USP - Universidade de São Paulo
FAU - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo
Programa de Pós-Graduação

AMANDA PUCHILLE PINHA

Integração entre BIM e BPS: desafios na avaliação de desempenho ambiental na era do projeto e processos digitais

São Paulo
2017

AMANDA PUCHILLE PINHA

Integração entre BIM e BPS: desafios na avaliação de desempenho ambiental na era do projeto e processos digitais

Dissertação apresentada à Faculdade de Arquitetura
e Urbanismo da Universidade de São Paulo para
obtenção do título de Mestre em Ciências

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO:
Tecnologia da Arquitetura

ORIENTADOR:
Prof. Dr. Norberto Corrêa da Silva Moura

São Paulo
2017

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

EXEMPLAR REVISADO E ALTERADO EM RELAÇÃO À VERSÃO ORIGINAL, SOB
RESPONSABILIDADE DO AUTOR E ANUÊNCIA DO ORIENTADOR.

O original se encontra disponível na sede do programa.
São Paulo, 06 de junho de 2017

Catlogação na Publicação
Serviço Técnico de Biblioteca
Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo

P654i Pinha, Amanda Puchille
Integração entre BIM e BPS: desafios na avaliação
de desempenho ambiental na era do projeto e
processos digitais / Amanda Puchille Pinha ;
orientador Norberto Corrêa da Silva Moura. - São
Paulo, 2017.
100 f.

Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Arquitetura
e Urbanismo da Universidade de São Paulo. Área de
concentração: Tecnologia da Arquitetura

1. Geometria e Modelagem Computacional. 2.
Simulação Computacional. 3. Conforto Ambiental. 4.
Avaliação de Desempenho. 5. Interoperabilidade. 6.
Integração de Tecnologias. I. Moura, Norberto Corrêa
da Silva, orient. II. Título.

Nome: PINHA, Amanda Puchille

Título: **Integração entre BIM e BPS:** desafios na avaliação de desempenho ambiental na era do projeto e processos digitais.

Dissertação apresentada à Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Aprovada em:

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr.

Instituição:

Julgamento:

Assinatura:

Prof. Dr.

Instituição:

Julgamento:

Assinatura:

Prof. Dr.

Instituição:

Julgamento:

Assinatura:

DEDICATÓRIA

Às mulheres, exemplos de força, de minha família: às minhas bisavós, que vieram do trabalho braçal do campo para fazer a vida na cidade; à minha avó materna, que, com os filhos pequenos, conquistou uma vaga em concurso público e venceu os preconceitos da época para poder trabalhar “fora”; e à minha mãe, que abriu mão de um trabalho estável e do tempo com a família para realizar seu sonho de se formar na faculdade. É honrando a essas mulheres que concluo o primeiro curso de mestrado na família.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Dr. Norberto pelo cuidado, liberdade e confiança depositada em mim, essenciais para o desenvolvimento de minhas pesquisas. Obrigada pela disposição, paciência e orientação em todos os meus trabalhos acadêmicos, desde a graduação. Foram muitos e essenciais os seus ensinamentos com relação à pesquisa científica, tendo sido um dos grandes responsáveis por despertar meu interesse por essa atividade.

Agradeço à minha mãe e meu pai pelo exemplo relativo à importância do estudo em nossas vidas e pelo incentivo e suporte dado durante toda minha trajetória escolar e acadêmica. Agradeço também aos meus avós pelo carinho e apoio incondicional.

Agradeço ao Leonardo pelo carinho na revisão do texto, contribuindo com sua visão analítica de engenheiro com sugestões para o refinamento da metodologia e apresentação dos resultados, e também pelo estímulo para dar continuidade à minha carreira acadêmica.

RESUMO

PINHA, Amanda P. **Integração entre BIM e BPS: desafios na avaliação de desempenho ambiental na era do projeto e processos digitais.** 2017. 100 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo (FAUUSP), São Paulo, 2017.

Simulações computacionais são um recurso de grande valia no projeto do edifício, particularmente na área de desempenho ambiental, permitindo prever fenômenos complexos como desempenho térmico, lumínico, acústico e energético dos edifícios e de seu entorno. O surgimento do BIM (*Building Information Modeling* ou Modelagem da Informação da Construção), por sua vez, forneceu aos profissionais da indústria da construção novas ferramentas para auxiliar na criação e gestão da informação da construção. Ao combinar um modelo 3D com um banco de dados único do projeto, BIM acaba por reduzir a perda de informação e o retrabalho, permitindo o trabalho colaborativo e aumentando a confiabilidade e rastreabilidade das informações do projeto ao longo do ciclo de vida da construção. Muito antes do BIM, ferramentas de simulação de desempenho do edifício (*Building Performance Simulation* - BPS, na sigla em inglês) já empregavam modelos 3D, o que significa que especialistas de avaliação ambiental do edifício frequentemente tinham que modelar o edifício – e remodelá-lo cada vez que o projeto fosse alterado – dentro destas ferramentas de modo a executar as análises de desempenho. Neste contexto, a integração entre ferramentas BIM e BPS é fundamental para aumentar a eficiência de uma indústria da construção altamente fragmentada. Nos últimos anos, muitos pesquisadores têm se focado em alcançar tal integração. Este estudo sintetiza as pesquisas nesta questão por meio da revisão sistemática de mais de 250 pesquisas publicadas mundialmente no período de 1991 a 2015. Os resultados mostram que, apesar de um aumento significativo no número de estudos publicados nos últimos cinco anos, a plena integração entre BIM e BPS é um assunto complexo e continua sendo um desafio. Esta revisão sistemática produziu um diagnóstico abrangente e contribui com pesquisadores por revelar padrões, tendências e lacunas da área de pesquisa, orientando assim futuros esforços de pesquisa.

Palavras-chave: *Building Information Modeling* (BIM), *Building Performance Simulation* (BPS), simulação de desempenho ambiental do edifício, conforto ambiental, eficiência energética, interoperabilidade, IFC, gbXML, revisão sistemática.

ABSTRACT

PINHA, Amanda P. **BIM and BPS integration:** challenges in environmental performance analysis in the digital design and processes era. 2017. 100 f. Dissertation (Master in Science) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo (FAUUSP), São Paulo, 2017.

Computer simulations are a valuable resource in building design, notably in the environmental performance field, enabling designers and engineers to predict complex phenomena such as thermal, lighting, acoustic and energy performance. The emergence of BIM (Building Information Modeling), in turn, provided these professionals with new tools to assist in the creating and managing of building information. By combining a 3D model to a unique project database, BIM ultimately reduces the loss of information and rework, allowing collaborative work and increasing reliability and traceability of the project information throughout the construction lifecycle. Long before BIM, Building Performance Simulation (BPS) tools already employed 3D models, meaning that simulationists frequently had to model the building – and remodel it as many times as the design changed – within these tools in order to run performance analyses. In this context, the integration of BIM and BPS tools is critical to increase efficiency of a highly fragmented construction industry. In the past years, many researchers have been focusing on achieving this integration. This study summarizes research on this topic by systematically reviewing over 250 researches published worldwide from 1991 to 2015. Results show that, despite a significant increase in the number of studies published in the last five years, fully integration between BIM and BPS is a complex subject and remains a challenge. This systematic review produced a comprehensive diagnosis and contributes with researchers by revealing patterns, trends and gaps of the research area, orientating future research efforts.

Keywords: Building Information Modeling (BIM), Building Performance Simulation (BPS), environmental performance, environmental comfort, energy efficiency, interoperability, IFC, gbXML, systematic review.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Fluxograma que ilustra proposta de BIM ser um modelo único de informação do edifício a ser usado ao longo de todo ciclo de vida da construção. Fonte: ³¹	22
Figura 2: Estágios de Maturidade BIM. Fonte: ¹²	24
Figura 3: Diferença entre modelos geométricos (esq.) e analíticos (dir.). Fonte: ⁴⁴	30
Figura 4: Panorama do campo de pesquisa em CIC - Computer Integrated Construction (Computação Integrada na Construção, tradução nossa). Fonte: ³⁷	32
Figura 5: As três etapas do processo de revisão sistemática. Fonte: Adaptado de ⁴⁷	36
Figura 6: Categorias de classificação da revisão sistemática.	39
Figura 7: Matriz utilizada na etapa de extração de dados para organizar as informações dos estudos selecionados e registrar os dados extraídos na revisão sistemática.	86
Figura 8: Tabulação dos dados extraídos na execução da revisão sistemática.	87
Figura 9: Plotagem dos resultados da revisão sistemática, incluindo os diversos gráficos de teste e estudo.	88
Figura 10: Fases do ciclo de vida da construção no Estágio de Maturidade BIM 1 - modelo linear. Fonte: ¹²	100
Figura 11: Fases do ciclo de vida da construção no Estágio de Maturidade BIM 2 - modelo linear. Fonte: ¹²	100
Figura 12: Fases do ciclo de vida da construção no Estágio de Maturidade BIM 3 - modelo linear. Fonte: ¹²	100

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Porcentagens (do total) de artigos classificados de acordo com a fonte.....	40
Gráfico 2: Porcentagens de artigos (por período e no total) de acordo com a Origem dos Autores.....	42
Gráfico 3: Quantidade de artigos revisados por ano.	43
Gráfico 4: Porcentagens de artigos por ano de acordo com a nomenclatura BIM.....	45
Gráfico 5: Porcentagens de artigos por período de acordo com a nomenclatura BIM.	45
Gráfico 6: Quantidade de artigos classificados por período.	45
Gráfico 7: Classificação dos artigos de acordo com o Método da Pesquisa – porcentagens por período (esq.) e no total (dir.).....	47
Gráfico 8: Classificação dos artigos de acordo com a Contribuição da Pesquisa – porcentagens do total.....	49
Gráfico 9: Classificação dos artigos de acordo com a Aplicação da Pesquisa relativa à Integração – porcentagens por período (esq.) e no total (dir.).....	51
Gráfico 10: Classificação dos artigos de acordo com a Disciplina de Simulação – porcentagens do total.....	52
Gráfico 11: Classificação dos artigos de acordo com a Disciplina Geral de Simulação – porcentagens por período e no total.....	53
Gráfico 12: Classificação dos artigos de acordo com a Disciplina Geral de Simulação (associadas) – porcentagens por período (esq.) e no total (dir.).....	53
Gráfico 13: Classificação dos artigos de acordo com a Fase do Projeto – porcentagens por período (esq.) e no total (dir.).....	55
Gráfico 14: Classificação dos artigos de acordo com Outras Aplicações – quantidades por período.....	57
Gráfico 15: Classificação dos artigos de acordo com o Método de Interoperabilidade – porcentagens por período e no total.....	60

Gráfico 16: Classificação dos artigos de acordo com o Método de Interoperabilidade (associadas) – percentagens por período (esq.) e no total (dir.).....	60
Gráfico 17: Resultados combinados das categorias “Método de Interoperabilidade” e “Método da Pesquisa” – percentagens no total (por classe).	96
Gráfico 18: Resultados combinados das categorias “Método de Interoperabilidade” e “Aplicação da Pesquisa relativa à Integração” – percentagens no total (por classe).96	
Gráfico 19: Resultados combinados das categorias “Método de Interoperabilidade” e “Disciplina Geral de Simulação” – percentagens no total (por classe).....	97
Gráfico 20: Resultados combinados das categorias “Método de Interoperabilidade” e “Fase do Projeto” – percentagens no total (por classe).	97

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Justificativa e objetivos de cada categoria de classificação da revisão sistemática.	38
Tabela 2 - Quantidade de artigos classificados por Revista Científica.	40
Tabela 3 - Quantidade de artigos classificados por Conferência.	41
Tabela 4 - Métodos de interoperabilidade para realizar a integração entre BPS e BIM.	59
Tabela 5 - Estágios de Maturidade BIM. Adaptado de ¹²	98

LISTA DE SIGLAS

AECO	Arquitetura, Engenharia, Construção e Operação das Instalações
Applnt	<i>Application Integration</i> / Integração entre aplicações
BAS	<i>Building Automation Systems</i> / Sistemas de Automação Predial
BIM	<i>Building Information Modeling</i> / Modelagem da Informação da Construção
BMS	<i>Building Management Systems</i> / Sistemas de Gestão Predial
BPS	<i>Building Performance Simulation</i> / Building Performance Simulation
BREEAM	<i>Building Research Establishment's Environmental Assessment Method</i> é uma certificação de origem europeia para avaliar o desempenho ambiental de um empreendimento imobiliário.
CAD	<i>Computer-Aided Design</i> / Desenho Assistido por Computador
CIS/2	Formato de arquivo não-proprietário utilizado por aplicações para projeto e análise de estruturas metálicas.
DGN	Formato de arquivo proprietário do <i>software</i> Microstation, da Bentley.
DtConv	<i>Data Converter</i> / Conversor de Dados
DtXFor	<i>Data Exchange Format</i> / Formato de Intercâmbio de Dados
DWF	<i>Design Web Format</i> é um formato de arquivo criado pela Autodesk que permite a leitura de seus arquivos proprietários por meio de um <i>software</i> gratuito que pode ser instalado em qualquer computador.
DXF	<i>Drawing/Data Exchange Format</i> é um formato de arquivo criado pela Autodesk para intercâmbio de dados CAD.
gbXML	Formato de arquivo não-proprietário especialmente criado para intercâmbio de dados BPS, também utilizado por aplicações BIM.
IFC	<i>Industry Foundation Classes</i> é um formato de arquivo não-proprietário criado para intercâmbio de dados BIM.
LEED	<i>Leadership in Energy and Environmental Design</i> é uma certificação de origem estadunidense para avaliar o desempenho ambiental de um empreendimento imobiliário
N/D	Não definido
RVT	Formato de arquivo proprietário do <i>software</i> Revit, da Autodesk.
XML	<i>eXtensible Markup Language</i> é uma linguagem de marcação para a criação de documentos com dados organizados hierarquicamente, tais como textos, banco de dados ou desenhos vetoriais.

SUMÁRIO

Resumo	6
Abstract	8
Lista de Ilustrações	9
Lista de Gráficos	10
Lista de Tabelas	12
Lista de Siglas.....	13
Sumário.....	14
1. Introdução.....	16
1.1. Contextualização e Justificativa	16
1.2. Objetivo, Método e Resultados	18
1.3. Delimitação do tema.....	18
1.4. Estrutura do Trabalho.....	18
2. A simulação de desempenho do edifício (BPS) inserida no processo de projeto em BIM: contexto e interface	20
2.1. BPS (Building Performance Simulation)	20
2.2. BIM (Building Information Modeling).....	22
2.2.1. Colaboração e integração BIM	24
2.2.2. Interoperabilidade	25
2.3. Interface entre BIM e BPS.....	27
2.3.1. Integração da simulação no processo de projeto	27
2.3.2. Designer-friendly versus Design-integrated	28
2.3.3. Modelo geométrico versus modelo analítico.....	29
2.3.4. IFC versus gbXML.....	30
2.3.5. Dados versus Processos	31

3. Metodologia.....	35
3.1. Método da Pesquisa	36
3.2. Estrutura para classificação e análise dos resultados	38
3.2.1. Categorias auxiliares.....	40
4. Análise dos Resultados	46
4.1. Categoria 1: Método da Pesquisa.....	46
4.2. Categoria 2: Contribuição da Pesquisa	48
4.3. Categoria 3: Aplicação da Pesquisa relativa à Integração	50
4.4. Categoria 4: Disciplina de Simulação.....	51
4.5. Categoria 5: Fase do Projeto.....	54
4.6. Categoria 6: Outras Aplicações.....	57
4.7. Categoria 7: Método de Interoperabilidade.....	59
5. Conclusões e Considerações Finais.....	64
Referências Bibliográficas.....	67
APÊNDICE A - Protocolo definido para a revisão sistemática	81
APÊNDICE B - Bibliografia complementar	89
APÊNDICE C - Resultados complementares	96
ANEXO A - Níveis de Maturidade BIM.....	98

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA

As ferramentas computacionais de suporte ao projeto do edifício evoluíram rapidamente nas últimas décadas devido a avanços na Tecnologia da Informação (TI) que reduziram custos de *hardware* e melhoraram as capacidades de *software*, tornando-se amplamente acessíveis aos projetistas, o que visivelmente impactou no modo como os edifícios passaram a ser projetados, analisados e construídos ¹. A simulação de desempenho do edifício – mais conhecida na literatura internacional pela sigla BPS (*Building Performance Simulation*) – tem como propósito a previsão, avaliação e verificação do comportamento físico de edificações conforme projetadas, construídas ou operadas ². Desde os anos 1960, ferramentas BPS auxiliam profissionais a analisar o desempenho do edifício em diferentes áreas, desde análise estrutural até conforto ambiental e eficiência energética ^{3; 4}. Recentemente, BIM (*Building Information Modeling* ou Modelagem da Informação da Construção) tornou-se a principal tendência tecnológica da indústria AECO (Arquitetura, Engenharia, Construção e Operação das Instalações), apesar de o seu conceito já ser discutido desde os anos 1970 ⁵. BIM é a denominação para o sistema no qual todos os objetos inteligentes modelados se combinam para formar o projeto do edifício, coexistindo em uma única “base de dados do projeto” ou “edifício virtual” que contém toda a informação sobre o edifício ⁶.

Ao auxiliar na criação e gerenciamento da informação da construção, BIM acaba por reduzir a perda de informação e o retrabalho, possibilitando o trabalho colaborativo e aumentando a confiabilidade e rastreabilidade das informações do projeto ao longo do ciclo de vida da construção ⁷. Muitas pesquisas de mercado a nível mundial verificaram que a maioria dos profissionais e empresas da indústria AECO já substituiu ou está em processo de substituição das tecnologias CAD 2D por BIM para o desenvolvimento de seus projetos ^{8; 9; 10; 11}. É evidente, portanto, o domínio e estabelecimento desta nova abordagem na indústria da construção, mudança essa tida como não apenas no âmbito de tecnologia, mas também de processos e políticas da indústria ¹².

Do mesmo modo, a crescente demanda por redução do impacto ambiental e melhoria da eficiência energética dos edifícios alavancou a prática de BPS pelos projetistas ¹³. Muito antes do BIM, ferramentas BPS já empregavam modelos 3D do edifício analisado. Em um cenário em que especialistas de simulação recebiam a documentação do projeto em 2D, modelar o edifício – e remodelá-lo quantas vezes o projeto fosse alterado – dentro destas ferramentas era necessário para que se pudessem executar as análises de desempenho do mesmo. Considerando que, em geral, as simulações de cada aspecto do desempenho (térmico, lumínico, etc.) são executadas em diferentes aplicativos especializados, para obter-se uma análise completa faz-se necessário também modelar o edifício em cada um desses aplicativos separadamente e repetidamente. Com a popularização do BIM, a integração entre ferramentas BPS e BIM é vista por muitos pesquisadores como sendo a solução para reduzir os característicos retrabalhos e suscetibilidade a erros do procedimento de modelagem para simulação, pois se beneficiaria das já citadas vantagens intrínsecas ao BIM, facilitando assim a retroalimentação do projeto e viabilizando a produção e manutenção de edifícios mais eficientes em diversos quesitos.

A integração entre BIM e BPS tem recebido uma quantidade significativa de atenção desde o amadurecimento do BIM, com um crescimento vertiginoso no número de publicações nos últimos anos. Dado que a pesquisa acadêmica neste tema tem sido realizada há mais de uma década, argumenta-se que o momento é oportuno para a realização de um balanço com o objetivo de analisar o que foi produzido de modo a guiar os esforços futuros. O recente rápido crescimento da literatura neste tema, por sua vez, representa um grande desafio para a realização de uma revisão tão abrangente. Esforços anteriores de revisão da literatura sobre o assunto ^{4; 14; 15; 16; 17; 18; 19; 20} frequentemente empregavam métodos pouco claros ou assistemáticos e se baseavam em uma seleção bibliográfica não estruturada, com número limitado de artigos revisados, o que pode resultar em uma visão parcial ou propensa a interpretações errôneas da área de pesquisa. Assim, observa-se a falta de um mapeamento conceitual sólido da literatura neste tema, o que só pode ser alcançado por meio de uma classificação extensiva, quantitativa e sistemática da produção de pesquisa da área.

1.2. OBJETIVO, MÉTODO E RESULTADOS

Esta pesquisa tem como objetivo realizar uma ampla investigação da produção científica internacional referente à integração entre BIM e BPS – que configura a questão central deste estudo –, de modo a produzir um diagnóstico abrangente da pesquisa neste tema. O método “revisão sistemática” foi escolhido para esta pesquisa, no qual artigos publicados mundialmente no período de 1991 a 2015 foram analisados e classificados a fim de destacar padrões, tendências e lacunas de pesquisa. As principais questões de pesquisa já solucionadas e aquelas que ainda precisam ser abordadas foram aqui caracterizadas. Os resultados deste estudo são úteis para pesquisadores, profissionais da indústria e desenvolvedores de ferramentas computacionais envolvidos com a integração entre BIM e BPS, servindo como orientação para direcionar futuros esforços de pesquisa e desenvolvimento.

1.3. DELIMITAÇÃO DO TEMA

O escopo desta pesquisa inclui a simulação de desempenho do edifício *apenas* nas disciplinas de conforto ambiental e eficiência energética, limitado à utilização de ferramentas *computacionais* de simulação. Foram desconsiderados os estudos de integração entre BPS e ferramentas computacionais de suporte ao projeto do edifício que não fossem *estritamente* BIM, como modeladores 3D (e.g. Sketchup, AutoCAD 3D, Rhinoceros) e ferramentas de *design* generativo (e.g. Grasshopper).

1.4. ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está organizado em cinco capítulos. A Introdução (capítulo 1) contém uma breve contextualização e introduz a questão da pesquisa, seguida da justificativa para a mesma e de um resumo de seus objetivos, métodos e resultados. Apresenta-se também a delimitação do tema da pesquisa e a estrutura em que o trabalho está organizado.

No capítulo 2 a questão central da pesquisa é examinada em detalhe, com a definição de conceitos e visões adotados neste estudo. É apresentado o contexto de cada um dos dois

assuntos abrangidos pela questão central da pesquisa (BIM e BPS), com ênfase no tema da interface entre os mesmos, i.e. a integração ou interoperabilidade entre eles. Primeiramente é feito um panorama sobre BIM, compreendendo sua origem, histórico, definições e relevância na indústria da construção. Os assuntos colaboração, integração e interoperabilidade relativos a BIM também serão tratados em tópicos específicos. A seguir, o tema BPS é contextualizado, apresentando seus principais conceitos, finalidades e complexidade, além das particularidades de seu emprego em diferentes fases do ciclo de vida da construção. Por fim, a questão da interface entre BIM e BPS é amplamente analisada, descrevendo-se o cenário atual desta prática, com suas peculiaridades, benefícios e dificuldades de implementação. São destacados os crescentes esforços no sentido de integrar tais ferramentas com o propósito de beneficiar-se das qualidades de cada uma, além de reduzirem-se retrabalhos e a ocorrência de erros no processo de projeto envolvendo diferentes profissionais.

O capítulo 3 trata da metodologia da pesquisa, descrevendo o método aplicado e a estrutura desenvolvida para classificação dos artigos selecionados e para a análise dos resultados. No capítulo 4, os resultados da pesquisa são apresentados e discutidos. No capítulo 5 são feitas as conclusões e considerações finais da pesquisa, apontando seus possíveis desdobramentos e indicando temas para pesquisas futuras. Por fim, o Apêndice A apresenta o protocolo definido para a revisão sistemática, seguido pelo Apêndice B no qual constam resultados complementares, além do Anexo A que descreve em detalhe os “Níveis de Maturidade BIM”.

2. A SIMULAÇÃO DE DESEMPENHO DO EDIFÍCIO (BPS)

INSERIDA NO PROCESSO DE PROJETO EM BIM:

CONTEXTO E INTERFACE

Neste capítulo, a questão central da pesquisa é examinada em detalhe, definindo-se os conceitos e visões adotados neste estudo. As duas primeiras seções apresentam o contexto de cada um dos dois assuntos abrangidos pela questão central (BIM e BPS), seguidas pela análise da questão da interface entre os mesmos.

2.1. BPS (*BUILDING PERFORMANCE SIMULATION*)

Building Performance Simulation (BPS - Simulação de Desempenho do Edifício) é o termo mais utilizado na literatura internacional especializada para se referir à prática de simulação computacional para análise de desempenho ambiental do edifício. O uso eficiente de ferramentas BPS pode reduzir o impacto ambiental do edifício, favorecer o conforto e a produtividade de seus usuários, além de facilitar futuras inovações e progressos tecnológicos na construção ²¹. Estas ferramentas oferecem ao arquiteto uma melhor compreensão das consequências de suas decisões de projeto, informando-o sobre as possibilidades de melhoria do desempenho do edifício projetado e promovendo, assim, o desenvolvimento de soluções tecnicamente adequadas que aumentarão a eficiência ambiental da construção. A prática de simulação também é tida como responsável por acelerar o processo de concepção do projeto ao permitir a análise destas diferentes soluções ²².

