XV ENCAC Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído
XI ELACAC Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído
JOÃO PESSOA | 18 a 21 de setembro de 2019

SIMULAÇÃO PARAMÉTRICA DE BRISE-SOLEIL EM FACHADA OESTE PARA REDUÇÃO DE CONSUMO ENERGÉTICO EM EDIFICAÇÃO COMERCIAL

Ana Júlia Maia Mairink (1); Jacqueline Alves Vilela (2); Marina da Silva Garcia (3); Ana Carolina de Oliveira Veloso (4); Roberta Vieira Gonçalves de Souza (5)
(1) Arquiteta, Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável (UFMG), anajuliamaiamayrink@gmail.com
(2) Arquiteta, Doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável (UFMG), arqjacvilela@gmail.com
(3) Arquiteta e Urbanista, Doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável (UFMG), marinagarcia.arq@gmail.com
(4) Arquiteta, Pós-Doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável (UFMG), acoveloso@gmail.com
(5) Arquiteta, D. Sc., Professora do Dep. de Tecnologia da Arquitetura e do Urbanismo (UFMG), robertavgs2@gmail.com

Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Arquitetura (EA-UFMG), Rua Paraíba, 697, 30130-141 - Belo Horizonte - MG, Tel. (31)3409-882

RESUMO

O objetivo deste artigo é realizar um estudo de caso utilizando a simulação paramétrica para otimização de um *brise* em fachada oeste e comparar os resultados obtidos com os de *brises* dimensionados tradicionalmente, tendo em vista metas de redução de consumo energético previstas no LEED v.4.A metodologia inclui levantamento de dados, elaboração de algoritmo para simulações paramétricas, realização das simulações e análise de resultados. As simulações utilizaram um projeto de edifício comercial em Belo Horizonte. Os resultados apontam maior redução de consumo a partir da aplicação de *brises* otimizados, aumentando a pontuação atingida no LEED v.4. O artigo descreve um algoritmo para a realização das simulações e evidencia que a simulação paramétrica é um processo válido por gerar diferentes opções projetuais aliadas a resultados quantificáveis, que podem embasar tomadas de decisão mais informadas, principalmente no que tange ao consumo energético.
Palavras-chave: Eficiência energética em edificações. Simulação paramétrica. *Brises*. LEED.

ABSTRACT

The aim of this paper is to carry out a case study using the parametric simulation for the optimization of a solar shading device and to compare the obtained results with those of traditionally designed brise-soleil, taking into account the energy consumption reduction targets set forth in LEED v.4. The methodology includes data collection, development of an algorithm for parametric simulations, computer simulations and results analysis. A commercial building project in Belo Horizonte was used as the base case for simulation. The results indicate a reduction in energy consumption when compared to traditionally dimensioned solar shading devices, increasing the achieved score in LEED. The paper describes the algorithm used for the simulations and shows that parametric simulation is a valid process for generating different design options combined with quantifiable results, which can support more informed decisions, especially regarding energy consumption.
Keywords: Energy efficiency in buildings. Parametric simulation. *Brise-soleil*. LEED.

1. INTRODUÇÃO

A permanente discussão a respeito do desenvolvimento sustentável nas agendas mundiais faz com que seja imprescindível a avaliação dos impactos gerados pelo setor da construção civil no planeta. Este setor é responsável por uma parcela significativa dos danos causados pelo ser humano ao meio ambiente, tanto pelos recursos naturais utilizados como pelos resíduos gerados em todo o ciclo de vida das construções (BRASIL, 2017). Segundo a *International Energy Agency* (IEA, 2018), a construção e operação de edifícios foi responsável por cerca de 36% do consumo final global de energia e 40% das emissões de CO^2 do planeta em 2017.

Tendo em vista a tendência de aumento do contingente populacional urbano e do consumo energético demonstrado pelo Plano Nacional de Energia 2030 (BRASIL, 2007), o cenário futuro de segurança do abastecimento de energia elétrica no Brasil possui dois problemas básicos: o crescimento da demanda e a capacidade de expansão da geração de energia elétrica. Portanto, a investigação de processos e tecnologias em prol da eficiência energética na indústria da construção civil, pode contribuir para a mitigação dos impactos gerados por este setor (CAO; DAI; LIU, 2016). Segundo o Programa Nacional de Eficiência Energética em Edificações (PROCEL EDIFICA, 2017), estima-se um potencial de redução de consumo de 30% para edifícios existentes e de 50% para edifícios novos, com a implementação de ações de eficiência energética nos sistemas de iluminação, ar condicionado e na envoltória. Este dado de economia de energia possível para edificações existentes é corroborado por Alves *et al* (2017), que encontrou para edifícios de escritório em Belo Horizonte - Brasil, uma economia possível de 28%.

No Brasil, as questões relativas ao desempenho térmico e à eficiência energética em edificações têm se tornado cada vez mais evidentes, principalmente após a promulgação das Normas NBR 15220 (ABNT, 2005) e NBR 15575 (ABNT, 2013), além do Regulamento Técnico de Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edifícios Residenciais (RTQ-R) (BRASIL, 2012) e do Regulamento Técnico de Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, Públicos e de Serviços (RTQ-C) (BRASIL, 2010) que aborda requisitos de desempenho mínimo para diferentes níveis de eficiência energética, incluindo a avaliação dos sistemas de envoltória, iluminação e condicionamento de ar.

