

MARIO ALVES DA SILVA, JOYCE CORRENA CARLO E LUCIANA BOSCO E SILVA

Modelagem paramétrica e desempenho da edificação: otimização baseada em simulação luminosa e energética através de algoritmos genéticos.

*Parametric modeling and building performance: lighting and energy simulation
based optimization through genetic algorithms.*

Modelagem paramétrica e desempenho da edificação: otimização baseada em simulação luminosa e energética através de algoritmos genéticos.

Parametric modeling and building performance: lighting and energy simulation based optimization through genetic algorithms.

Mario Alves da Silva

Graduando do Departamento de Arquitetura e Urbanismo da UFV. Realizou recentemente uma Iniciação Científica fomentada pela FAPEMIG na área de Tecnologias em Arquitetura, estudando principalmente modelagem paramétrica, simulação energética e luminosa e otimização de edificações. Atua como pesquisador no Laboratório de Tecnologias em Conforto Ambiental e Eficiência Energética (Latecae).

Undergraduate student in the Architecture and Urban Planning Department of UFV. He recently held a FAPEMIG junior research for a Scientific Initiation study in the area of Architecture Technologies, in specific parametric design, energy and light simulation and buildings optimization. He is a researcher at the Laboratory of Technologies in Environmental Comfort and Energy Efficiency (Latecae).

silvalves.mario@gmail.com

Joyce Correna Carlo

Dra. Joyce Carlo é professora do Departamento de Arquitetura e Urbanismo e coordenadora do Latecae - Laboratório de Tecnologias em Conforto Ambiental e Eficiência Energética, onde desenvolve estudos referentes à eficiência energética, conforto térmico e iluminação natural com uso de simulação de desempenho de edifícios, na Universidade Federal de Viçosa (UFV). Suas habilidades também incluem estratégias bioclimáticas e métodos de otimização nas fases iniciais do processo de projeto com modelagem digital. Ela é membro da Secretaria Técnica do Programa Brasileiro de Etiquetagem para Edificações do Inmetro, auditora do Inmetro para o mesmo programa e membro fundador da IBPSA Brasil – International Building Performance Simulation Association.

Dr. Joyce Carlo is a professor of the Department of Architecture and Urbanism and the coordinator of Latecae - Laboratory of Technologies of Building Comfort and Energy Efficiency, where she develops studies regarding energy efficiency, thermal comfort and daylighting using building performance simulation in Federal University of Viçosa (UFV). Her expertise also includes passive low energy strategies and optimization methods in the early stages of digital modeling design processes. She is a member of the national advising committee of the Energy Efficiency Labeling Program for Buildings of Inmetro, an auditor of Inmetro for the Energy Efficiency Labeling Program for Buildings, and a founding member of IBPSA Brazil – International Building Performance Simulation Association.

correnacarlo@gmail.com

Modelagem paramétrica e desempenho da edificação: otimização baseada em simulação luminosa e energética através de algoritmos genéticos.

Parametric modeling and building performance: lighting and energy simulation based optimization through genetic algorithms.

Luciana Bosco e Silva

Professora do Departamento de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Viçosa. Doutora em Artes pela EBA-UFMG (2011), Mestre em Estética e História da Arte pela USP (2006), graduada em Arquitetura e Urbanismo pela Universidade Santa Úrsula (1995). Trabalha com Arte Contemporânea, Arquitetura e Urbanismo com ênfase em Práticas Espaciais, Conceitos formais contemporâneos e Percepção Ambiental; atuando principalmente nos seguintes temas: percepção do espaço, apropriação e produção material e imaterial do espaço construído. Participação em pesquisa interdisciplinar em Artes, Arquitetura e Cidade, com foco na percepção e composição formal e sensorial do ambiente construído.

Professor at the Department of Architecture and Urbanism of the Federal University of Viçosa. Doctor on Arts from EBA-UFMG (2011), Master on Aesthetics and History of Art from USP (2006), graduated in Architecture and Urbanism from Santa Úrsula University (1995). Works with Contemporary Art, Architecture and Urbanism with emphasis on Space Practices, Contemporary Formal Concepts and Environmental Perception; acting mainly on the following themes: perception of space, appropriation and material and immaterial production of built space. Participation in interdisciplinary research in Arts, Architecture and City, focusing on the perception and formal and sensorial composition of the built environment. of Inmetro for the Energy Efficiency Labeling Program for Buildings, and a founding member of IBPSA Brazil – International Building Performance Simulation Association.

luciana.bosco@gmail.com

Modelagem paramétrica e desempenho da edificação: otimização baseada em simulação luminosa e energética através de algoritmos genéticos.

Parametric modeling and building performance: lighting and energy simulation based optimization through genetic algorithms.

Resumo

Projetos baseados no desempenho da edificação são cada vez mais utilizados como uma metodologia de projeto em arquitetura e os avanços computacionais do século XXI permitem que sejam desenvolvidos softwares e ferramentas capazes de integrar processos de modelagem paramétrica e eficiência energética nas edificações. Este trabalho teve por objetivo avaliar o potencial de integração do DIVA, um software capaz de realizar simulações luminosas dinâmicas, às simulações energéticas do software Archsim/EnergyPlus, por meio de padrões de disponibilidade de iluminação natural nos ambientes. Avaliou-se também a utilização de algoritmos genéticos durante o processo de otimização, atentando para o tempo e a forma de convergência dos parâmetros e objetivos. Foi elaborado, portanto, um problema multiobjetivo com intuito de maximizar a ocorrência de luz natural nos ambientes e minimizar o consumo energético com sistemas de iluminação artificial e ar condicionado. Foram parametrizados 2 casos, sendo o Caso Base correspondente à forma real da edificação e o Caso Inicial ao edifício com modificações nas aberturas da fachada principal e acréscimo de elementos de proteção solar. O processo de otimização baseada em simulação foi iniciado após a simulação do Caso Inicial, no entanto foi encerrado quando completada a 54ª Geração, totalizando 7293 indivíduos. A melhoria no desempenho luminoso e energético da edificação foi percebida já na fase de simulação do Caso Inicial, pois houve uma melhor distribuição da luz natural no ambiente e uma redução de 14% no consumo energético do edifício. No Caso Otimizado, observou-se uma pequena melhoria em relação ao Caso Inicial, onde houve uma melhoria de 20% no valor de iluminância útil média, bem como uma redução de 5% na intensidade energética.

Palavras-chave: Projeto baseado em desempenho. Iluminação natural. Iluminância útil. DIVA. Intensidade energética.

Abstract

Performance-based design is being increasingly used as a design methodology in architecture. 21st Century computational advances allow the development of software and tools capable of integrating parametric modeling and energy efficiency processes in buildings. The objective of this work is to evaluate the potential of DIVA on energy analysis. DIVA is a software capable of performing dynamic light simulation, which is integrated to the energy simulations of Archsim/EnergyPlus, through the availability of daylight in the interior rooms. The use of genetic algorithms during the optimization process was also evaluated, considering the time and the pattern of convergence of the parameters and objectives. Therefore, a multiobjective optimization problem was elaborated in order to maximize the occurrence of daylight and to minimize energy consumption with artificial lighting and air conditioning systems. Two cases were parameterized, the Base Case corresponding to the real form of the building and the Initial Case, corresponding to the building with modifications in the main façade openings and addition to solar protection elements. The simulation based optimization process was initiated after the simulation of the Initial Case, but was finished when the 54th Generation was completed, totaling 7293 individuals. The improvement in lighting and energy performance of the building was already perceived in the simulation phase of the Initial Case, as a better distribution of daylight in the interior rooms was achieved with a reduction of 14% in the energy consumption of the building. In the Optimized Case, there was an improvement, compared to the Initial Case, of 20% in the average useful daylight illuminance value, as well as a reduction of 5% in the energy use intensity.

Keywords: Performance-based design. Natural lighting. Useful daylight illuminance. DIVA. Energy intensity.

Introdução

No ano de 2016, o setor público consumiu 43.278GWh, o equivalente a aproximadamente 50% do consumido pelo setor comercial, 30% do setor residencial e 25% do setor industrial (BRASIL, 2017). Após levantamento e diagnóstico em 20 edificações de uso público, realizado por Brasil (2017b), foi constatado que uma parcela significativa do consumo de tais edifícios advém dos sistemas de condicionamento artificial, como iluminação e ar condicionado. Dado isto, são necessárias medidas e estratégias que reflitam na redução desta parcela significativa de consumo energético.

A forma tem papel fundamental no desempenho energético da edificação (SANTANA; GUIMARÃES; CARLO, 2015). As experimentações formais, propostas por Omidfar (2011) e Cartana, Pereira e Berté (2016), possibilitaram avaliar a correlação entre a composição formal da envoltória e a iluminação interna do ambiente, e além do envelope da edificação percebe-se também que a volumetria e o espaço em si determinam a distribuição da luz natural (OMIDFAR, 2011; BROTAS; RUSOVAN, 2013; MOHSENIN; HU, 2015). A utilização de elementos de proteção externos possibilita consequentemente um melhor desempenho energético por dois fatores principais: impedir a entrada de radiação direta no ambiente, visto que a incidência de ondas curtas nas superfícies opacas do ambiente gera irradiação de ondas longas, responsáveis por grande parte dos ganhos térmicos da edificação; e também por reduzir o ofuscamento, melhorando assim o conforto dos ocupantes (BROTAS; RUSOVAN, 2013).

As ferramentas digitais de projeto em arquitetura são grandes aliadas nas decisões projetuais por agilizarem os processos de representação gráfica e permitirem uma grande variedade de análises em diferentes aspectos, como apontado por Venâncio e Pedrini (2011), e também por Cartana, Pereira e Berté (2016). O uso de ferramentas digitais encontra, no entanto, conflitos na maneira como são relacionadas aos processos tradicionais de projeto, fazendo com que a pequena parcela de arquitetos que utilizam tais ferramentas para simulações, optem por análises mais simples (VENÂNCIO; PEDRINI, 2011). Em sentido oposto, é crescente a utilização de processos digitais de modelagem e parametrização no meio acadêmico, principalmente para processos de simulação de desempenho das edificações, que possibilitam avaliar diversas relações entre fatores como forma, desempenho térmico, energético, etc. (DIDONÉ; PEREIRA, 2010; GRANADEIRO; DUARTE; PALENSKY, 2011; GRANADEIRO et al., 2013).