A equação de questões técnicas relacionadas ao conforto ambiental e ao consumo energético é especialmente complexa na análise de desempenho do edifício dada a quantidade de variáveis relacionadas ao problema, tais como análise do clima local, estudos de insolação e ventilação, conhecimento sobre os mecanismos de transmissão de calor, capacidade de avaliar corretamente o desempenho térmico dos materiais e dos sistemas construtivos, para citar algumas ²³. Outra barreira é relativa à modelagem do edifício no *software* BPS. Atualmente, a maioria das ferramentas BPS disponíveis são desenvolvidas

como aplicações autônomas (*standalone*) verticais e a maioria delas realiza simulações de uma natureza ou disciplina específica, como análise térmica, lumínica ou de ventilação. Assim, para uma análise completa, a abordagem predominante requer que cada proposta de projeto seja modelada separadamente e repetidamente em cada um desses aplicativos, pois na maioria dos casos não existe interoperabilidade – para comunicação do modelo – entre os mesmos e, também, porque os modelos de simulação frequentemente devem ser construídos de modos específicos de acordo com requisitos de cada *software* ou disciplina de simulação, tais como simplificações na geometria original do projeto devido a limitações do *software* ou do processamento computacional, definição de zonas térmicas e entrada de dados sobre propriedades térmicas dos materiais. Mesmo em ferramentas BPS multidisciplinares muitas vezes é necessário modelar o edifício projetado de maneiras diversas em conformidade com necessidades específicas das diferentes disciplinas de simulação. Além disso, existem ferramentas que não dispõem de modeladores e, portanto, a entrada dos dados do modelo do edifício torna-se muito complexa e dispendiosa^{24; 25; 26; 27}.

Portanto, a prática de BPS corrente é caracterizada pela criação de diferentes modelos separados de um único projeto de edifício para cada tipo de avaliação ambiental. Este processo implica a extração e reentrada manuais de dados oriundos da documentação do projeto para dentro das ferramentas de simulação, um procedimento demorado e altamente propenso a erros. Consequentemente, os recursos demandados para o emprego de práticas BPS sofisticadas no processo de projeto têm sido historicamente proibitivos²⁴. Além disso, considerando que nos últimos 60 anos literalmente centenas de ferramentas BPS foram desenvolvidas e estão atualmente em uso²⁸ e que ainda não existem definições padronizadas de requisitos e especificações para tais ferramentas em muitos níveis²⁹, incluindo modelagem, a magnitude e a complexidade de se integrar BPS na prática de projeto tornam-se evidente, especialmente quando se leva em consideração que não apenas um projeto de edifício deve ser analisado durante todo o processo de projeto, mas várias propostas de projeto, a fim de obter a melhor solução de eficiência ambiental para o edifício projetado. Neste contexto, o surgimento do BIM – com todos os seus benefícios relativos ao gerenciamento da informação do projeto, incluindo o modelo geométrico do edifício, conforme já citado – tem sido visto como uma solução em potencial para as questões de

modelagem para BPS, reduzindo retrabalhos e ocorrência de erros, o que consequentemente alavancaria a prática de BPS na indústria.

2.2. BIM (BUILDING INFORMATION MODELING)

Building Information Modeling (BIM - Modelagem da Informação da Construção) é o termo estabelecido para se referir ao conjunto de ferramentas, processos e políticas para se produzir, comunicar e analisar modelos de construção – i.e. representações digitais das características físicas e funcionais de uma instalação que associam geometria 3D a um banco de dados com toda a informação do projeto ^{7; 12; 30}. Desde os anos 1970 ⁵ seus conceitos, ferramentas e processos têm sido extensivamente discutidos na literatura, congressos acadêmicos, seminários da indústria, dentre muitos outros meios relacionados. Segundo Howell e Batcheller ⁶, a “utopia” BIM foi concebida como um único modelo de informação do edifício a ser usado por toda a indústria da construção (Figura 1). Neste sistema, todos os objetos inteligentes construídos se combinam para formar o projeto do edifício, coexistindo em uma única “base de dados do projeto” ou “edifício virtual” que contém toda a informação sobre o edifício. A tecnologia BIM, em teoria, fornece uma simples, lógica e consistente fonte para toda a informação associada ao edifício.

Figura 1: Fluxograma que ilustra proposta de BIM ser um modelo único de informação do edifício a ser usado ao longo de todo ciclo de vida da construção. Fonte: ³¹.

Enquanto o principal objetivo dos CADs geométricos é a simples produção de desenhos, i.e. a representação gráfica 2D dos projetos de edifício, o princípio da abordagem BIM por sua vez é muito mais amplo, auxiliando também no processo de criação e gerenciamento de informações da construção, o que acaba por reduzir as perdas de informação e o retrabalho, permitindo a continuidade no processo de projeto desde as fases de concepção até as de construção e manutenção do edifício.

BIM tem sido nos últimos anos sinônimo de inovação técnica e processual, sendo considerado como a mais recente revolução tecnológica da indústria AECO – esta ainda mais ampla e profunda que a última provocada pelo advento do CAD, pois constitui uma mudança de paradigma e não somente tecnológica, tendo assim modificado estruturalmente o setor da construção. Ao longo das duas últimas décadas em que BIM se difundiu como o novo paradigma da indústria, verificou-se que sua completa adoção não ocorre de forma imediata; ao invés disso, requer-se uma apropriação gradual da tecnologia e transformação dos processos correlacionados, os quais ocorrem em estágios progressivos de desenvolvimento até atingir sua plenitude. Succar ¹² sistematizou esta progressão, configurando o que ele chama de “estágios de maturidade” da implementação BIM*. O ponto inicial da escala de estágios de maturidade é definido como a fase anterior à implementação BIM (“pré-BIM”), seguida por três estágios de maturidade BIM (“modelagem baseada em objetos”, “colaboração baseada em modelos” e “integração baseada em redes”) e um ponto final variável (“pós-BIM”) que visa abranger avanços tecnológicos futuros ainda não previstos, conforme apresentado na Figura 2. Neste conceito, diversos fatores influenciam na ampla adoção do BIM na indústria AECO, tais como a quantidade de disciplinas e fases do ciclo de vida da construção que estão envolvidas, além do nível de mudanças que ocorrem em termos de tecnologias, processos e políticas adotadas.

* Implementação BIM é aqui entendida como a adoção de ferramentas e processos BIM dentro de uma organização ³².

Figura 2: Estágios de Maturidade BIM. Fonte: ¹².

2.2.1. COLABORAÇÃO E INTEGRAÇÃO BIM

Como a própria nomenclatura dos estágios de maturidade BIM denota, o fator chave que distingue cada um dos estágios é o nível de desenvolvimento da integração dos modelos, que acaba por definir o grau de colaboração entre os diversos profissionais envolvidos em um projeto. Assim, constata-se que para a consolidação do BIM na indústria é necessário não somente o desenvolvimento das ferramentas de modelagem paramétrica, mas também de soluções tecnológicas, processuais e de políticas que viabilizem a *integração* entre as mesmas ¹².

No entanto, pesquisas evidenciaram como muitas equipes de projeto tem tido dificuldade em trabalhar com esta nova tecnologia, com poucos escritórios atualmente conseguindo obter o máximo do potencial do BIM ^{33; 34; 35}. Neste cenário, os profissionais especialistas (e.g. projetistas de componentes como fachadas, painéis solares, etc.; especialistas em conforto ambiental e análise energética) são considerados os mais excluídos das práticas inovadoras. Algumas das razões para isso são as dificuldades técnicas de adoção do BIM e um desajuste entre a atuação humana e as capacidades das tecnologias BIM, resultando em grande parte dos profissionais do setor não terem os recursos necessários para participar ativamente deste novo processo. Assim, a prática de BIM hoje é frequentemente “confusa” e caracterizada por um elevado grau de retrabalhos desnecessários, adaptações e imprevistos ³⁶. Todas estas observações atestam o fato de que a prática de BIM permanece um desafio no que se refere às práticas integradas e colaborativas dentro do processo de projeto.

Comparada com outras indústrias que dependem de engenharia para desenvolvimento de seus produtos, como a aeronáutica e a automobilística, a indústria da construção sempre demorou em tirar partido do potencial das Tecnologias da Informação (TI) em termos de ganho em qualidade e produtividade, ficando defasada na adoção de sistemas integrados para o projeto e fabricação de seus produtos, bem como de tecnologias que promovem a colaboração entre seus profissionais ^{37; 38}. Esta relativa letargia se deve às muitas características particulares da indústria AECO – e.g. grande variabilidade das características de seus produtos, cada um deles constituindo um produto único; profunda fragmentação do setor; baixa eficiência de seus serviços; falta de investimento em inovações tecnológicas e metodológicas; entre outras –, que levam a dificuldades de comunicação, coordenação e padronização que acabam por dificultar a efetiva colaboração entre seus diferentes agentes.

Como visto, as questões relacionadas ao desenvolvimento tecnológico das ferramentas BIM, além de processos e de políticas visando viabilizar a colaboração entre diferentes profissionais, são vitais para superar ou minimizar as limitações supramencionadas da indústria da construção. Por esta razão, nos últimos anos a questão da integração e da interoperabilidade tem centralizado as discussões em torno do BIM, tendo surgido diversas iniciativas por parte de pesquisadores acadêmicos, organismos de normalização e consórcios industriais, conforme será abordado a seguir.

2.2.2. INTEROPERABILIDADE

A interoperabilidade pode ser definida como a “capacidade de um sistema ou de um produto de trabalhar com outros sistemas ou produtos sem esforços especiais por parte do cliente” ³⁹ (tradução nossa). Segundo esta mesma fonte, a interoperabilidade só é possibilitada por meio do estabelecimento de normas. Um exemplo disso é o IFC, um protocolo ou modelo de dados neutro (não-proprietário) destinado a descrever e compartilhar as informações da construção.

Segundo Succar ¹², os fluxos de dados BIM podem ser classificados em “*data exchanges*” (que pode ser traduzido como “troca de dados”) ou “*data interchanges*” (podendo ser traduzido como “intercâmbio de dados”), conforme segue:

- **“BIM data exchanges”** - é quando um agente exporta ou importa dados que não são nem estruturados ou computáveis, e.g. a exportação de desenhos 2D para aplicações CAD a partir de modelos paramétricos, resultando em uma perda significativa de informações geométricas e semânticas;
- **“BIM data interchanges”** - é quando um agente exporta ou importa dados que são estruturados e computáveis (“compreendidos”) por outra aplicação. Estes intercâmbios de dados requerem uma interoperabilidade adequada entre o sistema remetente e aquele receptor dos dados. O intercâmbio de dados seria, portanto, uma troca interoperável (sem perda) de dados BIM, podendo ocorrer de diversas maneiras, como a troca de formatos de arquivos proprietários (ex.: RVT e DGN), proprietários-abertos (ex.: DWF e XML) ou não-proprietários (ex.: IFC e CIS/2).

O IFC, portanto, se enquadra no segundo grupo. A iniciativa que culminou no desenvolvimento do IFC veio de uma das maiores fabricantes de *software* para a indústria AECO, a Autodesk, que iniciou em 1994 a formação de um consórcio – inicialmente chamado *“Industry Alliance for Interoperability”* – com empresas interessadas em desenvolver um conjunto de códigos de programação visando apoiar o desenvolvimento de aplicativos integrados. Esta aliança foi posteriormente reconstituída como uma organização sem fins lucrativos liderada pela indústria com o objetivo de publicar o IFC, tendo seu nome sido alterado em 2007 para *“buildingSMART”*, atual responsável pelo desenvolvimento e manutenção do IFC ⁴⁰.

Apesar de ser o mais maduro e difundido modelo de dados para a interoperabilidade na indústria AECO, o que se observa na prática ainda hoje é que o uso do IFC não atende completamente todas as necessidades da mesma ⁴¹. Não há suporte adequado, por exemplo, para as informações específicas relacionadas às análises de desempenho energético (conforme será retomado mais adiante) ou também para coordenação de projeto no IFC, em especial referente à documentação relacionada a resolução de interferências ⁴². Apesar de melhorias nesse sentido serem incorporadas a cada nova versão do IFC, restam ainda muitas lacunas, o que é compreensível dada a amplitude e diversidade própria da indústria AECO.

2.3. INTERFACE ENTRE BIM E BPS

A seguir são apresentados os principais assuntos relativos à interface entre BIM e BPS, levantados na revisão bibliográfica, caracterizando a complexidade e extensão da questão central da pesquisa.

2.3.1. INTEGRAÇÃO DA SIMULAÇÃO NO PROCESSO DE PROJETO

Como visto nas seções “2.2.1. Colaboração e integração BIM” e “2.2.2. Interoperabilidade”, o compartilhamento de dados no âmbito do BIM ainda não está completamente resolvido, uma vez que nem sempre é possível realizar-se uma fácil e bem-sucedida troca de informações entre sistemas BIM de diferentes fabricantes, o mesmo valendo para a interoperabilidade entre BIM e outras ferramentas de suporte ao projeto, como as de simulação computacional de desempenho do edifício. Atualmente, mesmo quando as fabricantes do *software* garantem a interoperabilidade entre duas ferramentas, em geral, problemas de compatibilidade costumam ocorrer, normalmente devido a interpretações díspares dos dados do modelo, levando à perda de informação em cada conversão de arquivo realizada entre programas diferentes. Já em outros casos pode ser necessário o uso de uma terceira aplicação para realizar o trabalho de “traduzir” os formatos de arquivo de uma ferramenta para outra – como acontece, por exemplo, com o Ecotect (*software* BPS), que permite importar os modelos do Revit (*software* BIM) e em seguida exportá-los para diversas outras ferramentas BPS ⁴³.

Por outro lado, observou-se nos últimos anos um esforço por parte das fabricantes de soluções BIM no sentido de oferecer a seus usuários diferentes ferramentas de análise de desempenho do edifício, tendo como grande enfoque a análise de desempenho energético. Isto se dá tanto pela aquisição de ferramentas de outras fabricantes – com a consequente viabilização da interoperabilidade entre suas soluções BIM e os programas comprados – quanto pelo desenvolvimento de aplicações de análise de desempenho que são incorporadas diretamente a seus produtos BIM. Temos como exemplo o caso do ArchiCAD, ferramenta BIM da fabricante GRAPHISOFT, que tem uma aplicação integrada para análise energética denominada EcoDesigner; já a Autodesk (fabricante do *software* BIM Revit) possui em seu portfólio diferentes ferramentas para análise de desempenho do edifício,

como o *software* de simulação de desempenho ambiental multidisciplinar Ecotect, o serviço em nuvem para análise energética chamado Green Building Studio (ambos, Ecotect e GBStudio, adquiridos pela Autodesk em 2008), além de módulos adicionais para simulação de iluminação, térmica e de fluxos de fluidos (CFD) – sendo todos estes programas anunciados pela fabricante como sendo interoperáveis com sua ferramenta BIM (Revit).

Nesse cenário, nota-se a tendência das fabricantes de soluções BIM de cada vez menos dar foco à resolução da interoperabilidade de seus produtos com ferramentas de análise de desempenho de outras fabricantes, uma vez que estão cada vez mais procurando integrar este tipo de ferramenta a seu próprio portfólio de produtos. Por esse motivo, temos visto nos últimos anos uma profusão no meio acadêmico de iniciativas mais ou menos isoladas com o objetivo de viabilizar a integração e interoperabilidade entre ferramentas BIM e de análise de desempenho do edifício.

2.3.2. DESIGNER-FRIENDLY VERSUS DESIGN-INTEGRATED

Atualmente, a maioria das ferramentas BPS não fornece o tipo de assistência desejada pelo arquiteto – retornos (*feedbacks*) rápidos e suporte que transmitam confiança para a tomada de decisões de projeto –, uma vez que tais ferramentas normalmente são concebidas *por* engenheiros *para* engenheiros ou especialistas da área. Dessa forma, as ferramentas de análise de desempenho do edifício em sua maioria são desenhadas para atender profissionais com profundo conhecimento nas áreas técnicas em questão, além de visar à *verificação* do desempenho do projeto de edifício, no lugar de permitir a *investigação* de diferentes soluções de projeto ⁴⁴. Este foco na verificação é o fator que explica a maior utilização destas ferramentas altamente especializadas nas fases *finais* do processo de projeto – em geral, para conformidade com normas ou requisitos de desempenho –, quando quase não há mais espaço para mudanças significativas no projeto. Do mesmo modo, este tipo de ferramenta se mostra demasiado complexo para ser empregado nas fases *iniciais* , na concepção do edifício, estágio em que tais análises têm mais potencial de impactar o desempenho final do edifício.

Assim, um tema controverso no campo de BPS é a concorrência entre ferramentas com interfaces amigáveis para projetistas ("*designer-friendly*") – aplicações desenvolvidas para

uso pelos próprios projetistas, em geral com interface mais simplificada e menor controle das variáveis de simulação – e a prática de simulação integrada (“*design-integrated*”) – referente à integração da prática de BPS (realizada por especialistas da área) ao processo de projeto. Augenbroe ¹⁴ argumenta que, com o desenvolvimento da internet e a melhoria contínua na área da computação, não existe mais motivo para continuar com a promoção das ferramentas “*designer-friendly*”, uma vez que:

“a acessibilidade onipresente e instantânea de parceiros de projeto e suas ferramentas avançadas cria o estímulo para envolver quantos especialistas forem desejados em uma decisão de projeto. Espera-se destes especialistas o uso das melhores ferramentas do mercado e a infusão de sua experiência insubstituível na comunicação dos resultados das análises com outros membros da equipe de projeto” ¹⁴ (tradução nossa).

Em contrapartida, observaram-se na última década inúmeras iniciativas que promovem ambos os tipos de ferramenta “*designer-friendly*” e “*design-integrated*” objetivando envolver mais o arquiteto no processo de análise de desempenho do edifício projetado. Isto é especialmente notável nas pesquisas para integração de modeladores paramétricos (BIM) – utilizados pelos arquitetos para desenvolvimento do projeto – com ferramentas de análise de desempenho do edifício, o que tem sido nos últimos anos um dos principais focos dos desenvolvedores de *software* BIM, bem como da comunidade BPS ⁴⁵.

2.3.3. MODELO GEOMÉTRICO VERSUS MODELO ANALÍTICO

Apesar de a divisão de funções entre arquitetos e engenheiros estar ficando cada vez menos nítida no contexto do BIM, algumas diferenças ainda afetam o modo como modelos são criados e operados por arquitetos e engenheiros – mais um sintoma da profunda fragmentação do setor da construção. Por esse motivo, o procedimento padrão tem sido a utilização de modelos separados, porém correlacionados: modelos geométricos, produzidos por arquitetos para representar o edifício projetado, e modelos analíticos, utilizados por engenheiros e especialistas para os cálculos de análise de desempenho.

Os modelos usados por arquitetos possuem maior refinamento em relação à geometria, pois devem representar da maneira mais fiel possível todos os detalhes do edifício projetado de modo a permitir que o mesmo seja construído da maneira que foi pensado pelo arquiteto. Já os modelos usados pelos engenheiros quase sempre são versões simplificadas do modelo do

arquiteto, com o objetivo de reduzir a complexidade e o tempo de cálculo (além de limitações do modelo de cálculo empregado), sem perdas significativas no resultado da análise.

Figura 3: Diferença entre modelos geométricos (esq.) e analíticos (dir.). Fonte: ⁴⁴

Neste arranjo, toda a comunicação é feita de modo não estruturado (no domínio das interações humanas), sendo a interação entre modelos/aplicações realizada de modo manual, inviabilizando retornos (*feedbacks*) diretos e rápidos que acompanhem as necessidades dos projetos hoje. Isso também acaba por gerar retrabalhos e a possibilidade de ocorrência de uma série de erros e desentendimentos por divergências entre os modelos. Dessa forma, para viabilizar-se a integração entre estes dois tipos de modelos, seria necessário um sistema integrado para atender a um amplo espectro de requisitos e objetivos, de modo a ajustar-se a todos os colaboradores envolvidos ⁴⁴.

2.3.4. IFC VERSUS GBXML

Além do IFC (vide seção 2.2.2), outro modelo de dados para a interoperabilidade que vem ganhando destaque na indústria AECO é o gbXML, um modelo aberto de dados criado especificamente para o intercâmbio de dados entre as ferramentas CAD/BIM e BPS. Este modelo foi desenvolvido pela empresa Green Building Studio (antiga GeoPraxis), com sua primeira versão publicada no ano de 2000 e tendo posteriormente (em 2009) sido constituída como uma organização pública sem fins lucrativos da Califórnia, EUA. Diversas ferramentas BIM e BPS permitem hoje o intercâmbio de seus modelos via gbXML.

No presente, o IFC e o gbXML são os dois modelos de dados para a interoperabilidade mais disseminados no setor AECO. Dong *et al.* ⁴⁶ apresentam um exame detalhado destes dois modelos, comparando-os em termos de suas representações de dados, estruturas de dados

e aplicações. Os autores afirmam que tais modelos possuem abordagens diametralmente opostas, similar às diferenças discutidas anteriormente sobre os modelos geométricos e analíticos. O IFC, analogamente aos modelos geométricos, adota uma abordagem abrangente e genérica com o objetivo de representar um projeto de edifício completo, permitindo representações de todo tipo de formas geométricas. Já o gbXML, analogamente aos modelos analíticos, aceita apenas formas retangulares, constituindo modelos simplificados do edifício, o que é suficiente para as análises energéticas.

Além disso, o IFC usa uma abordagem “*top-down*” (de cima a baixo) e relacional que resulta num esquema de representação de dados relativamente complexo e que produz arquivos de grande tamanho. Estas características fazem do IFC um modelo de dados muito complexo de ser programado e implementado em *software*. O gbXML, por sua vez, adota uma abordagem “*bottom-up*” (de baixo a cima), a qual se caracteriza por ser flexível, de fonte aberta (*open source*) e relativamente simples. O gbXML, comparado ao IFC, possui menos camadas de complexidade, facilitando sua programação e implementação.

Assim, com um esquema de dados abrangente, o IFC apresenta benefícios em potencial devido a sua representação dos dados altamente organizada e relacional. Em contraste, o gbXML é mais simples e fácil de compreender, o que permite uma rápida implementação para diferentes propósitos de projeto. Esta relativa simplicidade é uma das principais razões para explicar o fato de o gbXML ter ganhado cada vez mais espaço como meio de integração entre BIM e BPS ⁴⁶.

2.3.5. DADOS VERSUS PROCESSOS

Outro viés da questão da integração entre as ferramentas de suporte ao processo de projeto e aquelas para simulação de desempenho do edifício é o foco dado à integração. Boddy et al. ³⁷ organizou as pesquisas do campo denominado CIC – *Computer Integrated Construction* (Computação Integrada na Construção), que compreende a integração entre as diferentes ferramentas computacionais de suporte às atividades da indústria da construção – em uma estrutura conceitual (*framework*) representada bidimensionalmente por dois eixos que evidenciam os enfoques das pesquisas em relação à integração (Figura 4), sejam eles:

- Foco em relação à semântica (*Semantic focus*): este eixo representa as aplicações com semântica subjacente que variam de soluções que utilizam estruturas de dados transmitidas por meio de modelos de dados até soluções de representações ricas em semântica por meio de ontologias;
- Foco no campo das aplicações (*Application domain focus*): este eixo representa os esforços de pesquisa que variam de soluções centradas em aplicações (*software*) a soluções centradas em processos e pessoas.

Figura 4: Panorama do campo de pesquisa em CIC - Computer Integrated Construction (Computação Integrada na Construção, tradução nossa). Fonte: ³⁷.

