UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ALINE MEDEIROS FERREIRA DE ARAUJO

AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA ENERGÉTICO EM EDIFICAÇÕES A PARTIR DE MODELAGEM BIM E SIMULAÇÃO TERMO ENERGÉTICA: APLICAÇÃO UTILIZANDO REVIT E ENERGYPLUS

CURITIBA

2018

ALINE MEDEIROS FERREIRA DE ARAUJO

AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA ENERGÉTICO EM EDIFICAÇÕES A PARTIR DE MODELAGEM BIM E SIMULAÇÃO TERMO ENERGÉTICA: APLICAÇÃO UTILIZANDO REVIT E ENERGYPLUS

Dissertação apresentada ao curso de Pós Graduação em Engenharia de Construção Civil, Área de Concentração Ambiente Construído e Gestão, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Construção Civil,

Orientador: Prof. Dr. Sérgio Fernando Tavares

CURITIBA

2018

Catalogação na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

A663a Araujo, Aline Medeiros Ferreira de
Avaliação de ciclo de vida energético em edificações a partir de modelagem BIM e simulação termo energética: aplicação utilizando Revit e Energyplus / Aline Medeiros Ferreira de Araujo. – Curitiba, 2018.

TeseDissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, 2018.

Orientador: Sérgio Fernando Tavares. -

1. Modelagem da informação da construção. 2. Avaliação do ciclo de vida energético. 3. Edificações . I. Universidade Federal do Paraná. II. Tavares, Sérgio Fernando. Título.

CDD: 690

Bibliotecária: Vanusa Maciel - CRB - 9/1928

TERMO DE APROVAÇÃO

ALINE MEDEIROS FERREIRA DE ARAUJO

AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA ENERGÉTICO EM EDIFICAÇÕES A PARTIR DE MODELAGEM BIM E SIMULAÇÃO TERMO ENERGÉTICA: APLICAÇÃO UTILIZANDO REVIT E ENERGYPLUS

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, Área de Concentração: Ambiente Construído e Gestão, Setor de Tecnologia, da Universidade Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora:

Orientador: _____

Prof. Dr. Sergio Fernando Tavares

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, UFPR.

Examinadores: _____

Prof. Dr. Sergio Scheer

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, UFPR.

_____

Prof. Dr. Roberto Lamberts

Departamento de Engenharia Civil, UFSC.

Curitiba, 03 de maio de 2018

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao professor Sérgio Tavares, por todo incentivo, apoio, confiança e orientação.

Agradeço também à toda minha família, em especial Alessandra, Wilma, Claiton e Alice, pela paciência e suporte.

Ao meu companheiro Fernando, pelo incentivo, por ter me acompanhado em todo esse caminho, pela paciência, carinho e estímulo.

Agradeço aos meus amigos e colegas pelo apoio.

Agradeço também aos professores Sérgio Scheer e Aloísio Schmid e todos professores do PPGECC pelo conhecimento compartilhado e contribuições.

Por fim, agradeço à CAPES pelo auxílio financeiro durante o desenvolvimento desta pesquisa.

“Today, more than ever before, life must be characterized by a sense of Universal responsibility, not only nation to nation and human to human, but also human to other forms of life''

Tenzin Gyatso, Dalai Lama

RESUMO

Os métodos tradicionais de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) no setor da Arquitetura, Engenharia e Construção (AEC) exigem esforços e períodos de tempo significativos para serem realizados, ocorrendo normalmente ao final da construção. Visto que o uso do Building Information Modeling (BIM) vem se desenvolvendo cada vez mais na indústria de AEC, o presente trabalho propõe e prescreve um método de condução de Avaliação de Ciclo de Vida Energético (ACVE) em edificações usando recursos de modelagem em BIM e simulação termo-energética. Com objetivo de auxiliar a tomada de decisão em projetos para edificações mais sustentáveis, o método de ACVE proposto tem o intuito de permitir análises e/ou comparações para diferentes configurações de projetos. O método de ACVE proposto analisa impactos durante todo ciclo de vida da edificação, incluindo as fases de pré-operação, operação e pós-operação. As categorias de impacto avaliadas neste método de ACV são: consumo de energia e emissão de CO_2. Através do método de pesquisa *Design Science Research*, o artefato desenvolvido é o próprio método de ACVE aplicado com o uso dos software Revit e EnergyPlus. O estudo está contextualizado para projetos de edificações brasileiras, ou seja, são consideradas informações tecnológicas, processos de projeto, sistemas e processos construtivos, legislações, normalizações, bancos de dados de materiais, matriz de fontes energéticas e outros aspectos relacionados e adaptados à realidade do Brasil. A validação do método de ACVE, foi realizada através da criação e aplicação de um modelo de teste para uma edificação residencial localizada na cidade de Curitiba. Os resultados da pesquisa apresentam uma análise qualitativa da aplicação da ACVE, descrevendo os pontos positivos do artefato desenvolvido e dificuldades encontradas na aplicação e testes. O método de ACVE proposto se mostrou satisfatório como ferramenta de auxílio na seleção de materiais e tomada de decisão em projetos, permitindo fácil visualização dos resultados de forma a favorecer a identificação clara e detalhada dos elementos que exercem maior influência nos impactos durante todo ciclo de vida. A possibilidade de criar bibliotecas próprias, com parâmetros compartilhados no Revit permite que o método seja aplicado diversas vezes pelo projetista ou profissional responsável pelas análises energéticas e de ciclo de vida de forma mais automatizada. O processo de exportação do modelo BIM para o software de simulação termo-energética apresentou vantagens significativas, principalmente quanto à atribuição das propriedades dos materiais aos seus respectivos elementos. A exportação foi realizada no formato gbXML para o formato IDF através da ferramenta OpenStudio e com o auxílio do plug-in Euclid no Sketchup. Ao final do trabalho também está prescrito um passo à passo para replicação da método de ACVE. Uma das principais considerações feitas em relação ao que foi proposto é que a quantificação dos impactos ambientais estimados a partir do método testado não poderá servir como base para comparar os impactos causado por duas edificações diferentes. Não faz sentido comparar o consumo de energia e emissões de gás carbônico entre construções que estão localizadas em diferentes contextos climáticos, culturais, regionais e geográficos, pois estas condições tem influência direta nos resultados.

Palavras-chaves: Avaliação do Ciclo de Vida Energético. Modelagem da Informação da Construção. Revit. EnergyPlus

ABSTRACT

Traditional Life Cycle Assessment (LCA) methods in Architecture, Engineering and Construction (AEC) requires several efforts to be performed, and usually occurring at the end of construction. Since Building Information Modeling (BIM) is increasing and developing on AEC industry, this work proposes and prescribes a Life Cycle Energy Assessment (LCEA) conduction method using BIM modeling and thermal and energy simulation. The LCEA proposed method intent to allow design analysis and comparisons, helping in decision-making processes for sustainable constructions. This method analyzes impacts throughout building life cycle, including the pre-operation, operation and post-operation phases. Impacts categories that are considered in this research include energy consumption and CO_2 emissions. Through the Design Science Research method, the artifact developed is the LCEA method itself applied with Revit and EnergyPlus software use. The research is contextualized for Brazilian building projects. In other words, it was considered technological information, design and construction processes, legislations, standards, materials databases, energy sources and other aspects applied in Brazil. The LCEA method validation occurs through a test model creation and application for a residential building located at Curitiba. The research results presents a qualitative analysis about the LCEA method application. It describes the artifact gains and difficulties found by applying and testing it. The LCEA method proposed proved to be satisfactory as a material selection and decision-making tool, allowing easy results visualization, showing clearly and detailing elements that exert the greatest influence on the impacts throughout the life cycle. Possibility of creating own libraries with shared parameters in Revit allows method to be applied in an automated way several times by designers and professionals responsible for energy and life cycle analyzes. The exportation process from BIM model file to the energy simulation software presented advantages, regarding materials properties assignment to their respective elements. The exportation was performed in gbXML file format to the IDF file through OpenStudio tool and with Euclid plug-in in SketchUp. In the end, also there is step by step prescription of the LCEA method, in order to allow its replication. It is important to emphasize that environmental impacts estimated from the tested method should not be compared with impacts caused by different buildings. It makes no sense to compare energy consumption and carbon dioxide emissions between buildings that are located in different climatic, cultural, regional and geographic contexts, as these conditions have a direct influence on final results.

Keywords: Life Cycle Energy Assessment. Building Information Modeling. Revit. EnergyPlus

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - CURVA DE MACLEAMY 24

FIGURA 2 - PROTOCOLO DA PESQUISA DE ACORDO COM ETAPAS DA DSR 31

FIGURA 3 - FASES DE ACVE EM UMA CONSTRUÇÃO 38

FIGURA 4 - ETAPAS DO CICLO DE VIDA DE EDIFICAÇÕES 58

FIGURA 5 - PARTES DO MODELO BIM 61

FIGURA 6 - PARÂMETROS DE TIPO CRIADOS E APLICADOS AOS ELEMENTOS TIPO 62

FIGURA 7 - PARÂMETROS DE INSTÂNCIA CRIADOS E APLICADOS AOS MATERIAIS 63

FIGURA 8 - FLUXOGRAMA PRA QUANTIFICAR IMPACTOS DOS RESÍDUOS NA FASE DE PÓS-OPERAÇÃO 69

FIGURA 9 – TABELA DE LEVANTAMENTO DE MATERIAIS COM PARÂMETROS INSTÂNCIA 72

FIGURA 10 - TABELA DE LEVANTAMENTO DE MATERIAIS COM PARÂMETROS SOMADOS AO FINAL 72

FIGURA 11 - TABELA DA FAMÍLIA DE PAREDES COM CÁLCULO DE EE TOTAL POR PARÂMETROS DE TIPO 73

FIGURA 12 – EXPORTAÇÃO DO MODELO BIM NO FORMATO GBXML PELO MENU DO REVIT 76

FIGURA 13 - JANELA PARA VERIFICAÇÃO E CONFIGURAÇÃO DO MODELO PARA EXPORTAÇÃO POR GBXML NO REVIT 76

FIGURA 14 - ARQUIVO IDF ABERTO NO EUCLID E BARRA DE FERRAMENTA DO PLUG-IN 77

FIGURA 15 - INTERFACE DO ARQUIVO IDF NO IDF EDITOR 77

FIGURA 16 - PLANTA BAIXA DO MODELO TESTE 81

FIGURA 17 - MODELO 3D DA EDIFICAÇÃO – ARQUITETÔNICO, ESTRUTURAL E HIDRÁULICO 82

FIGURA 18 – MODELO 3D BIM COM TODOS OS VÍNCULOS CARREGADOS.....82

FIGURA 19 - CARTA BIOCLIMÁTICA DE CURITIBA, ANO TRY DE 1969.....90

FIGURA 20 - SEÇÕES DE UM COMPONENTE COM CAMADAS HOMOGÊNEAS E NÃO HOMOGÊNEAS.....93

FIGURA 21 - REPRESENTAÇÃO DE COMPONENTE EQUIVALENTE.....93

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 - DISTRIBUIÇÃO DA DESPESAS DE CONSUMO MÉDIO MENSAL FAMILIAR, PERÍODO DE 2008-2009 20

GRÁFICO 2 - EVOLUÇÃO DA TARIFA DE ENERGIA ELÉTRICA, ACUMULADO NO ANO EM %.....22

GRÁFICO 3 - TEMPERATURAS SIMULADAS PARA O MÊS DE JANEIRO 98

GRÁFICO 4 - TEMPERATURAS SIMULADAS PARA O MÊS DE JULHO.....99

GRÁFICO 5 - CONSUMO DE ENERGIA POR FASE DO CICLO DE VIDA.....100

GRÁFICO 6 - CONSUMO ENERGÉTICO POR TIPO DE EQUIPAMENTO EM 50 ANOS DE OPERAÇÃO DA EDIFICAÇÃO 101

GRÁFICO 7 – EMISSÃO DE CO2 POR FASE DO CICLO DE VIDA.....101

GRÁFICO 8 - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DA ACVE DO MODELO TESTE COM ACVE DE REFERENCIA 102

LISTA DE GRÁFICOS

QUADRO 1 – ESPECIFICAÇÃO DOS DIFERENTES LOD.....48

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - DISTRIBUIÇÃO DO CONSUMO ENERGÉTICO NO BRASIL POR DIFERENTES SETORES INDUSTRIAIS 20

TABELA 2 - 16 PARÂMETROS DO MODELO CRIADOS PARA A REALIZAÇÃO DA ACVE 64

TABELA 3 – 19 PARÂMETROS DE CÁLCULO CRIADOS PARA A REALIZAÇÃO DA ACVE 65

TABELA 4 – MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO UTILIZADOS, ÍNDICES DE ENERGIA EMBUTIDA DE FABRICAÇÃO, TRANSPORTE E TAXA DE DESPERDÍCIO 83

TABELA 5 - ÍNDICES DE CO_2 EQUIVALENTE NA FABRICAÇÃO E TRANSPORTE DE MATERIAIS 84

TABELA 6 - VIDA ÚTIL DOS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO E FATOR DE SUBSTITUIÇÃO 85

TABELA 7 - ÍNDICES DE IMPACTOS GERADOS NA DESTINAÇÃO FINAL DOS RESÍDUOS DA DESCONSTRUÇÃO 86

TABELA 8 - CLASSIFICAÇÃO DO POTENCIAL DE RECICLABILIDADE DOS MATEIRIAIS 86

TABELA 9 - PADRÕES DE OCUPAÇÃO NOS AMBIENTES DE PERMANÊNCIA PROLONGADA 88

TABELA 10 - PADRÕES DE ILUMINAÇÃO NOS AMBIENTES DE PERMANÊNCIA PROLONGADA 89

TABELA 11 - PROPRIEDADES TÉRMICAS DOS MATERIAIS 91

TABELA 12 - PADRÃO DE USO DOS EQUIPAMENTOS 94

TABELA 13 - EMISSÃO DE CO_2 NA PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA 95

TABELA 14 – EMISSÃO DE CO_2 NA QUEIMA DE COMBUSTÍVEIS PARA COCÇÃO 95

TABELA 15 - RESULTADOS PARCIAIS DA ACVE: VALORES DE SAÍDA DOS PARÂMETROS NO REVIT 96

TABELA 16 - RESULTADOS PARCIAIS DA ACVE: CONSUMO DE ENERGIA POR SISTEMA.....97

TABELA 17 - RESULTADOS PARCIAIS DA ACVE: EMISSÃO DE CO_2 POR SISTEMA.....97

TABELA 18 - RESULTADOS DA SIMULAÇÃO – CONSUMO DE ENERGIA E EMISSÃO DE CO_2 DURANTE A OPERAÇÃO DO EDIFÍCIO.....99

LISTA DE SIGLAS

ABDI	- Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial
ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACV	- Avaliação de Ciclo de Vida
ACVE	- Avaliação e Ciclo de Vida Energética
AEC	- Arquitetura, Engenharia e Construção
ANEEL	- Agência Nacional de Energia Elétrica
ASHRAE	- American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
BEN	- Balanço Energético Nacional
BIM	- Building Information Modeling
CAD	- Computer-Aided Design
CAPES	- Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CB3E	- Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações
CBIC	- Câmara Brasileira da Indústria da Construção
CFD	- Computacional Fluid Dynamics
CO_2	- Dióxido de Carbono
CONAMA	- Conselho Nacional do Meio Ambiente
CONMETRO	- Conselho Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial
DAP	- Declaração Ambiental de Produto
DOE	- Departamento de Energia dos EUA
DPI	- Densidade de Potência de Iluminação
DSR	- Design Science Research
EE	- Energia Embutida
ELETROBRAS	- Centrais Elétricas Brasileiras S.A
EN	- European Norms
ENCE	- Etiqueta Nacional de Conservação de Energia
EPD	- Environmental Product Declarations
EPE	- Empresa de Pesquisa Energética
EPW	- Energyplus Weather Data
EUA	- Estado Unidos da América
FINEP	- Financiadora de Estudos e Projetos

gbXML	- Green Building Extensible Markup Language
GEE	- Gases do Efeito Estufa
GLP	- Gás Liquefeito de Petróleo
HTML	- Hypertext Markup Language
IBGE	- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IBICT	- Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia
IDF	- Energyplus Input Data Files
IES-VE	- Integrated Environmental Solutions - Virtual Environment
IFC	- Industry Foundation Classes
INMETRO	- Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
IPCC	- Intergovernmental Panel on Climate Change
ISO	- International Organization for Standardization
KML	- Keyhole Markup Language
LABEEE	- Laboratório de Eficiência Energética em Edificações
LOD	- Load of Detail
MCTIC	- Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações
MDIC	- Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior
MEP	- Mechanical, Electrical and Plumbing
MPOG	- Ministério do Planejamento, Desenvolvimento e Gestão
NBR	- Norma Brasileira
NIST	- National Institute of Standards and Technology
NSGA-II	- Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm-II
OSM	- Openstudio Models
PBACV	- Programa Brasileiro de Avaliação do Ciclo de Vida
PBE	- Programa Brasileiro de Etiquetagem
PCM	- Phase Change Materials
PPGECC	- Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Construção Civil
PROCEL	- Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
RCC	- Resíduos de Construção Civil
RCD	- Resíduos de Construção e Demolição
RSL	- Revisão Sistemática da Literatura
RTQ-C	- Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas

RTQ-R	- Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais
SICV Brasil	- Banco Nacional de Inventários do Ciclo de Vida
SINDUSCON	- Sindicato da Indústria da Construção Civil
SLTI	- Secretaria de Logística e Tecnologia da Informação
TEP	- Tonelada Equivalente de Petróleo
TMY	- Typical Meteorological Year
TRY	- Test Reference Year
UFPR	- Universidade Federal do Paraná
UFSC	- Universidade Federal de Santa Catarina
XLS	- Excel Binary File Format
XML	- Extensible Markup Language
ZB	- Zona Bioblimática

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 18
1.1 PROBLEMA 18
1.2 OBJETIVO 19
1.3 JUSTIFICATIVA 19
1.4 CONTEXTUALIZAÇÃO NO PROGRAMA 25
1.5 ESTRATÉGIA E ESTRUTURA DA PESQUISA 28
1.5.1 Método de pesquisa 28
1.5.2 Unidade de análise 29
1.5.3 Delimitação do trabalho 29
1.5.4 Validade do artefato 30
1.5.5 Estrutura da pesquisa 30
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 33
2.1 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA 33
2.2 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA NA CONSTRUÇÃO CIVIL 36
2.3 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA ENERGÉTICO EM EDIFICAÇÕES 37
2.3.1 Fase de pré-operação 39
2.3.2 Fase de operação 39
2.3.3 Fase de pós-operação 42
2.4 FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS PARA ACV 45
2.5 BIM NA AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA 46
2.5.1 Ferramentas BIM para AVC 51
3 MÉTODO DE ACVE USANDO BIM E SIMULAÇÃO TÉRMO - ENERGÉTICA 58
3.1 DEFINIÇÃO DA ESTRUTURA DA AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA ENERGÉTICO 58
3.2 DESENVOLVIMENTO DO MÉTODO DE ACVE NOS SISTEMAS SELECIONADOS 59
3.2.1 Inserção de parâmetros no modelo BIM 60
3.2.2 Simulação termo-energética 73
3.2.3 Avaliação e interpretação dos resultados 80
4 APLICAÇÃO DO MODELO DE TESTE 81

4.1 DEFINIÇÃO DO PERFIL DA EDIFICAÇÃO E COMPOSIÇÃO DOS DADOS DE ENTRADA 81
4.1.1 Padrão residencial para o modelo de teste 81
4.1.2 Índices de energia embutida e CO_2 equivalente: 82
4.1.3 Vida útil dos materiais de construção 84
4.1.4 Índices de consumo de energia e emissão de CO_2 na fase de desconstrução 85
4.1.5 Dados de entrada para simulação energética na fase operacional 87
4.2 ANÁLISE DOS IMPACTOS AMBIENTAIS 96
4.2.1 Resultados no Revit - 1º passo 96
4.2.2 Resultados no EnergyPlus - 2º passo 97
4.2.3 Resultados final - 3º passo 100
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO 104
5.1 ANÁLISE QUALITATIVA DO MÉTODO DE ACVE PROPOSTO 104
5.2 DIFICULDADES E DETALHES INTRÍNSECOS ÀS FERRAMENTAS UTILIZADAS 106
5.3 REPLICABILIDADE DO ARTEFATO 108
5.4 PRESCRIÇÃO DO MÉTODO DE ACVE USANDO REVIT E ENERGYPLUS 109
6 CONCLUSÕES 111
6.1 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS E POSSIBILIDADES UTILIZANDO OUTRAS FERRAMENTAS 114
REFERÊNCIAS 117
APÊNDICE A – TABELAS COMPLETAS GERADAS NO REVIT 127
APÊNDICE B – RESULTADOS DAS TEMPERATURAS MENSAIS SIMULADAS PARA CADA AMBIENTE 131
ANEXO 1 – ARTIGO: INTEROPERABILIDADE DE FERRAMENTAS BIM E AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE EDIFICAÇÕES 136
ANEXO 2 – ARTIGO: BUILDING LIFE CYCLE ENERGY ASSESSMENT ON PRE OPERATION PHASE USING BIM 146
ANEXO 3 – ARTIGO: ANÁLISE DO PROCESSO DE EXPORTAÇÃO DE MODELO BIM DESENVOLVIDO NO REVIT PARA O ENERGYPLUS VIA OPENSTUDIO .. 157

1 INTRODUÇÃO

A Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) é comumente utilizada em setores como da indústria automotiva, equipamentos de manufatura e em desenvolvimento de produtos de consumo. Comparada a estes produtos, a construção civil possui características únicas. No caso de uma edificação, por exemplo, seu tempo de vida pode ser calculado em décadas, pode possuir múltiplas funções, e irá permanecer nem local único. Devido a estes fatores, a adoção de métodos de ACV em projetos de Arquitetura, Engenharia e Construção (AEC) tem sido limitada e normalmente é desenvolvida ao final da construção. Os métodos tradicionais de ACV exigem esforços e períodos de tempo significativos para serem realizados. As dificuldades em se aplicar ACV na indústria de AEC incluem desde a obtenção de dados a respeito dos impactos ambientais causados, sobre fluxos de materiais, até a definição das fronteiras do sistema. Adicionalmente, o uso do *Building Information Modeling* (BIM), ou modelagem da informação da construção em português, vem crescendo e se desenvolvendo cada vez mais na indústria de AEC, porém ainda existem muitas lacunas na interoperabilidade de sistemas, principalmente entre softwares próprios para ACV (BASBAGILL et al. 2013).

Uma vez que a aplicação da modelagem da informação da construção (BIM) em projetos permite agilizar processos, reduzir retrabalho, aprimorar a gestão e troca de informação, pressupõe-se que ao unir a modelagem em BIM e a Avaliação de Ciclo de Vida seja possível realizar a ACV de edificações, atividade normalmente complexa, de forma mais automatizada e facilitada durante os projetos, a fim de auxiliar na tomada de decisões e seleção de materiais.

1.1 PROBLEMA

A questão a ser tratada no presente trabalho consiste em: como desenvolver uma Avaliação e Ciclo de Vida Energética (ACVE) de edificações na fase de projeto, utilizando BIM e simulações termo-energéticas?

1.2 OBJETIVO

O presente trabalho visa propor e prescrever um método de condução de ACVE em edificações usando recursos de modelagem em BIM e simulação termo-energética, assim como, avaliar a aplicabilidade do método proposto.

1.3 JUSTIFICATIVA

Durante a Conferência das Nações Unidas sobre Mudança Climática, a COP 21, que ocorreu em Paris no ano de 2015, o Brasil assumiu o compromisso de reduzir suas emissões de gases do efeito estufa em 37% em 2025 e 43% em 2030 em relação ao ano de 2005. Essa redução foi exigida apenas para os países desenvolvidos, mas está sendo perseguida voluntariamente pelo governo brasileiro. De acordo com dados reunidos por Suzer (2015), a indústria da construção civil é responsável pelo consumo de 40% dos recursos globais, 12% das reservas de água potável, responsável também por aproximadamente 50% da geração de resíduos e contribui com 48% dos gases de efeito estufa emitidos no mundo. Em 2007, a operação do ambiente construído brasileiro foi responsável por 44% do consumo de energia elétrica (ANEEL, 2008). Visto isso, ações práticas para quantificação de impactos e redução de gases de efeito estufa no setor da construção civil no Brasil podem contribuir de forma expressiva no cumprimento dos compromissos ambientais assumidos pelo país perante o resto do mundo.

O consumo de recursos como a água e energia e as emissões de gases do efeito estufa (GEE) podem estar relacionados com atividades que movimentam de forma significativa a economia de um país. Conforme é possível observar na TABELA 1, dentre os dez setores industriais que mais consomem energia no Brasil, seis deles estão relacionados diretamente com a Indústria da construção civil: cimento, cerâmica, metais não ferrosos, aço, química e mineração.

Apesar da importância da preocupação com o meio ambiente, o desempenho das construções vem sendo atualmente avaliado em termos de qualidade, tempo e custo. A análise do desempenho ambiental é relativamente nova, e por isso ainda apresenta grandes desafios, limitando sua praticabilidade e confiabilidade (SAADE *et al.*, 2014). Através da ACV de edificações, as empresas, governos e organizações estão sendo capazes de identificar oportunidades, planejar e estabelecer melhores

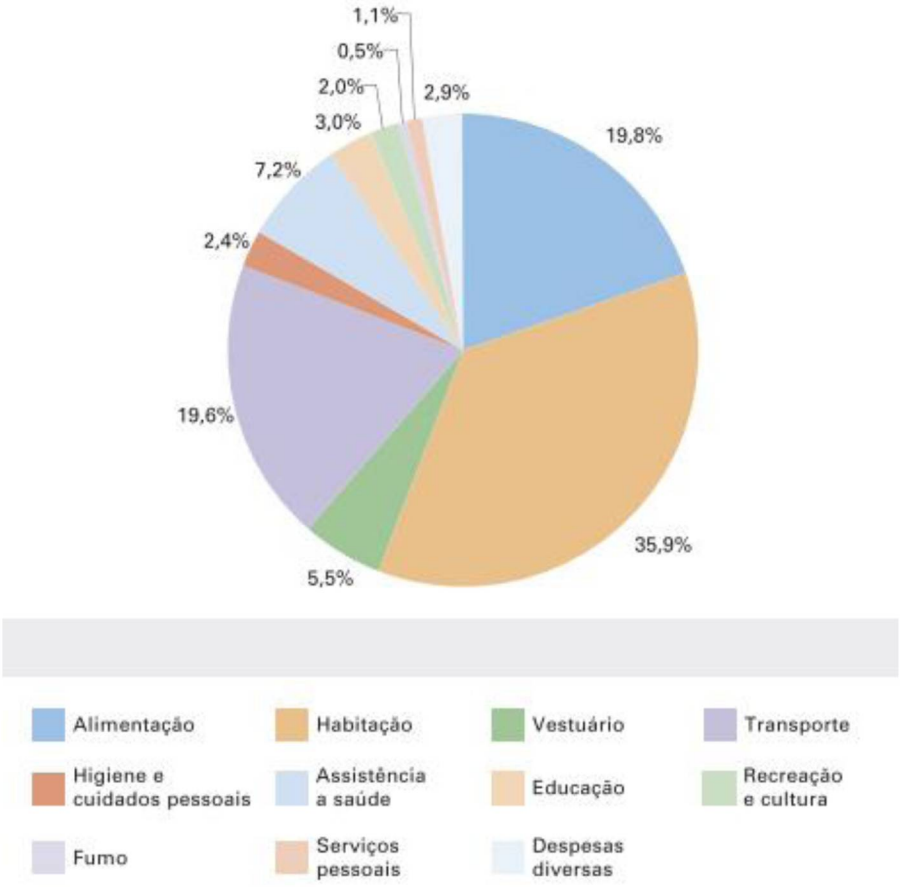
estratégias para o setor da construção civil. Desta forma, torna-se viável a melhoria dos aspectos ambientais das construções, possibilitando uma melhor seleção de materiais e fornecedores adequados (SILVA, 2012).

