

ANÁLISE COMPARATIVA DE FLUXOS DE TRABALHO PARA SIMULAÇÃO DA ILUMINAÇÃO NATURAL EM PROCESSO DE PROJETO BIM (*BUILDING INFORMATION MODELING*)

Ravi Motta Stoutz (1); Anderson Claro (2)

(1) Arquiteto Urbanista, especialista, mestrando do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da UFSC, ravimotta@posgrad.ufsc.br, Servidão Eurico Leopoldo Rodrigues, 755, Rio Tavares, Florianópolis - SC, (48) 99130-6595

(2) Doutor Arquiteto, Professor Titular, ander@arq.ufsc.br, Departamento de Arquitetura e Urbanismo – CTC - Universidade Federal de Santa Catarina, Campus UFSC – Trindade. Florianópolis / SC, (48) 99607-0877

RESUMO

A iluminação natural é essencial para a qualidade arquitetônica e um importante aspecto bioclimático, com impacto significativo para o conforto ambiental e eficiência energética nas edificações. A atuação dos arquitetos e a adoção de estratégias apropriadas desde as etapas iniciais de projeto são determinantes e o uso de ferramentas de simulação é recomendado para que os edifícios apresentem melhores desempenhos quanto a esse aspecto. A recente implementação de ferramentas e processos de Modelagem das Informações da Construção (BIM – da expressão em inglês *Building Information Modeling*) no Brasil é entendida como uma importante oportunidade para promover maior integração das simulações e análises da iluminação natural aos processos de projeto. O estudo tem por objetivo analisar comparativamente três fluxos de trabalho e resultados de simulação da iluminação natural tendo como ponto de partida um Modelo de Informações da Construção (modelo BIM, de *Building Information Model*) criado com o Revit. Foram consideradas duas hipóteses: a realização das simulações e análises por um arquiteto projetista ou por um especialista em simulações em colaboração com o arquiteto. Os fluxos de trabalho, definidos pela utilização das ferramentas de simulação Insight 360, DIVA-for-Rhino e Apolux, são delineados e descritos por meio de um estudo de caso com um projeto real, para o qual são realizadas simulações estáticas e dinâmicas da iluminação natural. Os resultados para simulações estáticas mostraram-se muito semelhantes, enquanto diferenças mais acentuadas foram observadas para as simulações dinâmicas. As análises permitiram identificar vantagens e desvantagens para cada hipótese considerada, além de potencialidades e limitações dos programas utilizados para a efetiva integração das simulações aos processos de projeto.

Palavras-chave: simulação, iluminação natural, processo de projeto, BIM.

ABSTRACT

Daylighting is essential for architectural quality and an important bioclimatic aspect, which also has a significant impact on environmental comfort and energy efficiency in buildings. The architects' role and the adoption of adequate design strategies since its initial stages are decisive, and the use of simulation tools is recommended so that the buildings can achieve better daylight performance. The recent implementation of Building Information Modeling (BIM) tools and processes in Brazil is thought to be an important opportunity to promote the further integration of daylighting simulations and analyzes into design processes. The aim of the study is to compare three workflows and results of daylight simulation, using a Building Information Model (BIM model) created with Revit as a starting point. Two hypotheses were considered: the simulations and analyzes being performed by an architectural designer or by a simulation specialist in collaboration with the designer. The workflows, which are defined by the use of the Insight 360, DIVA-for-Rhino and Apolux simulation tools in association with Revit, are delineated and described by means of a case study with a real project. Static and dynamic daylight simulations are performed and analyzed. The results for static simulations were found very similar, while more pronounced differences were observed for the dynamic simulations. The analyzes allowed to identify advantages and disadvantages for each hypothesis considered, as well as the potentialities and limitations of the programs used for the effective integration of simulations into design processes.

1. INTRODUÇÃO

A indústria da construção é uma das atividades humanas com maior impacto sobre o meio ambiente, a atividade econômica e o bem-estar da sociedade (SILVA, SILVA e AGOPYAN, 2003). A demanda pela redução dos impactos negativos desta indústria e pela produção e requalificação de edifícios com melhor desempenho ambiental e energético é crescente no mundo todo. Para se obter resultados efetivos nesse sentido, a atuação do arquiteto é determinante. A adoção de princípios bioclimáticos para o planejamento da edificação quanto à sua tipologia, orientação, materiais e sistemas construtivos, entre outros, é de grande importância para a obtenção de conforto ambiental de forma passiva, ou com uso reduzido de recursos mecânicos para iluminação e climatização, e está intimamente relacionada à sua eficiência (LAMBERTS, DUTRA e PEREIRA, 2014). Como um dos mais importantes aspectos bioclimáticos, o uso adequado da iluminação natural representa um grande potencial de economia de energia, além de ser essencial para a qualidade arquitetônica. A luz natural também é reconhecida pelos arquitetos como uma das matérias primas mais nobres, seja por seu efeito poético e simbólico ou por sua importância para a saúde e o bem-estar humanos (BOUBEKRI, 2008).

No contexto atual, projetar um edifício que privilegie o uso da iluminação natural para promover conforto e eficiência requer uma atuação cuidadosa e a adoção de estratégias apropriadas desde as etapas iniciais. Reinhart (2014) acredita na necessidade de expor os arquitetos a processos de trabalho que permitam avaliar suas propostas com base em fundamentos científicos, e aponta que o uso de ferramentas de simulação computacional vem possibilitando o desenvolvimento de novas técnicas de análise que podem ser integradas ao processo de projeto de arquitetura. Pesquisas recentes têm abordado a importância da incorporação da prática das simulações de desempenho desde etapas iniciais do processo de projeto (BRÍGITTE e RUSCHEL, 2013), destacado a necessidade de interfaces amigáveis e resultados que sejam significativos para os arquitetos responsáveis pela concepção arquitetônica (SOUZA, 2012) e a necessidade de modelos dinâmicos e integrados para um melhor suporte ao projetista (NEGENDAHL, 2014). Embora distintas em termos de algoritmos e métodos de cálculo, simulações térmicas, energéticas e de iluminação natural são análogas em importância e complementares entre si, uma vez que o uso da luz natural tem impactos diretos também sobre o desempenho térmico e sobre o consumo de energia. Inúmeros trabalhos têm investigado métodos que buscam auxiliar os arquitetos para uma análise compreensiva da iluminação natural, que contam com suporte de simulações para avaliar o potencial anual e outros critérios relevantes para a boa iluminação (ANDERSEN e GUILLEMIN, 2013; ANDERSEN, GAGNE e KLEINDIENST, 2013; CLARO, 2015; REINHART e WIENOLD, 2011).