Alguns exemplos dos produtos das pesquisas examinadas estão representados em cada quadrante formado por esses dois eixos (Figura 4), com sua posição relativa aos eixos determinada conforme os enfoques dados à pesquisa de acordo com os critérios

apresentados acima. Abaixo são detalhados, para cada quadrante, alguns destes produtos e contribuições das pesquisas:

- I. Integração no nível de dados e de aplicações (quadrante superior esquerdo) - trata-se do principal foco das pesquisas examinadas dos últimos vinte anos; alguns dos esforços deste tipo são o desenvolvimento de formatos de arquivo padrão para o intercâmbio de dados entre diferentes aplicações – como o DXF (*Drawing/Data Exchange Format*) para as aplicações CAD e o IFC para as aplicações BIM – e também o desenvolvimento das próprias ferramentas BIM no que se refere à integração entre modelo geométrico e banco de dados.
- II. Integração no nível de semântica e de aplicações (quadrante superior direito) - uma variedade de iniciativas teve como objetivo desenvolver recursos semânticos no setor da construção tais como dicionários, ontologias e taxonomias especializadas; algumas das iniciativas mais notáveis são a norma britânica BS6100 ³⁷, um glossário de termos da construção, e o OmniClass, um sistema de classificação da construção desenvolvido para suprir as necessidades de gerenciamento da informação da indústria.
- III. Integração no nível de dados e de processos (quadrante inferior esquerdo) - BIM em sua esfera metodológica está enquadrado nesta área, no que se refere à integração entre os modelos BIM e processos como o planejamento da obra (4D).
- IV. Integração no nível de semântica e de processos (quadrante inferior direito) - este quadrante representa a integração de processos por meio de serviços compostos mediados e descritos semanticamente, sendo o mais negligenciado pelas pesquisas.

Diversas razões são apresentadas para fundamentar a afirmação de que as soluções existentes de integração – em sua maioria baseadas em esforços relacionados ao aprimoramento de ferramentas BIM e de normatização, como o IFC – não serão suficientes para alcançar, no longo prazo, o objetivo de integração ¹⁴:

- a) Por focarem-se no intercâmbio de dados, as soluções existentes não são capazes de lidar devidamente com problemas de controle do intercâmbio de dados relacionados à lógica dos processos;
- b) Os esforços relacionados a BIM têm se concentrado no desenvolvimento de um modelo de dados único, uniforme e neutro (IFC), o que levanta alguns problemas específicos como a dificuldade em mapear todas as informações necessárias para um modelo completo do edifício que abranja todas as diferentes disciplinas normalmente envolvidas, cada uma com suas especificidades; a excessiva complexidade e magnitude destes modelos únicos (dada a vasta quantidade de informações encerradas); a dificuldade de programar as aplicações BIM para lidar com estes modelos, devido à esta complexidade; a possibilidade de implicações relacionadas à ordem de execução dos passos do processo de projeto, impondo uma ordem rígida para uso das ferramentas;
- c) A presunção, no desenvolvimento destes modelos de dados e normas, de que todas as informações da construção podem ser bem estruturadas e armazenadas em “idealizações estruturadas” da realidade, enquanto no mundo real grande parte das informações sempre continuará vivendo em mídias desestruturadas, como documentos textuais, memorandos informais, notas pessoais, etc.

Estes autores, portanto, afirmam que as pesquisas na área da integração entre as diferentes ferramentas computacionais de suporte às atividades da indústria da construção têm tido, nos últimos vinte anos, um forte foco na integração de dados e de aplicações em detrimento da integração de processos, evidenciando a necessidade de voltar a concentrar-se nas soluções de integração dos processos de modo a viabilizar completamente a integração dentro do setor da construção.

3. METODOLOGIA

A abordagem metodológica escolhida para este estudo consiste em uma meta-análise da literatura acadêmica, usualmente conhecida como “revisão sistemática”. Embora a revisão bibliográfica (ou revisão da literatura) seja um processo fundamental na metodologia científica, no qual o conhecimento existente em determinada área é examinado de modo a evitar esforços duplicados ou a repetição de erros anteriores, revisões bibliográficas tradicionais – mesmo quando realizadas conforme as “boas práticas” – carecem de rigor científico, normalmente resultando em visões parciais ou polarizadas do campo de pesquisa. Nesse sentido, o desenvolvimento de uma abordagem sistemática para a revisão da produção de pesquisa pretende estabelecer um processo mais formal e controlado para a condução da investigação, não consistindo em um simples rearranjo de dados já conhecidos ou publicados. No campo das ciências da saúde, bem como em outros campos diversos como as ciências sociais e a ciência da computação, uma metodologia bem estabelecida para revisões abrangentes da literatura é a chamada revisão sistemática, uma metodologia científica que vai além da revisão bibliográfica tradicional, visando criar generalizações que permitem ao pesquisador analisar criticamente os dados coletados. A revisão sistemática, portanto, não é considerada uma fase do trabalho de pesquisa – papel cumprido pela revisão bibliográfica usual –, constituindo propriamente um procedimento metodológico, compreendendo diferentes objetivos de pesquisa bem como aspectos metodológicos, requisitos e procedimentos específicos ⁴⁷.

A natureza longitudinal da revisão sistemática lhe confere uma habilidade única para evidenciar a descoberta de princípios gerais, em um nível mais elevado de abstração conceitual; diagnosticar e analisar as relativas inconsistências externas pela comparação de estudos individuais com resultados contrastantes entre si; iluminar novos aspectos e questões no campo de pesquisa; abordar questões sobre o estudo científico em si, como tendências de questões, conceitos, métodos ou resultados ao longo do tempo, bem como questões sobre os contextos do campo de pesquisa em uma esfera mais ampla ⁴⁷. Estas contribuições fornecem aos pesquisadores informações abrangentes e precisas para a condução de pesquisas futuras, dado que a produção científica foi mapeada

conceitualmente ⁴⁸. Este método é executado, como o próprio termo denota, de maneira formal e sistemática, o que significa que a condução de seu processo segue uma sequência rigorosa com passos metodológicos muito bem definidos de acordo com um protocolo estabelecido de antemão, com uma documentação detalhada de todo o processo ⁴⁷. Em suma, a revisão sistemática é um “método sistemático, explícito, abrangente e replicável para a identificação, avaliação e sintetização do corpo existente de trabalhos concluídos e registrados produzidos por pesquisadores, acadêmicos e profissionais” ⁴⁹.

3.1. MÉTODO DA PESQUISA

O método aplicado neste estudo compreendeu três estágios: planejamento, execução e análise dos resultados, conforme apresentado na Figura 5. Embora tais estágios possam parecer sequenciais, a realização deste processo envolveu iteração entre os mesmos, o que significa que problemas identificados em uma etapa poderiam requerer ajustes de uma etapa anterior, com a consequente necessidade de re-execução da seguinte. Enquanto cada um destes estágios era desenvolvido, os procedimentos realizados e resultados intermediários foram cuidadosamente armazenados de modo a produzir um relatório detalhado de tudo o que foi concretizado.

Figura 5: As três etapas do processo de revisão sistemática. Fonte: Adaptado de ⁴⁷.

Na etapa de planejamento, um protocolo foi desenvolvido com base nos objetivos da pesquisa e nas descobertas da revisão bibliográfica preliminar, com a definição de critérios para a coleta e seleção de dados, bem como as métricas para mensuração e análise dos resultados (vide APÊNDICE A - Protocolo definido para a revisão sistemática). O estágio seguinte consistiu na execução do protocolo definido, com seleção, avaliação e extração de informações dos dados primários*, na qual os estudos selecionados foram lidos por

* Na metodologia revisão sistemática, os dados primários consistem dos artigos selecionados no corpo de pesquisas publicadas.

completo e classificados em múltiplas categorias de interesse. Tais categorias de classificação foram definidas previamente na fase de planejamento com base na revisão bibliográfica preliminar, porém foram posteriormente revisadas de acordo com novas informações levantadas na fase de execução. Na terceira e última etapa, os resultados dos estágios anteriores foram sintetizados na forma de gráficos e analisados.

Os dados primários da pesquisa são compostos tanto por artigos de revistas científicas (*journals*) quanto por estudos publicados em anais de conferências e foram coletados em dois bancos de dados acadêmicos por meio de buscas com palavras-chave. Os bancos de dados escolhidos foram o *Web of Science*, de autoria da Thomsom Reuters⁵⁰, e o banco de artigos publicados nos anais dos congressos da *International Building Performance Simulation Association (IBPSA)*^{* 52}. A base de dados *Web of Science* foi escolhida com base em sua ampla cobertura e relevância no campo acadêmico, oferecendo acesso a “mais de 12.000 das principais revistas científicas e acadêmicas do mundo, juntamente com anais de conferências, conteúdos de livros e outros materiais”⁵³. A IBPSA, por sua vez, organiza o principal evento internacional no campo de BPS: a “*IBPSA Building Simulation Conference*”, uma conferência bianual que acontece em anos ímpares, enquanto algumas das afiliadas regionais da IBPSA oferecem conferências locais nos anos pares. A IBPSA mantém um banco de dados online com milhares de artigos publicados desde a primeira edição de sua conferência internacional em 1985, incluindo os anais de dezenas das conferências locais realizadas em quase todos os continentes. Note-se que, apesar do fato de artigos de conferência serem, em geral, revisados com menos rigor quando comparados aos artigos de revistas científicas, ambas as fontes foram consideradas e tratadas indiferentemente no processo de extração de informação, pois o objetivo deste estudo não era avaliar ou comparar a solidez ou qualidade dos artigos, mas sim fazer um diagnóstico abrangente das tendências e interesses da comunidade de pesquisa.

Os artigos coletados foram verificados primeiramente pela leitura do resumo, seguida de sua leitura completa. Alguns dos artigos que foram coletados inicialmente por meio da busca por palavras-chave acabaram por ser descartados neste processo de verificação caso o resumo

* A Associação Internacional para Simulação de Desempenho de Edificações (IBSPA) é uma sociedade internacional sem fins lucrativos, com organizações regionais afiliadas ao redor do mundo, “fundada para fazer avançar e promover a ciência da simulação de desempenho do edifício”⁵¹

ou o artigo em si não se enquadrasse no escopo definido para a pesquisa. Este processo selecionou um total de 251 artigos para a análise de conteúdo – tendo 21 deles sido deixados de fora do processo de classificação por tratarem o tema BIM como um assunto secundário*, ao passo que seu conteúdo foi considerado relevante para a revisão e foram incluídos na discussão dos resultados. Cada artigo foi então submetido a uma revisão qualitativa na qual seu conteúdo foi analisado em detalhe, examinando-se o título, resumo, palavras-chave, objetivos declarados, métodos e resultados alcançados. Esta operação permitiu a extração das principais questões e descobertas das pesquisas, dos tópicos de interesse predominantes, entre outras informações que forneceram as categorias nas quais os artigos foram posteriormente classificados e analisados.

3.2. ESTRUTURA PARA CLASSIFICAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Conforme explicado na seção anterior, a definição das categorias de classificação resultou tanto da revisão bibliográfica preliminar quanto da realização do processo de revisão sistemática em si. Estas categorias permitiram a análise do corpo de pesquisa em diversas perspectivas, conforme descrito na Tabela 1. A Figura 6 apresenta todas as categorias de classificação utilizadas na revisão sistemática.

Tabela 1 - Justificativa e objetivos de cada categoria de classificação da revisão sistemática.

CATEGORIAS	JUSTIFICATIVA E OBJETIVOS [†]
1 MÉTODO DA PESQUISA	Analisar o nível de implementação da integração entre BIM e BPS na produção acadêmica, e.g. artigos de desenvolvimento indicam esforços para viabilizá-la, enquanto estudos de caso representam sua prática.
2 CONTRIBUIÇÃO DA PESQUISA	Caracterizar a natureza e prevalência de cada tipo de contribuição da produção acadêmica.
3 APLICAÇÃO DA PESQUISA RELATIVA À INTEGRAÇÃO	Complementar a análise da categoria 1 por meio da verificação da aplicação da pesquisa em relação à integração, i.e. se a integração foi tratada como o objetivo (<u>fin</u>) do artigo ou como um <u>meio</u> para se alcançar outro(s) objetivo(s). Desta forma, o primeiro representaria os esforços de desenvolvimento e o segundo, a prática de integração.

* Foram considerados como artigos que trataram do tema BIM como um assunto secundário aqueles que não abrangiam BIM em seus objetivos e/ou métodos, porém apresentavam o termo na análise e discussão dos resultados (e, portanto, apareceram nos resultados por palavra-chave da revisão sistemática) – e.g. artigos de revisão da prática de BPS em geral, que inicialmente não pretendiam abordar o tema BIM, mas acabaram por citar o termo devido à sua aparição espontânea nos resultados dos questionários aplicados a profissionais.

[†] Para a definição das categorias e suas classes utilizou-se como referência os trabalhos de revisão sistemática de Standing *et al.* ⁴⁸, Yalcinkaya e Singh ⁵⁴, Wong e Zhou ⁵⁵ e Volk *et al.* ⁵⁶.

4 DISCIPLINA DE SIMULAÇÃO	Avaliar a integração entre BIM e BPS em relação às disciplinas de simulação abrangidas pelos artigos.
5 FASE DO PROJETO	Avaliar a integração entre BIM e BPS de acordo com as fases do ciclo de vida da construção compreendidas pelos estudos.
6 OUTRAS APLICAÇÕES	Identificar outras aplicações de pesquisa não abrangidas pelas outras categorias.
7 MÉTODO DE INTEROPERABILIDADE	Mensurar quais métodos para a interoperabilidade são mais disseminados/ aplicados na comunidade de pesquisa, tais como IFC, gbXML, outros formatos de intercâmbio de dados, conversores de formatos/dados e programas especializados para a integração direta entre aplicações de <i>software</i> .

CATEGORIAS AUXILIARES	JUSTIFICATIVA E OBJETIVOS
A FONTE DA PUBLICAÇÃO	Caracterizar o corpo de pesquisa analisado em relação à fonte (banco de dados) e ao tipo de publicação (artigo de conferência ou revista científica), listando as principais fontes para referência.
B ORIGEM DOS AUTORES	Idem ao anterior, porém relativo à origem geográfica das instituições às quais os autores das pesquisas estavam vinculados à época da publicação do estudo.
C NOMENCLATURA BIM	Complementar a análise dos resultados das outras categorias ao auxiliar na definição da periodização utilizada na apresentação dos resultados.

Figura 6: Categorias de classificação da revisão sistemática.

3.2.1. CATEGORIAS AUXILIARES

As categorias auxiliares serviram para dar suporte aos procedimentos metodológicos. Os resultados das categorias “Fonte da Publicação” e “Origem dos Autores” permitiram avaliar a procedência da produção científica levantada. A análise dos resultados da categoria “Nomenclatura BIM”, por sua vez, foi responsável por balizar a periodização utilizada na apresentação dos resultados.

O Gráfico 1 apresenta a contribuição de cada fonte de dados no total de artigos classificados – com 60% deles provenientes da base *Web of Science* e 40% dos anais da IBPSA –, além de evidenciar a proporção entre artigos de conferência (74%) e de revistas científicas (26%). A Tabela 2 lista as quantidades de artigos classificados por revista científica, enquanto a Tabela 3 lista as quantidades por conferência. Assim, constata-se que os artigos classificados foram, em sua grande maioria, publicados em conferências acadêmicas, com contribuição equivalente de cada uma das duas bases de dados selecionadas, enquanto o restante dos artigos fora publicado em revistas científicas e constavam exclusivamente do banco de dados *Web of Science*.

Gráfico 1: Porcentagens (do total) de artigos classificados de acordo com a fonte.

Tabela 2 - Quantidade de artigos classificados por Revista Científica.

REVISTA CIENTÍFICA	QTD. DE ARTIGOS
Automation in Construction	15
Energy and Buildings	10
Building and Environment	6
Building Simulation	3
Journal of Architectural and Planning Research	3
Advanced Engineering Informatics	2

Engineering with Computers	2
Journal of Computing in Civil Engineering	2
Journal of Green Building	2
Ain Shams Engineering Journal	1
Applied Energy	1
Architectural Design	1
Architectural Research	1
Architectural Science Review	1
Arquitetura Revista	1
Ashrae Journal	1
Building Research and Information	1
Construction and Building Materials	1
Environmental Science & Technology	1
IEEE Sensors Journal	1
International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration	1
International Journal of Architectural Computing	1
Journal of Asian Architecture and Building Engineering	1
Journal of Building Performance Simulation	1
Journal of Information Technology in Construction	1
Journal of Interior Design	1
Journal of Management in Engineering	1
Journal of Professional Issues in Engineering Education and Practice	1
Journal of the Architectural Institute of Korea Planning & Design	1
Research Journal of Chemistry and Environment	1
Solar Energy	1

TOTAL de 67 artigos* em 32 Revistas Científicas

Tabela 3 - Quantidade de artigos classificados por Conferência.

CONFERÊNCIA	QTD. DE ARTIGOS
International IBPSA Building Simulation Conference	82
European Conference on Product and Process Modelling	12
Local IBPSA Conferences (multiple locations)	10
Winter Simulation Conference (WSC)	6
International Conference on Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA)	5
International Conference on Education and Research in Computer Aided Architectural Design in Europe (eCAADe)	4
Computer-Aided Architectural Design Futures (CAAD Futures)	3
Annual Conference of the Association-for-Computer-Aided-Design-in-Architecture (ACADIA)	2
IEEE Conferences (conferences organized by the Institute of Electrical and Electronics Engineers)	2

* Alguns dos artigos apresentados em conferências foram posteriormente publicados integralmente por revistas científicas e estão, portanto, computados em duplicidade na Tabela 2.

International Conference on Green Building, Materials and Civil Engineering (GBMCE)	2
International Conference on Information Visualisation	2
International Conference on Low-Carbon Transportation and Logistics, and Green Buildings (LTLGB)	2
International Conference on Sustainability and Energy in Buildings (SEB)	2

TOTAL de 170 artigos em mais de 50 Conferências (incluídas as não listadas nesta tabela) *

Quanto à distribuição geográfica, o Gráfico 2 apresenta as porcentagens de artigos de acordo com o continente de origem dos autores[†]. Observa-se que os países da Europa ocidental foram os que mais contribuíram com pesquisas no tema da integração entre BIM e BPS, totalizando 114 artigos – com grande expressão do Reino Unido, Irlanda e Alemanha (cada um com 18 artigos), com destaque também da França, Holanda, Bélgica e Itália (com 6 a 9 artigos cada um). A seguir, temos a América do Norte (82 artigos) – representada principalmente pelos Estados Unidos da América (76 artigos) – e o continente asiático (52 artigos) – em especial a Coreia do Sul (19 artigos), China (15 artigos) e Singapura (6 artigos). Com pouquíssima expressão estão a Oceania – representada exclusivamente pela Austrália (12 artigos) –, Europa Oriental (8 artigos), América do Sul (4 artigos) – representada apenas pelo Brasil (2 artigos) e Chile (2 artigos) – e África (3 artigos) – representada unicamente pelo Egito.

Gráfico 2: Percentagens de artigos (por período e no total) de acordo com a Origem dos Autores.

* Na Tabela 3 são listadas apenas as conferências com mais de um artigo classificado, devido ao grande número de conferências listadas no total.

[†] Considerou-se como “origem dos autores” a localização (país) das instituições às quais os autores encontravam-se vinculados à época da publicação, conforme indicado no artigo, com apenas uma contabilização por país por artigo, i.e. artigos com mais de um autor de um mesmo país foram contabilizados apenas uma vez para tal país. O Gráfico 2 apresenta a soma da contabilização por país para cada continente.

Analisando-se as porcentagens por períodos, observa-se uma gradual diversificação da distribuição geográfica dos estudos, inicialmente dominada por pesquisas realizadas na Europa Ocidental e América do Norte, tendo pesquisadores asiáticos ganhado espaço na pesquisa deste tema nos últimos anos. Além disso, os artigos de origem sul-americana, africana, do leste europeu e da Oceania somam números muito reduzidos de artigos em todos os períodos quando comparados aos números das outras regiões geográficas.

A fim de simplificar a apresentação dos resultados de cada categoria e permitir uma análise mais clara da evolução da pesquisa ao longo do tempo, examinou-se inicialmente a distribuição das quantidades de artigos selecionados por ano de publicação* (Gráfico 3). Este gráfico mostra que o número de artigos selecionados não ultrapassava a marca de 15 até o ano de 2011, quando este valor mais que dobrou, com os anos seguintes continuando a apresentar altas quantidades de estudos publicados no tema da integração entre BIM e BPS.

Gráfico 3: Quantidade de artigos revisados por ano.

Após este exame, optou-se por segmentar o intervalo total de 25 anos[†] em um pequeno número de períodos, resultando em uma distribuição de quantidades mais suave, no lugar do padrão irregular verificado na distribuição ano a ano. Os critérios para esta periodização foram:

* Nesta pesquisa, o “ano de publicação” foi considerado como sendo o ano no qual o artigo foi disponibilizado para a comunidade de pesquisa. Para artigos de conferências, foi considerado o ano em que a conferência foi realizada. Para artigos de revistas científicas, no entanto, algumas vezes os artigos apresentam diferentes datas de publicação: uma para a “disponibilização online” e outra para a publicação do volume. O ano referente à disponibilização online – que normalmente precede a publicação do volume – é o que consta no Gráfico 3.

[†] A definição do início deste intervalo de 25 anos foi resultante do processo de seleção no qual o artigo mais antigo dentre os selecionados datava de 1991, enquanto seu fim refere-se ao ano anterior à quando o processo de coleta foi realizado (2016).

- a) agrupar os anos em números pares, pois a conferência internacional organizada pela IBPSA é bianual, o que resulta em maiores quantidades de artigos publicados a cada dois anos;
- b) levar em consideração a evolução do estabelecimento da nomenclatura “BIM”^{*}.

Com base na análise da distribuição das quantidades de artigos por ano (Gráfico 3) e da evolução das porcentagens referentes à nomenclatura BIM (Gráfico 4), a divisão do intervalo em grupos de quatro anos mostrou-se a mais adequada para os critérios definidos. Assim, a periodização resultante da análise destes dois fatores reflete aproximadamente a evolução do estabelecimento do termo “BIM” em quatro períodos:

- I. [1991-2003] Período Pré-BIM – embora o termo “BIM” tenha sido cunhado em 1992, este só iria se popularizar dez anos depois⁵. Assim, poucos estudos selecionados deste período empregavam esse termo (Gráfico 5); em vez disso, utilizavam as denominações “*Building Product Model*”, “*Product Information Model*” ou “*Product Data Model*”, além da referência ao IFC (*Industry Foundation Classes*);
- II. [2004-2007] Período de disseminação BIM – o termo “BIM” ganhou popularidade neste período e se propagou pela indústria ao redor do mundo, com quase metade dos artigos selecionados deste período empregando o mesmo (Gráfico 5);
- III. [2008-2011] Período de estabelecimento BIM – após a indústria reconhecer o BIM como a nova mudança de paradigma tecnológico, o termo se estabeleceu e as outras denominações existentes caíram em desuso. Assim, todos os artigos selecionados deste período empregavam o termo. Além disso, vemos o número de artigos publicados neste período dar um salto em relação ao anterior (Gráfico 6);
- IV. [2012-2015] Período BIM recente – caracterizado por uma profusão de artigos sobre a integração entre BIM e BPS, notando-se um salto ainda maior que o observado no período anterior no que se refere ao número de artigos publicados (Gráfico 6).

^{*} A nomenclatura “BIM” nem sempre foi a única utilizada por pesquisadores e pela indústria; em seu “período de gestação”, o conceito era frequentemente referido como “*Building Product Model*” ou “*Product Information Model*”, que mais tarde evoluiu para a forma estabelecida “*Building Information Modeling*”⁵.

Gráfico 4: Porcentagens de artigos por ano de acordo com a nomenclatura BIM.

Gráfico 5: Porcentagens de artigos por período de acordo com a nomenclatura BIM.

Gráfico 6: Quantidade de artigos classificados por período.

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Esta seção apresenta os resultados do processo de classificação dos artigos selecionados no âmbito da revisão sistemática. Os dados foram analisados por meio de gráficos, os quais apresentam os resultados tanto em valores totais quanto por períodos de tempo (conforme definição apresentada na seção anterior) de modo a permitir a análise da evolução dos resultados ao longo dos anos de forma clara e objetiva. Os gráficos produzidos são de diferentes tipos, de acordo com o modo de classificação de cada categoria (exclusiva ou não) e o tipo de apresentação dos resultados (valores totais ou por período):

- Gráfico de Pizza - apresenta valores percentuais em relação à quantidade total de artigos; utilizado nas categorias em que cada artigo pôde ser classificado em *apenas uma* de suas classes;
- Gráfico de Área 100% empilhada - apresenta valores percentuais em relação à quantidade total de artigos em cada período; utilizado nas categorias em que cada artigo pôde ser classificado em *apenas uma* de suas classes;
- Gráfico de Barras - apresenta valores absolutos ou percentuais em relação à quantidade total de artigos em cada período e/ou no intervalo total; utilizado nas categorias em que cada artigo pôde ser classificado em *mais de uma* classe.