O crescente desenvolvimento tecnológico do século XXI possibilita cada vez mais que novas ferramentas computacionais sejam criadas e aprimoradas nos diversos setores, e principalmente no ramo da modelagem. O aperfeiçoamento e a criação de novas estruturas computacionais de interface gráfica possibilitaram o desenvolvimento de softwares mais potentes, capazes de gerar e interpretar estruturas formais mais complexas (CARTANA; PERERIA; BERTÉ, 2016). A modelagem paramétrica surge então como uma maneira de aumentar a variabilidade de resultados formais por associar entre si os componentes geradores da forma e permitir, de tal modo, que uma pequena variação nos parâmetros possa gerar diferentes configurações dos elementos (TAGLIARI; FLORIO, 2009). O programa Rhinoceros quando aliado a plataforma de programação visual Grasshopper, possibilita uma modelagem paramétrica integrada a diferentes interfaces e plugins, sendo assim possível avaliar a forma segundo diferentes parâmetros de desempenho (GONZÁLEZ; FIORITO, 2015).

Ainda, a integração de processos de otimização ao modelo de programação paramétrica do Grasshopper permite um novo modo de avaliação da forma, visto que os processos de otimização são estratégias pelas quais são definidos objetivos que têm por

Modelagem paramétrica e desempenho da edificação: otimização baseada em simulação luminosa e energética através de algoritmos genéticos.

Parametric modeling and building performance: lighting and energy simulation based optimization through genetic algorithms.

finalidade minimizar ou maximizar as soluções para o problema proposto (BAÑOS et al., 2011). A busca por soluções ótimas ocorre através de algoritmos que direcionam o processo de otimização, tais quais os algoritmos genéticos, que são baseados em princípios evolucionários, como mutação, cruzamento, dominância, etc. A utilização de plugins de desempenho e motores de otimização no Grasshopper possibilita, portanto, a geração de formas cada vez mais associadas a altos padrões de desempenho, e a opção por algoritmos genéticos é vista como uma estratégia eficaz para encontrar uma maior variabilidade de soluções em um menor período de tempo, como ao avaliar problemas de projeto em arquitetura (GONZÁLEZ; FIORITO, 2015). A discussão acerca da viabilidade de utilização dos algoritmos genéticos, em processos de otimização baseada em simulação (OBS) em arquitetura, e principalmente em simulações luminosas, está pautada na demanda por tempo de execução (WORTMANN, 2017). Visto que o presente estudo é realizado em âmbito acadêmico cuja a demanda por tempo não é fator primordial para execução do processo de OBS, e que como resultados espera-se analisar diferentes soluções, busca-se responder à seguinte pergunta: Seria viável a realização de otimização multiobjetivo baseada em simulação luminosa e energética por meio de algoritmos genéticos?

Objetivo

O presente estudo tem por objetivo avaliar a relação entre a forma de uma edificação destinada a laboratórios de práticas de restauração, conforto ambiental, projeto, modelagem digital, maquetes e desenho - e seu desempenho energético e luminoso, através de processos de otimização baseada em simulação (OBS).

Revisão bibliográfica

Os estudos envolvendo processos de otimização ganham, cada vez mais, importância na arquitetura (MAGNIER; HAGHIGHAT, 2010; BAÑOS et al., 2011; ASADI et al., 2012; GRANADEIRO et al., 2013; EVINS, 2013; NGUYEN; REITER; RIGO, 2014; WORTMANN; NANNICINI, 2016; WORTMANN et al., 2017; WORTMANN, 2017a; WORTMANN, 2017b), principalmente devido às suas relações com os processos de projeto baseado em desempenho. A utilização de otimização em arquitetura mostra uma tendência a aplicação de métodos meta-heurísticos, ou seja, ferramentas de busca que objetivam resultados próximos ao ótimo (BAÑOS et al., 2011). Tais processos requerem a definição dos parâmetros a serem alterados para que o objetivo final seja atingido, cujos problemas podem tentar solucionar um objetivo único ou então múltiplos objetivos. Para tanto, é também necessário definir o método de otimização para a configuração da solução do problema. O método population-based meta-heuristics, predominante em estudos de OBS em arquitetura contém mecanismos nos quais as soluções são obtidas através de populações de indivíduos que evoluem durante o processo e, como resultado final, retornam uma população de soluções (BAÑOS et al., 2011). Este processo inclui diversos tipos de algoritmos, dentre eles os algoritmos genéticos que, segundo Evins (2013), estão presentes em cerca de 60% das pesquisas de arquitetura que envolvem processos de OBS.

As condições de nebulosidade, posição do Sol na abóbada celeste, a orientação da edificação e também sua localização, são fatores fundamentais para que a iluminação seja analisada. No entanto, muitos programas de simulação luminosa partem

de modelos estáticos, que utilizam um modelo de céu nublado para todo o ano e desconsideram todos os outros fatores, deste modo, não fornecem dados próximos a situações reais, subaproveitando o potencial da iluminação natural para a edificação (NABIL; MARDALJEVIC, 2005), sendo recomendados apenas para estudos iniciais de iluminação em fases iniciais de projeto (BROTAS; RUSOVAN, 2013). Nabil e Mardaljevic (2005) propuseram a utilização de uma métrica, de caráter dinâmico, chamada Useful daylight illuminance (UDI) que define o percentual de horas do ano em que os níveis de iluminância estão, por padrão, entre 100 e 2000lx. As métricas que possibilitam análises dinâmicas da iluminação são chamadas climate based (NABIL; MARDALJEVIC, 2006), por incorporarem dados referentes às 8760 horas de um ano representativo para a localidade determinada, contidos nos arquivos climáticos.

Os limites do UDI não são estáticos, pois variam de acordo com o tipo de uso dado a determinado espaço e fatores subjetivos relacionados ao usuário. Mardaljevic et al. (2012) classifica a faixa de 300-3000lx como UDI autônomo (UDI-a), ou seja, intervalo onde a utilização de sistemas de iluminação artificial não é necessária. O limite superior de 3000lx é resultado de um processo de pesquisa e fundamentação em outros trabalhos, com foco em análises de ambientes de escritório com uso contínuo de computadores e monitores com telas de menor brilho, possibilitando assim uma permissibilidade maior a valores de iluminância. No entanto, não se descarta a necessidade de adequação do limite superior de acordo com o ambiente e o usuário, visto que a admissibilidade depende de situações de conforto e do tipo de atividade executada (MARDALJEVIC et al., 2012).

A utilização de modelos dinâmicos de simulação luminosa corrobora com a alta demanda por tempo de processamento, todavia ela aumenta a precisão do processo, pois, segundo Brotas e Rusovan (2013), a utilização do método climate based permite melhores análises do desempenho luminoso. Estudos apontam diferentes programas capazes de realizar simulações luminosas dinâmicas (GHOBAD et al., 2013; GAVIRIA; PEREIRA; MIZGIER, 2013; BELLIA; FRAGLIASSO; PEDACE, 2015). Destaca-se aqui o DIVA – Design Iterate Validate Adapt – que permite que seus resultados de simulação luminosa, sejam parâmetros de entrada no Archsim, através de padrões de consumo em iluminação artificial baseados na disponibilidade de luz natural no ambiente. A utilização do DIVA é crescente tanto em estudos nacionais (GAVIRIA; PEREIRA; MIZGIER, 2013; WEISS; TAMURA; KRÜGER, 2015; CARTANA; PEREIRA; BERTÉ, 2016; CARTANA; PEREIRA; MAYER, 2017), quanto internacionais (JAKUBIEC; REINHART, 2011; OMIDFAR, 2011; BROTAS; RUSOVAN, 2013; GHOBAD et al., 2013; GONZÁLEZ; FIORITO, 2015; BELLIA; FRAGLIASSO; PEDACE, 2015; MOHSENIN; HU, 2015; WORTMANN; NANNICINI, 2016; WORTMANN, 2017a), porém seu uso em processos de OBS é ainda restrito. Wortmann e Nannicini (2016) e Wortman (2017a) utilizaram processos de OBS luminosa com foco na comparação do tempo gasto para a convergência, pela curva de Pareto, e também na dispersão das soluções encontradas, entre algoritmos genéticos e os do tipo model based, que funcionam através de um motor de otimização específico, responsável por aperfeiçoar e simplificar constantemente, durante o processo de otimização, o modelo montado pelo simulador.

Os estudos que envolvem OBS luminosa, geralmente buscam solucionar problemas relacionados a iluminação natural e ao ofuscamento, porém criam relações de dependência entre os objetivos e optam pela formulação de um problema de objetivo único (GAGNE; ANDERSEN, 2011; WORTMANN, 2017a; WORTMANN, 2017b). A utilização de algoritmos genéticos em processos de otimização baseada em simulação luminosa, ainda que existente em alguns estudos (TORRES; SAKAMOTO, 2007; GAGNE; ANDERSEN, 2011; TURRIN; VON BUELOW; STOUFFS, 2011), é apontada como inviá-

Modelagem paramétrica e desempenho da edificação: otimização baseada em simulação luminosa e energética através de algoritmos genéticos.

Parametric modeling and building performance: lighting and energy simulation based optimization through genetic algorithms.

vel em trabalhos recentes (WORTMANN; NANNICINI, 2016; WORTMANN et al., 2017; WORTMANN, 2017a; WORTMANN, 2017b). As soluções apresentadas por Wortmann (2017) apontam a utilização do processo model based através do motor de otimização Opossum. A utilização deste motor é indicada para processos de grande complexidade e grande demanda por tempo de otimização, sendo assim, seria eficaz para OBS luminosa, no entanto o motor permite a entrada de apenas um objetivo, retorna apenas uma solução e seu algoritmo necessita uma grande apuração da modelagem, podendo este último fator demandar um grande tempo de modelagem e contradizer a economia de tempo.

Metodologia

As etapas propostas por Nguyen, Reiter e Rigo (2013) foram adotadas como metodologia para o presente trabalho, que consiste em três fases principais: pré-processamento, tida como a mais importante por ser responsável pela elaboração do problema a ser solucionado; processamento, que abrange o processo de otimização; e pós-processamento, fase na qual é realizada a análise e interpretação dos resultados obtidos.

Pré-processamento

O pré-processamento foi composto por cinco fases. São elas: escolha da edificação e análise de suas características formais-compositivas; decisões iniciais para a parametrização da edificação; seleção dos parâmetros que serão avaliados segundo os critérios de desempenho; modelagem da edificação no plugin Grasshopper, acoplado ao software Rhinoceros; e simulação dos casos base e inicial a serem comparados com os resultados obtidos na fase de processamento.

Seleção e análise da composição formal da edificação

O edifício anexo do Departamento de Arquitetura e Urbanismo (DAU) da Universidade Federal de Viçosa contém os laboratórios do curso de Arquitetura e Urbanismo e foi o escolhido como modelo a ser simulado e otimizado segundo os critérios de desempenho energético e luminoso [1]. A escolha está pautada na possibilidade de expansão deste edifício, surgida em 2017, com propostas de alterações significativas na conformação dos espaços ali existentes.

FIGURA 1- Edifício anexo, DAU
- UFV.

Fonte: Os autores.