Outro mecanismo de avaliação de eficiência energética e sustentabilidade presente no país é o selo americano LEED (*Leadership in Energy And Environmental Design*), sistema desenvolvido para certificar edificações através da colocação de quesitos relativos à sustentabilidade e à redução do impacto ambiental das construções que adotam práticas ambientalmente responsáveis. O LEED v.4 permite uma análise de critérios que, analisados de forma multidisciplinar, possibilitam aos agentes envolvidos, tomadas de decisão mais embasadas, desde as fases de desenvolvimento inicial do projeto até situações de *retrofit* de edifícios existentes.Por se tratar de uma análise de multicritérios, o LEED é considerado uma importante referência no que tange ao consumo de energia nas edificações (USGBC, 2018).

É possível, por meio do processo de simulação computacional, avaliar diferentes estratégias projetuais relacionadas a questões como propriedades térmicas dos materiais, orientação da edificação, níveis de iluminação natural e níveis de conforto térmico tendo em vista o atingimento de níveis mínimos de métricas relacionadas ao desempenho da edificação.

Uma solução de proteção contra ganhos térmicos excessivos das envoltórias comumente adotada é o uso de proteção solar, ou *brise-soleil*, que, conforme Ouahrani e Touma (2018)pode ser incorporado às edificações de diversas formas e promover a redução do consumo de energia. Existem variados software gratuitos, capazes de gerar máscaras de sombra para *brises*, auxiliando assim no seu dimensionamento. Citam-se como exemplos o software Analysis Sol-ar (LABEEE, 2018) e o The Solar-Tool© v 1.10descrito por BITTENCOURT(2004), que são usualmente utilizados por projetistas brasileiros para o dimensionamento de elementos de sombreamento.

A simulação computacional é também um instrumento importante para avaliar o desempenho térmico e energético de edificações para diferentes alternativas de projeto. Mendes et al. (2005), afirmam que "com a simulação computacional, pode-se estimar a redução do consumo de energia, do custo desse consumo e até mesmo do impacto ambiental provocado pela alternativa de projeto antes mesmo de sua execução". Ainda, Carlo e Lamberts (2010) apontam que a simulação computacional, embora não represente a realidade em sua totalidade, é a forma mais flexível e completa de observar aspectos relacionados à eficiência energética de edificações.

A parametria pode ser entendida como uma prática de modelagem digital, ou programação visual, na qual se podem modelar uma série de variáveis e se atribuir relações matemáticas entre as mesmas, gerando assim algoritmos que abrangem grande quantidade de possibilidades. Com o surgimento de ferramentas paramétricas e técnicas de fabricação digital, os processos de projeto se modificaram e a capacidade de gerar rapidamente milhares de variantes de projeto levou a novas questões sobre como avaliar as opções, não

apenas pelo viés estético, mas de forma multidisciplinar. Para abordar esta questão, as ferramentas de projeto se integraram a programas de simulação de desempenho que permitem aos usuários quantificar o comportamento térmico, energético e luminoso (REINHART et. al, 2015). Trabalhos atuais nacionais e internacionais têm abordado o uso da modelagem paramétrica junto a simulação energética, térmica, luminosa e de ventilação, como o de Cartana, Pereira e Mayer (2018), Manz *et al.* (2018) e Shiel, Tarantino e Fischer (2018).Uma das vantagens da simulação paramétrica consiste na possibilidade de avaliação de múltiplas soluções de projeto de forma mais automatizada do que as práticas atuais onde as simulações de cada opção projetual são geradas de forma individualizada.

Dentre os programas que permitem a análise paramétrica estão o Rhinoceros® e os plug-ins Grasshopper, Honeybeee, Ladybug e Galápagos. O Rhinoceros® 3D (de modelagem do tipo *Non Uniform Rational Basis Spline* -NURBS) junto a seu *plug-in* Grasshopper, que é um editor de algoritmo gráfico, permitem a elaboração de formas paramétricas sem a necessidade de conhecimento específico de programação por linguagens de *script* (LAGIOS; NIEMASZ e REINHART, 2010). O Rhinoceros surgiu nos anos 1990 nos Estados Unidos como um comando do AutoCAD e com sua grande repercussão se desenvolveu como um software principal. Permite a execução de desenhos em 2D que, por meio de configurações, se transformam em visualizações 3D (BINI e GALAFASSI, 2017).Um dos plug-ins mais conhecidos para trabalho junto ao Rhinoceros® é o Grasshopper, programa que utiliza a modelagem paramétrica por meio de programação algorítmica, determinando as formas matemáticas representadas visualmente por desenhos de "pilhas" ou "baterias", que se conectam e montam as formas que podem ser vistas na interface do Rhinoceros®. No que tange às análises ambientais e energéticas, destacam-se o Honeybee e Ladybug, que são plug-ins gratuitos e de código aberto para o Grasshopper. Eles permitem que o projetista explore a relação direta entre os dados ambientais e a geração do projeto por meio de saídas de dados gráficos integrados à geometria do prédio. O *plug-in* Galapagos permite a geração de uma matriz de possibilidades de associação definidas a partir um "genoma" (variáveis que podem ser associadas) em um processo de combinações definido por um algoritmo de seleção (FOOD4RHINO, 2018).

Considera-se que tais ferramentas possuem o potencial de contribuir para a maior adoção da simulação computacional com foco em projetos mais responsáveis ambientalmente desde as fases iniciais do processo. No entanto, considera-se também que, como já afirmava Rogers (1995), o nível de dificuldade das ferramentas continua sendo um fator de grande influência para sua adoção. Nota-se, neste contexto, que apesar das potencialidades dos referidos programas, ainda existem poucas publicações científicas para o auxílio na elaboração prática de avaliações do desempenho energético de edificações.

