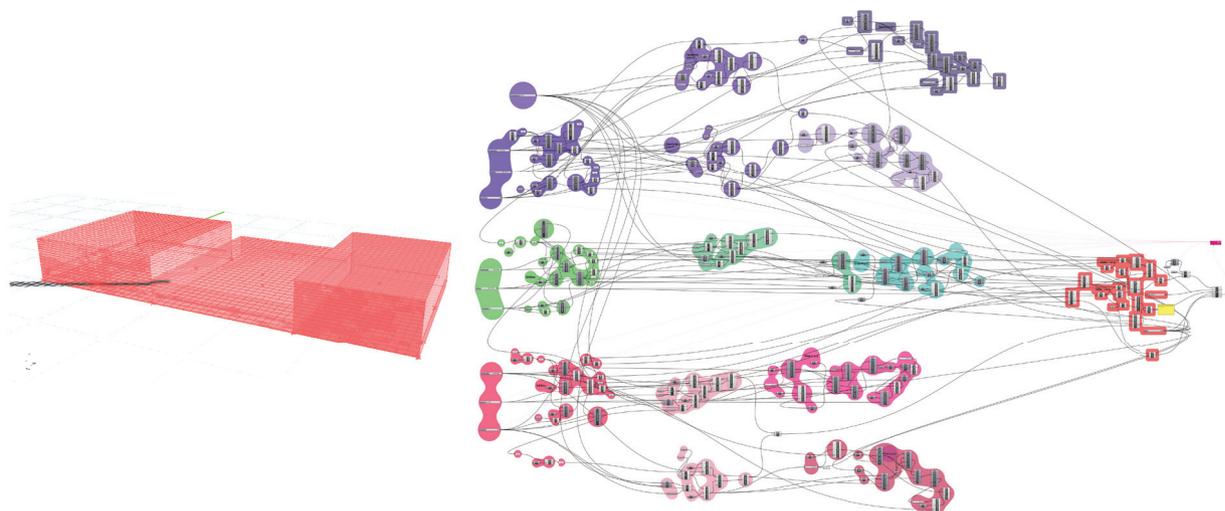
### Teste 1: Multiplicação horizontal

O teste 1 (Figura 6) constou da multiplicação horizontal da forma básica inicialmente analisada. Esta primeira análise se refere a uma edificação predominantemente horizontal, com poucos pavimentos, que pode ser facilmente adaptada à terrenos com maiores dimensões.

A forma utilizada inicialmente foi reproduzida outras duas vezes, sendo que as três formas resultantes seriam ligadas entre si por arestas. A reprodução iria gerar



**Figura 5.** Programação da Volumetria Inicial.  
**Figure 5.** Initial Volumetry Programming.



**Figura 6.** Código do Grasshopper utilizado para o Teste 1.  
**Figure 6.** Grasshopper's code utilized to Test 1.

problemas para aplicação da Equação 1, o que foi contornado com o desconto das áreas e volumes das intersecções por meio de componentes de cálculo diferenciado e de sua subtração do todo.

As aberturas em todas as fachadas externas também foram inseridas no formato final, bem como as proteções solares horizontais. Vale salientar que os componentes de altura das aberturas, FS dos vidros e AVS das proteções solares, são os mesmos para todas as aberturas e orientações. O número de pavimentos da edificação variou de um a dois, enquanto todas as demais variáveis seguiram os mesmos valores utilizados na forma inicial.

### Teste 2: multiplicação vertical

O teste 2 constou de um estudo de uma torre, cuja forma pode ser facilmente adaptada à terrenos menores. Neste teste, a forma inicial foi reproduzida verticalmente, e foi aplicada uma rotatividade em seu eixo a partir do componente Graph Mapper do GH.

O componente Graph Mapper precisa de uma série de pontos para formar a linha ou gráfico desejado. Os variadores numéricos unidimensionais inseridos representaram a geometria da edificação, para sua tradução como FF e FA da equação do RTQ-C. Usando essa linguagem, a forma a atingir deveria reproduzir a volumetria inicial ao longo do eixo vertical, porém com pavimentos de orientações distintas, cujo giro foi pré-definido pelo componente. Neste teste, os valores de comprimento e largura dos blocos horizontais variam de 22,3607 a 30.