O sucesso na utilização desses métodos para a melhoria do desempenho em termos de iluminação natural pressupõe também a colaboração entre profissionais de diferentes áreas e a consideração simultânea de muitos aspectos do projeto. Por isso, a *Illuminating Engineering Society* (IES) defende a abordagem do Projeto Integrado do Edifício (*Integrated Building Design*) como sendo benéfico para o melhor desempenho da Iluminação Natural e o uso da tecnologia BIM (*Building Information Modeling* ou *Building Information Model*) como favorecedora dessa abordagem de projeto (ILLUMINATING ENGINEERING SOCIETY, 2009). O termo BIM pode ser usado para definir “uma tecnologia de modelagem e um conjunto de processos associados para produzir, comunicar e analisar modelos de edifícios” (EASTMAN *et al.*, 2011, p.16, tradução nossa). No contexto do projeto de edifícios, o termo pode estar associado, portanto, a uma série de ferramentas destinadas à criação do Modelo de Informações da Construção (modelo BIM, *de Building Information Model*), ou aos processos de trabalho envolvidos na modelagem, gerenciamento e análises dessas informações. No Brasil, o estágio atual de implementação corresponde a uma transição entre o estágio pré-BIM e o primeiro estágio, conforme definido por Succar (2009), em que modelos BIM baseados em objetos paramétricos são gerados e utilizados de forma restrita ao âmbito de uma única disciplina, sem que haja intercâmbio significativo de informações do modelo para colaboração. No âmbito de pesquisas nacionais sobre o tema, Andrade e Ruschel (2009) indicaram a necessidade de investigar a interoperabilidade e modelagem paramétrica relacionando-as às metodologias de projeto digital para auxílio à síntese das soluções arquitetônicas. Estudos que relacionam o BIM à prática de simulações ainda são poucos no Brasil e as tratam de forma genérica, sem enfatizar o aspecto lumínico. Considerando-se este cenário, esta pesquisa espera contribuir para difusão das simulações para iluminação natural como ferramentas de auxílio ao projeto a partir da oportunidade representada pela implementação da tecnologia BIM.

2. OBJETIVO

Analisar comparativamente os fluxos de trabalho e os resultados para análise de iluminação natural, obtidos

pela associação entre uma plataforma BIM para projeto arquitetônico e ferramentas de simulação selecionadas, e identificar potencialidades e limitações para a integração das simulações ao processo de projeto caracterizado pelo uso da tecnologia BIM, no contexto brasileiro atual.

3. MÉTODO

O trabalho se baseia em um estudo de caso em que se utiliza um projeto arquitetônico real desenvolvido com o Revit – plataforma BIM da Autodesk para projetos de edificações – para delinear e descrever três fluxos de trabalho para a simulação da iluminação natural. O ponto de partida é o modelo BIM do projeto arquitetônico tomado como estudo de caso. Os programas Insight 360, DIVA-for-Rhino e Apolux são utilizados para realizar as simulações.

Com base em análises comparativas dos procedimentos necessários às simulações e resultados obtidos, espera-se identificar potencialidades e limitações para a integração das simulações ao processo de projeto por meio da tecnologia BIM, com base em duas hipóteses de pesquisa:

1. Que a operação das ferramentas de simulação e a análise dos resultados sejam realizadas por arquitetos envolvidos diretamente no desenvolvimento do projeto.
2. Que a equipe de projeto conte com o suporte de um especialista para realização das simulações, mas que tenha participação efetiva na análise dos resultados e consequentes tomadas de decisão de projeto.

3.1. Descrição dos Fluxos de Trabalho para simulação.

Nesta seção são descritos os três fluxos de trabalho analisados.

No **Fluxo de Trabalho 1 (FT1)**, representado esquematicamente na Figura 1, o modelo BIM é simulado e analisado utilizando ferramentas do próprio Revit, e ferramentas do *plug-in Insight 360* e *Autodesk 360 Rendering*. Estes são serviços desenvolvidos pela Autodesk para oferecer aos arquitetos acesso centralizado a análises energéticas, de iluminação e solares por meio de conexão com modelos do *Revit* ou *FormIt 360* e processamento computacional em nuvem. Os cálculos da iluminação natural utilizam o algoritmo *Multidimensional Lightcut* associado ao método do raio traçado bidirecional, que é validado com base no Radiance e em modelo reais (WALTER *et al.*, 2006). Os tipos de céu utilizados são o modelo de Perez para qualquer clima (PEREZ *et al.*, 1990) e padronizados pela *Comission Internationale d'Eclairage* (CIE). Todas as informações de projeto são obtidas diretamente do modelo BIM e a realização dos cálculos é feita em nuvem pelos servidores da Autodesk. Assim, o processamento é mais rápido do que quando realizados nos computadores do usuário e permitem ao arquiteto continuar trabalhando no arquivo do projeto sem interrupção. Os resultados são visualizados diretamente no ambiente de trabalho do Revit e caracteriza-se um processo integralmente baseado na tecnologia BIM.

A primeira etapa é de preparação do modelo BIM para o propósito específico das simulações. Consiste na verificação de parâmetros que normalmente já constam no arquivo do projeto desenvolvido com o Revit. Os passos desta etapa são: a determinação da localização, em termos de latitude e longitude; a modelagem para caracterização do entorno, caso não tenha sido representado para o projeto; definição dos ambientes incluídos na análise; atribuição das propriedades lumínicas dos materiais, definidas pelo perfil RGB das cores aparentes; e definição de vistas 3D, para gerenciamento da visibilidade dos objetos que serão computados nas simulações, e vistas em planta, para visualização dos resultados.

Por fim, é possível realizar as simulações e análises mostradas na Figura 1, onde são destacadas em cinza aquelas definidas para análise comparativa com os resultados obtidos pelos outros fluxos de trabalho.

