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

SOMBREAMENTO COM ILUMINAÇÃO: DESENVOLVIMENTO DE MODELO PARAMÉTRICO PARA FACILITAR ESCOLHAS DE PROJETO ENVOLVENDO CRITÉRIOS CONFLITANTES

Raoni Venâncio (1)
(1) Dr., Arquiteto e Urbanista, raoni_vsl@yahoo.com.br, Universidade Federal de Campina Grande.

RESUMO
Este artigo tem o objetivo de desenvolver e testar um modelo paramétrico para ser utilizado em fases iniciais do projeto de proteções solares na otimização de critérios conflitantes: obstrução da radiação solar e aproveitamento de iluminação natural. O modelo geométrico consiste em um ambiente com uma janela e possibilidade de configuração de um obstáculo externo. Ao todo, quatro tipos de proteções solares podem ser selecionados e configurados: brises horizontais, verticais, prateleira de luz e proteções mistas (verticais e horizontais). Com a configuração das simulações, foram definidos cinco valores numéricos que podem ser usados como objetivos em ferramenta de avaliação multicritério com a adoção de algoritmos genéticos. No estudo realizado, três objetivos de desempenho foram definidos: maximizar a quantidade de pontos entre 300 e 750lux, aumentar a iluminância média e reduzir a incidência de radiação na superfície de abertura. Para exemplificar o processo de evolução das soluções, são apresentados resultados em dois momentos. Na 10ª geração de casos (metade do processo), foram selecionados seis casos de duas áreas distintas do gráfico dentre os casos mais eficientes (fronteira de Pareto). Na 20ª geração, apenas dois desses casos se mantiveram entre os mais eficientes. Os demais foram superados por soluções melhores. Os resultados plotados em gráfico tridimensional permitem relacionar a área em que determinado caso está localizado com o tipo de solução gerada. Isso ocorre pela impossibilidade de se ter o melhor desempenho nos três objetivos propostos. Assim, a seleção do caso final depende do peso que cada critério tem para o projetista.
Palavras-chave: projeto generativo, sombreamento, iluminação, avaliação multicritério;

ABSTRACT
This paper aims to develop and test a parametric model to support the early design of shading devices with the optimization of conflicting criteria: blocking solar radiation and providing the incidence of daylight. The geometric model consists of a room with one window and also the possibility of an external obstacle. There are four types of shading devices that can be selected and adjusted by the user: horizontal and vertical louvers, lightshelf and a mixed louver (with both horizontal and vertical blades). After the setup of the simulations, five numeric values were defined to be used as goals within a multicriteria evaluation tool with genetic algorithms. In this study, three objectives were chosen: maximize the number of points between 300 and 750 lux, increase average illuminance levels and reduce the incidence of direct solar radiation on the window surface. In order to exemplify the evolutionary process, six cases were selected in two distinct areas of the 3d graph among the most fit solutions (Pareto front). In the 20th generation, only two of those cases were still among the best solutions. The other solutions were replaced by better ones. The results plotted in a 3d graph allow us to associate the area in which each case is located with the type of solution that was generated. That happens because of the impossibility of having the best performance in all three performance goals. Therefore, the final selection depends on the importance of each criterion has to the designer.
Keywords: generative design, sun shading, daylight, multi-criteria analysis.

1. INTRODUÇÃO

O ato de projetar uma edificação é uma atividade complexa que envolve múltiplos critérios relacionados a aspectos formais, simbólicos, tecnológicos, de desempenho, dentre muitos outros. Muitos desses critérios de projeto podem ser conflitantes entre si e isso requer uma tomada de posição por parte do arquiteto. Quando projetamos, elegemos prioridades – processo que é descrito por Donald Schön como o "*enquadramento*" de uma situação de projeto (SCHÖN, 1983).

Quando as decisões envolvem aspectos qualitativos, os processos de seleção de prioridades de projeto e tomada de decisões são feitos, muitas vezes, de modo fluido e inconsciente. Ciclos de análise, avaliação e síntese não são tão ordenados como alguns esquemas teóricos sugerem (LAWSON, 2006). Algumas decisões de projeto são fundamentadas por processos de simulação mental em que o projetista busca antever possíveis deficiências e contradições (DÖRNER, 1999). Em arquitetura, tais decisões podem envolver fluxos de pessoas, proporções volumétricas, visibilidade, além de muitas outras possibilidades.

O processo decisório deveria ser mais fácil quando as decisões envolvem critérios de desempenho quantificáveis: o projetista quantificaria as soluções e escolheria entre uma gama de possibilidades. Entretanto, alguns obstáculos dificultam a adoção de métodos quantitativos pela maioria dos arquitetos. Primeiramente, existe a dificuldade inerente à natureza técnica e específica de alguns critérios de desempenho e suas ferramentas de análise. Ainda que as possibilidades de especialização através de cursos de pós-graduação tenham se ampliado nas últimas décadas, a formação básica do arquiteto ainda é generalista. Além disso, a compreensão de que processos de avaliação de desempenho devem permear todo o processo de projeto é limitada na prática de projeto. É muito mais comum que processos de simulação sejam realizados para a confirmação de desempenho, em etapas finais do processo de projeto (DE WILDE, 2004).

Considerando as dificuldades de fornecer suporte a decisões de projeto com o uso de simulação computacional, o que dizer quando o processo decisório envolve critérios conflitantes? Em climas predominantemente quentes, devemos evitar ganhos de calor provocados pela incidência de radiação direta em superfícies transparentes. Contudo, esse critério de desempenho tomado isoladamente levaria a janelas pequenas e/ou elementos de sombreamento superdimensionados, o que restringiria a incidência de luz natural. Problemas também surgiriam se pensarmos em iluminação natural sem considerar a necessidade de controle solar.

Lidar com as necessidades de sombrear e iluminar com ferramentas tradicionais de simulação é um processo trabalhoso, pois ambos os critérios são interligados. Uma das maneiras de abordar o problema de modo qualitativo seria trabalhar com máscaras de sombra gradientes, que indicariam as áreas da abóbada celeste que estariam obstruídas ou expostas em relação à superfície de uma janela (VENÂNCIO e PADRE, 2015). Todavia, a dificuldade de manipulação de variáveis de um modelo em métodos tradicionais de simulação limita a quantidade de iterações necessárias para otimização de uma determinada solução.

