



EIXO TEMÁTICO:

- | | | |
|---|---|---|
| <input type="checkbox"/> Ambiente e Sustentabilidade | <input type="checkbox"/> Crítica, Documentação e Reflexão | <input type="checkbox"/> Espaço Público e Cidadania |
| <input type="checkbox"/> Habitação e Direito à Cidade | <input type="checkbox"/> Infraestrutura e Mobilidade | <input checked="" type="checkbox"/> Novos processos e novas tecnologias |
| <input type="checkbox"/> Patrimônio, Cultura e Identidade | | |

O algoritmo evolutivo como método no processo de definição de brises

Evolutionary algorithms as a method in the process of designing solar shades

Algoritmo evolutivo como un método de proceso en la definición del protecciones solares

MARTINO, Jarryer Andrade De (1)

(1) Doutorando, Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP, PPGATC, Campinas, SP, Brasil; e-mail: jarryer_martino@hotmail.com

O algoritmo evolutivo como método no processo de definição de brises

Evolutionary algorithms as a method in the process of designing solar shades

Algoritmo evolutivo como un método de proceso en la definición del protecciones solares

RESUMO

O objetivo desse artigo é apresentar a implementação de um sistema generativo evolutivo no processo de definição de brises, utilizando o algoritmo evolutivo como um método para a negociação entre as diferentes variáveis, a fim de encontrar as melhores soluções possíveis que ofereçam um índice de iluminância ao ambiente que seja adequado ao desenvolvimento de atividades de escritório. Para isso foram desenvolvidos dois experimentos que se diferenciam pelo aumento da complexidade, ao inserir mais uma variável ao processo de negociação e busca, afetando positivamente a obtenção das soluções. Um terceiro experimento foi realizado com o objetivo de verificar como a insolação agiria sobre a melhor solução de configuração de brises para a iluminância interna. Experimentos que possibilitaram não apenas obter resultados, mas verificar o quanto o uso desse sistema generativo evolutivo potencializou o processo de projeto, assumindo um status experimental.

PALAVRAS-CHAVE: algoritmo evolutivo, sistema generativo, índice iluminância, brises

ABSTRACT

The aim of this paper is to present the implementation of an evolutionary generative system in the definition of solar shades, using evolutionary algorithms as a method for negotiating between different variables to find the best solutions that can offer adequate illuminance for an office's activities. For this, two experiments were carried out, with increasing complexity, by inserting an additional variable to the negotiation process and search, positively affecting the achievement of solutions. A third experiment was conducted with the goal of checking how insolation acts on the best solution configuration of shades to avoid glare without resulting in insufficient illuminance levels. These experiments allowed to check the efficiency of the use of this evolutionary system in an exploratory design process.

KEY-WORDS: evolutionary algorithm, generative system, illuminance, solar shades

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es presentar la implementación de un sistema generativo evolutiva en la definición del proceso de diseño de protecciones solares, utilizando el algoritmo evolutivo como un método para la negociación entre las diferentes variables con el fin de encontrar las mejores soluciones posibles que ofrecen la iluminancia adecuada al desarrollo de actividades de oficina. Para este fin, dos experimentos que difieren por el aumento de la complejidad, mediante la inserción de una variable adicional para el proceso de negociación y de búsqueda, que afecta positivamente el logro de soluciones, han sido desarrollados. Un tercer experimento se ha realizado con el objetivo de comprobar el efecto de la insolación sobre las mejores configuraciones de las protecciones solares para la iluminación interna. Los experimentos permitieron no sólo obtener resultados, pero comprobar cómo el uso de este sistema ha mejorado el proceso generativo evolutivo de diseño, en un proceso experimental.

PALABRAS-CLAVE: algoritmo evolutivo, sistema generativo, iluminancia, protección solar

1 INTRODUÇÃO

Durante o desenvolvimento de um projeto de arquitetura, a definição de um elemento arquitetônico como o brise envolve a negociação entre as diferentes variáveis e valores que determinam as suas características. Encontrar uma configuração ideal para o brise compreende buscar por soluções cujo seu ângulo de inclinação, a sua largura e a quantidade de elementos dispostos ao longo da abertura possam atender simultaneamente e satisfatoriamente o seu objetivo. Para isso, a realização de constantes simulações é necessária, gerando informações suficientes para a análise da sua eficiência, e permitindo antecipar e prever o comportamento de uma determinada configuração de brises.

O processo aparentemente é simples, mas é importante destacar que, para cada diferente valor de uma das variáveis será necessário gerar uma nova simulação, além das diferentes possibilidades de combinações entre as variáveis, obtendo uma quantidade significativa de simulações e de dados a serem analisados e avaliados. Esse é um tipo de problema que alguns pesquisadores considerariam como fazendo parte do quarto paradigma da ciência, que utiliza como modelo a geração de dados através de simulações, seguido pelo seu processamento através de softwares e o armazenamento da informação ou conhecimento resultante em computadores (HEY *et al*, 2011). Dentro desse contexto informatizado, Tierney (2007) acredita que os métodos projetuais assumiram um caráter muito particular, sendo explorados de diferentes maneiras pelos projetistas, criando seus próprios sistemas e ferramentas capazes de gerar, simular e controlar o complexo número de informações sobre um determinado problema, envolvendo assim, um alto nível tecnológico. Para isso, a metodologia de projeto incorpora processos baseados na lógica computacional e no uso de linguagem de programação, permitindo explorar a potencialidade dos recursos digitais para a geração e manipulação das informações, fazendo dessa ferramenta não apenas uma extensão da mente humana, mas um parceiro no processo de projeto com aptidões específicas (TERZIDIS, 2009).