2. OBJETIVO

Tendo em vista a contextualização apresentada, o objetivo deste artigo é realizar um estudo de caso utilizando a simulação paramétrica para otimização energética de um *brise* em fachada oeste e comparar os resultados obtidos com os de *brises* dimensionados de forma tradicional (a partir do *software Sun-Tool*), tendo em vista as metas de redução de consumo de energia previstas no LEED v.4. Para atingir este objetivo, o presente trabalho abordou também o desenvolvimento de algoritmo de simulação paramétrica utilizando o *software Rhinoceros*® e os *plug-ins Grasshopper, Honeybeee, Ladybug e Galápagos*.

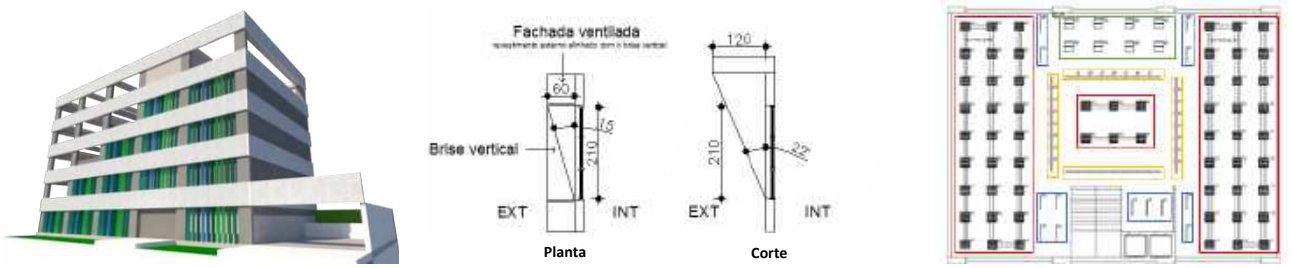
3. MÉTODO

A metodologia do presente trabalho seguiu seis etapas distintas: levantamento de dados do projeto arquitetônico a ser utilizado como estudo de caso; revisão de literatura em artigos científicos e sites de tutoriais dos programas utilizados; planejamento das simulações; elaboração do algoritmo de simulação paramétrica de consumo energético com o *Rhinoceros® 5.0, Grasshopper, Honeybee, Ladybug e Galápagos*; realização das simulações; e, por fim, a análise comparativa de dados em relação ao consumo energético. O projeto arquitetônico e os parâmetros de simulação utilizados serão descritos com maior detalhe nos itens a seguir.

3.1. Descrição do estudo de caso

Optou-se por estudar um edifício comercial localizado em Belo Horizonte/MG (Figura 1A). Para o estudo da parametrização dos *brises* da fachada oeste, utilizou-se o terceiro pavimento do edifício, classificado como *Open Office*, representando um pavimento aberto, sem divisões internas, com janelas de vidro comum nas 4 fachadas. O pavimento estudado tem peitoril de 0,70 m, altura de janelas de 2,10 m e verga de 0,70 m, perfazendo um pé direito de 3,50 m. A área total do pavimento é de 367,40 m².

O projeto contempla *brises* horizontais e verticais dispostos nas fachadas norte/sul e leste/oeste, respectivamente. Os *brises* horizontais são em concreto armado (prolongamento da laje do pavimento superior) com largura de 1,20m e espessura de 0,10m. Os *brises* verticais possuem a seguinte especificação: *brise* metálico, largura 0,60m e espessura da chapa 0,80 mm (Figura 1B). Os *brises* dimensionados com o *software The Solar-Tool*© são descritos na Tabela 1. Na fachada oeste, foram projetados por este método, 26 elementos verticais para cada vão de 5,64m, e estrutura de fixação horizontal com largura de 0,60m. Foi desenvolvido para este andar um projeto luminotécnico representado na Figura 1C.



(A) (B) (C)

Legenda (C): Vermelho: luminária embutida (4 x LED 31W), Verde: luminária embutida (1 x LED 17W), Azul: luminária de sobrepor (1 x LED 16W) e Amarelo: luminária de sobrepor (1 x LED 9W)

Figura 1 - (A) Perspectiva do edifício comercial estudado;(B) Detalhe dos *brises* existentes no projeto e (C)Planta projeto forro e luminotecnia do 3º pavimento, (MAIRINK, 2018).

Tabela 1 – Características da proteção solar dimensionada através do programa The Solar-Tool©

Fachada	Comprimento	Altura	Brise horizontal		Brise Vertical	
			Profundidade	Nº de elementos	Profundidade	Nº de elementos
Norte	16,80 m	3,50 m	1,20 m	1	-	-
Sul	16,80 m	3,50 m	1,20 m	1	-	-
Leste	21,72 m	3,50 m	-	-	0, 60 m	26
Oeste	21,72 m	3,50 m	-	-	0, 60 m	26

3.2. Planejamento das simulações computacionais

O presente estudo contemplou três grupos de simulação, nos quais pretendeu-se avaliar o consumo energético anual referente ao LEED v.4. Para isso, optou-se por utilizar o software *Rhinoceros*® com o *plug-in* de parametrização *Grasshopper*. Para as análises de consumo energético, foram considerados os *plug-ins Honeybee e Ladybug.* Os grupos de simulações realizadas foram:

Estudo de caso 1- *Baseline*: simulou-se o pavimento sem nenhum elemento de proteção solar.

Estudo de caso 2 – *Brises* dimensionados no projeto: foi modelado o pavimento com os brises horizontais e verticais existentes para todas as fachadas. A opção por simular todos os *brises* projetados, apesar do presente estudo focar na parametrização apenas do *brise* da fachada oeste, foi feita para maior precisão nos dados de consumo energético.