Atualmente, interfaces de programação visual são cada vez mais comuns, não somente na produção de programas e jogos, mas em diversas áreas de atuação: *design*, arquitetura, produção de arte multimídia e simulação computacional. Nesse tipo de ferramenta, o usuário interliga os elementos, componentes e parâmetros através de conectores e setas. Os primeiros experimentos de parametrização se iniciaram no fim da década de 90. Em 2009, o desenvolvimento da primeira versão da ferramenta de modelagem paramétrica *Grasshopper* marca o início do gradual processo de popularização de ferramentas de parametrização. O programa funciona como extensão do software Rhinoceros3d.

No *Grasshopper*, o modelo é criado a partir da combinação de componentes e parâmetros, representados por caixas com conectores para *inputs* e *outputs*. As diversas conexões entre componentes podem representar comandos e regras que possibilitam a automatização de processos de modelagem ou desenho geométrico no programa *Rhinoceros3d*. Na Figura , temos o exemplo de um simples modelo paramétrico usado para criar uma torre elíptica cujos pavimentos são rotacionados entre si. Na imagem, também são mostrados alguns exemplos de configurações obtidos a partir da modificação dos seis parâmetros do modelo.

Com o uso de modelos paramétricos combinados com algoritmos de projeto generativo, pode-se configurar a manipulação do modelo para que se chegue a soluções ótimas. Após estabelecer os objetivos de desempenho, a ferramenta calcula inúmeras combinações entre variáveis manipuláveis e, ao longo desse processo, apenas as soluções que melhor atendem aos critérios vão sendo produzidas – processo análogo à evolução natural das espécies.

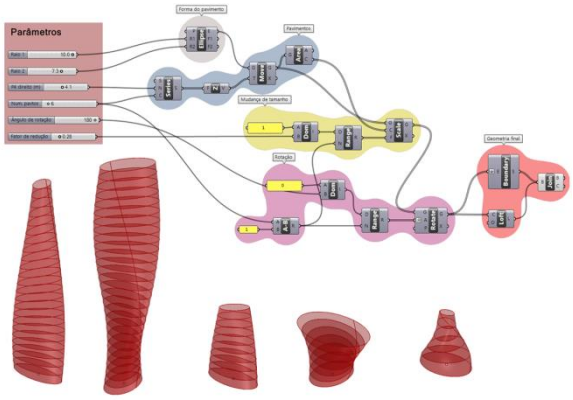

Figura 1 – Exemplo de aplicação do *Grasshopper*. Acervo pessoal.

É comum a associação de ferramentas de modelagem paramétrica com as formas complexas e orgânicas idealizadas pela arquiteta Zaha Hadid. Contudo, pelas possibilidades de adoção de *plugins* de simulação, há grande potencial para o uso da parametrização em casos genéricos, de geometrias simples e prismáticas, no auxílio de decisões iniciais de projeto. O uso de ferramentas concebidas para o uso em fases iniciais de projeto pode minimizar o obstáculo que arquitetos sentem ao se deparar com programas mais complexos.

2. OBJETIVO

Este artigo tem o objetivo de desenvolver e testar modelo paramétrico que possa ser utilizado em fases iniciais de projeto de proteções solares para otimização de sombreamento e iluminação natural com o uso do *software Grasshopper* e de *plugins* para simulações (*LadyBug* e *HoneyBee*) e projeto generativo (*Octopus*).

3. MÉTODO

Os procedimentos metodológicos da pesquisa se dividem em três etapas:

1. Modelagem dos elementos geométricos: modelagem paramétrica de um ambiente com janela e quatro tipos de proteções solares que podem ser selecionadas pelo usuário;
2. Preparação para simulação: para que as soluções possam ser otimizadas, devem ser definidos os critérios de otimização do modelo e inseridos os componentes de preparação (propriedades de materiais) e cálculo;
3. Teste de otimização: com o uso de algoritmo que reproduz a transferência de genes através de gerações, serão realizadas análises em dois momentos do processo evolutivo;

3.1. Modelagem dos elementos geométricos

A elaboração do modelo tem o objetivo de fornecer suporte a fases iniciais de projeto. Dessa forma, para permitir que o programa seja ágil na produção de resultados, é necessário que os elementos geométricos sejam simplificados, sobretudo se considerarmos que qualquer processo de otimização através de ferramenta de projeto generativo requer centenas ou até milhares de casos simulados.

O modelo geométrico é composto por um ambiente com uma janela externa e um obstáculo frontal (

Figura). Através da modificação de parâmetros, as dimensões do ambiente, do obstáculo e da janela podem ser modificadas. A esse modelo, foram adicionadas opções de proteções solares: proteção horizontal, vertical, prateleira de luz e proteção mista (horizontal e vertical combinadas).

O dimensionamento das proteções solares também ocorre por meio de parâmetros manipuláveis pelo usuário (Figura). Para permitir rapidez nas iterações do modelo, não foram consideradas as espessuras de paredes, proteções solares, pisos e tetos.

O processo de modelagem do ambiente foi iniciado a partir de um prisma retangular, no qual foi removida a área de janela em uma das faces. A modelagem do obstáculo externo (piso e face vertical) foi iniciada a partir dos pontos extremos da linha inferior da face externa do ambiente, que são movidos lateralmente, formando nova linha que gera, por extrusão, a superfície de piso. O obstáculo vertical também é gerado da mesma maneira, através da linha de piso.

A modelagem geométrica das proteções solares teve uma complexidade um pouco maior. Cada tipo de elemento foi modelado separadamente a partir da geometria da janela.

Para permitir que o usuário selecione um tipo de proteção, os resultados geométricos foram conectados como *inputs* do componente *stream filter*, que faz com que se possa escolher (filtrar) um dos caminhos conectados.