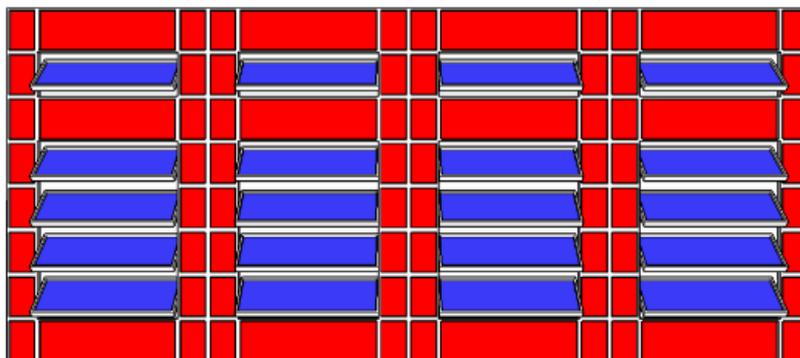
Modelagem paramétrica e desempenho da edificação: otimização baseada em simulação luminosa e energética através de algoritmos genéticos.

Parametric modeling and building performance: lighting and energy simulation based optimization through genetic algorithms.

O volume principal do edifício é composto basicamente por dois blocos laboratoriais e um de circulação. Em [1], considerando a fachada principal com orientação leste, o Bloco 1 encontra-se à esquerda e a sul e o Bloco 2 encontra-se à direita e a norte. A fachada da edificação é composta basicamente por linhas e planos, orientados vertical e horizontalmente. Os elementos compositivos são os planos formados pelas aberturas, paredes e a demarcação da entrada do edifício, já as linhas correspondem aos elementos estruturais, pilares e lajes, além das esquadrias [1]. As esquadrias das janelas, compostas por pequenos planos, são resultado de uma composição formal que busca principalmente a segurança para a edificação, visto que cerca de 80% das folhas de vidro são fixas. A parcela operável é do tipo basculante, e assim reduz ainda mais o potencial de ventilação de cada abertura, resultando em uma área de ventilação efetiva correspondente a apenas 5% da área total do vão [2].

FIGURA 2- Distribuição dos painéis móveis (azul) e fixos (vermelho) nas aberturas.

Fonte: Os autores.



Decisões iniciais de parametrização

As janelas da fachada principal [1] são responsáveis pela maior captação de iluminação direta, dado que a edificação se encontra na parte inferior de um terreno com desnível acentuado e vegetação densa, sendo assim, é fundamental que estas possuam dimensões e propriedades adequadas para garantir também a iluminação natural no interior dos ambientes. As aberturas principais possuem 3,15 m de altura, largura de 5,60 metros, e estão localizadas em ambientes com profundidade média de 8,30 metros e largura média de 11,50 metros, garantindo uma proporção 1:2,5 na profundidade e 1:2 na largura. Quanto ao modelo de aberturas existente, decidiu-se pela troca das aberturas com esquadrias do tipo retícula e abertura basculante por sistemas de esquadrias periféricas e abertura de correr com área de ventilação efetiva de 50%, contra 5% do modelo existente.

Optou-se também pela modificação das propriedades termo-luminosas dos vidros, que atualmente seguem o vidro tipo 1. O vidro do tipo 1 permite grandes ganhos térmicos e situações de ofuscamento na edificação, principalmente nas APPs, dado que as superfícies envidraçadas representam cerca de 40% das superfícies da fachada principal. Dada a possibilidade de aumento de tal percentual, em decorrência da variação do parâmetro de altura das aberturas, decidiu-se pela utilização de dois tipos de vidro combinados com as diferentes opções de dimensões das proteções solares, de acordo com o tempo de permanência na zona, prolongada ou transitória [3].

Modelagem paramétrica e desempenho da edificação: otimização baseada em simulação luminosa e energética através de algoritmos genéticos.

Parametric modeling and building performance: lighting and energy simulation based optimization through genetic algorithms

FIGURA 3- Propriedades termo-luminosas e ocorrência dos vidros tipo 1 e 2.

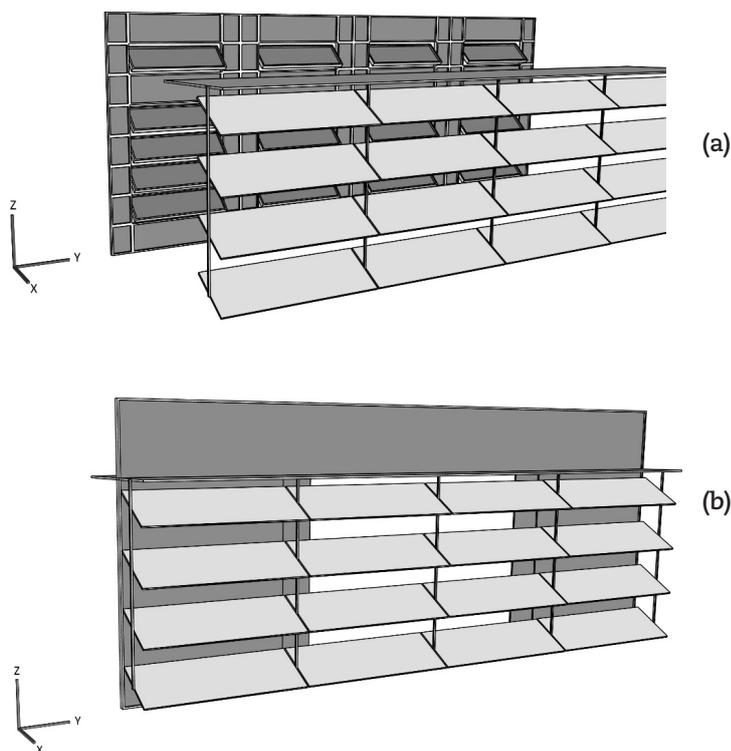
Fonte: Os autores.

Propriedades	Vidro 1	Vidro 2	Uni.
Transmitância da luz visível	0,72	0,67	%
Transmissividade	0,79	0,73	%
Emissividade superficial interna	0,84	0,04	%
Transmitância	5,67	3,23	W/(m ² K)
Fator solar	0,6	0,35	%
Zonas de ocorrência	3, 5, 6 e 10	1, 2, 4, 7, 8, 9, 11, 12, 13, 14 e 15	

Foram adicionadas ao modelo proteções solares do tipo brise horizontal e prateleiras de luz, nas 8 janelas frontais da edificação [1]. Com este acréscimo busca-se uma melhor distribuição da luz natural no interior das zonas e uma redução dos níveis de ofuscamento, além de um desempenho térmico mais satisfatório. A composição do sistema janela-proteção solar está estruturada na utilização da prateleira como sustentação para os brises [4].

FIGURA 4- – Concepção formal das proteções solares e prateleira de luz (a) e novo modelo de esquadrias com as proteções (b).

Fonte: Os autores.



Seleção dos parâmetros e formulação do problema

Após análise formal da edificação, foram escolhidos 10 parâmetros que têm relação direta com a distribuição luminosa no espaço e, conseqüentemente, com o desempenho energético [5].

FIGURA 5-- Parâmetros utilizados na modelagem e suas restrições.

Fonte: Os autores.

Parâmetro	Descrição	Min.	Máx.	Uni.	Tipo
1	Dimensão no eixo X – Bloco 1	10,00	14,00	m	contínua
2	Dimensão no eixo Y – Bloco 1	10,00	14,00	m	contínua
3	Dimensão no eixo X – Bloco 2	14,00	16,00	m	contínua
4	Dimensão no eixo Y – Bloco 2	10,00	14,00	m	contínua
5	Dimensão das aberturas no eixo Z	1,65	2,05	m	contínua
6	Deslocamento do brise em relação à abertura	0,25	1,00	m	contínua
7	Ângulo de abertura dos brises	0	90	°	contínua
8	Refletância dos brises	2,6	88,9	%	discreta
9	Refletância da prateleira de luz	2,6	88,9	%	discreta
10	Profundidade da prateleira de luz	0,40	0,80	m	contínua

Apesar da escolha de uma edificação pré-existente, foi avaliada a possibilidade de expansão dos blocos de forma independente, uma vez que os espaços contidos nos blocos 1 e 2, podem variar no plano bidimensional de forma autônoma, sem que o bloco adjacente sofra alteração de forma ou área. Dois modelos foram criados: um caso base da edificação existente e um caso inicial da otimização. Os parâmetros 6, 7, 8, 9 e 10 [5] estão presentes apenas no modelo utilizado para o processo de otimização, dado que a configuração atual do edifício não possui proteções solares e prateleiras de luz.

Quanto aos parâmetros referentes às proteções solares e às prateleiras de luz, decidiu-se avaliar o afastamento dos brises em relação às suas respectivas aberturas e ângulo de inclinação com o plano horizontal. Com relação às prateleiras de luz, foi escolhido variar a sua profundidade no ambiente interno, considerando um mínimo do ângulo alpha, entre sua extremidade e a parte superior da abertura, de 45° [4b]. A cor dos brises e prateleiras foi parametrizada separadamente, com base nas 78 variáveis discretas de Dornelles (2008), sendo que ao invés da absorvância foi necessária a utilização da refletância das cores. Tal separação visa avaliar a variação e influência dos níveis de refletância nas proteções. O problema da otimização é multiobjetivo, formulado com base na intensidade energética e na iluminância com vistas a minimizar o consumo em energia elétrica com sistemas de ar condicionado e iluminação artifi-