Estudo de caso 3 – *Brises* parametrizados:realizou-se o estudo de parametrização dos brises verticais da fachada oeste mantendo os *brises* das outras fachadas conforme dimensionado anteriormente (Tabela 1). A definição da variação dos parâmetros dos *brises* verticais foi baseada em estudo preliminar de máscaras de sombra no *software The Solar-Tool*©. Os parâmetros podem ser vistos na Tabela 2.

Tabela 2 - Parâmetros e suas variações.

Métrica simulada	Parâmetros variáveis	Variações
Consumo de energia elétrica	Cor	Branco neve, verde limão e verde primavera Refletância = 0,2 a 0,8
	Quantidade de brises no vão	De 10 a 30
	Profundidade	0,30 a 0,60 m.
	Angulação[1]	0º a 45º

(1) Ângulo 0º refere-se a *brise* perpendicular à fachada oeste, e 45º refere-se a brises que permitem a incidência solar no inverno.

As análises de consumo de energia dos *brises* parametrizados envolveram o *plug-in Galápagos* para a sua otimização, tendo como objetivo encontrar a solução que apresentasse menor consumo energético. A meta de redução de consumo pretendida foi de 24%, referente a 10 pontos do LEED v.4. Salienta-se que o objetivo do trabalho envolveu a análise do *brise* a ser adotado visando a maior redução de consumo de

energia elétrica. Portanto, as análises apresentadas são referentes à elaboração do algoritmo de simulação térmica e seus resultados para os três estudos de caso.

3.3. Parâmetros de simulação

Os Estudos de Caso envolveram parâmetros de entrada fixos, com a variação dos *brises* da fachada oeste.

Parâmetros Fixos: em todas as simulações realizadas, considerou-se Azimute de 15º (mais frequente na cidade de Belo Horizonte) e apenas uma zona térmica para o pavimento. Os parâmetros fixos referentes às cargas internas de equipamentos e iluminação artificial podem ser vistos na Tabela 3. Para a densidade de ocupação, considerou-se a quantidade de postos de trabalho do pavimento, ou seja, 48 pessoas, chegando-se assim a 0,13 pessoas/m². Os parâmetros considerados para a elaboração da envoltória são apresentados no Quadro 1 e nas Tabelas4 e 5.

Tabela 3 – Densidades de potência instalada – equipamentos e iluminação.

Dados	Potência unitária	Quantidade	Área do pavimento	DPI	Fonte
Equipamentos (computadores)	250 W	48		32 w/m²	Projeto de layout
Iluminação					
Embutir	31 W	60	367,40 m²	6,6 w/m²	Projeto luminotécnico
Sobrepor	9 W	27			
Embutir	17 W	13			
Sobrepor	16 W	8			

Tabela 4 - Propriedades térmicas dos materiais da envoltória inseridos no Honeybee.

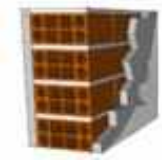
Envoltória	
Parede	
	Argamassa interna (2,50 cm) Bloco cerâmico (9,00 cm x 19,00 cm x 29,00 cm) Argamassa externa (2,50 cm) U [W/(m²K)] = 1,84 Ct [Kj/m²K] = 161
Vidro	
	Vidro simples 3 mm U [W/(m²K)] = 1,0 Fator solar = 0,914 (MILBRATZ, 2007) Transmitância a luz visível = 0,899 (MILBRATZ, 2007)
Cobertura e piso	
Superfícies consideradas adiabáticas por tratar-se de pavimento intermediário.	

Tabela 5 - Propriedades térmicas dos materiais das paredes inseridos no *Honeybe*e para alcance da transmitância desejada.

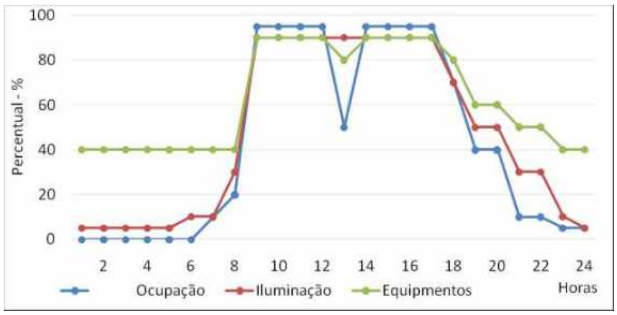
Dados	Tijolo	Argamassa	Fonte
Espessura (m)	0,35	0,025	
Condutividade (W/mK)	0,70	1,15	NBR 15220 (ABNT, 2005)
Densidade (Kg/m³)	1000	1800	NBR 15220 (ABNT, 2005)
Calor específico (Kg/°K)	920	1000	NBR 15220 (ABNT, 2005)
Absortância	0,73	0,72	Dornelles, Caram e Sichieri (2012)

Nas simulações realizadas, considerou-se que o pavimento é condicionado artificialmente, com o equipamento "16.VRF+DOAS", que se encontra no *default* dos sistemas de ar condicionados do *plug-in Honeybee.*Este sistema tem como características Fluxo de Gás Refrigerante Variável (VRF) com sistema

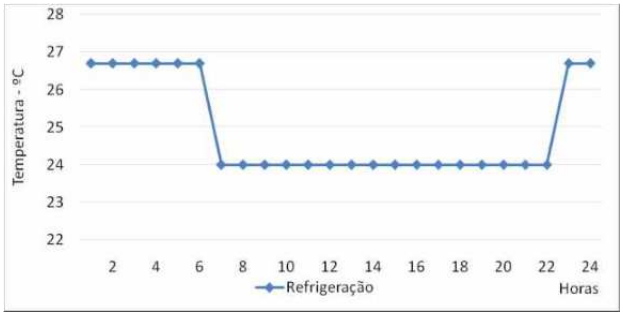
dedicado ao tratamento de ar externo (*Dedicated Outdoor Air System*). O sistema VRF utilizado possui condensação a ar, com COP de 3,81 e nível de eficiência A de acordo com o RTQ-C (BRASIL, 2009).O ar condicionado teve como *Set Point* as temperaturas: máxima (29ºC) e mínima (18ºC) sugeridas por Givoni (1992) para Belo Horizonte.