O modelo geométrico completo pode ser visualizado na Figura . Todos os parâmetros manipuláveis estão agrupados no retângulo verde, de modo que um usuário não precise navegar por todo o modelo para fazer as configurações.

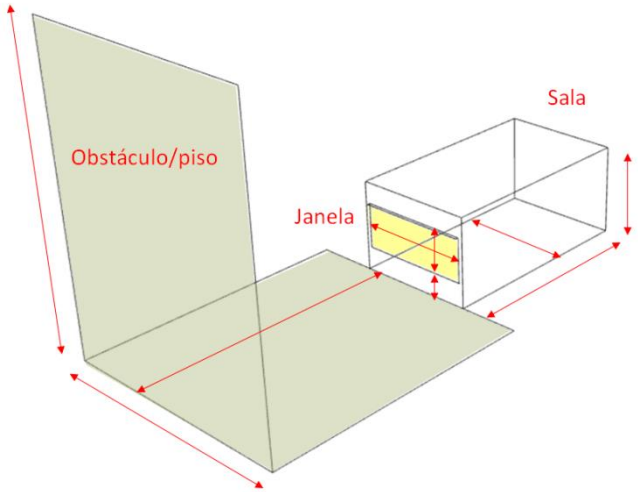

Figura 2 – Modelo geométrico do ambiente e contexto.

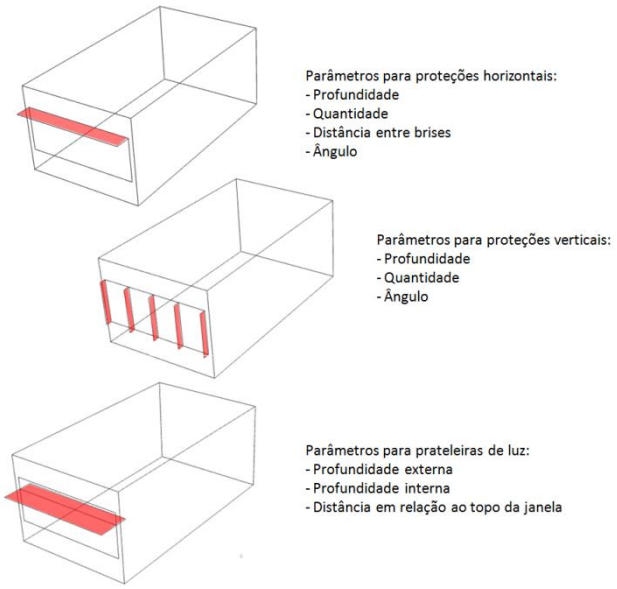

Figura 3 – Parâmetros das proteções solares.

As superfícies que formam a sala, o obstáculo frontal e das proteções solares estão agrupados nos retângulos de cor vermelha. Cada retângulo é destinado a um desses elementos geométricos, o que facilita a compreensão do modelo caso sejam necessárias alterações.

A geometria final é obtida a partir da combinação entre a geometria da sala e da proteção solar escolhida, que é um *output* do componente *stream filter*, em amarelo (Figura 4).

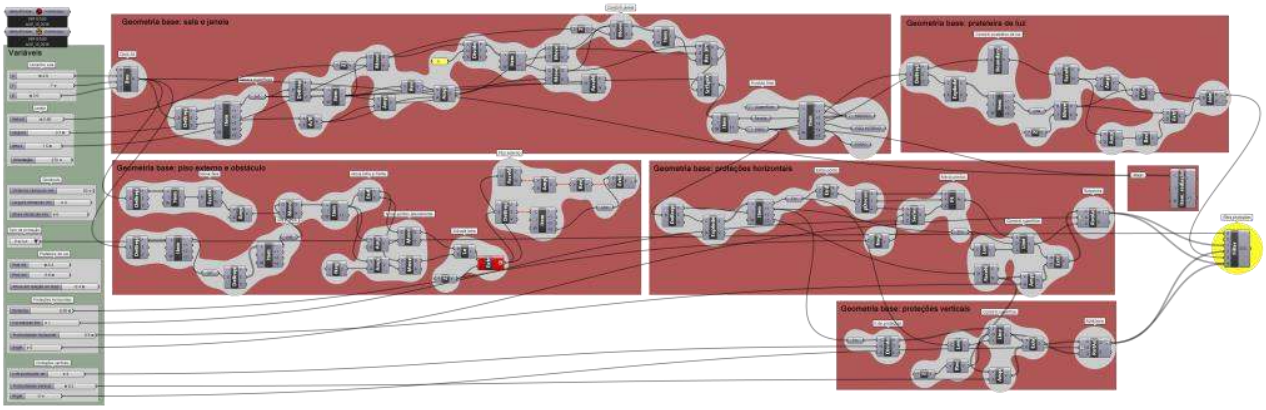

Figura 4 – Modelo geométrico da sala, obstáculo e proteções solares.

3.2. Preparação para a simulação

A segunda etapa de modelagem consiste na definição dos tipos de simulação a serem realizados e na preparação para que os cálculos possam ser feitos com o modelo geométrico produzido. Para que o modelo possa ser otimizado com uso de algoritmos genéticos (projeto generativo), é necessário que o tempo de cada simulação não seja excessivo, pois essa otimização requer grandes quantidades de casos simulados. Assim, seria inviável o uso de simulações anuais para incidência de radiação e iluminação natural com esse propósito. Para permitir a otimização das proteções solares considerando os dois critérios de desempenho, deve-se selecionar um cenário (dia e hora) para realizar as simulações. Numa situação de projeto, seria recomendável configurar cenários mais críticos, com grande incidência de radiação direta na fachada onde a abertura está localizada.

A primeira parte de preparação do modelo consiste na atribuição de materiais. Para tornar o uso da ferramenta mais intuitivo, foram usados componentes de cores de materiais para extração das refletâncias dos materiais de superfícies opacas (Figura). Propriedades de rugosidade e especularidade podem também ser inseridas. A seleção do vidro pode ser feita através da transmissividade média do vidro. Com base no valor inserido, é extraído da biblioteca do *radiance* um vidro com valores aproximados.