TABELA 1 - DISTRIBUIÇÃO DO CONSUMO ENERGÉTICO NO BRASIL POR DIFERENTES SETORES INDUSTRIAIS

CONSUMO ENERGÉTICO FINAL POR SETOR (%)										
IDENTIFICAÇÃO	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Indústria total	**37,7**	**36,1**	**34,5**	**35,5**	**36,1**	**35,1**	**33,9**	**32,9**	**32,6**	**33,0**
Cimento	1,6	1,7	1,7	1,8	2,0	2,0	2,0	2,0	1,8	1,7
Ferro-Gusa e Aço	8,2	7,8	5,9	6,8	7,1	6,7	6,3	6,2	6,4	5,9
Ferro-ligas	0,8	0,8	0,7	0,7	0,6	0,6	0,6	0,5	0,5	0,5
Mineração e pelotização	1,5	1,4	1,0	1,3	1,4	1,3	1,2	1,3	1,3	1,1
Não-ferrosos e metalurgia	2,8	2,6	2,4	2,7	2,9	2,8	2,7	2,5	2,2	2,2
Química	3,6	3,2	3,3	3,0	3,0	2,9	2,7	2,5	2,6	2,6
Alimentos e bebidas	9,9	9,1	9,8	9,6	9,4	9,5	9,0	8,4	8,2	9,2
Têxtil	0,6	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4	0,4	0,4	0,3	0,3
Papel e Celulose	4,0	4,0	4,2	4,2	4,1	4,0	4,1	4,3	4,5	4,8
Cerâmica	1,8	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,8	1,7
Outros	3,0	3,0	3,1	3,0	3,2	3,0	3,1	3,0	3,0	3,0

FONTE: EPE (2017).

GRÁFICO 1 - DISTRIBUIÇÃO DA DESPESAS DE CONSUMO MÉDIO MENSAL FAMILIAR, PERÍODO DE 2008-2009

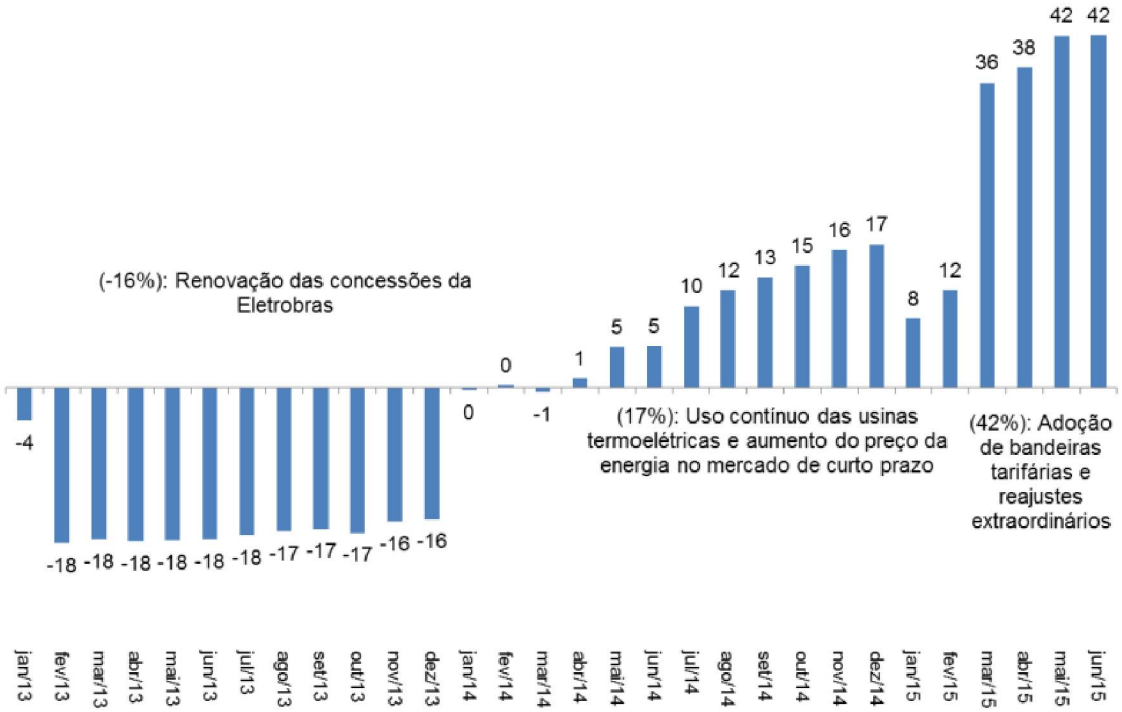


FONTE: IBGE, 2010.

Parte da proposta de se realizar uma ACVE ainda durante a fase de projeto é possibilitar a previsão e redução do consumo de recursos naturais. Neste sentido, as etapas de operação e manutenção das edificações podem ser bastante significativas. No GRÁFICO 1 é possível observar que a maior parte das despesas familiares no Brasil estão relacionadas à habitação. Segundo o IBGE (2010), dentro da categoria "habitação" na pesquisa realizada estão inclusas despesas com serviços como: telefone, gás, energia elétrica, fornecimento de água e esgoto. São consideradas também as despesas com manutenção e reparos da habitação: cimento, tijolo, tinta, vidro, etc. Quando a edificação é projetada visando ser energeticamente eficiente, podendo reduzir custos com energia elétrica, energia para cocção e custos com manutenção, além de prover melhores condições de conforto dentro das edificações, permite também que o valor monetário economizado pelas famílias possa ser investido em saúde, educação, alimentação, cultura ou lazer, por exemplo, possibilitando assim uma maior qualidade de vida.

A longo prazo, o consumo excessivo e ineficiente de energia em edificações também pode ter impacto direto na economia. Um dos fatores que tiveram grande influência na inflação em 2015 foi o aumento das tarifas de energia elétrica. 0,71 p.p. (ponto percentual) da inflação de 1,32% verificada em março de 2015 foi decorrente da variação da tarifa da energia elétrica residencial, o que representou 53,8% do índice naquele mês. Fazendo uma análise histórica do preço da energia, percebe-se que em 2013, as tarifas ficaram mais baratas por conta da renovação antecipada das concessões nos segmentos de geração e transmissão de energia, e também devido à redução de alguns encargos setoriais. Porém em 2014 e 2015 os valores aumentaram e pressionaram a inflação, em decorrência da crise hídrica e do consequente uso das termoelétricas. A adoção de bandeiras tarifárias e da revisão extraordinária das tarifas nas concessionárias distribuidoras também influenciou crescimento das tarifas (DIEESE, 2015). Paralelamente, conforme o Plano Decenal de Energia 2023, elaborado pela Empresa de Pesquisa Energética (2014), a previsão é que ocorra crescimento médio de 4,3% do consumo de energia elétrica no país entre o ano de 2013 e 2023. Ou seja, se a tendência é que o consumo energético aumente e atrelado à isto, a tarifa de energia também tende a crescer, os impactos economicos podem se agravar futuramente, portanto, é fundamental utilizar ferramentas que possam prever e reduzir o consumo energético vinculado à construção civil.

GRÁFICO 2 - EVOLUÇÃO DA TARIFA DE ENERGIA ELÉTRICA, ACUMULADO NO ANO EM %



FONTE: DIEESE, 2015

A implementação do BIM no setor de AEC pode facilitar a realização de projetos mais eficientes energeticamente e ao mesmo tempo, ambientalmente mais conscientes. Ou seja, projetos com conceitos passivos que possam ser direcionados a serem eficientes desde o início de seu desenvolvimento. Uma vez que o tamanho, a forma e a orientação geográfica do edifício sejam pensados em conjunto com os elementos naturais, a demanda por dispositivos para aquecimento, resfriamento, ventilação, iluminação e outras cargas elétricas podem ser reduzidas substancialmente (MCGRAW HILL, 2010). Não somente o consumo de energia durante a operação dos edifícios pode ser reduzido, mas também, com a implantação de ACVE e BIM é possível prever e planejar melhor o consumo energético envolvido na produção de materiais e transporte dos mesmos.

Uma adequada seleção de materiais é fundamental, tal como o correto detalhamento do projeto, que resultará em impactos menores e maior benefício. Por isso ferramentas de seleção são importantes e devem ser desenvolvidas (MACEDO, 2011). A realização de uma ACV fornece uma visão geral dos impactos causados pelo produto como um todo, o que torna a seleção de materiais mais consistente e evita a avaliação de aspectos ambientais de forma isolada. Por exemplo, é possível que em uma primeira e superficial análise, o uso de determinado material produza maior dano

ao meio ambiente quanto à extração de matéria prima, porém ao avaliar todo o seu ciclo de vida, pode-se perceber que na verdade os impactos iniciais são compensados pela sua durabilidade e desempenho do mesmo, podendo ser este produto ainda a melhor escolha em comparação com outros produtos que exerçam a mesma função, porém de forma menos eficiente.

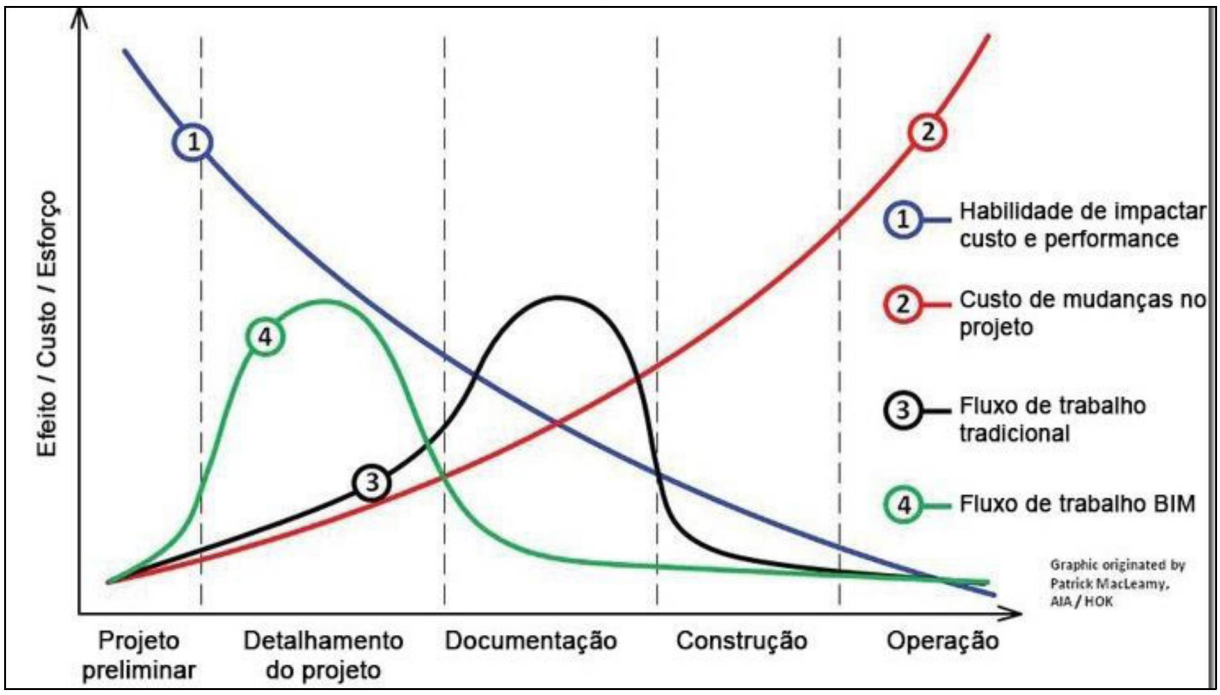
O BIM permite processos que beneficiam os três principais aspectos da sustentabilidade. Economicamente falando, algumas ferramentas BIM podem reduzir custos através do melhor gerenciamento de informações, redução de algumas atividades meramente mecânicas que dispendem de tempo para serem realizadas, e evitar retrabalhos desnecessários, aumentando desta forma a eficiência nos processos de projetos, consequentemente estimulando a concorrência. Do ponto de vista social, o BIM facilita a análise e simulação com variação de diversos parâmetros, permitindo que análises complexas possam ser mais facilmente cumpridas a fim de criar melhores condições de conforto e bem estar no ambiente construído. E por fim, em relação ao aspecto ambiental, o BIM fornece muitos recursos para análises de impactos ao meio ambiente, especialmente quando se relaciona com ferramentas especiais, como a ACV por exemplo (ANTÓN; DÍAZ, 2014a).

O momento em que as decisões tem maior potencial de efeito sobre os impactos de uma construção, sejam estes econômicos, sociais, ambientais, de desempenho ou cronológicos, é durante o projeto. Uma vez que a construção já se iniciou, toda modificação implicará em perdas e custos para realizar as adaptações. Por isso é importante realizar análises e simulações dos processos de construção, funcionamento do edifício e desconstrução, ainda durante o projeto. A FIGURA 1 apresenta a Curva de MacLeamy, a qual ilustra o benefício que o processo de projeto integrado, exigido pela tecnologia BIM, juntamente com maior esforço inicial em estimar efeitos futuros, pode trazer.

No contexto brasileiro, o BIM vem se desenvolvendo e aos poucos sendo incorporado aos projetos de AEC, incentivado pela própria concorrência tecnológica e também por políticas públicas e atividades de parcerias público-privadas. Elaborado em 2011 pelo Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior (MDIC) juntamente com outros órgão governamentais, o Plano Brasil Maior sintetizou propostas que integram 19 agendas estratégicas setoriais, as quais indicam novas medidas a serem implementadas na indústria brasileira. Os objetivos da agenda estratégica para o setor da construção incluíam: a) intensificar o uso de tecnologia da

informação aplicada à construção; b) promover a interoperabilidade técnica e a construção industrializada.

FIGURA 1 - CURVA DE MACLEAMY



FOTE: Adaptado de MacLeamy (2004)

A partir disso, diversas ações foram realizadas a fim de difundir e complementar a normatização brasileira para o BIM. Como exemplo, a elaboração da ABNT-NBR 15.965 com título geral de “Sistema de Classificação da Informação da Construção”, a qual teve sua primeira parte publicada em 2011, do total de 7 partes, das quais 3 ainda estão em desenvolvimento. No fim de 2017 foi publicada a Coletânea GUIAS BIM desenvolvida também pelo MDIC em conjunto com a Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial (ABDI), e em 2018 está previsto o lançamento da Plataforma BIM, a qual funcionará como um repositório nacional gratuito com objetos virtuais BIM, publicações, projetos e canais discussão voltados aos profissionais da construção. Essas ações apontam uma tendência tecnológica no setor que deve ser amplamente desenvolvida.

1.4 CONTEXTUALIZAÇÃO NO PROGRAMA

Algumas pesquisas relacionadas à ACV de edificações, à tecnologia BIM e simulação termo-energética já foram realizadas dentro do presente programa de pós graduação, e cada uma delas possui contribuição no desenvolvimento desta dissertação. A fim de complementar os estudos já realizados, e incentivar o desenvolvimento de novas pesquisas que possam apoiar a aplicação do BIM em análises ambientais de edificações, foi realizada uma análise dos trabalhos concebidos anteriormente nesta linha de pesquisa.

Marcos (2009) realizou uma pesquisa que teve como objetivo analisar a emissão de CO_2 na fase pré-operacional da construção, através de um sistema CAD-BIM, em dois tipos de habitação de interesse social: uma construída nos métodos convencionais (paredes de alvenaria, cimento e argamassa) e outra utilizando painéis de madeira. Na metodologia adotada foram utilizados dois estudos de casos e depois foi feita uma análise do quantitativo de materiais com base nos sistemas utilizados em cada um dos casos. A partir disto, foram desenvolvidos protótipos das habitações utilizando o software ArchiCAD. E então, os valores de Energia Embutida (EE) dos materiais foram calculados para cada elemento e estes índices foram inseridos como base de dados no software. Posteriormente foi possível extrair planilhas com os quantitativos de gás carbônico emitido na fase pré-operacional de cada edificação, incluindo o processo de fabricação e transporte dos materiais até a obra. Foi realizada uma comparação das emissões entre os dois processos construtivos estudados. O que vem sendo proposto no presente estudo é utilizar a mesma lógica de inserção de dados nos modelos, considerando a energia embutida em cada material de construção, porém ainda durante a fase de projeto, enquanto o modelo está sendo desenvolvido. As emissões calculadas para a fase pré-operacional poderão ser somadas ao consumo e emissões das outras etapas do ciclo de vida da edificação.

Ayres Filho (2009) pesquisou sobre as diversas formas de se acessar os dados de modelos de edifícios e em seguida realizou alguns experimentos através de aplicativos para demostrar a acessibilidade, facilidade e a disponibilidades de ferramentas no acesso aos modelos. Em um de seus experimentos, foi avaliada a possibilidade de associar os dados do edifício a dados adicionais sobre o ciclo de vida dos materiais de construção utilizados. Foi desenvolvida uma ferramenta que associa automaticamente os dados através de um *script* e processos de quantificação

disponibilizados pelo software de modelagem. Desta maneira, além de verificar a possibilidade de acesso aos dados, foi possível gerar uma ferramenta que fornece informações para avaliar instantaneamente, em fases iniciais do projeto, parte do impacto ambiental causado pela utilização de diferentes materiais de construção, a partir da própria interface do BIM CAD, também no ArchiCAD. Mais especificamente, a ferramenta desenvolvida avalia de forma rápida a quantidade de energia consumida e emissão de CO_2 na fabricação e no transporte dos materiais selecionados. A partir disto, o trabalho de Ayres Filho (2009) terá grande contribuição neste estudo no que tange o conhecimento sobre o acesso ao modelo, integração de dados em aplicações BIM e geração de informações, ainda na fase inicial do projeto.

Lobo (2010) desenvolveu uma fermenta para realizar inventário de EE e emissão de CO_2 equivalente com o uso de planilhas de composição de serviços de obras. A pesquisa abordou a ACV para análises energéticas considerando a extração de matéria-prima, processos de fabricação de materiais, atividades de execução e o transporte de todas as etapas até a conclusão da obra. Foi desenvolvida uma ferramenta em formato de planilha eletrônica com vínculos para possibilitar os cálculos de EE e emissão de CO_2 a partir dos quantitativos de obras. Como sugestão para trabalhos futuros, o autor citou pesquisas que incluam análises para etapas operacionais, de reciclagem, demolição e disposição final no ciclo de vida das edificações e também sugeriu a possibilidade de migrar dados para componentes de bibliotecas BIM.

Graf (2011) buscou entender a relação entre a transmitância térmica dos materiais da envoltória e a energia embutida dos mesmos em residências locadas na cidade de Curitiba. A pesquisa realizou experimentos manipulando as espessuras das superfícies que compõem a envoltória da edificação, criando variações de projeto. Através de simulação computacional, foram mensurados os efeitos sobre a temperatura interna da edificação, considerando o cálculo de energia incorporada. Por necessitar de relevante quantidade de energia de climatização, a edificação mostrou-se inviável ambientalmente e financeiramente para ser implantada em Curitiba.

O estudo realizado por Monich (2012) propôs dimensionar a energia embutida e emissões associadas aos materiais que compõem uma habitação de interesse social pré-fabricada em madeira. Foi realizado um estudo de caso para coleta de dados em uma empresa que produz casas pré-fabricadas no sistema Wood Frame na Cidade Industrial de Curitiba. Tais dados foram relacionados a índices de energia e

carbono provenientes de três fontes diferentes na literatura. Posteriormente foi realizada a avaliação do impacto ambiental utilizando o software SimaPro 7.3, no qual foram avaliadas, para fins de comparação, a habitação em *wood frame* e uma em alvenaria.

A pesquisa de Oba (2014) explorou um procedimento para a adequação de um edifício moderno promovendo a permanência da eficiência. Através do método de Avaliação de Ciclo de Vida Energético, foi possível calcular o consumo energético relacionado à construção, manutenção, alterações e operação de equipamentos. Posteriormente, através de simulação computacional foram explicadas alterações no desempenho termo-energético do edifício. Os resultados mostraram que as alterações físicas nos componentes de envoltória foram pouco significativas no desempenho e consumo energético, enquanto o uso de equipamentos elétricos se mostrou como o maior responsável por gastos energéticos ao logo do ciclo de vida.

A pesquisa de Oliveira (2016) teve como objetivo quantificar a Energia Embutida e CO_2 embutido na extração de matéria prima e produção dos materiais de construção de madeira que compõe o sistema construtivo *wood frame*, comparando dois padrões construtivos em 5 cenários diferentes.

Martins (2016) estudou as estratégias determinadas pela Norma Brasileira de Desempenho Térmico e Zoneamento Bioclimático, a NBR 15.220-3 para a cidade de Curitiba. Através de simulação computacional no software EnergyPlus, foram testadas as estratégias bioclimáticas propostas pela norma, com o objetivo de esclarecer a fundamentação dos limites de temperatura e estratégias recomendadas pelo Diagrama Bioclimático da norma. Ao fim da pesquisa houve a confirmação parcial dos limites e diretrizes estipulados. O estudo contribui de para o presente trabalho, uma vez que a simulação computacional e diretrizes da mesma norma terão papel fundamental para estimar o consumo energético durante a operação do edifício.

A pesquisa de Fischer (2017) propôs uma casa de interesse social mais adaptável, comparando seu desempenho energético com o de uma unidade convencional. Foram realizadas a simulações de adaptações ao longo do ciclo de vida da edificação familiar a fim de se obter dados qualitativos e quantitativos a respeito do impacto que as adaptações causam na consumo final de energia. Um conceito importante discutido pelo autor foi a respeito da energia residual, que é a energia incorporada em materiais cuja durabilidade técnica é superior à durabilidade funcional,

indicando que os mesmos ainda podem ser utilizados na mesma unidade habitacional ou em novas construções.

Barreto (2017) propôs um projeto com melhores atributos de sustentabilidade, principalmente pelo caráter temporário, usando o projeto de um módulo educacional para validar seus resultados. Edifícios temporários, segundo o autor, são mais conhecidos em termos de durabilidade dos componentes, são pensados para serem desmontados, em vez de demolidos ao fim da sua vida útil. Foi realizada uma comparação em termos de ciclo de vida energético, utilizando também simulação termo-energética. Os resultados mostraram que edifícios menos duráveis podem ser a solução mais sustentável no caso de flutuação da demanda, como observado na educação de jovens e adultos no Brasil.

Por fim, Mass (2017) comparou a quantidade de resíduos de construção civil (RCC) gerada durante a construção de uma edificação concebida em *Light Steel Framing* com uma edificação em alvenaria convencional, por meio da realização de um estudo de caso com etapa de simulação. Também foram analisados os impactos ambientais associados a esses sistemas construtivos no ciclo de vida pré-operacional, em relação à energia embutida e emissões de CO_2. Os resultados mostraram que a edificação construída em *Light Steel Framing*, além de gerar uma quantidade de resíduos muito menor do que a construída em alvenaria, também gerou menor impacto ambiental, indicando claros atributos de sustentabilidade.

1.5 ESTRATÉGIA E ESTRUTURA DA PESQUISA

1.5.1 Método de pesquisa

O presente trabalho visa propor e prescrever um método de Avaliação de Ciclo de Vida Energético (ACVE) de edificações durante a etapa de projeto, com o auxílio de aplicações computacionais. A intenção é facilitar e tornar viáveis e acessíveis os processos de análise de impactos ambientais por parte dos projetistas e/ou consultores, com o intuito de auxiliar na seleção de materiais e tomadas de decisões durante o projeto. A pesquisa realizada está bem contextualizada dentro do método do *Design Science Research* (DSR), pois tem como produto final um artefato que prescreve o uso de ferramentas a serem aplicadas e integradas aos projetos de AEC.

A tentativa de desenvolver a ACVE de uma edificação integrada ao projeto, utilizando-se da tecnologia da informação para melhor aproveitar os dados já existentes em um modelo BIM, pode ser uma forma de aprimoramento, não somente dos métodos tradicionais de ACV, como também dos processos de projeto e construção. Isso possibilitaria melhoras quanto a eficiência e desempenho de edificações futuras.

1.5.2 Unidade de análise

No presente estudo a unidade de análise compreende software que permitam a aplicação da Avaliação do Ciclo de Vida Energético de edificações, considerando procedimentos para quantificar o consumo de energia e emissão de CO_2.

1.5.3 Delimitação do trabalho

O presente trabalho está delimitado na avaliação dos resultados qualitativos da aplicação do método proposto para ACVE a partir de modelagem em BIM e simulação termo-energética. Os resultados quantitativos, como por exemplo, o valor total de energia embutida, emissão de CO_2 e consumos energéticos finais servirão como base para validar o método utilizado porém não compõem o foco principal da pesquisa.

O estudo visa testar a aplicação de um método de ACVE para edificações brasileiras Ou seja, as informações tecnológicas, processos de projeto, sistemas e processos construtivos, legislações e normalizações, bancos de dados de materiais, matriz de fontes energéticas e outros aspectos abordados estão relacionados e adaptados à realidade do país.

1.5.3.1 Definição do artefato

O artefato deve ser uma generalização de uma solução, que pode ser transformada em um conhecimento a ser aplicado em diversas situações similares, desde que consideradas suas particularidades (DRESCH, *et. al.*, 2015). A partir disso, no caso deste trabalho, o artefato consiste em um método de avaliação de ciclo de vida de edificações com o uso de aplicações em um modelo BIM e simulação termo-energética.

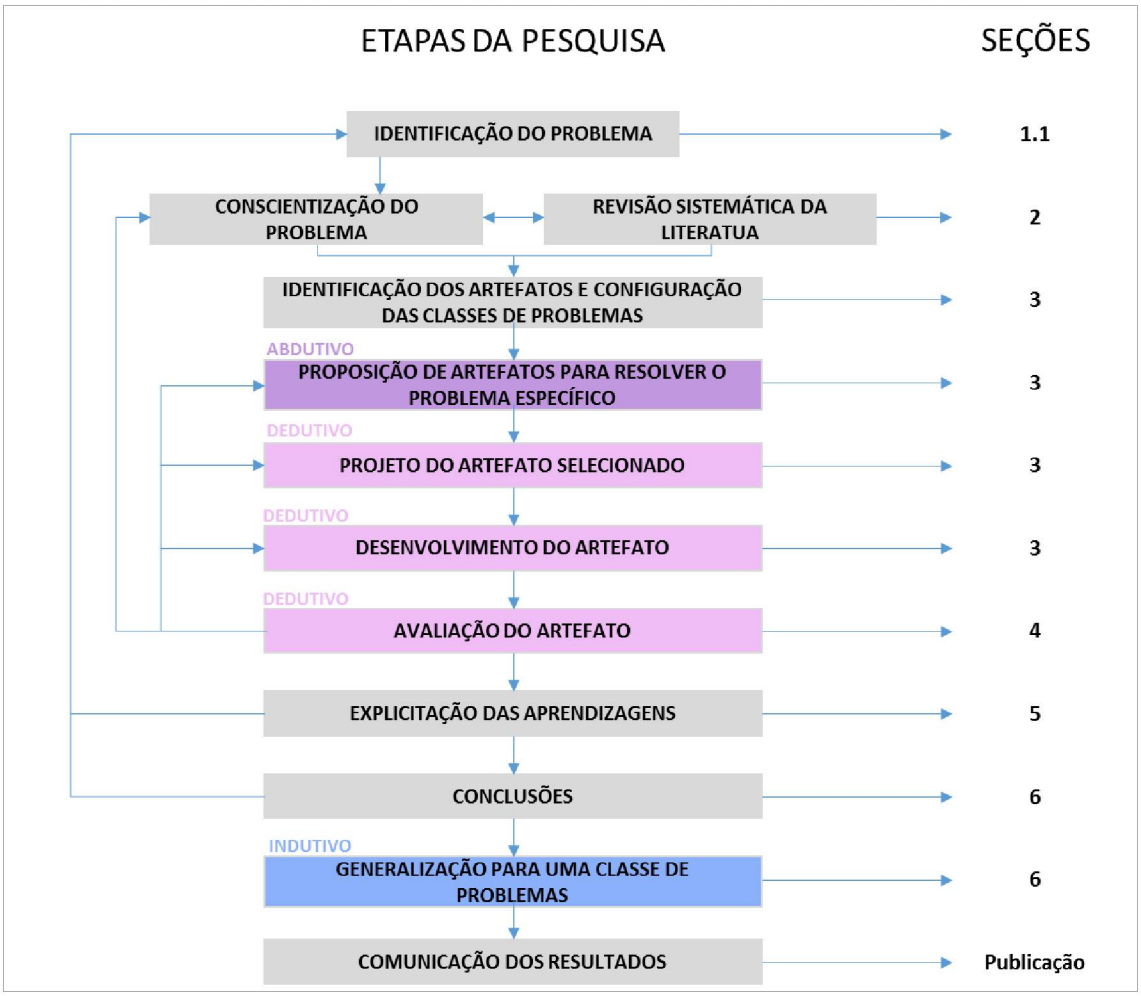
1.5.4 Validade do artefato

A validade de uma pesquisa pode ser caracterizada como um conjunto de procedimentos utilizados para garantir que os resultados gerados pelo artefato provêm do ambiente interno projetado e do ambiente externo no qual foi preparado para operar (DRESCH, *et. al.*, 2015). Sendo assim, a atual pesquisa é o próprio ambiente interno e as normas e processos de projetos dentro de empresas são o ambiente externo. O método de avaliação do artefato no presente trabalho ocorreu na forma experimental e de teste: através da criação de um modelo de teste de uma edificação, pode-se aplicar o método de ACVE e a partir dos resultados quantitativos, qualitativos, e do desempenho desse método, foi possível analisar as dificuldades, facilidades, aspectos positivos e negativos do processo prescrito (artefato), assim como sua aplicabilidade. O modelo teste desenvolvido está especificado no capítulo 5. Vale citar que o desenvolvimento do artefato está atrelado e depende diretamente da tecnologia disponível pelas ferramentas que foram utilizadas. Porém, a intensão é que se possa aplicar o mesmo processo em outros software similares, conforme a preferência do usuário.