No **Fluxo de Trabalho 2 (FT2)**, representado esquematicamente na Figura 2, o modelo BIM gerado no Revit é exportado e convertido em modelo geométrico de base CAD. Caracteriza-se um processo híbrido que utiliza tecnologias BIM e CAD, no qual a interoperabilidade fica reduzida à geometria do projeto. As

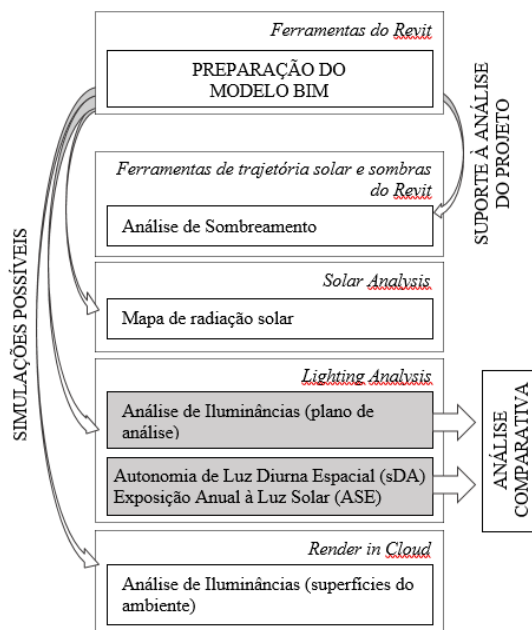


Figura 1 – Fluxo de Trabalho 1. Diagrama esquemático.

propriedades lumínicas dos materiais e os dados de localização e orientação do projeto precisam ser redefinidos conforme os padrões da ferramenta de simulação. O DIVA é um plugin para o programa de modelagem CAD Rhinoceros, que realiza simulações para análise ambiental de um modelo arquitetônico integrando-o a motores de cálculo validados e consagrados pela indústria. Os cálculos de iluminação são realizados pelo Radiance e os algoritmos do DAYSIM são usados para análises com base em arquivos climáticos (JAKUBIEC; REINHART, 2011). Os tipos de céu disponibilizados também incluem o modelo de Perez e da CIE. Os resultados são visualizados sobre o modelo geométrico do Rhinoceros, em gráficos de falsas cores ou apresentados em formato HTML.

A primeira etapa consiste na preparação do modelo BIM e os passos necessários são: a definição da vista que será exportada como modelo geométrico; e exportação do arquivo com a extensão DWG.

Na segunda etapa, o modelo deve ser manipulado no Rhinoceros, seguindo os seguintes passos: ajuste da orientação do modelo ao Norte Geográfico; limpeza do modelo geométrico; modelagem de planos de análise para definição da malha de sensores; a simplificação geométrica dos elementos translúcidos, para converter os sólidos que representam os vidros no Revit em planos simples; e o salvamento do modelo com a extensão 3DM.

Em seguida, o modelo é preparado para as simulações utilizando ferramentas do DIVA. Os passos necessários são: carregamento do arquivo de dados climáticos, que também supre os dados de latitude e longitude; definição da malha de sensores, para os cálculos de iluminâncias; e atribuição das propriedades lumínicas dos materiais.

Para a etapa de simulação, foram consideradas relevantes para o estudo aquelas organizadas nos menus *Daylight Images* e *Daylight Grid-based*, do DIVA, e mostradas na Figura 2.

No **Fluxo de Trabalho 3** (FT3), representado esquematicamente na Figura 3, o modelo BIM gerado no Revit é exportado e convertido em modelo geométrico com o auxílio do AutoCAD, para simulações e análises utilizando o programa Apolux. Também se caracteriza um processo híbrido, com interoperabilidade reduzida à geometria do projeto, em que há a necessidade de reinserção dos dados de propriedades lumínicas dos materiais, localização e orientação do projeto. O Apolux é um programa dedicado ao cálculo da iluminação natural, desenvolvido no Laboratório de Conforto Ambiental da UFSC pelo prof. Dr. Anderson Claro. Utiliza um modelo tridimensional em formato DXF gerado por um modelador de base CAD que, para o caso desta pesquisa, foi usado para a manipulação do modelo geométrico. O programa é composto por dois módulos. No módulo Fractal, o modelo geométrico em formato DXF é preparado para a realização dos cálculos pelo módulo Foton. O Modelo Vetorial Esférico e algoritmos baseados no método da radiossidade são utilizados para processar simulações estáticas e dinâmicas de iluminação natural. Diferentemente dos programas de FT1 e FT2, são adotados os 15 tipos de céu padronizados pela Norma ISO 15469- 2004 (E) CIE S 011-E, que são baseados no trabalho de Kittler *et al* (1997) *apud* Claro (2015) (CLARO, 2015). Os resultados podem ser visualizados em gráfico gerados pelo programa e em planilhas de dados.

A primeira etapa, de preparação do modelo BIM, consiste na definição da vista que será exportada como modelo geométrico, com a extensão DXF.

Na segunda etapa, o modelo é manipulado no AutoCAD, seguindo os seguintes passos: modelagem de planos de análise em camada (*layer*) específica; a simplificação geométrica dos elementos translúcidos, transformando sólidos em planos simples; e o salvamento do modelo com a extensão DXF.

No Módulo Fractal, o modelo geométrico com a extensão DXF é aberto e os seguintes passos são realizados: filtragem do arquivo para eliminar eventuais objetos inválidos; fracionamento do modelo, onde se

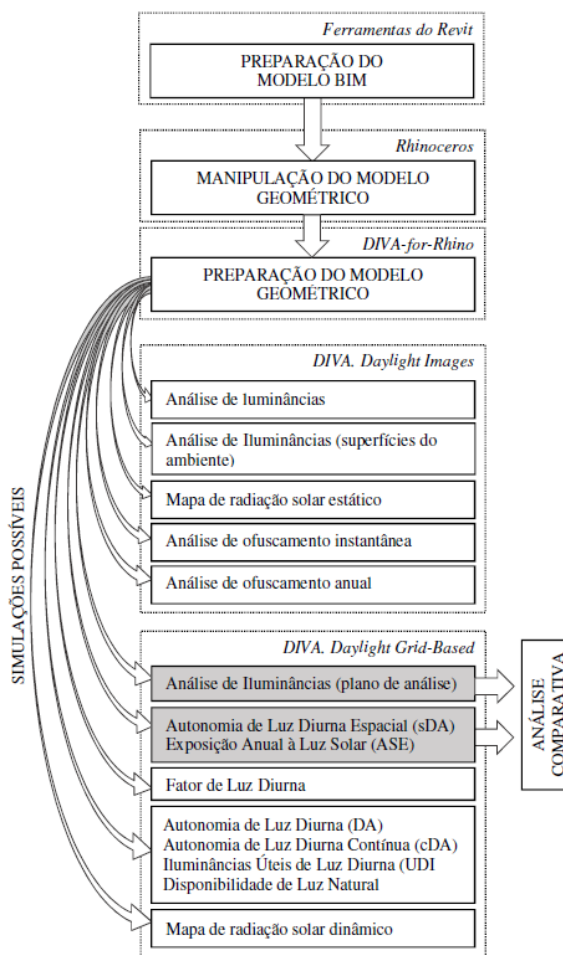


Figura 2 – Fluxo de Trabalho 2. Diagrama esquemático.

define o fator de divisão dos planos e os vértices que serão utilizados para o cálculo do fator de forma de cada ponto; salvamento do modelo com a extensão MDL, para registrar as ações realizadas no módulo Fractal; e salvamento do projeto com a extensão PJ4, para a abertura no Módulo Foton.