A seguir são apresentados e analisados os resultados de cada uma das categorias de classificação da revisão sistemática.

4.1. CATEGORIA 1: MÉTODO DA PESQUISA

Nesta categoria, os artigos foram classificados com base na abordagem metodológica adotada. Conforme mostrado no Gráfico 7 (dir.), a maioria dos artigos foi classificada como de desenvolvimento (*Developmental*) – os quais incluíam o desenvolvimento de estruturas conceituais (*frameworks*), protocolos, técnicas, métodos e sistemas computacionais – seguida por apresentações de diversos estudos de caso (*Case study*), artigos teóricos (*Theoretical*) – incluindo análises conceituais e baseadas em observação; descrições teóricas;

revisões do estado da arte e da literatura; pesquisas baseadas em questionários (*surveys*) da indústria e da prática corrente – e, por último, pesquisas experimentais (*Experimental*) de diferentes naturezas. A evolução ao longo do tempo das porcentagens de cada uma destas classes pode ser observada no gráfico da esquerda, no qual nota-se que a porcentagem de artigos teóricos diminuiu significativamente nos últimos quatro anos para menos de 10%, após sua parcela ter ficado relativamente estável pelos vinte anos anteriores. Apesar de se manter em todos os períodos analisados como a abordagem metodológica majoritária, a porcentagem de artigos de desenvolvimento estava constantemente caindo até 2011, porém sofreu uma guinada nos últimos quatro anos. Inversamente, as porcentagens de artigos sobre estudos de caso e experimentos aumentaram acentuadamente até 2011, porém tiveram um ligeiro decréscimo nos últimos quatro anos devido ao aumento vertiginoso no número de artigos de desenvolvimento neste período – analisando os valores absolutos ao invés das porcentagens, vemos que o número de artigos sobre estudos de caso e experimentos passou de um total de 3 e 5 artigos nos primeiros dois períodos para 18 e 33 nos últimos dois, enquanto o número de artigos de desenvolvimento passou de 20 e 13 para 26 e 85.

Gráfico 7: Classificação dos artigos de acordo com o Método da Pesquisa – porcentagens por período (esq.) e no total (dir.).

Estes números indicam uma grande quantidade de esforços de desenvolvimento para viabilizar a integração entre BIM e BPS ao longo de todo o intervalo de 25 anos, com taxas iniciais excepcionalmente altas de artigos de desenvolvimento, que constantemente diminuíram nos períodos seguintes devido a um aumento acentuado no número de artigos sobre a prática efetiva de integração – representados pelos de estudos de caso e

experimentos. Este crescimento nos relatos de prática de integração pode ser visto como resultante dos esforços de desenvolvimento ao longo do tempo, refletindo na aplicação das soluções desenvolvidas para a integração entre BIM e BPS. Consistentemente, com o aumento da prática de integração, artigos teóricos tornaram-se menos frequentes nos últimos anos. Finalmente, o aumento da parcela de artigos de desenvolvimento nos últimos quatro anos – em oposição à sua tendência decrescente nos anos anteriores – pode estar associado ao surgimento de novas aplicações para a integração entre BIM e BPS, tais como *laser scanning* e técnicas relacionadas para o *retrofit* de edifícios, ou, ainda, para a integração de BIM e BPS com BMS (*Building Management Systems* ou Sistemas de Gerenciamento Predial) para a melhoria da eficiência dos sistemas prediais (conforme será apresentado na seção “4.6. Categoria 6: Outras Aplicações”), o que demandou esforços renovados de desenvolvimento.

4.2. CATEGORIA 2: CONTRIBUIÇÃO DA PESQUISA

A partir da classificação dos artigos de acordo com a abordagem metodológica da pesquisa, pôde-se identificar os seguintes tipos de “Contribuição da Pesquisa”^{*}, conforme apresentado no Gráfico 8:

- I. Abordagem metodológica teórica - análises conceituais (*Conceptual*), revisões da literatura e da prática (*Review*) e pesquisas baseadas em questionários (*Survey*);
- II. Abordagem metodológica de desenvolvimento - desenvolvimento de estruturas conceituais (*Framework Dev.*), de metodologias (*Methodology Dev.*) e de sistemas computacionais (*Comp. Syst. Dev.*);
- III. Abordagem metodológica de estudo de caso - aplicação de *frameworks* (*Framework C.S.*) e de sistemas computacionais (*Comp. Syst. C.S.*), desenvolvimentos reais de projetos (*Project C.S.*) e aplicações educacionais (*Educ. C.S.*);
- IV. Abordagem metodológica experimental - realização de experimentos (*Experiment*).

^{*} Contribuição da pesquisa é aqui entendida como o conjunto dos diferentes produtos da aplicação do método de pesquisa – esta relação entre método e contribuição está evidenciada pelo código de cores utilizado nos gráficos.

Gráfico 8: Classificação dos artigos de acordo com a Contribuição da Pesquisa – percentagens do total.

O Gráfico 8 apresenta as percentagens* para cada tipo de contribuição identificado no corpo de pesquisa. A contribuição mais frequente foi o desenvolvimento de sistemas computacionais para a integração entre BIM e BPS, tais como sistemas para conectar pares específicos de aplicações BIM e BPS, conversores de formatos de dados (e.g. IFC para gbXML), módulos de extensão (*plug-ins*) para a importação e/ou exportação de modelos BIM/BPS, entre outros – a natureza destes desenvolvimentos computacionais será examinada em maior detalhe na análise dos resultados da “Categoria 7: Método de Interoperabilidade”. Praticamente empatados em segundo lugar estão os desenvolvimentos de *frameworks* (estruturas conceituais) e de métodos de integração, estando o primeiro estreitamente relacionado com o desenvolvimento de sistemas computacionais, frequentemente precedendo o mesmo, enquanto o último responde pela elaboração de procedimentos para a integração entre duas ou mais ferramentas BIM e BPS existentes.

No grupo de pesquisas de abordagem teórica, artigos de revisão foram os mais frequentes, incluindo revisões do estado da arte, da prática corrente e da literatura sobre diversos tópicos relacionados com a integração entre BIM e BPS. Além disso, muitos pesquisadores se propuseram a verificar a integração entre BIM e BPS na prática dos profissionais por meio da

* Enquanto na categoria “Método da Pesquisa” apenas uma opção poderia ser selecionada e, portanto, apenas a abordagem metodológica principal foi listada no processo de classificação, a categoria “Contribuição da Pesquisa” permitia mais de uma opção de classificação para cada artigo, uma vez que alguns deles tinham dois ou mais métodos e/ou contribuições, e.g. um artigo que realizou uma *survey* da indústria (abordagem metodológica teórica) a partir da qual um *framework* foi desenvolvido (abordagem metodológica de desenvolvimento) – neste caso, o método de desenvolvimento foi entendido como sendo o principal, pois a abordagem teórica fora aplicada como um meio para realizar tal desenvolvimento.

condução de “*surveys*” (pesquisas baseadas em questionários) da indústria^{58; 59; 60; 61; 62; 63}, enquanto diversas *surveys* sobre a prática de BPS (não focadas em BIM) relataram que vários dos profissionais entrevistados citaram a abordagem BIM como solução complementar às dificuldades encontradas na prática^{29; 64; 65; 66; 67}. Poucos estudos se limitaram a apresentar conceitualmente a integração entre BIM e BPS.

A contribuição de estudo de caso mais prevalente foi a apresentação de casos reais de desenvolvimento de projeto do edifício que empregaram a integração entre BIM e BPS. Outros tipos de estudo de caso incluíam a descrição de implementação de *frameworks* e de sistemas computacionais, além de relatos de experiências em cursos acadêmicos envolvendo a integração entre BIM e BPS. Finalmente, algumas pesquisas realizaram experimentos de diferentes naturezas utilizando-se da integração entre ferramentas BIM e BPS.

4.3. CATEGORIA 3: APLICAÇÃO DA PESQUISA RELATIVA À INTEGRAÇÃO

Verificou-se nesta categoria a aplicação da pesquisa em relação à integração entre BIM e BPS, tendo os resultados mostrado que a maioria do total de artigos classificados abordava a integração como seu objetivo primário, enquanto o restante dos artigos utilizava a integração entre BIM e BPS como um meio para atingir outro(s) objetivo(s) que não a integração por si só, conforme apresentado no Gráfico 9 (dir.). A tendência observada no Gráfico 9 (esq.) evidencia um aumento acentuado e contínuo da parcela de artigos de “Integração como Meio” ao longo dos anos, em detrimento da parcela de artigos de “Integração como Fim”.

A classe “Integração como Fim” refere-se a pesquisas em que a integração é um fim em si mesma, o que pode indicar que, para tais estudos, a integração entre BIM e BPS ainda era uma questão não completamente solucionada, que precisava ser abordada ou melhor desenvolvida. Pode-se entender também que uma alta taxa de artigos de “Integração como Fim” representa um cenário de pouca ou difícil prática de integração, com grande parte dos esforços de pesquisa focados nesta questão. Por outro lado, os artigos classificados como “Integração como Meio” não estão completamente focados na integração entre BIM e BPS, mas utilizam-na como o meio para se alcançar outro(s) objetivo(s), o que pode ser entendido

como representativo da prática efetiva de integração, com a aplicação de soluções de integração para atingir diversos objetivos que não a integração em si. Com estas premissas, os resultados desta categoria confirmam as observações feitas na análise dos resultados da “Categoria 1: Método da Pesquisa” de que o período analisado foi caracterizado por uma grande quantidade de esforços de desenvolvimento de modo a viabilizar a integração entre BIM e BPS, com uma tendência de aumento acentuado e contínuo da prática de integração ao longo do tempo.

Gráfico 9: Classificação dos artigos de acordo com a Aplicação da Pesquisa relativa à Integração – porcentagens por período (esq.) e no total (dir.).

4.4. CATEGORIA 4: DISCIPLINA DE SIMULAÇÃO

Esta categoria foi mensurada de três maneiras distintas*:

- De acordo com a disciplina de simulação *específica* (Gráfico 10);
- De acordo com a disciplina *geral* de simulação, que agrupou as específicas em três áreas – Conforto Ambiental, Análise Energética e *Green Building & Sustentabilidade* (Gráfico 11);
- De acordo com as disciplinas gerais de simulação considerando-se as associações entre elas, i.e. considerando a associação de duas ou mais disciplinas gerais, no caso de artigos que abordavam mais de uma disciplina de simulação de áreas diferentes (Gráfico 12).

* Considerando que nesta categoria cada artigo poderia ser classificado em mais de uma classe, uma vez que vários deles tratavam de duas ou mais disciplinas de simulação.

O Gráfico 10 apresenta as porcentagens de artigos de acordo com a disciplina de simulação específica abordada. Na classificação dos artigos nesta categoria foram diferenciados os estudos que abordaram o conforto ambiental visando analisar estritamente o desempenho do edifício em determinada disciplina – incluindo o Conforto Ambiental em sentido amplo (*Env.Comf.*) e as disciplinas Acústica (*Acoustics*), Ventilação (*Ventilation*), Iluminação (*Lighting*) e Térmica (*Thermal*), que figuram em tons de azul no gráfico – e aqueles que realizaram a análise de desempenho de tais disciplinas como parte da análise energética do edifício – Conforto Ambiental / Ventilação / Iluminação / Térmica para Análise Energética (*Comf. / Vent. / Ligh. / Therm. for Energy*), representados por tons de púrpura no gráfico. Além disso, diferenciaram-se os artigos em que a análise energética fora realizada como parte da análise de *Green Building* e Sustentabilidade (*Energy for GB&S*) daqueles que não tinham tal escopo (*Energy Analysis*).

Gráfico 10: Classificação dos artigos de acordo com a Disciplina de Simulação – porcentagens do total.

Conforme mostrado no gráfico acima, os estudos de análise energética foram os mais frequentes dentre os artigos selecionados, com quase dois terços deles cobrindo este tema. Em segundo lugar estão os estudos que abrangiam o conforto ambiental em sentido amplo, sem se ater a uma ou mais disciplinas específicas, ou que abrangiam três ou mais disciplinas específicas desta área, seguidos por estudos envolvendo *Green Building* e Sustentabilidade. A seguir estão as pesquisas que compreendiam especificamente cada uma das disciplinas de conforto ambiental, na seguinte ordem (considerando-se a soma de sua associação ou não à análise energética): térmica, iluminação, ventilação e acústica.

De modo a permitir maior clareza na análise de tendências dos resultados desta categoria, as disciplinas específicas de conforto ambiental (térmica, acústica, iluminação e ventilação) foram agrupadas, conforme explicado anteriormente, produzindo os dois conjuntos de gráficos abaixo. O Gráfico 11 apresenta as porcentagens de cada um destes grupos isoladamente, enquanto o Gráfico 12 permite a análise considerando-se as associações entre as disciplinas gerais.

Gráfico 11: Classificação dos artigos de acordo com a Disciplina Geral de Simulação – porcentagens por período e no total.

Gráfico 12: Classificação dos artigos de acordo com a Disciplina Geral de Simulação (associadas) – porcentagens por período (esq.) e no total (dir.).

Ambos os gráficos acima evidenciam que nos dois primeiros períodos analisados a predominância era de estudos abrangendo disciplinas de conforto ambiental (*Env.Comf.*), com mais de dois terços dos artigos cobrindo este tema, ao passo que nos últimos dois períodos esta fração caiu para menos da metade e houve uma grande ascensão do tema da eficiência energética (*Ener.A*), coberta por quase 90% dos artigos nos últimos oito anos. Os

assuntos *Green Building* e Sustentabilidade (*GB&Sust.*) tiveram maior expressão também nos dois últimos períodos.

O Gráfico 12 mostra que pesquisas focadas exclusivamente no tema da eficiência energética (sem relacioná-lo a disciplinas de conforto ambiental ou *Green Building* e Sustentabilidade) eram menos frequentes nos dois primeiros períodos, não passando de um quarto dos artigos, com a maior parte dos artigos nestes períodos iniciais abrangendo exclusivamente as disciplinas de conforto ambiental. Já nos últimos dois períodos estas proporções foram invertidas, tendo a parcela de artigos envolvendo disciplinas de conforto ambiental caído bruscamente, em especial aquelas não associadas à análise energética, enquanto os artigos focados exclusivamente no tema da eficiência energética passaram a compor mais da metade do total. Em suma, analisando as tendências dos gráficos apresentados vemos que inicialmente as disciplinas de conforto ambiental recebiam maior atenção por parte dos pesquisadores, enquanto a primazia do foco em análise energética ocorreu principalmente nos últimos anos, acompanhada da emergência dos temas de *Green Building* e Sustentabilidade.

4.5. CATEGORIA 5: FASE DO PROJETO^{*}

Conforme apresentado no Gráfico 13, a fase do ciclo de vida da construção mais abordada pelos artigos classificados foi a de projeto e construção (*Design&Constr.*), com ampla maioria dos artigos em todo o intervalo analisado. Em segundo lugar estão empatadas a fase inicial de concepção do projeto (*Early-Design*) e a fase de operação e manutenção do edifício (*Operation&Maint.*), sendo que em todos os períodos houve uma porção relevante de pesquisadores concentrando-se nesta fase inicial, enquanto o enfoque na fase da pós-construção surgiu apenas no segundo período, tendo um crescimento significativo e constante de sua parcela ao longo dos períodos subsequentes. A seguir estão os artigos que trataram de todas as fases do ciclo de vida da construção (*All Phases*) e aqueles que não especificaram enfoque a alguma fase (N/D), com uma maior concentração de ambos nos primeiros dois períodos do intervalo.

^{*} O termo “projeto” aqui é utilizado em seu significado mais abrangente, incluindo todos os produtos de todas as fases do ciclo de vida da construção.

Gráfico 13: Classificação dos artigos de acordo com a Fase do Projeto – percentagens por período (esq.) e no total (dir.).

Diversos autores estão de acordo que as primeiras etapas de projeto são as mais importantes no que diz respeito à possibilidade de economia de energia e melhoria na qualidade de conforto nos ambientes construídos, pois é nesta fase em que há a possibilidade de garantir a incorporação de elementos de uma arquitetura de baixo impacto ambiental ^{14; 44; 68; 69}. Assim, é importante oferecer aos profissionais de arquitetura uma ferramenta de apoio às decisões de projeto, aplicável já nas primeiras etapas de trabalho. Por esse motivo, vemos um grande número de trabalhos no corpo de pesquisa analisado dedicados à questão da integração entre BIM e BPS já nas fases de concepção do edifício ^{62; 68; 69; 70; 71; 72; 73; 74}, o que inclusive fez com que tal fase fosse discriminada nos resultados do processo de classificação dos artigos.

Em relação à fase de detalhamento do projeto, a ferramenta BPS surgiria para auxiliar consultores especializados, o que não acontece com grande frequência na prática projetual cotidiana ¹⁴, em especial nos projetos com limitações de custo ou tempo. Como explicado anteriormente, uma das grandes barreiras para isso são as questões de modelagem do edifício nas ferramentas BPS e, por esse motivo, vê-se nos resultados um grande número de esforços relativo à integração entre BIM e BPS na fase de desenvolvimento do projeto e construção do edifício.

Nos últimos anos, a prática de simulação está também se tornando cada vez mais relevante em outros estágios da construção, como durante as fases de comissionamento e operação do edifício ²¹, conforme comprovado pelos resultados apresentados no gráfico acima, no

qual observamos um número significativo de casos reportados em que a simulação foi ou está sendo utilizada após a construção do edifício^{75; 76; 77; 78; 79; 80; 81; 82; 83; 84}. Isso se deve em grande parte ao crescente reconhecimento do fato de a maioria dos edifícios existentes não operarem tão bem ou tão eficientemente como poderia e deveria⁸⁵. Nesse sentido, o comissionamento* é tido como um dos fatores chave para garantir o correto funcionamento do edifício e de todos os seus sistemas⁸⁶, tendo algumas pesquisas apontado para economias relevantes no uso de energia nos casos em que o processo de comissionamento foi aplicado⁸⁷. Note-se aqui que estas economias não foram fruto da opção pela instalação de equipamentos mais eficientes, mas sim da simples identificação e correção de problemas de funcionamento dos equipamentos, assim como o ajuste das configurações de controle dos sistemas de modo a otimizar a operação dos mesmos de acordo com o uso efetivo do edifício, melhorando inclusive as condições de conforto do mesmo.

O corpo de pesquisa aqui analisado evidencia também que a prática de BPS no chamado “pós-projeto” tem muitas aplicações, auxiliando o processo de comissionamento e de operação do edifício em tarefas como o diagnóstico da operação, configuração dos sistemas para sua otimização, lograr uma meta de economia de recursos ou ainda avaliar uma nova norma de controle. Muitas destas aplicações valem-se da chamada “simulação calibrada”, uma simulação na qual os dados de entrada são afinados de modo que os valores previstos pela simulação se aproximem dos valores medidos no edifício. As simulações calibradas são um recurso valioso para analisar o desempenho do edifício em operação e prever seu comportamento futuro, tendo várias pesquisas empregado tal recurso^{87; 88; 89; 90; 91; 92; 93}.

Por fim, a redução ao longo dos anos das parcelas de artigos abrangendo todas as fases e daqueles que não definiram um enfoque relativo a alguma delas está relacionada com a redução da quantidade de artigos teóricos (conforme apresentado nos resultados da “Categoria 1: Método da Pesquisa”) – que em sua maioria tratavam do assunto da integração entre BIM e BPS de forma abrangente e genérica – e com o período inicial de desenvolvimento de métodos de interoperabilidade neutros (conforme será apresentado na análise dos resultados da “Categoria 7: Método de Interoperabilidade”) – no qual diversos

* O termo “comissionamento”, usado originalmente na indústria naval, refere-se ao processo que torna um edifício ou alguns de seus sistemas completamente aptos para uso²¹, ocorrendo na entrega do edifício ao proprietário pela construtora, previamente à ocupação do mesmo.

artigos ressaltaram que tais métodos objetivavam abranger todas as fases do ciclo de vida da construção.

4.6. CATEGORIA 6: OUTRAS APLICAÇÕES

Em vista dos artigos que tinham objetivos não limitados à integração entre BIM e BPS, suas outras aplicações foram listadas e quantificadas como mostrado no Gráfico 14. Estudos relacionados à educação (*Education*) – tais como implementação de cursos acadêmicos e experiências pedagógicas^{94; 95; 96; 97; 98; 99; 100; 101}, bem como trabalhos que envolviam estudantes^{69; 102; 103; 104; 105} – foram uma constante a partir do período de “Disseminação BIM” (2004-2007), com 3 a 5 artigos sobre o tema em cada período.

Um assunto presente desde o início do intervalo analisado são as técnicas computacionais de otimização (*Optimization*), que tinha pouca representação nos três primeiros períodos, porém se popularizou muito nos últimos quatro anos a ponto de alcançar o segundo lugar na categoria. Este tema aparece em alguns artigos teóricos de revisão da literatura^{4; 44} e estudos de caso^{89; 106; 107}, mas principalmente em artigos de desenvolvimento^{25; 108; 109; 110; 111; 112; 113; 114} e está estreitamente relacionado com objetivos de eficiência energética.

Gráfico 14: Classificação dos artigos de acordo com Outras Aplicações – quantidades por período.

Os resultados desta categoria também ressaltaram algumas tendências relacionadas com o tema da eficiência energética e da aplicação da integração entre BIM e BPS na fase de ocupação do edifício. Artigos que abrangiam códigos e sistemas de classificação ambiental (*Cod.&Rating Sys.*) – como o LEED (*Leadership in Energy and Environmental Design*) e o BREEAM (*Building Research Establishment's Environmental Assessment Method*)¹¹⁵, para

citar os mais recorrentes – foram mais numerosos a partir de 2008, totalizando 20 estudos sobre o assunto em todo o intervalo. Vários destes artigos apresentavam estudos de caso^{116;}¹¹⁷ e experimentos^{118; 119; 120}, porém em sua maioria eram artigos de desenvolvimento^{121; 122;}^{123; 124; 125}. Os estudos que tratavam dos assuntos “edifícios energeticamente autônomos” (*Net-zero*)^{126; 127} e “fontes de energia renovável” (*Renewable energy*)^{128; 129; 130; 131; 132}, por sua vez, apareceram apenas nos últimos dois períodos, com maior expressão no último. Vários destes artigos abordavam estes dois temas concomitantemente^{117; 133; 134; 135} ou tratavam de um deles juntamente com outras aplicações aqui listadas^{89; 101; 106; 131; 134}.

Vemos no último período o surgimento de uma nova tendência de aplicação do “*As-is Modeling*” – ou modelagem do edifício “tal como está” (*as-is*), realizada por meio de tecnologias NDT - *Nondestructive Testing* (ensaios não destrutivos, tradução nossa), tais como *laser scanning*, ensaios ultrassônicos, termografia e fotomodelagem^{136; 137; 138} – como suporte às atividades de simulação de desempenho do edifício existente, bem como de trabalhos visando o “*Retrofit*” (normalmente traduzido como “renovação”) destes edifícios, seja para adequação de uso ou melhoria da eficiência de seus sistemas^{88; 139; 140; 141; 142}. Estando ambos os temas inseridos na fase de operação e manutenção do edifício, boa parte dos estudos relacionavam estes dois assuntos entre si^{79; 143; 144; 145} ou com outros temas ligados à eficiência energética^{89; 91; 134}. Esta tendência de estudos focados na fase do “pós-projeto”, por sua vez, iniciou-se a partir do segundo período analisado, conforme observado nos resultados da “Categoria 5: Fase do Projeto” e também nesta categoria pela distribuição das quantidades de artigos que tratavam da integração entre BIM e BPS com sistemas de controle e monitoramento dos equipamentos prediais, conhecidos pelas siglas BAS (*Building Automation Systems* ou Sistemas de Automação Predial) e BMS (*Building Management Systems* ou Sistemas de Gerenciamento Predial)^{80; 84; 146; 147; 148; 149; 150}. Diversos dos artigos de aplicação “BAS/BMS” utilizaram os dados coletados pelos sistemas de monitoramento de modo a comparar o desempenho real com o desempenho simulado^{76; 88; 90; 151; 152}. Por fim, observou-se que os três temas inseridos na fase de ocupação (*As-is Modeling*, *Retrofit* e BAS/BMS) são tratados nas pesquisas quase sempre com o objetivo de melhoria da eficiência energética dos sistemas prediais de edifícios existentes para redução de seu consumo energético^{85; 91; 153; 154; 155; 156; 157}.