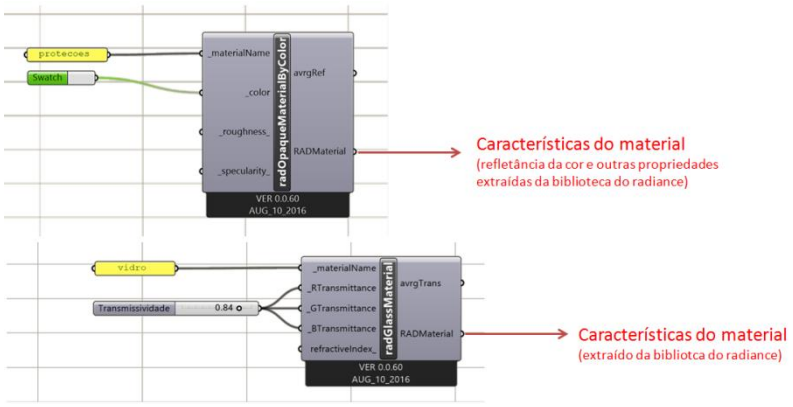

Figura 5 – Exemplos de componentes de aplicação de materiais

O passo seguinte consiste na definição dos tipos de cálculos que podem ser realizados. Para o uso da ferramenta de projeto generativo, é essencial que tenhamos pelo menos um tipo de simulação de iluminação natural e outro de incidência de radiação. Ao todo, as seguintes simulações foram agregados ao modelo e podem ser ativadas ou desativadas conforme o interesse do usuário:

- Iluminâncias no plano de trabalho (*lux*): foi configurado um plano de trabalho a 80cm do chão e uma malha de pontos espaçados a cada 0,5 metros;
- Incidência de radiação direta na superfície do vidro (kWh/m²): foi configurada uma malha de pontos distanciados a cada 10cm na superfície da janela;
- Incidência de radiação direta no plano de trabalho (Wh/m²): o mesmo componente usado para cálculo de iluminâncias foi duplicado e configurado para produzir resultados de radiação solar;
- Percurso solar: para permitir a visualização da orientação da sala em relação ao percurso solar e, consequentemente, a identificação de cenários mais críticos em termos de radiação solar, foi adicionado esse componente auxiliar;

Além dos três tipos de simulação, deve-se definir que valores numéricos serão usados para os objetivos a serem adotados pela ferramenta de projeto generativo. A partir das três simulações principais, foram definidos cinco grandezas que podem auxiliar na tomada de decisões como critérios:

1 – Porcentagem de pontos com iluminância entre 300 e 750 lux (limites definidos pelo usuário): o cálculo de iluminância é feito em plano a 80cm do piso, dividido em pontos afastados a cada 50cm;

2 – Incidência de radiação solar direta na superfície da janela (Wh/m²): a média da radiação solar incidente numa malha de 10cm na superfície da abertura;

3 – Uniformidade de iluminação: a partir dos dados de iluminância, foi calculada a razão entre o mínimo valor obtido e a média de iluminância;

4 – Iluminância média no plano de trabalho (lux): média do resultado de todos os valores da malha;

5 – Incidência de radiação total no plano de trabalho (Wh/m²): radiação solar total;

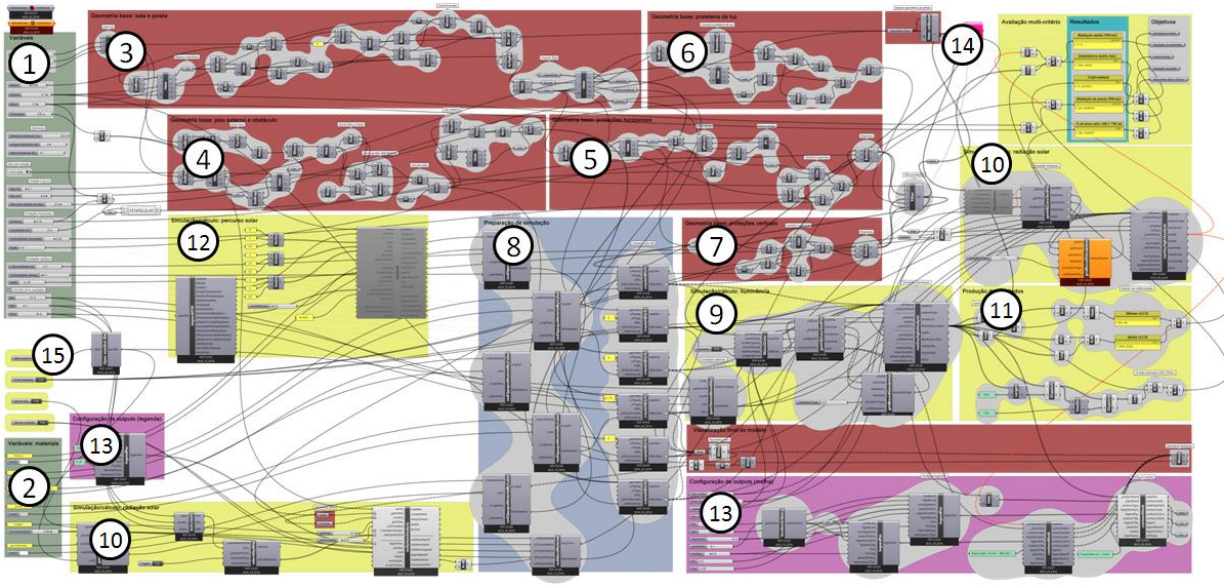

Figura 6 – Modelo paramétrico final;

O modelo paramétrico final é composto por 15 partes, listadas na Figura . Em verde, são agrupadas as variáveis geométricas e de modificações de materiais do modelo. Os itens 3, 4, 5 e 6, em vermelho, são destinados à modelagem e representação geométrica de todos os elementos. As geometrias são conectadas a componentes de atribuição de materiais (item 8), necessários para a simulação de iluminâncias internas. Todos os componentes de simulação ou tratamento de resultados são apresentados em amarelo, com as simulações de iluminâncias, radiação solar direta na janela, radiação solar no plano de trabalho, cálculo de objetivos e simulação de percurso solar. Os dois itens de numeração 13 dizem respeito à configuração de *outputs* na representação dos resultados em malhas e/ou legendas. O item 14 é a ferramenta *octopus* de avaliação multicritério. A esse componente, são conectadas as variáveis manipuláveis (genes) e os objetivos de desempenho. No item 15, entre os dois grupos de variáveis, são alocados quatro elementos que ativam os processos de abrir arquivo climático, calcular tipo de céu, rodar simulação no *radiance* e calcular radiação.