No Módulo Foton, os seguintes passos ainda são necessários antes que se iniciem os cálculos para simulação: definição do Nível do plano de análise, equivalente ao *layer* em que foi modelado no AutoCAD; atribuição das propriedades lumínicas dos materiais; e definição da resolução do Globo, que representa matematicamente a abóbada celeste.

A etapa seguinte se divide em dois percursos distintos para simulações estáticas ou para simulações dinâmicas. Para simulações estáticas, os passos necessários são: realização dos cálculos de visibilidade para determinação dos fatores de forma, que podem ser feitos no modo completo (fluxo dividido dos componentes RGB) ou no modo simples (fluxo médio total); realização dos cálculos da iluminação (radiosidade), quando são inseridos os parâmetros de ciclos de radiosidade, localização (latitude, longitude e altitude), orientação do Norte (azimute), data, horário e tipo de céu para simulação; salvamento do arquivo de cálculo; e o cálculo da imagem, para visualização dos resultados estáticos mostrados na Figura 3.

Para as simulações dinâmicas, os passos necessários são: realização dos cálculos de visibilidade, que neste caso deve ser feito no modo simples (fluxo médio total); realização dos cálculos dos coeficientes de luz natural, quando se definem o método de cálculo, o número de ciclos de radiosidade, a refletância média do solo, os limites de iluminâncias, as horas úteis anuais e o arquivo climático; salvamento do arquivo da Estimativa Anual de Luz Natural (EALN); e o cálculo das imagens, para geração dos gráficos referentes às métricas mostradas na Figura 3.

3.2. Descrição do Estudo de Caso.

Para o estudo de caso foi escolhido um projeto arquitetônico de um edifício comercial no bairro Burity, em Belo Horizonte, MG. O terreno localiza-se aos 19,97°S de latitude e 43,96°O de longitude. A plataforma Revit foi utilizada para modelagem e compatibilização dos projetos de todas as especialidades – arquitetura, estruturas e instalações. Uma perspectiva ilustrativa é mostrada na Figura 4.

Para viabilizar a análise do projeto com três fluxos de trabalho distintos, as simulações foram limitadas a um conjunto de duas salas comerciais representativas do programa arquitetônico. A Figura 5 mostra o pavimento e destaca as salas analisadas. A sala 403 tem 24,9m², mede 3,6m de largura por 6,93m de profundidade, 2,6m de pé-direito e tem aberturas voltadas para Oeste, sendo uma porta de vidro medindo 2m por 2,55m de altura e uma janela medindo 1,6m por 1,75m de altura e 0,8m de peitoril. A sala 409 tem 31m², mede 3,6m de largura por 8,63m de profundidade, 2,6m de pé-direito e tem aberturas voltadas para Leste, sendo uma janela medindo 3,60m por 1,75m de altura e peitoril de 0,8m.

As refletâncias dos materiais de acabamento e transmitâncias dos vidros foram padronizadas segundo o método descrito pela IES LM-83-12 (IES, 2012): 20% para os pisos, 70% para os tetos, 50% para paredes, portas de madeira e caixilhos, e 88% para a transmitância dos vidros. Em todos os fluxos de trabalho foi considerado um plano de análise a 0,76m do piso.

No FT 1 o modelo geométrico corresponde ao próprio modelo BIM, com nível de detalhamento correspondente à etapa de desenvolvimento do projeto. Uma vista 3D do modelo é criada, na qual são deixados visíveis somente os elementos construtivos listados no parágrafo anterior além da geometria do terreno e edifícios vizinhos. Somente os elementos visíveis são computados nos cálculos das simulações. Ao

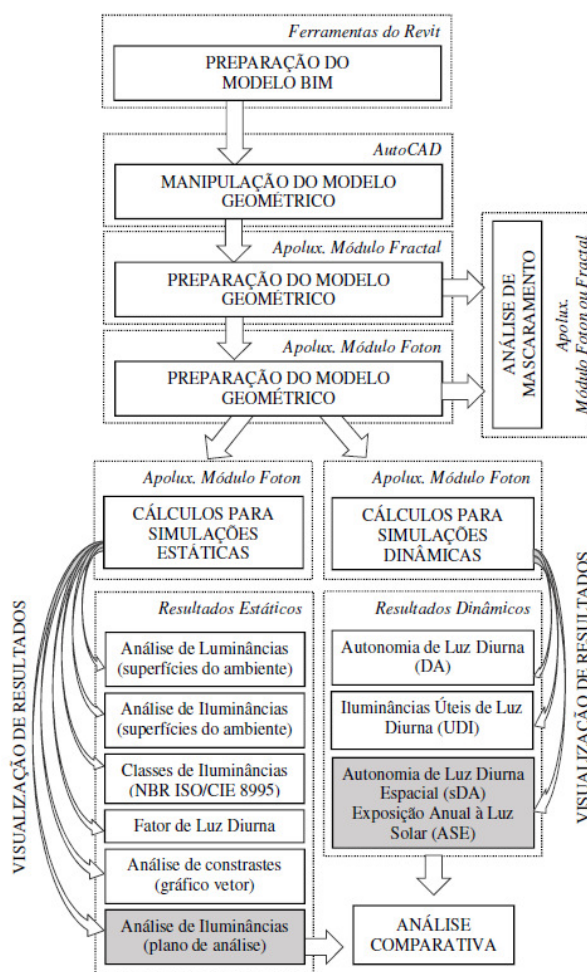


Figura 3 – Fluxo de Trabalho 3. Diagrama esquemático.



Figura 4 – Perspectiva ilustrativa do projeto utilizado como estudo de caso. Vista da fachada posterior (Oeste).



Figura 5 – Planta do pavimento em análise e indicação das salas simuladas (tracejado vermelho).

contrário de muitas pesquisas envolvendo a simulação da iluminação em que os modelos geométricos são criados com o propósito específico de serem usados para simulação, a intenção deste trabalho é que o modelo geométrico para simulação possa ser obtido do modelo BIM com o mínimo de intervenção possível.

A intenção é que as simulações possam acompanhar o curso de desenvolvimento do projeto e poupe o trabalho de modelagem a cada nova rodada de simulações. Assim, para o FT2 e FT3, uma nova vista 3D do modelo é criada, deixando as mesmas categorias de elementos visíveis, mas delimitando o modelo geométrico como mostrado na Figura 6. A delimitação do modelo tem o objetivo reduzir o tamanho do arquivo do modelo geométrico, que sobrecarregaria os cálculos realizados por meio do DIVA e do Apolux.