4.7. CATEGORIA 7: MÉTODO DE INTEROPERABILIDADE

A revisão dos artigos selecionados permitiu a identificação de quatro métodos de interoperabilidade empregados ou citados pelas pesquisas como meio para se alcançar a integração entre BIM e BPS, conforme apresentado na tabela a seguir.

Tabela 4 - Métodos de interoperabilidade para realizar a integração entre BPS e BIM.

<p>1 Integração direta entre ferramentas BIM e BPS, podendo esta funcionalidade ser programada em uma das aplicações (BPS ou BIM) por parte da própria fabricante ou ser iniciativa de desenvolvedores independentes por meio da produção dos chamados “<i>plug-ins</i>” (módulos de extensão utilizados para adicionar funções a outros programas maiores, provendo alguma funcionalidade especial ou muito específica) para exportação/importação dos arquivos de uma ferramenta no formato nativo da outra;</p>
<p>2 Integração entre ferramentas BIM e BPS via aplicações para conversão de formatos de dados/arquivo, i.e. o desenvolvimento de aplicações específicas para, por exemplo, a conversão de um formato de arquivo proprietário de determinado <i>software</i> BIM para um formato de arquivo proprietário de determinada ferramenta BPS, ou para a conversão de um formato de arquivo proprietário de determinado <i>software</i> BIM para um formato de arquivo não-proprietário (como o IFC ou o gbXML) compatível com determinada ferramenta BPS, entre outras possibilidades;</p>
<p>3 Integração entre ferramentas BIM e BPS via “exchange format” (formato de arquivo para intercâmbio de dados entre aplicações diferentes), e.g. IFC e gbXML, em geral viabilizada pelos próprios fabricantes de <i>software</i>;</p>
<p>4 Incorporação de funcionalidades BPS a ferramentas BIM, podendo esta incorporação ser realizada por parte do próprio fabricante ou ser iniciativa de desenvolvedores independentes por meio da produção de “<i>plug-ins</i>” para a realização de simulação de desempenho ambiental.</p>

Analogamente ao realizado na “Categoria 4: Disciplina de Simulação”, os resultados desta categoria são apresentados em dois formatos: o primeiro com as porcentagens de cada classe isolada (Gráfico 15) e o segundo com as porcentagens de tais classes associadas (Gráfico 16) *.

* Considerando que nesta categoria cada artigo poderia ser classificado em mais de uma classe, uma vez que vários deles abordavam dois ou mais métodos de interoperabilidade.

Gráfico 15: Classificação dos artigos de acordo com o Método de Interoperabilidade – percentagens por período e no total.

Gráfico 16: Classificação dos artigos de acordo com o Método de Interoperabilidade (associadas) – percentagens por período (esq.) e no total (dir.).

Os gráficos acima evidenciam a evolução do desenvolvimento e aplicação dos diferentes métodos de interoperabilidade identificados – em especial o IFC e o gbXML, conforme foi explorado na seção “2.2.2. Interoperabilidade” – de acordo com cada um dos períodos analisados:

- I. 1º período (1991-2003) - Pré-BIM: antes de o termo BIM ser cunhado, algumas das primeiras pesquisas selecionadas ^{57; 158; 159; 160} utilizavam os termos “*Building Product Model*” ou “*Product Data Model*” para se referir aos conceitos que hoje denominamos

BIM. A criação do IFC em 1994 ⁴⁰, por sua vez, impulsionou o desenvolvimento de pesquisas para tornar ferramentas BPS existentes compatíveis com este modelo de dados neutro ^{114; 161; 162} e para o desenvolvimento de módulos independentes (*plug-ins*) com o mesmo objetivo ^{163; 164; 165}, além de artigos sobre o desenvolvimento de ferramentas BPS que desde sua criação já previam a compatibilidade com o modelo de dados ^{70; 166}. Alguns dos artigos deste período inicial também tinham a finalidade de apresentar as funcionalidades, benefícios e desenvolvimentos futuros previstos para o IFC ^{20; 167; 168; 169}, enquanto já surgiam pesquisas pioneiras que empregavam o IFC para alcançar objetivos que não a integração entre BIM e BPS em si ^{107; 170; 171} – enquadradas na classe “Integração como meio” da “Categoria 3: Aplicação da Pesquisa relativa à Integração”. Paralelamente, uma vez que o IFC estava ainda em seus estágios iniciais, vemos que vários pesquisadores recorreram a outros métodos de interoperabilidade, seja via integração direta entre ferramenta BIM e BPS (*App. Integration*) ^{70; 165; 172; 173} ou por meio de outros modelos de dados (*Data Exch. Format*) ^{174; 175} ou ambos ¹⁷⁶. Assim, mais da metade dos artigos deste período abrangiam o IFC, enquanto uma porcentagem considerável de pesquisadores recorreu a outros métodos como alternativa ao “jovem” IFC.

- II. 2º período (2004-2007) - Disseminação BIM: vemos neste período o aumento da popularidade do IFC associado à difusão internacional do termo BIM na indústria AECO, com mais de 90% dos artigos classificados abrangendo este método de interoperabilidade. Sendo um dos principais objetivos do modelo de dados neutro, a questão da *colaboração* entre os diversos profissionais e disciplinas envolvidos no projeto do edifício começou a aparecer como tema central em algumas pesquisas ^{96; 177; 178}. Com o estabelecimento das primeiras normas BIM ao redor do mundo, um estudo teórico procurou analisar o impacto deste tipo de norma e de padrões como o IFC no campo da simulação de desempenho energético do edifício ¹⁷⁹. Outros artigos teóricos também procuraram revisar os desenvolvimentos neste campo com relação a BIM e ao IFC ^{4; 180}, além de estudos de caso que buscaram explorar os benefícios da integração entre estes sistemas ^{24; 181}. No grupo de artigos de desenvolvimento, temos o primeiro estudo focado na fase de operação e manutenção do edifício ⁷⁵, além do desenvolvimento de métodos e sistemas computacionais para a integração entre BIM e BPS via IFC para estudos de

ventilação com ferramentas CFD ^{182; 183}, de análise energética ^{121; 184; 185} e acústica ¹⁰⁴, além de ferramentas BPS multidisciplinares ¹⁸⁶. Como consequência da grande disseminação do IFC neste período, houve uma considerável redução nas parcelas de pesquisas que empregavam outros métodos, ainda assim sempre associadas ou relacionadas ao IFC ^{187; 188}. Vemos também neste período a emergência do recém-criado modelo de dados gbXML em um estudo comparativo deste com o IFC ⁴⁶.

- III. 3º período (2008-2011) - Estabelecimento BIM: neste período o gbXML ganhou grande popularidade e se estabeleceu como o principal modelo de dados neutro utilizado pelos pesquisadores do campo de BPS, ultrapassando ligeiramente o IFC. Voltou também a crescer o emprego de outros métodos para a interoperabilidade, com o surgimento de mais um deles – conversores de formatos de arquivo/dados (*Data Converter*) desenvolvidos no contexto específico de algumas pesquisas ^{112; 113}. Conforme evidenciado nos gráficos que apresentam os resultados da “Categoria 7: Método de Interoperabilidade” combinados com os resultados das outras categorias (vide APÊNDICE C - Resultados complementares), observou-se também que a difusão do gbXML a partir deste período está relacionada com o aumento da prática de integração entre BIM e BPS, uma vez que os artigos que abrangiam este modelo de dados apresentavam maiores porcentagens nas abordagens metodológicas que representavam a prática – estudos de caso e experimentos, bem como aqueles classificados como “Integração como meio”. O IFC, por outro lado, aparece principalmente nas pesquisas teóricas e de desenvolvimento focadas na solução da integração em si (“Integração como fim”).
- IV. 4º período (2012-2015) - BIM recente: constata-se neste período a redução das parcelas de artigos abrangendo os dois modelos de dados neutros mais populares no campo de BPS (IFC e gbXML), com o consequente crescimento no número de artigos que empregaram outros métodos para atingir a interoperabilidade entre BIM e BPS. Deste fato pode-se apreender que os modelos de dados neutros, apesar de desenvolvidos com o objetivo de viabilizar a interoperabilidade, não foram completamente bem-sucedidos, pois diversas pesquisas tiveram de buscar meios complementares ou outras soluções além dos modelos neutros para alcançar seus objetivos de integração.

Ressalta-se ainda a existência de estudos que objetivaram complementar o modelo de dados IFC, pois o mesmo não possuía à época campos específicos para informações relativas à análise de desempenho ambiental e energético ¹⁸⁹, enquanto outros ainda foram além e criaram modelos de dados próprios de modo a suprir os requerimentos de BPS não contempladas pelos modelos de dados mais difundidos ^{174; 190; 191}. Por fim, outra questão relevante a se notar é o grande enfoque das pesquisas na questão da interoperabilidade – i.e. a integração de *dados* – em detrimento do desenvolvimento da integração de *processos*, conforme discutido na seção 2.3.5, com apenas alguns artigos focados neste segundo aspecto ^{58; 61; 113; 115; 158; 176; 192; 193}.

5. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta pesquisa teve como objetivo realizar uma ampla investigação da produção científica internacional relacionada à questão da integração entre BIM e BPS, produzindo um diagnóstico abrangente da pesquisa neste tema por meio da aplicação do método “revisão sistemática”. Os resultados da análise e classificação de 251 artigos selecionados, publicados mundialmente no período de 1991 a 2015, permitiram a identificação de padrões, tendências e lacunas de pesquisa, além da caracterização das principais questões de pesquisa já solucionadas e aquelas que ainda precisam ser abordadas, permitindo também corroborar muitas das informações levantadas na revisão preliminar da literatura.

Os resultados das categorias “Método da Pesquisa” e “Aplicação da Pesquisa relativa à Integração” permitiram verificar o expressivo aumento ao longo dos anos da prática de integração, mesmo que os esforços de desenvolvimento para viabilizar a integração entre BIM e BPS tenham sido predominantes em todo o intervalo analisado. Além disso, observou-se que nos últimos anos houve crescimento na parcela de artigos de desenvolvimento – em oposição à sua tendência decrescente nos anos anteriores – o que pode ser associado ao surgimento de novas aplicações para a integração entre BIM e BPS.

Em relação à “Categoria 5: Fase do Projeto”, observou-se nos estudos levantados uma atenção especial com a etapa de concepção do edifício, o que levou à inclusão de uma classe específica para esta etapa da fase de projeto. Esta preocupação, por sua vez, está relacionada com o dado auferido na revisão bibliográfica de que as primeiras etapas de projeto são as mais importantes no que diz respeito à possibilidade de economia de energia e melhoria na qualidade de conforto nos ambientes construídos, pois é nesta fase em que há a possibilidade de garantir a incorporação de elementos de uma arquitetura de baixo impacto ambiental. Apesar de a fase de desenvolvimento do projeto e construção do edifício ser a fase predominante por todo o intervalo analisado, foi verificado um crescimento constante e expressivo de pesquisas focadas na fase de ocupação / operação e manutenção do edifício, uma tendência já destacada na revisão bibliográfica – de que a prática de simulação está se tornando cada vez mais relevante em outros estágios da construção, em especial nas fases de comissionamento e operação do edifício.

Quanto aos resultados da “Categoria 4: Disciplina de Simulação”, observou-se o expressivo aumento da quantidade de estudos com foco em análise energética, que foram ampla maioria nos últimos anos. Por outro lado, notamos a gradual redução na parcela de artigos que tratavam de disciplinas visando o conforto ambiental. Todas estas tendências relativas à fase do projeto e disciplina de simulação, juntamente com os resultados da “Categoria 6: Outras Aplicações”, evidenciam um forte crescimento da preocupação com a eficiência energética dos edifícios, em especial em sua fase de operação.

Os resultados da “Categoria 7: Método de Interoperabilidade” expressaram a evolução de vários aspectos relativos a cada um dos campos de BPS e BIM, podendo-se compreender como o desenvolvimento de alguns aspectos de um campo influenciaram ou contribuíram no avanço do outro. A colaboração entre os diferentes profissionais envolvidos no projeto de edifício e a importância de desenvolvimentos no campo dos processos, e não somente de tecnologia, que viabilizem esta colaboração foram alguns dos temas destacados.

Em suma, o conjunto de resultados das categorias de classificação da revisão sistemática evidencia a magnitude e a complexidade inerentes à questão da integração da simulação de desempenho ambiental do edifício na prática de projeto realizada em suporte BIM, notadamente nos resultados dos últimos anos em que modelos de dados neutros como o IFC e o gbXML comprovaram-se insuficientes para se alcançar plenamente tal integração.

Algumas limitações deste estudo referem-se à escolha das fontes para seleção dos dados primários, tanto por ter-se restringido a duas das bases mais relevantes para o escopo da pesquisa, ficando assim excluídos os artigos que não constam nas mesmas, quanto por restrições na busca de trabalhos dentro destas bases, devido principalmente a questões tecnológicas, e.g. artigos produzidos de maneira analógica que foram digitalizados sem a utilização de tecnologia de reconhecimento de caracteres, impossibilitando assim a busca por palavra-chave no texto. Outra limitação que pode ser citada é relativa às nomenclaturas utilizadas como palavras-chave na busca dentro destas bases, tendo-se restringido aos termos mais empregados pela comunidade acadêmica para se referir aos principais temas do escopo da pesquisa.

Devido à constatação da pouca representatividade da América Latina nos resultados da revisão sistemática, conforme apresentado na categoria auxiliar “Origem dos Autores”,

planeja-se aplicar o processo desenvolvido para coleta, seleção e análise de artigos a outros bancos de dados de referência local, dentre eles o Infohab* e a SciELO[†], para a complementação do diagnóstico do campo da pesquisa referente ao cenário brasileiro. Outros desdobramentos da pesquisa que podem ser citados são o aprofundamento do diagnóstico por meio da análise combinada por pares de categorias de classificação com o objetivo de esmiuçar como os resultados de cada categoria se relaciona com os das outras categorias – similar ao que foi apresentado no “APÊNDICE C - Resultados complementares”. Outra possibilidade futura seria analisar as relativas inconsistências, divergências e lacunas entre estudos individuais de objetivos semelhantes por meio da comparação de seus resultados entre si, de modo a complementá-los e chegar a conclusões que as pesquisas não conseguiram alcançar isoladamente. Seria igualmente interessante comparar os padrões, tendências e lacunas de pesquisa identificados neste estudo com os resultados de *surveys* que investigam a prática da indústria AECO, relacionando-se assim a pesquisa acadêmica com a prática profissional. Além disso, o método de revisão sistemática desenvolvido neste estudo poderá ser aplicado em pesquisas futuras para a produção de diagnósticos abrangentes da pesquisa em outros campos, temas ou áreas de interesse particulares.

Por fim, considera-se que este trabalho atendeu os objetivos iniciais da pesquisa. A extensão do material coletado e processado nesta pesquisa mostrou amplo potencial de investigação futura, uma característica intrínseca ao método de revisão sistemática, que permite ajustes e iterações dentro do próprio processo de investigação. Desse modo, o presente trabalho pretendeu aprofundar questões que surgiram durante este processo, ampliando assim a contribuição da pesquisa e sua aplicação futura.

* O InfoHAB (Centro de Referência e Informação em Habitação) é um projeto liderado pela ANTAC (Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído) que começou como uma biblioteca digital voltada para a divulgação científica na área do ambiente construído, atualmente oferecendo também “produtos e serviços que servem de apoio a todas as etapas processo/ciclo de geração do conhecimento”¹⁹⁴, como divulgação de chamadas de trabalhos e de eventos.

[†] A SciELO (*Scientific Electronic Library Online*) é “uma biblioteca eletrônica que abrange uma coleção selecionada de periódicos científicos brasileiros”¹⁹⁵, fruto de projeto de pesquisa da FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) em parceria com a BIREME (Centro Latino-Americano e do Caribe de Informação em Ciências da Saúde) e com apoio do CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS*

- ¹ OXMAN, R. Theory and design in the first digital age. **Design Studies**, v. 27, n. 3, p. 229-265, May 2006. ISSN 0142-694X.
- ² MALKAWI, A. M.; AUGENBROE, G. **Advanced Building Simulation**. New York, NY, USA: Spon Press, 2004.
- ³ AUGENBORE, G. Trends in building simulation. In: (Ed.). **Advanced building simulation**. New York, NY, USA: Spon Press, 2004. cap. 1, p.4-24.
- ⁴ MALKAWI, A. M. Developments in environmental performance simulation. **Automation in Construction**, v. 13, n. 4, p. 437-445, Jul 2004. ISSN 0926-5805.
- ⁵ LAISERIN, J. Foreword. In: (Ed.). **BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors** 1st ed. Hoboken, New Jersey John Wiley & Sons, Inc., 2008.
- ⁶ HOWELL, I.; BATCHELER, B. Building Information Modelling Two Years Later – Huge Potential, Some Success and Several Limitations. **The LaiserinLetter**, USA, 2005.
- ⁷ EASTMAN, C. et al. **BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors**. 1st ed. Hoboken, New Jersey John Wiley & Sons, Inc., 2008.
- ⁸ BUILDING COST INFORMATION SERVICE (BCIS). **Building Information Modelling Survey**. UK. 2011
- ⁹ GRAY, M. et al. **Building Information Modelling: An International survey** World Building Congress 2013. Brisbane, Australia 2013.
- ¹⁰ MCGRAW-HILL CONSTRUCTION. **The Business Value of BIM (Series)**. McGraw-Hill Construction Research and Analytics. USA. 2014
- ¹¹ NBS. **National BIM Report 2016**. UK: RIBA Enterprises Ltd 2016.
- ¹² SUCCAR, B. Building information modelling framework: A research and delivery foundation for industry stakeholders. **Automation in Construction**, v. 18, n. 3, p. 357-375, May 2009. ISSN 0926-5805.
- ¹³ KOLAVERIC, B.; MALKAWI, A. **Performative architecture - Beyond instrumentality**. New York, NY, USA: Spon Press, 2005.
- ¹⁴ AUGENBROE, G. Trends in building simulation. **Building and Environment**, v. 37, n. 8-9, p. 891-902, Aug-Sep 2002. ISSN 0360-1323.

* De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT NBR 6023).

- ¹⁵ MITCHELL, J. **BIM & Building Simulation**. 12th International IBPSA Building Simulation Conference. Sydney, Australia: IBPSA 2011.
- ¹⁶ HITCHCOCK, R. J.; WONG, J. **Transforming IFC architectural view BIMs for energy simulation: 2011**. 12th International IBPSA Building Simulation Conference. Sydney, Australia: IBPSA 2011.
- ¹⁷ DE SOUZA, C. B. A critical and theoretical analysis of current proposals for integrating building thermal simulation tools into the building design process. **Journal of Building Performance Simulation**, v. 2, n. 4, p. 283-297, 2009. ISSN 1940-1493.
- ¹⁸ ILAL, M. E. The Building Performance Perspective for Interoperability Requirements for a Future Analysis Network. Ecaade 2009: Computation: the New Realm of Architectural Design: 89-94 p. 2009.
- ¹⁹ ISSA, R. R. A. et al. **Use of Building Information Models in Simulations**. Winter Simulation Conference 2009. Austin, TX: Ieee: 2534-2541 p. 2009.
- ²⁰ BAZJANAC, V. **Acquisition of building geometry in the simulation of energy performance**. 7th International IBPSA Building Simulation Conference. Rio de Janeiro, Brazil: IBPSA 2001.
- ²¹ HENSEN, J. L. M.; LAMBERTS, R. **Building Performance Simulation for Design and Operation**. New York, USA: Spon Press, 2011.
- ²² AUGENBROE, G.; HENSEN, J. Simulation for better building design. **Building and Environment**, v. 39, n. 8, p. 875-877, Aug 2004. ISSN 0360-1323.
- ²³ DELBIN, S. **Insertion of buildings simulation into architectural design teaching: methodology proposal**. 2006. (Mestrado em Engenharia Civil). Área de Concentração: Edificações – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), Campinas, Brasil.
- ²⁴ HITCHCOCK, R. J. Software interoperability in support of whole-building performance assurance. **Journal of Architectural and Planning Research**, v. 21, n. 4, p. 303-311, Win 2004. ISSN 0738-0895.
- ²⁵ ASL, M. R. et al. BPOpt: A framework for BIM-based performance optimization. **Energy and Buildings**, v. 108, p. 401-412, Dec 2015. ISSN 0378-7788.
- ²⁶ SANGUINETTI, P. et al. General system architecture for BIM: An integrated approach for design and analysis. **Advanced Engineering Informatics**, v. 26, n. 2, p. 317-333, Apr 2012. ISSN 1474-0346.
- ²⁷ AISH, R.; MARSH, A. **An Integrated Approach to Algorithmic Design and Environmental Analysis**. Symposium on Simulation for Architecture and Urban Design (SimAUD). Boston, MA, USA 2011.
- ²⁸ CRAWLEY, D. B. et al. Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs. **Building and Environment**, v. 43, n. 4, p. 661-673, Apr 2008. ISSN 0360-1323.
- ²⁹ ATTIA, S. et al. Selection criteria for building performance simulation tools: contrasting architects' and engineers' needs. **Journal of Building Performance Simulation**, v. 5, n. 3, p. 155-169, 2012. ISSN 1940-1493.

- 30 SCIENCES, N. I. O. B. **National BIM Standard - United States**. Washington, DC, USA 2016.
- 31 ECONOCOM. #BIM: Bringing a “sea change to the industry’s workflow”. 2015. Disponível em: < <http://blog.econocom.com/en/blog/bim-bringing-a-sea-change-to-the-industrys-workflow/> >. Acesso em: 03/02/2016.
- 32 SUCCAR, B.; KASSEM, M. Macro-BIM adoption: Conceptual structures. **Automation in Construction**, v. 57, p. 64-79, 2015.
- 33 DOSSICK, C. S.; NEFF, G. **Constructing Teams: Adapting Practices and Routines for Collaboration through BIM**. Engineering Project Organization Conference (EPOC). Colorado, USA 2013.
- 34 MERSCHBROCK, C.; MUNKVOLD, B. E. A Research Review on Building Information Modelling in Construction: An Area Ripe for IS Research. **Communications of the Association for Information Systems**, v. 31, p. 207-228, 2012.
- 35 MERSCHBROCK, C. Unorchestrated Symphony: The Case of Inter-Organizational Collaboration in Digital Construction Design. **Journal of Information Technology in Construction**, v. 17, p. 333-350, 2012.
- 36 MERSCHBROCK, C.; FIGUERES-MUNOZ, A. Circumventing obstacles in digital construction design: a workaround theory perspective. **Procedia Economics and Finance**, v. 21, p. 247-255, 2015.
- 37 BODDY, S. et al. Computer Integrated Construction: A review and proposals for future direction. **Advances in Engineering Software**, v. 38, p. 677-687, 2007.
- 38 REZGUI, Y.; ZARLI, A. Paving the Way to the Vision of Digital Construction: A Strategic Roadmap. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 132, n. 7, p. 767-776, 2006.
- 39 IEEE. Standards Glossary. 2010. Disponível em: < https://www.ieee.org/education_careers/education/standards/standards_glossary.html >. Acesso em: 21/11/2016.
- 40 AUTODESK. The End of Babel [video]. 1994. Disponível em: < https://www.youtube.com/watch?v=g_jmGQvr6dQ e <https://www.youtube.com/watch?v=vTyB96O7Xeg> >. Acesso em: 04/02/2016.
- 41 KIVINIEMI, A. et al. Review of the Development and Implementation of IFC Compatible BIM. **ERABUILD FUNDING ORGANIZATIONS**, 2008. Disponível em: < <http://www.ebst.dk/file/9498/ReviewoftheDevelopmentandImplementationofIFCcompatibleBIM.pdf> >. Acesso em: 04/02/2016.
- 42 WANG, L.; LEITE, F. Formalized knowledge representation for spatial conflict coordination of mechanical, electrical and plumbing (MEP) systems in new building projects. **Automation in Construction**, v. 64, p. 20-26, 2016.
- 43 PINHA, A. P. **A Redundância da Informação na Modelagem para Simulação Computacional**. São Paulo: Relatório (Pesquisa de Iniciação Científica) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo (FAUUSP): 144 p. 2010.