Assim, o processo de projeto precisa ser sistematizado, determinando variáveis, criando regras, procedimentos e restrições, organizados conforme um pensamento algorítmico, permitindo a criação de um sistema parametrizado e generativo capaz de se auto-organizar e adaptar. A ideia de algoritmo se resume a uma receita, método ou técnica para fazer algo, e possui como característica essencial ser composta por um conjunto finito de regras ou operações precisas, inequívocas e simples, que ao serem seguidas conseguem conduzir à execução de uma ação (DIETRICH, 1999; LINDEN, 2008; TERZIDS, 2009). A parametrização corresponde a um sistema constituído por partes que se inter-relacionam e sofrem um auto ajuste quando uma variável é alterada, assim, ao modificar qualquer um dos valores dessas variáveis a solução será redefinida e transformada sem perder a sua estrutura principal (TIERNEY, 2007; WOODBURY, 2010; OXMAN; OXMAN, 2010). E a ideia de sistema, corresponde a múltiplos agentes interagindo dinamicamente e seguindo regras locais, composto por subsistemas que interagem de maneira bem definida, resultando em um estado maior, emergindo uma resposta para o sistema como um todo (JOHNSON, 2003; MITCHEL, 2008; ALEXANDER, 2013). A esse sistema parametrizado e generativo é possível associar o algoritmo evolutivo, que irá auxiliar na busca por soluções que atendam satisfatoriamente e simultaneamente todos os critérios e objetivos desejados.

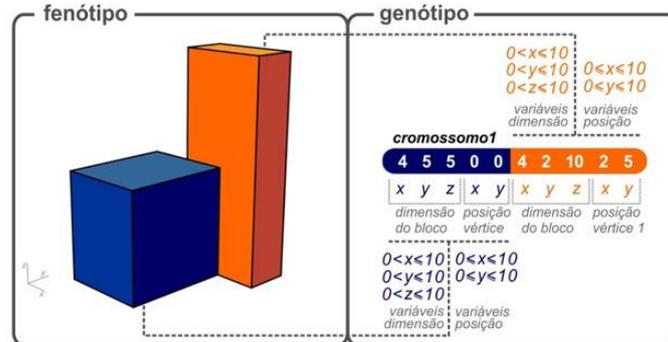
ALGORITMO EVOLUTIVO

O algoritmo evolutivo teve a sua origem na ciência da computação, na área da inteligência artificial, reproduzindo computacionalmente o processo evolutivo fundamentado na Teoria de Darwin. A sua principal característica é a reprodução artificial dos mecanismos evolutivos que possibilitam a auto-organização e o comportamento adaptativo (BITTENCOURT, 1996). Assim como na Natureza, esse processo é caracterizado pela integração e interação entre o grande número de espécies e das suas variações, que buscam atingir o equilíbrio com o meio através de uma disputa pela sobrevivência dos mais aptos. Este é o principal enfoque para a utilização do algoritmo evolutivo, ou seja, a busca por soluções que resolvam e satisfaçam simultaneamente e satisfatoriamente os diferentes objetivos que envolvem um determinado problema (FLOREANO; MATTIUSSI, 2008).

Essa situação é facilmente encontrada em um processo de projeto, que consiste basicamente em encontrar soluções que atendam em maior ou menor grau satisfatoriamente e simultaneamente todos os critérios e os objetivos que lhe são exigidos, obtendo soluções que consigam manter o equilíbrio e não priorizem apenas um deles (BENTLEY, 1999; MITCHELL, 1999). Os problemas perniciosos ou de difícil solução, definidos por Horst Rittel em 1960 (BUCHANAN, 1992), são um exemplo, pois são problemas de difícil definição e que possuem mais de uma solução, dentre as quais não existe uma melhor que as demais. Essa situação pode ser denominada como *tradeoff*, ou seja, onde há um conflito de escolha, de maneira que ao favorecer o ganho de um dos objetivos pode sacrificar outro, existindo assim uma “relação de compromisso” entre os diferentes objetivos. Dessa forma, ao definir o processo de projeto como uma solução de problema com multicritérios caracterizando uma situação *tradeoff*, a utilização do algoritmo evolutivo torna-se viável e coerente com a sua conceituação.

O sistema generativo evolutivo de projeto possui como principais componentes a representação dos indivíduos, a população inicial e as descendentes, a função de avaliação (função de avaliação), os mecanismos de seleção e os operadores de diversidade (mutação e recombinação) (GERO, 1999; BENTLEY, 1999). O elemento arquitetônico ou indivíduo (termo recorrente na área da computação evolutiva) pode ser representado através da codificação binária ou utilizar os parâmetros reais que envolvem um projeto, como a dimensão para o comprimento, largura, altura, coordenadas de posicionamento, ângulos, entre outros, que serão organizados conforme o modelo cromossômico, ou seja, inspirado na codificação do ser humano, o DNA (Figura 1). A vantagem na utilização dos parâmetros reais é a obtenção de maior grau de precisão nos resultados, pois os valores são diretamente manipulados, evitando o processo de mapeamento, codificação e posterior decodificação que poderiam gerar aproximações ou até mesmo falhas.