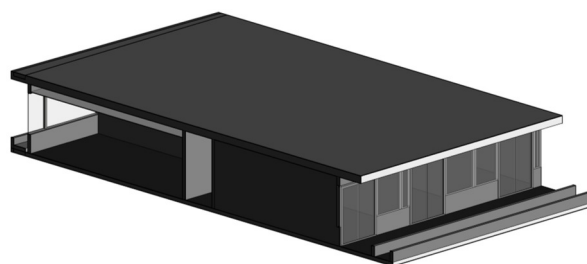


Figura 6 – Modelo tridimensional das salas simuladas, delimitado com ferramentas do Revit para exportação do modelo geométrico.

3.3. Análise comparativa dos fluxos de trabalho.

Souza (2012) aponta o contraste de paradigmas entre a forma de pensar o projeto entre os usuários de ferramentas de simulação e os arquitetos da área de projetos. Os contrastes residem nas diferenças da base de conhecimento e na prática profissional. Com o intuito de incentivar a prática de simulações da iluminação natural no âmbito dos escritórios de arquitetura, a análise comparativa dos fluxos de trabalho é feita sob o ponto de vista do arquiteto e leva em conta as duas hipóteses da pesquisa. Assim, busca-se evidenciar as diferenças e semelhanças dos fluxos de trabalho analisados quanto aos aspectos descritos a seguir.

Quanto às características das ferramentas, evidencia as diferenças conceituais dos métodos de cálculo e modelos de céu, assim como na forma de uso dos dados climáticos.

Quanto à interface com o usuário, são feitas considerações sobre a praticidade de uso das ferramentas e às ações que o usuário deve realizar para proceder com as simulações. Apontam-se as diferenças na interoperabilidade das informações de projeto em cada fluxo de trabalho.

Em contraponto, evidenciam-se as possibilidades de controle dos parâmetros que influenciam os cálculos e os resultados para análise.

Por fim, são comparados os tipos de análises que podem ser realizados em cada fluxo de trabalho, além daquelas que tiveram os resultados comparados neste estudo.

3.4. Análise comparativa dos resultados de simulação.

Para análise comparativa de resultados foram consideradas as duas principais abordagens de simulação correntes: estáticas ou dinâmicas.

Simulações estáticas são aquelas em que a iluminação natural dos ambientes é simulada para um dado instante no tempo sob determinada condição de céu. Optou-se por estudar os mapas de iluminâncias gerados sobre um plano de análise para os ambientes escolhidos do estudo de caso. Os mapas comparados foram

gerados para o solstício de verão, às 15h, sob as condições de céu claro e céu encoberto. Este tipo de simulação pode e deve ser realizado para datas, horários e condições de céu diversos e permite avaliar os ambientes qualitativamente, quanto ao padrão de distribuição da iluminação, ocorrência de contrastes excessivos no plano de análise e possibilidade de ofuscamento. Quantitativamente, permite avaliar a suficiência ou excesso da luz natural para as condições simuladas.

Simulações dinâmicas são aquelas em que a iluminação natural dos ambientes é simulada para o curso de um ano inteiro. São utilizados dados climáticos e algoritmos especiais de cálculo para a determinação das condições de céu. Para analisar a enorme quantidade de dados gerados nesse tipo de simulação, novas métricas vêm sendo criadas para lhes dar significado útil para avaliação dos ambientes e projetos. Muitas dessas novas métricas carecem ainda de estudos para estabelecimento de critérios de avaliação (REINHART, 2014). Para o estudo, são exploradas duas métricas que são complementares e tiveram seus métodos padronizados e aprovados através da publicação IES LM-83-12. A **Autonomia Espacial de Luz Diurna** – ou **sDA**, do termo em inglês *Spatial Daylight Autonomy* – é definida e padronizada pela IES como o percentual da área de análise que atinge um nível mínimo 300lux durante pelo menos 50% das horas úteis anuais, que correspondem a um período diário de 10 horas – 8h às 18h. Como critério, são definidos dois níveis de conformidade: preferível (75%) ou aceitável (55%). A **Exposição Anual à Luz Solar** – ou **ASE**, do termo em inglês *Annual Sunlight Exposure* - é uma métrica que descreve o potencial de desconforto visual em espaços interiores. Representa o percentual da área do plano de análise que excede o valor de 1000lux para iluminância pela luz solar direta por um número de horas anuais superior a 250. O limite estabelecido como critério pela IES-LM-83-12 para ASE é de 10% da área dos ambientes analisados. Para conformidade os limites estabelecidos para sDA e ASE devem ser atingidos simultaneamente nos ambientes analisados (ILLUMINATING ENGINEERING SOCIETY, 2013).

4. RESULTADOS

4.1. Análise comparativa dos fluxos de trabalho.

Simulações para iluminação natural envolvem inúmeras variáveis relativas ao projeto em análise – tais como geometria, materiais, localização, data e horário – ou parâmetros inerentes aos métodos e algoritmos de cálculo. Os três fluxos de trabalho analisados contrastam abordagens distintas tanto na forma de abordar essas variáveis quanto na interface com o usuário.

No FT1 as ferramentas de simulação e análise foram desenvolvidas especificamente para serem operadas no ambiente de trabalho do Revit. A interoperabilidade é completa e as variáveis de projeto são extraídas diretamente do modelo arquitetônico. A interface é simplificada para favorecer o uso pela própria equipe de projetos e as simulações são realizadas de forma praticamente direta. Em contrapartida, mesmo que os métodos utilizados sejam validados, o usuário não tem controle sobre parâmetros de cálculo e sobre os dados climáticos utilizados, o que pode interferir na precisão dos resultados. Os tipos de análises possíveis, mostrados na Figura 1, são bem mais limitados que em relação ao FT2 e FT3. As análises de sombras e trajetória solar são um importante recurso de suporte ao projetista que foi associado ao FT1 por utilizarem ferramentas do Revit, mas também traz benefícios ao FT2 e FT3, que também têm o Revit como ferramenta principal de desenvolvimento de projeto.

No FT 2, a interoperabilidade reduzida torna necessárias as etapas de manipulação e preparação do modelo geométrico, que são realizadas com ferramentas do Rhinoceros e do plugin DIVA. Estas etapas significam retrabalho para o processo de projeto, com a reinserção de informações já constantes no modelo BIM, e possibilidades de erros que podem ser significativos conforme a complexidade do projeto. A partir destas etapas, a interface para a realização das simulações estáticas ou dinâmicas é semelhante e relativamente simples. Para cada simulação, uma caixa de diálogo permite o controle de variáveis de projeto, que podem ser definidas por um arquiteto não especialista, e parâmetros avançados, que podem ser utilizados por um arquiteto, com valores padrão pré-definidos, ou ajustados por um especialista com conhecimentos nos algoritmos do Radiance, para resultados mais precisos. Os tipos de análise disponíveis abrangem os principais aspectos que devem ser avaliados para o conforto visual dos usuários e as principais métricas de simulações dinâmicas que vem sendo desenvolvidas recentemente em pesquisas internacionais.