3.3. Teste de otimização

Para o teste de otimização usando algoritmos de evolução natural, foram definidas, primeiramente, as variáveis fixas do modelo:

- Sala: 4m (largura) x 7m (profundidade) x 3 m (altura) sem obstáculo frontal;
- Janela: 3,7m (largura) x 1,5m (altura) com peitoril de 0,8 m;
- Orientação: Oeste (azimute 270°);
- Cenário: 21 de Março às 16 horas (equinócio de outono);
- Arquivo climático: Campina Grande/PB;

Selecionamos um cenário de abertura Oeste justamente pela complexidade de atender a critérios de iluminação e sombreamento no caso de uma incidência solar tão frontal em relação à janela. Também foi escolhido um cenário de equinócio para que as soluções finais representem um equilíbrio em relação às necessidades opostas dos solstícios.

O tipo de proteção solar selecionado foi de brises mistos, pois apresenta maior quantidade de variáveis manipuláveis. Os seguintes parâmetros serão manipulados como genes no modelo de cálculo evolutivo:

- Distância entre brises horizontais: valores variam entre 0,01 e 0,50;
- Quantidade de brises horizontais: entre 1 e 10 (foi adotada uma expressão condicional para que a multiplicação entre as distâncias entre proteções solares e a quantidade de brises não exceda a altura da janela;
- Ângulo de brise horizontal: entre 0 e -40° (em intervalos de 5°);
- Quantidade de brises verticais: entre 2 e 9;
- Ângulo de brise vertical: entre 30° e -30° (em intervalos de 5°);

A decisão de quais objetivos serão usados no modelo evolutivo é crucial, pois as soluções irão se adaptar para atender aos critérios numéricos escolhidos. Com o *plugin* de avaliação multicritério *Octopus*, podem ser selecionados até cinco critérios diferentes. Como os resultados são representados em gráfico tridimensionais com três eixos, vamos trabalhar com três objetivos para facilitar na visualização dos casos mais eficientes.

No modelo paramétrico, existem cinco possíveis objetivos que podem ser selecionados pelo usuário para encontrar soluções de melhor desempenho:

1 - Maximizar número de pontos com iluminância entre 300 e 750lux.
2 - Minimizar radiação solar direta na janela (Wh/m²).
3 - Maximizar uniformidade da iluminação.
4 - Maximizar iluminância média (lux).
5 - Minimizar incidência de radiação solar no plano de trabalho (Wh/m²).

Estudos iniciais foram feitos para verificar as características de soluções otimizadas para diferentes combinações de objetivos. A seguir, uma breve descrição de algumas combinações testadas:

Objetivos 1, 2 e 3: os objetivos 1 e 2 representam bem os dois critérios principais: iluminação natural (quantitativa e qualitativamente) e sombreamento (quantificação da radiação direta na janela). Contudo, ao ser combinado com o objetivo 3, referente à uniformidade de iluminação, as soluções mais evoluídas tendem a ter menores iluminâncias médias e priorizar o sombreamento – considerando que a uniformidade é calculada a partir da razão entre o valor mínimo obtido e o valor médio de iluminância. Essa combinação seria usada caso o sombreamento da sala seja mais importante do que a iluminação natural;

Objetivos 1, 2 e 4: ao adicionar a média de iluminância como objetivo, há melhor equilíbrio entre critérios de iluminação e sombreamento. Assim, as melhores soluções tendem a atingir boa porcentagem de pontos entre 300 e 750 lux sem reduzir consideravelmente a média de iluminâncias internas;

Objetivos 5, 1 e 4 (ou 5, 3 e 4): o objetivo 5 é adequado nos casos de simulação de prateleiras de luz. Nessa situação, a superfície da janela sempre será parcialmente exposta – mas não necessariamente a radiação

direta chega ao plano de trabalho. Caso fosse adotado o objetivo 2, os casos evoluídos tenderiam a eliminar a distância entre a prateleira de luz e o topo da janela. Podem ser usados como critérios de iluminação tanto a maximização do número de pontos entre 300 e 750 lux quanto a uniformidade. Vale ressaltar que a correlação entre os critérios 4 e 5 é praticamente linear – o que dificulta a identificação de casos extraordinários.

Neste artigo, será usada a combinação dos objetivos 1, 2 e 4, considerando que não se trata de simulação de prateleira de luz e que esses critérios representam bem as duas prioridades que estamos estudando: iluminação natural e sombreamento.

O cálculo de otimização é realizado pelo *plugin Octopus* e adota o método de cálculo *Hypervolume Indicator*, solução mais eficiente do que os tradicionais métodos SPEA e SPEA2 para que as soluções convirjam para a "Fronteira de Pareto" (VIERLINGER, 2013) – linha limítrofe formada pelos casos de melhor desempenho em dois ou mais critérios determinados.

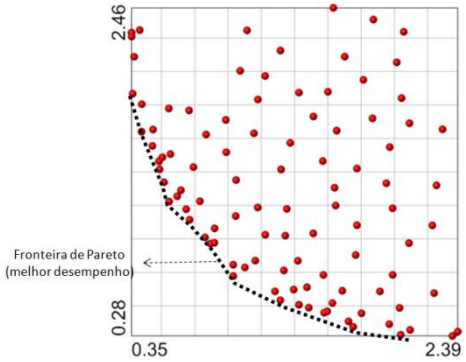

Figura 7 – Fronteira de Pareto: melhores casos estariam próximos à origem. Fonte: adaptado de Vierlinger, 2013.