Figura 1: A representação física é a fenotípica e a codificada é a genotípica, simulando o DNA



Fonte: Elaborado pelos autores

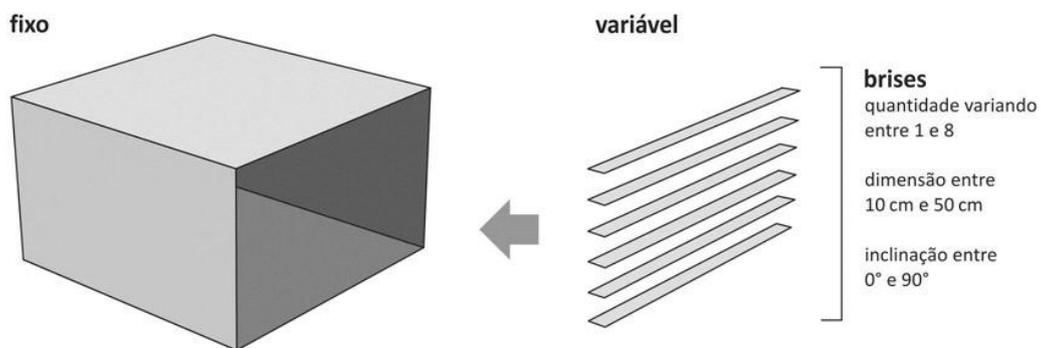
A população inicial geralmente é constituída por indivíduos que são escolhidos aleatoriamente a partir de um conjunto de possíveis soluções, até completar um número determinado pelo projetista. Após essa composição, é importante destacar que os indivíduos são estáticos e não interagem sozinhos, sendo necessária a definição algorítmica para comandar a execução dos procedimentos capazes de gerar a próxima população. O algoritmo evolutivo padrão utiliza o modelo geracional, mantendo o número de indivíduos nas gerações, resultando na completa substituição da geração velha pela nova. A mutação e recombinação são os operadores responsáveis por gerar a diversidade nas populações, contribuindo significativamente para a exploração do espaço de soluções, pois a partir da alteração provocada nos genes dos cromossomos dos “indivíduos pais”, ou na combinação entre eles, irão surgir os “indivíduos filhos”, que correspondem a diferentes pontos localizados no espaço de soluções e que podem estar presentes nos picos onde se encontram os ótimos globais. São estes operadores responsáveis pelos saltos que ocorrem de um pico para outro no campo de soluções, contribuindo para uma varredura em busca das melhores soluções (KALLEL *et al*, 2001), por isso, a mutação e a recombinação são considerados os elementos que caracterizam os métodos evolutivos (MICHALEWICZ, 1996; LINDEN, 2008; EIBEN; SMITH, 2010).

2 DESENVOLVIMENTO

A configuração dos brises utilizou como método de projeto um sistema generativo evolutivo, inspirado na teoria sobre projeto sistematizado e orientado por metas (MITCHELL, 1975), que considera uma estruturação lógica representada algorítmicamente, capaz de produzir um complexo espaço de soluções a partir de um mecanismo de geração associado a outro de avaliação, utilizando estratégias de controle para a obtenção de soluções eficientes (MITCHELL, 2008; LINDEN; 2008; EIBEN; SMITH, 2010). A partir desse método foi possível desenvolver uma pesquisa de caráter experimental, cujo principal objetivo é a obtenção de uma configuração de brises com a menor largura, a menor quantidade de elementos distribuídos na abertura e o maior ângulo de inclinação possível, mantendo o índice de iluminância média no interior do ambiente entre 500 e 750 lux, tornando o espaço favorável ao desenvolvimento de tarefas com requisitos visuais normais, trabalho médio de máquina e escritórios, valor adotados com base na tabela de referência sobre iluminâncias por classes de tarefas visuais da NBR 5413/1992. Para a isso, o experimento considerou como fonte luminosa a abóbada celeste, ou seja, a luz proveniente do céu, e não a insolação direta do sol sobre os brises, os dados climáticos correspondem ao do estado de São Paulo obtidos no site do EnergyPlus.

O modelo adotado como referência para a execução do experimento é uma sala de planta quadrada com 5 m de largura e 3 m de pé direito, não possuindo fechamento na lateral voltada para o Leste, correspondendo à abertura que receberá os brises horizontais. Estes são elementos parametrizados com a possibilidade de variações na quantidade (entre 1 e 8), na largura (entre 10 e 50 cm) e na inclinação (entre 0° e 90°), como pode ser visto na Figura 2. O experimento ocorreu em duas etapas, uma considerando variações apenas na quantidade de brises e inclinações, e a outra, inserindo a possibilidade de variação na largura, permitindo a comparação entre os dois grupos de resultados. O melhor resultado desses dois experimentos foi adotado para a realização de um terceiro, agora apresentando como fonte luminosa o Sol, e orientando a abertura para o Leste, Norte, Oeste e Sul, permitindo verificar a insolação direta sobre os brises e comparando as informações de iluminância e insolação.