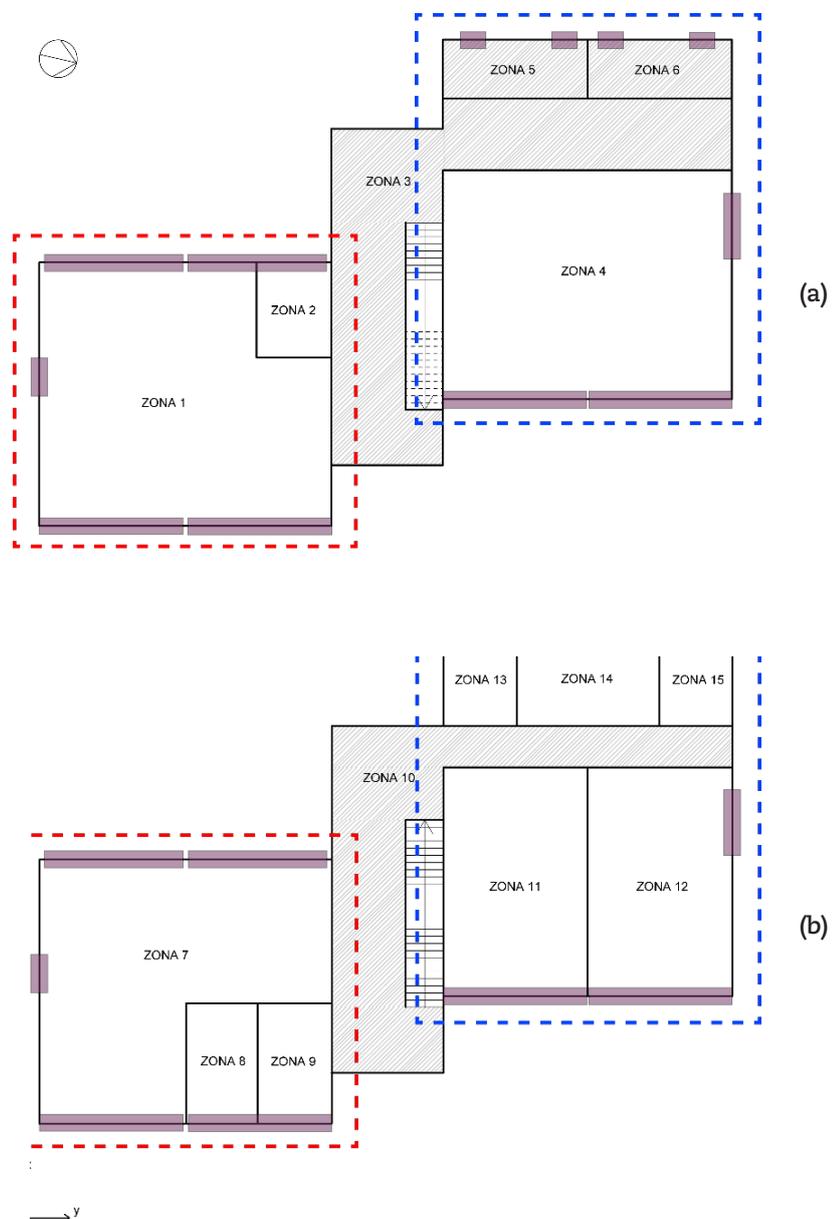
cial e maximizar a ocorrência de iluminâncias úteis da luz natural (Usefull Daylight Illuminance, UDI) entre 300 e 3000lx. A definição dos limites de UDI está baseada nos estudos de Mardaljevic et al. (2012).

Modelagem

A edificação foi dividida em 15 zonas térmicas, uma para cada ambiente, incluídos os ambientes de permanência prolongada e transitória [6]. Vale ressaltar que as zonas 3 e 10 não foram avaliadas por serem ambientes de permanência transitória, sem requisitos rigorosos de ofuscamento.

FIGURA 6- Bloco 1 (hachurado vermelho) e bloco 2 (hachurado azul) contendo zonas térmicas 1 a 6 correspondentes ao primeiro pavimento (a), 7 a 15 correspondentes ao segundo pavimento (b). Ambientes de permanência prolongada (sem hachura) e ambientes de permanência transitória (hachurados). Os retângulos roxos indicam a posição das aberturas.

Fonte: Os autores.



Modelagem paramétrica e desempenho da edificação: otimização baseada em simulação luminosa e energética através de algoritmos genéticos.

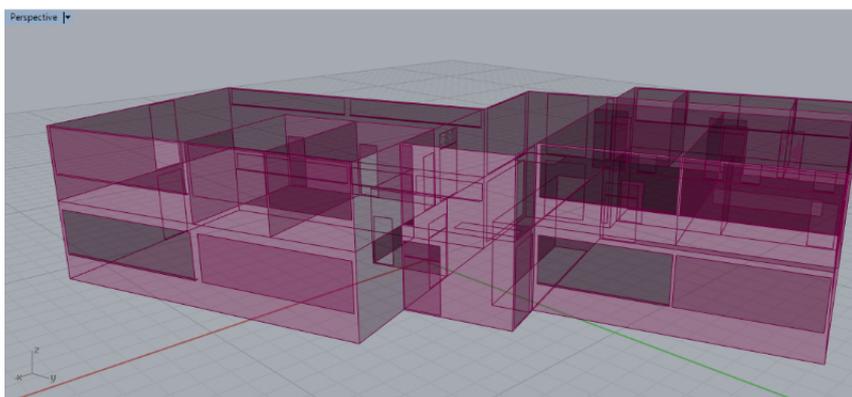
Parametric modeling and building performance: lighting and energy simulation based optimization through genetic algorithms

Caso base e caso inicial: método de simulação

A edificação foi modelada no software Rhinoceros, por meio da interface de programação visual do plugin Grasshopper [7].

FIGURA 7- Edifício Anexo do DAU, modelado no software Rhinoceros.

Fonte: Os autores.



O plugin DIVA integrado à plataforma de modelagem do Grasshopper, foi escolhido por permitir a realização de simulações dinâmicas por meio do método climate based (NABIL; MARDALJEVIC, 2006). Foram definidos dados básicos de entrada para o DIVA, como altura do plano de avaliação, refletância das superfícies e arquivo climático [8].

FIGURA 8- – Dados de entrada utilizados na simulação luminosa Annual Daylight no DIVA.

Fonte: Os autores.

Item	Descrição	Parâmetro	Entrada	Uni.
Grid	Superfície para análise de distribuição da iluminação	Altura	0,90	m
Obj	Superfícies das zonas, divididas em: paredes, teto, piso, vidros	Refletância	0,70 0,80 0,50 0,79 ¹	%
Loc	Arquivo climático base	_____	Viçosa, MG. TMY2	_____

O plugin Archsim, também integrado ao Grasshopper, foi escolhido para a realização da simulação energética por permitir a acoplagem dos padrões de uso de iluminação artificial gerados pelo DIVA e assim utilizá-los como base para o cálculo do consumo de luz elétrica. O consumo de todas as ambientes de permanência prolongada (APPs) foi analisado, assim como o consumo por iluminação das Zonas 5 e 6, que são banheiros. Os modos de condicionamento artificial e ventilação natural, foram configurados em dois períodos, sendo que os APPs têm condicionamento artificial durante as horas ocupadas do edifício, os ambientes de permanência transitória (APT's) têm condicionamento natural durante as horas ocupadas do edifício e todos os ambientes tem ventilação natural no período noturno nos finais de semana [9].

¹ Valor médio da transmissividade dos vidros translúcidos e foscos.

Modelagem paramétrica e desempenho da edificação: otimização baseada em simulação luminosa e energética através de algoritmos genéticos.

Parametric modeling and building performance: lighting and energy simulation based optimization through genetic algorithms

FIGURA 9- Padrões de uso como entrada para o DIVA e Archsim: edificação ocupada e condicionamento artificial ligado (laranja), sem ocupação (hachurado) e ventilação natural (azul).

Fonte: Os autores.

Período	Dias úteis	Fim de semana
00:00 - 08:00		
08:00 - 12:00		
12:00 - 14:00		
14:00 - 18:00		
18:00 - 00:00		

Processamento

A fase de processamento consiste na realização da otimização do modelo, com base na busca pela solução do problema formulado durante a fase de pré-processamento, por meio de detalhamento dos objetivos e configuração do motor de otimização. O processamento foi dividido em quatro etapas: definição do método de execução e avaliação dos índices a serem maximizados e minimizados; configuração do motor de otimização Octopus; execução da simulação do caso base e inicial; e realização do processo de otimização.

Para a maximização da ocorrência de iluminância útil autônoma (MARDALJEVIC et al., 2012), foram seguidos dois passos: o primeiro consiste em determinar a dimensão da quadrícula da malha que está localizada sobre o plano de trabalho, aqui definida em 1,25m. Após a definição da malha, foi determinada como 0,65 un/m² de área condicionada a densidade de sensores² utilizados pelo DIVA para análise dos níveis de UDI. Por fim, o valor de UDI-a, obtido após análise das 4639 horas de luz no plano horizontal disponíveis para a cidade de Viçosa-MG, foi dividido pelo número de sensores para a obtenção do UDI médio (UDI_m). Já o consumo pela área condicionada foi minimizado com base na Intensidade do Uso Energético (EUI, do inglês Energy Use Intensity).

O Octopus é um plugin para Grasshopper que permite a realização de processos de otimização através de algoritmos genéticos. O motor foi escolhido por permitir a realização de processos de otimização multiobjetivo e utilizar o método population-based meta-heuristics por meio de algoritmos genéticos. O motor possui mecanismos de acompanhamento visual de convergência e apresenta as soluções com base na curva de Pareto, que caracteriza um conjunto de soluções tidas como representativas do ótimo para um problema de otimização. O plugin permite também ao usuário manipular diferentes configurações relacionadas à forma de funcionamento dos algoritmos [10].

² Os sensores, utilizados pelo DIVA para a realização da simulação luminosa, correspondem aos dispositivos foto sensíveis (pontos medidores) utilizados em medições físicas.

Figura 10- Configurações adotadas para o processo de otimização do Octopus.

Fonte: Os autores.

Configuração	Descrição	Entrada
<i>elitism</i>	proporção de indivíduos que serão mantidos intactos e serão levados para a geração seguinte	0,5
<i>mut. probability</i>	probabilidade de cada parâmetro sofrer mutação durante o processo	0,1
<i>mutation rate</i>	taxa de variação nos valores dos parâmetros, a cada nova solução gerada, quanto maior o valor, maior a variação	0,5
<i>crossover rate</i>	possibilidade de dois indivíduos subsequentes compartilharem parâmetros com os mesmos valores	0,8
<i>population size</i>	número de indivíduos presente em cada geração	70
<i>max generations</i>	número máximo de gerações a serem alcançadas, e quando 0, não há limite	0
<i>record interval</i>	intervalo de gerações no qual um registro histórico é armazenado no computador	1
<i>save interval</i>	intervalo entre as gerações em que o arquivo do <i>Grasshopper</i> ³ é salvo	0
<i>max. eval. time</i>	tempo máximo de avaliação para cada solução, e quando 0, não há limite	0
<i>reduction algorithm</i>	algoritmo utilizado como estratégia para redução do número de indivíduos da curva de Pareto quando o arquivo é muito grande	HypE
<i>mutation algorithm</i>	algoritmo utilizado como estratégia de mutação dos parâmetros	HypE

Pós-processamento

A partir dos resultados obtidos, foi estabelecida uma metodologia de análise baseada na avaliação da variação dos 10 parâmetros estabelecidos durante o pré-processamento e os objetivos relacionados a iluminância e consumo. As gerações de Pareto determinadas pelo plugin Octopus durante o processo de otimização foram escolhidas como objeto de análise. Foram selecionadas as gerações 0, 1, 2, 3, 4, 8, 12, 16, 20, 24, 28, 32, 36, 40, 44, 48, 49, 50, 51, 52 e 53, com uma média de 69 indivíduos por geração, a fim de abranger um campo amostral com maior adensamento nas primeiras e últimas gerações que foram sequenciais. As gerações intermediárias foram usadas para manter a sequência da evolução dos casos, porém selecionadas a cada intervalo de quatro ocorrências. Este procedimento de seleção de gerações foi determinado a fim de observar as principais modificações sofridas durante as gerações, e a partir de outros trabalhos (SANTANA, 2016; FONSECA et al., 2017) é conhecido que as primeiras gerações tendem a sofrer maiores modificações, as intermediárias apresentam mudanças graduais e as últimas tendem a manter estabilidade com relação aos objetivos estabelecidos. Dado o processo de seleção, optou-se por analisar 5 indivíduos de cada geração, correspondentes aos dois extremos dos indivíduos da geração de Pareto, gerada pelo Octopus, o joelho da curva e dois indivíduos intermediários.