1.5.5 Estrutura da pesquisa

Gibbons *et al.*(1994) define dois tipos de produção do conhecimento. O conhecimento tipo 1 é aquele que se refere a uma forma de produção com enfoque disciplinar, de forma mais tradicional. E o conhecimento tipo 2 é aquele que possui o foco na aplicação desse conhecimento, abrangendo desde a produção de conhecimento para o avanço da ciência até o conhecimento que poderá ser aplicado em problemas reais por profissionais dentro das organizações. A presente pesquisa terá o envolvimento do pesquisador em um contexto transdisciplinar, considerando a produção de conhecimento tipo 2, conforme definido acima. Para manter o rigor da pesquisa e garantir que os resultados obtidos sejam confiáveis e úteis, será seguido o protocolo proposto por Dresch *et al.* (2015), conforme apresentado na FIGURA 2, aplicado à estrutura do presente trabalho.

FIGURA 2 - PROTOCOLO DA PESQUISA DE ACORDO COM ETAPAS DA DSR



FONTE: A autora, adaptado de Dresch *et. at*. (2015)

Para resolver um problema de pesquisa, primeiramente é necessário realizar uma conscientização, ou seja entender o contexto do que está se estudando. O Capítulo 2 do presente estudo apresentou noções básicas de construções mais sustentáveis, de impactos ambientais gerados pela construção civil, avaliação de ciclo de vida de edificações, ferramentas de ACV e apresenta uma visão geral de como o BIM pode auxiliar na redução de impactos durante projetos de novas edificações. O método da DSR prevê a realização de uma revisão sistemática da literatura (RSL) a fim de estabelecer o quadro de soluções empíricas conhecidas até o momento e fornecer maior embasamento para a nova solução. A RSL foi realizada a partir de três bases de dados diferentes, com a finalidade de perceber o que tem sido estudado recentemente no âmbito da ACV atrelada ao BIM. Os resultados da RSL também estão contemplados no Capítulo 2 e serviram para perceber quais ferramentas de ACV, modelagem em BIM e simulação energética são comumente utilizadas, quais os

pontos positivos, negativos de cada uma e como funciona a interoperabilidade entre elas. O resultado da RSL está descrito de forma específica em Araujo et al. (2017), disponibilizado no ANEXO 1.

O capitulo 3 e 4 compreendem o desenvolvimento do método e processos de ACVE, e os capítulos 5 e 6 contemplam os resultados e conclusões, apresentando dificuldades observadas na aplicação do método prescrito, assim como apontam as vantagens, desvantagens e pontos de melhorias e aprimoramento do artefato proposto.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA

Avaliação de ciclo de vida pode ser compreendida como uma análise sistemática dos impactos ambientais resultantes de serviços e produtos (HORNE; GRANT; VERGHESE, 2009). De acordo com Grann (2012), o objetivo da ACV é promover uma visão holística de uma análise ambiental, levando em consideração todas as fases de um produto, serviço ou sistema produtivo, desde a fase de transformação da matéria prima, fabricação, uso até a disposição final ou reciclagem.

A ACV é baseada em um sistema de análise simplificado, porém, esta simplificação consiste em uma extensa linearização de fatores. Fazer interconexões entre as partes do ciclo de vida de um produto que existe na realidade gera relações extremamente complexas. Existem diversas possibilidades de trabalhar com as informações entrelaçadas e com os desvios da estrutura linear da análise, como por exemplo, através de abordagens interativas ou matrizes numéricas (KLOPFFER, GRAH, 2014).

Na década de 70 foram realizadas as primeiras ACVs na Europa, porém foi nos anos 90 que o termo se tornou conhecido, e métodos que abrangiam o conceito de "berço ao tumulo" passaram a se tornar conhecidos internacionalmente. A partir daí surgiu a necessidade de padronizar métodos. As primeiras versões da série ISO 14040 foram criadas entre 1997 e 2000, as quais foram revisadas em 2006, e juntas compuseram a ISO 14040 e ISO 14044. Posteriormente surgiram algumas normas a nível locais de cada pais (WEISSENBERGER; JENSCH; LANG, 2014). Por sua vez, o conjunto de normas brasileiras que trata de procedimentos e técnicas de ACV engloba principalmente as ABNT NBR ISO 14040 e 14044, ambas revisadas em 2009.

Conforme a ABNT NBR ISO 14040 (ABNT, 2009), a Avaliação do Ciclo de Vida é uma técnica de análise de materiais e processos que aponta os potenciais impactos ambientais. Ciclo de vida são os estágios sucessivos e encadeados de um produto. Em cada um dos estágios são contabilizadas as entradas e saídas de materiais, energia, produtos e emissões. A ISO 14040 (ISO, 2006) define o método de ACV que analisa todas as fases do produto e todos os processos interativos que o compõem, estruturado em quatro categorias, conforme é explicado por Saade, Silva e Gomes (2014):

a) Objetivo e Escopo: delimitar os propósitos do estudo;
b) Análise do Inventário: delimitar e quantificar as entradas e saídas do sistema;
c) Avaliação do Impacto: compreender e analisar a magnitude e significância dos potenciais impactos ambientais;
d) Interpretação: avaliar de forma crítica e interativa as 3 categorias anteriores.

Uma ACV pode avaliar diversos impactos ambientais. Segundo Jrade e Jalaei (2013), a Agencia de Proteção Ambiental dos Estados Unidos categorizou as dez principais categorias de impactos ambientais: potencial de aquecimento global, potencial de depleção da camada de ozônio, potencial de oxidação, potencial de acidificação, eutrofização, toxicidade da saúde humana (cancerígenos) , toxicidade de saúde humana (não cancerígenos), poluição do ar, potencial de eco-toxicidade e consumo de combustíveis fósseis.

A ACV não fornece uma conclusão definitiva sobre o real impacto de produtos no meio ambiente, ela apenas permite compilar os potenciais impactos. Ou seja, ACVs são baseadas em modelos que proporcionam uma representação limitada da realidade. Assim, os resultados dependem, por exemplo, da determinação dos limites do sistema, bem como da escolha da categoria de impacto. Além disso, a precisão dos resultados depende principalmente dos dados disponíveis em bancos de dados. Exemplos de aplicações diretas e benefícios da ACV podem ser percebidos através da melhoria e desenvolvimento de produtos, no suporte de planejamento estratégico e formulação de políticas públicas. Em outros setores - no setor automotivo, na indústria química ou bens de conveniência - as ACVs são comumente usadas para otimização de processos e redução de impactos. No entanto, os produtos analisados são principalmente de áreas onde a produção em massa prevalece. Em contraste, para os edifícios, que são quase sempre únicos e costumam ter uma vida muito longa, a aplicação dos métodos de ACV se tornam mais complexos (WEISSENBERGER; JENSCH; LANG, 2014).

A disponibilidade de bancos de dados apropriados é fundamental para um estudo de ACV, uma vez que a etapa de inventário requer uma grande quantidade de dados a serem levantados, e muito conhecimento na área a ser trabalhada (LIMA; KIPERSTOK, 2007). No Brasil, algumas iniciativas vêm surgindo para apoiar a prática de ACV, visando o desenvolvimento de banco de dado confiáveis de forma

padronizada. O Projeto de Inventário do Ciclo de Vida para a Competitividade Ambiental da Industrial Brasileira foi criado em 2006 pelo Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações (MCTIC) em conjunto com a Finep, e é coordenado pelo Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia (Ibict) em parceria com algumas universidades. O projeto tem como principal objetivo disponibilizar um sistema gerenciador de banco de dados contendo informações fundamentais sobre insumos para a realização de inventários de ciclo de vida de produtos da indústria brasileira, o chamado Banco Nacional de Inventários do Ciclo de Vida (SICV Brasil). Para a construção deste inventário nacional é necessária uma produção colaborativa entre governo e empresas. Desde sua criação, o projeto vem se desenvolvendo, realizando algumas ações e traçando objetivos pontuais, inclusive com acordos internacionais. Mais uma iniciativa em andamento é o Programa Brasileiro de Avaliação do Ciclo de Vida (PBACV) no âmbito do Conselho Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial, Conmetro, que visa dar continuidade às ações de ACV no Brasil, apoiar o desenvolvimento sustentável e a competitividade ambiental da produção industrial brasileira. O programa pretende: implantar um sistema reconhecido em âmbito internacional, capaz de organizar, armazenar e disseminar informações padronizadas sobre inventários do Ciclo de Vida da produção industrial brasileira; além de intervir e influenciar nos trabalhos de normalização internacional e nacional afetos ao tema; e identificar as principais categorias de impactos ambientais para o Brasil (MOTTA, 2014).

Do ponto de vista normativo, a sub-série ISO 14020 dispões sobre rótulos e declarações ambientais de produtos, e dentro desta, a NBR ISO 14025 (ABNT, 2015) estabelece os princípios e especifica os procedimentos para desenvolver programas de declaração ambiental de Tipo III, instituindo especificamente o uso da série NBR ISO 14040 (ABNT, 2009) no desenvolvimento de programas de declaração. Por sua vez, a série 14040 comporta o conjunto de normas brasileiras que trata de procedimentos e técnicas de ACV. A sigla EPD é abreviação de declaração ambiental de produto (*Environmental Product Declarations*) que que segue a padronização destas normas.

Para o setor de construção civil existem outras duas normas importantes à respeito de ACV: o padrão europeu para EPDs, a EN 15804/2012, e a ISO 21930 que foi recentemente atualizada no final de 2017. A ISO 21930 especifica princípios e requerimento para desenvolver EPDs para produtos, serviços, elementos e sistemas

tecnológicos integrados usados em qualquer tipo de construção. A ISO 21930 serve como complemento às normas da série ISO 14000. No Brasil, atualmente existem dois sistemas de rotulagem Tipo III, o RGMat, específico da construção civil e concedido pela Fundação Vanzolini, e o Programa de Rotulagem Tipo III – Declaração Ambiental de Produto(DAP) do Inmetro. Porém o DAP se aplica a todo tipo de produto brasileiro, não somente da a construção civil, e é uma das ações estratégicas do PBACV.

2.2 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA NA CONSTRUÇÃO CIVIL

A indústria da construção civil é uma das maiores responsáveis pelos impactos ambientais gerados atualmente, uma vez que esta produz os artefatos com as maiores dimensões físicas do planeta. A cadeia produtiva das construções gera impactos em todos os processos envolvidos: desde a extração de matéria-prima, transformação e fabricação de materiais, ocupação e modificação de terrenos, construção, uso da edificação e demolição, considerando também dentro desse aspecto, o consumo de energia e água em todas as etapas, além de todos os resíduos gerados (OLIVEIRA, 2007).

A ACV fornece um inventário completo sobre massas e fluxos de energias para cada sistema e permite que sejam realizadas comparações destes balanços em formas de impactos gerados. A avaliação do ciclo de vida em construções inclui a produção de materiais de construção, operação, manutenção, desconstrução e gerenciamento dos resíduos (BUENO *et al.*, 2013).

A indústria da construção como um todo está claramente cada vez mais voltada para a sustentabilidade, porém alguns aspectos têm um peso maior que outros a respeito disso. Cada projeto é único e possui características próprias. Tais características estão relacionadas a condições específicas, ou seja, necessidades individuais de cada cliente, localização em que a edificação está inserida, entre outras. Consequentemente o produto deve ser flexível, de forma que o desempenho possa ser melhorado através de simples modificações. De fato, entre todas as diferentes fases do ciclo de vida de uma construção, a fase de projeto é a que possui maior potencial por influenciar e agregar valor à edificação. Uma vez que a construção já tenha sido iniciada, o projeto como um todo perde grande parte de sua flexibilidade e apenas pequenas alterações são possíveis, o que pode representar altos custos financeiros e ambientais (ANTÓN; DÍAZ 2014).

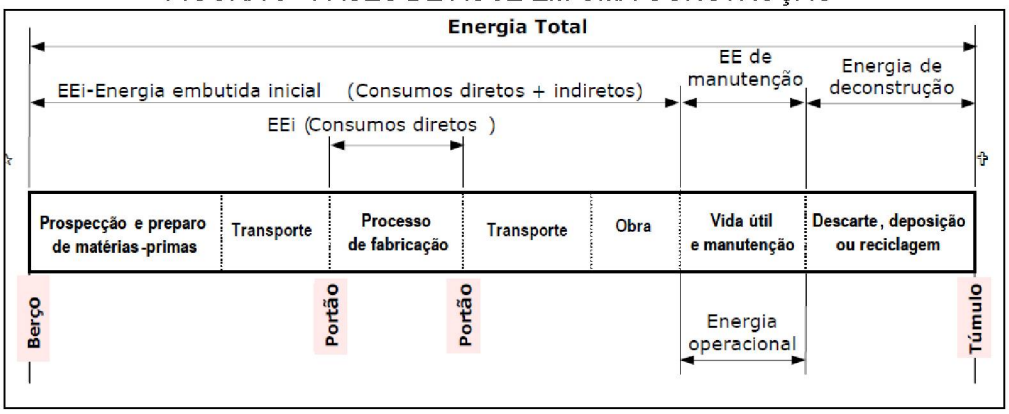
A ACV tem sido aplicada às construções de diversas formas. A maioria dos estudos relacionados à ACV de edificações têm foco em apenas uma parte específica de todo ciclo de vida da edificação. Poucas pesquisas estão focadas em analisar todo ciclo de vida, devido às dificuldades em se obter indicadores acurados em relação aos materiais e desempenho dos mesmos, assim como sobre o uso de energia e climatização no ambiente interno, principalmente durante a fase de projeto do edifício (PENG; WU, 2015). De acordo com Krantz *et al*. (2015), as abordagens mais convencionais de ACV são estáticas, ou seja, desconsideram a evolução dinâmica dos projetos do setor de construção, resultando em avaliações independentes da localização em que o edifício está inserido, e fazem suposições errôneas de efeitos homogêneos. Portanto a percepção de todos os aspectos, não somente do ciclo de vida da edificação, mas sim do contexto em que a mesma está inserida, pode ser determinante ao se realizar uma ACV.

2.3 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA ENERGÉTICO EM EDIFICAÇÕES

Análise do Ciclo de Vida Energético (ACVE) é uma maneira simplificada de ACV para avaliar os impactos ambientais, porém significativa. Esta análise tem base na norma ISO 14040, mas é realizada priorizando o inventário de dados de consumo de energia que fazem parte do ciclo de forma direta e indireta. Através da ACVE também é possível perceber os impactos ambientais causados e por ter uma estrutura mais simplificada, demanda menor custo e menos esforço para ser executada (TAVARES, 2006).

A soma dos requisitos energéticos de todo sistema é a Energia Total no ciclo de vida energético. A ACVE pode ser dividida em várias etapas que avaliam todos os processos desde o berço ao túmulo. Outro impacto ambiental que está diretamente relacionado ao consumo de energia é a emissão de CO_2. O gás carbônico é o principal gás de efeito estufa, e os índices de emissões a partir da geração e consumo de energia dependem diretamente da fonte energética que está sendo consumida. Segundo Bueno (2010) o ciclo de vida de um edifício inclui: a fabricação de materiais de construção; a própria construção em si; fase de operação e manutenção; desmontagem; e gestão de resíduos. Todas as fases devem ser consideradas em uma ACVE completa. A FIGURA 3 ilustra as diferentes fases de uma ACVE descritas por Tavares (2006).

FIGURA 3 - FASES DE ACVE EM UMA CONSTRUÇÃO



FONTE: Tavares (2006).

A Energia Embutida (EE) é entendida como a associação de todos os insumos energéticos necessários para extrair matéria prima, beneficiar, fabricar e transportar produtos e materiais que serão utilizados na construção, incluindo transporte até o canteiro de obras, e finalmente a energia despendida na obra propriamente dita. Além da EE, também há o consumo de energia por parte dos equipamentos usados durante toda vida útil da edificação, a chamada Energia Operacional. Esta energia de operação inclui todos os gastos energéticos para realizar atividades de iluminação, cocção, entretenimento, climatização, entre outros (TAVARES, 2006)

De acordo com o Balanço Energético Nacional (BEN, 2016) com ano base de 2015 as residências foram responsáveis por 9,6 % de toda energia consumida no Brasil. Já, de acordo com a Pesquisa de Posse de Equipamentos e Hábitos de Consumo de Energia, com anos base de 2004 até 2006, 10,5% dos lares brasileiros possuíam pelo menos um aparelho de ar condicionado.

É importante considerar também a energia utilizada na execução de reformas e manutenções que ocorrem no decorrer do tempo, incluindo a Energia Embutida dos materiais utilizados nesta etapa, que pode ser denominada Energia Embutida de Manutenção. Por fim, há a Energia de Desconstrução, que contabiliza o consumo na etapa final do ciclo, com descarte, deposição e/ou reciclagem dos resíduos, considerando insumos diretos para desconstrução ou demolição, transporte de materiais e pessoas. Vale citar que se os materiais forem reaproveitados ou reciclados para outras construções, irão ser contabilizados de forma positiva na ACVE dos novos edifícios (TAVARES, 2006).

2.3.1 Fase de pré-operação

De acordo com Macedo (2011) a energia embutida primária ou incorporada pode ser definida como o inventário energético do material ao longo de sua vida útil. Este inventário apresenta os dados em unidade energética por unidade de massa (MJ/kg) ou por unidades de volume (MJ/m^3).

A energia que é consumida no transporte de materiais, resíduos e até mesmo na mão-de-obra está diretamente relacionada com a distância geográfica entre a origem e o destino. As obras que se encontram mais próximas dos centros produtores de materiais de construção apresentam parcelas de energia de transporte menores que as que se encontram mais distantes. O mesmo se aplica à distância em relação as residências dos trabalhadores da construção. O veículo que é utilizado, tipo de combustível, condições de trânsito e condições das vias também são fatores que possuem grande influência nesta questão energética. Outro fator a ser contabilizado na fase pré-operacional é a questão do transporte do desperdício, que inclui os materiais em excesso na obra, ou materiais estragados e/ou inutilizados, devido ao armazenamento incorreto ou falta de planejamento (SILVA, 2012).

As estimativas de emissão de CO_2 durante o ciclo de vida de uma edificação dependem de distintas características regionais devido ao clima, políticas e tecnologias diferentes em cada país. Por exemplo, a emissão de gás carbônico a partir de materiais de construção em regiões mais desenvolvidas poderá ser maior que em países em desenvolvimento. No entanto, as emissão de CO_2 da partir da extração de matéria prima podem ser menores. Estes fatores dependem do nível e cultura de industrialização do país. Este é um dos aspectos que tornam a simulação e estimativa de emissão de gás carbônico tão complexas. Por este motivo, cálculos e métodos aplicados em algumas regiões não podem ser replicados em outras (PENG; WU, 2015). Em sua pesquisa, Tavares (2006) obteve valores de energia embutida em materiais de construção brasileiros através de análises de processos e análises estatísticas. Alguns desses valores foram atualizados por Tavares e Bragança (2016).

2.3.2 Fase de operação

O consumo residencial de energia na fase de operação pode ser dividido basicamente entre a demanda de energia para iluminação, para equipamentos

elétricos/eletrônicos e para aquecimento de água, seja para cocção de alimentos, banho ou higiene pessoal. De acordo com Su e Zhang (2016), diversos autores afirmam que energia operacional de um edifício é bem superior à energia embutida inicial, podendo chegar até a 90% do consumo energético total. Porém, estudos focados em analisar alternativas de redução do consumo de energia e emissões durante a fase de operação vêm se desenvolvendo, como por exemplo, instalação de materiais isolantes de alto desempenho em paredes externas e telhados, uso de janelas com alto desempenho térmico, tecnologia inovadoras de sistemas de ar condicionado, entre outros.

De acordo com Melo, Sorgato e Lamberts (2014), diversas pesquisas têm mostrado que há um crescente interesse nos benefícios da redução do consumo energético e custo de operação de edifícios. Como exemplo, a pesquisa de Montes (2016) teve como objetivo avaliação da incorporação de medidas de eficiência energética em projetos de habitação de interesse social no Brasil abordando também e foco no desempenho termoenergético do edifício. A autora evidencia a importância da adequada seleção inicial de materiais nos projetos, tanto em termos dos seus impactos associados quanto do desempenho termoenergético ocasionado na edificação na sua vida útil.

Diversos países estão desenvolvendo seus próprios padrões de eficiência energética no que diz respeito às construções mais sustentáveis. A maior parte destes padrões e normas possuem como base o padrão *Standart* 90.1 e 90.2 da *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers* (ASHRAE), o qual estabelece requerimentos mínimos para projetos de edifícios eficientes, quanto características e parâmetros para envelopes das construções, sistemas de ar-condicionado, potência de iluminação e outros aspectos, tendo seus valores revisados a cada três anos. Cada aspecto pode ser observado conforme a zona bioclimática em qual o edifício se encontra ou será construído.

No Brasil, o desenvolvimento da primeira norma de desempenho térmico para edifícios ocorreu em 2005, com a NBR 15220 (ABNT, 2005), a qual determina critérios conforme os parâmetros adequados à realidade do país. A NBR 15220 – parte 3 lista também as zonas bioclimáticas das cidades brasileiras. Esta norma se restringiu apenas para edificações unifamiliares de interesse social e, portanto, uma nova norma foi elaborada para estabelecer requisitos de desempenho para edificações habitacionais. A primeira versão da NBR 15575 (ABNT, 2013) foi publicada em 2008,

e após revisões, a versão final da norma entrou em vigor em julho de 2013. A norma em questão engloba requisitos mínimos de desempenho térmico, acústico, lumínico, de durabilidade, e outros (SORGATO; MELO; LAMBERTS, 2014). Antes disso, ainda no início da década de 2000, já vinha sendo desenvolvido o Programa Procel Edifica pela Eletrobras/Procel, que mais tarde passou a ser integrado ao processo de Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE) do Inmetro, formando o atual PBE Edifica. Uma ENCE classifica a eficiência dos equipamentos, veículos e edificações, e fornece outras informações relevantes ao consumidor. Esta etiqueta pode ser obtida para edificações comerciais, de serviços e públicas, sendo esta categoria regida pelo RTQ-C (Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas) e edificações residenciais, que devem seguir o RTQ-R (Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais). Atualmente a ENCE do PBE Edifica é de caráter voluntário, exceto pra as edificações públicas federais, pois em 2014, a Instrução Normativa MPOG/SLTI Nº 02 dispôs sobre a obrigatoriedade da etiqueta nos edifícios dessa natureza.

A análise sobre o consumo energético de edifícios é uma tarefa complexa, uma vez que requer atenção em questões que englobam a interação do edifícios com o seu redor, clima, localização, orientação e trocas térmicas. Os sistemas de climatização, ventilação, uso de equipamentos eletrônicos, entre outros diversos aspectos também devem ser considerados. A eficiência energética nos edifícios visa desenvolver estratégias para reduzir o consumo de energia, porém mantendo e considerando as condições de conforto ambiental dos ocupantes. A simulação computacional é uma ferramenta indispensável para considerar todos os parâmetros chaves em um projeto que tem influência na determinação da eficiência energética (SILVA; ALMEIDA; GHISI, 2016). Segundo Shoubi *et al.* (2015), obter modelos físicos e matemáticos que são efetivos na caracterização destes itens também pode ser bastante complexo. O comportamento dinâmico das condições climáticas, das operações do edifício e a presença de múltiplas variáveis requer o auxílio de ferramentas computacionais capazes de estimar, de forma aprimorada, o consumo energético dentro de um sistema.

O consumo energético de edificações, que varia conforme clima e orientação geográfica da edificação, o local onde o edifício está ou será inserido, também possui reflexo direto nas estimativas de emissão de CO_2. Diferentes fontes energéticas

emitem quantidades de gases de efeito estufa (GEE) diversas. Sanches-Pereira, Tudeschini e Coelho (2016) realizaram uma pesquisa que analisa o consumo energético em residências, relacionando a emissão de carbono em nível local para cada região geográfica do Brasil, através de inventários de consumos energéticos diretos, sem considerar energia para transporte dos moradores e energia embutida nos bens de consumo. Os resultados foram divididos em emissão de CO_2 pelo uso de eletricidade e pelo consumo energético para cocção. Segundo os autores, diversos fatores podem influenciar a pegada de carbono, que varia de forma significativa conforme cada região do país. Não somente as diferenças socioeconômicas influenciam a análise de emissão de CO_2, mas também os diferentes sistemas de produção e transmissão de eletricidade no país. Por exemplo, a região Norte consome em média somente 6% de toda demanda residencial de eletricidade, porém, é responsável por cerca de 34% das emissão de CO_2 neste setor, uma vez que a maior parte das suas necessidades energéticas são supridas através de sistemas isolados. O estudo mostra também que a emissão de carbono por consumo de energia elétrica vem crescendo, não somente devido a uma maior demanda causada pela urbanização e aumento de renda do país, mas também devido à crescente contribuição das termoelétricas na matriz energética nos últimos anos. Outro aspecto importante a ser considerado é o padrão de consumo de energia para cocção, que vem se modificando ao longo dos anos. O consumo de lenha e gás liquefeito de petróleo (GLP) ainda são os principais combustíveis utilizados em residências para cocção de alimentos, porém o consumo de gás natural e da própria eletricidade para este fim também vêm se desenvolvendo no país, variando ao longo dos anos e entre as diferentes regiões. Estes e diversos outros fatores tornam ainda mais complexa a avaliação e estimativas futuras a respeito do consumo energético e emissão de gás carbônico durante toda vida útil de uma edificação.

2.3.3 Fase de pós-operação

De acordo com Krantz *et al.* (2015), alguns pesquisadores defendem que energia embutida envolve não somente a fase de pré-operação do edifício, mas também as fases de manutenção, remodelação e a energia de desconstrução e deposição dos materiais, que pode ser chamada de energia embutida recorrente.

Atualmente, com a alta demanda energética operacional por grande parte dos edifícios, com exceção aos prédios projetados para serem eficientes, o fim da vida de uma edificação normalmente é responsável por uma pequena parcela do impacto ambiental global, geralmente inferior a 5%. No entanto, se for considerada a reciclagem, a capacidade de substituir materiais naturais e o correto gerenciamento de resíduos e transporte dos mesmos, este cenário pode ser modificado, ao ponto de reduzir os impactos na fase pós operacional de forma significativa (COELHO; BRITO, 2013).

A reciclagem de materiais é uma estratégia para minimizar resíduos que oferece três benefícios: redução da demanda, e consequentemente da produção de novos materiais com recursos naturais; redução de custos de transporte e consumo de combustível e consequentes queimas e emissões; e redução da quantidade de materiais desperdiçados em aterros sanitários. Normalmente, os Resíduos de Construção e Demolição (RCD) são compostos por concreto demolido, tijolo e alvenaria, madeira, vidro, gesso, rocha, solo e outros materiais (TAM; TAM, 2006). Os agregados reciclados vêm sendo introduzidos de forma bem sucedida em diversas atividades dentro da construção civil. De acordo com Gayarre *et al.* (2016), pesquisadores têm mostrado usos efetivos de agregados reciclados de elementos de concreto e na fabricação de blocos e tijolos de alto desempenho.

Os agregados reciclados são processados normalmente pelas usinas de reciclagem de RCD. Segundo Coelho e Brito (2013) os principais impactos ambientais gerados por uma usina de reciclagem estão ligados essencialmente ao consumo de energia. Uma vez que a geração de ruídos e dispersão de pó e material particulado são muitas vezes minimizados pelos regulamentos e legislações municipais, aplicadas às operações industriais, não há outros impactos significativos além do consumo energético, que está fortemente ligado à emissões atmosféricas. Os materiais contaminados com tintas, solventes ou outros produtos químicos e também lodo e resíduos misturados ou úmidos, que são rejeitados pelas usinas, não devem ser considerados como impactos da usina, uma vez que são resíduos gerados pelas construções ou demolições que foram erroneamente encaminhados para a reciclagem. No contexto de consumo energético, os autores dividiram os impactos ambientais causados por usinas de RCD em três principais categorias: impactos incorporados, operacionais e de transporte. Impactos incorporados englobam basicamente o consumo de energia e emissão de CO_2 equivalente desde a extração

de matéria prima até a fabricação dos equipamentos e todas as máquinas instaladas no local. Nos impactos incorporados são considerados inclusive toda manutenção ou substituição de material ou equipamento durante toda vida útil da usina. Já os impactos operacionais estão essencialmente ligados à demanda de energia elétrica pelas máquinas durante todas as horas de operação. Por fim, nos impactos de transporte são considerados o consumo energético no transporte de materiais enquanto a usina está em operação. Nesta última categoria está incluso: viagens entre o canteiro de obras ou edifício demolido até a usina; a partir da recicladora até o aterro mais próximo (transporte de materiais rejeitados no processo de reciclagem); materiais destinados aos centros de processamento secundário; ou até as indústrias que recebem ou compram os produtos gerados pela usina.