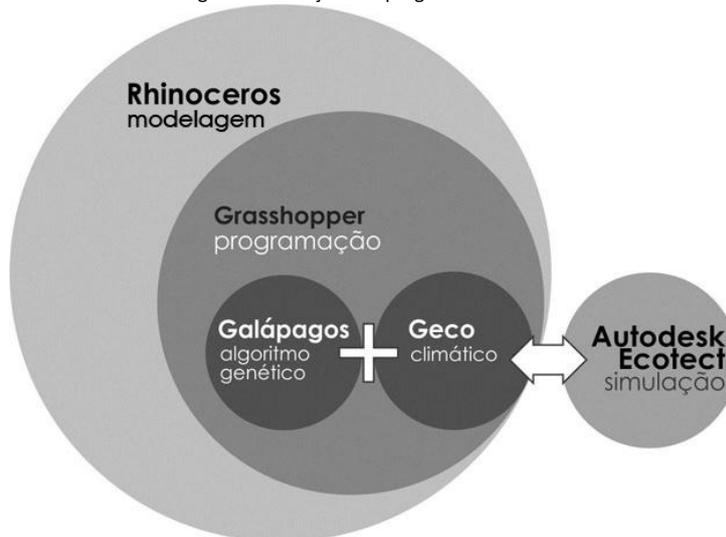
Figura 2: Definição do modelo adotado para o experimento



Fonte: Elaborado pelos autores

No processo de projeto foi utilizada como ferramenta o *plugin* Grasshopper, editor de algoritmo gráfico integrado ao *software* Rhinoceros de modelagem tridimensional, que possui um comando específico denominado Galápagos para a implementação do algoritmo evolutivo de forma fácil e simplificada, além do uso do *add-on* Geco, que habilita comandos que estabelece conexão entre o Grasshopper e o Autodesk Ecotect. Dessa forma, é possível enviar o modelo parametrizado desenvolvido no Grasshopper para o Ecotect, gerando simulações conforme os dados climáticos, obtendo novas informações que serão importadas pelo Geco no Grasshopper, permitindo a avaliação dos resultados (Figura 3).

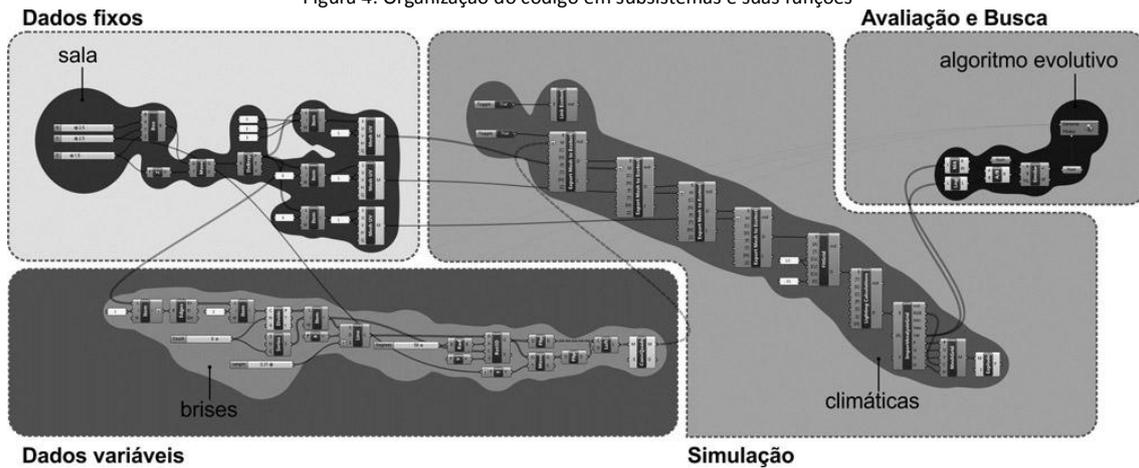
Figura 3: Interação dos programas utilizados



Fonte: Elaborado pelos autores

A programação foi organizada em quatro blocos de códigos (Figura 4) que definem subsistemas distintos, mas que juntos constituem um sistema que possibilita a emergência de possíveis resultados, a sua avaliação e seleção. Dois subsistemas estão relacionados com a configuração espacial, sendo que um deles não possui variação nos seus dados porque definem as dimensões da sala (constantes durante todo o experimento), e o outro está relacionado com os brises, portanto, é o que possui as diferentes variáveis e valores a serem “negociados”; os outros dois subsistemas estão relacionados ao processo de simulação (Geco), avaliação e seleção (Galápagos).