- 44 NEGENDAHL, K. Building performance simulation in the early design stage: An introduction to integrated dynamic models. **Automation in Construction**, v. 54, p. 39-53, Jun 2015. ISSN 0926-5805.
- 45 KOTA, S. et al. Building Information Modeling (BIM)-based daylighting simulation and analysis. **Energy and Buildings**, v. 81, p. 391-403, Oct 2014. ISSN 0378-7788.
- 46 DONG, B. et al. A comparative study of the IFC and gbXML informational infrastructures for data exchange in computational design support environments. 10th International IBPSA Building Simulation Conference. Beijing, China: 1530-1537 p. 2007.
- 47 BIOLCHINI, J. et al. **Systematic Review in Software Engineering**. UFRJ (Universidade Federal do Rio de Janeiro), COPPE/PESC. Rio de Janeiro. 2005
- 48 STANDING, S.; STANDING, C.; LOVE, P. E. D. A review of research on e-marketplaces 1997-2008. **Decision Support Systems**, v. 49, n. 1, p. 41-51, Apr 2010. ISSN 0167-9236.
- 49 OKOLI, C.; SCHABRAM, K. A Guide to Conducting a Systematic Literature Review of Information Systems Research **Working Papers on Information Systems**, v. 10, n. 26, p. 1-49, 2010.
- 50 REUTERS, T. Web of Science. 2016. Disponível em: < <https://webofknowledge.com/> >. Acesso em: 28/10/2016.
- 51 IBPSA. International Building Performance Simulation Association website - About. 2016. Disponível em: < http://www.ibpsa.org/?page_id=20 >. Acesso em: 10/12/2016.
- 52 _____. International Building Performance Simulation Association publications database. 2016. Disponível em: < http://www.ibpsa.org/?page_id=51 >. Acesso em: 10/12/2016.
- 53 KING, C. Web of Science: 1 billion cited references and counting. 2015. Disponível em: < <http://stateofinnovation.thomsonreuters.com/web-of-science-1-billion-cited-references-and-counting> >. Acesso em: 28/10/2016.
- 54 YALCINKAYA, M.; SINGH, V. Patterns and trends in Building Information Modeling (BIM) research: A Latent Semantic Analysis. **Automation in Construction**, v. 59, p. 68-80, Nov 2015. ISSN 0926-5805.
- 55 WONG, J. K. W.; ZHOU, J. Enhancing environmental sustainability over building life cycles through green BIM: A review. **Automation in Construction**, v. 57, p. 156-165, Sep 2015. ISSN 0926-5805.
- 56 VOLK, R.; STENGEL, J.; SCHULTMANN, F. Building Information Modeling (BIM) for existing buildings - literature review and future needs. **Automation in Construction**, v. 38, p. 109-127, Mar 2014. ISSN 0926-5805.
- 57 AUGENBORE, G.; WILSCHUT, P.; ROMBOUTS, W. **Linking two building performance simulation tools to a product model tested**. 2nd International IBPSA Building Simulation Conference. Nice, France: IBPSA 1991.
- 58 STIPO, F. J. F. **A Standard Design Process for Sustainable Design**. 6th International Conference on Ambient Systems, Networks and Technologies (Ant-2015), the 5th International Conference on Sustainable Energy Information Technology (Seit-2015). 52: 746-753 p. 2015.

- 59 MOTAWA, I.; CARTER, K. **Sustainable BIM-based Evaluation of Buildings**. Selected Papers from the 26th Ipma (International Project Management Association), World Congress. 74: 419-428 p. 2013.
- 60 SOEBARTO, V. et al. **Capturing the views of architects about building performance simulation to be used during design processes**. 14th International IBPSA Building Simulation Conference. Hyderabad, India: IBPSA 2015.
- 61 GRINBERG, M.; RENDEK, A. **Architecture & energy in practice: implementing an information sharing workflow**. 13th International IBPSA Building Simulation Conference. Chambéry, France: IBPSA 2013.
- 62 BRÍGITTE, G. T. N.; RUSCHEL, R. C. **Integrated model supporting environmental performance simulations in the early stages of building design**. 13th International IBPSA Building Simulation Conference. Chambéry, France: IBPSA 2013.
- 63 HIYAMA, K.; KATO, S. Analysis of influence on mechanical design process by BIM spread - consciousness survey to BIM by questionnaire of mechanical engineer. 12th International IBPSA Building Simulation Conference. Sydney, Australia: IBPSA 2011.
- 64 HIEN, W. N.; POH, L. K.; FERIADI, H. The use of performance-based simulation tools for building design and evaluation - a Singapore perspective. **Building and Environment**, v. 35, n. 8, p. 709-736, Nov 2000. ISSN 0360-1323.
- 65 ATTIA, S. G. et al. **Towards strategic use of BPS tools in Egypt**. 12th International IBPSA Building Simulation Conference. Sydney, Australia: IBPSA 2011.
- 66 SAMUELSON, H. W.; LANTZ, A.; REINHART, C. **Identifying non-technical barriers to energy model sharing and reuse**. 12th International IBPSA Building Simulation Conference. Sydney, Australia: IBPSA 2011.
- 67 ATTIA, S. G. et al. **"Architect friendly": a comparison of ten different building performance simulation tools**. 11th International IBPSA Building Simulation Conference. Glasgow, Scotland: IBPSA 2009.
- 68 BASBAGILL, J. et al. Application of life-cycle assessment to early stage building design for reduced embodied environmental impacts. **Building and Environment**, v. 60, p. 81-92, Feb 2013. ISSN 0360-1323.
- 69 BAMBARDEKAR, S.; POERSCHKE, U. **The architect as performer of energy simulation in the early design stage**. 11th International IBPSA Building Simulation Conference. Glasgow, Scotland: IBPSA 2009.
- 70 LAM, K. P. et al. SEMPER-II: an internet-based multi-domain building performance simulation environment for early design support. **Automation in Construction**, v. 13, n. 5, p. 651-663, Sep 2004. ISSN 0926-5805.
- 71 TOTH, B. et al. **Closing the loop of design and analysis - Parametric modelling tools for early decision support**. Proceedings of the 16th International Conference on Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (Caadria 2011): Circuit Bending, Breaking and Mending: 525-534 p. 2011.

- 72 LEE, S.; SONG, D. S. **Prediction and Evaluation Method of Wind Environment in the Early Design Stage using BIM-based CFD simulation.** 9th World Congress on Computational Mechanics/4th Asian Pacific Congress on Computational Mechanics. Sydney, AUSTRALIA: Iop Publishing Ltd. 10 2010.
- 73 KIM, I.; KIM, J.; SEO, J. Development of an IFC-based IDF Converter for Supporting Energy Performance Assessment in the Early Design Phase. **Journal of Asian Architecture and Building Engineering**, v. 11, n. 2, p. 313-320, Nov 2012. ISSN 1346-7581.
- 74 LOBOS, D.; TREBILCOCK, M. Building performance information and graphs approach for the design of floor plans. **Arquitetura Revista**, v. 10, n. 1, p. 23-30, Jan-Jun 2014. ISSN 1808-5741.
- 75 O'SULLIVAN, D. T. J. et al. Improving building operation by tracking performance metrics throughout the building lifecycle (BLC). **Energy and Buildings**, v. 36, n. 11, p. 1075-1090, Nov 2004. ISSN 0378-7788.
- 76 CORRY, E. et al. **Systematic development of an operational BIM utilizing simulation and performance data in building operation.** 12th International IBPSA Building Simulation Conference. Sydney, Australia: IBPSA 2011.
- 77 LIAO, C. Y.; TAN, D. L.; LI, Y. X. Research on the Application of BIM in the Operation Stage of Green Building. **Advanced Building Materials and Sustainable Architecture, Pts 1-4**, v. 174-177, p. 2111-2114, 2012. ISSN 1660-9336.
- 78 COSTA, A. et al. Building operation and energy performance: Monitoring, analysis and optimisation toolkit. **Applied Energy**, v. 101, p. 310-316, Jan 2013. ISSN 0306-2619.
- 79 CHO, Y. K.; HAM, Y.; GOLPAVAR-FARD, M. 3D as-is building energy modeling and diagnostics: A review of the state-of-the-art. **Advanced Engineering Informatics**, v. 29, n. 2, p. 184-195, Apr 2015. ISSN 1474-0346.
- 80 MARZOUK, M.; ABDELATY, A. Monitoring thermal comfort in subways using building information modeling. **Energy and Buildings**, v. 84, p. 252-257, Dec 2014. ISSN 0378-7788.
- 81 GOKCE, H. U.; GOKCE, K. U. Integrated System Platform for Energy Efficient Building Operations. **Journal of Computing in Civil Engineering**, v. 28, n. 6, p. 11, Nov 2014. ISSN 0887-3801.
- 82 ACQUAVIVA, A. et al. **Energy consumption management using CAFM and BIM applications.** 10th International Study Forum on Life of Traders: 213-222 p. 2012.
- 83 ALAHMAD, M. et al. **Real Time Power Monitoring and Integration with BIM.** IECON 2010 - 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society. Glendale, USA 2010.
- 84 MOON, H. J.; KIM, B. K.; CHOI, M. S. **A BIM based data model for an integrated building energy information management in the design and operational stages.** 13th International IBPSA Building Simulation Conference. Chambéry, France: IBPSA 2013.
- 85 HERRIGAN, M. et al. **A holistic life-cycle data analysis approach to bridge the energy performance gap in buildings.** 14th International IBPSA Building Simulation Conference. Hyderabad, India: IBPSA 2015.

- ⁸⁶ TUOHY, P. Simulation and BIM for building design, commissioning and operation: a comparison with the microelectronics industry. 11th International IBPSA Building Simulation Conference. Glasgow, Scotland IBPSA 2009.
- ⁸⁷ CLARIDGE, D. Building Simulation for practical operational optimization. In: (Ed.). **Building Performance Simulation for Design and Operation**. New York, USA: Spon Press, 2011.
- ⁸⁸ IM, P.; BHANDARI, M.; ASHRAE. Use of Flexible Research Platforms (FRP) for BIM and Energy Modeling Research. **Ashrae Transactions**, v. 118 pt. 2, p. 197-204, 2012. ISSN 0001-2505.
- ⁸⁹ SINGH, S. **Net zero energy retrofit using calibrated model, optimization techniques and regression graphs**. 14th International IBPSA Building Simulation Conference. Hyderabad, India: IBPSA 2015.
- ⁹⁰ ANDRIAMAMONJY, A. L.; KLEIN, R.; SAELENS, D. **Sensor handling in building information models: development of a method and application on a case study**. 14th International IBPSA Building Simulation Conference. Hyderabad, India: IBPSA 2015.
- ⁹¹ HARMATI, N.; MAGYAR, Z. **Energy consumption monitoring and energy performance evaluation of an office building**. Proceedings of the 5th German-Austrian IBPSA Conference BauSIM. Aachen, Germany: IBPSA 2014.
- ⁹² DONG, B. et al. **Development and calibration of a reduced-order energy performance model for a mixed-use building**. 13th International IBPSA Building Simulation Conference. Chambéry, France: IBPSA 2013.
- ⁹³ RAFTERY, P.; KEANE, M.; COSTA, A. **Calibration of a detailed simulation model to energy monitoring system data: a methodology and case study**. 11th International IBPSA Building Simulation Conference. Glasgow, Scotland: IBPSA 2009.
- ⁹⁴ LEWIS, A. M. et al. BIM Energy Modeling: Case Study of a Teaching Module for Sustainable Design and Construction Courses. **Journal of Professional Issues in Engineering Education and Practice**, v. 141, n. 2, p. 6, Apr 2015. ISSN 1052-3928.
- ⁹⁵ APTEKAR, A. et al. Closing the loop - completing the design/analysis & fabrication & validation cycle. The impact of digital collaboration tools on interdisciplinary teaching. 5th International Conference on Education and New Learning Technologies (EDULEARN). Barcelona, Spain: IATED - Int. Assoc. Technology Education & Development: 3177-3186 p. 2013.
- ⁹⁶ PLUME, J.; MITCHELL, J. Collaborative design using a shared IFC building model - Learning from experience. **Automation in Construction**, v. 16, n. 1, p. 28-36, Jan 2007. ISSN 0926-5805.
- ⁹⁷ OSELLO, A. et al. **Multidisciplinary team activity using BIM and interoperability: a PhD course experience at Politecnico di Torino**. Heritage, Architecture, Landesign: Focus on Conservation, Regeneration, Innovation: 880-889 p. 2013.
- ⁹⁸ PALME, M. **What architects want? Between BIM and simulation tools: an experience teaching Ecotect** 12th International IBPSA Building Simulation Conference. Sydney, Australia: IBPSA 2011.
- ⁹⁹ OZENER, O. O. et al. Illuminating the Design Incorporation of natural lighting analyses in the design studio using BIM. Ecaade 2010: Future Cities: 493-498 p. 2010.

- ¹⁰⁰ POERSCHKE, U.; KALISPERIS, L. N. **Integrating energy simulation applications and building information modelling in the design studio.** Oxford Conference: a Re-Evaluation of Education in Architecture: 307-310 p. 2008.
- ¹⁰¹ STROBBE, T. et al. Using a Building Information Modelling approach for teaching about residential energy use and official energy performance. 14th International IBPSA Building Simulation Conference. Hyderabad, India: IBPSA 2015.
- ¹⁰² LEE, Y. S. Using Building Information Modeling for Green Interior Simulations and Analyses. **Journal of Interior Design**, v. 37, n. 1, p. 35-50, Mar 2012. ISSN 1071-7641.
- ¹⁰³ HEDGES, K. E.; DENZER, A. S.; ASME. **Visualizing energy: How BIM influences design choices.** Detc2007: Proceedings of the Asme International Design Engineering Technology Conference and Computers and Information in Engineering Conference, Vol 4: 567-574 p. 2008.
- ¹⁰⁴ ILAL, M. E.; MACIT, S. **Integration of an acoustic simulation tool with CAAD environments using ifcXML.** Enterprise Interoperability II: New Challenges and Approaches: 807-810 p. 2007.
- ¹⁰⁵ HETHERINGTON, R. et al. **Integrated building design, information and simulation modelling: the need for a new hierarchy.** 12th International IBPSA Building Simulation Conference. Sydney, Australia: IBPSA 2011.
- ¹⁰⁶ IADANZA, E. et al. **The STREAMER European Project. Case Study: Careggi Hospital in Florence.** 6th European Conference of the International-Federation-for-Medical-and-Biological-Engineering (MBEC). Dubrovnik, CROATIA: Springer-Verlag Berlin. 45: 649-652 p. 2014.
- ¹⁰⁷ HOLST, J. N. Using whole building simulation models and optimizing procedures to optimize building envelope design with respect to energy consumption and indoor environment. 8th International IBPSA Building Simulation Conference. Eindhoven, Netherlands: IBPSA 2003.
- ¹⁰⁸ NOUR, M.; HOSNY, O.; ELHAKEEM, A. A BIM based approach for configuring buildings' outer envelope energy saving elements. **Journal of Information Technology in Construction**, v. 20, p. 173-192, 2015. ISSN 1874-4753.
- ¹⁰⁹ ASL, M. R.; ZARRINMEHR, S.; YAN, W. **Towards BIM-based parametric building energy performance optimization.** Acadia 2013: Adaptive Architecture: 101-107 p. 2013.
- ¹¹⁰ WELLE, B.; ROGERS, Z.; FISCHER, M. BIM-Centric Daylight Profiler for Simulation (BDP4SIM): A methodology for automated product model decomposition and recomposition for climate-based daylighting simulation. **Building and Environment**, v. 58, p. 114-134, Dec 2012. ISSN 0360-1323.
- ¹¹¹ STROBBE, T. et al. **Optimization in compliance checking using heuristics: Flemish Energy Performance Regulations (EPR).** Ework and Ebusiness in Architecture, Engineering and Construction: 477-482 p. 2012.
- ¹¹² WELLE, B.; HAYMAKER, J.; ROGERS, Z. ThermalOpt: A methodology for automated BIM-based multidisciplinary thermal simulation for use in optimization environments. **Building Simulation**, v. 4, n. 4, p. 293-313, Dec 2011. ISSN 1996-3599.
- ¹¹³ OH, S.-M. et al. Process-driven BIM-based optimal design using integration of Energyplus, Genetic Algorithm, and Pareto Optimality 12th International IBPSA Building Simulation Conference. Sydney, Australia: IBPSA 2011.

- 114 MOURSHED, M. M.; KELLIHER, D.; KEANE, M. **ArDOT: a tool to optimise environmental design of buildings**. 8th International IBPSA Building Simulation Conference. Eindhoven, Netherlands: IBPSA 2003.
- 115 TUOHY, P. G.; MURPHY, G. B. Closing the gap in building performance: learning from BIM benchmark industries. **Architectural Science Review**, v. 58, n. 1, p. 47-56, Jan 2015. ISSN 0003-8628.
- 116 AZHAR, S. et al. **Using Building Information Modeling to streamline LEED (R) rating analyses**. Proceedings of the First International Conference on Sustainable Urbanization (Icsu 2010): 75-81 p. 2010.
- 117 HITCHMOUGH, M. et al. **The design of the co-operative head office, Manchester**. 12th International IBPSA Building Simulation Conference. Sydney, Australia: IBPSA 2011.
- 118 SHIAU, Y. C. et al. Using Ecotect to Improve Energy Conservation for Older Buildings. **Research Journal of Chemistry and Environment**, v. 16, p. 162-171, Nov 2012. ISSN 0972-0626.
- 119 REEVES, T.; OLBINA, S.; ISSA, R. Validation of building energy modeling tools: Ecotect (TM), Green Building Studio T and IES < VE >(TM). Winter Simulation Conference (WSC). Berlin, GERMANY: Ieee 2012.
- 120 AL-GHAMDI, S. G.; BILEC, M. M. Life-Cycle Thinking and the LEED Rating System: Global Perspective on Building Energy Use and Environmental Impacts. **Environmental Science and Technology**, v. 49, n. 7, p. 4048-4056, 2015. ISSN 0013-936X.
- 121 HE, H.; HAMMAD, A.; FAZIO, P. **Application of IT and international standards to evaluate building envelope performance**. 9th International IBPSA Building Simulation Conference. Montréal, Canada IBPSA 2005.
- 122 ZHOU, M.; BO, W. B.; QIAN, L. W. **Study on the Application of BIM Technology in Green Projects**. Criocm2009: International Symposium on Advancement of Construction Management and Real Estate, Vols 1-6: 2248-2252 p. 2009.
- 123 AZHAR, S. et al. Building information modeling for sustainable design and LEED (R) rating analysis. **Automation in Construction**, v. 20, n. 2, p. 217-224, Mar 2011. ISSN 0926-5805.
- 124 WU, W.; ISSA, R. R. A. BIM Execution Planning in Green Building Projects: LEED as a Use Case. **Journal of Management in Engineering**, v. 31, n. 1, p. 18, Jan 2015. ISSN 0742-597X.
- 125 SALGUEIRO, I. B.; FERRIES, B. An "Environmental BIM" Approach for the Architectural Schematic Design Stage. **International Journal of Architectural Computing**, v. 13, n. 3-4, p. 300-312, Dec 2015. ISSN 1478-0771.
- 126 SRINIVASAN, R. et al. **Preliminary research in dynamic-BIM (D-BIM) workbench development**. Winter Simulation Conference (WSC). Berlin, GERMANY: Ieee 2012.
- 127 SPIEGELHALTER, T. Achieving the net-zero-energy-buildings "2020 and 2030 targets" with the support of parametric 3-D/4-D BIM design tools. **Journal of Green Building**, v. 7, n. 2, p. 74-86, 2012. ISSN 1552-6100.

- 128 GUPTA, A.; HOPFE, C. J.; REZGUI, Y. **BIM and solar PV modeling**. Ework and Ebusiness in Architecture, Engineering and Construction: 113-120 p. 2012.
- 129 ANDREY, V.; LUIZA, S. **Programming applications of computer aided design and layout of the complex solar panels**. 2nd International Conference on Information Technology and Management Innovation (ICITMI 2013). Zhuhai, China. 411-414: 1840-1843 p. 2013.
- 130 GUPTA, A. et al. A conceptual framework to support solar PV simulation using an open-BIM data exchange standard. **Automation in Construction**, v. 37, p. 166-181, Jan 2014. ISSN 0926-5805.
- 131 RONZINO, A. et al. **The energy efficiency management at urban scale by means of integrated modelling**. Sustainability in Energy and Buildings: Proceedings of the 7th International Conference Seb-15. 83: 258-268 p. 2015.
- 132 SCHLUETER, A.; THESELING, F. Building information model based energy/exergy performance assessment in early design stages. **Automation in Construction**, v. 18, n. 2, p. 153-163, Mar 2009. ISSN 0926-5805.
- 133 SELVIG, A.; O'BRIEN, W.; MERRETT, C. G. **2013 Solar Decathlon: Technologies, Modelling Tools and Canadian Applications** 8th Canadian IBPSA Conference eSim Ottawa, Canada: IBPSA 2014.
- 134 SPIEGELHALTER, T. Energy-Efficiency Retrofitting and Transformation of the FIU-College of Architecture plus The Arts into a Net-Zero-Energy-Building by 2018. 2013 Ises Solar World Congress. 57: 1922-1930 p. 2014.
- 135 DIXIT, M.; YAN, W. **A building-integrated photovoltaic prototype for calculating solar orientation and solar insolation**. 14th International IBPSA Building Simulation Conference. Hyderabad, India: IBPSA 2015.
- 136 WANG, C.; CHO, Y. K.; KIM, C. Automatic BIM component extraction from point clouds of existing buildings for sustainability applications. **Automation in Construction**, v. 56, p. 1-13, Aug 2015. ISSN 0926-5805.
- 137 LAGUELA, S. et al. Non-destructive approach for the generation and thermal characterization of an as-built BIM. **Construction and Building Materials**, v. 51, p. 55-61, Jan 2014. ISSN 0950-0618.
- 138 DIAZ-VILARINO, L. et al. Semantic as-built 3d models including shades for the evaluation of solar influence on buildings. **Solar Energy**, v. 92, p. 269-279, Jun 2013. ISSN 0038-092X.
- 139 WANG, Y. Z.; JUANG, L. H.; LIU, W. H. **A New Design Concept by Using BIM for Reforming an Energy-saving Campus Building**. Frontiers of Green Building, Materials and Civil Engineering III, Pts 1-3. 368-370: 1191-1195 p. 2013.
- 140 WANG, J. Y.; SUN, X.; ZENG, X. D. The Application of BIM in Updating the Thermal Environment Design of Traditional Residences in Mountain Region- A Case of Chongqing. **Materials, Transportation and Environmental Engineering, Pts 1 and 2**, v. 779-780, p. 1324-1327, 2013. ISSN 1022-6680.
- 141 HAM, Y.; GOLPARVAR-FARD, M. Mapping actual thermal properties to building elements in gbXML-based BIM for reliable building energy performance modeling. **Automation in Construction**, v. 49, p. 214-224, Jan 2015. ISSN 0926-5805.

- 142 WOO, J. H.; MENASSA, C. Virtual Retrofit Model for aging commercial buildings in a smart grid environment. **Energy and Buildings**, v. 80, p. 424-435, Sep 2014. ISSN 0378-7788.
- 143 PREVITALI, M.; BARAZZETTI, L.; RONCORONI, F. **Spatial Data Management for Energy Efficient Envelope Retrofitting**. Computational Science and Its Applications, Pt I. 7971: 608-621 p. 2013.
- 144 LAGUELA, S. et al. Automatic thermographic and RGB texture of as-built BIM for energy rehabilitation purposes. **Automation in Construction**, v. 31, p. 230-240, May 2013. ISSN 0926-5805.
- 145 CARRIZO, J. S.; O'BRIEN, W.; QUINTER, M. S. **Lasers, Light, and God: 3-D scanning assisted lighting analysis of a house of worship** 8th Canadian IBPSA Conference eSim. Ottawa, Canada IBPSA 2014.
- 146 TOMASI, R. et al. Leveraging BIM Interoperability for UWB-Based WSN Planning. **Ieee Sensors Journal**, v. 15, n. 10, p. 5988-5996, Oct 2015. ISSN 1530-437X.
- 147 MARZOUK, M.; ABDELATY, A. BIM-based framework for managing performance of subway stations. **Automation in Construction**, v. 41, p. 70-77, May 2014. ISSN 0926-5805.
- 148 CHRISTENSEN, J. E.; SCHIØNNING, P.; DETHLEFSEN, E. **Comparison of simplified and advanced building simulation 2 tool with measured data**. 13th International IBPSA Building Simulation Conference. Chambéry, France: IBPSA 2013.
- 149 MENASSA, C. C. et al. **A high level architecture framework for coupling building energy performance models**. 13th International IBPSA Building Simulation Conference. Chambéry, France: IBPSA 2013.
- 150 MOON, H. J.; CHOI, M. S.; AN, K. A. **A Simulation-based Control Approach in a Mechanical Ventilation System**. ASim IBPSA Conference. China: IBPSA 2012.
- 151 MCGLINN, K. et al. **Usability evaluation of an activity modelling tool for improving accuracy of predictive energy simulations**. 14th International IBPSA Building Simulation Conference. Hyderabad, India: IBPSA 2015.
- 152 BEGUERY, P. et al. **Simulation of smart buildings HOMES pilot sites**. 12th International IBPSA Building Simulation Conference. Sydney, Australia: IBPSA 2011.
- 153 JUNG, D. K. et al. **Optimization of energy consumption using BIM-based building energy performance analysis**. Mechanical Engineering, Materials and Energy II. 281: 649-652 p. 2013.
- 154 MADY, A. et al. **Compositional Model-Driven Design of Embedded Code for Energy-Efficient Buildings**. 7th IEEE International Conference on Industrial Informatics. Cardiff, WALES: Ieee: 250-255 p. 2009.
- 155 BAUMGARTEL, K.; KATRANUSCHKOV, P.; SCHERER, R. J. Design and software architecture of a cloud-based virtual energy laboratory for energy-efficient design and life cycle simulation. Ework and Ebusiness in Architecture, Engineering and Construction: 9-16 p. 2012.
- 156 JAHN, M. et al. **Towards a context control model for simulation and optimization of energy performance in buildings**. Ework and Ebusiness in Architecture, Engineering and Construction: 909-917 p. 2012.