Para tanto, o primeiro variador numérico unidimensional inserido na entrada “S” representou a altura do primeiro pavimento, com variação de 1 a 10. O segundo, inserido na entrada “N”, referiu-se à altura dos pés-direitos

dos andares da edificação, variando de 1 a 5. Já o terceiro, inserido na entrada “C”, referiu-se ao número de pavimentos, com variação de 5 a 20. Vale salientar, que o intervalo de variação numérica é definido pelo próprio projetista de acordo com as necessidades do projeto.

O gráfico destacado na Figura 7 determinou a rotatividade do edifício em relação ao eixo central. Para a aplicação da fórmula do RTQ-C, uma série de componentes foram utilizados a fim de possibilitar a quantificação de uma única área de superfície externa e do volume total da edificação.

### Teste 3: multiplicação vertical – forma única

O teste 3 também consistiu em um estudo de torre, desta vez em forma única, sem intersecções na geometria. Para tal, o gráfico criado no teste 2 foi ligado ao eixo X e ao eixo Z para proporcionar fluidez na forma. A área e volume total foram calculados e aplicou-se a Equação 1. Porém, neste teste foram considerados apenas o FF e FA da edificação, já que não foram inseridas aberturas na forma final.

A forma final do edifício foi obtida com o formato da linha do gráfico do Graph Mapper (Figura 8). A base da volumetria inicial foi utilizada, com comprimento e largura variáveis, e esta linha foi multiplicada para os vértices do retângulo, para logo após o edifício ser “encapeado”, o que gerou uma envoltória única para inserção na equação do RTQ-C.

O gráfico foi alterado para a equação linear e utilizou-se como variáveis a largura, comprimento da base, número de pavimentos, com variação de 10 a 30, altura do pé-direito dos pavimentos, variando de 1 a 5, e altura do pé-direito do primeiro pavimento, com variação de 0 a 10.

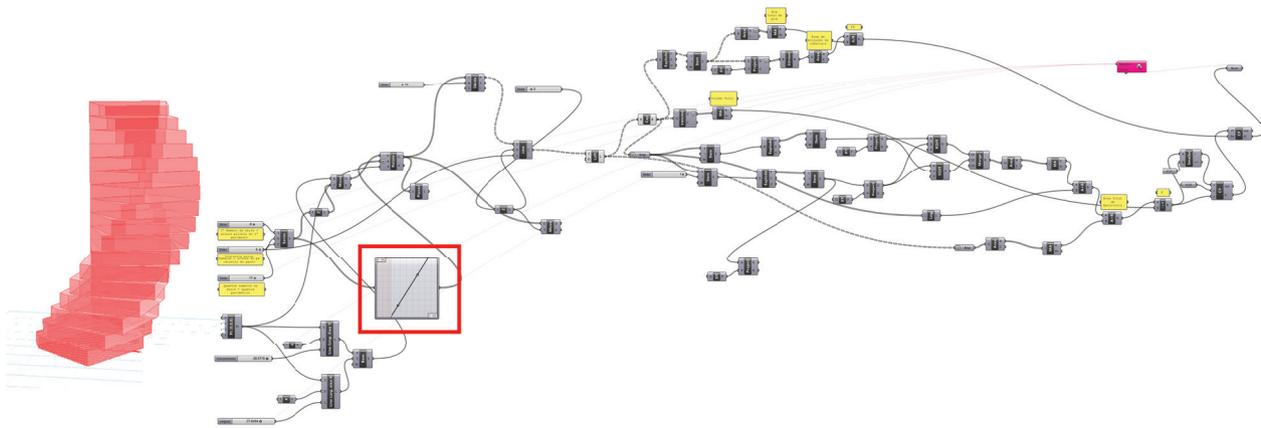


Figura 7. Componente Graph Mapper e a geração da forma do Teste 2.  
Figure 7. Graph Mapper Component and the generation of Test 2 form.