De acordo com o princípio de Vilfredo Pareto, uma solução com múltiplas medidas de qualidade não pode melhorar um objetivo sem degradar outro(s). Assim sendo, avaliações multicritério não resultam em apenas um caso de melhor desempenho, já que os critérios se afetam mutuamente. O resultado é um grupo de soluções que não serão igualmente eficientes num mesmo critério: a escolha final depende da prioridade que o projetista atribui a cada objetivo.

A fronteira de Pareto é facilmente identificável em avaliações levando em conta dois critérios (Figura). Em problemas com três ou mais critérios, a fronteira é um polígono tridimensional.

A configuração do algoritmo evolutivo adotou a probabilidade de mutação de cada parâmetro de 4,8% (valor próximo do limite inferior), com taxa de mutação de 0,3 (valor um pouco abaixo do intermediário). Esses valores minimizam a probabilidade de mutação de determinado gene (parâmetro) e, quando essas mutações ocorrem tendem a não ser significativas. Os valores mais baixos se justificam pois a aleatoriedade das mutações não contribuem tanto para o tipo de problema a ser resolvido . O *crossover rate* (taxa de cruzamento), valor que representa a probabilidade de cruzamento de genes entre soluções, é de 0.80 (valor padrão do programa).

4. RESULTADOS

Uma vez finalizado o modelo paramétrico, foi iniciado o cálculo do solucionador evolutivo. As soluções geradas vão sendo mostradas em gráfico tridimensional, no qual se podem visualizar os três objetivos em eixos (Figura). Como no *plugin* adotado, as melhores soluções estão sempre próximas do cruzamento dos eixos, todos os valores numéricos que se deseja maximizar (objetivos de iluminação, por exemplo) devem ser multiplicados por -1. Desse modo, quanto maior o valor desse objetivo, mais se aproxima da origem.

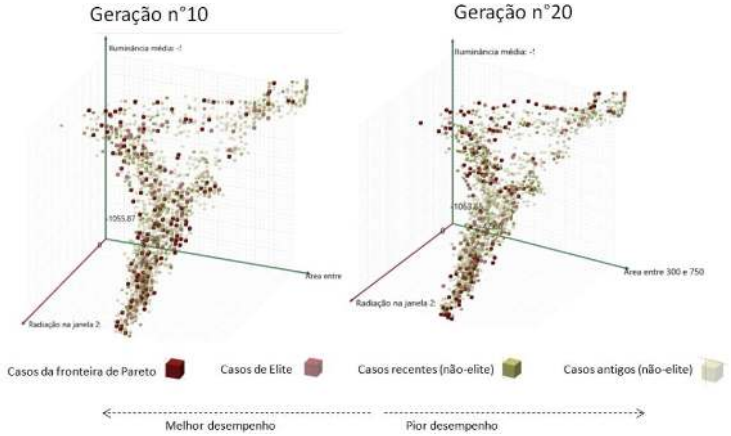

Figura 8 – Gráfico tridimensional com resultados no momento das gerações 10 e 20.

A evolução das soluções é feita em gerações de populações. Por padrão, cada população tem 100 indivíduos. A cada geração, casos mais eficientes tendem a ser produzidos até que o usuário fique satisfeito com as soluções geradas ou que a quantidade de alternativas eficientes se esgote e haja convergência de combinação de genes. Como são necessárias muitas iterações para a produção dos casos mais eficientes, a

viabilidade de estudos dessa natureza depende bastante do tempo de cada simulação. Com o modelo adotado, a média de criação e simulação para cada caso é de pouco mais de oito segundos. Assim, para produzir uma geração, são necessários quase 14 minutos.

O processo pode ser interrompido a qualquer momento e o usuário pode marcar no gráfico e visualizar aqueles casos de melhor desempenho. Também é possível marcar determinado caso que atenda bem aos critérios principais para influenciar nos objetivos de desempenho de futuras gerações. Neste artigo, serão mostrados os resultados nas gerações número 10 e 20 para que se possa visualizar dois estágios de evolução do processo.

Os resultados das duas gerações podem ser visualizados na Figura . Apesar da dificuldade em analisar o gráfico sem a possibilidade de orbitar ao redor dele, percebe-se que alguns itens que eram da fronteira de Pareto na geração 10 (cubos vermelhos opacos) passam a não fazer parte dela na geração 20.

Essa análise é bem mais facilitada no programa, pois podemos filtrar apenas os casos que fazem parte da zona de Pareto e visualizar seus resultados em tempo real.

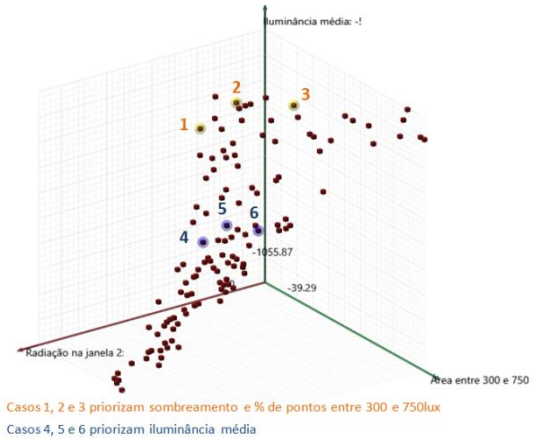

Figura 9 – Fronteira de Pareto na geração 10.

Os casos mais eficientes da geração 10 apresentam grande variação de desempenho considerando os três objetivos propostos (Figura). Tomando como base o gráfico tridimensional, foram identificados dois grupos com três soluções cada. O primeiro grupo apresenta alta porcentagem de pontos entre 300 e 750 lux e valores mais baixos de radiação solar e iluminância média. Esses casos buscam certo equilíbrio entre sombreamento e iluminação. Um segundo grupo apresenta valores mais elevados de iluminância média e menor preocupação com a incidência de radiação solar. Com essa incidência, a quantidade de pontos acima de 750 lux também aumenta, o que provoca a redução do valor desse objetivo.