Conforme Silva (2012), o destino final dos materiais de demolição tem considerável influência na quantificação de energia despendida nesta etapa. Se existe perspectiva de reuso dos materiais, sem que estes sejam novamente processados, a fase de desconstrução tende a consumir mais energia devido ao maior esforço e cuidados necessários para que a edificação seja desconstruída sem danificar os materiais em questão. Por outro lado, nos casos em que os materiais são reciclados, ou seja, sofrem processos de transformação para posterior utilização, o consumo energético durante a fase de desconstrução tende a ser menor. Porém, ao serem utilizados os materiais proveniente de reuso ou reciclagem na construção de uma nova edificação, tais processos contribuirão para a redução da energia embutida na fase pré-operacional desta nova edificação. Por isso também é fundamental que materiais passíveis de serem reutilizados tenham certa prioridade durante a seleção de materiais na fase inicial do ciclo de vida.

Ding, Wang e Zou (2016) realizaram uma pesquisa para explorar e simular como a mudança de atitude e a interação dinâmica entre as partes interessadas pode influenciar o desempenho ambiental do gerenciamento de resíduos de demolição. Foi desenvolvido um modelo para avaliar o impacto ambiental utilizando a técnica de modelagem baseada em agentes avaliando os impactos ambientais quantificados em quatro categorias: recursos da terra, recursos hídricos, recursos do ar e recursos energéticos. A pesquisa indicou que o governo pode estar mais atento ao gerenciamento de resíduos de demolição no futuro, devido ao grande volume de resíduos gerados e consequente dano ao meio ambiente, especialmente na fase de aterro e transporte. Os resultados da simulação demonstram a importância da

interação e atitude entre as partes interessadas, tais como projetistas e as empresas de demolição, bem como a aplicação de tecnologias de desconstrução mais consciente.

2.4 FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS PARA ACV

Quando o conceito de ACV começou a surgir, os cálculos para quantificar impactos ambientais eram realizados sem o auxílio de computadores modernos, o que demandava uma quantidade enorme de tempo. Em 1973, pela primeira vez, nos EUA, um programa de computador foi usado para fazer uma ACV. E Atualmente já existem diversos programas próprios para isso (WEISSENBERGER; JENSCH; LANG, 2014).

A realização de ACV com o auxílio de ferramentas específicas e softwares tornou este sistema complexo em um processo mais simplificado, porém ainda há muitas incertezas quanto à questão da precisão destas ferramentas. Existem diversas ferramentas para auxiliar na realização de Avaliação do Ciclo de Vida. Segundo Macedo (2011), um software muito utilizado é o SimaPro, um software suíço desenvolvido para ACV em geral, que pode ser aplicado a qualquer área da indústria. O SimaPro foi criado em 1990, através da interpretação da legislação holandesa e consiste em uma plataforma que pode ser usada para efetuar ACV segundo a fronteira do berço ao túmulo, seguindo as premissas da ISO 14040.

O software GaBi, desenvolvido na Alemanha, também realiza ACV para produtos em diversas áreas da indústria. A ferramenta modela elementos da fabricação de um produto ou sistema. GaBi fornece um banco de dados que detalha custos, consumo de energia e impactos ambientais de matérias-primas e de componentes processados, apresentando opções alternativas para fabricação, distribuição e reciclabilidade. Outra ferramenta de ACV conhecida internacionalmente é o OpenLCA, também da Alemanha, gratuita e de código aberto. O software é resultado da colaboração de diversos pesquisadores, e permite realizar exportação dos dados de forma facilitada, assim como importar bancos de dados em diversos formatos. A ferramenta calcula indicadores ambientais, sociais e econômicos, e também pode funcionar como *plug-in* em outros ambientes de TI.

Existem também ferramentas específicas para o setor da construção civil que têm como base os princípios da ACV, como por exemplo: *Athena, Knowledgebase, Butterfly Tool, Carbon Calculator,* BEES, entre outros (ARIYARATNE; MONCASTER,

2014). O software BEES (*Building for Environmental and Economic Sustainability*) foi desenvolvido pelo laboratório de engenharia do NIST (*National Institute of Standards and Technology*) e mede o desempenho ambiental dos produtos de construção usando a abordagem de ACV especificada na série de padrões ISO 14040. O BEES Online, que é destinado a designers, construtores e fabricantes de produtos, inclui dados reais de desempenho ambiental e econômico para 230 produtos de construção. A ferramenta permite analisar as etapas da vida de um produto incluindo: aquisição, fabricação, transporte, instalação, uso e reciclagem de matérias-primas e gerenciamento de resíduos. Porém, conforme pontuado por Oliveira (2007), o programa foi desenvolvido nos Estados Unidos e portanto não se pode ter certeza de sua aplicabilidade em realidades tão diferentes como é o caso do Brasil. Isso se deve principalmente às diferença tecnológica nos processos de fabricação e construção.

O Instituto Athena (*Athena Sustainable Materials Institute*) é composto por profissionais do setor da construção civil, incluindo também fabricantes de produtos e atuantes na área de políticas publicas que se baseiam na colaboração e troca de infomações para promover a ACV no setor dentro da américa do norte. O instituto desenvolve ferramentas de ACV para auxiliar em projetos mais sustentáveis, como o *Impact Estimator* e o *EcoCalculator*, ambos disponíveis gratuitamente. Os dois software estão relacionados e possuem bancos de dados que fornecem informações do berço ao túmulo para materiais de construção, produtos, transporte e processos de construção e demolição, cumprindo os padrões da ISO. A Athena *EcoCalculator* é uma ferramenta de planilha com configurações pré-definidas de montagem e envelope, realiza estimativas rápidas porém é mais limitada quanto a opções de design. Já o software *Impact Estimator* é mais flexível, permite estimativas mais detalhadas e precisas. O *Impact Estimator* também permite ao usuário inserir resultados de simulação de energia para calcular seus efeitos operacionais juntos com os impactos incorporados.

2.5 BIM NA AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA

O *Building Information Modeling*, em português, Modelagem da Informação da Construção, é um conceito de modelagem que apresenta todo em conjunto de parâmetros, considera todas informações digitalizadas e relacionadas ao projeto, fornece desenhos conceituais e detalhados, permitindo que a construtibilidade seja

analisada antes da execução. Segundo Eastman *et. al.* (2011), os problemas mais comuns associados à troca de informação e comunicação através das bases em 2D durante a fase de projeto estão relacionados à grande demanda de tempo e despesas necessárias para gerar informações significativas sobre o projeto proposto. Tais informações incluem a avaliação dos custos estimados, análises energéticas, detalhes estruturais, entre outros. Estas análises normalmente são realizadas por último, quando já é tarde para se propor mudanças importantes. Ou seja, devido à falta de interatividade entre os projetos, as inconsistências só podem ser percebidas no final, o que pode comprometer o projeto original e todo seu andamento.

O BIM é um dos avanços mais promissores na indústria de arquitetura, engenharia e construção (AEC). Com a tecnologia BIM é possível criar modelos virtuais de edificações de forma extremamente acurada. Quando prontos, estes modelos gerados contêm geometrias precisas e dados necessários para representar e auxiliar na construção, fabricação e aquisição de produtos para a edificação. (EASTMAN *et al.*, 2011). O BIM é uma plataforma da tecnologia da informação aplicada à construção civil e materializada em novos software que oferecem novas funcionalidades aplicáveis a todo ciclo de vida de um empreendimento. As ferramentas BIM não são ferramentas que possibilitam apenas a modelagem e visualização gráfica em 3D, e sim ferramentas que apresentam soluções baseadas em objetos paramétricos e inteligentes com atualizações automáticas (CBIC, 2016).

Ao trabalhar com modelagem BIM, é fundamental atentar-se ao nível de detalhamento dos modelos, ou *Load of Detail* (LOD). A definição do LOD serve como uma referência que permite aos profissionais da Indústria de AEC especificarem e articularem com alto grau de clareza o conteúdo e a confiabilidade dos modelos BIM em vários estágios do processo de projeto e construção. Os LODs não são definidos por fases de projetos. Ao contrário, a conclusão da fase de projeto, bem como qualquer outro marco ou entrega, pode ser definida através do LOD. Esta abordagem é importante por diversos fatores: a) atualmente não há um padrão detalhado para as fases de projeto, muitos arquitetos criaram padrões internos ao próprio escritório, que acabam diferindo de uma empresa para outra e, mesmo dentro de uma única empresa, os requisitos as vezes são ajustados às necessidades de um projeto específico; b) os sistemas de construção progridem desde o conceito até a definição precisa, de modo que, a qualquer momento, diferentes elementos estarão em diferentes pontos ao longo dessa progressão (BIM Forum, 2016). O QUADRO 1

apresenta de forma mais específica a definição e informações que devem estar presentes em cada um dos níveis de detalhes.

QUADRO 1 – ESPECIFICAÇÃO DOS DIFERENTES LOD

LOD	DEFINIÇÃO	DADOS E DETALHES
100	Elementos genérico	Dimensões e volume aproximado da edificação
200	Elementos representados graficamente no modelo como sistemas, objetos ou conjuntos genéricos.	Quantidades, dimensões, formas, localização e orientação aproximadas.
300	Elementos representados graficamente no modelo como sistemas, objetos ou conjuntos específicos.	Quantidades, dimensões, formas, localização e orientação detalhadas.
350	Elementos representados graficamente no modelo como sistemas, objetos ou conjuntos, especificando elementos responsáveis pela interfaces entre os sistemas.	Quantidades, dimensões, formas, localização e orientação detalhadas. Itens de suporte e conexão.
400	Elementos representados graficamente no modelo como sistemas, objetos ou conjuntos, especificando elementos responsáveis pela interfaces entre os sistemas e instalações.	Quantidades, dimensões, formas, localização e orientação detalhadas. Itens de suporte e conexão com detalhes de instalação e fabricação dos componentes.
500	Elementos e modelo são representações verificadas em campo.	Quantidades, dimensões, formas, localização e orientação detalhadas. Itens de suporte e conexão com detalhes de instalação e fabricação dos componentes. A representação está relacionada à verificação de campo e portanto, não é uma indicação de progressão para um nível mais alto.

FONTE: Adaptado de BIM Forum (2016).

As técnicas existentes para avaliação de construções mais sustentáveis usando o BIM normalmente dependem de ferramentas de avaliação adquiridas externamente ao software de modelagem, o que pode causar problemas associados à interoperabilidade e falta de dados e informações compatíveis. Muitas vezes é necessária uma grande demanda de tempo e trabalho para converter os formatos conforme a necessidade. O intercâmbio de dados entre duas aplicações BIM diferentes pode ser feito de quatro maneiras: através de ligações diretas e proprietárias entre ferramentas BIM específicas; por formatos de arquivos de intercambio proprietários; formatos públicos de intercambio; e formatos baseados em XML. Um formato de arquivo proprietário é aquele que foi desenvolvido por uma empresa para realizar a interface com outro aplicativo daquela mesma companhia ou outra específica. A ligação direta é uma interface binária em tempo de execução. Os formatos de intercambio público envolvem o uso de um padrão aberto para os modelos. O Industry Foundation Classes (IFC) é uma das principais opções

internacionais de formato de intercambio público, desenvolvido para criar um grande conjunto de dados e informações e permitir que estes sejam intercambiados entre diversas aplicações na indústria de AEC. Outra forma de intercambiar dados é por meio do *eXtensible Markup Language* (XML), que é uma extensão para o HTML, a linguagem usada para enviar informações pela web. Diversas aplicações oferecem a alternativa de transferência de arquivo no formato *Green Building* XML (gbXML), que foi desenvolvido para transferir informações necessárias para análise de energia do envelope de construções, zonas térmicas e simulação de equipamentos mecânicos (EASTMAN et al. 2011).

Segundo Yung e Wang (2014), o BIM é uma técnica que usa modelos 3D em conjunto com outras ferramentas inteligentes, como por exemplo, informações relacionadas ao tempo e cronogramas (4D), e custos e orçamentos (5D). Em relação à sexta dimensão do BIM, ainda não há um conceito bem definido entre os diversos autores e pesquisadores da área, porém pode-se afirmar que o termo BIM 6D abrange o ciclo de vida da construção, voltado ao desempenho, manutenção e sustentabilidade. Ou seja, uma vez que o BIM permite que a informação multidisciplinar esteja disponível através de um modelo, ele cria uma oportunidade para que índices de sustentabilidade sejam incorporados ao longo do processo de concepção (JRADE; ABDULLA, 2012).

Um dos maiores desafios da indústria da construção civil é se beneficiar de conhecimentos e tecnologias que visam o desenvolvimento sustentável. ACV e BIM são ferramentas que permitem alcançar esse propósito. Serviços ambientalmente corretos necessitam auxílio de ferramentas mais colaborativas e o BIM pode contribuir para a melhoria da comunicação e colaboração entre os diferentes atores envolvidos em um projeto (ANTÓN; DÍAZ, 2014).

A partir da modelagem em BIM é possível, ainda nas fases iniciais do projeto, que o modelo, em conjunto com as sua capacidade para armazenar informações adicionais sobre o projeto, seja capaz de fornecer uma plataforma útil para avaliar os aspectos de sustentabilidade. Uma vez que os dados de impacto ambiental sobre os componentes de construção podem ser adicionados ao modelo BIM, então é possível que o modelo seja utilizado para realizar estas análises. Os valores obtidos podem ser usados para comparar as opções de projeto nas fases iniciais do empreendimento. A fixação direta dos dados nos modelos pode aprimorar a comunicação e análise de

informações relacionadas à questões externas, tais como avaliações de carbono incorporado, por exemplo (ARIYARATNE; MONCASTER, 2014).

Construções mais sustentáveis demandam mais atores envolvidos nos projetos, novos métodos de construção, design avançados e diversas análises. Isto implica em grande intercolaboração entre as partes envolvidas, visando uma comunicação efetiva e compartilhamento de informações, incluindo a tomada de decisões sobre a forma de alcançar objetivos comuns. A plataforma BIM facilita o processo de tomada de decisões através de ferramentas que auxiliam as análises. De acordo com Eastman *et. al.* (2011), a interoperabilidade pode ser entendida como a habilidade de se transmitir dados entre diferentes aplicativos, facilitando de forma automatizada os fluxos de trabalho e eliminando a necessidade de réplica de informações já fornecidas anteriormente.

A partir disso, é clara a necessidade de métodos que integrem modelos BIM e sistemas ACV, uma vez que teriam o potencial para simplificar os processos de ACV e facilitar a gestão rigorosa do impacto ambiental das instalações construídas. De acordo com o estudo de Ariyaratne e Moncaster (2014), no qual foram realizadas entrevistas com profissionais da área, o uso de software BIM para calcular carbono emitido foi amplamente apoiado. O índice de aprovação entre os participantes da pesquisa para essas ideias foi de 81%. Foram testadas aplicações do BIM para análises ambientais, mostrando que esta prática pode ser viável e bem aceita no mercado. Os dados de emissões de carbono e energia embutida podem ser adicionados ao software BIM de diversas maneiras. Uma das opções exploradas foi a introdução de ferramentas de plug-in. Um produto similar é atualmente utilizado pela indústria de iluminação para o desenvolvimento de seus projetos usando o software desenvolvido pela indústria, o Dialux. Para esta aplicação em particular, ferramentas de plug-in obtidas junto aos fornecedores contêm informações técnicas sobre produtos específicos que são adicionados a um modelo 3D para gerar projeto de iluminação. Informações que podem ser facilmente adicionados aos software que os projetistas já estão utilizando pode ser considerado como uma forma comercial mais inteligente de incentivar o uso de determinados produtos no projeto. Em termos de tecnologia, é possível desenvolver aplicações semelhantes para fornecer detalhes de emissões associadas à fabricação de materiais e componentes que podem ser adicionados aos modelos BIM. Além disso, os projetistas também podem adicionar as suas próprias equações nos software para automatizar o processo de cálculo de

emissões. Em conjunto a isso, é possível explorar ferramentas que possam relacionar o modelo BIM a simulações energética, dando continuidade na análise do ciclo de vida do edifício.

2.5.1 Ferramentas BIM para AVC

Pesquisadores vêm tentando relacionar softwares de ACV com sistemas BIM, integrando funções e ferramentas com simulação termo-energética. Dawood *et al.* (2009) desenvolveram um modelo BIM no Revit, no qual foram inseridas informações relacionadas à localização e orientação da edificação, propriedade físicas dos materiais, formas, pesos, entre outros. Depois, usando o IES-VE, foram acessadas as variáveis ambientais e de custos para analisar e comparar os impactos. O *software* pode comparar e contrastar como diferentes escolhas de projeto afetam o desempenho de uma ampla gama de elementos de construção, como o desempenho térmico, de fluxo de ar e iluminação e consumo de energia e emissão de CO_2. Com o uso do SimaPro, foram aplicados dados e variáveis nos componentes selecionados na etapa anterior. O método apresentou uma ferramenta genérica porém com diversos aspectos positivos, contemplando processos integrados, simulação do edifício completo, resultados quantitativos e qualitativos, além de possibilitar uma exportação de dados para o EnergyPlus.

Peng e Wu (2015) realizaram um estudo de caso combinando diferentes softwares para estimar as emissões de CO_2 durante o ciclo de vida de um edifício de escritório dentro dos limites do berço ao túmulo. O modelo BIM foi desenvolvido no Revit e o software Ecotect foi utilizado para fornecer informações e ferramentas necessárias para a simulação do desempenho do edifício. Ambos software foram desenvolvidos pela Autodesk. O ciclo de vida do CO_2 foi dividido em três partes: fase de construção, operação e demolição. Por fim, uma análise de sensibilidade foi realizada alterando vários parâmetros alternativos, para identificar qual parâmetro tem mais impacto sobre o desempenho do edifício. Neste estudo, os autores concluíram que os dois *softwares* utilizados não se integram completamente, não havendo sobreposição virtual em relação a ferramentas, terminologias e estrutura de dados, ainda que ambas as ferramentas tenham sido desenvolvidas pela Autodesk. O edifício foi modelado separadamente no Revit e no Ecotect, e segundo os autores, não existe fluxo direto de informação entre as ferramentas, porém não foi informado de que forma

foi testado este fluxo. Por outro lado, em outra pesquisa que também utilizou os mesmos dois software, Shoubi *et al.* (2015) observaram que o Ecotect conseguiu identificar os elementos modelados no Revit. Primeiramente, foi necessário criar zonas e ambientes no modelo e exportar o arquivo no formato gbXML, no qual foram atribuídas outras características (localização e tipo do edifício). Após a exportação, no Ecotect foram atribuídas mais características como atividades, tipo do sistemas e limites de temperatura confortável. O software 3D Max foi utilizado para identificar soluções de projeto alternativas que poderiam contribuir para a redução do consumo de energia. Ao final, os autores conseguiram demonstrar que os software Revit e Ecotect podem ser integrados para facilitar a simulação e a análise de consumo energético.

Atualmente, o software Ecotect não está mais disponível comercialmente, o que mostra a desvantagem de basear métodos e processos que dependem de ferramentas de código fechado, desenvolvidas por empresas particulares. Outro software de análises energéticas que vêm sendo utilizado como substituto é o Green Building Studio, também desenvolvido pela Autodesk. A pesquisa de Abanda e Byers (2016) investigou o impacto da orientação do edifício sobre o consumo de energia em pequena escala, avaliando como o BIM pode ser usado para facilitar esse processo. O modelo criado no Revit foi exportado para o Green Building Studio, e com base na análise do consumo de energia correspondente às diferentes orientações, os autores afirmaram que um edifício bem orientado pode poupar uma quantidade considerável de energia ao longo do seu ciclo de vida. No entanto, apesar desta capacidade do BIM de possibilitar a tomada de decisão analisando modelos virtuais, ainda existem algumas limitações. Dentre as limitações percebidas pelos autores, uma delas é a falta de conexão em tempo real entre o modelo BIM e os software de simulação energética. Ou seja, se após a exportação, forem descobertos erros ou realizadas modificações no projeto, então o modelo deverá ser corrigido e exportado novamente para o software de simulaçã.

Borges et al. (2018) avaliaram a aplicação do BIM na ACV de edificações a partir de um estudo de caso utilizando o Revit e o DesignBuilder. Os autores estimaram as emissões de CO2 na fase de pré-uso de uma edificação escolar. No entanto, notou-se problemas na questão da interoperabilidade entre as duas ferramentas. O DesgnBuilder permite uma interface amigável para inserir informações

de entrada e gerar resultados de simulação termo-energética baseada na ferramenta EnergyPlus.

O EnergyPlus é um software gratuito amplamente utilizado, é um programa de código aberto que foi desenvolvido em colaboração entre diversos institutos acadêmicos, pesquisadores e laboratórios do Departamento de Energia dos EUA (DOE). Segundo manual do CB3E (2008), o software EnergyPlus foi criado como uma iniciativa para estimular o desenvolvimento de um código computacional capaz de calcular não só a carga térmica da edificação, mas também que pudesse prever o consumo de energia de uma edificação condicionada. Diversas pesquisas analisam e validam o uso do software EnergyPlus de forma positiva. Gomes (2010) validou a simulação no programa EnergyPlus fazendo comparações com medições *in situ*. No estudo de Shabunko, Lim e Mathew (2016) foram desenvolvidos modelos no EnergyPlus para três tipos de projetos de construção tipicamente usado em habitações na Ásia, comparando o desempenho energético de 400 edifícios. Yang, Fu e Qin (2015) avaliaram a precisão e a aplicabilidade de três modelos térmicos no EnergyPlus para calcular os efeitos da umidade e de diferentes taxas de infiltração sobre o consumo de energia em condições climáticas diversas. Barbosa *et al.* (2013) avaliaram o desempenho térmico de um ambiente com fachada dupla, mostrando uma vantagem do EnergyPlus em relação às simulações por *Computacional Fluid Dynamics* (CFD). Segundo Zhang *et al.* (2013), o CFD é adotado como ferramenta eficaz para simulações de ventilação natural, no entanto, torna-se instável para o modelo de transferência de calor conjugado, que é a transferência de calor transiente entre sólido e fluido. As pesquisas de Tabares-Velasco, Christensen e Bianchi (2012), Brito *et al.* (2015) e Lee, Medina e Sun (2016) validam o uso do EnergyPlus para modelos com materiais de mudança de fase, ou *Phase Change Materials* (PCM). Batista, Lamberts e Güths (2011) avaliam os algoritmos que o software utiliza para a simulação dos processos de condução e convecção, e assim como Anđelković; Mujan e Dakić (2016), empregam o modelo de rede *Airflow Network* para ventilação natural, e apresentam como resultado um alto nível de correspondência entre valores reais medidos e valores simulados.

A NBR 15.575 (ABNT, 2013) recomenda o uso do EnergyPlus para a realização das simulações computacionais de desempenho térmico. A norma permite a utilização de outros programas, desde que sejam validados pela American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE) - Standard 140. O

Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (RTQ-R), elaborado pela Eletrobras e Procel (2012) também indica o uso deste programa. Porém, diferente da NBR 15.575, que avalia o desempenho térmico pela simulação das temperaturas internas máxima e mínima do edifício em um dia típico de verão e de inverno, o RTQ exige uma simulação térmica anual que avalia os parâmetros de graus-hora para resfriamento, consumo energético para aquecimento e refrigeração.

Outras pesquisas estão mais focadas em relacionar software de modelagem BIM com bases de dados de ACV reconhecidas. Jrade e Abdulla (2012), por exemplo, descreveram um protótipo desenvolvido e validado por meio de uma ferramenta de ACV, Athena EcoCalculator. No estudo, esta ferramenta foi interligada a um modelo BIM, desenvolvido no Revit, utilizando o formato IFC para troca de dados e organização dos mesmo através de macros no Excel. A vantagem deste método testado é a facilidade, sendo necessário apenas que o usuário possua habilidades no uso do Revit e Microsoft Excel, no qual Athena é baseado. Porém um dos pontos negativos percebidos foi que os dados de energia embutida são referentes a materiais de construções dos EUA e Canadá, o que impede a realização de uma ACV efetiva em outras localidades. Os autores sugerem um melhor desenvolvimento na interface do software com a ferramenta BIM para que a aplicação da ACV seja mais interativa.

Inyim *et al.* (2014) introduziram o *Simulation of Environmental Impact Construction* (SimulEICon), uma ferramenta que fornece a análise do impacto econômico e ambiental, projetado especificamente para ajudar no processo de tomada de decisão durante a fase de concepção de um projeto de construção. SimulEICon é uma extensão BIM (add-on para o software Revit), que utiliza o Microsoft Access para as operações de banco de dados relacionados. Além disso, o algoritmo genético NSGA-II foi utilizado para a otimização, a fim de encontrar soluções que estivessem em conformidade com os objetivos do projeto. No estudo de caso apresentado pelos autores, verificou-se que várias das soluções geradas pelo SimulEICon tiveram componentes correspondentes ao estudo de caso específico. A ampla gama de resultados gerados contribuiu para a seleção de soluções que atenderam com sucesso os objetivos do projeto. Porém, a limitação do SimulEICon é que ele considera apenas três aspectos por vez (neste caso, tempo, custo, e emissão de CO_2) e diversos outros fatores do projeto acabam sendo desconsiderados durante o processo de tomada de decisão. Para futuros trabalhos, foi recomendado pelos

pesquisadores a integração de mais fatores do projeto na tomada de decisão, tais como o consumo de energia durante a fase de ocupação, por exemplo.

Kulahcioglu, Dang e Toklu (2012) apresentaram um protótipo de software para análises 3D e avaliação do ciclo de vida de todo o processo de construção, utilizando também o formato IFC para melhor gerir os dados. Foi utilizado a interface de GaBi, e como plataforma de implementação foi utilizado o Blender (Blender 2010), uma fonte aberta 3D para criação de conteúdo livre. A extensão no Blender foi criada através de programação em Python. No entanto, não foram encontradas maneiras diretas para importar arquivos IFC para o Blender. Então como solução para este problema, o arquivo IFC foi convertido em um formato de arquivo intermediário para, em seguida, ser importado para o Blender. O formato intermediário escolhido foi KMZ, uma versão compactada do KML. Obtido através da importação para o Google SketchUp. Este fator, e outros aspectos da ACV mostraram que o método ainda deve ser aprimorado.

Recentemente uma ferramenta que busca a integração direta entre ACV e BIM foi desenvolvida pela KT Innovations em parceria com a Autodesk e com a Thinkstep (desenvolvedora de GaBi). O software Tally funciona como um plug-in dentro da interface do Revit, incorporando dados de ciclo de vida necessários para análises no processo de projeto. A ferramenta Tally permite que arquitetos e engenheiros que trabalham no Revit possam quantificar o impacto ambiental dos materiais de construção e realizem análises comparativas entre opções de design e gerem relatórios de impacto. Bueno e Fabricio (2016) realizaram uma pesquisa-ação envolvendo profissionais da cidade de São Paulo que trabalham majoritariamente na plataforma BIM, e que demonstraram interesse na aplicação de estudos de ACV para embasar decisões de projeto. Os resultados do estudo destacaram dificuldades dos usuários quanto ao fato de a ferramenta estar na língua inglesa, dificultando o reconhecimento de nomenclatura técnica de alguns materiais e componentes construtivos. A maior parte dos usuários não considerou o processo de definição dos materiais no plug-in complicada, porém esse processo se mostrou bastante trabalhoso e demorado, pela necessidade de os materiais serem definidos individualmente, um a um no processo de correlação dos bancos de dados. Em relação à disponibilidade de dados ambientais oferecidos pelo software, as avaliações foram consideradas regulares ou ruins, devido ao fato de a base de dados não apresentar informações ambientais compatíveis com a realidade brasileira, o que dificulta a obtenção de resultados mais realísticos. No entanto, segundo os autores, essa problemática vai

além das capacidade do software em si, e se justifica pela falta de disponibilidade de dados brasileiros de ciclo de vida para a grande maioria dos insumos da construção civil. Quanto à necessidade de aproximações e estimativas, foi percebida certa dificuldade devido à limitação de materiais disponíveis em sua biblioteca.