- 157 BOURDEAU, M.; BOISSONNAT, A.; LARESGOITI, I. **Energy and behavioural modelling and simulation at facility management.** Ework and Ebusiness in Architecture, Engineering and Construction: 885-890 p. 2012.
- 158 DE WILDE, P.; AUGENBROE, G.; VAN DER VOORDEN, M. Design analysis integration: supporting the selection of energy saving building components. **Building and Environment**, v. 37, n. 8-9, p. 807-816, Aug-Sep 2002. ISSN 0360-1323.
- 159 KOHLER, N.; LUTZKENDORF, T. Integrated life-cycle analysis. **Building Research and Information**, v. 30, n. 5, p. 338-348, Sep-Oct 2002. ISSN 0961-3218.
- 160 SUTER, G.; MAHDAVI, A. Elements of a representation framework for performance-based design. **Building and Environment**, v. 39, n. 8, p. 969-988, Aug 2004. ISSN 0360-1323.
- 161 KAROLA, A. et al. **BSPRO COM-Server - interoperability between software tools using industrial foundation classes.** 7th International IBPSA Building Simulation Conference. Rio de Janeiro, Brazil: IBPSA 2001.
- 162 LAM, K. P. et al. **Mapping of industry building product model for detailed thermal simulation and analysis.** 8th International IBPSA Building Simulation Conference. Eindhoven, Netherlands: IBPSA 2003.
- 163 PELLETRET, R.; KEILHOLZ, W. **Coupling CAD tools and building simulation evaluators.** 6th International IBPSA Building Simulation Conference. Kyoto, Japan: IBPSA 1999.
- 164 NYTSCH-GEUSEN, C. et al. **Integration of CAAD, thermal building simulation and CFD by using the IFC data exchange format.** 8th International IBPSA Building Simulation Conference. Eindhoven, Netherlands: IBPSA 2003.
- 165 STILL, M. **Development of base efficiencies in building environment simulation for building simulation 2003 conference.** 8th International IBPSA Building Simulation Conference. Eindhoven, Netherlands: IBPSA 2003.
- 166 VAN TREECK, C.; ROMBERG, R.; RANK, E. **Simulation based on the product model standard IFC.** 8th International IBPSA Building Simulation Conference. Eindhoven, Netherlands: IBPSA 2003.
- 167 BAZJANAC, V. **The implementation of Industry Foundation Classes in simulation tools for the building industry.** 5th International IBPSA Building Simulation Conference. Prague, Czech Republic: IBPSA 1997.
- 168 _____. **Industry Foundation Classes and interoperable commercial software in support of design of energy-efficient buildings.** 6th International IBPSA Building Simulation Conference. Kyoto, Japan: IBPSA 1999.
- 169 _____. **Improving building energy performance simulation with software interoperability.** 8th International IBPSA Building Simulation Conference. Eindhoven, Netherlands: IBPSA 2003.
- 170 CROUSE, B. et al. **Indoor air flow analysis based on lattice Boltzmann methods.** 7th International IBPSA Building Simulation Conference. Rio de Janeiro, Brazil: IBPSA 2001.

- 171 NEUBERG, F. et al. **Integrated life cycle assessment for a sustainable resource management of buildings.** 8th International IBPSA Building Simulation Conference. Eindhoven, Netherlands: IBPSA 2003.
- 172 SCHEVERS, H.; TOLMAN, F. P. **Theory and implementation of a concept modeler supporting the HVAC engineer.** 7th International IBPSA Building Simulation Conference. Rio de Janeiro, Brazil: IBPSA 2001.
- 173 SAHLIN, P. **A tool for data mapping from design product models to object-oriented simulation models.** Simulation in Industry'99: 11th European Simulation Symposium 1999: 18-22 p. 1999.
- 174 GOWRI, K. **EnerXML – A Schema for Representing Energy Simulation Data** 7th International IBPSA Building Simulation Conference. Rio de Janeiro, Brazil: IBPSA 2001.
- 175 LYDON, G. P.; KEANE, M. M.; KELLIHER, D. **Formulation of STEP compliant building product model data for CFD analysis.** Fifth International Conference on Information Visualisation, Proceedings: 495-499 p. 2001.
- 176 AUGENBROE, G. et al. **The Design Analysis Integration (DAI) initiative.** 8th International IBPSA Building Simulation Conference. Eindhoven, Netherlands: IBPSA 2003.
- 177 MITCHELL, J.; WONG, J.; PLUME, J. **Design collaboration using IFC.** Computer-Aided Architectural Design Futures (Caad Futures) 2007: 317-329 p. 2007.
- 178 HOLZER, D.; TENGONO, Y.; DOWNING, S. **Developing a framework for linking design intelligence from multiple professions in the AEC industry.** Computer-Aided Architectural Design Futures (Caad Futures) 2007: 303-316 p. 2007.
- 179 BAZJANAC, V. **Impact of the US National Building Information Model Standard (NBIMS) on building energy performance simulation.** 8th International IBPSA Building Simulation Conference. Beijing, China: IBPSA: 1377-1382 p. 2007.
- 180 EINBERG, G.; HANNINEN, R.; LAINE, T. **CFD modelling as a part of integrated design process for optimised indoor environment.** Indoor Air 2005: Proceedings of the 10th International Conference on Indoor Air Quality and Climate, Vols 1-5: 3180-3184 p. 2005.
- 181 LAINE, T.; HANNINEN, R.; KAROLA, A. **Benefits of BIM in the thermal performance management.** 10th International IBPSA Building Simulation Conference. Beijing, China: IBPSA: 1455-1461 p. 2007.
- 182 LYDON, G. P.; KEANE, M. M.; INGHAM, D. B. **Implementation of an interface between a CFD energy analysis and an IFC building product model.** Ninth International Conference on Information Visualisation, Proceedings: 277-286 p. 2005.
- 183 VAN TREECK, C.; RANK, E. **Geometrical and topological issues for coupling dimensionally reduced multizone models with high-resolution CFD techniques.** 9th International IBPSA Building Simulation Conference. Montréal, Canada: IBPSA 2005.
- 184 MORRISSEY, E. et al. **Building effectiveness communication ratios for improved building life cycle management.** 9th International IBPSA Building Simulation Conference. Montréal, Canada: IBPSA 2005.

- 185 O'SULLIVAN, B.; KEANE, M. **Specification of an IFC based intelligent graphical user interface to support building energy simulation.** 9th International IBPSA Building Simulation Conference. Montréal, Canada: IBPSA 2005.
- 186 YI, Y. K. et al. **Data-centric simulation interoperability using the DeST simulation platform.** 10th International IBPSA Building Simulation Conference. Beijing, China: IBPSA: 1587-1594 p. 2007.
- 187 VAN TREECK, C.; RANK, E. Dimensional reduction of 3D building models using graph theory and its application in building energy simulation. **Engineering with Computers**, v. 23, n. 2, p. 109-122, Jun 2007. ISSN 0177-0667.
- 188 LAM, K. P. Building performance simulation in the Singapore construction industry IT network. **Journal of Architectural and Planning Research**, v. 21, n. 4, p. 312-320, Win 2004. ISSN 0738-0895.
- 189 CEMESOVA, A.; HOPFE, C. J.; MCLEOD, R. S. PassivBIM: Enhancing interoperability between BIM and low energy design software. **Automation in Construction**, v. 57, p. 17-32, Sep 2015. ISSN 0926-5805.
- 190 O'DONNELL, J. et al. **SIMMODEL: a domain data model for whole building energy simulation.** 12th International IBPSA Building Simulation Conference. Sydney, Australia: IBPSA 2011.
- 191 KEILHOLZ, W. et al. **A simple, neutral building data model.** Ework and Ebusiness in Architecture, Engineering and Constructio N: 105-109 p. 2009.
- 192 AUGENBROE, G.; MALKAWI, A. M.; DE WILDE, P. A performance-based language for design analysis dialogues. **Journal of Architectural and Planning Research**, v. 21, n. 4, p. 321-330, Win 2004. ISSN 0738-0895.
- 193 AUGENBROE, G. et al. An interoperability workbench for design analysis integration. **Energy and Buildings**, v. 36, n. 8, p. 737-748, Aug 2004. ISSN 0378-7788.
- 194 INFOHAB. Centro de Referência e Informação em Habitação website - Institucional. 2017. Disponível em: < <http://www.infohab.org.br/index/institucional> >. Acesso em: 17/01/2017.
- 195 SCIELO. Scientific Electronic Library Online website. 2017. Disponível em: < http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_home&lng=pt&nrm=iso >. Acesso em: 17/01/2017.
- 196 AIA. **Integrated Project Delivery: A Guide.** [S.l.]: The American Institute of Architects, 2007. Disponível em: < <http://www.aia.org/ipdg> >. Acesso em: 14/01/2017.

APÊNDICE A - PROTOCOLO DEFINIDO PARA A REVISÃO SISTEMÁTICA

O protocolo definido para a execução da revisão sistemática, apresentado a seguir, foi adaptado do modelo apresentado por Biolchini *et al.* ⁴⁷. O mesmo está organizado em três partes consoante as etapas previstas para o processo de revisão (Figura 5).

✎ Etapa 1 - Planejamento

1. Formulação da Questão

1.1. Foco da Questão: realizar uma ampla investigação da produção científica internacional relacionada ao tema da integração entre BIM (*Building Information Modeling* ou Modelagem da Informação da Construção) e BPS (*Building Performance Simulation* ou Simulação de Desempenho do Edifício) de modo a produzir um diagnóstico abrangente da pesquisa neste tema.

1.2. Qualidade e Amplitude da Questão:

- **Problema** (contextualização do problema) - conforme apresentado nos capítulos 1 e 2.
- **Questão** (definição da questão central e delimitação do tema) - integração entre tecnologias e processos BIM e BPS, de acordo com delimitação de escopo especificada na seção 1.3.
- **Palavras-chave e Sinônimos** - *Building Information Modeling* (BIM), *Building Product Model*, *Product Information Model*, *Product Data Model*, *object oriented*, *Revit*, *Archicad*, *Bentley*; *Building Performance Simulation* (BPS), *Building Performance Analysis* (BPA), *environmental analysis*, *lighting*, *daylighting*, *thermal*, *ventilation*, *acoustics*, *energy analysis*, *Green Building*; *interoperability*, *integration*; IFC, gbXML.

- **Intervenção** (o que será observado no contexto da revisão sistemática planejada) – escopo, objetivos, métodos e resultados da pesquisa; questões e temáticas abordadas.
- **Controle** (conjunto inicial de dados) - conforme revisão bibliográfica preliminar constante no capítulo 2.
- **Efeito** (tipos de resultados esperados no final da revisão sistemática) - padrões, tendências e lacunas de pesquisa, além das principais questões de pesquisa já solucionadas e aquelas que ainda precisam ser abordadas.
- **Medição de Resultados** (métricas usadas para medir o efeito) - foram definidos critérios para classificação dos artigos em categorias conforme Figura 6 e Tabela 1, que apresentam as categorias definidas, os objetivos de cada uma – relativos ao tipo de informação a ser extraída e análise que se pretende realizar a partir destes dados.
- **População** (grupo de população que será observado pela intervenção) - artigos de revistas científicas (*journals*) e artigos apresentados em conferências e eventos acadêmicos.
- **Aplicação** (funções, tipos profissionais ou áreas de aplicação que irão se beneficiar dos resultados da revisão sistemática) - pesquisadores, profissionais da indústria e desenvolvedores de ferramentas computacionais envolvidos com a integração entre BIM e BPS, servindo como orientação para direcionar futuros esforços de pesquisa e desenvolvimento.
- **Projeto Experimental** (descreve como a meta-análise será conduzida, definindo quais métodos de análises estatísticas serão aplicados nos dados coletados para interpretação dos resultados) - os dados serão analisados por meio de gráficos, os quais apresentarão os resultados tanto em valores totais quanto por períodos de tempo (conforme definição apresentada na seção 3.2) de modo a permitir a análise da evolução dos resultados ao longo dos anos de forma clara e objetiva. Os gráficos produzidos serão de diferentes tipos, de acordo com o modo de classificação de cada categoria e o tipo de apresentação dos resultados (totais ou por período):

- Gráfico de Pizza - apresenta valores percentuais em relação à quantidade total de artigos; utilizado nas categorias em que cada artigo puder ser classificado *apenas em uma* de suas classes;
- Gráfico de Área 100% empilhada - apresenta valores percentuais em relação à quantidade total de artigos em cada período; utilizado nas categorias em que cada artigo puder ser classificado *apenas em uma* de suas classes;
- Gráfico de Barras - apresenta valores absolutos ou percentuais em relação à quantidade total de artigos em cada período e no intervalo total; utilizado nas categorias em que cada artigo puder ser classificado em mais de uma classe.

Note-se que os métodos de análises estatísticas apresentados aqui estão em sua forma final, tendo sido resultado de diversas iterações entre as etapas de planejamento e execução, que acabaram por refinar e adequar os métodos definidos previamente à etapa de execução.

2. Seleção das Fontes

2.1. Definição de Critério para Seleção das Fontes: as fontes selecionadas deverão conter ampla base de dados na temática da questão central e ser reconhecidas no meio acadêmico internacional.

2.2. Línguas dos Estudos (idioma): inglês, pois as publicações selecionadas deverão ser de abrangência internacional.

2.3. Identificação das Fontes:

- **Lista de Fontes** - foram levantadas as seguintes fontes relevantes para a pesquisa:
 - Web of Science (Thomson Reuters) - plataforma de pesquisa que disponibiliza milhares de títulos de periódicos de todo o mundo, possibilitando a identificação de artigos científicos em diversas áreas do conhecimento;
 - IBPSA (International Building Performance Simulation Association) - associação internacional sem fins lucrativos de pesquisadores, desenvolvedores e profissionais de simulação de desempenho do edifício que promove conferências bienais internacionais e locais em diversos países afiliados sobre o tema da simulação de desempenho ambiental do edifício.

- **Métodos de Pesquisa das Fontes** (método utilizado para realizar as buscas nas fontes) - busca por meio de motores de busca web com palavras-chave.
- **Cadeia de Pesquisa** (palavras-chave utilizadas na busca) - Referente a BIM, foram selecionados como palavras-chave o próprio termo bem como expressões que eram utilizadas no mesmo sentido previamente ao estabelecimento do mesmo, além de nomes de ferramentas BIM. Já em relação a BPS, diversas palavras e expressões comumente empregadas nas pesquisas deste campo foram selecionadas, incluindo as disciplinas de simulação. Além disso, selecionou-se também palavras relacionadas com o tema da integração entre os sistemas, como interoperabilidade e os modelos de dados neutros. Assim, as buscas combinaram as seguintes palavras-chave em cada uma das fontes de pesquisa:
 - Web of Science: BIM, *building, model, Product Model, Product Information, Product Data, object oriented*, Revit, Archicad, Bentley; BPS, BPA, *simulation, performance, environmental analysis, lighting, daylighting, thermal, ventilation, acoustics, energy analysis, Green Building; interoperability, integration*; IFC, gbXML.
 - IBPSA: BIM, *model, Product Model, Product Information, Product Data, object oriented*, Revit, Archicad, Bentley; *interoperability, integration*; IFC, gbXML.

2.4. Seleção de Fontes Pós Avaliação - as duas fontes levantadas foram selecionadas para uso na revisão sistemática, pois ambas atendem aos critérios definidos para a seleção.

3. Seleção dos Estudos

3.1. Definição dos Estudos:

- **Definição de Critério de Inclusão e Exclusão de Estudos** - de acordo com o enquadramento do estudo nos objetivos e delimitação do tema da revisão sistemática.
- **Definição de Tipos de Estudo** - todos os tipos de estudo indexados nas fontes selecionadas, com exceção de artigos editoriais de revistas científicas.
- **Procedimentos para Seleção de Estudos** - os estudos serão selecionados primeiramente por meio da leitura de seu resumo e análise de título e palavras-

chave, seguida da leitura integral do mesmo para o caso de existir algum aspecto desqualificador que não tenha sido esclarecido ou apontado no resumo.

✎ Etapa 2 - Execução

3.2. Execução da Seleção:

- **Seleção Inicial de Estudos** - os estudos foram coletados nas fontes de dados conforme definições da etapa de planejamento. Devido à grande abrangência de algumas das palavras chave – e.g. simulação, interoperabilidade – o número de artigos levantado inicialmente foi muito grande, totalizando mais de mil artigos na base de dados *Web of Science* (mesmo utilizando-se a filtragem por área de pesquisa, conforme opções disponibilizadas no motor de buscas da fonte) e quase duzentos estudos publicados nos anais do IBPSA. Assim, foi necessária a realização de uma filtragem inicial dos artigos coletados, em especial dos estudos da base de dados *Web of Science* – que abrange diferentes campos do conhecimento, enquanto os estudos da base de dados da IBPSA pertencem somente ao campo da simulação de desempenho ambiental do edifício –, a qual foi realizada por meio de buscas por palavras-chave nos resumos dos artigos coletados para verificação do contexto em que as mesmas se inseriam, ficando então excluídos estudos de outras áreas que empregavam algumas das palavras-chave selecionadas, e.g. pesquisas sobre simulação de desempenho de rotas de fuga em edifícios modelados em BIM.
- **Avaliação da Qualidade dos Estudos** - além do procedimento de filtragem inicial citado anteriormente, foi aplicado o procedimento para seleção dos estudos conforme estabelecido na etapa de planejamento para avaliação da qualidade e aderência ao escopo definido para a revisão sistemática, o que reduziu o número de artigos selecionados de quase dois mil para cerca de 250.

4. Extração de Informações

4.1. Definição de Critério de Inclusão e Exclusão de Informações: a definição das informações a serem extraídas dos artigos – i.e. as categorias de classificação – se

deu inicialmente com base nos principais temas e questões levantados na revisão bibliográfica preliminar, tendo posteriormente sido complementados durante a execução da revisão sistemática a partir da identificação de outros assuntos de interesse.

4.2. Formulários de Extração de Dados: as informações dos artigos selecionados (título, autores, resumo, etc.) e os dados extraídos (classificação dos artigos nas diferentes categorias definidas) foram organizados e registrados em uma matriz conforme apresentado na figura a seguir (Figura 7).

Categorias de Classificação										Controle		Informações dos artigos									
CLASSIFICAÇÃO										CONTROLE		INFORMAÇÕES DOS ARTIGOS									
Publicat	Proj	Discipl	Discipl	Discipl	Discipl	Discipl	Discipl	Discipl	Discipl	Publicat	Proj	Discipl	Discipl	Discipl	Discipl	Discipl	Discipl	Discipl	Discipl	Discipl	Discipl
1	J	Early-O	BPA	Ener.A	GB	BPA	En.A>GB	BPA	En.A>GB	1	J	Early-O	BPA	Ener.A	GB	BPA	En.A>GB	BPA	En.A>GB	BPA	En.A>GB
2	J	Early-O	BPA	Ener.A	GB	BPA	En.A>GB	BPA	En.A>GB	2	J	Early-O	BPA	Ener.A	GB	BPA	En.A>GB	BPA	En.A>GB	BPA	En.A>GB
3	J	Early-O	BPA	Ener.A	GB	BPA	En.A>GB	BPA	En.A>GB	3	J	Early-O	BPA	Ener.A	GB	BPA	En.A>GB	BPA	En.A>GB	BPA	En.A>GB
4	J	Early-O	BPA	Ener.A	GB	BPA	En.A>GB	BPA	En.A>GB	4	J	Early-O	BPA	Ener.A	GB	BPA	En.A>GB	BPA	En.A>GB	BPA	En.A>GB
5	J	Early-O	BPA	Ener.A	GB	BPA	En.A>GB	BPA	En.A>GB	5	J	Early-O	BPA	Ener.A	GB	BPA	En.A>GB	BPA	En.A>GB	BPA	En.A>GB
6	J	Early-O	BPA	Ener.A	GB	BPA	En.A>GB	BPA	En.A>GB	6	J	Early-O	BPA	Ener.A	GB	BPA	En.A>GB	BPA	En.A>GB	BPA	En.A>GB
7	J	Early-O	BPA	Ener.A	GB	BPA	En.A>GB	BPA	En.A>GB	7	J	Early-O	BPA	Ener.A	GB	BPA	En.A>GB	BPA	En.A>GB	BPA	En.A>GB
8	J	Early-O	BPA	Ener.A	GB	BPA	En.A>GB	BPA	En.A>GB	8	J	Early-O	BPA	Ener.A	GB	BPA	En.A>GB	BPA	En.A>GB	BPA	En.A>GB
9	J	Early-O	BPA	Ener.A	GB	BPA	En.A>GB	BPA	En.A>GB	9	J	Early-O	BPA	Ener.A	GB	BPA	En.A>GB	BPA	En.A>GB	BPA	En.A>GB
10	J	Early-O	BPA	Ener.A	GB	BPA	En.A>GB	BPA	En.A>GB	10	J	Early-O	BPA	Ener.A	GB	BPA	En.A>GB	BPA	En.A>GB	BPA	En.A>GB
11	J	Early-O	BPA	Ener.A	GB	BPA	En.A>GB	BPA	En.A>GB	11	J	Early-O	BPA	Ener.A	GB	BPA	En.A>GB	BPA	En.A>GB	BPA	En.A>GB

Figura 7: Matriz utilizada na etapa de extração de dados para organizar as informações dos estudos selecionados e registrar os dados extraídos na revisão sistemática.

4.3. Execução da Extração: a extração dos dados foi realizada de forma objetiva por meio da classificação dos artigos selecionados nas categorias definidas com base na leitura integral dos mesmos.

Etapa 3 - Análise dos Resultados

5. Resumo dos Resultados

5.1. Cálculo Estatístico dos Resultados: os métodos estatísticos definidos na etapa de planejamento (subitem Projeto Experimental) foram aplicados para permitir a análise dos dados e compreensão da complexa relação entre os resultados obtidos.

5.2. Apresentação dos Resultados em Tabelas: os resultados obtidos foram tabulados (Figura 8) para permitir análises mais detalhadas e a geração dos gráficos conforme os métodos estatísticos definidos na etapa de planejamento.

Figura 8: Tabulação dos dados extraídos na execução da revisão sistemática.

5.3. Análise de Sensibilidade: os resultados foram analisados referente à sua robustez de modo a verificar se houve inconsistências na execução da revisão sistemática.

5.4. Plotagem: os resultados foram plotados conforme métodos estatísticos definidos na etapa de planejamento, tendo-se obtido os gráficos finais após uma série de testes com diferentes formatos e tipos de gráficos conforme ilustrado na Figura 9.

5.5. Comentários Finais: os comentários (análises) sobre os resultados da revisão sistemática foram apresentados no capítulo 4.

APÊNDICE B - BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR

Abaixo estão listados os artigos que compõem a amostragem utilizada na Revisão Sistemática e que não constam na seção “Referências Bibliográficas”, uma vez que não foram citados no corpo do presente trabalho.