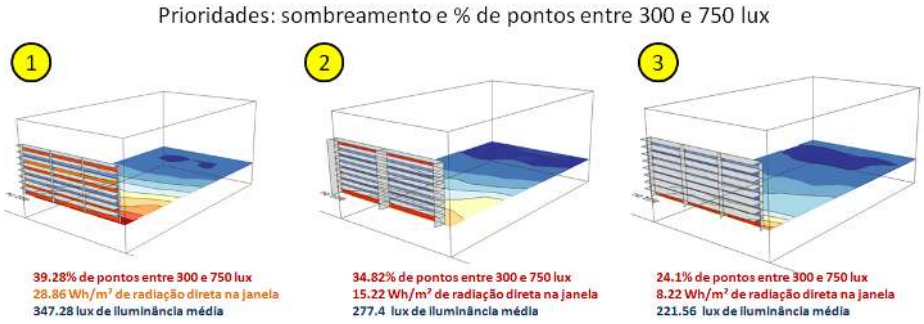

Figura 10 – Casos selecionados da geração 10 que priorizam o sombreamento da abertura.



Figura 11 – Casos selecionados da geração 10 que priorizam a iluminância média no ambiente.

Os casos 1, 2 e 3, que não priorizam a maximização da média de iluminância no ambiente, apresentam boa combinação entre sombreamento e quantidade de pontos entre 300 e 750 lux. São soluções que buscam a redução da incidência de radiação direta na janela (Figura). Os casos 4, 5 e 6, priorizam as médias de iluminâncias internas sem expor completamente a abertura (Figura).

Com a evolução de mais 10 gerações de simulações, alguns dos casos que faziam parte da fronteira de Pareto são superados por outros ainda mais eficientes. Dos seis casos que foram selecionados na geração 10,

apenas as soluções 2 e 3 se mantiveram na fronteira de Pareto. Na vigésima geração, foram selecionados mais quatro casos para substituir as soluções descartadas ao longo do processo. Ao selecionar soluções análogas em termos dos valores dos três objetivos de desempenho, podemos ter ideia sobre como se deu a evolução das proteções solares na vigésima geração.



Figura 12 – Exemplo de evolução de solução de proteção solar após 10 gerações.

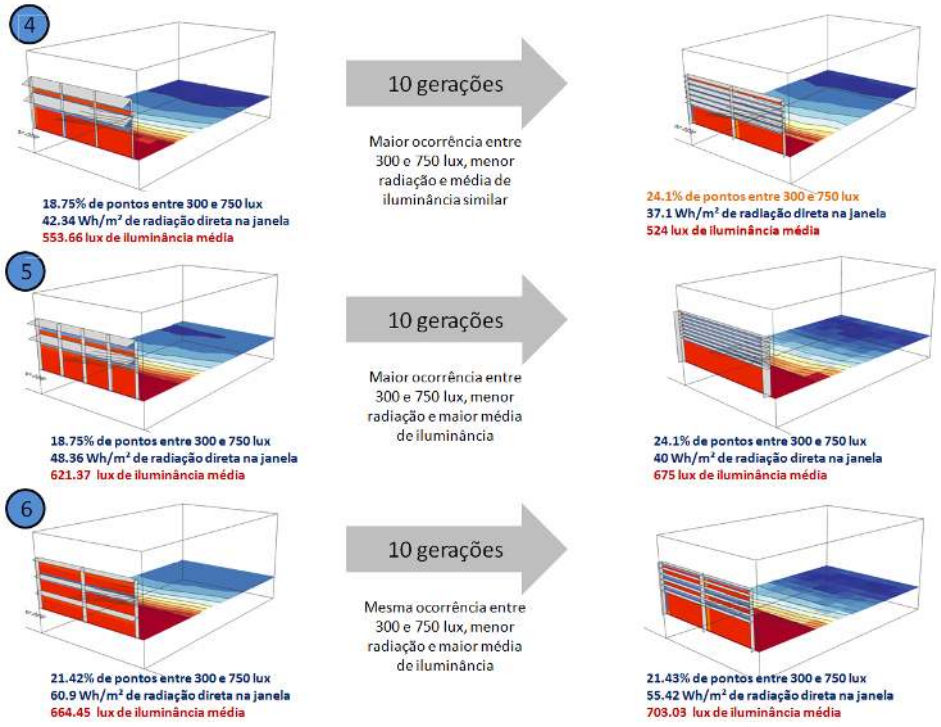

Figura 13 – Exemplo de evolução de soluções que priorizam as médias de iluminância.

O caso n° 1 apresentava boa porcentagem de pontos entre 300 e 750 lux, embora com ganhos razoáveis de radiação solar. Após 10 gerações, um caso análogo em termos de desempenho apresenta grande redução da radiação solar direta sem impactos consideráveis na distribuição de iluminação natural (Figura).

Para substituir os casos 4, 5 e 6, que priorizaram as médias de iluminância, foram selecionadas soluções seguindo o mesmo critério. Nos três casos, pelo menos dois dos objetivos foram melhorados. Embora a média de iluminância no caso 4 tenha sido levemente reduzida, essa redução é compensada pelo melhor desempenho nos outros critérios (Figura).

Pode-se perceber pelos tipos de soluções que, ao priorizar as médias de iluminância sem grande ênfase no sombreamento de aberturas, há a tendência de serem geradas proteções solares que expõem a área inferior da janela. Desse modo, há grande incidência de luz na área próxima ao peitoril da janela, o que resulta no aumento da média de iluminância e redução da quantidade de pontos entre 300 e 750 lux. Ainda que essas soluções sejam notadamente negligentes com a incidência de radiação solar, por estarem em posição mais centralizada no gráfico (Figura), elas apresentam valores intermediários para os três objetivos. Contudo, esse equilíbrio meramente numérico não necessariamente indica boa solução de projeto. Na prática, os três critérios não são igualmente importantes e, por essa razão, o ponto de equilíbrio aparentemente não teria valores médios de iluminância tão altos, assim como deveriam ser menores os valores de radiação direta e maiores a quantidade de pontos entre 300 e 750 lux.