Os padrões de utilização para equipamentos, iluminação, ocupação e refrigeração considerados para as simulações foram os predefinidos pelo *Honeybee* para a tipologia *Office – Open Office* e podem ser vistos nos Gráficos 1 e 2.

Gráfico 1 – (A) Padrões de utilização predefinidos no *Honeybee*; (B) Padrão de utilização para refrigeração redefinido no *Honeybee.*



(A)



(B)

4. RESULTADOS

Os resultados e discussões deste estudo serão apresentados em dois grandes grupos. O primeiro grupo apresenta a elaboração do algoritmo para análise do consumo energético total anual (kWh/ano) desenvolvido com o *software Grasshopper*, utilizando os *Plug-ins Honeybee, Ladybug e Galapagos*.No segundo grupo são apresentados os resultados das simulações térmicas.

4.1. Processo de elaboração do algoritmo para análise energética

Inicialmente, foram criadas as superfícies das fachadas (norte, sul, leste e oeste) da única zona térmica que limita o pavimento estudado com o comando *Honeybee_CreateHBSrfs*, além da definição das superfícies de piso e teto como superfícies adiabáticas, já que o pavimento é intermediário à edificação. Foram adicionadas as áreas das respectivas janelas com o comando *Honeybee_addHBGlz*.As faces da zona térmica criada foram classificadas em parede, teto, piso e janelas com o comando *Honeybee_decomposebytype.* Criaram-se, em seguida, os materiais (argamassa, bloco cerâmico) com a composição apresentada no item de metodologia, através do comando *Honeybee__EnergyPlusopaquematerial*, gerando o componente da parede. Além disso, criou-se com o comando *Honeybee_EnergyPlusWindowMaterial* o componente vidro. Através do comando *Ladybug_downloadEPW* o arquivo climático da cidade de Belo Horizonte, MG, Estação Pampulha (SWERA) foi inserido ao algoritmo. Com o comando *Honeybee_setEnergyPlusZoneLoads,* foram inseridas as cargas internas devidas à ocupação, iluminação artificial, equipamentos (computadores) e ar condicionado, seguindo as especificações apresentadas no item de metodologia.Os *brises* foram criados com o comando *Honeybee_EnergyPlusShadeMaterial* e com o comando *Honeybee_EnergyPlusWindowShadeGenerator.* Os parâmetros referentes aos ângulos, número de *brises*, profundidade e refletância foram configurados no comando *NumbersSliders*, sendo mantidos fixos, com exceção dos *brises* verticais da fachada oeste, para os quais as simulações consideraram variações de acordo com o apresentado na Tabela 1. Após a criação dos mesmos, foi necessário utilizar o comando *Honeybee_EPContextSurfaces* para inserir os elementos de sombreamento na simulação do EnergyPlus. Caso contrário, os *brises* não seriam considerados na mesma. Após a configuração dos dados de entrada, utilizou-se o comando *Honeybee_GenerateEPOutput* para configurar os dados de saída desejados – no caso do presente trabalho, o consumo de energia elétrica. Após isso, o comando *Honeybee_RunEnergySimulation* foi empregado para realizar a simulação. Os dados de saída foram visualizados com comando *Honeybee_ReadEPResult* juntamente ao *Honeybee_ColorZonesByEPResults*.

O processo de elaboração dos algoritmos de modelagem e simulação de consumo energético vivenciado no desenvolvimento deste trabalho se mostrou complexo e dispendioso em termos de tempo. Notaram-se poucas publicações científicas e manuais técnicos para o auxílio do desenvolvimento de tais algoritmos. Portanto, reitera-se a importância de trabalhos que abordem este processo de elaboração para a

maior difusão e adoção das tecnologias envolvidas, tendo em vista os potenciais benefícios para o cenário da construção.

A partir da constatação de Rogers (1995), a respeito da adoção de novas tecnologias, considera-se que a elaboração dos algoritmos pode ser o principal entrave para a adoção da simulação paramétrica no processo projetual dos arquitetos, dado seu alto nível de dificuldade. No entanto, ressalta-se que, uma vez elaborados, os algoritmos podem ser utilizados para a avaliação de diferentes projetos. Assim, o maior investimento de tempo deverá ser feito na primeira vez que estas avaliações paramétricas venham a ser adotadas.

4.2.Resultados das simulações de consumo energético

A partir dos dados de entrada e do algoritmo elaborado, os resultados de consumo energético anual, assim como os consumos desagregados de iluminação, equipamentos e refrigeração (kWh/m²/ano) foram obtidos. Em relação aos estudos de *brises* otimizados, as simulações com o *Galápagos,* o qual automatizou a simulação das diferentes variações configuradas conforme Tabela 1, foram interrompidas após 9h de processamento. A Figura 2 apresenta um exemplo de visualização do funcionamento do *Galápagos*.