Figura 4: Organização do código em subsistemas e suas funções

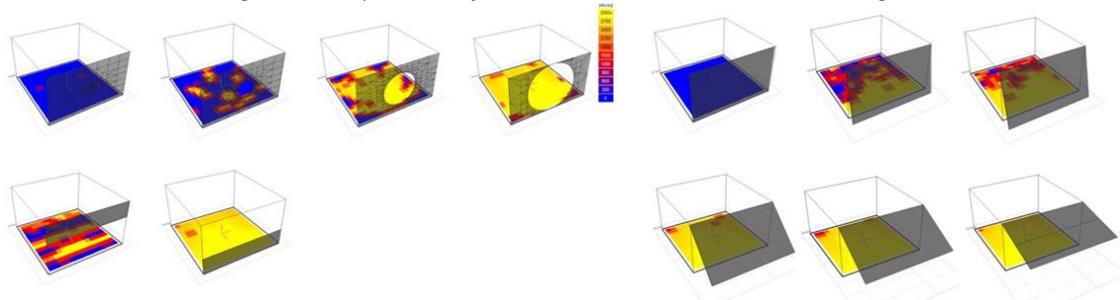


Fonte: Elaborado pelos autores

Para o melhor entendimento da configuração e uso da ferramenta Geco, alguns testes foram realizados antes de iniciar os experimentos (Figura 5), o que tornou possível perceber que durante a execução das simulações existe uma variação automática na escala cromática indicadora do índice de iluminância no Ecotect. Essa variação ocorre devido aos diferentes valores de mínimo e máximo obtidos em cada simulação, dificultando uma avaliação visual

comparativa entre os diferentes resultados. Para solucionar esse problema foi definida uma configuração no *software* Ecotec, estabelecendo valores fixos para o mínimo e o máximo da escala cromática, que não mudariam de uma simulação para outra, sendo 0 lux para o mínimo e 5400 lux para o máximo. Outra questão observada foi o grau de resolução para as simulações (completa, muito alta, alta, média e baixa precisão), que também interfere no resultado cromático da escala e no tempo de execução das simulações, uma vez que, quanto maior for o grau de precisão, maior será a exigência de processamento do computador. Dessa forma, como esse experimento está contextualizado em uma fase inicial do processo de projeto, a resolução escolhida foi a baixa precisão, para que fosse possível obter resultados de forma mais rápida, pois o algoritmo evolutivo irá gerar diversas possibilidades de configuração dos brises, que, posteriormente, conforme o nível de detalhamento do projeto fosse avançando, poderiam ser realizadas novas simulações com um maior grau de resolução, refinando o projeto das possíveis soluções. A grade de análise, onde são definidos os índices de iluminância distribuídos pela área, possui vinte células e está no nível do piso, embora a norma sugira o seu posicionamento na altura da superfície de trabalho, neste caso, como não foi definido uma atividade específica, optou-se por manter a menor altura possível.

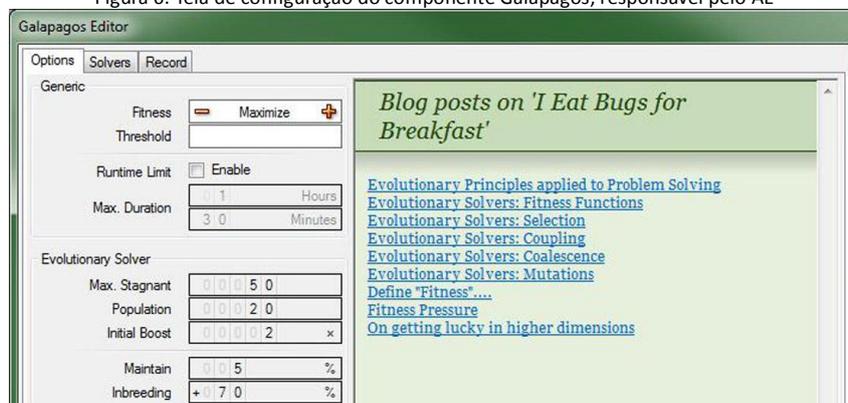
Figura 5: Testes para verificação do funcionamento da ferramenta e do código



Fonte: Elaborado pelos autores

A configuração adotada para o componente Galápagos do Grasshopper, responsável pelo algoritmo evolutivo, considerou a maximização para o valor da função de avaliação, vinte indivíduos para cada geração e a finalização da execução do código quando atingir a estagnação de cinquenta gerações. A taxa de endogamia, ou seja, cruzamento entre indivíduos com características semelhantes, foi considerada de 70%, e a de permanência de indivíduos de uma geração para a outra de 5% (Figura 6). Após as verificações do funcionamento das ferramentas e da sua configuração foi possível dar início aos experimentos.

Figura 6: Tela de configuração do componente Galápagos, responsável pelo AE

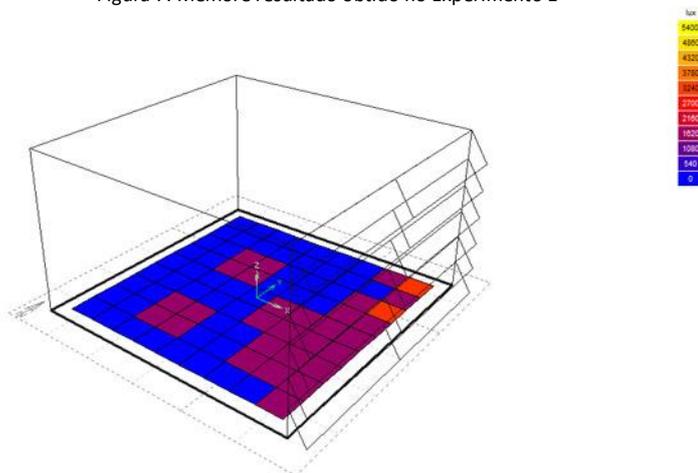


Fonte: Elaborado pelos autores

EXPERIMENTO 1

Nesse experimento as variáveis a serem negociadas foram a quantidade de brises ao longo da abertura e a sua inclinação, sendo considerada todas as configurações para o Geco e o algoritmo evolutivo descritas anteriormente. Foram gerados mil indivíduos, vinte para cada uma das cinquenta gerações, e a melhor solução obtida na última geração do algoritmo evolutivo, ou seja, a que possui maior valor para a função de avaliação, apresentou uma iluminância média de 565 lux, possuindo seis brises distribuídos ao longo da abertura, com o ângulo de inclinação de 32° e apresentando 31 cm de largura (Figura 7), sendo que este valor foi considerado constante para todo o experimento 1.