³ Foi definido que o arquivo seria salvo a cada novo indivíduo gerado, garantindo a atualização do arquivo a cada novo processamento.

Análises e discussões

Os resultados obtidos após as simulações do Caso Base e Inicial permitiram notar uma alteração significativa nos níveis de UDI_m e, principalmente, no EUI, decorrentes do acréscimo de elementos de proteção solar [11].

Figura 11-Valores iniciais dos parâmetros para os casos base.

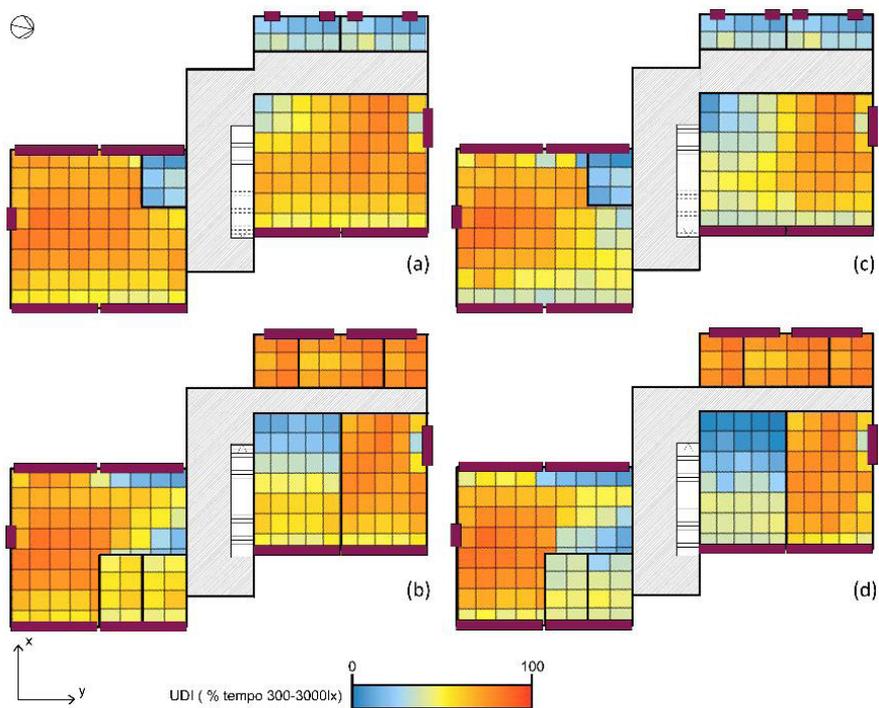
Fonte: Os autores.

Parâmetro	Descrição	Caso Base	Caso Inicial	Uni.	Tipo
1	Dimensão no eixo X – Bloco 1	10,41	10,41	m	contínua
2	Dimensão no eixo Y – Bloco 1	11,47	11,47	m	contínua
3	Dimensão no eixo X – Bloco 2	14,20	14,20	m	contínua
4	Dimensão no eixo Y – Bloco 2	11,36	11,36	m	contínua
5	Dimensão das aberturas no eixo Z	1,65	1,65	m	contínua
6	Deslocamento do brise em relação à abertura	_____	0,25	m	contínua
7	Ângulo de abertura dos brises	_____	90	°	contínua
8	Refletância dos brises	_____	84,2	%	discreta
9	Refletância da prateleira de luz	_____	84,2	%	discreta
10	Profundidade da prateleira de luz	_____	0,40	m	contínua
Área	_____	507,9	507,9	m ²	
UDI _m	_____	56	50	%	
EUI	_____	51,6	37,6	kWh/(m ² .ano)	

A análise dos dados qualitativos gerados pelo DIVA, através da malha de iluminância, permitem a compreensão visual da variação dos níveis de UDI_m e, principalmente, observar a influência dos elementos de proteção solar e prateleiras de luz na distribuição da luz natural no ambiente [12]. A adição das prateleiras de luz e dos elementos de proteção solar, com a tinta acrílica fosca branca de refletância igual a 84,2% (DORNELLES, 2008), bem como a inclinação do brise igual a 90°, garantiram uma melhor distribuição dos níveis de UDI-a nas zonas. Os elementos de proteção solar tiveram também impacto direto no consumo da edificação por impedirem a entrada de radiação direta nos ambientes, reduzindo as horas de uso dos condicionadores de ar split, e por distribuírem melhor a luz natural, o que diminuiu as horas de uso dos sistemas artificiais de iluminação, levando a uma redução de 27% no EUI.

Figura 12-Distribuição dos níveis de UDI-a no primeiro (a) e segundo pavimento (b), do Caso Base, e no primeiro (c) e segundo pavimento (d), do Caso Inicial (áreas de circulação demarcadas por hachuras e aberturas representadas pelos retângulos roxos).

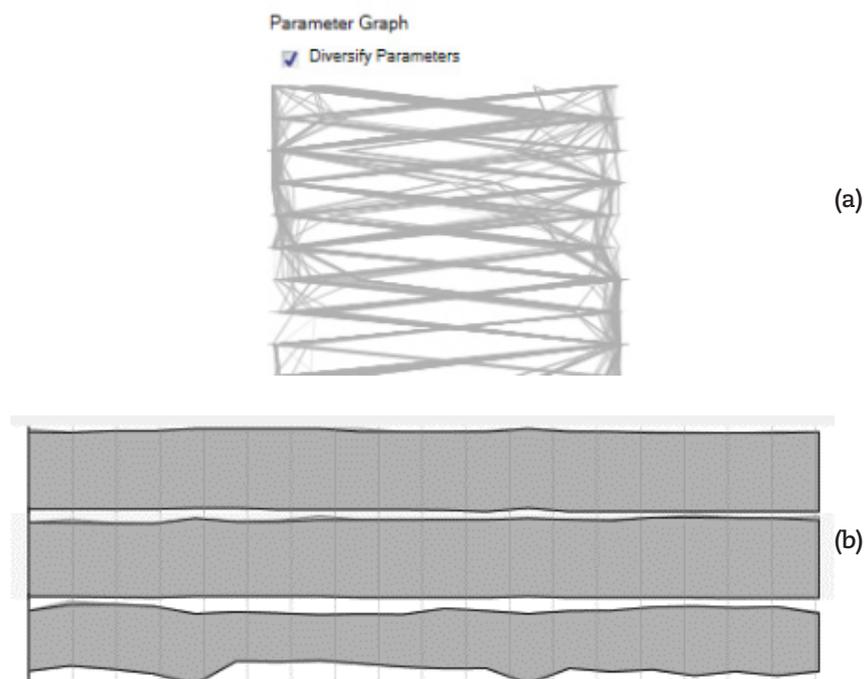
Fonte: Os autores.



O acompanhamento do processo de otimização iniciou-se pela observação dos indicadores visuais de convergência do Octopus. O processo foi encerrado ao término da Geração 53, visto que o indicador de convergência dos objetivos apresentou um alinhamento tendendo a uma constante [13a], enquanto o indicador de convergência dos parâmetros, uma distribuição uniforme, sem grandes dispersões [13b].

Figura 13-Indicadores de convergência dos parâmetros (a) e dos objetivos (b), gerados pelo Octopus.

Fonte: Os autores.



A partir da análise do gráfico de dispersão, que aloca os 7293 indivíduos obtidos em 54 gerações de acordo com os indicadores que compõem os objetivos, é possível observar a tendência de convergência entre UDI_m e consumo, e a formação da curva de Pareto nas últimas gerações [13]. Como o objetivo deste trabalho é encontrar indivíduos que satisfaçam ao problema estabelecido durante a fase de Pré-Processamento, os melhores casos foram encontrados em situações de maior nível de UDI_m e menor EUI, ou seja, no joelho da curva de Pareto, que apresenta valores estáveis de intensidade energética, entre 34 e 36 kWh/m², e UDI_m, entre 56 e 61% [14]. A partir de [14], é possível também perceber a formação de duas massas de concentração, em relação aos níveis de UDI_m, sendo um grupo com níveis de 20 a 38% e outro com níveis acima de 38%. Tais indivíduos encontram-se distribuídos ao longo de todas as gerações. No entanto, ressalta-se uma maior concentração de indivíduos das últimas gerações no segundo grupo.

Figura 14- Distribuição dos objetivos referentes aos indivíduos que compõem as 54 gerações, em relação a EUI e UDI_m. Demarcação do grupo 1 (vermelho), grupo 2 (azul) e formação da curva de Pareto (roxo).

Fonte: Os autores.