Para verificar a heterogeneidade das soluções, marcamos no gráfico da 20ª geração alguns casos em áreas extremas do gráfico. De acordo com a Figura , vemos que o aumento da iluminância média é muito correlacionado com o aumento de incidência de radiação solar. Os casos que apresentarem baixa radiação e boa quantidade de pontos entre 300 e 750 lux tendem a ser os mais adequados para um ambiente voltado para Oeste (área azul). Na área verde, há sombreamento excessivo e na área vermelha, muita exposição solar.

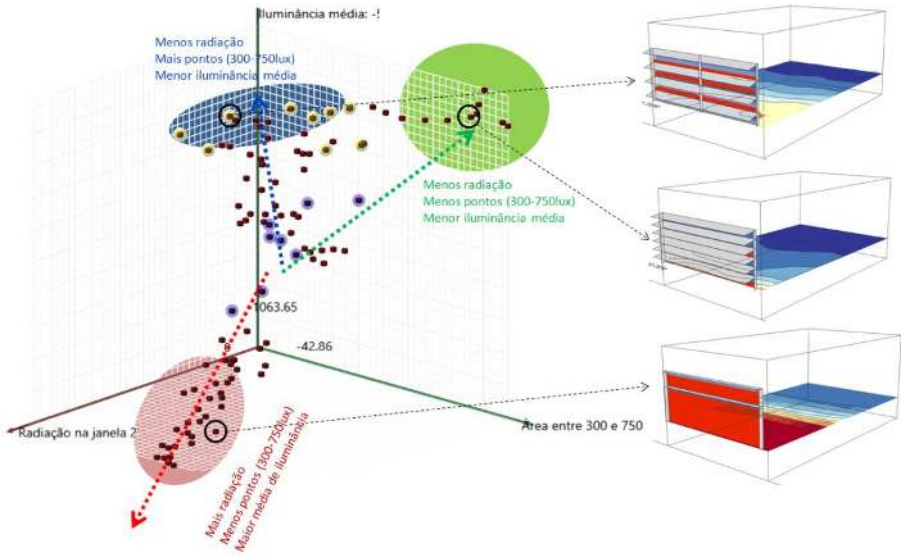

Figura 14 – Fronteira de Pareto na 20ª geração: seleção de casos em áreas diferentes do gráfico.

Ao longo do cálculo evolutivo, é possível que o usuário conduza as simulações para atingir o equilíbrio desejado. É possível marcar determinado(s) caso(s) de bom desempenho para que futuras gerações de casos busquem atingir ou ultrapassar os objetivos dos casos selecionados, o que torna mais eficiente o processo de evolução.

5. CONCLUSÕES

Este trabalho descreve a elaboração de modelo paramétrico de investigação do desempenho de proteções solares em fases iniciais de projeto considerando dois critérios conflitantes: sombreamento e aproveitamento da iluminação natural. A otimização adota algoritmo genético, no qual as variáveis manipuláveis são tratadas como genes, que são transmitidos através das gerações.

O modelo geométrico é composto por um ambiente com abertura externa e possibilidade de configuração de obstáculo frontal. Os materiais podem ser selecionados através de cores, o que torna o uso mais intuitivo. Ademais, não são necessários conhecimentos de modelagem, tendo em vista que o modelo é completamente paramétrico.

Após a finalização do modelo, foram definidos os tipos de simulação e possíveis objetivos para otimização. Ao todo, pode-se realizar até quatro tipos de simulação. Com os resultados, foram também calculados os cinco valores numéricos que podem ser usados como objetivos. A seleção dos critérios a serem calculados pelo algoritmo é essencial, pois determina as adaptações realizadas pelas soluções ao longo do processo evolutivo.

O artigo apresenta resultados em dois estágios de evolução do modelo (gerações número 10 e 20), para que se possa visualizar as adaptações realizadas ao longo desse intervalo. Foram selecionados seis casos na fronteira de Pareto na 10ª geração em duas áreas distintas do gráfico. Os primeiros três casos enfatizam a maximização da quantidade de pontos entre 300 e 750 lux combinada a valores baixos ou intermediários de radiação solar. Os três últimos casos apresentam valores intermediários para os três objetivos, embora, pela análise das soluções, se perceba que há uma priorização da média de iluminância em detrimento dos outros dois critérios. Essa constatação sugere que o equilíbrio desejado entre sombreamento e iluminação se situa em regiões diferentes do gráfico. É esperado que essas condições de equilíbrio entre as três variáveis possam mudar dependendo da orientação, posição solar, medidas do ambiente e tipo de proteção solar. Dos seis casos selecionados, apenas dois ainda permaneceram na fronteira de Pareto na geração número 20. Os outros quatro casos foram superados por soluções mais eficientes em um ou mais critérios.

Em trabalhos futuros, é possível adicionar simulações mais sofisticadas ao modelo para que se possa comparar as soluções mais eficientes obtidas no processo de otimização durante todo o ano. Esse procedimento seria viabilizado pela reduzida quantidade de alternativas otimizadas. Também podem ser simulados casos com outros tipos de proteção solar e outras condicionantes externas, para refinamento do modelo e, se necessário, dos objetivos de desempenho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

DE WILDE, P. **Computational Support for the Selection of Energy Saving Building Components**. 2004. Phd Thesis Delft University of Technology, Delft.

DÖRNER, D. **Approaching design thinking research**. Design Studies, 1999.

LAWSON, B. **How designers think: the design process demystified.** 4th ed. Oxford: Architectural Press, 2006.

SCHÖN, D. A. **The reflective practitioner: How professionals think in action.** London: Temple Smith, 1983.

VENÂNCIO, R.; PADRE, P. **Shade and Daylight: Simulated Performance of Typical and Hypothetical Shading Devices on the UFCG Campus, Brazil**. Passive and Low-Energy Architecture. Rome, IT 2015.

VIERLINGER, R. **Multi Objective Design Interface**. 2013. (Mestrado). Instituto de Construção Civil e Tecnologia, TU Viena.