Figura 7: Melhor resultado obtido no Experimento 1



Fonte: Elaborado pelos autores

A quantidade de possíveis soluções com o índice de iluminância média entre 500 e 750 lux foi muito pequena nesse primeiro experimento, situação que pode ter sido provocada pela falta de flexibilidade nas variáveis, restringindo o campo de soluções. Sendo assim, ao realizar uma análise mais aprofundada sobre o problema e dos resultados obtidos neste experimento, verificou-se a possibilidade de aumentar o campo de soluções, estabelecendo mais uma variável no problema, sendo ela a variação na largura do brise, potencializando o processo e dando origem ao segundo experimento.

EXPERIMENTO 2

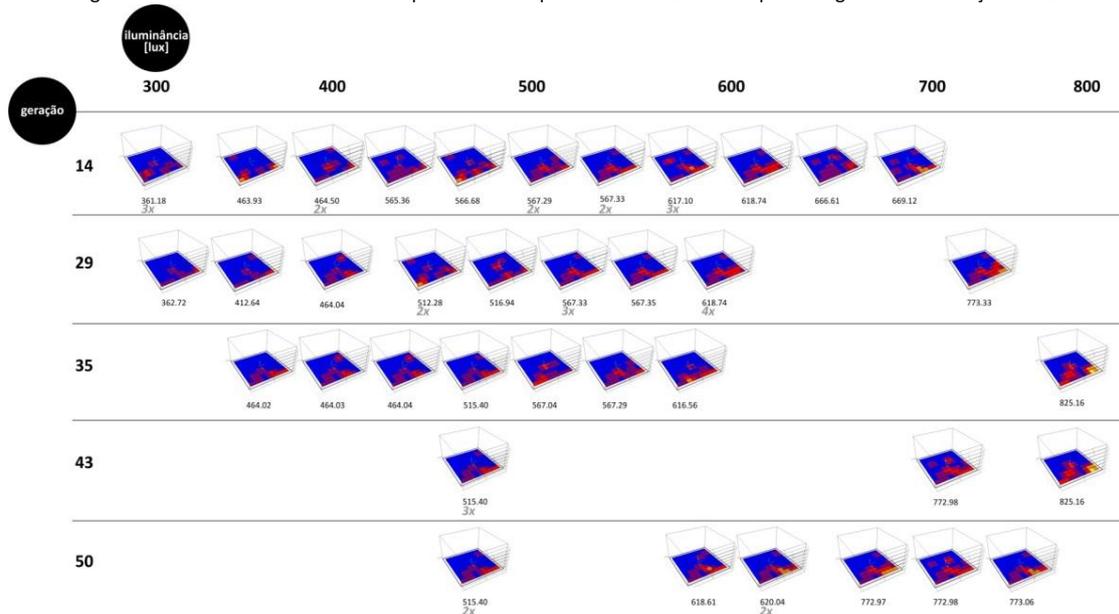
Dessa forma, esse experimento considerou três variáveis, a quantidade de brises, a sua inclinação e a variação na sua largura, o que permitiu aumentar o campo de soluções. A quantidade de indivíduos gerada é a mesma do outro experimento, assim como as configurações para o Geco e o algoritmo evolutivo. Como este experimento apresentou uma diversidade maior de resultados favoráveis, foi realizada uma coleta de indivíduos ao longo da execução do algoritmo evolutivo em diferentes gerações, permitindo assim uma comparação entre os resultados deste experimento. Para isso foram selecionados apenas os que possuem o maior valor para a função de avaliação e aqueles que se localizam nos picos do gráfico de produtividade do algoritmo evolutivo (Figura 8). A Figura 9 apresenta uma relação desses indivíduos conforme a geração que cada indivíduo pertence e os valores para o índice médio de iluminância.

Figura 8: Tela de visualização da execução do AE



Fonte: Elaborado pelos autores

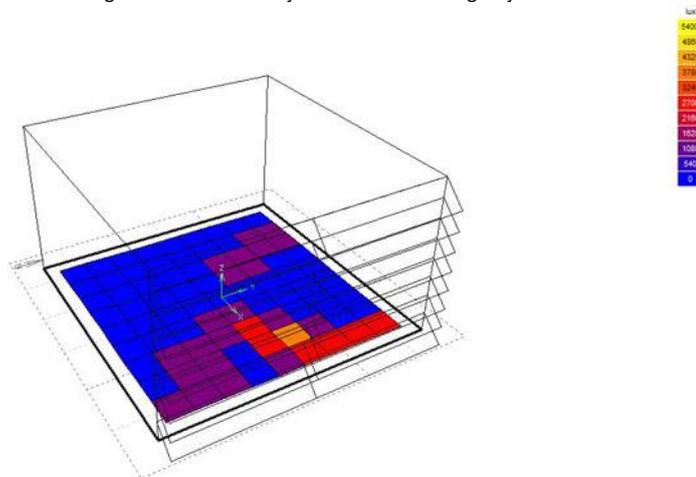
Figura 9: Indivíduos com o maior valor para o fitness que estão localizados nos picos do gráfico de execução do AE