Em ambos FT1 e FT2 os cálculos de iluminação são realizados com base no método do Raio Traçado, bidirecional e recursivo, respectivamente, e adotam os modelos de céu de Perez, para simulações dinâmicas, e padronizados pela CIE para simulações estáticas.

No FT3, a questão da interoperabilidade é semelhante à do FT2, assim como também há a necessidade das etapas de manipulação e preparação do modelo, com consequentes retrabalho e possibilidades de erro da parte do usuário. A manipulação do modelo pode ser feita no AutoCAD, como foi o caso deste estudo, ou em

outros programas de base CAD, como o SketchUp e o próprio Rhinoceros. A preparação do modelo passa necessariamente pelos dois módulos do Apolux antes que se iniciem os cálculos. O processo resultante não é tão direto como no FT1 e exige do usuário um número maior de passos que no FT2 até que se obtenham resultados para análise. Em contrapartida, pelo fato de ser uma ferramenta dedicada à simulação da iluminação natural, permite ao usuário um controle muito maior das variáveis de cálculo em um vocabulário acessível a arquitetos, tais como a escolha da resolução da Abóbada Celeste e o modo de cálculo pelo fluxo luminoso médio ou dividido em perfil RGB. Os tipos de análise disponíveis também abrangem os principais aspectos de conforto visual e as principais métricas de simulações dinâmicas. Mas permite ainda a análise de conformidade com a norma brasileira NBR ISO/CIE 8995 e a realização de estudos de máscaras, que não são possíveis com o FT1 e FT2.

4.2. Análise comparativa dos resultados de simulação.

A figura 7 apresenta um painel para a análise comparativa dos resultados obtidos por simulação estática. Os gráficos representam mapas de iluminâncias para as condições de céu claro e céu encoberto em um dia de solstício de verão, às 15h.

Os gráficos obtidos por FT2 e FT3 apresentam padrões de distribuição das iluminâncias no plano de análise muito semelhantes tanto para céu claro quanto para céu encoberto. Já em FT1, a mancha de iluminação excessiva próxima às aberturas da sala 403 (à direita) foi mais acentuada. Em todos os gráficos se observa uma região excessivamente iluminada, acima de 3000lux, próxima às aberturas da fachada Oeste,

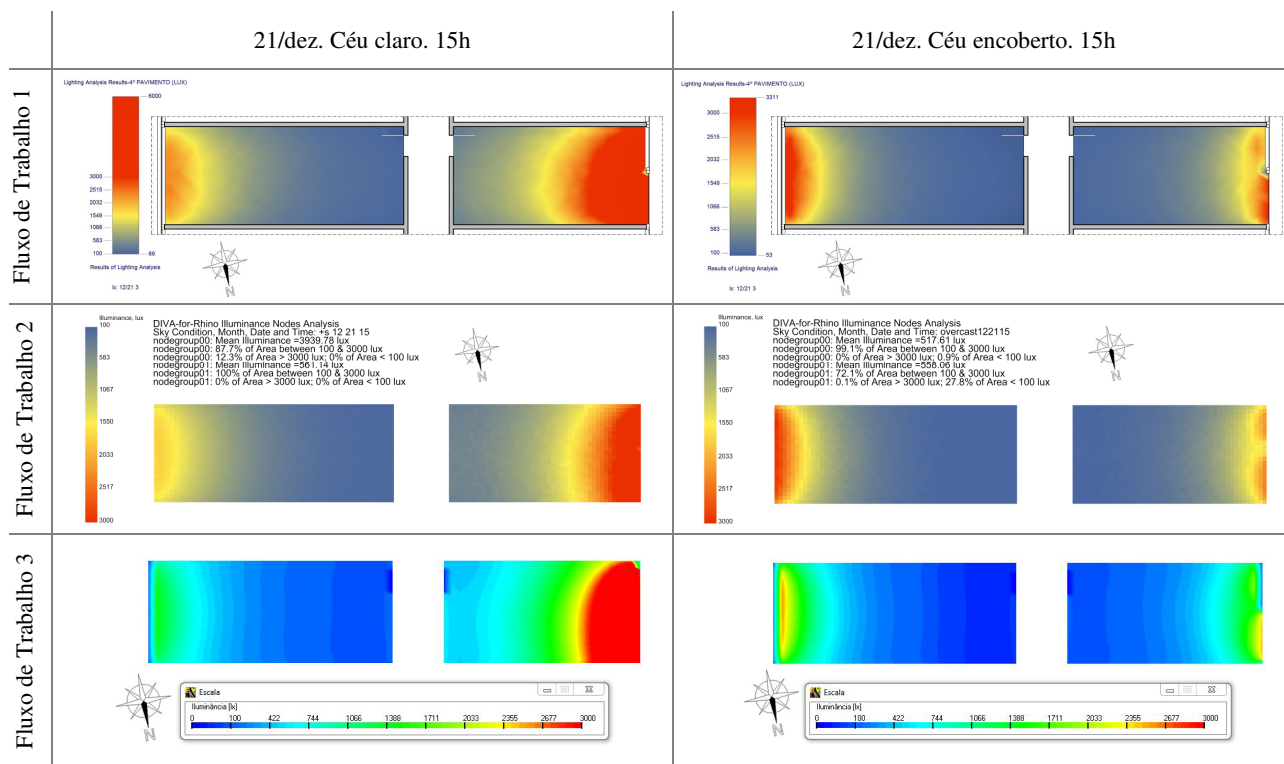


Figura 7. Painel comparativo dos resultados de simulação estática. Mapas de iluminâncias obtidos com os três fluxos de trabalho para que decai à medida que delas se afasta. O nível de iluminação excessivo próximo a essas aberturas, em contraste com níveis mais baixos no fundo das salas sugere a necessidade de se propor um elemento de proteção para o sol da tarde que redirecione a luz natural em mais profundidade. A diferença qualitativa observada em FT1 decorre provavelmente de diferenças nos dados climáticos. Em FT2 e FT3 foi utilizado o mesmo arquivo climático, escolhido pelo usuário, em formato EPW, para o ano de 2009. Enquanto em FT1 os dados climáticos são carregados automaticamente e se referem ao ano de 2006. Quantitativamente, em análise mais minuciosa, podem se observar diferenças também entre FT2 e FT3, decorrentes dos diferentes modelos de céu adotado por cada programa.