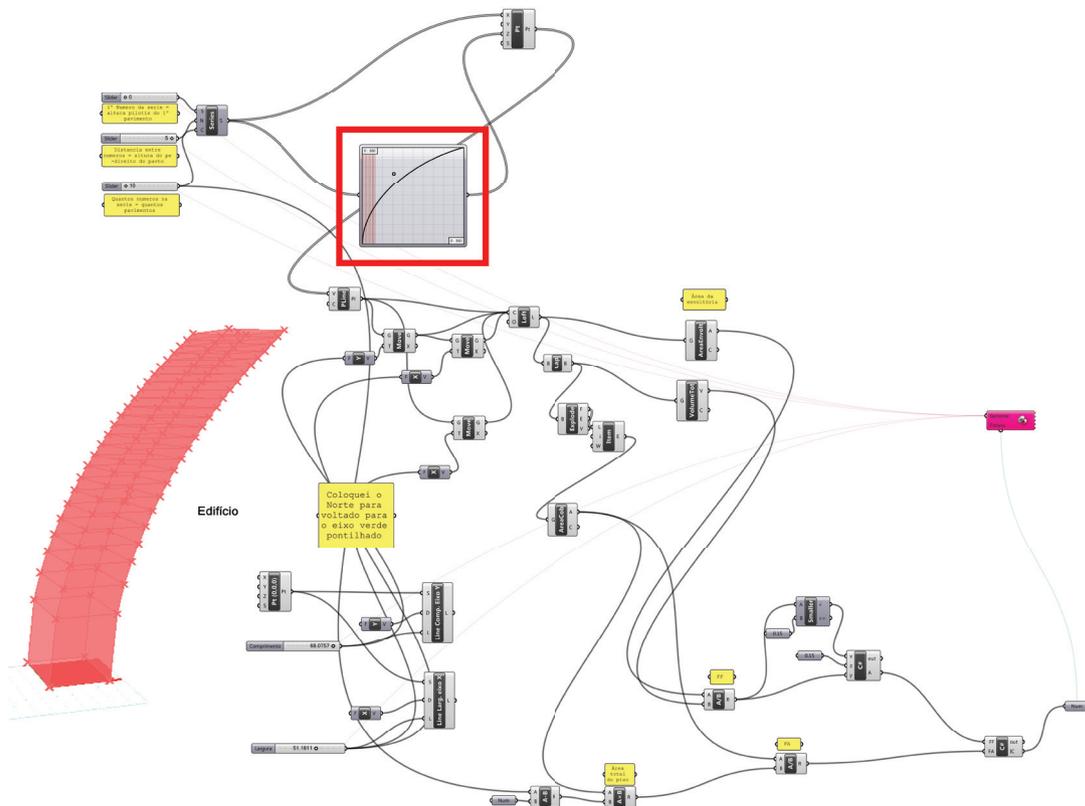


Figura 8. O componente Graph Mapper determinando a forma final do Teste 3.  
Figure 8. Graph Mapper component determining the final shape of Test 3.

## Resultados

A otimização da forma a partir da aplicação do algoritmo genético foi realizada, obtendo-se assim os resultados formais encontrados no programa Rhinoceros. Assim, o método tradicional de avaliação do RTQ-C foi

aplicado, a fim de verificar a classificação da edificação no item envoltória, considerando que todos os pré-requisitos para a obtenção do nível A foram cumpridos.

A evolução automatizada no plug-in Galapagos para a volumetria inicial, realizou 100 combinações genéticas entre as variáveis da edificação e alcançou o valor de

IC de 7,51. Os valores alcançados pelas variáveis foram: Comprimento = 37,3830; Largura = 40,9216; Altura das aberturas = 0,24; n° de Pavimentos = 7; PAFt = 0,0108; AVS = 45° e FS = 0,17. Esta automatização da forma gerou a forma resultante final apresentada na Figura 9. O ângulo vertical de sombreamento, apesar de apresentar um valor de 45°, não é visível na figura devido à sua escala.

### Teste 1

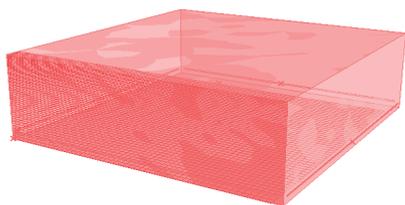
A forma resultante do teste 1 foi simulada no Galapagos (Figura 10), cujos valores se encontram na Tabela 2, após a realização de 100 combinações genéticas.

### Teste 2

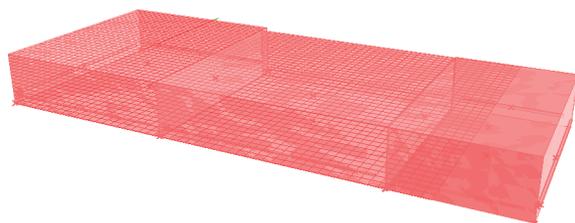
Após a realização da evolução automatizada no Galapagos, a partir de 35 combinações genéticas, obteve-se os seguintes resultados para o teste 2 (Figura 11): IC= 61,19; Comprimento = 29,5715; Largura = 30,00; Número de pavimentos=14; Altura do pé-direito dos pavimentos=5; Altura do pé-direito do primeiro pavimento=8.