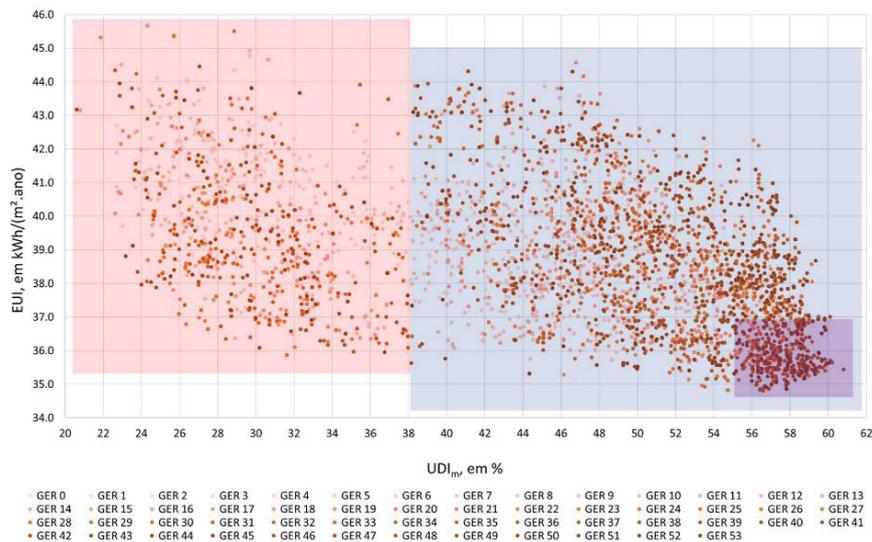
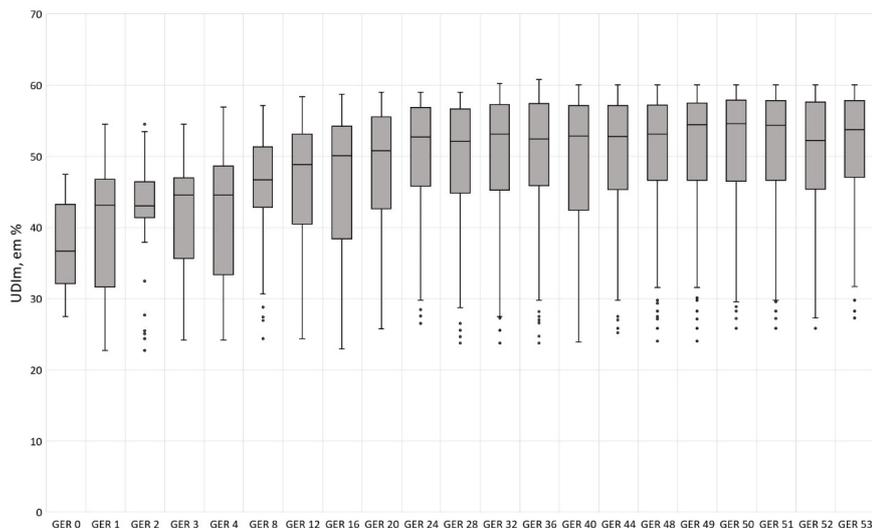
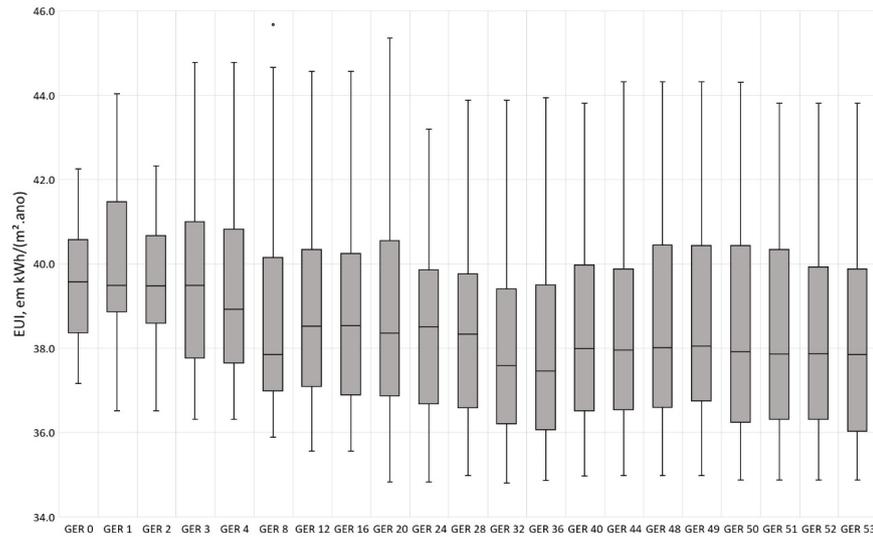


Figura 15- Distribuição dos valores de UDI_m (a) e EUI (b) ao longo das gerações analisadas.

Fonte: Os autores.



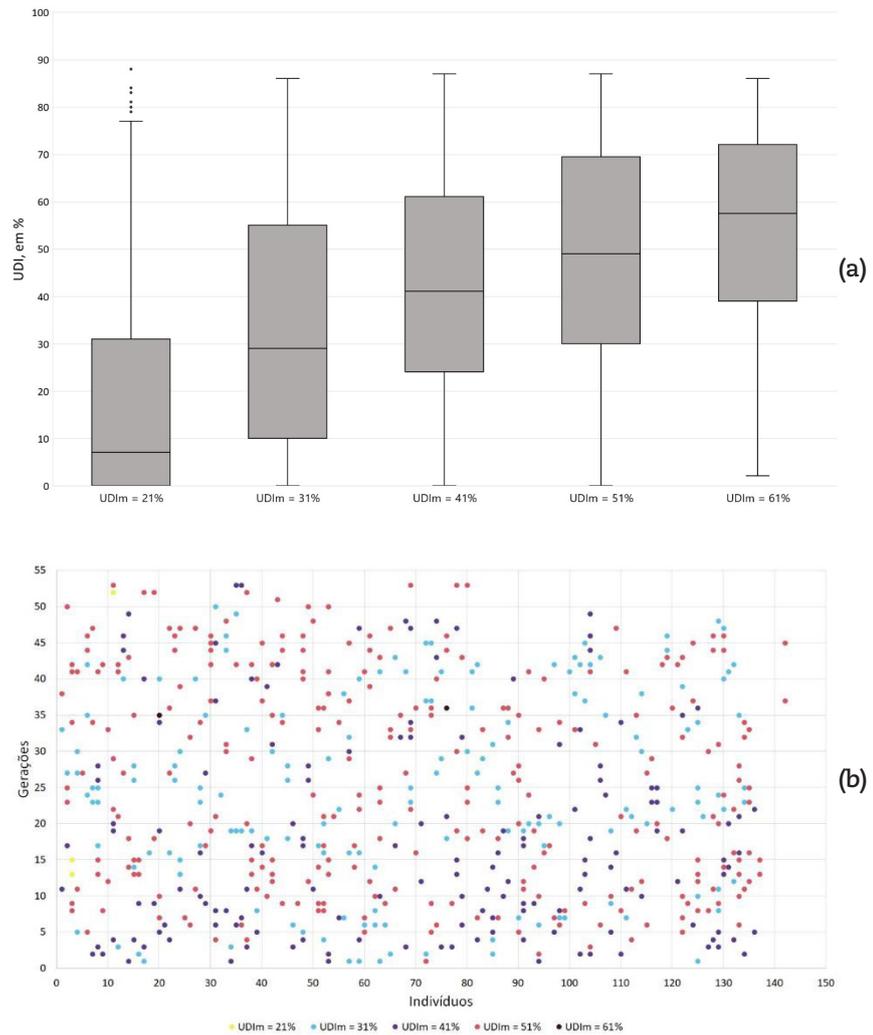


A análise da distribuição dos valores de UDI_m [15a] permite identificar uma tendência à estabilização a partir da Geração 24, mesmo com o registro de ocorrência de mais da metade dos indivíduos com níveis de UDI_m acima de 50%, já na geração 16. Com relação à distribuição de EUI [15b], observa-se um aumento na quantidade de indivíduos com níveis abaixo de 40 kWh/(m².ano), sendo que, a partir da Geração 32, mais da metade dos indivíduos apresentam valores abaixo de 38 kWh/(m².ano). A partir da Geração 24, os indivíduos localizados no joelho da curva de Pareto apresentam UDI_m igual a 59% e 60%, com exceção das Gerações 35 e 36, onde estes apresentam 61%. Entre os casos de maior ocorrência, foi escolhido como o indivíduo ótimo aquele localizado no joelho da curva da Geração 53, com UDI igual a 60% e EUI equivalente a 35,6 kWh/(m².ano).

Após a obtenção dos valores UDI_m foram selecionados cinco indivíduos dentre todos os obtidos até a Geração 53 para exemplificar a amplitude dos valores de UDI nos sensores, sendo estes: indivíduo 3, da Geração 13, com UDI_m = 21% que é o menor valor obtido; indivíduo 17, da Geração 1, com UDI_m = 31%; indivíduo 14, da Geração 1, com UDI_m = 41%; indivíduo 44, da Geração 9, com UDI_m = 51%; e o indivíduo 20, da Geração 35, com UDI_m = 61% que é o maior valor obtido [16a]. Em [16a], é possível também perceber a tendência de distribuição da UDI de acordo com o valor de UDI_m obtido, onde mesmo nos indivíduos com maiores UDI_m existem sensores com níveis de UDI próximos ou iguais a 0. No entanto, os níveis superiores apresentam estabilidade, com valores em torno de 85%. A distribuição dos 5 valores representativos de UDI_m, ao longo das 55 gerações, permitiu identificar a concentração dos níveis de UDI_m ao longo do processo, principalmente quando analisada a existência corriqueira de níveis de UDI_m iguais a 31, 41 e 51% [16b]. É possível também observar o surgimento pontual dos níveis de UDI_m iguais a 21 e 61%, sendo apenas 3 casos do primeiro e 2 do segundo. O UDI_m de 21% surge apenas após a 10ª geração e o UDI_m de 61% ocorre, primeiramente, na Geração 35 [16b].

Figura 16- Distribuição dos níveis de UDI contidos nos sensores de 5 indivíduos representativos dos valores extremos e intermediários de UDIm, referentes aos valores da primeira ocorrência nos indivíduos de Pareto (a) e distribuição dos níveis de UDI, extremos e intermediários, ao longo das gerações (b).

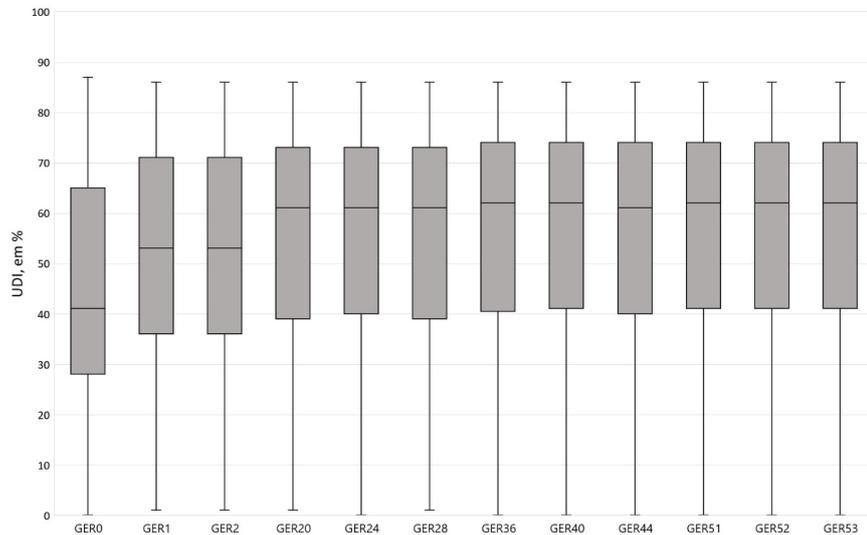
Fonte: Os autores.



A distribuição dos valores de UDI nos sensores foi também realizada para indivíduos localizados no joelho da curva de Pareto de 12 gerações, sendo escolhidas as 3 primeiras, 6 intermediárias e as 3 últimas. Em [17] observa-se a tendência de aumento na quantidade de sensores dentro de faixas mais elevadas de UDI-a, de acordo com o valor médio de UDI encontrado. É possível também perceber que a partir da Geração 1, mais da metade dos sensores já possuem UDI acima de 50%, sendo que da Geração 20 em diante, a distribuição torna-se mais estável e mais de 50% dos indivíduos possuem UDI acima de 60%.