Soust-Verdaguer, Llatas e García-Martínez (2017) realizaram uma revisão da literatura que analisa métodos e a integração entre ferramentas de ACV e BIM. Os autores perceberam que a maior parte do artigos revisados focam apenas nas etapas pré-operacional e operacional, normalmente de forma parcial. E que nenhuma pesquisa incluiu fatores de reciclagem e reuso de materiais, sendo que a vida útil da edificação foi omitida em grande parte dos casos. As etapas pós-operacionais e de manutenção foram raramente consideradas. A maioria dos casos aplicados no Canadá e nos EUA usou a ferramenta Athena, com dados aplicáveis para todos os tipos de construção norte-americanos. E outras pesquisas utilizaram bases de dados locais para obter dados dos materiais de construção. A maior parte das pesquisas usou o Revit para desenvolver o modelo BIM. Os métodos analisados incluíam: plug-in que vincula software BIM à ferramenta de ACV; integração com software de simulação energética; e o uso de software BIM para a quantificação de materiais de construção. O uso mais significativo de softwares BIM foi a obtenção automática de quantitativos de materiais. A maior parte das pesquisas extraiu quantitativos automáticos, em seguida, exportou a lista para uma planilha de Excel onde os dados foram organizados de forma manual para aplicar a ferramenta de ACV. A pesquisa evidenciou o interesse crescente pela integração do BIM com os métodos de cálculo do impacto ambiental porém, que a literatura sobre o assunto ainda é escassa.

Para melhorar a troca de dados entre ferramentas, os modelos devem incluir mais informações sobre as propriedades dos materiais e as características construtivas dos edifícios, adaptando os bancos de dados do modelo BIM à estrutura de dados do método de ACV. Ou seja, o ideal é que dados sobre materiais ou propriedades de componentes sejam adicionados às bibliotecas BIM pelo usuário final de antemão. Em relação ao LOD, é apropriado que sejam definidos materiais e componentes mais relevantes, incluindo: espessura de parede, camadas de componentes e a definição de elementos estruturais. De acordo com Soust-Verdaguer; Llatas e García-Martínez (2017), o LOD 300 parece ser o mais adequado para verificar os impactos ambientais durante os estágios iniciais do projeto. Já, a pesquisa de Dupuis *et al.* (2017) apresentou um método para executar

automaticamente cálculos de ACV nos primeiros níveis de desenvolvimento do modelo BIM, mais especificamente com LOD100, realizando atualizações simples conforme o modelo é detalhado. Porém, os mesmos autores afirmam que cada elemento de dados deve estar pelo menos no nível de detalhe LOD350 para que os resultados de ACV sejam mais precisos.

Ainda de acordo com a revisão feita por Soust-Verdaguer, Llatas e García-Martínez (2017), as ferramentas BIM desenvolvidas por empresas de software individuais foram criticadas por abordar a interoperabilidade entre seus próprios produtos, tornando mais difícil o uso do BIM, especialmente para empresas pequeno porte. Este fato evidencia a necessidade de desenvolver novas ferramentas baseadas em esquemas BIM abertos. Foi citada também a limitação de vários softwares de simulação energética quanto à interoperabilidade com software BIM. Segundo os autores, a integração BIM e ACV pode ser desenvolvida em três níveis: 1) integrando BIM como ferramenta, durante o estágio do inventário para a quantificação de materiais e elementos de construção; 2) usar o BIM como ferramenta para quantificar e organizar materiais e componentes, integrar informações ambientais ao software BIM ou à softwares de simulação; 3) desenvolvimento de processos automatizados que combinam diferentes dados e software. Também é confirmado que a integração do BIM-ACV pode reduzir os esforços na entrada de dados e pode ser aplicada como uma ferramenta útil para comparar materiais de construção e cenários de energia, embora várias limitações também tenham sido detectadas nos métodos estudados. A pesquisa destacou como recomendações para usuários finais que o desempenho ambiental dos edifícios seja feito desde os primeiros estágios do projeto. Para os desenvolvedores de software, um dos maiores desafios é melhorar a interoperabilidade entre as duas ferramentas. A complexidade em associar cada material e componente de construção aos processos da unidade durante o ciclo de vida do edifício (por exemplo, transporte, manutenção, envelope) foi detectada como uma grande dificuldade.

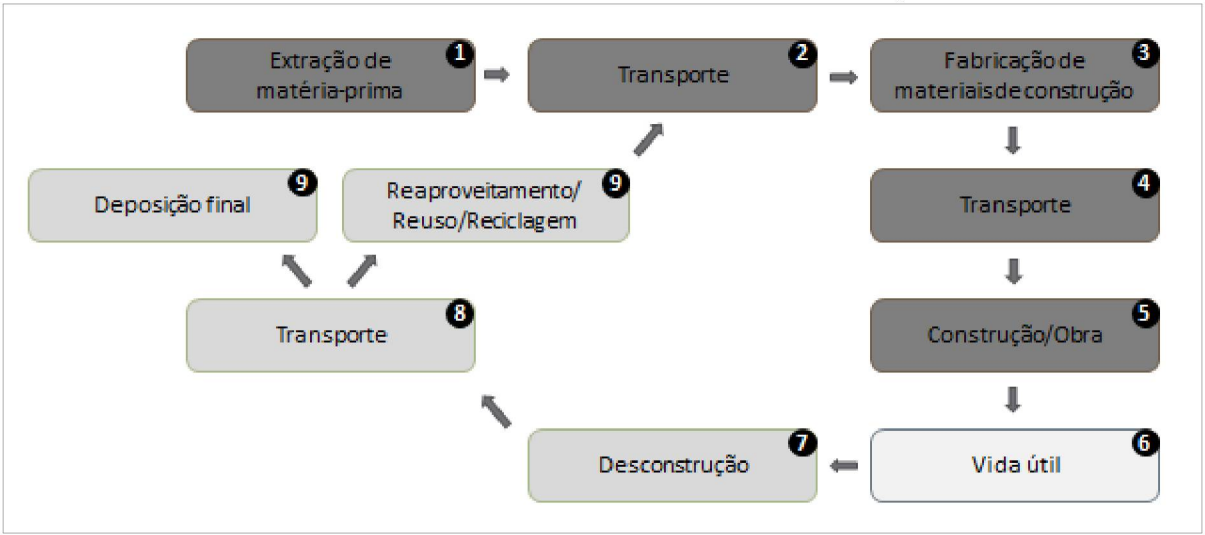
Diante das considerações abrangidas neste capítulo a respeito de outras pesquisas que envolvem aspectos de grande interesse no atual trabalho, foi possível selecionar algumas ferramentas e desenvolver o método de ACVE de forma indutiva e dedutiva, conforme descrito na próxima seção.

3 MÉTODO DE ACVE USANDO BIM E SIMULAÇÃO TÉRMO-ENERGÉTICA

3.1 DEFINIÇÃO DA ESTRUTURA DA AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA ENERGÉTICO

Conforme já descrito no capítulo 2, segundo a NBR ISO 14040, para se realizar uma ACV deve-se determinar, de forma detalhada, o objetivo, escopo e como será feita a análise do inventário e a avaliação do impacto. O escopo da ACVE proposta no presente método consiste em avaliar os impactos durante todo ciclo de vida da edificação, considerando o ciclo do berço ao túmulo, ou do berço ao berço. A FIGURA 4 mostra as etapas do ciclo de vida de uma edificação dentro das fases pré-operacional, operacional e pós-operacional.

FIGURA 4 - ETAPAS DO CICLO DE VIDA DE EDIFICAÇÕES



Fonte: A autora

No método proposto, as etapas de construção e desconstrução, etapa 5 e 7 respectivamente, estão fora da fronteira do sistema. As categorias de impacto consideradas nesta análise são: consumo de energia e emissão de CO_2. Ou seja, a ACVE está delimitada em analisar a quantidade de energia consumida e de CO_2 que é emitido de forma direta nos processos de extração de matéria prima (etapa 1), fabricação (3) e transporte de materiais que entram e saem da obra (etapas 2 e 4). Os materiais que saem da obra aqui considerados são aqueles materiais de construção desperdiçados na obra, os quais são transportados até o local, porém não são utilizados, ou são transformado em resíduos. Também está dentro do sistema o

transporte dos materiais que saem da área demolida (etapa 8) até seu destino final (etapa 9). Além disso, também está incluso dentro do sistema a fase de operação do edifício, a qual comtempla a energia consumida pelos usuários e respectivas emissões derivadas da produção desta energia, assim como a energia embutida e CO_2 relacionado à produção e transporte dos materiais de reposição e manutenção ao longo da vida útil do edifício (etapa 6). Os impactos referentes à fabricação e descarte dos equipamentos eletrodomésticos, eletrônicos e mobiliários da residência estão fora da fronteira de análise. Está sendo contabilizado apenas o impacto referente ao consumo de energia destes equipamentos no uso durante a operação do edifício. Estão fora do sistema de análise os impactos relacionados às embalagens dos materiais que chegam até a obra, assim como os o consumo de energia dos equipamentos utilizados na construção e desconstrução do edifício, bem como transportes diário de funcionários e outras atividades dentro das etapas 5 e 7.

O método proposto possibilitará a realização da ACVE durante a etapa de projeto. Portanto, o objetivo da ACVE realizada através do presente método é possibilitar a comparação de diferentes configurações e facilitar a tomada de decisão pelos projetistas e consultores antes que a edificação seja construída. A intenção é possibilitar a análises e comparações do uso de diferentes materiais, sistemas construtivos e *layout*, de forma interativa e mais automatizada.

Os dados de inventário devem ser levantados previamente. A fase de inventário neste método é independente, ou seja, o projetista ou consultor que for aplicar a ACVE seguindo este artefato poderá escolher o banco de dados que melhor lhe convier. Estudos de Avaliação do Ciclo de Vida normalmente utilizam banco de dados prontos, ou base de dados locais com as informações de impactos ambientais.

3.2 DESENVOLVIMENTO DO MÉTODO DE ACVE NOS SISTEMAS SELECIONADOS

Após uma análise abrangente sobre possibilidades e ferramentas de projeto e de análises utilizadas atualmente (capítulo 2), foram escolhidos dois principais software para desenvolver o método de ACVE. Primeiramente, foram explorados procedimentos que envolvem a inserção de parâmetros na ferramenta de projeto Revit e posterior exportação das informações do modelo para o software de simulação energética EnergyPlus. O Revit é uma ferramenta para a criação de projetos em BIM,

desenvolvida pela Autodesk e disponibilizado comercialmente, porém sua licença é oferecida gratuitamente para fins educacionais. No Revit é possível desenvolver modelagem parametrizada em 3D para projetos arquitetônicos, estruturais e complementares. Já, o EnergyPlus, é um software gratuito amplamente utilizado em pesquisas de simulação termo-energética no mundo todo. A ferramenta possui uma longa história de testes analíticos e comparativos, sendo constantemente atualizado com novas versões. Esta ferramenta foi escolhida neste trabalho devido ao seu reconhecimento como ferramenta para simulação dinâmica de edifício pela comunidade acadêmica.

3.2.1 Inserção de parâmetros no modelo BIM

Em software de modelagem BIM, é possível personalizar elementos, materiais e parâmetros, modificando componentes previamente definidos pelo programa ou então criar novos componentes, que podem ser configurados de forma mais adequada ao projeto. O Revit já possui diversas famílias de componentes de uma construção cadastrados em sua biblioteca, tais como: paredes, portas, janelas, tubulações, etc. As famílias se dividem em subcategorias, que por sua vez são divididas em elementos tipo que podem ser divididos em componentes e subcomponentes. Cada elemento tipo é um elemento específico que exerce determinada função, com características (subcomponentes) que definem os materiais, espessuras, propriedades físicas, mecânicas, aparência e outros diversos parâmetros. Por exemplo, um elemento tipo pode ser composto pelo material X e Y, com espessuras de 10 e 5 respectivamente. Se houver um elemento semelhante que também é composto pelo material X e Y, porém com espessuras 10 e 20, este será um elemento tipo diferente, porém ambos pertencerão à mesma família se exercerem a mesma função no projeto. Os elementos tipo se diferem por componentes pois cada componente pode possuir uma altura ou comprimento diferente e também estão alocados em diferentes ambientes.

No processo de desenvolvimento e detalhamento de novos projetos, os projetistas podem utilizar a biblioteca genérica do próprio software, criar suas próprias bibliotecas de famílias com elementos que possuam as caraterísticas e especificações desejadas, ou então utilizar as bibliotecas disponibilizadas pelos próprios fornecedores dos materiais de construção.

FIGURA 5 - PARTES DO MODELO BIM



FONTE: A autora

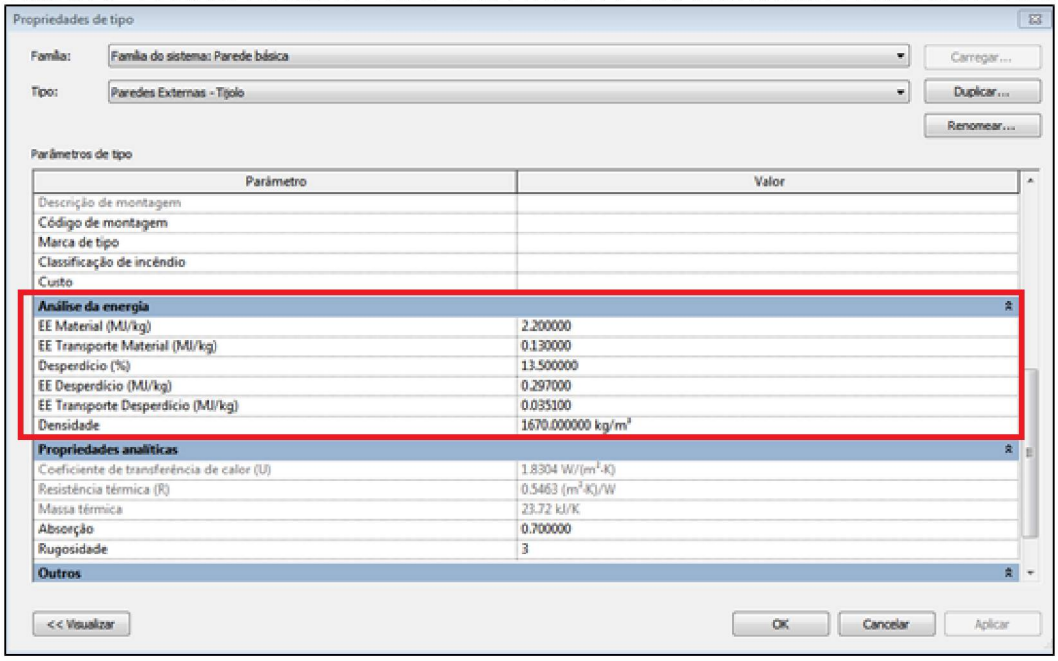
O desenvolvimento do método de ACVE ocorreu através de testes de possibilidade de inserção de parâmetros no modelo BIM. Primeiramente, os projetos arquitetônico, estrutural e hidráulico da edificação foram desenvolvidos no Revit a partir da biblioteca genérica fornecida pelo próprio programa. O modelo foi detalhado com o LOD 350. Depois, cada componente foi substituído por elementos personalizados. Os novos elementos tipo e materiais criados foram configurados no Revit, de forma a especificar o nome, composição e aparência. Foram atribuídos valores às propriedades intrínsecas de cada subcomponente e material, como por exemplo, espessura de camadas, densidade e outras propriedades físicas e térmicas. Para poder realizar a ACVE com base nas informações do modelo, foi necessário criar novos parâmetros específicos para este fim, e a partir disso foi possível atribuir os índices de energia embutida e emissão de CO_2 a cada elemento e/ou material.

Os novos parâmetros criados foram divididos em duas categorias: a) parâmetros do modelo e b) parâmetros de cálculo. Estas categorias e nomenclatura foram atribuídas pela autora com a finalidade de facilitar a compreensão dos processos realizados no presente trabalho. Os parâmetros do modelo são aqueles cujos valores ou características são atribuídos aos elementos tipo, subcomponentes e materiais no modelo. Mais especificamente, os parâmetros do modelo são os parâmetros nos quais o projetista ou consultor deverá entrar com os índices de impacto, dados estes já previamente conhecidos no levantamento dos dados de inventário. Os parâmetros de cálculo são parâmetros criados apenas nas tabelas do projeto, aos quais são atribuídas fórmulas para auxiliar no cálculo do valor final dos impactos.

Quando se cria novos parâmetros no Revit, é preciso escolher se estes parâmetros serão parâmetros de Projeto ou parâmetros Compartilhados e se serão de Instância ou de Tipo. A característica que diferencia um parâmetro Compartilhado e de Projeto é que as definições dos parâmetros Compartilhados são armazenadas

em um arquivo externo, independente de qualquer outro arquivo, permitindo que este seja acessado por diferentes famílias ou projetos no futuro. Os parâmetros Compartilhados também podem ser utilizados em identificadores do Revit e são úteis quando se deseja criar uma tabela que exiba diversas categorias de famílias, ou tabela multicategorias. Os parâmetros de Projeto não podem ser compartilhados em outros projetos e também não podem ser utilizados em identificadores. Por isso, no presente método, todos os parâmetros do modelo criados são parâmetros Compartilhados, uma vez que a intenção é que este artefato possa ser replicados em outros projetos. Em relação ao parâmetro de Tipo e Instância, a principal diferença entre eles é que o primeiro é atribuído para cada elemento tipo, enquanto o segundo se refere a cada componente, subcomponente ou material.

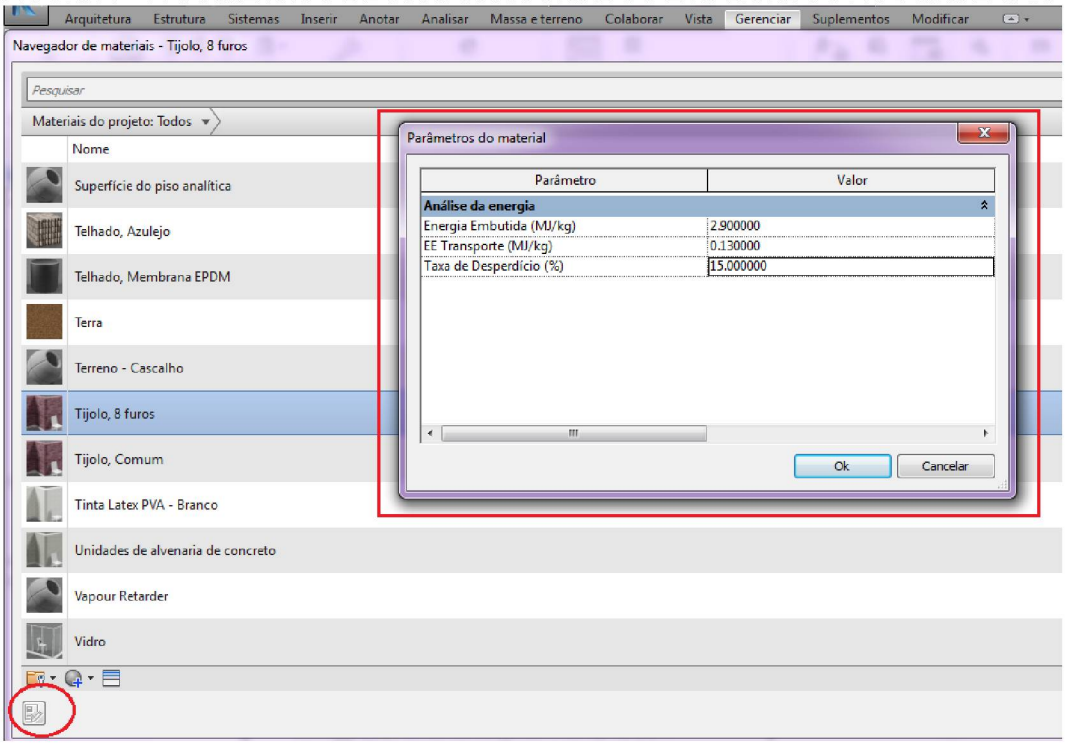
FIGURA 6 - PARÂMETROS DE TIPO CRIADOS E APLICADOS AOS ELEMENTOS TIPO



FONTE: A autora, via Revit

No presente método os parâmetros de Tipo são utilizados sendo associados a cada elemento tipo, e os parâmetros de Instância estão associados a cada material. Para exemplificar, a FIGURA 6 mostra como se pode acessar os parâmetros de Tipo do Revit nas propriedades de um elemento e a FIGURA 7 indica como é feito o acesso aos parâmetros de Instância na lista de materiais.

FIGURA 7 - PARÂMETROS DE INSTÂNCIA CRIADOS E APLICADOS AOS MATERIAIS



FONTE: A autora, via Revit

Para a realização da ACVE, foi necessário criar 16 parâmetros do modelo, discriminados na TABELA 2 e mais 19 parâmetros de cálculo, TABELA 3. Cada um dos parâmetros do modelo foi duplicado e configurado como parâmetro de Tipo e de Instância, exceto o parâmetro “separável” que foi configurado apenas como parâmetro de Tipo. Ressalta-se que os parâmetros do modelo configurados como parâmetros de Instância foram aplicados somente aos materiais. Os parâmetros de Tipo, foram aplicados, no presente método, apenas para elementos Tipo que não possuem detalhamento de material e camadas, ou em situações em que os índices de impactos ambientais se refiram ao elemento como um todo. Como exemplo, pode-se considerar uma situação em que o sistema construtivo envolva painéis pré-fabricados para vedação da envoltória. Se durante o levantamento dos dados de inventário os índices de impacto forem fornecidos para o elemento como um todo, sem detalhar impactos de cada material, os parâmetros de Tipo seriam utilizados para este elemento especificamente. Isto pode ser aplicado para diversos outros casos semelhantes em que não é possível determinar parâmetros por materiais.

TABELA 2 - 16 PARÂMETROS DO MODELO CRIADOS PARA A REALIZAÇÃO DA ACVE

FASE DA ACVE	NOME DO PARÂMETRO	DESCRIÇÃO	FORMATO DE DADO DE ENTRADA	SÍMBOLO
Pré-operação	EE Materiais (MJ/kg)	Índice Energia Embutida pela extração de matéria prima e fabricação dos materiais	número	**a**
	Energ. Transporte (MJ/kg*km)	Índice de consumo de energia pelo meio de transporte dos materiais (do fornecedor até a obra)	número	**b**
	Dist. Material (km)	Distância do fornecedor até a obra	número	**Ω**
	Desperdício (%)	Índice de desperdício de materiais na obra	número	**d**
	Densidade (kg/m3)	Densidade do material	número	**E**
	CO2 Mat (kg /kg)	Índice de emissão de CO_2 na extração de matéria prima e fabricação de materiais	número	**f**
	CO2 Transp. (kg/MJ)	Índice de emissão de CO_2 pelo meio de transporte dos materiais (do fornecedor até a obra)	número	**g**
Operação	Reposição	Fator de reposição e manutenção: quantas vezes o material precisará ser substituído ao longo da vida da edificação	número	**h**
Pós-operação	Energ. Transp. Resíduos (MJ/kg/km)	Índice de consumo de energia pelo meio de transporte dos resíduos (da desconstrução o aterro ou incinerador)	número	**i**
	Dist. Deposição (km)	Distância da desconstrução até o destino final do resíduos	número	**j**
	CO2 Transp. resíduos (kg/MJ)	Índice de emissão de CO_2 pelo meio de transporte dos resíduos (da desconstrução até o aterro ou incineração)	número	**k**
	Energ. Aterro(MJ/kg)	Índice do consumo de energia para manutenção do aterro onde o os resíduos serão depositados ou incinerados	número	**l**
	CO2 Aterro (kg/kg)	Índice de emissão de CO_2 para a manutenção do aterro ou incineração	número	**m**
	Separável *	O elemento é composto de materiais passíveis de separação?	sim/não	**ω**
	Reutilizável/Reciclável	O material é considerado resíduo classe A ou B? **	sim/não	**α**
	Perigoso	O material é considerado resíduo classe D? **	sim/não	**ϕ**

FONTE: A autora.

LEGENDA: (*) Único que só pode ser aplicado como parâmetro de Tipo; (**) Conforme definido pela resolução do CONAMA nº 307/2002

TABELA 3 – 19 PARÂMETROS DE CÁLCULO CRIADOS PARA A REALIZAÇÃO DA ACVE

FASE DA ACVE	NOME DO PARÂMETRO	DESCRIÇÃO	FÓRMULA	SÍMBOLO
Pré-operação	Massa (kg)	Massa total do existente na edificação	V*E	**z**
	EE Materiais (MJ)	Quantidade Energia Embutida contida nos materiais	a*z	**y**
	EE Transporte (MJ)	Energia consumida com o transporte dos materiais	z*b*Ω	**x**
	EE Desp. (MJ)	Energia Embutida nos materiais desperdiçados	y*d/100	**w**
	EE Transp. Desp. (MJ)	Energia consumida no transporte dos materiais desperdiçado	z* b*Ω*2*d/100	**v**
	CO2 Mat (kg)	Quantidade de CO_2 emitido na fabricação dos materiais	z*f	**u**
	CO2 Transp (kg)	Quantidade de CO_2 emitido no transporte dos materiais	g*x	**t**
	CO2 Desp (kg)	Quantidade de CO_2 emitido na fabricação dos materiais desperdiçados	u*d/100	**s**
	CO2 Transp Desp (kg)	Quantidade de CO_2 emitido no transporte dos materiais desperdiçados	g*v	**r**
Operação	EE Manut. (MJ)	Energia Embutida na fabricação e transporte dos materiais de reposição e manutenção	h*(y+x)	**q**
	CO2 Manut (kg)	Quantidade de CO_2 emitido na fabricação e transporte dos materiais de reposição e manutenção	h*(u+t)	**p**
Pós-operação	E Transp. Resíduos (MJ)	Energia consumida no transporte dos resíduos até o aterro ou incinerador	if(and(ω, α), 0, i *j*z+(h+1))	**o**
	CO2 Transp resíduos (kg)	Quantidade de CO_2 emitido no transporte de resíduos até o aterro ou incinerador	if(and(ω, α), 0,k*z*j*(h+1))	**n**
	Energ. Deposição (MJ)	Energia consumida na manutenção do aterro onde os resíduos serão depositados ou incinerador	if(and(ω, α), 0,l*z*(h+1))	**τ**
	CO2 Deposição (kg)	Quantidade de CO_2 emitido com a manutenção do aterro onde os resíduos serão depositados ou incinerados	if(and(ω, α), 0,m*z*(h+1))	**δ**
Valores finais	EE Pré-Operação (MJ)	Total de Energia Embutida na fase pré-operacional	y+x+w+v	**β**
	CO2 Pré-Operação (kg)	Total de CO_2 emitido na fase pré-operacional	u+t+s+r	**ε**
	Energ. Pós-Operação (MJ)	Total de Energia consumida na fase pós-operacional	o+τ	**ɣ**
	CO2 Pós-Operação (kg)	Total de CO_2 emitido na fase pós-operacional	n+δ	**μ**

FONTE: A autora

3.2.1.1 Parâmetros para análise pré-operacional

Para elaborar os parâmetros de avaliação dos impactos durante a fase pré-operacional utilizou-se como base a pesquisa de Tavares (2006) e o método simplificado, utilizando a criação de parâmetros no Revit, realizado por Araujo e

Tavares (2016), no ANEXO 2. A abordagem utilizada permite a inserção de índices de Energia Embutida e emissão de Dióxido de Carbono emitidos desde a extração até a fabricação e transporte dos materiais de construção que virão a ser utilizados na edificação. Os valores desses índices precisam ser relacionados à quantidade de cada material que estará presente na edificação, contabilizada em quilograma. O volume de cada elemento e material que compõe o modelo já é calculado de forma automática pelo software BIM, ou seja, volume é um parâmetro intrínseco ao modelo, o que permite a aplicação da ACVE de forma prática. A Energia Embutida em MJ (y) pode ser então calculada pela equação a seguir:

$$y = az \tag{1}$$

sendo a a EE pela extração de matéria prima até a fabricação dos materiais em MJ/kg e z a massa de material em kg, definida pelo produto do volume (V) em m^3 e densidade (E) em kg/m^3:

$$z = VE \tag{2}$$

De forma semelhante é calculado o CO_2 emitido na extração de matéria prima até a fabricação dos materiais (u), multiplicando o índice de emissão (f) pela massa de material. O índice de emissão deve estar na unidade de kg de CO_2 por kg de material.

$$u = fz \tag{3}$$

Para o cálculo do consumo de energia (x) e emissão de CO_2 (t) decorrentes do transporte dos materiais, desde o local de fabricação até ao obra, é necessário conhecer qual meio de transporte é utilizado, o tipo combustível, e da eficiência do mesmo. O valor do índice de consumo de energia do meio de transporte (b), em MJ/kg*km, e do índice de emissão (g), em kg de CO_2/kg*km, deverão ser estimados caso a caso para compor os parâmetros e na análise do inventário. A distância do fornecedor até a obra (Ω) também é um fator determinante, como mostram as equações a seguir. O índice de energia consumida e CO_2 emitido será menor quanto mais próxima a fábrica estiver da obra e quanto mais eficiente for o meio de transporte, ou seja, menos combustível consumir e menos poluente for o combustível.

$$x = zb\Omega \tag{4}$$

$$t = gzb\Omega = gx \quad (5)$$

O índice de desperdício de materiais de construção durante a obra (d) deverá ser determinado na análise do inventário, com base nos processos e sistema construtivo, produtividade e qualidade da mão de obra, entre outros fatores. Para trabalhar com esses índices no Revit, foram criados os parâmetros de cálculo referentes ao consumo energético (w) e emissão de CO_2 (s) na fabricação do materiais desperdiçados e no transporte desses materiais (v e r, respectivamente). Para fins de praticidade, o material desperdiçado, que é transportado até a obra e posteriormente é levado a um local de deposição, reciclagem ou revenda, neste método tem seus índices de transportes multiplicados por dois no cálculo dos impactos.

$$w = az\frac{d}{100} = y\frac{d}{100} \quad (6)$$

$$s = fz\frac{d}{100} = u\frac{d}{100} \quad (7)$$

$$v = 2x\frac{d}{100} \quad (8)$$

$$r = 2gx\frac{d}{100} = gv \quad (9)$$

3.2.1.2 Parâmetros para análise operacional

A fase de operação do edifício é a única fase que tem seus impactos quantificados no Revit e também através da simulação termo-energética no EnergyPlus. Na avaliação dos impactos da fase de operação do edifício através do modelo BIM foi necessário a criação de apenas um parâmetro do modelo e dois parâmetros de cálculo. Aqui também foi utilizado como referência o processo realizado por Tavares (2006). Nesta etapa são considerados os impactos referentes aos materiais que necessitarão de manutenção ou substituição ao longo da vida útil (VU) da edificação. Para isso, é preciso conhecer a durabilidade de cada material (DM). O fator de reposição (h) de um material deve ser determinado pela fórmula:

$$\begin{cases} se\ DM \geq VU \rightarrow\ h = 0 \\ se\ DM < VU \rightarrow h = VU \div DM \end{cases} \quad (10)$$

A partir disso, a Energia Embutida (q) na fabricação e transporte dos materiais de reposição e respectivas emissões de CO_2 (p) são dadas por:

$$q = h(y + x) \quad (11)$$

$$p = h(u + t) \quad (12)$$

Os outros impactos gerados na fase de operação são calculados neste método através da simulação termo-energética, descrita no subcapitulo 3.2.2.