### Teste 3

Os resultados alcançados com o teste 3 (Figura 12), após 50 combinações genéticas, foram: IC=20,98; Comprimento=68,0757; Largura=51,1811; Número de pavimentos=10; Altura do pé-direito dos pavimentos=5; Altura do pé-direito do primeiro pavimento=0.



**Figura 9.** Forma resultante final.  
**Figure 9.** Resulting shape end.



**Figura 10.** Forma resultante do Teste 1.  
**Figure 10.** Resulting form of Test 1.

A partir da aplicação do método tradicional proposto pelo RTQ-C (Inmetro, 2010), considerando como variáveis de entrada, as variáveis de saída obtidas a partir da modelagem generativa, obteve-se os seguintes resultados (Tabela 3).

### Considerações finais

O presente artigo procurou verificar o potencial permitido pela integração da etiquetagem à modelagem generativa, de modo que as questões de conforto e redução do consumo de energia do edifício sejam consideradas

**Tabela 2.** Resultados do Teste 1.

**Table 2.** Results of Test 1.

Índice de Consumo	103,75		
	Bloco 1	Bloco 2	Bloco 3
Comprimento (m)	23,09	21,68	21,98
Largura (m)	20,81	25,00	12,97
Número de pavimentos	2	2	2
Altura das aberturas (m)	0,26		
PAFt	0,039		
AVS (graus)	45		
FS	0,19		



**Figura 11.** Forma resultante do Teste 2.  
**Figure 11.** Resulting form of Test 2.



**Figura 12.** Forma resultante do Teste 3.  
**Figure 12.** Resulting Form of Test 3.

**Tabela 3.** Resultados e nível de eficiência dos testes.**Table 3.** Results and tests efficiency levels.

Modelos	Volumetria inicial	Teste 1	Teste 2	Teste 3
IC do modelo	7,51	103,75	61,19	20,98.
Limite máximo do nível de eficiência A	33,98	127,95	74,61	34,43
Nível de eficiência	A	A	A	A

desde as etapas iniciais do projeto. Portanto, investigou-se os passos iniciais para o desenvolvimento do projeto arquitetônico com vistas à eficiência energética, mas sem eliminar o valor advindo da criatividade do projetista. Os recursos computacionais envolvidos foram ferramentas que apresentaram soluções que ainda devem ser avaliadas e pesadas pelo arquiteto, mas os parâmetros de decisão foram fornecidos quantitativamente para valorizar os parâmetros qualitativos.

Em um projeto arquitetônico, que possui muitas variáveis e limitações como o orçamento, legislação local, clima local, terreno, dentre outras, o uso da modelagem generativa aliada aos fatores ligados à eficiência energética da edificação para a zona bioclimática 3, pode auxiliar a tomada de decisão do projetista na busca pela forma arquitetônica que melhor se adequa a estes fatores energéticos.

A volumetria inicial resultante mostrou a viabilidade de aplicação do método proposto. No entanto, pode-se perceber a sua simplicidade formal excessiva que, embora atenda aos requisitos da eficiência energética, não atende às necessidades compositivas e volumétricas que um edifício institucional pode apresentar. Ainda, tal forma pode não ser adequada se há condicionantes externos, como por exemplo, a implantação em um terreno mais alongado.

Desse modo, a volumetria inicial foi estratificada, o que gerou um potencial plástico maior, mantendo os parâmetros de desempenho energético desejados. O teste 1 mostrou a viabilidade de uma geometria eficiente energeticamente ser adaptada a diferentes terrenos desde sua concepção inicial. Os testes 2 e 3 alcançaram soluções formais mais complexas com desempenhos energéticos apropriados, o que mostrou o elevado potencial do método proposto.

O uso do algoritmo genético permite a obtenção do mínimo IC possível de ser alcançado a partir de algumas variáveis de modelagem, tendo como critério de análise o método tradicional proposto pelo RTQ-C. Esta pesquisa comprovou a viabilidade de aplicação deste método, uma vez que todos os testes realizados obtiveram nível de eficiência A.