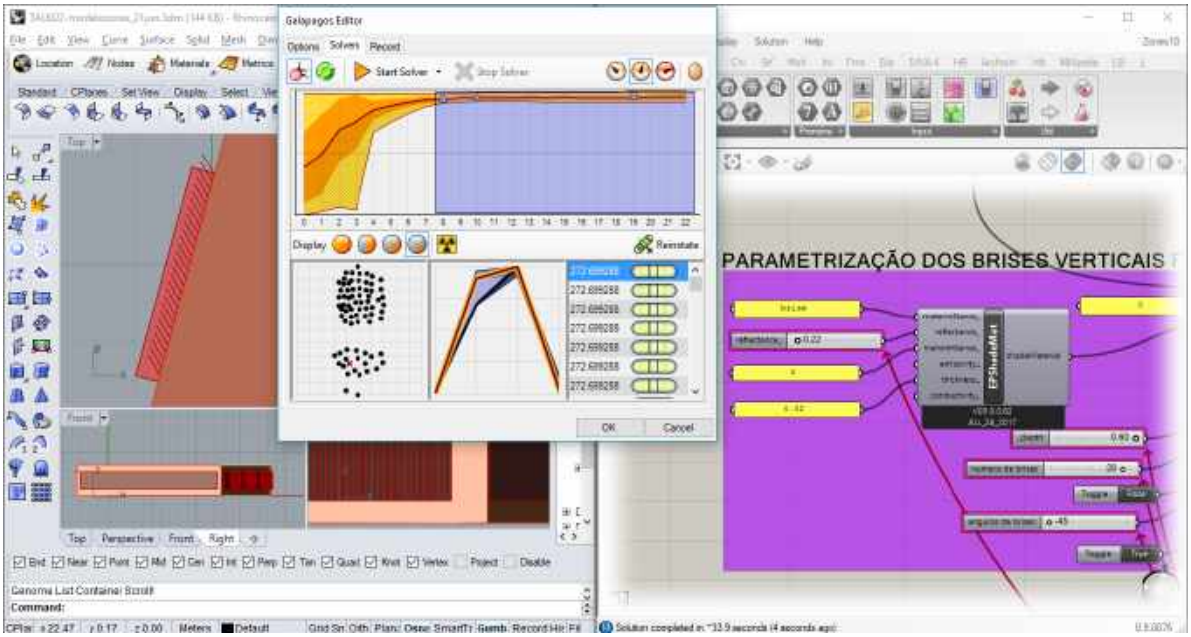


Figura 2 – Resultado e parâmetros do Brise Otimizado 1(BO1), a partir do uso do Galápagos.

A partir dos resultados obtidos, foram escolhidas cinco opções de *brises*, que apresentaram maior redução de consumo energético. As configurações obtidas a partir dos mesmos podem ser vistas na Tabela 6.

Tabela 6 –Configurações dos *brises* otimizados

Brise	**Ângulo**	**Número de brises**	**Profundidade do *brise* (m)**	**Refletância (%)**
Brise Otimizado 1	45	28	0,6	22
Brise Otimizado 2	45	24	0,6	21
Brise Otimizado 3	45	24	0,6	27
Brise Otimizado 4	41	22	0,5	66
Brise Otimizado 5	43	26	0,4	74

Os resultados de consumo energético, redução de consumo de energia em relação ao projeto base e pontuação obtida de acordo com os parâmetros do LEED v.4 para estes modelos são apresentados na Tabela 7. Verifica-se que não se atingiu a meta de pontuação prevista para a otimização de acordo com os parâmetros do LEED v.4.

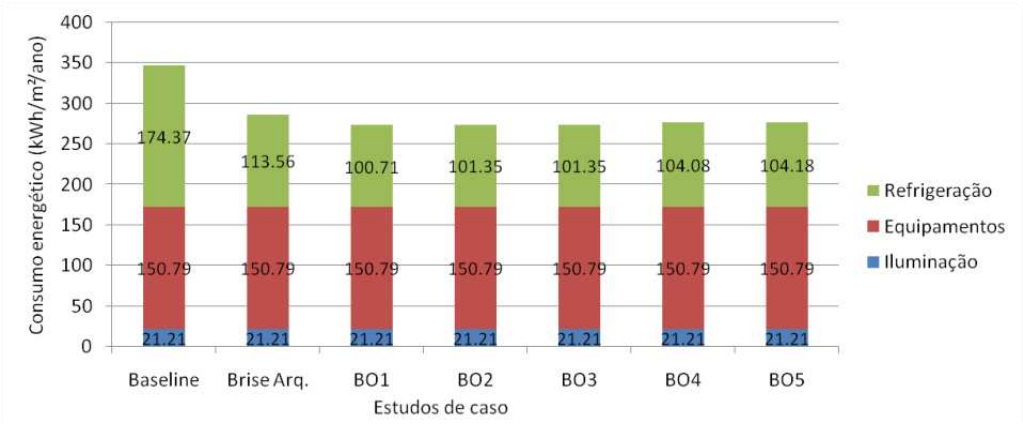
Tabela 7 – Configurações e resultados de consumo energético dos *brises* otimizados.

Brise	Consumo total (kWh/m².ano)	Redução em relação ao *Baseline*	Pontuação atingida no LEED
Sem brise (Baseline)	346,37	-	-
Brise dimensionado tradicionalmente	285,55	17,56%	6
Brise otimizado 1	272,69	21,27%	8
Brise otimizado 2	273,34	21,08%	8
Brise otimizado 3	273,34	21,08%	8
Brise otimizado 4	276,07	20,29%	8
Brise otimizado 5	276,17	20,26%	8
Meta de redução	263,24	24%	10

Apesar da similaridade de consumo energético entre os *Brises* otimizados 2 e 3 (BO2 e BO3, respectivamente) apresentados na Tabela 7, ressalta-se que a diferença nos modelos está na refletância do material do *brise*, que pode influenciar na distribuição da luz natural, e que esta diferença deve ser analisada em estudo específico.