Fonte: Elaborado pelos autores

Na última geração foram encontradas oito soluções com o valor máximo para a função de avaliação, e que, portanto, satisfazem o requisito desejado do índice de iluminância entre 500 e 750 lux. O primeiro indivíduo da lista de genes, e, portanto, considerado o melhor adaptado às restrições, possui como características oito brises com o ângulo de 45° e dimensão de 29 cm de largura (Figura 10).

Figura 9: Uma das soluções encontradas na geração 50

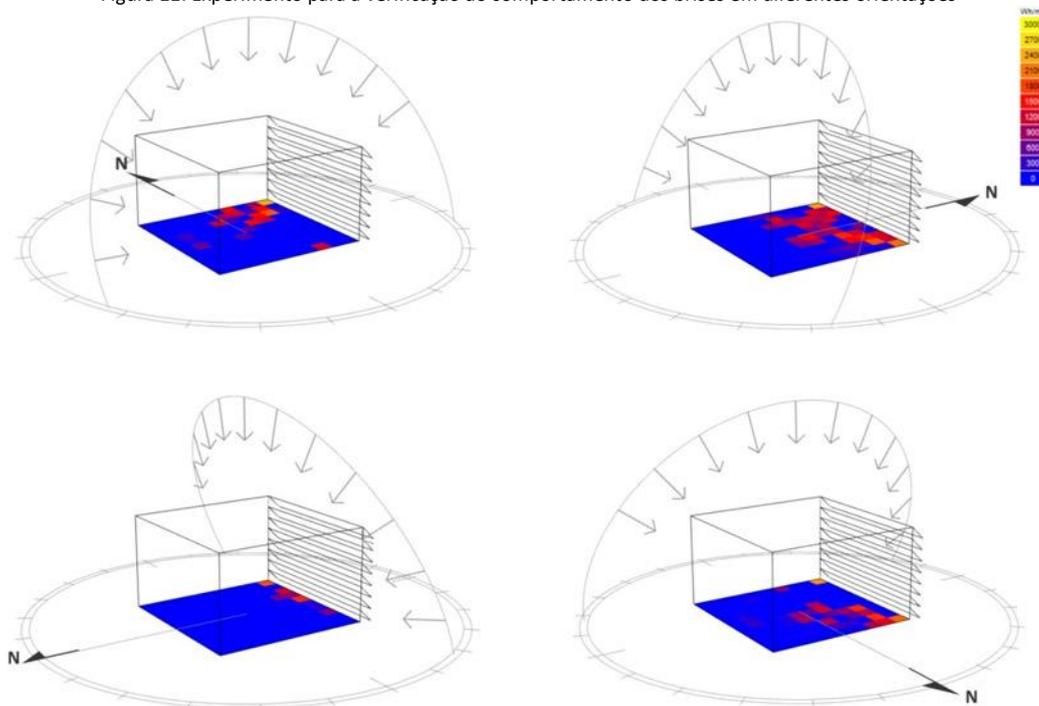


Fonte: Elaborado pelos autores

EXPERIMENTO 3

A solução com oito brises com o ângulo de 45° e dimensão de 29 cm de largura foi adotada para a realização do terceiro experimento, apresentando como objetivo a verificação do comportamento dos brises ao receber a insolação. Neste caso, o modelo foi simulado possuindo a orientação da abertura conforme os quatro principais pontos cardeais, pois diferentemente do nível de iluminância, a insolação é a ação direta dos raios luminosos do sol sobre o objeto em estudo. Dessa forma, o período de tempo adotado para o experimento compreendeu a insolação das 8 h até às 18 h, sendo posicionada a orientação da abertura para os quatro principais pontos cardeais - Leste, Norte, Oeste e Sul (Figura 11).

Figura 11: Experimento para a verificação do comportamento dos brises em diferentes orientações



Fonte: Elaborado pelos autores

É interessante perceber que a situação com a maior área de iluminação no interior da sala possui semelhança com as soluções ideais obtidas no experimento sobre a iluminância. Nos outros casos, as áreas de insolação são menores, e que por se tratar da luz direta do Sol, portanto, gerando um maior desconforto devido a sua alta intensidade, demonstra a eficiência da configuração do brise adotada a partir do primeiro experimento também para a insolação. A princípio foi questionada a realização do experimento sobre a iluminância, uma vez que o elemento em análise é a configuração dos brises, e, que, portanto, talvez só a análise da insolação fosse válida, já que este elemento arquitetônico está relacionado à incidência solar. Mas este elemento arquitetônico oferece uma qualidade para o desenho das aberturas que irá influenciar na iluminação natural interna, determinando um valor para a iluminância (luz proveniente da abóbada celeste e recebida durante todo o período do dia), e o valor para a insolação (luz proveniente do sol, dependendo da orientação da abertura, sofrendo ação direta apenas em um período do dia). Isso demonstra que uma análise conjunta torna o processo completo, permitindo assim o cruzamento dos dados obtidos diante de uma mesma solução, verificando se esta é a mais adequada.