3.2.1.3 Parâmetros para análise pós-operacional

A determinação dos parâmetros necessários para avaliar os impactos de consumo de energia e emissão de CO_2 na fase de pós-operação seguiu a mesma lógica utilizada nas fases anteriores, fazendo também uma adaptação simplificada do método usado por Akinade *et al.* (2015). Não é possível saber como será a destinação dos materiais e resíduos ao final da vida útil da edificação, principalmente porque não se pode prever a legislação e tecnologias disponíveis nos próximos 30, 50 ou mais anos. Ding, Wang e Zou (2016) defendem que processos que visam a demolição com zero emissões de resíduos e desconstrução planejada serão o futuro da indústria da construção por causa de seus impactos positivos na economia, no meio ambiente e na sociedade. Segundo os autores, a melhoria em processos de desconstrução planejada tem maior efeito positivo do que o gerenciamento tradicional de resíduos de demolição. O processo de desconstrução é diferente da demolição, na qual a construção é desmontada de forma rápida, sem a preocupação de segregação dos resíduos. Portanto, no presente método de ACVE, assumiu-se que a edificação, ao final de sua vida útil, será desconstruída de forma que todos os resíduos sejam separados por classes e por tipo de material. No que diz respeito aos impactos, foi avaliada a possibilidade de se aproveitar ou reciclar os materiais componentes.

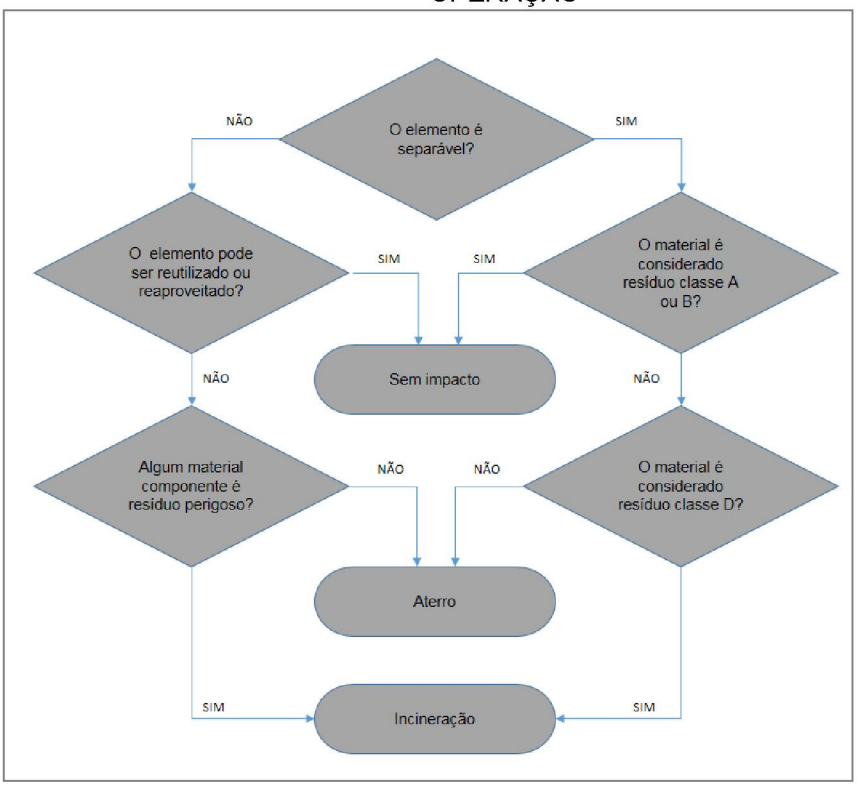
De acordo com a resolução do CONAMA nº 307/2002, os resíduos de construção civil (RCC) podem ser classificados da seguinte forma:

- Classe A: resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados provenientes de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infraestrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem; de

construção, demolição, reformas e reparos de edificações. Componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento etc.); argamassa e concreto; de processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meios-fios etc.) produzidas nos canteiros de obra.

- Classe B: resíduos recicláveis para outras destinações, tais como: plásticos, papel/papelão, metais, vidros, madeiras e outros.
- Classe C: resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis para reciclagem/recuperação.
- Classe D: resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como: tintas, solventes, óleos, ou aqueles contaminados ou prejudiciais à saúde, oriundos de reformas ou demolição de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros, bem como telhas e demais objetos e materiais que contenham amianto ou outros produtos nocivos à saúde.

FIGURA 8 - FLUXOGRAMA PRA QUANTIFICAR IMPACTOS DOS RESÍDUOS NA FASE DE PÓS-OPERAÇÃO



FONTE: A autora

A partir disso, para quantificar a energia consumida e emissão de CO_2 na fase de desconstrução, foram criados 8 parâmetros do modelo. Os parâmetros referentes ao transporte do material em forma de resíduo são: índice de consumo de energia (i),

em MJ/kg*km, índice de emissão (k), em kg de CO_2/MJ, e a distância (j) em quilômetros que esse material será transportado. Outros parâmetros criados estão relacionados ao consumo de energia na manutenção do aterro ou na incineração do resíduo (l), em MJ/kg de resíduo, e à emissão de CO_2 durante essas atividades (m). Nesta etapa também foram criados mais 3 parâmetros com entradas não numéricas, para indicar se o elemento Tipo pode ter seus materiais separados (ω); se os materiais são reutilizáveis ou recicláveis (α), ou seja, se serão classificados como resíduos A ou B de acordo com CONAMA nº 307/2002; e se são materiais perigosos classe D - (φ). A lógica utilizada para estruturar os parâmetros de cálculo dos valores finais de consumo de energia e emissão de CO_2 está representada no fluxograma da FIGURA 8.

Partiu-se do princípio que toda massa de material (z) adicionada à edificação na etapa pré-operacional, somada ao material de reposição da etapa operacional, será retirada no processo de desconstrução. Desta forma, os valores do consumo de energia para transporte (o) e destinação final dos resíduos (τ) podem ser calculados de forma automática nas tabelas do modelo BIM. O parâmetro φ, no qual deve-se selecionar se o material é classificado como perigoso, serve para alertar ao projetista ou consultor que os dados de entrada em l e m devem ser relacionados aos índices de incineração e não de aterramento, e caso o material não seja separável, os valores em l e m serão iguais para todos os materiais pertencentes àquele elemento Tipo. Quando os materiais componentes de um elemento separável forem recicláveis ou reutilizáveis, o impacto na fase pós-operacional será igual a zero. Pois, o consumo de energia e emissões para transportar, tratar e reciclar o material deve ser contabilizado como Energia Embutida e emissões na fase pré-operacional da futura construção que este material irá compor no futuro. Caso contrário, esses impactos seria contabilizados de forma duplicada dentro da economia circular. É importante enfatizar que na fase de desconstrução não estão sendo considerados consumos energéticos com equipamentos para a desconstrução em si.

3.2.1.4 Saída de dados e análise dos resultados gerados no modelo BIM

Os últimos 4 parâmetros de cálculo foram adicionados para somar os impactos totais gerados em cada fase do ciclo de vida, sendo eles: energia embutida na fase pré-operacional (β), emissão de CO_2 na fase pré-operacional (ε), energia consumida

na fase pós-operacional (λ), e emissão de CO_2 na fase pós-operacional (μ). Os valores da fase de operação já estão contemplados nos parâmetros q e p citados anteriormente.

$$\beta = y + x + w + v \quad (13)$$

$$\varepsilon = u + t + s + r \quad (14)$$

$$\lambda = o + \tau \quad (15)$$

$$\mu = n + \delta \quad (16)$$

Para trabalhar com os parâmetros no Revit é preciso gerar tabelas. Cada coluna da tabela representa um parâmetro, seja este um parâmetro intrínseco do modelo, (nome das famílias, tipo, dimensões, volume, ambientes, por exemplo), ou parâmetros novos criados (parâmetros do modelo e parâmetros de cálculo). Dentre as diferentes formas de tabela disponíveis no Revit, as duas que permitem gerenciar e analisar os parâmetros são: tabela de quantidades e tabela de levantamento de materiais. A tabela de quantidades pode ser uma tabela multicategorias ou uma tabela específica para cada família. A tabela de levantamento de materiais lista os subcomponentes ou materiais de qualquer família. Ou seja, é na tabela de levantamento de materiais que é possível trabalhar com os parâmetros de instância atribuídos aos materiais. E a tabela de quantidades permite a gestão dos parâmetros de Tipo.

A análise dos resultados é feita a partir da elaboração de uma tabela de levantamento de materiais única, a qual foi configurada com 40 colunas. Os parâmetros que compõem as 5 primeiras colunas são: família, tipo, nome, volume e área. Cada linha contém informações de cada subcomponente material presente no modelo e esses 5 primeiros parâmetros já tem seus valores e informações automaticamente preenchidos pelo software. As próximas colunas contemplam os 16 parâmetros do modelo criados (TABELA 2), sendo esses os campos que necessitam ser preenchidos com os valores do inventário. Esse processo de atribuição dos valores deve ser feito manualmente, porém, o parâmetro de instância se repete para todo material que seja igual, ou seja, quando uma célula é preenchida, o mesmo valor é repetido automaticamente para todas as outras células que estão se referindo ao mesmo material, mesmo que estejam em diferentes componentes. As ultimas 19

colunas da tabela correspondem aos parâmetros de cálculo (TABELA 3), os quais já são calculados de forma automática conforme as células dos parâmetros do modelo são preenchidas, uma vez que foram criados a partir de fórmulas.

FIGURA 9 – TABELA DE LEVANTAMENTO DE MATERIAIS COM PARÂMETROS INSTÂNCIA

B	C	D	E	F	G	H	I	
Tipo	Nome	Volume	Material: Área	Material: EE Materiais (	Energ.Transporte (MJ/K	Material: Dist. Material (	Material: Desperdício (	Mater
AA - Forro gesso	Placa de gesso	0.45 m³	5 m²	4.5	0.00162	80	30	1000
AA_Chapisco forro	Emboço interno	0.10 m³	48 m²	1.3	0.00162	80	17	1546
AA_Chapisco forro	Tinta Latex PVA - Bran	0.05 m³	48 m²	65	0.00162	80	15	1380
AA_Correr 2 Folhas 14	Vidro transparente	0.01 m³	2 m²	18.5	0.00162	80	5	2500
AA_Correr 2 Folhas 14	Aço laminado	0.03 m³	2 m²	31	0.00162	80	10	7870
AA_Correr 2 Folhas 14	Vidro transparente	0.01 m³	2 m²	18.5	0.00162	80	5	2500
AA_Correr 2 Folhas 14	Aço laminado	0.03 m³	2 m²	31	0.00162	80	10	7870
AA_Correr 2 Folhas 14	Vidro transparente	0.01 m³	2 m²	18.5	0.00162	80	5	2500
AA_Correr 2 Folhas 14	Aço laminado	0.03 m³	2 m²	31	0.00162	80	10	7870
AA_Correr 2 Folhas 18	Vidro transparente	0.03 m³	4 m²	18.5	0.00162	80	5	2500
AA_Correr 2 Folhas 18	Aço laminado	0.04 m³	3 m²	31	0.00162	80	10	7870
AA_Janela maxim-ar - P	Vidro transparente	0.00 m³	1 m²	18.5	0.00162	80	5	2500
AA_Janela maxim-ar - P	Alumínio Branco	0.00 m³	0 m²	98.2	0.00162	80	10	7870
AA_Janela maxim-ar - P	Aço laminado	0.01 m³	1 m²	31	0.00162	80	10	7870
AA - Parede tijolo exter	Tijolo, 8 furos	1.53 m³	17 m²	2.9	0.00162	80	15	1400
AA - Parede tijolo exter	Chapisco	0.14 m³	34 m²	1	0.00162	80	21	1601
AA - Parede tijolo exter	Emboço interno	0.26 m³	17 m²	1.3	0.00162	80	17	1546
AA - Parede tijolo exter	Emboço externo	0.26 m³	17 m²	1.4	0.00162	80	19	1546
AA - Parede tijolo exter	Reboco	0.17 m³	34 m²	1.2	0.00162	80	17	1544
AA - Parede tijolo exter	Tinta Latex PVA - Bran	0.03 m³	34 m²	65	0.00162	80	15	1380
AA - Parede tijolo exter	Tijolo, 8 furos	0.54 m³	6 m²	2.9	0.00162	80	15	1400
AA - Parede tijolo exter	Chapisco	0.05 m³	12 m²	1	0.00162	80	21	1601
AA - Parede tijolo exter	Emboço interno	0.09 m³	6 m²	1.3	0.00162	80	17	1546
AA - Parede tijolo exter	Emboço externo	0.09 m³	6 m²	1.4	0.00162	80	19	1546
AA - Parede tijolo exter	Reboco	0.06 m³	12 m²	1.2	0.00162	80	17	1544
AA - Parede tijolo exter	Tinta Latex PVA - Bran	0.01 m³	12 m²	65	0.00162	80	15	1380
AA - Parede tijolo exter	Tijolo, 8 furos	0.70 m³	8 m²	2.9	0.00162	80	15	1400

FONTE: A autora, via Revit

FIGURA 10 - TABELA DE LEVANTAMENTO DE MATERIAIS COM PARÂMETROS SOMADOS AO FINAL

0.173043	15.89	0.04	2.383352	3.215523	1739.24	95.59	2.52
6.015797	28.43	1.11	5.686228	2.407711	177.50	29.55	0.00
28.363453	79.33	2.63	31.733801	40.542667	1403.29	81.96	0.00
3.701844	17.50	0.69	3.499042	1.481595	109.23	18.18	0.00
17.453561	48.82	1.62	19.527518	24.948088	863.52	50.44	0.00
0	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00	0.00
6.466315	30.56	1.20	6.112064	2.588023	190.80	31.76	0.00
30.487567	85.28	2.82	34.110318	43.578872	1508.38	88.10	0.00
17.840295	84.31	3.30	16.862933	7.140248	526.40	87.62	0.00
84.11394	235.27	7.79	94.10896	120.23231	4161.56	243.06	0.00
7.501651	35.45	1.39	7.090681	3.002397	221.35	36.84	0.00
35.369002	98.93	3.28	39.5718	50.556386	1749.89	102.21	0.00
0	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00	0.00
267.363481	1631.64	90.05	179.480115	76.433773	0.00	0.00	0.00
294.953212	1676.47	89.94	203.690683	76.538276	0.00	0.00	0.00
28.558969	162.32	8.71	19.722436	7.410851	0.00	0.00	0.00
982.953975	758.45	72.84	379.226071	42.150978	0.00	0.00	0.00
49.228122	5184.91	18.24	518.490639	436.272838	0.00	0.00	0.00
1.440271	4.07	0.36	0.611226	1.441104	134.45	4.43	0.00
0.69133	1.96	0.17	0.293388	0.69173	64.54	2.13	0.00
1.440271	4.07	0.36	0.611226	1.441104	134.45	4.43	0.00
0.69133	1.96	0.17	0.293388	0.69173	64.54	2.13	0.00
1.440271	4.07	0.36	0.611226	1.441104	134.45	4.43	0.00
0.69133	1.96	0.17	0.293388	0.69173	64.54	2.13	0.00
1.440271	4.07	0.36	0.611226	1.441104	134.45	4.43	0.00
0.69133	1.96	0.17	0.293388	0.69173	64.54	2.13	0.00
1.646024	4.66	0.41	0.698544	1.646976	153.66	5.06	0.00
0.705047	1.99	0.17	0.29921	0.705455	65.82	2.17	0.00
1.646024	4.66	0.41	0.698544	1.646976	153.66	5.06	0.00
0.705047	1.99	0.17	0.29921	0.705455	65.82	2.17	0.00
1372.649472	10894.04	145.30	3812.9152	2354.475136	92744.62	11039.35	0.00
4381.139159	31471.37	715.84	7024.070429	4548.072368	276355.62	22389.09	350.36

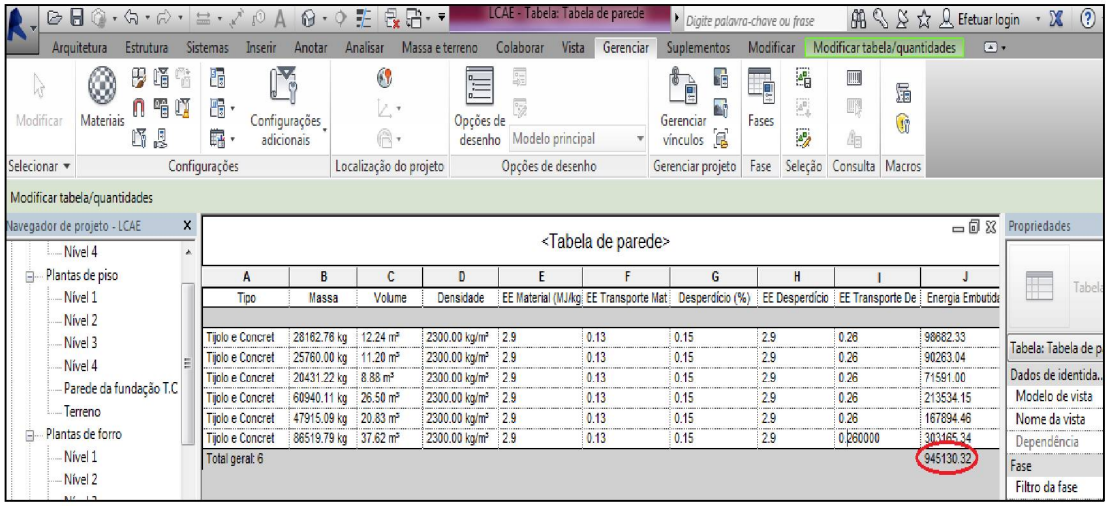
FONTE: A autora, via Revit

Ao final, a tabela foi formatada para que os valores de cada linha de uma coluna inteira sejam somados, também de forma automática. São esses somatórios que apresentam os resultados numéricos de parte da ACVE. A FIGURA 9 mostra o formato

da tabela de levantamento de materiais desenvolvida e a FIGURA 10 indica onde aparecem as somas dos valores das colunas.

No caso de componentes e materiais que não apareçam na tabela de levantamento de materiais, por não apresentarem estrutura detalhada de subcomponentes, é necessário criar tabelas de quantidades especificadas por família para realizar os cálculos da ACVE. Um exemplo dessa aplicação seriam painéis pré-fabricados, nos quais os índices de impacto sejam levantados para o painel como um todo, e não especificamente para cada material. Dessa forma, tais índices devem ser relacionados aos elemento Tipo, e não aos subcomponentes e materiais. A FIGURA 11 mostra o exemplo de uma tabela de quantidades criada para a família de paredes.

FIGURA 11 - TABELA DA FAMÍLIA DE PAREDES COM CÁLCULO DE EE TOTAL POR PARÂMETROS DE TIPO



Tipo	Massa	Volume	Densidade	EE Material (MJ/kg)	EE Transporte Mat	Desperdício (%)	EE Desperdício	EE Transporte De	Energia Embutida
Tijolo e Concret	28162.76 kg	12.24 m³	2300.00 kg/m³	2.9	0.13	0.15	2.9	0.26	98682.33
Tijolo e Concret	25760.00 kg	11.20 m³	2300.00 kg/m³	2.9	0.13	0.15	2.9	0.26	90263.04
Tijolo e Concret	20431.22 kg	8.88 m³	2300.00 kg/m³	2.9	0.13	0.15	2.9	0.26	71591.00
Tijolo e Concret	60940.11 kg	26.50 m³	2300.00 kg/m³	2.9	0.13	0.15	2.9	0.26	213534.15
Tijolo e Concret	47915.09 kg	20.83 m³	2300.00 kg/m³	2.9	0.13	0.15	2.9	0.26	167894.46
Tijolo e Concret	86519.79 kg	37.62 m³	2300.00 kg/m³	2.9	0.13	0.15	2.9	0.260000	303185.34

FONTE: A autora, Via Revit

3.2.2 Simulação termo-energética

Para estimar o restante dos impactos causados na fase de operação, foi realizada simulação termo-energética, a fim de quantificar o consumo energético da edificação ao longo de toda sua vida útil. Uma vez que, uma das premissas da tecnologia BIM é reduzir retrabalhos e contribuir para o trabalho colaborativo através da interoperabilidade, foram feitos testes para exportar o modelo BIM para o software de simulação. O intuito dessa exportação é não precisar modelar a geometria da edificação novamente no programa EnergyPlus, nem inserir informações referentes às propriedades térmicas, padrões de ocupação, localização do edifício e outros dados já determinados no modelo BIM. A partir disso, foram exploradas possibilidades

de exportação das informações, ferramentas disponíveis e quais os processos necessários para realizar a transferência de dados.

A inserção da geometria de um edifício no EnergyPlus é feita, tradicionalmente, através de coordenadas espaciais dos componentes. Ou seja, é preciso inserir numericamente as coordenas das arestas de cada superfície dos elementos construtivos. Esse é um processo muito demorado e sujeito a diversos erros. A fim de incentivar e também facilitar o uso do EnergyPlus, algumas ferramentas foram desenvolvidas pelo próprio DOE e laboratórios parceiros para criar interfaces mais "amigáveis" no software. Um exemplo disso é o OpenStudio, uma plataforma com uma coleção de ferramentas desenvolvidas para fornecer suporte em simulações energéticas no EnergyPlus. Entre as aplicações gráficas da plataforma OpenStudio, há um *plug-in* para o SketchUp, que permite aos usuários criar rapidamente uma geometria que poderá ser salva no formato compatível para entrada na simulação.

Sendo assim, além do Revit e EnergyPlus, no presente método, em especial na realização da interoperabilidade entre estes dois software, foram utilizadas mais três ferramentas:

a) **SketchUp**: software de arquitetura desenvolvido para desenhar modelos em 3D de edifícios, renderizar ambientes, dentre outras funcionalidades. Atualmente os direitos do software pertencem ao desenvolvedor *Trimble Navigation,* que atualiza novas versões a cada ano. O SketchUp funciona com arquivos no formato .SKP e também permite a execução de muitas extensões e *plug-ins* desenvolvidos paras as mais diversas finalidades;

b) **OpenStudio**: principal software da plataforma de mesmo nome, gratuito e de código aberto, funciona como uma interface para criar arquivos de entrada no EnergyPlus. Nesta interface é possível definir tipos de espaços, zonas térmicas, criar agendamentos e rotinas, configurar elementos das construções, propriedades térmicas de materiais, ganhos internos, sistema de HVAC, entre outros. Tudo isso pode ser feito também diretamente no Editor do EnergyPlus, porém a interface do OpenStudio favorece o entendimento da ferramenta e a entrada de dados por usuários mais leigos no âmbito da simulação térmo-energética. O formato de arquivo próprio do OpenStudio é o .OSM, porém, a ferramenta é capaz de receber informações do modelo BIM no formato .gbXML e transformar o mesmo arquivo no

formato .IDF (*EnergyPlus Input Data Files*), mantendo as informações originais do modelo;

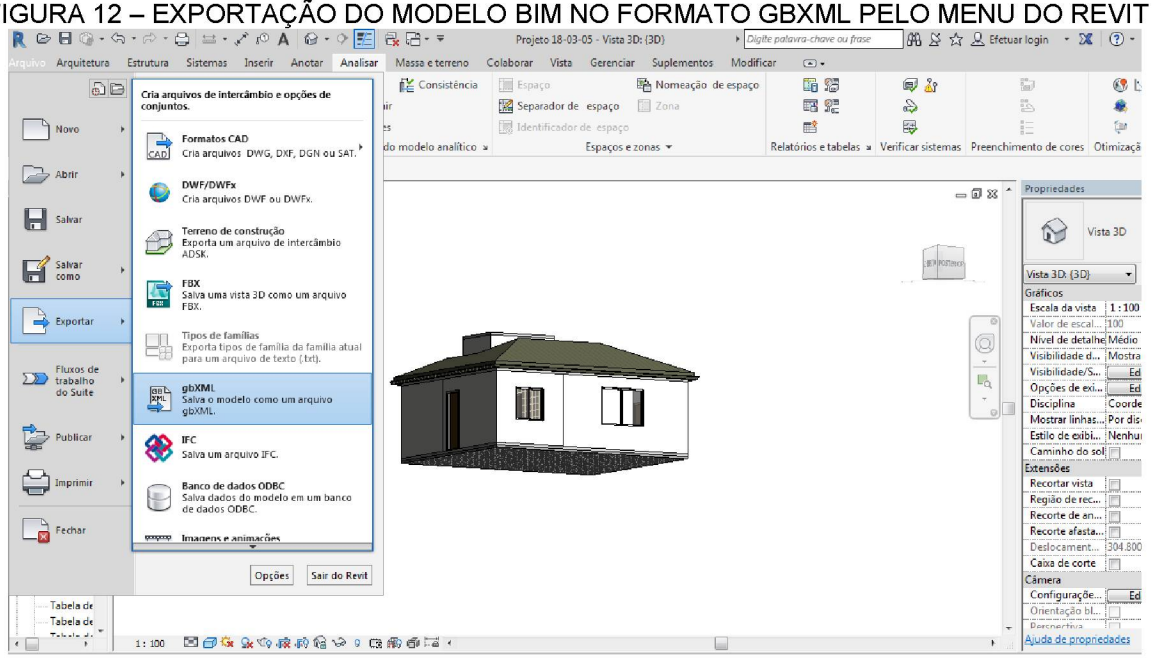
c) **Euclid**: é uma extensão ou plug-in que cria e edita a geometria dos arquivos de entrada do EnergyPlus, usando o formato .IDF, dentro do SketchUp. Esta ferramenta era anteriormente chamada de Legacy OpenStudio. O Euclid funciona de forma semelhante a um plug-in do OpenStudio que permite editar geometrias no EnergyPlus. Porém quaisquer outras configurações do arquivo de entrada do EnergyPlus que não sejam referentes à geometria, devem ser editadas fora do ambiente do SketchUp, utilizando ou o OpenStudio ou o *IDF Editor*.

A partir disso, foram realizadas algumas tentativas e testadas diversas maneiras para exportar o modelo BIM para o software de simulação, conforme descrito por Queiróz, Santos e Grigoletti (2016) e Araujo, Tavares e Scheer (2017), no ANEXO 3. O Revit disponibiliza dois componentes independentes para delimitar uma área de interesse no projeto: Ambiente e Espaço. A definição destes componentes no modelo é essencial para realizar análises energéticas e exportações no formato gbXML. Um Ambiente armazena valores em parâmetros variados, que afetam a análise de cargas para aquecimento ou resfriamento. Os Ambientes são componentes de arquitetura utilizados para manter as informações sobre áreas de ocupação onde são colocados. Já os Espaços, são usados nas disciplinas de instalações complementares ou MEP (*Mechanical, Electrical and Plumbing*) para analisar volumes, não necessariamente ocupados. Os Ambientes e Espaços delimitados devem, posteriormente, ser identificados no EnergyPlus como zonas térmicas para a simulação energética.