Os resultados de simulações estáticas indicam um grande potencial de incorporação desse tipo de análise ao processo de projeto com a utilização do Revit, posto que para os arquitetos a simplicidade na obtenção destes resultados com o FT1 é muito relevante e supre a necessidade de avaliação qualitativa, para comparação de diferentes soluções de projeto.

A figura 8 apresenta o painel para análise comparativa dos resultados obtidos por simulação dinâmica. A coluna da esquerda mostra os resultados para análise de sDA e a coluna da direita os gráficos para ASE.

O gráfico para sDA do FT1 apresenta apenas as áreas que atendem (amarelo) ou não (cinza) ao critério de conformidade para a sDA. No FT2 e FT3, os gráficos indicam a distribuição dos percentuais de

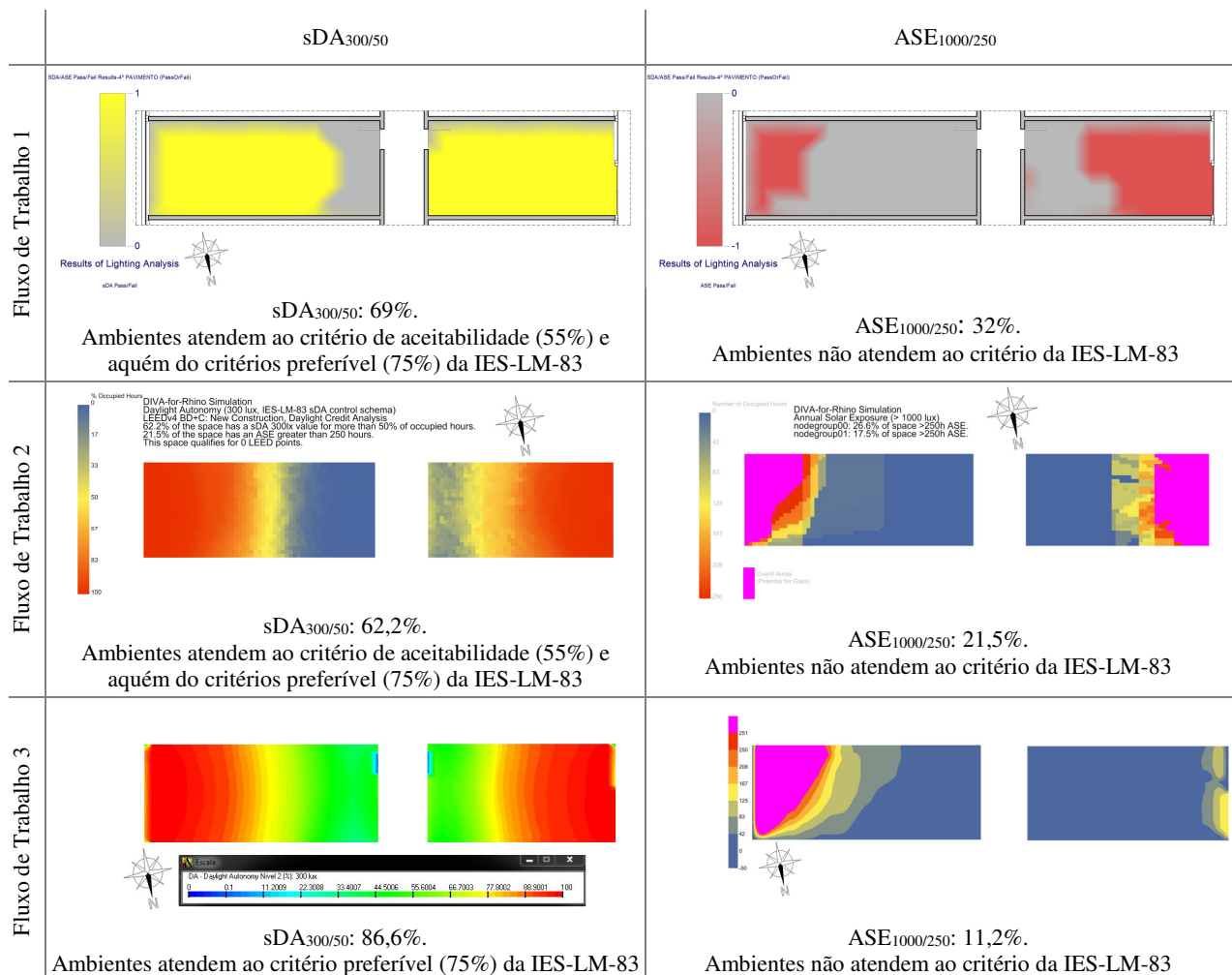


Figura 8. Painel comparativo dos resultados de simulação dinâmica. Mapas de DA e ASE e indicação dos percentuais de sDA e ASE para verificação dos critérios estabelecidos pela IES-LM-83 (IES, 2012).

Autonomia de Luz Diurna (DA) de onde é extraído valor de sDA. Para esta métrica, o FT1 e o FT2 apresentaram resultados parecidos, 69% e 62,2%, respectivamente. Ambos correspondem ao critério de aceitabilidade. Do FT3 o resultado foi 86,6%, que atenderia ao critério preferível da IES-LM-83-12.

O gráfico para ASE do FT1, analogamente ao gráfico de sDA, mostra apenas as áreas que atendem (cinza) ou não (vermelho) ao critério definido para a métrica. O gráfico do FT2 também destaca os pontos que não atendem ao critério da métrica, mas mostra uma escala de cores com o número de horas de iluminação excessiva para os demais pontos do ambiente. Do FT3, o Apolux forneceu os dados numéricos e o gráfico foi gerado com o auxílio do programa Surfer. Os resultados obtidos com os três fluxos de trabalho indicaram não conformidade aos critérios para ASE. De acordo com os resultados obtidos por FT1 e FT2, 32% e 21,5% respectivamente, os ambientes não atendem ao critério limite para ASE, enquanto o resultado obtido pelo FT3, 11,2% indica a conformidade dos ambientes analisados.

5. CONCLUSÕES

A exploração dos três fluxos de trabalho permitiu concluir que uma das principais contribuições da tecnologia BIM para a integração das simulações de iluminação natural ao processo de projeto é o aproveitamento do modelo tridimensional. Embora pareça óbvio, a utilização do modelo BIM elimina o trabalho de modelagem para o propósito específico das simulações, que pode ser uma etapa bastante trabalhosa em um projeto desenvolvido com base em desenhos bidimensionais elaborados em softwares CAD. No FT1, as informações associadas ao modelo BIM também são utilizadas de forma consistente, enquanto no FT2 e FT3 somente os dados geométricos e a organização dos elementos em *layers* é utilizada.