- AGHEMO, C. et al. **Interoperability between Building Information Models and software for lighting analysis**. 13th International IBPSA Building Simulation Conference. Chambéry, France. 2013.
- AHN, K. U. et al. **BIM interface for full vs. semi-automated building energy simulation**. 2nd International Conference on Building Energy and Environment (COBEE). Colorado, USA. 2012.
- ANDREY, V.; ARTEM, S.; PAVEL, C. **Usage of building information modelling for evaluation of energy efficiency**. 2nd International Conference on Civil, Architectural and Hydraulic Engineering (ICCAHE 2013). Zhuhai, China. 2013.
- ASMI, E. E. et al. **Leveraging Building Design Model from Energy Performance Model: from an IFC/BIM to Cometh Simulation Engine**. 14th International IBPSA Building Simulation Conference. Hyderabad, India. 2015.
- BAZJANAC, V. et al. **An assessment of the use of building energy performance simulation in early design**. 12th International IBPSA Building Simulation Conference. Sydney, Australia. 2011.
- CAO, J. et al. **A Flexible Model Transformation to Link BIM with Different Modelica Libraries for Building Energy Performance Simulation**. 14th International IBPSA Building Simulation Conference. Hyderabad, India. 2015.
- CAO, J. et al. **Model transformation from SIMMODEL to Modelica for building energy performance simulation**. 5th German-Austrian IBPSA Conference BauSIM. Aachen, Germany. 2014.
- CEMESOVA, A.; HOPFE, C. J.; REZGUI, Y. **An approach to facilitating data exchange between BIM environments and a low energy design tool**. 13th International IBPSA Building Simulation Conference. Chambéry, France. 2013.
- CERANIC, Boris; LATHAM, Derek; DEAN, Angela. **Sustainable Design and Building Information Modelling: Case Study of Energy Plus House, Hieron's Wood, Derbyshire UK**. 7th International Conference on Sustainability and Energy in Buildings (SEB). Lisbon, Portugal. 2015.
- CHIAIA, B. et al. **BIM and interoperability for energy simulations**. 14th International IBPSA Building Simulation Conference. Hyderabad, India. 2015.
- CHUN, H. Y.; HUI, E. C. **Automatic carbon tool in Singapore**. 13th International IBPSA Building Simulation Conference. Chambéry, France. 2013.
- CHUN, H. Y.; YUEZHONG, L. **Automatic simulation and carbon analysis for architecture design**. 13th International IBPSA Building Simulation Conference. Chambéry, France. 2013.

- CLARKE, J. A. et al. A data model for integrated building performance simulation. First Building Simulation and Optimization Conference. Loughborough, UK. 2012.
- CORMIER, A. et al. **Towards a BIM-based service oriented platform:** application to building energy performance simulation. 12th International IBPSA Building Simulation Conference. Sydney, Australia. 2011.
- DAWOOD, S.; LORD, R.; DAWOOD, N. **Development of a visual whole life-cycle energy assessment framework for built environment**. Winter Simulation Conference 2009. Texas, USA. 2009.
- DELFOSE, V. et al. **Some advice for migrating to IFC**. 17th International Conference on Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA). Chennai, India. 2012.
- DELGHUST, M. et al. **Enrichment of Single-Zone Edb-Data Into Multi-Zone Models using BIM-Based Parametric Typologies**. 14th International IBPSA Building Simulation Conference. Hyderabad, India. 2015.
- DENG, Y. C.; DAS, M.; CHENG, J. C. P. **A Framework for Integrating Energy Simulation Data in Building Information Modeling**. 3rd International Conference on Civil Engineering, Architecture and Sustainable Infrastructure (ICCEASI). Hong Kong, China. 2015.
- DU, R. W. et al. The Technique of Computer Simulation Aided Architecture Design in the BIM Environment. **Applied Mechanics and Materials**, v. 368-370, p. 130-133, 2013.
- FERRARI, P. C.; SILVA, N. F.; LIMA, E. M. **Building Information Modeling and Interoperability with Environmental Simulation Systems**. International Joint Conference on Computer, Information, Systems Sciences and Engineering. USA. 2008
- Fisher, Al. Engineering Integration: Real-Time Approaches to Performative Computational Design. **Architectural Design**, v. 82, n. 2, p. 112-117, 2012.
- GIANNAKIS, G. I. et al. **A Methodology to Automatically Generate Geometry and Material Inputs for Energy Performance Simulation from IFC BIM Models**. 14th International IBPSA Building Simulation Conference. Hyderabad, India. 2015.
- HITCHCOCK, R. J.; WONG, J. **Transforming IFC architectural view BIMs for energy simulation:** 2011. 12th International IBPSA Building Simulation Conference. Sydney, Australia. 2011.
- HIYAMA, Kyosuke et al. A new method for reusing building information models of past projects to optimize the default configuration for performance simulations. **Energy and Buildings**, v. 73, p. 83-91, 2014.
- HU, Ming. **Performance-based design**. 18th International Conference on Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA). Singapore. 2013.
- HUAMING, Qu; HAO, Wang; LEJIN, Zhang. **Influence study of energy consumption in different flats of a high residential building in north part of China**. 2nd International Conference on Sustainable Energy and Environmental Engineering (ICSEEE). Shenzhen, China. 2014.
- IVANOVA, I.; KIESEL, K.; MAHDAVI, A. **BIM-generated data models for EnergyPlus: A comparison of gbXML and IFC Formats**. 14th International IBPSA Building Simulation Conference. Hyderabad, India. 2015.

- JAMNICKY, M. **Building Information Modeling with static and dynamic daylight analysis.** International Conference on Advanced Building Construction and Materials (ABCM 2013). Kocovce, Slovakia. 2013.
- JEONG, W. S. et al. **Visualization of building energy performance in building information models.** 33rd Annual Conference of the Association-for-Computer-Aided-Design-in-Architecture (ACADIA). Cambridge, Canada. 2013.
- JONES, N. L. et al. **Automated translation and thermal zoning of digital building models for energy analysis.** 13th International IBPSA Building Simulation Conference. Chambéry, France. 2013.
- JOO, J. S. et al. **Development of web-based sun-hours and energy analysis system using IFC.** ASim IBPSA Conference. China. 2012.
- KIM, D.; LEE, S.; KIM, S. A. **A Visualization System for the Comfort Analysis of Modular Architecture: A Case Study.** 9th Annual International Conference on Cooperative Design, Visualization, and Engineering (CDVE). Osaka, Japan. 2012.
- KIM, Hyunjoo; ANDERSON, Kyle. Energy Modeling System Using Building Information Modeling Open Standards. **Journal of Computing in Civil Engineering**, v. 27, n. 3, p. 203-211, 2013.
- KIM, J. B. et al. Developing a physical BIM library for building thermal energy simulation. **Automation in Construction**, v. 50, p. 16-28, 2014.
- KIM, Ka-Ram; YU, Jungho. A Method for Extracting Geometry Data from IFC File for Building Energy Load Analysis. *Journal of the Architectural Institute of Korea Planning & Design*, v. 28, n. 5, p. 241-248, 2012.
- KIM, S.; WOO, J. H. **Analysis of the differences in energy simulation results between building information modeling (BIM)-based simulation method and the detailed simulation method.** Winter Simulation Conference (WSC)/Conference on Modeling and Analysis for Semiconductor Manufacturing (MASM). Phoenix, USA. 2011.
- KIM, Y. J. et al. **Self-activating uncertainty analysis for BIM-based building energy performance simulations.** 12th International IBPSA Building Simulation Conference. Sydney, Australia. 2011.
- KOTWAL, Thomas; PONOUM, Ratcharit; BRODRICK, James. BIM for Energy Savings. *ASHRAE Journal*, v. 53, n. 9, 2011.
- LEAL, S. et al. **BAUSIM 2014: a prototypical automated building modeling tool.** 5th German-Austrian IBPSA Conference BauSIM. Aachen, Germany. 2014.
- Lee, K. H.; Kim, I. H.; Choo, S. Y. Model study of design components for energy-performance-based architectural design using BIM LOD 100. **Journal of Green Building**, v. 10, n. 2, p. 179-197, 2015.
- LEE, S.; SONG, D. Evaluation of wind environment around the building in the early design stages using BIM-based CFD simulation. **International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration**, v. 19, n. 4, p. 263-272, 2011.
- LILIS, G.N.; GIANNAKIS, G.I.; ROVAS, D.V. **Detection and semi-automatic correction of geometric inaccuracies in IFC files.** 14th International IBPSA Building Simulation Conference. Hyderabad, India. 2015.

- MA, J. Y. et al. **A Study on BIM based Energy Efficient Design Improvement for Rural Standard Drawing and Specification in South Korea Focusing on Using Buffer-Zone.** 29th Conference on Education in Computer Aided Architectural Design in Europe (eCAADe). Ljubljana, Slovenia, 2011.
- MAILE, T. et al. **BIM - geometry modelling guidelines for building energy performance simulation.** 13th International IBPSA Building Simulation Conference. Chambéry, France. 2013.
- MOON, H. J. et al. **Case studies for the evaluation of interoperability between a BIM based architectural model and building performance analysis programs.** 12th International IBPSA Building Simulation Conference. Sydney, Australia. 2011.
- MYUNG-SIK, L. et al. Prototype Development for BIM based Thermal Insulation and Condensation Performance Evaluation of Apartment Housings. **Architectural Research**, v. 17, n. 2, p. 75-81, 2015.
- NAROWSKI, Piotr; STASIERSKI, Jacek; WERESZCZYŃSKI, Piotr. **Modelling of conduction transfer functions for typical thermal bridges identified in BIM data.** 12th International IBPSA Building Simulation Conference. Sydney, Australia. 2011.
- PAUWELS, P. et al. A semantic rule checking environment for building performance checking. **Automation in Construction**, v. 20, n. 5, p. 506-518, 2011.
- PELKEN, P. M. et al. "Virtual Design Studio" - Part 1: Interdisciplinary design processes. **Building Simulation**, v. 6, n. 3, p. 235-251, 2013.
- PELKEN, P. M. et al. "Virtual Design Studio" - Part 2: Introduction to overall and software framework. **Building Simulation**, v. 6, n. 3, p. 253-268, 2013.
- PETRUSHEVSKI, F. et al. **Quality assessment of automatically generated simplified thermal building models.** 14th International IBPSA Building Simulation Conference. Hyderabad, India. 2015.
- REMMEN, P. et al. **An Open Framework for Integrated BIM-Based Building Performance Simulation using Modelica.** 14th International IBPSA Building Simulation Conference. Hyderabad, India. 2015.
- ROBERT, S. et al. **Plumes: towards a unified approach to building physical modeling.** 13th International IBPSA Building Simulation Conference. Chambéry, France. 2013.
- ROSE, C. M.; BAZIANAC, V. An algorithm to generate space boundaries for building energy simulation. **Engineering with Computers**, v. 31, n. 2, p. 271-280, 2013.
- Runsheng, Wang; Jing, Xu. **Green technology applied in the greening of buildings' outer skins.** 2nd International Conference on Green Buildings Technologies and Materials (GBTM 2012). Wuhan, China. 2012.
- RYU, H. S. et al. **Development of optimized geometry for low energy super tall office with BIM Decision on ratio of lateral to longitudinal length and orientation in early design stage.** 29th Conference on Education in Computer Aided Architectural Design in Europe (eCAADe). Ljubljana, Slovenia, 2011.
- SANGUINETTI, P.; EASTMAN, C.; AUGENBROE, G. **Courthouse energy evaluation: BIM and simulation model interoperability in concept design.** 11th International IBPSA Building Simulation Conference. Glasgow, Scotland. 2009.

- SCHERER, R. J. et al. **Ontology-based integration of building and related information models for integrated lifecycle energy management.** 9th European Conference on Product and Process Modelling. Reykjavik, Iceland. 2012.
- SEE, R. et al. **Development of a user interface for the Energyplus whole building energy simulation program.** 12th International IBPSA Building Simulation Conference. Sydney, Australia. 2011.
- SHOUBI, M. V. et al. Reducing the operational energy demand in buildings using building information modeling tools and sustainability approaches. **Ain Shams Engineering Journal**, v. 6, n. 1, p. 41-55, 2015.
- SMITH, D. K. **Ensuring building performance through simulation.** Winter Simulation Conference 2009. Texas, USA. 2009.
- SOMBOONWIT, N. **Modeling for building energy performance improvement in accordance with the local climatic settings: a case of a generalizable building design of intermediate health care facilities in Thailand.** 12th International IBPSA Building Simulation Conference. Sydney, Australia. 2011.
- SOMBOONWIT, Nuttasit; SAHACHAISAREE, Nopadon. **Healthcare Building: Modelling the Impacts of Local Factors for Building Energy Performance Improvement in Thailand.** ASEAN Conference on Environment-Behaviour Studies (AcE-Bs) on Way of Life - Socio-Economic and Cultural Context. Bangkok, Thailand. 2012.
- STAVRAKANTONAKI, M. **Daylight Performance Simulations and 3D Modeling in BIM and non-BIM Tools Interoperability and accuracy** - an experience aiming to a more integrated and interdisciplinary approach. 31st International Conference on Education and Research in Computer Aided Architectural Design in Europe (eCAADe). Delft, Netherlands. 2013.
- SU, Ying-Ming. **Incorporation of Computational Fluid Dynamics into the Effect of Building Layout on the Wind Environment: A Case Study of Shezi Island in Taipei.** World Congress on Engineering (WCE 2013). London, UK. 2013.
- TAHMASEBI, M. M. et al. **Assessment of the variation impacts of window on energy consumption and carbon footprint.** International Conference on Green Buildings and Sustainable Cities (GBSC). Bologna, Italy. 2011.
- THOMAS, D. et al. **Multiscale co-simulation of Energyplus and Citysim models derived from a Building Information Model.** 5th German-Austrian IBPSA Conference BauSIM. Aachen, Germany. 2014.
- THOMAS, D.; SCHLUETER, A. **Customizable continuous building simulation using the design performance toolkit and Kepler scientific workflows.** 9th European Conference on Product and Process Modelling. Reykjavik, Iceland. 2012.
- TOTH, B. et al. **Custom digital workflows: A new framework for design analysis integration.** 17th International Conference on Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA). Chennai, India. 2012.

- TOTH, B. et al. **Sky high and back again: the evolution of simulation-based design from aerospace to construction.** 12th International IBPSA Building Simulation Conference. Sydney, Australia. 2011.
- TOTH, B.; DROGEMULLER, R.; FRAZER, J. **Information dependencies between architects and services engineers for early design evaluation: A framework for an energy design tool for architects.** 15th International Conference on Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA). Hong Kong, China. 2010.
- VERSTRAETEN, R. et al. IFC-based calculation of the Flemish energy performance standard. 7th European Conference on Product and Process Modelling. Sophia Antipolis, France. 2008.
- WIMMER, R. et al. **Data-requirements specification to support BIM-based HVAC definitions in Modelica.** 5th German-Austrian IBPSA Conference BauSIM. Aachen, Germany. 2014.
- WIMMER, R. et al. **Implementation of Advanced Bim-Based Mapping Rules for Automated Conversions to Modelica.** 14th International IBPSA Building Simulation Conference. Hyderabad, India. 2015.
- WINDISCH, R. et al. **Virtual wind laboratory for the aerodynamic analysis of building structures.** 9th European Conference on Product and Process Modelling. Reykjavik, Iceland. 2012.
- WONG, J. **The role of MVD in defining curtain wall system for energy analysis.** 12th International IBPSA Building Simulation Conference. Sydney, Australia. 2011.
- WONG, J.; PLUME, J.; THOMAS, P. C. **Base case data exchange requirements to support thermal analysis of curtain walls.** 7th European Conference on Product and Process Modelling. Sophia Antipolis, France. 2008.
- XIA, Haishan; YI, Kuangyi. **Study on Collaborative Design of Green Building Based on BIM Technology.** International Conference on Low-carbon Transportation and Logistics, and Green Buildings (LTLGB). Beijing, China. 2012.
- Xu, Gang; Ding, Gefei. **Research on the Expression of Energy Consumption Information of Public Buildings in BIM.** International Conference on Construction and Real Estate Management. Kansas City, USA. 2012.
- YAN, W. et al. **Interfacing BIM with building thermal and daylighting modeling.** 13th International IBPSA Building Simulation Conference. Chambéry, France. 2013.
- YUAN, Y.; ZHANG, Y. L. **Research on BIM-Based Collaboration Platform to Integrate Digital Technology for Building Design, Assessment and Simulation: A Case Study on Residential Building.** 2nd International Conference on Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications (SMTA). Paris, France. 2015.
- YUAN, Yan; YUAN, Jingling. **The theory and framework of integration design of building consumption efficiency based on BIM.** International Conference on Advanced in Control Engineering and Information Science (CEIS). Dali, China. 2011.
- ZENG, M. **Future of Green BIM designing and tools.** 4th International Conference on Technology of Architecture and Structure (ICTAS 2011). Xian, China. 2011.

ZHANG, Runmei; LIU, Changcheng; XU, Tao. **Case Study of BIM-Based Building Energy Evaluation.** International Conference on Low-carbon Transportation and Logistics, and Green Buildings (LTLGB). Beijing, China. 2012.

APÊNDICE C - RESULTADOS COMPLEMENTARES

Os gráficos a seguir apresentam os resultados da “Categoria 7: Método de Interoperabilidade” combinados com os resultados das outras categorias.

Gráfico 17: Resultados combinados das categorias “Método de Interoperabilidade” e “Método da Pesquisa” – percentagens no total (por classe).

Gráfico 18: Resultados combinados das categorias “Método de Interoperabilidade” e “Aplicação da Pesquisa relativa à Integração” – percentagens no total (por classe).

Gráfico 19: Resultados combinados das categorias “Método de Interoperabilidade” e “Disciplina Geral de Simulação” – percentagens no total (por classe).

Gráfico 20: Resultados combinados das categorias “Método de Interoperabilidade” e “Fase do Projeto” – percentagens no total (por classe).

ANEXO A - NÍVEIS DE MATURIDADE BIM

Tabela 5 - Estágios de Maturidade BIM. Adaptado de ¹².

<p>pre BIM</p>	<p>Estágio pré-BIM</p> <ul style="list-style-type: none"> • documentação 2D desenhada à mão ou por meio de ferramentas CAD ou 3D não-paramétrico, tais como AutoCAD® e SketchUP®; • muita dependência de documentação 2D para descrever a realidade 3D; • mesmo quando existem visualizações 3D, estas são frequentemente desconexas e dependentes da documentação e detalhamento bidimensionais; • quantidades, estimativas de custo e especificações geralmente não são derivadas do modelo de visualização 3D, nem vinculadas à documentação; • não priorização de práticas colaborativas entre as partes envolvidas; • fluxo de trabalho linear e assíncrono; • baixo investimento em tecnologia; • falta de interoperabilidade.
<p>1 <i>object-based modelling</i></p>	<p>Estágio 1 - modelagem paramétrica</p> <ul style="list-style-type: none"> • implantação de programas paramétricos como ArchiCAD®, Revit® e Digital Project®; • modelos 3D isolados (por disciplina e fases de projeto); • entregáveis BIM: modelos de projeto de arquitetura e instalações usados principalmente para automatizar a geração e coordenação de documentação 2D e visualização 3D, exportações de base de dados (tabelas de especificações, quantitativos, custos, etc.); • práticas colaborativas: similar ao estágio pré-BIM - não há intercâmbios de modelos significativos entre disciplinas diferentes; intercâmbio de dados entre as partes envolvidas são unidirecionais e a comunicação continua desconexa e assíncrona; • como apenas pequenas mudanças processuais ocorrem neste estágio, as relações contratuais, alocação de riscos e comportamento organizacional do estágio pré-BIM persistem; no entanto, a aceleração das fases de projeto acaba ocorrendo (ver Figura 10) devido às características intrínsecas ao BIM que demandam a antecipação de soluções e detalhes de projeto; • em virtude de a ênfase estar essencialmente relacionada à aplicação de ferramentas de autoria BIM (para criação de modelos) em projeto, pode decorrer a falsa impressão de que BIM se trata apenas de tecnologia, dada a necessidade de se apropriar dessa nova tecnologia e investir em recursos de renovação de infraestrutura e <i>software</i>; • em relação ao estágio anterior: grandes mudanças em tecnologia, médias mudanças em processos e pequenas mudanças em políticas.
<p>2 <i>model-based collaboration</i></p>	<p>Estágio 2 - colaboração baseada em modelos</p> <ul style="list-style-type: none"> • após desenvolver competências de modelagem no estágio 1, as diferentes disciplinas envolvidas no estágio 2 colaboram ativamente entre si; • intercâmbio de modelos 3D entre diferentes disciplinas por meio de formatos proprietários (ex.: entre Revit® Architecture e Revit® Structure por meio do formato de arquivo .RVT) ou não-proprietários (ex.: entre ArchiCAD® e Tekla® por meio do formato de arquivo IFC);

- intercâmbio de modelos 3D entre diferentes fases de projeto, o que permite a geração de estudos 4D (planejamento da construção) e 5D (estimativa de custos);
- apesar de a comunicação entre as partes envolvidas continuar assíncrona, as linhas de demarcação que antes diferenciavam papéis, disciplinas e fases de projeto começam a desaparecer; algumas alterações contratuais começam a se fazer necessárias, uma vez que intercâmbios de modelos passam a ser mais frequentes e começam a substituir processos baseados em documentação 2D;
- a granularidade dos modelos também é alterada, com modelos de alto detalhamento substituindo modelos anteriormente pouco detalhados;
- a aceleração e antecipação das fases de projeto fica ainda mais evidente – inclusive com início da sobreposição de fases (denominada “*fast-tracking*”) para ganhar tempo (ver Figura 11);
- a adoção BIM neste estágio requer a implementação de coordenação BIM nos projetos, associada a uma mudança de cultura (relacionada a processos) da empresa.
- em relação ao estágio anterior: pequenas mudanças em tecnologia, mudanças médias em políticas e processos.

3 network-based integration

Estágio 3 - integração baseada em redes

- modelos integrados são criados, compartilhados e mantidos colaborativamente ao longo das fases de projeto por meio de tecnologias de servidores de modelo (usando formatos de arquivo proprietários, abertos ou não-proprietários), bases de dados únicas integradas ou federadas distribuídas e/ou soluções SaaS (*Software as a Service*);
- os modelos tornam-se interdisciplinares e ricos em semântica, permitindo análises complexas já nas fases iniciais de concepção do projeto;
- entregáveis BIM: se estendem além de propriedades semânticas dos objetos do modelo para incluir inteligência de negócio, princípios de *Lean Construction*, políticas de sustentabilidade e custos do ciclo de vida completo;
- o trabalho colaborativo agora ocorre em “espirais interativas” ao redor de um modelo de dados amplo, unificado e compartilhável;
- este processo simultâneo e recursivo causa a sobreposição completa das fases de projeto, formando um processo sem diferenciação de fases ou a “construção simultânea” com o objetivo de otimizar construtibilidade, operabilidade e segurança;
- requer grandes reconsiderações de relações contratuais, modelos de alocação de riscos e fluxos processuais;
- este estágio tem como pré-requisito um nível de maturidade das tecnologias de rede e *software* que permita um modelo interdisciplinar intercambiável de modo a prover acesso de via dupla entre todos os agentes;
- em relação ao estágio anterior: mudanças drásticas nas políticas e processos que se apoiam em mudanças significativas nas bases tecnológicas usadas.

post BIM

Estágio pós-BIM

- para Succar¹², o termo IPD (*Integrated Project Delivery* ou Entrega Integrada de Projeto, tradução nossa) – termo cunhado pela *American Institute of Architects* em 2007¹⁹⁶ – é adequado para representar a visão de longo-prazo do BIM como um amálgama de tecnologias, processos e políticas da indústria AECO. O IPD é uma abordagem de desenvolvimento de projeto que agrega pessoas, práticas, sistemas e

estruturas organizacionais num processo intensamente colaborativo objetivando otimizar resultados, agregar valor para o proprietário, reduzir perdas e maximizar a eficiência no projeto, fabricação e construção dos edifícios. A colaboração eficiente entre proprietário, projetistas e construtora deve ocorrer desde os estágios iniciais do processo de projeto e continuar até o início da operação do edifício, o que requer mudanças substanciais nos arranjos contratuais tradicionais. Os princípios que regem o IPD envolvem respeito e confiança mútua entre todos os envolvidos, benefícios e recompensas (gratificações) mútuas, inovação na colaboração e tomada de decisão, antecipação na definição de metas e do envolvimento de participantes-chave, intenso planejamento, comunicação aberta, tecnologia apropriada e organização/liderança.

Figura 10: Fases do ciclo de vida da construção no Estágio de Maturidade BIM 1 - modelo linear. Fonte: ¹².

Figura 11: Fases do ciclo de vida da construção no Estágio de Maturidade BIM 2 - modelo linear. Fonte: ¹².

Figura 12: Fases do ciclo de vida da construção no Estágio de Maturidade BIM 3 - modelo linear. Fonte: ¹².