Figura 17- Distribuição dos valores de UDI contidos nos sensores de indivíduos localizados no joelho da curva de Pareto de 12 gerações.

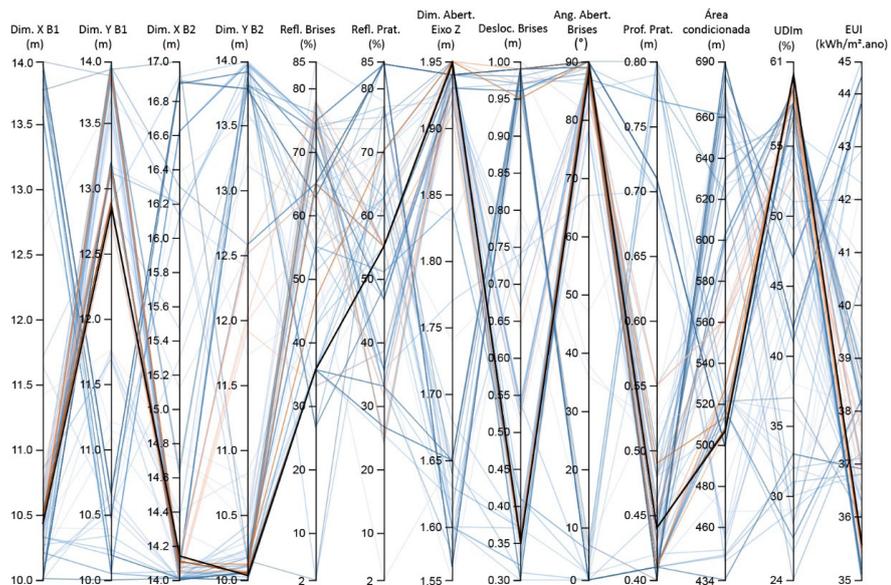
Fonte: Os autores.



A partir da análise do gráfico de coordenadas paralelas [18] é possível identificar visualmente as relações entre a variação dos parâmetros e os objetivos. As concentrações de indivíduos apontam os parâmetros que possuem maior impacto no UDI_m e EUI, assim, os eixos com menor dispersão de linhas contêm os parâmetros mais impactantes.

Figura 18- Relação entre a variação dos parâmetros, a área das zonas analisadas, UDI_m e a intensidade energética de casos da curva de Pareto, onde a linha preta demarca o caso ótimo, as linhas cor de laranja representam os joelhos das curvas e as azuis os demais casos selecionados (a variação de intensidade da cor ocorre conforme a geração, sendo as últimas mais escuras, em ambas as cores).

Fonte: Os autores.



Dentre os 10 parâmetros avaliados, o ângulo de abertura das aletas das proteções e a dimensão Z das aberturas, referentes à altura das janelas, foram os parâmetros mais importantes, considerando a orientação da fachada de aproximadamente 15°. Os casos presentes no joelho das curvas de Pareto das gerações analisadas concentram-se em ângulos superiores a 85°, que além de possibilitarem uma maior penetração de luz natural no ambiente, contribuem também para uma maior situação de conforto visual do usuário por permitirem maior visão para o exterior. A variação na dimensão das aberturas foi também fundamental para o alcance de índices elevados de UDI_{Im}, uma vez que o aumento de aproximadamente 40 cm na altura das janelas proporcionou um aumento na área de iluminação e ventilação dos APPs. Os melhores indivíduos concentram valores de afastamento das proteções em relação à fachada entre 35 e 40 cm; com exceção dos dois indivíduos que possuem níveis de UDI_{Im} iguais a 61%, que apresentam afastamento entre 95 e 100 cm. Quanto à refletância dos brises, é possível observar uma concentração até a Geração 36, com níveis acima de 70% nos casos ótimos, e a partir de tal geração os níveis caem para 35%⁴. As prateleiras apresentaram maior dispersão em relação aos valores de refletância, sendo possível observar uma refletância de entre 50 e 60% para este caso. As variações dimensionais foram pequenas em relação ao caso base, sendo as maiores da ordem de 1 metro. No entanto, quanto às dimensões dos blocos nos eixos X e Y, observou-se a maior influência das dimensões X no Bloco 1, e de X e Y no 2, quando analisados os objetivos.

Figura 19- Relação entre a área de piso e as áreas envidraçadas, entre o caso inicial e o indivíduo localizado no joelho da curva da Geração 53.

Fonte: Os autores.

		$A_{Ab,CI}$ ⁵	$A_{Ab,CO}$ ⁶	$A_{Pi,CI}$ ⁷	$A_{Pi,CO}$ ⁸	$Ab/Pi,CI$ ⁹	$Ab/Pi,CO$ ¹⁰
Bloco 1	Z1	28	35,9	108,6	122,5	0,3	0,3
	Z2	2,2	2,5	10,7	12,1	0,2	0,2
	Z7	21,6	26,2	92,1	100,2	0,2	0,3
	Z8/Z9	4,2	6	13,6	17,2	0,3	0,3
Bloco 2	Z4	24,8	26,7	102,2	90	0,2	0,3
	Z5/Z6	1,9	1,7	12,9	11,3	0,2	0,2
	Z11	8,5	9,4	51,1	45	0,2	0,2

⁴ Existe um grupo de indivíduos com níveis de refletância dos brises em 35%, no gráfico da Figura 18, no entanto, a escolha dos autores por destacar o indivíduo ótimo, em preto, sobrepôs à cor vermelha dos indivíduos representativos das últimas gerações de Pareto.

⁵ $A_{Ab,CI}$ = área de abertura do Caso Inicial.

⁶ $A_{Ab,CO}$ = área de abertura do Caso Otimizado

⁷ $A_{Pi,CI}$ = área de piso do Caso Inicial.

⁸ $A_{Pi,CO}$ = área de piso do Caso Otimizado.

⁹ $Ab/Pi,CI$ = relação entre a área de aberturas e a área de piso do Caso Inicial.

¹⁰ $Ab/Pi,CO$ = relação entre a área de aberturas e a área de piso do Caso Otimizado.

Z12	16,1	17,1	51,1	45	0,3	0,4
Z13	4,5	4	10,1	8,9	0,4	0,4
Z14	9	8	19,9	17	0,5	0,5
Z15	4,5	4	9,8	8,9	0,5	0,4

A variação das áreas, em [18], permite observar o intervalo ideal, entre 500 e 520 m², representado pela região que contém os casos da curva de Pareto. As áreas acima deste limite obtiveram valores satisfatórios de UDI_m, acima de 45%, porém apresentaram os maiores consumos, com EUI chegando a 44 kWh/(m².ano). Os indivíduos com áreas inferiores ao limite ideal apresentaram baixos valores de UDI_m, em torno de 30%, já os índices de EUI foram satisfatórios, e alguns bem próximos aos atingidos pelos melhores indivíduos das últimas gerações. O limite superior, no entanto, tende a ser reduzido, como é visível pela posição dos indivíduos localizados no joelho da curva de Pareto das últimas gerações, adotando valores em torno de 510 m². Em [19] é possível analisar a variação de área de piso por zona, entre o Caso Inicial e indivíduo localizado no joelho da curva de Pareto da Geração 36. A variação na área da dos blocos foi de apenas 1,3 m², tendo o Caso Otimizado uma área final de 506,6 m². A pequena variação das áreas e o aumento na dimensão das aberturas possibilitou o aumento na relação entre a área de aberturas e a área de piso nas Zonas 4, 7 e 12, no entanto, houve uma redução de 10% na mesma relação para a Zona 15.

Conclusões

Este trabalho permite avançar na utilização de processos de otimização baseada em simulação (OBS) para geração de novas configurações espaciais e volumétricas ideais para uma edificação existente, através de objetivos como EUI e UDI_m. A abordagem adotada, no entanto, é uma forma simplificada quando comparada às inúmeras maneiras de aplicação de processos de OBS em arquitetura, que vão desde as fases iniciais de projeto a estudos de edificações já existentes, como é o caso deste. Este método simplificado, foi escolhido com vistas a demonstrar a utilização de processos de OBS envolvendo simulação luminosa e energética em uma edificação já construída. No entanto, ressalta-se a possibilidade de aplicação do mesmo método em geometrias diversas à utilizada, com maior complexidade formal e volumétrica, e até mesmo é possível aplicar este método em casos onde o usuário deseja avaliar um maior número de parâmetros, dado o melhor desempenho do algoritmo HypE em situações com maior número de objetivos.

A possibilidade de integração de simulações luminosas dinâmicas realizadas pelo DIVA, e energéticas por meio do Archsim/Energy Plus, permite uma maior apuração dos resultados obtidos, uma vez que a carga térmica para o sistema de condicionamento artificial considera também o uso da iluminação gerado pelo DIVA.

Verificou-se que a adição de proteções solares e prateleiras de luz, mesmo sem variações volumétricas, já resultou em melhorias no desempenho da edificação. Houve uma redução significativa no consumo de energia elétrica com sistemas de ar condicionado e iluminação artificial. A redução de 30% no EUI do Caso Base em relação ao

Inicial, equivalente a 14 kWh/(m².ano), é consequência direta dos elementos de proteção que impedem a incidência de radiação solar direta e das prateleiras que garantem uma melhor distribuição da luz natural.

Os resultados obtidos permitiram identificar melhorias significativas na disponibilidade de iluminação natural e consumo energético da edificação, dado que o modelo final possui cerca de 50% dos sensores com níveis de UDI-a acima de 65% e EUI próximo a 35,5 kWh/(m².ano), uma melhoria de 20% nos níveis de UDI_m e de 5% no EUI, em relação ao Caso Inicial.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo apoio financeiro.

Referências

ASADI, Ehsan; DA SILVA, Manuel Gameiro; ANTUNES, Carlos Henggeler; DIAS Luís. A multi-objective optimization model for building retrofit strategies using TRNSYS simulations, GenOpt and MATLAB. **Building and Environment**, v. 56, p. 370-378, 2012.

BADER, Johannes; ZITZLER, Eckart. HypE: An Algorithm for Fast Hypervolume-Based Many-Objective Optimization. **Evolutionary Computation**, v. 19, n. 1, p. 45-76, 2011.

BANOS, R; MANZANO-AGUGLIARO, F.; MONTOYA, F. G.; GIL, C.; ALCAYDE, A.; GÓMEZ, J. Optimization methods applied to renewable and sustainable energy: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 4, p. 1753-1766, 2011.