Após realizar as configurações necessárias, o modelo foi exportado no formato gbXML a partir do menu principal do Revit. As configurações incluem: delimitação de Ambientes e/ou Espaços, ajustes e confirmação das propriedades físicas e térmicas dos materiais e componentes, entre outros. Por padrão, o Revit não calcula automaticamente os volumes de Ambientes e Espaços, portanto, é necessário ativar o cálculo de volumes, e corrigir os mesmos, caso necessário. A FIGURA 12 indica o caminho para exportar o modelo BIM no formato gbXML. É válido citar que só é permitida a exportação do modelo nesse formato quando se está na vista 3D. A FIGURA 13 mostra como é o menu de configurações e análise do modelo antes da

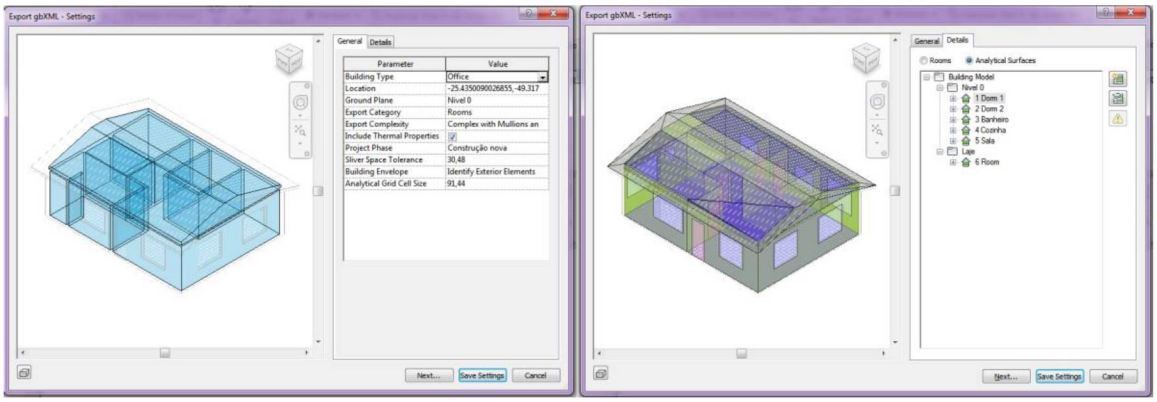
exportação. Nesta etapa é possível verificar os ambientes delimitados, e observar se as superfícies analíticas estão corretamente reconhecidas pelo programa.

FIGURA 12 – EXPORTAÇÃO DO MODELO BIM NO FORMATO GBXML PELO MENU DO REVIT



FONTE: A Autora, via Revit

FIGURA 13 - JANELA PARA VERIFICAÇÃO E CONFIGURAÇÃO DO MODELO PARA EXPORTAÇÃO POR GBXML NO REVIT

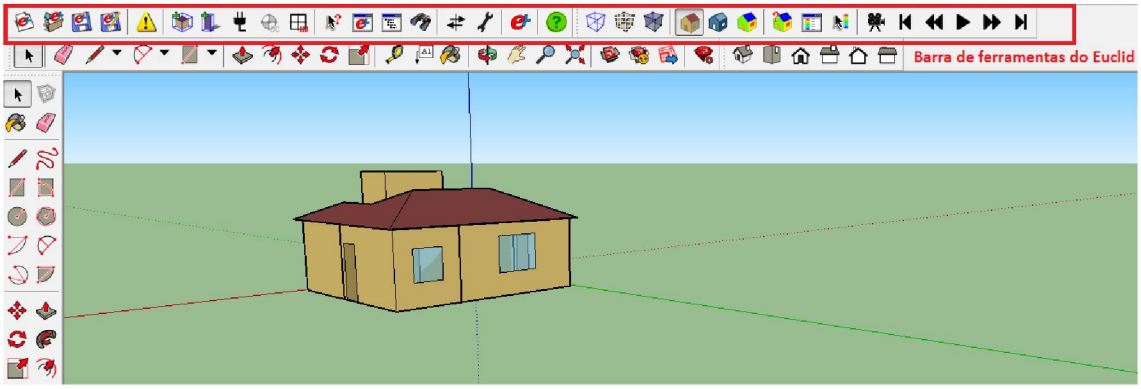


FONTE: A Autora, via Revit

Posteriormente, o arquivo gbXML foi importado no software OpenStudio, e o mesmo foi transformado e salvo no formado IDF. Este mesmo arquivo foi aberto no Sketchup através do plug-in Euclid, no qual é possível verificar a exportação da geometria. Caso a geometria contenha pequenos erros, com as ferramentas do próprio Euclid, destacadas na FIGURA 14, é possível editar e ajustar as dimensões, volumes, delimitações, deslocamento e outras características das superfícies. Nesta etapa também pode ser observada se a orientação da edificação em relação ao Norte está correta. Por padrão, o eixo verde do Sketchup está direcionado para o norte.

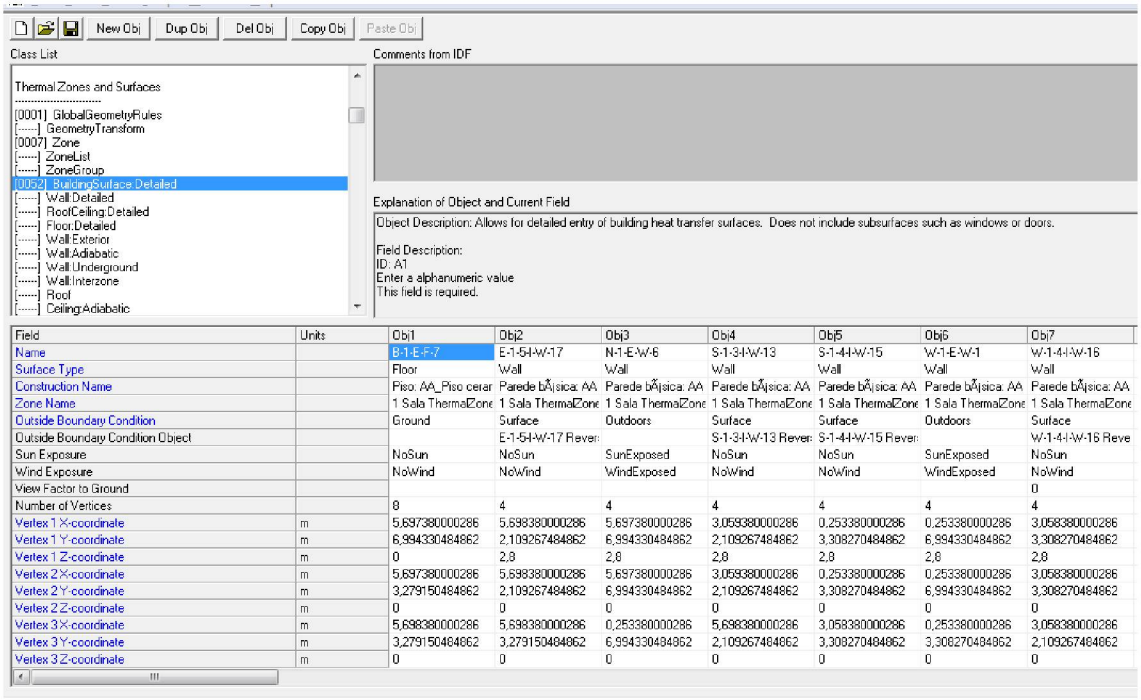
Na próxima etapa foram verificadas as outras informações exportadas do modelo BIM, principalmente as configuração dos elementos e respectivas superfícies, materiais e suas propriedades térmicas. Depois foi preciso ajustar as informações que não estavam corretas e configurar o resto do arquivo para rodar a simulação. Estas duas etapas podem ser feitas de duas maneiras: abrindo o arquivo novamente no OpenStudio ou diretamente no *IDF Editor* do EnergyPlus, conforme apresentado na FIGURA 15. A opção irá depender da preferência e domínio que o projetista ou consultor possui dentre as duas ferramentas.

FIGURA 14 - ARQUIVO IDF ABERTO NO EUCLID E BARRA DE FERRAMENTA DO PLUG-IN



FONTE: A autora, via Euclid e Sketchup

FIGURA 15 - INTERFACE DO ARQUIVO IDF NO IDF EDITOR



FONTE: A autora, via IDF Editor

O arquivo foi configurado de forma a possibilitar a simulação térmo-energética da edificação no período de 1 ano. A definição das informações sobre o perfil e padrão de uso do edifício fazem parte da análise do inventário. Tais informações são usadas como dados de entrada no arquivo. Os dados ajustados e inseridos no arquivo IDF para realização da ACVE incluíram:

a) Localização: latitude, longitude, altitude e orientação da edificação.
b) Arquivo climático: o arquivo climático utilizado para entrada no software de simulação fornece valores horários referentes às variáveis de temperatura de bulbo seco, temperatura de orvalho, umidade relativa do ar, direção e velocidade dos ventos, nebulosidade, pressão atmosférica, radiação global, direta normal e radiação difusa horizontal do local. O arquivo climático necessita ser uma série anual de dados climáticos, tratados segundo uma metodologia para representar uma situação referencial do clima local. A metodologia para gerar um ano *Test Reference Year* (TRY) se baseia na eliminação de anos de uma série histórica com temperaturas médias mensais extremas, obtendo ao final apenas um ano real com dados médios. Outra metodologia existente é do *Typical MeteorologicaL Year* (TMY), na qual basicamente são excluídos os meses que possuem médias mensais mais quentes e mais frias, até que restem apenas 12 meses para representar um ano com padrão médio. (GRIGOLETTI; FLORES; SANTOS, 2015) O EnergyPlus permite a entrada do arquivo climático no formato EPW.
c) Temperatura do solo: de acordo com Oliveira *et al.* (2012), a temperatura do solo é um parâmetro que assume grande importância nas simulações de edificações térreas, pois as trocas de calor entre o piso e o solo são determinantes no resultado final das trocas de calor do ambiente. A inserção dos valores de temperatura no solo pode ser feita de forma simplificada, utilizando as médias mensais disponibilizadas no arquivo climático ou também pode-se usar metodologias que utilizam o programa SLAB, já vinculado ao EnergyPlus e que roda de forma automática nas ultimas versões.
d) Rotinas de ocupação: rotinas e padrões de ocupação horárias e diárias nos ambientes. Essas rotinas determinam em que momentos haverá pessoas emitindo calor dentro dos ambientes ou zonas térmicas.
e) Potência e uso de equipamentos: assim como os ocupantes, os equipamentos elétricos também emitem calor para o ambiente, além de consumir energia

elétrica de forma direta. Por isso é necessário determinar qual a potência necessária e quais são os padrões de uso para os equipamentos de forma geral ao longo de toda fase de operação do edifício.

f) Potência e uso do sistema de iluminação
g) Configuração de equipamentos à gás e equipamentos de aquecimento de água: os equipamentos que funcionam à gás consomem energia e emitem CO_2 de forma diferenciada dos equipamentos que consomem eletricidade. Chuveiros e fogões podem ser exemplos destes equipamentos
h) Configuração de sistema de climatização e ventilação: definição do tipo de sistema utilizado, eficiência, limite máximo e mínimo para intervalo de temperaturas de conforto térmico, temperaturas de termostato e rotinas e horários de funcionamento do sistema.
i) Materiais e suas propriedades: espessuras, rugosidade, condutividade térmica, densidade, e calor específico de cada material componente. É importante também definir as propriedades do vidros das aberturas, como o fator solar, fator de transmitância térmica e transmitância visível.
j) Zonas térmicas: neste método, devem ser consideradas como cada ambiente ou espaços separadamente.
k) Configuração dos arquivos de saída: os arquivos de saída foram configurados para calcular o consumo de energia durante o período de 1 ano e também para apresentar as temperaturas médias horárias no ambiente externo e em cada zona térmica da edificação.

Foi realizada simulação termo-energética anual, ou seja, que simula a temperatura interna das zonas térmicas a cada hora durante as 8.760 horas no ano e calcula o consumo energético da edificação no período de 1 ano. Pode-se realizar uma ou um número de simulações que seja divisível pela quantidade de anos de vida útil da edificação, conforme o projetista ou consultor desejar e achar necessário. Por exemplo, considerando a vida útil da edificações de 50 anos, é possível realizar apenas uma simulação e multiplicar o resultado do consumo de energia anual por 50. Ou rodar 5 simulações, por exemplo, cada uma representando 1 década, modificando alguns padrões de entrada descritos acima a partir de previsões e estrapolações futuras, e multiplicar os 5 resultados por 10, somar todos, totalizando também o consumo de energia em 50 anos.

3.2.3 Avaliação e interpretação dos resultados

A análise e interpretação dos resultados é etapa fundamental na Avaliação do Ciclo de Vida. É nesta etapa que é possível observar quais os fatores possuem maior influência nos resultados, qual o peso de cada processo e fluxo dentro da ACVE e no caso atual, como cumprir com o objetivo da ACVE em comparar e aprimorar o projeto de modo que os impactos possam ser reduzidos. A análise dos resultados da ACVE no método proposto é feita em três passos: usando o Revit, depois o EnergyPlus e finalmente juntando o resultado gerados pelas duas ferramentas. Primeiro é avaliada a soma final realizada nos parâmetros de cálculo de cada tabela gerada no Revit, caso haja mais de uma. Os parâmetros cujos somatórios deverão ser avaliados estão exibidos a seguir, já descritos anteriormente na TABELA 3:

1) Energia Embutida fase pré-operacional (β)
2) Emissão de CO_2 fase pré-operacional (ε)
3) Energia Embutida de reposição/manutenção (q)
4) Emissão de CO_2 reposição/manutenção (p)
5) Energia consumida na fase pós-operacional (ɣ)
6) Emissão de CO_2 fase pós-operacional (μ)

Os dois primeiros e dois últimos parâmetros calculam os resultados da ACVE da fase de pré e pós-operação, respectivamente. O terceiro e quarto parâmetro precisam ter seus valores somados aos resultados da simulação energética.

4 APLICAÇÃO DO MODELO DE TESTE

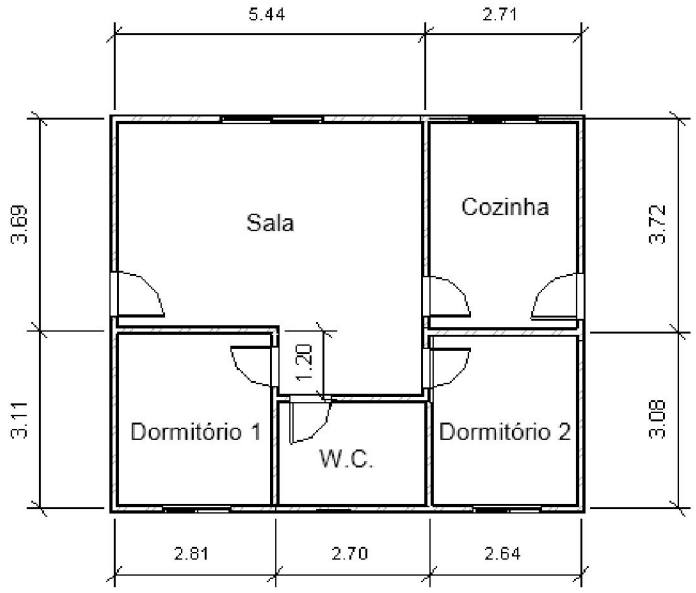
Para realizar a validação do artefato, foram definidos todos os dados de entrada necessários para a Avaliação do Ciclo de Vida Energética e de emissão de CO_2. O método de ACVE foi testado através do modelo de uma residência. O presente capítulo especifica o perfil construtivo da residência e padrões de uso durante sua operação. Antes da aplicação do método deve-se fazer a análise do inventário, e por tanto também foi necessário definir a base de dados utilizada para quantificação dos impactos ambientais adequada ao projeto.

4.1 DEFINIÇÃO DO PERFIL DA EDIFICAÇÃO E COMPOSIÇÃO DOS DADOS DE ENTRADA

4.1.1 Padrão residencial para o modelo de teste

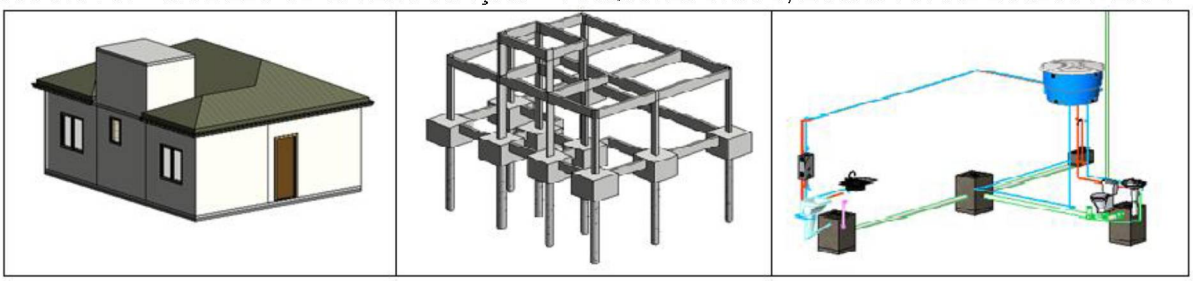
A edificação residencial foi criada com base na categoria R1-B de projeto padrão da NBR 12.721 (ABNT, 2006) e Manual do Sinduscon MG. Possui aproximadamente 55 m^2, composta de dois dormitórios, sala, banheiro, cozinha, área para tanque e área técnica para caixa d'água. A planta baixa está apresentada na FIGURA 16 e a FIGURA 17 e FIGURA 18 mostram o modelo 3D da edificação desenvolvida no Revit.

FIGURA 16 - PLANTA BAIXA DO MODELO TESTE



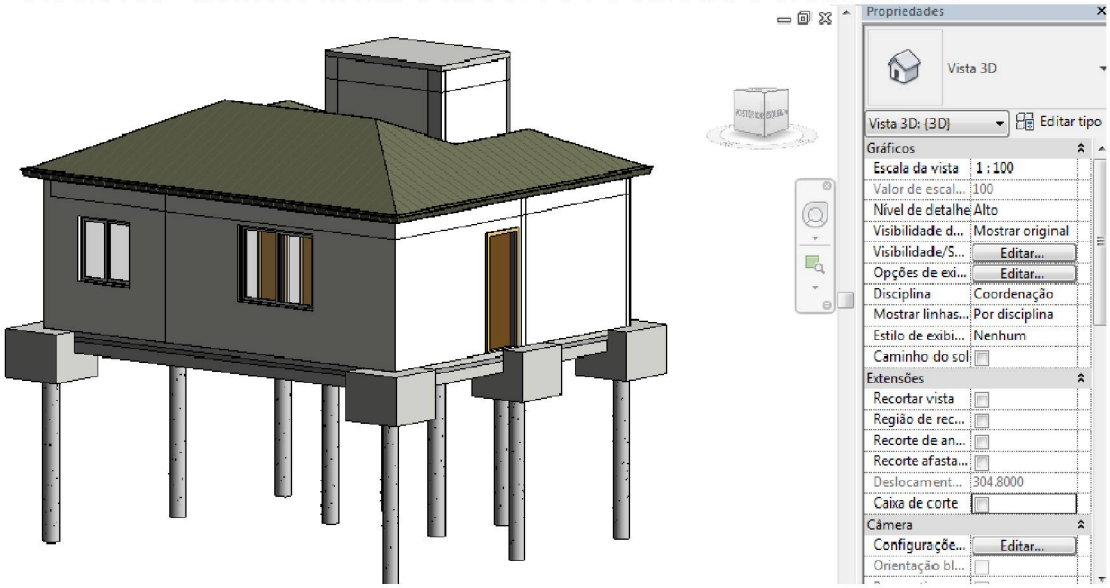
FONTE: A autora

FIGURA 17 - MODELO 3D DA EDIFICAÇÃO – ARQUITETÔNICO, ESTRUTURAL E HIDRÁULICO



FONTE: A autora, via Revit

FIGURA 18 – MODELO 3D BIM COM TODOS OS VÍNCULOS CARREGADOS



FONTE: A autora, via Revit

A localização escolhida foi a cidade de Curitiba-PR e os materiais e componentes do modelo de teste estão descritos na TABELA 4 no subcapítulo a seguir. O tempo de vida útil estimado para a residência é de 50 anos.

4.1.2 Índices de energia embutida e CO_2 equivalente:

Os dados de energia embutida e emissão de CO_2 utilizados foram os valores calculados nos estudos de Tavares (2006) e Tavares e Bragança (2016), incluindo também índices de transporte de materiais utilizados e porcentagem de desperdício de cada material. A TABELA 4 a seguir discrimina os materiais utilizados no modelo de teste e respectivos índices.

TABELA 4 – MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO UTILIZADOS, ÍNDICES DE ENERGIA EMBUTIDA DE FABRICAÇÃO, TRANSPORTE E TAXA DE DESPERDÍCIO

Materiais	EE Materiais (MJ/kg)	Energ. Transporte (MJ/kg*km)	Dist. Material (km)	Desperdício (%)	Densidade (kg/m^3)
	a	b	c	d	E
PORTAS E JANELAS					
Imbuia – Porta interna lisa (espessura: 35mm/ 0,7m x 2,10m)	3,5	0,00162	80	15	720
Imbuia - Porta externa lisa (espessura: 35mm/ 0,8m x 2,10m)	3,5	0,00162	80	15	720
Imbuia - Batente (espessura: 35mm / largura 140mm)	3,5	0,00162	80	15	720
Esquadrias Aço laminado- janela 140x120	31,0	0,00162	80	10	7870
Esquadrias Aço laminado- janela maxim-ar	31,0	0,00162	80	10	7870
Puxador Alumínio Branco- janela maxim-ar	98,2	0,00162	80	10	7870
Vidro comum liso 3mm	18,5	0,00162	80	5	2500
PISOS					
Lastro de brita	0,15	0,00162	80	50	1650
Tela de aço CA-60	31,0	0,00162	80	10	7870
Concreto não estrutural – Piso concreto	1,0	0,00162	80	11	1632
Argamassa Revestimento - Piso cerâmica	1,4	0,00162	80	20	1578
Cerâmica Esmaltada 20x20cm	5,0	0,00162	80	40	1860
Camada impermeabilização p/ área interna	90,0	0,00162	80	10	300
Concreto - Laje concreto	0,9	0,00162	80	12	1630
PAREDES					
Chapisco (1:3 - cimento:areia)	1,0	0,00162	80	21	1601
Emboço interno (1:2:8 - cimento:cal:areia)	1,3	0,00162	80	17	1546
Emboço externo (1:1:5 - cimento:cal:areia)	1,4	0,00162	80	19	1546
Reboco (1:2:9 - cimento:cal:areia)	1,2	0,00162	80	17	1544
Tijolo de 8 furos 9cm x 19cm x 19cm	2,9	0,00162	80	15	1400
Tinta látex PVA	65,0	0,00162	80	15	1380
Azulejo branco 10cm x 20cm	6,2	0,00162	80	15	2000
Argamassa colante (1:1,5:4 - cim:cal:areia)	1,6	0,00162	80	19	1568
COBERTURA E FORRO					
Telha fibrocimento ondulada 8mm x 2,44m x 1,10m	6,0	0,00162	80	35	1920
Placa de gesso	4,5	0,00162	80	30	1000
Montante madeira:50 mm x 150 mm - terças e caibros	3,5	0,00162	80	15	720
ESTRUTURA					
Concreto armado	1,54	0,00162	80	36	1766
Concreto estrutural	0,94	0,00162	80	36	1640
Concreto moldado in loco	0,94	0,01162	80	36	1640
HIDROSANITÁRIO					
PVC Branco 100 x 100 mm	80,0	0,00162	80	40	1400
Bacia Sanitária caixa acoplada cerâmica	25,0	0,00162	80	0	250
Concreto	1,0	0,00162	80	36	1632
Ferro fundido - Hidrômetro de 3/4"	35,0	0,00162	80	0	7250
Lavatório cerâmica	25,0	0,00162	80	0	250
Misturador Lavatório metal cromado	95,0	0,00162	80	0	1200
Pia Simples cozinha metal cromado	95,0	0,00162	80	0	1200
Porcelana Branca Brilhante	25,0	0,00162	80	0	250

FONTE: Adaptado de TAVARES (2006) e TAVARES E BRAGANÇA (2016)

De forma semelhante ao realizado por Tavares (2006), para fins de praticidade, uma vez que a edificação não existe, foi considerado o mesmo índice de consumo de energia no transporte para todos os materiais, assumindo que todos eles foram produzidos a uma distância de 80 km (parâmetro de entrada c) e transportados por caminhões de médio porte. Em um projeto real, estes índices deverão ser calculados levando em consideração o meio de transporte e distância real de cada fornecedor. O índice considerado foi de 1,62 MJ/ton/km, ou 0,00162 MJ/kg/km (parâmetro b).

A TABELA 5 apresenta os índices de emissão de CO_2 na fabricação (f) dos principais materiais utilizados em construções. Em relação ao transporte dos materiais, foi considerado o índice (g) de 0,0741 kg de CO_2/MJ de diesel consumido (IPCC, 2006).

TABELA 5 - ÍNDICES DE CO_2 EQUIVALENTE NA FABRICAÇÃO E TRANSPORTE DE MATERIAIS

Materiais	Fabricação (kg de CO_2/kg)
Aço e ferro	2,73
Alumínio	10,19
Areia	0,03
Argamassa	0,34
Cal	0,87
Cerâmica de revestimento	0,29
Cerâmica vermelha	0,17
Chapa de compensado	0,41
Cimento	0,79
Cobre	3,95
Concreto	0,12
Fibrocimento	0,72
Impermeabilizantes	5,50
Madeira	0,11
Papel	1,54
Pedra	0,10
Plástico	5,02
Tintas	3,57
Vidro	0,99
Outros	2,58

FONTE: TAVARES E BRAGANÇA (2016)

4.1.3 Vida útil dos materiais de construção

O fator de reposição (h) foi calculado com base nos dados de Tavares (2006) quanto à durabilidade de cada material, considerando quantas vezes cada material

precisará ser substituído por um novo. Em um caso real, o ideal seria considerar a vida útil garantida pelo fabricante de cada produto.

TABELA 6 - VIDA ÚTIL DOS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO E FATOR DE SUBSTITUIÇÃO

MATERIAL	ANOS	FATOR DE REPOSIÇÃO
Estrutura de aço para coberturas Estacas	100	0
Estacas de madeira, laje de concreto	73	0
Painéis, isolamentos, argamassas.	69	0
Placas de piso e pavimentação	68	0
Esquadrias, portas e janelas	46	1
Painéis de madeira	45	1
Tubos de PVC	45	1
Tubos de Cobre	42	1
Telhas de fibrocimento [1]	40	1
Fiação, interruptores e tomadas	38	1
Luminárias	30	1
Instalações de cozinha	30	1
Conexões	30	1
Piso cerâmico	30	1
Calhas e tubos de queda em PVC	20	2
Tubulação em ferro galvanizado	15	3
Pinturas de interiores	12	4
Pinturas de exteriores	8	6

FONTE: TAVARES (2006)

4.1.4 Índices de consumo de energia e emissão de CO_2 na fase de desconstrução

Para os índices de consumo de energia (i) e emissão de CO_2 (k) no transporte dos resíduos foram utilizados os mesmos valores da fase pré-operacional: 0,00162 MJ/kg/km e 0,0741 kg de CO_2/MJ, respectivamente. Porém, a distância da edificação até o destino final dos resíduos (j) foi considerada igual a 50 km para todos os materiais.

Mendes, Aramaki e Hanaki (2004) calcularam o consumo energético e emissões de gases do efeito estufa para o tratamento de Resíduos Sólidos Urbanos, aplicado na cidade de São Paulo, considerando 5 cenários diferentes, dentre eles o aterramento e incineração sem recuperação de energia térmica. Os valores apresentados pelos autores serviram como base para determinar os índices para entrada nos parâmetros da fase de pós-operação discriminados na TABELA 7 a seguir.

A classificação dos materiais em relação a serem Separáveis (ω), Reutilizáveis/Recicláveis (α) e Perigosos (φ) foi determinada com base no trabalho de Akinade *et al.* (2015) e classificação do com CONAMA nº 307/2002.