Para a primeira hipótese de pesquisa, o FT1 se mostrou com grande potencial de utilização por

arquitetos, pelo menos para análises estáticas preliminares, que também podem ser feitas para todos os ambientes do projeto sem acréscimo significativo de esforço do usuário. A facilidade para gerar resultados no mesmo ambiente de desenvolvimento do projeto é um importante atrativo. Em contrapartida, os tipos de análises possíveis são bem mais restritos e não há controle nenhum sobre parâmetros de cálculo. A adoção do FT2 ou FT3 por um arquiteto da área de projetos exigiria desse profissional um esforço consideravelmente maior, pois demanda a utilização de ferramentas de modelagem secundárias e uma carga mínima de conhecimentos específicos do universo das simulações para a correta operação dos programas.

Assim, para a segunda hipótese da pesquisa, o FT2 e o FT3 se mostraram mais vantajosos, principalmente por permitir o controle das variáveis de cálculo e oferecer opções para uma análise mais completa. A falta de interoperabilidade dos dados não geométricos é a principal desvantagem desses dois fluxos de trabalho. Maior esforço é despendido para a manipulação e preparação do modelo geométrico. E a carga de trabalho pode ser ainda maior caso se deseje analisar o projeto como um todo, o que exigiria a definição de estratégias apropriadas e definidas em conjunto pela equipe de projeto e especialista em simulações da iluminação natural. O trabalho colaborativo entre estes profissionais ainda não é uma prática corrente no Brasil, embora deva ser incentivada. Uma das principais vantagens em potencial da tecnologia BIM para o processo de projeto é o favorecimento do trabalho colaborativo interdisciplinar desde etapas iniciais, de modo que uma mudança cultural pela implementação do BIM no Brasil pode representar um maior potencial de integração das simulações ao processo de projeto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDERSEN, M.; GAGNE, J. M. L.; KLEINDIENST, S. **Interactive expert support for early stage full-year daylighting design: a user's perspective on lightsolve**. *Automation in construction*, 2013. v. 35, p. 338–352. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2013.05.014>>.
- ANDERSEN, M.; GUILLEMIN, A. **Daylight Dynamics to Guide Early Stage Design: a User-driven Goal-based Approach to "Good" Lighting**. PLEA 2013: 19th Conference, Sustainable Architecture for a Renewable Future, 2013. Disponível em: <http://infoscience.epfl.ch/record/188742/files/AndersenGuillemin2013_Lightsolve-PLEA_final2.pdf>.
- ANDRADE, Max Lira Veras X. de; RUSCHEL, Regina Coeli. **BIM: Conceitos, cenário das pesquisas publicadas no Brasil e tendências**. SBQP 2009: Simpósio Brasileiro de Qualidade do Projeto no Ambiente Construído, São Carlos, p.602-613, 18 nov. 2009.
- BOUBEKRI, Mohamed. **Daylighting, Architecture and Health: Building Design Strategies**. Oxford: Elsevier. 2008.
- BRÍGITTE, G. T. N.; RUSCHEL, R. C. **Integrated Model Supporting Environmental Performance Simulations in the Early Stages of Building Design**. Proceedings of BS2013: 13th Conference of International Building Performance Simulation Association, Chambéry, France, August 26-28, 2013. p. 856–861.
- CLARO, A. **Método para determinação da estimativa anual de luz natural utilizando o modelo vetorial esférico para radiossidade**. Tese (progressão para professor titular). Universidade Federal de Santa Catarina, 2015.
- EASTMAN, Chuck; TEICHOLZ, Paul; SACKS, Rafael; LISTON, Kathleen. **BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers, and Contractors**. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2011.
- ILLUMINATING ENGINEERING SOCIETY. **IES LM-83-12. Approved method: IES Spatial Daylight Autonomy (sDA) and Annual Sunlight Exposure (ASE)**.
- ILLUMINATING ENGINEERING SOCIETY. **IES Position Statement: Integrated Building Design (PS-01-09)**. 2009. p. 1–2.
- JAKUBIEC, J. A.; REINHART, C. F. **Diva 2.0: Integrating daylight and thermal simulations using rhinoceros 3d, daysim and energypplus**. Proceedings of Building Simulation 2011: 12th Conference of International Building Performance Simulation Association, 2011. p. 2202–2209. Disponível em: <<http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84870189464&partnerID=tZOTx3y1>>.
- LAMBERTS, Roberto; DUTRA, Luciano; PEREIRA, Fernando Oscar Ruttkay. **Eficiência energética na arquitetura**. 3. ed. Florianópolis, Sc: Eletrobrás - Procel, 2014. 366 p. Disponível em: <www.eletronbras.com/procel>. Acesso em: 03 fev. 2015.
- NEGENDAHL, Kristoffer. **Building performance simulation in the early design stage: an introduction to integrated dynamic models**. *Automation in Construction*, v. 54, pp. 39-53, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2015.03.002>>.
- PEREZ, R.; SEALS, R.; MICHALSKY, J. **All-Weather Model For Sky Luminance Distribution: Preliminary Configuration And Validation**. *Solar Energy*, Vol. 50, n. 3, pp.235-245. U.S.A, 1990.
- REINHART, Christoph F. **Daylighting Handbook I: Fundamentals. Designing with the sun**. Vol. 1. Cambridge. 2014.
- REINHART, Christoph; WIENOLD, Jan. **The daylighting dashboard: A simulation-based design analysis for daylight spaces**. *Building and Environment*. v. 46, n. 2, pp. 386-396. 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.08.001>>. Acesso em: 20, jun, 2016.
- SILVA, Vanessa Gomes da; SILVA, Maristela Gomes da; AGOPYAN, Vahan. **Avaliação de edifícios no Brasil: da avaliação ambiental para avaliação de sustentabilidade**. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 3, n. 3, p. 7-18, jul./set. 2003.
- SOUZA, Clarice Bleil de. **Contrasting paradigms of design thinking: The building thermal simulation tool user vs. the building designer**. *Automation in Construction*, v. 22, pp. 112-122, 2012.
- SUCCAR, Bilal. **Building information modeling framework: a research and delivery foundation for industry stakeholders**. *Automation in Construction*, v. 18, n. 3, p. 357-375, 2008. Disponível em: <www.elsevier.com/locate/autcon>. Acesso em: 20 jan. 2013
- WALTER, B. *et al.* **Multidimensional lightcuts**. *ACM Transactions on Graphics*, 2006. v. 25, n. 3, p. 1081. Disponível em: <<http://www.cs.cornell.edu/projects/lightcuts/>>.