As soluções encontradas para a modelagem generativa em um projeto baseado em desempenho, demonstraram a viabilidade de aplicação deste método projetual e indicaram um elevado potencial que pode ser explorado com adoção de outros critérios. Dentre eles, pode-se citar critérios como o desempenho lumínico de ambientes,

envolvendo profundidades, alturas de aberturas ou proteções solares; o conforto térmico, envolvendo materiais, envoltória e sombreamento; o conforto visual, envolvendo opções de cores de superfícies internas e externas; além do desempenho acústico, que pode envolver materiais de acabamento e geometria dos ambientes internos.

Deste modo, esta pesquisa procurou verificar as potencialidades da modelagem generativa integrada à eficiência energética, visando a estimular novas pesquisas nesta área e permitindo o desenvolvimento de novos modos de projetar arquitetônico, que podem ser aplicados em disciplinas de cursos de arquitetura, e inovar o processo projetual do arquiteto.

## Agradecimentos

Os autores agradecem a colaboração de Victor Calixto no desenvolvimento do trabalho e da instituição financiadora FAPEMIG.

## Referências

- ARANTES, P.F. 2012. *Arquitetura na era digital-financeira: desenho, canteiro e renda da forma*. 1ª ed., São Paulo, Editora 34, 368 p.
- BRASIL. 2001. Lei n. 10295, de 17 de outubro de 2001. Dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia. *Lex: Diário Oficial da União, Brasília*. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/qualidade/lei10295.pdf>. Acesso em: 17/01/2011.
- CAMPOREALE, P.E.; CZAJKOWSKI, J.D. 2015. Environmental index of energy consumption in buildings applied to parametric model design. *In: II International and IV National Congress on Sustainable Construction and Eco-Efficient Solutions*. Seville, 2015. *Anais...* Seville: M.P. Mercader. Disponível em: <https://idus.us.es/xmlui/handle/11441/43514>. Acesso em: 29/09/2017.
- CARLO, J.C.; LAMBERTS, R. 2008. Development of envelope efficiency labels for commercial buildings: Effect of different variables on electricity consumption. *Energy & Buildings*, **40**(11):2002-2008. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.05.002>
- CARLO, J.C.; LAMBERTS, R. 2010. Parâmetros e métodos adotados no regulamento de etiquetagem da eficiência energética de edifícios – parte 2: método de simulação. *Ambiente Construído*, **10**(2):27-40. <https://doi.org/10.1590/S1678-86212010000200002>
- CASALS, X.G. 2006. Analysis of building energy regulations and certification in Europe: their role, limitations and differences. *Energy & Buildings*, **38**:381-392. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2005.05.004>
- CELANI, G.; PUPO, R.T. 2008. Prototipagem rápida e fabricação digital para arquitetura e construção: definições e estado da arte no Brasil. *Cadernos PROARQ*, **8**(1):31-41.
- COUTINHO, F.; DUARTE, J.P.; CASTRO E COSTA, E.; KRUGER, M. 2012. Alberti Digital – Tradição e inovação na teoria e prática da arquitetura em Portugal. *In: Congresso da Sociedade Ibero-*