BELLIA, Laura; FRAGLIASSO, Francesca; PEDACE, Alessia. Lighting control systems: factors affecting energy savings' evaluation. **Energy Procedia**, v. 78, p.2645-2650.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia, Empresa de Pesquisa Energética – EPE. **Balanco Energético Nacional 2017 – Ano base 2016**. Relatório Síntese. 2017. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2017.pdf>. Acesso em: 11 nov. 2017.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente, Eficiência Energética em Edificações – Projeto 3E. **Diagnósticos Energéticos: Benchmarking de desempenho energético em edifícios públicos**. Relatório Síntese. 2017. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/images/arquivo/80051/Site_novo/Benchmarking/Relatorio%20Diagnosticos%20Energeticos.pdf>. Acesso em: 09 fev. 2018.

BROTAS, Luisa; RUSOVAN, Danijel. Parametric daylight envelope. In: PLEA2013 - Conference, Sustainable Architecture for a Renewable Future, 29., 2013. Munique. **Proceedings...** Munique, 2013.

CARTANA, Rafael Prado; PEREIRA, Fernando Oscar Ruttikay; BERTÉ, Eduardo João. Avaliação de desempenho térmico e lumínico de elementos de controle solar projetados através de modelagem paramétrica. In: Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 16., 2016. São Paulo. **Anais...** São Paulo, 2016. p. 604-619.

CARTANA, Rafael Prado; PEREIRA, Fernando Oscar Ruttikay; MAYER, Adir. Estudo piloto para análise de elementos de controle solar com formas complexas. In: Encontro Nacional e Encontro Latino-americano de Conforto do Ambiente Construído, 14. e 10., 2017. Balneário Camboriú. **Anais...** Balneário Camboriú, 2017. p. 1684-1693.

DIDONÉ, Evelise Leite; PEREIRA, Fernando Oscar Ruttkey. Simulação computacional integrada para a consideração da luz natural na avaliação do desempenho energético de edificações. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 10, n. 4, p. 139-154, out./dez 2010.

DORNELLES, Kelen Almeida. **Absortância solar de superfícies opacas**: métodos de determinação e base de dados para tintas látex acrílica e PVA. 2008. 160p. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.

EVINS, Ralph. A review of computational optimisation methods applied to sustainable building design. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 22, p. 230-245, 2013.

FONSECA, L. P. G. et al. Otimização multiobjetivo das dimensões dos ambientes de uma residência unifamiliar baseada em simulação energética e estrutural. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 17, n. 1, p. 267-288, mar. 2017. Disponível em <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1678-86212017000100267&lng=pt&nrm=iso>. acessos em 14 ago. 2018. <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212017000100135>.

GAGNE, Jaime; ANDERSEN, Marilyne. A generative facade design method based on daylighting performance goals. **Journal of Building Performance Simulation**, v. 5, n. 3, p. 141-154, 2011.

GAVIRIA, Laura Rendón; PEREIRA, Fernando Oscar Ruttkey; MIZGIER, Martín Ordenes. Influência da configuração urbana na geração fotovoltaica com sistemas integrados às fachadas. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 13, n. 4, p. 7-23, out./dez 2013.

GHOBAD, Ladan; ARDAKAN, Aho Malekafzali; HU, Jianxin; PLACE, Wayne. Comparison of Climate-Based Daylighting in Two Integrated Simulation Tools: DIVA and OpenStudio. In: PLEA2013 - Conference, Sustainable Architecture for a Renewable Future, 29., 2013. Munique. **Proceedings...** Munique, 2013.

GONZÁLEZ, Javier; FIORITO, Francesco. Daylight Design of Office Buildings: Optimisation of External Solar Shadings by Using Combined Simulation Methods. **Buildings**, v. 5, n. 2, p. 560-580, 2015.

GRANADEIRO, Vasco; DUARTE, José Pinto; PALENSKY, Peter. Building envelope shape design using a shape grammar-based parametric design system integrating energy simulation. In: AFRICON, 2011. Zâmbia. **Anais...** Zâmbia: IEEE, 2011. p. 327-345.

GRANADEIRO, Vasco; PINA, Luis; DUARTE, José P.; CORREIRA, João R.; LEAL, Vítor M. S. A general indirect representation for optimization of generative design systems by genetic algorithms: Application to a shape grammar-based design system. **Automation in construction**, v. 35, p. 374-382, 2013.

JAKUBIEC, J. Alstan; REINHART, Christoph F. DIVA 2.0: Integrating daylight and thermal simulations using Rhinoceros 3D, Daysim and EnergyPlus. In: Conference of International Building Performance Simulation Association, 12., 2011. Sydney. **Proceedings...** Sydney, 2011.

MAGNIER, Laurent; HAGHIGHAT, Fariborz. Multiobjective optimization of building using TRNSYS simulations, genetic algorithm, and Artificial Neural Network. **Building and Environment**, v. 45, p. 739-746, 2010.

MARDALJEVIC, J.; ANDERSEN, M.; ROY, N.; CHRISTOFFERSEN, J. Daylighting metrics: is there a relation between useful daylight illuminance and daylight glare probability? In: Building Simulation and Optimization Conference, 1., 2012. Loughborough. **Anais...** Loughborough: IBPSA, 2012. p. 189-196.

MOHSENIN, Mahsan; HU, Jianxin. Assessing daylight performance in atrium buildings by using Climate Based Daylight Modeling. **Solar Energy**, v. 119, p. 553-560, 2015.

Modelagem paramétrica e desempenho da edificação: otimização baseada em simulação luminosa e energética através de algoritmos genéticos.

Parametric modeling and building performance: lighting and energy simulation based optimization through genetic algorithms

NABIL, A.; MARDALJEVIC, J. Useful daylight illuminances: a new paradigm for assessing daylight in buildings. **Lighting Research & Technology**, v. 37, n. 1 p. 41-49, 2005.

NABIL, Azza; MARDALJEVIC, John. Useful daylight illuminances: A replacement for daylight factors. **Energy and Buildings**, v. 38 p. 905-913, 2006.

NGUYEN, Anh-Tuan; REITER, Sigrid; RIGO, Philippe. A review on simulation-based optimization methods applied to building performance analysis. **Applied Energy**, v. 113, p.1043-1058, 2014.

OMIDFAR, Azadeh. A methodology for designing contemporary high performance shading screen-the integration of 'form' and the DIVA simulation tool. In: Conference of International Building Performance Simulation Association, 12., 2011. Sydney. **Proceedings...** Sydney, 2011.

SANTANA, L.O; GUIMARÃES, Í.B.B; CARLO, J.C., 2015. Parametrização aplicada ao desempenho energético de edificações. **V!RUS**, São Carlos, n. 11, 2015.

SANTANA, Laila Oliveira. **Otimização multiobjetivo de edificações residenciais energeticamente eficientes por meio de algoritmos genéticos**. 2016. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) — Departamento de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

TAGLIARI, Ana; FLORIO, Wilson. Fabricação Digital de Superfícies: Aplicações da Modelagem Paramétrica na Criação de Ornamentos na Arquitetura Contemporânea. In: SIGRADI, 13., 2009. São Paulo. **Anais...** São Paulo, 2009. p. 59-61.

TORRES, Santiago L.; SAKAMOTO, Yuzo. Facade design optimization for daylight with a simple genetic algorithm. In: International Building Performance Simulation Association Building Simulation Conference, 11., 2007. Beijing. **Proceedings...** Beijing, 2007. p. 1162-1167.

TURRIN, Michela; VON BUELOW, Peter; STOUFFS, Rudi. Design explorations of performance driven geometry in architectural design using parametric modeling and genetic algorithms. **Advanced Engineering Informatics**, v. 25, n. 4, p. 656-675, 2011.

VENÂNCIO, Raoni; PEDRINI, Aldomar. Investigando o projeto de envoltória: questionário sobre prática arquitetônica e desempenho térmico. In: Encontro Nacional e Encontro Latino-americano de Conforto no Ambiente Construído, 11. E 7., 2011. Búzios. **Anais...** Búzios, 2011. p. 1-10.

WEISS, Ticiania; TAMURA, Cintia; KRÜGER, Eduardo L. Uso de simulação computacional como suporte a um estudo de iluminação natural em câmara climática. In: Encontro Nacional e Encontro Latino-americano de Conforto do Ambiente Construído, 13. e 9., 2015. Campinas. **Anais...** Campinas, 2015. p. 1-10.

WORTMANN, Thomas. Model-based Optimization for Architectural Design: Optimizing Daylight and Glare in Grasshopper. **Technology|Architecture + Design**, v. 1, p. 176-185, 2017.

WORTMANN, Thomas. OPOSSUM: Introducing and Evaluating a Model-Based Optimization Tool for Grasshopper. In: International Conference of the Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia, 22., 2017. Hong Kong. **Proceedings...** Hong Kong, 2017. p. 283-293.

WORTMANN, Thomas; NANNICINI, Giacomo. Black-Box Optimization Methods for Architectural Design. In: International Conference of the Association for Computer-

Modelagem paramétrica e desempenho da edificação: otimização baseada em simulação luminosa e energética através de algoritmos genéticos.

Parametric modeling and building performance: lighting and energy simulation based optimization through genetic algorithms

-Aided Architectural Design Research in Asia, 21., 2016. Hong Kong. **Proceedings...** Hong Kong, 2016.

WORTMANN, Thomas; WAIBEL, Christoph; NANNICINI, Giacomo; EVINS, Ralph; SCHROEPFER, Thomas; CARMELIET, Jan. Are Genetic Algorithms Really the Best Choice for Building Energy Optimization? In: SimAUD, X., 2017. Toronto. **Proceedings...** Toronto, 2017. p. 51-58.

DATA DA SUBMISSÃO DO ARTIGO: 16/07/2018 APROVAÇÃO: 06/08/2018

RESPONSABILIDADE INDIVIDUAL E DIREITOS AUTORAIS

A responsabilidade da correção normativa e gramatical do texto é de inteira responsabilidade do autor. As opiniões pessoais emitidas pelos autores dos artigos são de sua exclusiva responsabilidade, tendo cabido aos pareceristas julgar o mérito e a qualidade das temáticas abordadas. Todos os artigos possuem imagens cujos direitos de publicidade e veiculação estão sob responsabilidade de gerência do autor, salvaguardado o direito de veiculação de imagens públicas com mais de 70 anos de divulgação, isentas de reivindicação de direitos de acordo com art. 44 da Lei do Direito Autoral/1998: "O prazo de proteção aos direitos patrimoniais sobre obras audiovisuais e fotográficas será de setenta anos, a contar de 1º de janeiro do ano subsequente ao de sua divulgação".

O CADERNOS PROARQ (issn 1679-7604) é um periódico científico sem fins lucrativos que tem o objetivo de contribuir com a construção do conhecimento nas áreas de Arquitetura e Urbanismo e afins, constituindo-se uma fonte de pesquisa acadêmica. Por não serem vendidos e permanecerem disponíveis de forma *online* a todos os pesquisadores interessados, os artigos devem ser sempre referenciados adequadamente, de modo a não infringir com a Lei de Direitos Autorais.