3 CONCLUSÃO

A realização desses experimentos permitiu verificar o quanto o processo de projeto que utiliza um sistema generativo evolutivo pode contribuir significativamente para a obtenção de soluções, mesmo em um caso, que aparentemente poderia ser considerado simples, pode assumir um grau de complexidade quando analisada as suas possibilidades de configuração. A flexibilidade desse sistema, ao associar diferentes variáveis a serem negociadas, potencializa o processo, permitindo encontrar soluções que atendem e satisfazem simultaneamente diferentes objetivos, mas que precisam ser “negociados”. Isso é possível de ser exemplificado quando comparamos o resultado do experimento 1 com o experimento 2, que devido a inserção de mais uma variável permitiu a redução na largura do brise e aumento do ângulo de inclinação, embora tivesse aumentado a quantidade, ainda assim, satisfaz melhor do que o resultado do experimento 1.

Além da flexibilidade em encontrar soluções é válido destacar o quanto o sistema torna possível a realização de diferentes experimentos, transformando o processo de projeto em uma situação com característica exploratória, gerando simulações, obtendo dados, permitindo a comparação entre grupos de dados, reconfigurando o sistema, revendo as variáveis, e assim por diante. O projetar assume um novo status, fazendo da informação praticamente a matéria prima a ser gerenciada, manipulada, avaliada e tratada, apresentando um peso considerável durante o processo de projeto. É possível perceber que o contexto e a realidade onde o projeto será implantado atuam e contribuem cada vez mais para o processo de concepção e definição do elemento a ser edificado, justamente por adotar processos que incorporam um maior número de dados informacionais com alto grau de precisão.

Portanto, a adoção de métodos projetuais que exploram esses recursos informacionais torna-se cada vez mais inerentes ao processo de projeto, não apenas para agilizar um processo de produção, mas efetivando benefícios às futuras edificações, permitindo otimizar recursos, sejam ambientais ou construtivos, sem perder a qualidade do ambiente construído.



AGRADECIMENTOS

Agradeço ao apoio da FAPESP através da concessão da bolsa, processo 2012/18112-7.

REFERÊNCIAS

- ALEXANDER, C.; ISHIKAWA, S.; SILVERSTEIN, M. *Uma linguagem de padrões*. Porto Alegre: Bookman, 2013.
- BENTLEY, P. J. *Evolutionary Design by Computers*. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers Inc, 1999.
- BITTENCOURT, G. *Inteligência Artificial: ferramentas e teorias*. Campinas: Instituto da Computação, UNICAMP, 1996.
- BUCHANAN, R. Wicked problems in design thinking. *Desing Issues*, Cambridge, v. 8, n. 2, p. 5-21, Spring 1992.
Disponível em: < <http://www.jstor.org/stable/1511637>>. Acesso em: 29 mar. 2012.
- DIETRICH, E. Algorithm. In: WILSON, R. A; KEIL, F.C. (editors). *The MIT encyclopedia of the cognitive sciences*. Cambridge: The MIT Press, 1999. p. 11-12.
- EIBEN, A. E.; SMITH, J. E. *Introduction to evolutionary computing*. Berlin: Springer-Verlag, 2010.
- FLOREANO, D.; MATTIUSI, C. *Bio-inspired artificial intelligence: theories, methods, and technologies*. Cambridge: The MIT Press, 2008.
- GERO, J. S. Novel models in Evolutionary designing. *Simulated Evolution and Learning, Lecture Notes in Computer Science*, v. 1585, 1999, p. 381-388. Disponível em: < <http://link.springer.com> >. Acesso em: 13 jun. 2011.
- HEY, T. et al (org.). *O Quarto paradigma: descobertas científicas na era da eScience*. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.
- JOHNSON, S. *Emergência: a vida integrada de formigas, cérebros, cidades e softwares*. Rio de Janeiro: Jorge Zahar Ed., 2003.
- KALLEL, L. et al (Ed). *Theoretical aspects of evolutionary computing*. Berlin; New York: Springer, 2001.
- LINDEN, R. *Algoritmos genéticos*. 2. ed. Rio de Janeiro: Brasport, 2008.
- MICHALEWICZ, Z. *Genetic Algorithms + data structures = Evolution programs*. 3. ed. New York: Springer, 1996.
- MITCHELL, M. *An introduction to genetic algorithms*. Cambridge: The MIT Press, 1999.
- MITCHELL, W. J. *A lógica da arquitetura: projeto, computação e cognição*. Campinas: Editora da UNICAMP, 2008.
- _____. The theoretical foundation of computer-aided architectural design. In: *Environment and Planning B*. v.2, 1975, p.127-150.
- OXMAN, R.; OXMAN, R. New structuralism: design, engineering and architectural technologies. *Architectural Design*, v. 80, n. 4, p14-23, jul./ago. 2010.
- TERZIDIS, K. *Algorithmic architecture*. Oxford: Elsevier, 2009.
- TIERNEY, T. *Abstract space: beneath the media surface*. Oxon: Taylor & Francis, 2007.
- WOODBURY, R. *Elements of parametric design*. New York: Routledge, 2010.