- mericana de Gráfica Digital, 16, Fortaleza, 2012. *Anais...* Fortaleza, Sigradi, p. 211-215.
- FLORIO, W. 2009. Modelagem Paramétrica no Processo de Projeto em Arquitetura. In: Simpósio Brasileiro de Qualidade do Projeto no Ambiente Construído, 1, São Paulo, 2009. *Anais...* São Paulo, SBQP, 1:571-582.
- FONSECA, L.P.G.; NUNES, V.D.L.; SANTANA, L.O.; CARLO, J.C.; CÉSAR JÚNIOR, K.M.L. 2017. Otimização multiobjectivo das dimensões dos ambientes de uma residência unifamiliar baseada em simulação energética e estrutural. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, 17(1):267-288. <https://doi.org/10.1590/s1678-86212017000100135>
- INMETRO. 2010. Portaria 372 de 17 de setembro de 2010. Requisitos Técnicos da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos. Rio de Janeiro. Disponível em: [http://www.pbenedifica.com.br/sites/default/files/projetos/etiquetagem/comercial/downloads/Port372-2010\\_RTQ\\_Def\\_Edificacoes-C\\_rev01.pdf](http://www.pbenedifica.com.br/sites/default/files/projetos/etiquetagem/comercial/downloads/Port372-2010_RTQ_Def_Edificacoes-C_rev01.pdf) Acesso em: 03/10/2017.
- INMETRO. 2012. Portaria nº 18, de 16 de janeiro de 2012. Regulamento Técnico da Qualidade Para o Nível de Eficiência Energética Edificações Residenciais (RTQ-R). Rio de Janeiro. Disponível em: <http://www.pbenedifica.com.br/sites/default/files/projetos/etiquetagem/residencial/downloads/RTQR.pdf> Acesso em: 03/01/2017.
- JAKUBIEC, J.A.; REINHART, C.F. 2011. DIVA 2.0: integrating daylight and thermal simulations using Rhinoceros 3d, Daysim and Energyplus. In: Conference of International Building Performance Simulation Association, 12, Sidney, 2011. *Proceedings...* Sidney, IBPSA, p. 2202-2209.
- JIN, J.-T.; JEONG, J.-W. 2014. Optimization of a free-form building shape to minimize external thermal load using genetic algorithm. *Energy and Buildings*, 85:473-482. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.09.080>
- KOLAREVIC, B. 2005. Prologue. In: B. KOLAREVIC; A. MALKAWI (eds.), *Performative architecture: beyond instrumentality*. New York, Taylor & Francis e-Library, p. 1-4.
- LAGOS, P.S. 2012. Análisis Paramétrico de Volúmenes Arquitectónicos con Algoritmos Genéticos. *Hábitat Sustentable*, 2(1):47-58.
- MITCHELL, W.J. 2008. *A lógica da arquitetura: projeto, computação e cognição*. Campinas, Editora Unicamp, 304 p.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.08.061>
- OXMAN, R. 2006. Theory and design in the first digital age. *Design Studies*, 27:229-265. <https://doi.org/10.1016/j.destud.2005.11.002>
- POBLETE, C.I.B. 2010. *Algoritmos Genéticos com estratégia de diseño em Arquitectura*. Barcelona, Espanha. Tese de Doutorado. Universitat Politècnica de Catalunya, 254 p.
- POLLOCK, M.; RODERICK, Y.; MCEWAN, D.; WEATLEY, C. 2009. Building simulation as an assisting tool in designing an energy efficient building: a case study. In: Conference of International Building Performance Simulation Association, 10, Glasgow, 2009. *Proceedings...* Glasgow, IBPSA.
- SANTANA, L.; GUIMARAES, I.; CARLO, J. 2015. Parametrização aplicada ao desempenho energético. *V!RUS*, 11. São Carlos. Disponível em: <http://www.nomads.usp.br/virus/virus11/index.php?sec=4&item=4&lang=pt>. Acesso em: 29/09/2017.
- SHERIF, A.; SABRY, H.; GADELHAK, M. 2013. Daylighting simulation as means for configuring hospital intensive care unit windows under the desert clear skies. In: Conference of International Building Performance Simulation Association, 13, Chambéry, 2013. *Proceedings...* Chambéry, IBPSA, p. 3344-3351.
- TRUBIANO, F.; ROUDSARI, M.S.; OZKAN, A. 2013. Building simulation and evolutionary optimization in the conceptual design of a high-performance office building. In: Conference of International Building Performance Simulation Association, 13, Chambéry, 2013. *Proceedings...* Chambéry, IBPSA, p. 1306-1314.
- VANNINI, V.C. 2011. *Otimização da forma para captação da radiação solar sobre superfícies de edifícios: um exercício de integração entre os programas Rhinoceros e Ecotect*. Porto Alegre, RS. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 249 p.
- VAZ, C.E.V.; GODOI, G. de; CELANI, M.G.C. 2011. A gramática da Forma. In: D.C.C.K. KOWALTOWSKI; D.C. MOREIRA; J.R.D. PETRECHE; M.M. FABRICIO, *O processo de projeto em arquitetura: da teoria à tecnologia*. São Paulo, Oficina de Textos, p. 124-150.
- VENANCIO, R., PEDRINI, A., VAN DER LINDEN, K., VEM DEN HAM, E., STOUFFS, R. 2011. Understanding envelope design: survey about architectural practice and building performance. In: Conference of International Building Performance Simulation Association, 12, Sydney, IBPSA. *Proceedings...* Sydney, IBPSA, p. 514-521.

Submetido: 01/07/2014

Aceito: 27/11/2017