O Gráfico 2 apresenta a compilação dos resultados de consumo anual total e de consumo desagregado de todos os Estudos de caso. Nota-se que os consumos de energia elétrica desagregados obtidos com a iluminação artificial e com os equipamentos não sofreram alteração entre os Estudos de caso, uma vez que a carga de equipamentos foi mantida constante e que a iluminação artificial não foi integrada à natural por sistemas de controle na presente fase do estudo apresentado. Comparando-se os resultados do *Baseline* com os outros Estudos de caso, percebe-se que existiu significativa redução de consumo relativo à refrigeração, o que converge com os princípios apontados por Ouahrani e Touma (2018) em relação à redução de ganho térmico pela adoção de proteção solar através de estudos paramétricos.

Gráfico 2 – Resultados de consumo total anual e desagregado dos Estudos de caso.



Legenda: BO1: *Brise* otimizado 1, BO2: *Brise* otimizado 2, BO3: *Brise* otimizado 3, BO4: *Brise* otimizado 4 e BO5: *Brise* otimizado 5

Nota-se que, a partir da adoção de *brises* dimensionados de forma tradicional, houve redução no consumo energético, da ordem de 17% em relação ao *Baseline*, o que representa economia considerável de energia elétrica. Cabe lembrar que a grande quantidade de superfícies envidraçadas na fachada oeste do projeto *Baseline* contribuiu para que se alcançasse este percentual de redução. Assim, reforça-se a importância da adoção de proteção solar em projetos que possuam esta característica.

A partir da Tabela 7, percebe-se ainda que os *brises* otimizados ofereceram redução de consumo energético de aproximadamente 20% em relação ao *Baseline*, e que, quando comparados com o *brise* dimensionado tradicionalmente em projeto,verificou-se que os otimizados alcançaram uma redução de consumo de energia elétrica aproximadamente 4%, atingindo maior pontuação na certificação LEED v.4 (8 e 6 pontos, respectivamente). No entanto, a partir dos resultados apresentados, pode-se observar que nenhum dos Estudos de Caso atingiu a redução de consumo energético máxima especificada pelo LEED que era de 24% de economia (10 pontos no LEED).

5. CONCLUSÕES

O presente estudo teve como objetivo realizar um estudo de caso utilizando a simulação paramétrica para otimização energética de *brises* e comparar os resultados obtidos com aqueles fornecidos por*brises* dimensionados de forma tradicional, tendo em vista o alcance das metas da certificação LEED v.4. Um pavimento de uma edificação comercial na cidade de Belo Horizonte foi utilizado como modelo para as simulações realizadas.

Considera-se que o estudo atingiu o objetivo de desenvolver um algoritmo de simulação paramétrica utilizando o *software Rhinoceros*® e os *plug-ins Grasshopper*, *Honeybee, Ladybug* e *Galápagos*, e de realizar a simulação de consumo energético nos Estudos de caso, verificando a redução de consumo de energia gerada pela aplicação de *brises* e sua otimização para a fachada oeste. Todavia, ao comparar os *brises* otimizados com os dimensionados tradicionalmente em projeto, percebeu-se diferença pequena de redução de consumo energético e de pontuação obtida na certificação LEED (4% e 2 pontos, respectivamente).

A elaboração do algoritmo foi considerada de alto nível de dificuldade, sendo possivelmente o principal entrave para a adoção da simulação paramétrica no processo de projeto dos arquitetos. A comparação de resultados de consumo energético entre o *Baseline* e os Estudos de caso que adotaram *brises*, demonstrou impacto significativo da adoção de proteção solar no consumo de energia, exercendo significativa influência no sistema de refrigeração, a grande área de fechamentos em vidro do projeto analisado.

Com este trabalho, contribuiu-se para a confirmação do impacto da adoção de *brises* como elementos de proteção solar em fachadas em relação à redução de admissão de carga térmica e a consequente redução do consumo com condicionamento artificial de ar, principalmente em edificações com grandes áreas envidraçadas.

Ainda, contribui-se para a compreensão a respeito da elaboração prática de algoritmo para análises paramétricas de consumo energético. Os autores acreditam que a simulação paramétrica, apesar do seu alto grau de dificuldade, é um processo válido por gerar diferentes resultados numéricos, que podem auxiliar nos processos de tomada de decisão, principalmente no que se refere ao consumo de energia. Espera-se que os resultados do presente trabalho contribuam para a maior compreensão e adoção das tecnologias utilizadas.

Tendo em vista o desempenho e qualidade ambiental interna dos ambientes, os autores consideram que as análises de otimização também devem contemplar a simulação da iluminação natural, sendo esta uma das limitações do trabalho. Assim, próximas etapas do trabalho contemplarão esta análise, para que se possa aliar menor consumo energético ao maior aproveitamento da luz natural.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, T.; MACHADO, L,. SOUZA, R.V.G.; WILDE, P. A methodology for estimating office building energy use baselines by means of land use legislation and reference buildings. **Energy and Buildings**, v. 143, p. 100-113, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15220-3**: desempenho térmico de edificações: parte 3 : zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro: 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15575-1**: edifícios habitacionais de até cinco pavimentos - Desempenho Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro: 2013.

BINI, C.; GALAFASSI, M. Desenvolvimento de um Fluxo de Trabalho para Dimensionamento de Elementos de Obstrução Solar, Utilizando Softwares de Modelagem Paramétrica. In: XIV ENCAC & X ELACAC: Habitat Humano: em busca de conforto ambiental, eficiência energética e sustentabilidade no século XXI, 2017, Santa Catarina. **Anais...** Balneário Camboriú, 27-29 set.

BITTENCOURT, L. **Uso das Cartas Solares: Diretrizes para arquitetos**. 4o. edição. Maceió: EDUFAL, 2004.

BRASIL. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial - INMETRO. **Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos**. Brasília: ELETROBRAS-PROCEL, 2010.

BRASIL. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial - INMETRO. **Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edifícios Residenciais**. Brasília: ELETROBRAS-PROCEL, 2012.

BRASIL. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Plano Nacional de Energia 2030**. Ministério de Minas e Energia; colaboração Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Brasília: MME: EPE, 2007, v.2. Projeções.

BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Construção Sustentável**. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/urbanismo-sustentavel/constru%C3%A7%C3%A3o-sustent%C3%A1vel>. Acesso em: fev. 2019.

CAO, X.; DAI, X.; LIU, J. Building energy-consumption status worldwide and the state-of-the-art technologies for zero-energy buildings during the past decade. **Energy and Buildings**, v. 128, p. 198–213, 2016.

CARLO, J.; LAMBERTS, R. Parâmetros e métodos adotados no regulamento de etiquetagem da eficiência energética de edifícios – parte 2: método de simulação. **Ambiente Construído**, v. 10, n. 2, p. 27-40, abr./jun. 2010.

CARTANA, R. P.; PEREIRA, F. O. R.; MAYER, A. Estudo piloto para elementos de controle solar desenvolvidos com modelagem paramétrica e fabricação digital. **Ambiente Construído**, v. 18, n. 3, p. 67-82, jul./set. 2018.

FOOD4RHINO. **Ladybug Tools**. Disponível em: <http://www.food4rhino.com/app/ladybug-tools>. Acesso em: junho/2018

GIVONI, B. Comfort Climate Analysis and Building Design Guidelines. **Energy and Buildings**, v. 18, p. 11–13, 1992.

HUNTER DOUGLAS. **Produtos.** Disponível em: <http://www. www.hunterdouglas.com.br/ap/uploads/br/productos/productos>. Acesso em: junho/2018.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). 2018. **Global Status Report**: Towards a zero-emission, efficient and resilient buildings and construction sector, 2017. Disponível em: <https://webstore.iea.org/download/direct/2408?fileName=2018_Global_Status_Report.pdf>. Acesso em: mar. 2019.

KOROLIJA, I.; ZHANG, I. Impact of model simplification on energy and comfort analysis for dwellings. In: 13th CONFERENCE OF INTERNATIONAL BUILDING PERFORMANCE SIMULATION ASSOCIATION (IBPSA), 2013, França. **Anais...** Chambéry: 26-28 ago. p. 1184-1192. Disponível em: <http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2013/p_1502.pdf>. Acessoem: junho/2018.

LAGIOS, K.; NIEMASZ, J.; REINHART, C. F. Animated building performance simulation (ABPS) – linking rhinoceros/grasshopper with radiance/daysim. In: SIMBUILD, 2010, Nova York. **Anais...** Nova York: 11-13 ago. p. 321-327.

MAIRINK, A. J. M. **LEED Silver - Edifício Corporativo**: Projeto desenvolvido a partir de critérios de certificação de sustentabilidade. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Arquitetura e Urbanismo) – EA/UFMG, Belo Horizonte, 2018.

MANZ, H.; MICALLEF, D.; BORG, S. P.; BUHAGIAR, V. A parametric building energy simulation case study on the potential and limitations of passive design in the Mediterranean climate of Malta. **Sustainable Buildings**, v. 3, n.4, p. 1–11, 2018.

MENDES, N.; WESTPHAL, F. S.; LAMBERTS, R.; NETO, J. A. B. C. Uso de Instrumentos Computacionais para Análise do Desempenho Térmico e Energético de Edificações no Brasil. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v.5, n.4, p. 47-68, out./dez. 2005.

OUAHRANI, D.; TOUMA, A. A. Selection of slat separation-to-width ratio of brise-soleil shading considering energy savings, CO2 emissions and visual comfort – a case study in Qatar. **Energy and Buildings**, v. 165, p. 440–450, 2018.

PROCEL EDIFICA. **Eficiência Energética nas Edificações**: Apresentação. Disponível em: <http://www.procelinfo.com.br/data/Pages/LUMIS623FE2A5ITEMIDC46E0FFDBD124A0197D2587926254722LUMISADMIN1PTBRIE.htm> Acesso em: ago. 2018.

REINHART, C. F.; GEISINGER, J.; DOGAN, T.; SARATTSIS, E. Lessons learned from a simulation-based approach to teaching building science to designers. In: 14º IINTERNATIONAL IBPSA CONFERENCE, 2015. India. **Anais...** Hyderabad: 7-9 dez. p. 1126-1133.

ROGERS, E. M. **Diffusion of Innovations**. 3.ed. New York: The Free Press, 1995.

SHIEL, P.; TARANTINO, S.; FISCHER, M. Parametric analysis of design stage building energy performance simulation models. **Energy and Buildings**, v. 172, p. 78–93, 2018.

UNITED STATES GREEN BUILDING COUNCIL (USGBC).**LEED v4 para projeto e construção de edifícios (Building design and construction).** Disponível em: <http://www..usgbc.org/sites/default/files/LEED_v4_BDC_10_01_14_PT_3_24_17.pdf>. Acesso em: jun. 2018.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. Apoio PROAP/CAPES-PACPS-UFMG.