TABELA 7 - ÍNDICES DE IMPACTOS GERADOS NA DESTINAÇÃO FINAL DOS RESÍDUOS DA DESCONSTRUÇÃO

ÍNDICE (PARÂMETRO)	VALOR
Consumo de energia para manutenção do aterro (l)	2,43 MJ/kg de resíduo
Consumo de energia para incineração (l)	0,74 MJ/ kg de resíduo
Emissão de CO_2 na manutenção do aterro (m)	0,9 kg de CO_2/kg de resíduo
Emissão de CO_2 pela incineração (m)	0,6 kg de CO_2/kg de resíduo

FONTE: A autora, baseado em Mendes, Aramaki e Hanaki (2004)

TABELA 8 - CLASSIFICAÇÃO DO POTENCIAL DE RECICLABILIDADE DOS MATEIRIAIS

COMPONENTE	SEPARÁVEL (ω)	MATERIAIS	REUTILIZÁVEL/ RECICLÁVEL (α)	PERIGOSO (φ)
Pilar 12x30cm	X	Concreto armado	X	
Forro gesso	X	Placa de gesso		
Chapisco forro	X	Emboço interno	X	
		Tinta Latex PVA	X	
Fundações estruturais	X	Concreto estrutural	X	
Fundações estruturais (2)	X	Concreto Moldado in loco	X	
Janela Correr 140x120	X	Vidro transparente	X	
		Aço laminado	X	
Janela maxim-ar	X	Vidro transparente	X	
		Alumínio Branco	X	
		Aço laminado	X	
Parede tijolo	X	Tijolo, 8 furos	X	
		Chapisco	X	
		Emboço interno	X	
		Emboço externo	X	
		Reboco	X	
		Tinta Latex PVA - Branco	X	
Parede tijolo –área molhada	X	Tijolo, 8 furos	X	
		Chapisco	X	
		Emboço interno	X	
		Emboço externo	X	
		Reboco	X	
		Tinta Latex PVA - Branco	X	
		Argamassa colante	X	
		Azulejo cerâmico branco	X	
Tubo 100 x 100 mm	X	PVC Branco	X	
Bacia Sanitária caixa acoplada	X	Cerâmica	X	
Chuveiro	X	Metal Cromado	X	
Peça hidrosanitária	X	Concreto	X	
Hidrômetro de 3/4"	X	Concreto	X	
		Ferro fundido	X	

TABELA 8 - CLASSIFICAÇÃO DO POTENCIAL DE RECICLABILIDADE DOS MATEIRIAIS (CONTINUAÇÃO)

COMPONENTE	SEPARÁVEL (ω)	MATERIAIS	REUTILIZÁVEL/ RECICLÁVEL (α)	PERIGOSO (φ)
Lavatório	X	Cerâmica	X	
Misturador Lavatório	X	Metal Cromado	X	
Misturador Pia de Cozinha	X	Metal Cromado	X	
Pia Simples	X	Metal Cromado	X	
Porta grelha e grelha quadrados	X	PVC Branco	X	
Tanque	X	Porcelana	X	
Lastro de brita	X	Brita	X	
		Tela de aço CA-60	X	
Piso Cerâmica Esmaltada 20x20	X	Argamassa Revestimento	X	
		Cerâmica Esmaltada 20x20cm	X	
		Camada impermeabilização		
Laje concreto	X	Concreto	X	
Piso Concreto	X	Concreto	X	
Porta	X	Imbuia para porta	X	
		Imbuia- Batente/Montante	X	
Quadro estrutural	X	Concreto armado	X	
Telhado	X	Telha fibrocimento	X	
Terças e caibros	X	Madeira tratada		X
Caixa d'água	X	PVC Branco	X	
		PEMD Azul	X	

FONTE: A autora.

4.1.5 Dados de entrada para simulação energética na fase operacional

4.1.5.1 Padrão de ocupação dos ambientes

A configuração dos padrões foram baseadas no procedimento para determinação da eficiência pelo método da simulação da Etiqueta PBE Edifica. Conforme descrito no Manual para Aplicação do RTQ-R, elaborado pelo Procel (2012), o padrão de ocupação dos dormitórios deve ser de duas pessoas cada e a sala é utilizada por todos os usuários dos dormitórios. O padrão de ocupação dos ambientes foi modelado diferenciando dias úteis e não úteis, conforme os horários de ocupação apresentados na TABELA 9. A ocupação do ambiente é representada pela porcentagem de pessoas disponíveis no horário. Quanto à taxa metabólica indicada para cada atividade, será considerado o calor produzido de 81W e 108W por pessoa quando em repouso (dormitório) e sentado (sala), respectivamente.

TABELA 9 - PADRÕES DE OCUPAÇÃO NOS AMBIENTES DE PERMANÊNCIA PROLONGADA

HORA	DORMITÓRIOS		SALA	
	DIA ÚTIL (%)	DIA NÃO ÚTIL (%)	DIA ÚTIL (%)	DIA NÃO ÚTIL (%)
1h	100	100	0	0
2h	100	100	0	0
3h	100	100	0	0
4h	100	100	0	0
5h	100	100	0	0
6h	100	100	0	0
7h	100	100	0	0
8h	0	100	0	0
9h	0	100	0	0
10h	0	50	0	0
11h	0	0	0	25
12h	0	0	0	75
13h	0	0	0	75
14h	0	0	25	75
15h	0	0	25	50
16h	0	0	25	50
17h	0	0	25	50
18h	0	0	25	25
19h	0	0	100	25
20h	0	0	50	50
21h	50	50	50	50
22h	100	100	0	0
23h	100	100	0	0
24h	100	100	0	0

FONTE: A autora, adaptado de PROCEL (2012)

4.1.5.2 Padrão de iluminação

O padrão de iluminação está discriminado na TABELA 10, considerando uma Densidade de Potência de Iluminação (DPI) de 6,0 W/m^2 para dormitório e sala e 5,0 W/m^2 para banheiro e cozinha.

TABELA 10 - PADRÕES DE ILUMINAÇÃO NOS AMBIENTES DE PERMANÊNCIA PROLONGADA

HORA	DORMITÓRIOS		SALA	
	DIA ÚTIL (%)	DIA NÃO ÚTIL (%)	DIA ÚTIL (%)	DIA NÃO ÚTIL (%)
1h	0	0	0	0
2h	0	0	0	0
3h	0	0	0	0
4h	0	0	0	0
5h	0	0	0	0
6h	0	0	0	0
7h	100	0	0	0
8h	0	0	0	0
9h	0	100	0	0
10h	0	0	0	0
11h	0	0	0	100
12h	0	0	0	100
13h	0	0	0	0
14h	0	0	0	0
15h	0	0	0	0
16h	0	0	0	0
17h	0	0	100	100
18h	0	0	100	100
19h	0	0	100	100
20h	0	0	100	100
21h	100	100	100	100
22h	100	100	0	0
23h	0	0	0	0
24h	0	0	0	0

FONTE: A autora, adaptado de PROCEL (2012)

4.1.5.3 Condições climática

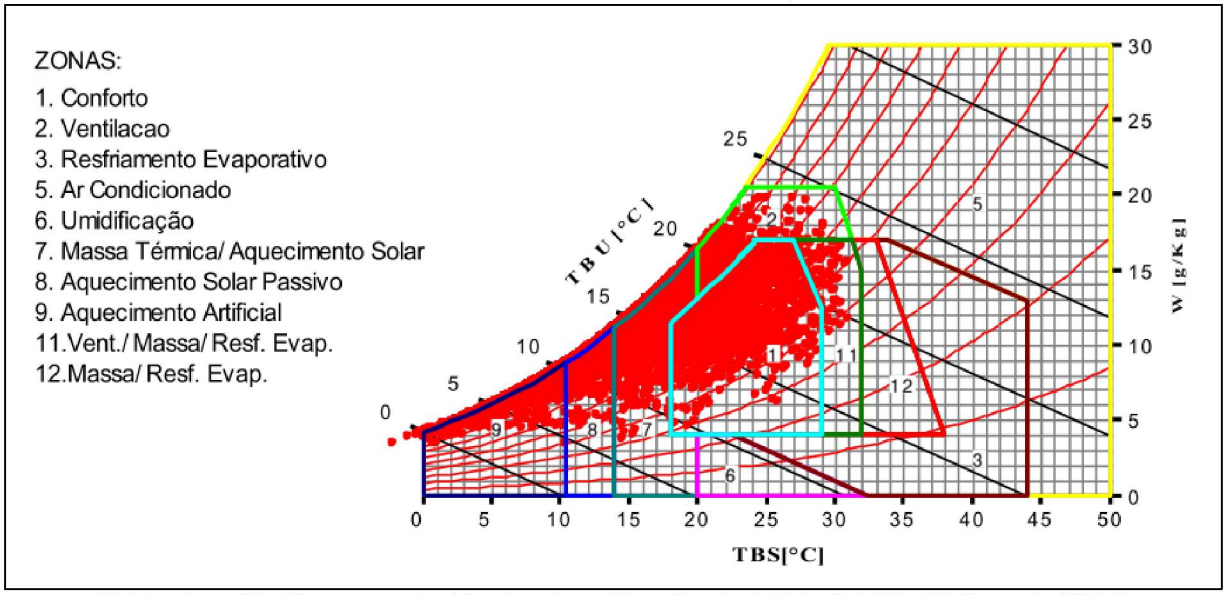
Foi selecionado o arquivo *Test Reference Year* (TRY) de Curitiba do ano de 1969, fornecido pelo Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (LabEEE) da UFSC e corrigido segundo descrito por Carlo e Lamberts (2005).

4.1.5.4 Sistemas de ventilação natural e aquecimento artificial

A NBR 15220- Parte 3 (ABNT, 2003) define a cidade de Curitiba como inserida na Zona Bioclimática 1 (ZB1), dentre as 8 zonas bioclimáticas compreendidas no Brasil. De acordo com a norma, as principais diretrizes para edificações na ZB1

incluem vedações externas com paredes relativamente leves e cobertura leve e isolada, aberturas para ventilação médias e incidência de sol, sem sombreamento, durante os períodos frios. Segundo Lamberts *et al*. (2011), as principais estratégias bioclimáticas necessárias para manter o conforto térmico no ambiente interno em Curitiba compreendem: massa térmica para aquecimento (materiais que permitem maior inércia térmica), aquecimento solar passivo, e aquecimento artificial no inverno. No verão as estratégias são: ventilação natural e resfriamento evaporativo. Porém, a simulação do modelo de teste incluiu parcialmente tais diretrizes, também com base no que é especificado no manual do RTQ-R, configurado um sistema de ventilação natural, aquecimento e resfriamento artificial. A FIGURA 19 apresenta a carta bioclimática para a zona 1.

FIGURA 19 - CARTA BIOCLIMÁTICA DE CURITIBA, ANO TRY DE 1969



FONTE: Apostila Desempenho térmico de edificações LabEEE (LAMBERTS et al., 2011).

O sistema de ventilação natural modelado considera aberturas (portas e janelas) para ventilação em todos os ambientes, com padrão de uso para controle de abertura das janelas quando a temperatura interna é igual ou superior à temperatura do termostato (adotado 20ºC) e superior à temperatura externa. O coeficiente de rugosidade do entorno adotado é de 0,33, o qual representa um terreno de centro urbano, no qual pelo menos 50% das edificações possuem altura maior que 21 metros. Os coeficientes de pressão são estimados através de experimentos em túnel do vento, dados calculados automaticamente no software, conforme indicado pelo manual do PBE Edifica (PROCEL, 2012) e ASHRAE (2009).

O sistema de aquecimento e refrigeração artificial foi programado para funcionar somente nos dormitórios no período entre 21h às 8h, mantendo a temperatura do termostato em 22 ºC para aquecimento e 24 ºC para refrigeração. Foi atribuída a taxa de fluxo de ar por pessoa de 0,00944 m^3/s, com modo de operação do ventilador continuo, eficiência do ventilador de 0,7 e eficiência do motor de 0,9. A razão entre o calor retirado do ambiente e a energia consumida pelo equipamento (COP) é 3,00 W/W e COP 2,70 W/W para fornecimento de calor.

4.1.5.5 Propriedades térmicas dos materiais

Os vidros utilizados nas janelas foram especificados com Fator U de 5,15 W/m^2 K e Fator Solar igual a 0,35. A TABELA 11 apresenta os valores de densidade de massa aparente, condutividade térmica e calor específico de cada material utilizado nos elementos componentes da envoltória da residência. Os valores foram retirados a partir da NBR 15.220 (ABNT, 2003).

TABELA 11 - PROPRIEDADES TÉRMICAS DOS MATERIAIS

MATERIAIS	DENSIDADE DE MASSA APARENTE (KG/M^3)	CONDUTIVIDA DE TÉRMICA (W/(M.K))	CALOR ESPECÍFICO (KJ/(KG.K))	ABSORTÂNCIA
Imbuia	980	0,23	1,46	0,90
Piso cerâmica esmaltada	2000	1,50	0,92	0,50
Brita	1400	0,70	0,80	0,80
Concreto	2300	1,75	1,00	0,80
Argamassa de revestimento	1900	1,15	1,00	0,80
Argamassa colante	1900	1,15	1,00	0,50
Chapisco	2000	1,15	1,00	0,80
Emboço	2000	1,15	1,00	0,80
Reboco	2000	1,15	1,00	0,80
Piso de cerâmica	1600	0,90	0,92	0,85
Tijolo de 8 furos + argamassa de assentamento*	1630	0,47	0,45	0,80
Azulejo cerâmico	2000	1,05	0,92	0,40
Telha fibrocimento	1900	0,84	0,95	0,90
Placa de gesso	750	0,35	0,84	0,30

FONTE: Adaptado de NBR 15220 (ABNT, 2003)
LEGENDA: (*) elemento equivalente

Segundo a NBR 15520, o cálculo da capacidade térmica de componentes com camadas homogêneas deve ser feito ou através de testes em laboratórios especializados, ou conforme a Equação (17):

$$C_T = \sum_i^n \lambda_i R_i c_i \rho_i = \sum_i^n e_i c_i \rho_i \quad (17)$$

consequentemente,

$$R_t = \sum_i^n \frac{e_i}{\lambda_i} \quad (18)$$

onde, C_T é a capacidade térmica, λ a condutividade térmica, c o calor específico e ρ a densidade de cada material.

A resistência térmica (R_T) total da parede ou cobertura e a transmitância térmica (U) são obtidas por:

$$R_T = R_{si} + R_t + R_{se} = \frac{1}{U} \quad (19)$$

sendo R_t a resistência térmica de uma camada única interna do componente construtivo, R_{si} a resistência superficial interna, e R_{se} a resistência superficial externa, ambas dependentes da emissividade, rugosidade das superfícies, temperatura do ar e outros fatores.

As equações (20) e (21) devem ser utilizadas no caso de componentes não homogêneos, através dos quais o transporte de calor não é uniforme em toda área perpendicular ao fluxo. Como exemplo, uma parede de alvenaria, cuja camada interna pode conter tijolos, com furos ou maciços, intercalados com argamassa de assentamento.

$$C_T = \frac{A_a + A_b + \cdots + A_n}{\frac{A_a}{C_{Ta}} + \frac{A_b}{C_{Tb}} + \cdots + \frac{A_n}{C_{Tn}}} \quad (20)$$

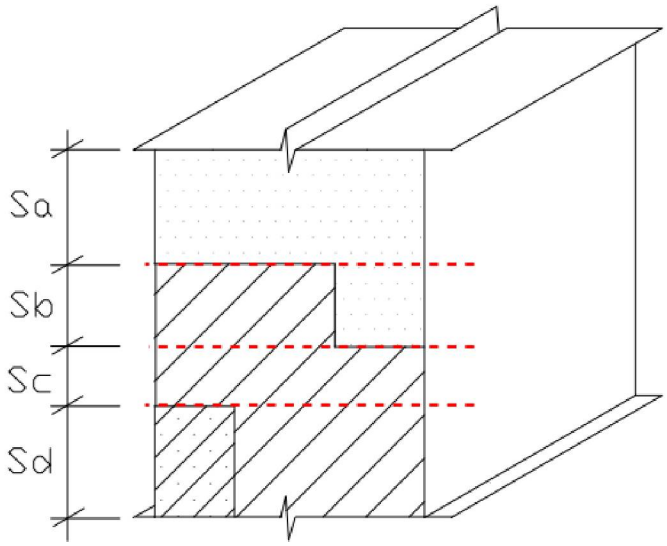
$$R_T = \frac{A_a + A_b + \cdots + A_n}{\frac{A_a}{R_a} + \frac{A_b}{R_b} + \cdots + \frac{A_n}{R_n}} \quad (21)$$

onde: C_{Ta}, C_{Tb},..., C_{Tn} e R_a, R_b..., R_n são a capacidade (C_T) e resistências térmicas (R_t) de superfície à superfície para cada seção, determinadas pelas equações 17 e 18, respectivamente; e A_a, A_b, ..., A_n são as áreas de cada seção, conforme representado na FIGURA 20.

Quando especificada no EnergyPlus a espessura, condutividade, densidade, calor específico e rugosidade de cada material, o software considera cada superfície

com camadas homogêneas. Uma vez que as paredes utilizadas no modelo não são homogêneas, assume-se que o cálculo da resistência térmica da parede no software não representa a realidade.

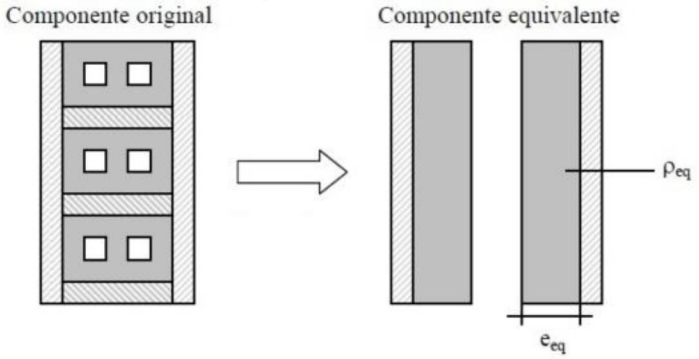
FIGURA 20 - SEÇÕES DE UM COMPONENTE COM CAMADAS HOMOGÊNEAS E NÃO HOMOGÊNEAS



FONTE: NBR 15220 (ABNT, 2003)

Portanto, na realização do ajuste dos materiais de parede, foi necessário criar paredes equivalentes, conforme metodologia descrita por Ordenes *et al.*(2003), e ilustrado na FIGURA 21.

FIGURA 21 - REPRESENTAÇÃO DE COMPONENTE EQUIVALENTE



FONTE: ORDENES *et al.*(2003)

A parede equivalente deve ser lida pelo software com as mesmas propriedades de transmitâncias e capacidade térmica da parede real, ou seja:

$$C_{T(eq)} = C_{T(real)} \quad (22)$$

$$R_{t(eq)} = R_{t(real)} \quad (23)$$

$$U_{(eq)} = U_{(real)} \quad (24)$$

assumindo os valores da parede real conforme cálculo descrito pela norma.

É valido citar que a densidade de massa aparente (ρ) é o quociente da massa pelo volume aparente de um corpo, enquanto que a densidade (E) determinada anteriormente na TABELA 4, é a massa específica de cada material.

4.1.5.6 Consumo energético dos equipamentos

A partir do cruzamento dos dados fornecidos pelo estudo Demanda de Energia 2050, o segundo de cinco documentos que irão compor o Plano Nacional de Energia 2050, elaborado pela EPE (2016), foi determinado o padrão de uso médios conforme descrito na TABELA 12.

TABELA 12 - PADRÃO DE USO DOS EQUIPAMENTOS

EQUIPAMENTOS	ZONA TÉRMICA	POTÊNCIA (W)	USO DIÁRIO (HORAS)	USO MENSAL (kWH)
Entretenimento	Sala	160,0	7,00	33,6
Computador e outros	Dormitório 1	150,0	1,00	4,5
Computador e outros	Dormitório 2	150,0	1,00	4,5
Refrigerador	Cozinha	58,3	24,00	41,9
Fogão*	Cozinha	66,7*	1,00	2,0*
Chuveiro elétrico	W.C.	3500,0	0,53	55,7
Outros	Cozinha	150,0	1,00	4,5

LEGENDA: *Único equipamento de fonte não elétrica.
FONTE: A autora, com base em EPE (2016).

A unidade para o fogão a gás foi convertida para kWh e adaptada para potência em Watt pois é neste formato que o EnergyPlus solicita a entrada de valores. Neste caso específico, foi necessário transformar o valor anual médio estimado em tep (tonelada equivalente de petróleo) para kWh, considerando 1 hora de uso diário. Importante ressaltar também que não foi considerada para a simulação a emissão de calor de fontes como a chama do fogão, calor gerado na cocção de alimentos ou no aquecimento da água do chuveiro. O programa EnergyPlus não tem capacidade para modelar o fluxo convectivo gerado pela diferença de temperatura do ar quando o

chuveiro é ligado, dissipando rapidamente o calor gerado por esse equipamento. Além disso, o fluxo de umidade também não é modelado corretamente (MATOS et al., 2006).

4.1.5.7 Emissões de CO_2 no uso de equipamentos

Os índices de emissão de CO_2 na produção da energia elétrica foram calculados conforme realizado por Tavares (2006). Foi considerada a contribuição significativa percentual de cada combustível no funcionamento das termoelétricas, com respectivos índices de eficiência energética e índices de emissão específicos para cada fonte, conforme mostra a TABELA 13. Apenas os três principais combustíveis de uso mais expressivos nas termoelétricas foram considerados, uma vez que as outras alternativas de geração de energia elétrica no Brasil não envolvem queima de combustível, e portando, não emitem dióxido de carbono de forma direta.

TABELA 13 - EMISSÃO DE CO_2 NA PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Combustíveis usado na termoeletricidade	**% matriz brasileira**	**Eficiência**	**%**	**Emissão por fonte (kg CO_2/GJ)**	**Emissão eletricidade (kg CO_2/GJ)**
Óleo	2,09	0,3	9,6	74,1	7,11
Carvão mineral	2,94	0,2	14,7	94,6	13,90
Gás Natural	9,76	0,7	13,9	56,1	7,79
Total					**28,80**

Fonte: Dados de EPE (2017) e IPCC (2006) e TAVARES (2006)

TABELA 14 - EMISSÃO DE CO_2 NA QUEIMA DE COMBUSTÍVEIS PARA COCÇÃO

Combustíveis usado para cocção nas residências	**% uso**	**Emissão por fonte (kg CO_2/GJ)**	**Emissão eletricidade (kg CO_2/GJ)**
GLP	50	63,1	31,55
Gás Natural	50	56,1	28,05
Total			**59,60**

Fonte: IPCC (2006)

Para quantificar a as emissões de dióxido de carbono relativas à energia de cocção foram utilizados índices de emissões do IPCC (2006). Foi considerado consumo a partir de fogão à gás, com possibilidade de uso por GLP ou gás natural. O índice final de emissões representa a média do uso dos dois combustíveis. A rede de gás natural na cidade de Curitiba está sendo ampliada pela Companhia Paranaense

de Gás, portanto o cenário presente considerou uso de GLP para cocção de alimentos na primeira metade da vida útil da edificação residencial e substituição por gás natural na segunda metade.

4.2 ANÁLISE DOS IMPACTOS AMBIENTAIS

4.2.1 Resultados no Revit - 1º passo

Ao final do processo de inserção dos parâmetros do modelo e preenchimento dos valores nas tabelas, os valores calculados pelos parâmetros de cálculo foram somados. Foi necessário gerar 3 tabelas no Revit para quantificar os resultados: a tabela de levantamentos de materiais e duas tabelas de quantidade (tabela de montantes e tabela de peças hidro sanitárias). Os montantes são os componentes da estrutura do telhado, como terças e caibros, as quais foram configuradas no projeto de forma que não estão presentes na lista de levantamento de materiais. No caso do elemento caixa d'água, uma vez que esta já chega na obra pronto da fábrica, seus impactos devem ser calculados através dos parâmetros de tipo. A TABELA 15 a seguir apresenta resultados gerados pelas tabelas com a soma dos parâmetros de cálculo:

TABELA 15 - RESULTADOS PARCIAIS DA ACVE: VALORES DE SAÍDA DOS PARÂMETROS NO REVIT

PARÂMETROS	ENERGIA EMBUTIDA (MJ)	EMISSÃO DE CO_2 (KG)	ENERGIA EMBUTIDA (MJ)	EMISSÃO DE CO_2 (KG)	CONSUMO DE ENERGIA (MJ)	EMISSÃO DE CO_2 (KG)
	β	ε	q	p	ɣ	μ
FASE	Pré-operação		Operação*		Pós-operação	
TABELA LEVANTAMENTO DE MATERIAIS	323.745,72	39.774,99	166.023,77	10.728,24	1.136,07	2.083,48
TABELAS QUANTIDADES	15.138,69	535,88	13.461,29	478,23	4.884,54	25.612,61
TOTAL	**338,88 GJ**	**40.310,87 kg**	**179,49 GJ**	**11.206,47kg**	**6,02 GJ**	**27.696,09 kg**

FONTE: A autora
LEGENDA: Legenda: (*) Resultado parcial

Utilizando os filtros nas tabelas, é possível avaliar de forma mais detalhada o peso que cada componente ou cada sistema teve no resultado final. TABELA 16 e

TABELA 17 a seguir apresentam o valor dos impactos para cada sistema da construção em cada fase do ciclo de vida.

TABELA 16 - RESULTADOS PARCIAIS DA ACVE: CONSUMO DE ENERGIA POR SISTEMA

SISTEMA	PRÉ-OPERAÇÃO		OPERAÇÃO*		PÓS-OPERAÇÃO	
	MJ	%	MJ	%	MJ	%
Estruturas	65.046	19,2	0	0,0	0	0,0
Alvenarias	75.032	22,1	4.660	2,6	0	0,0
Esquadrias	40.078	11,8	36.517	20,3	0	0,0
Coberturas	23.523	6,9	16.733	9,3	6.021	100,0
Pisos	107.883	31,8	10.914	6,1	0	0,0
Instalações	7.149	2,1	5.440	3,0	0	0,0
Pinturas	20.173	6,0	105.222	58,6	0	0,0

FONTE: A autora

TABELA 17 - RESULTADOS PARCIAIS DA ACVE: EMISSÃO DE CO_2 POR SISTEMA

SISTEMA	PRÉ-OPERAÇÃO		OPERAÇÃO*		PÓS-OPERAÇÃO	
	kg	%	kg	%	kg	%
Estruturas	12.114	30,1	0	0,0	0	0,0
Alvenarias	6.771	16,8	324	2,9	0	0,0
Esquadrias	3.582	8,9	3.028	27,0	0	0,0
Coberturas	3.129	7,8	1.062	9,5	27.696	100,0
Pisos	12.957	32,1	770	6,9	0	0,0
Instalações	455	1,1	240	2,1	0	0,0
Pinturas	1.303	3,2	5.783	51,6	0	0,0

FONTE: A autora

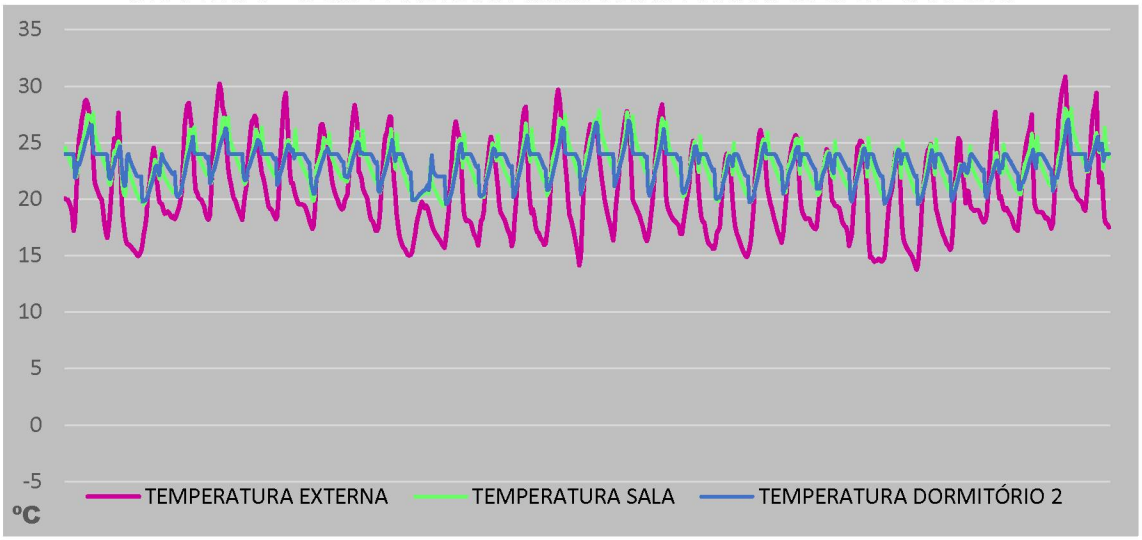
Os resultados calculados de forma automática no Revit para o consumo de energia foram 338,88 GJ e 6,02 GJ na fase pré-operacional e pós-operacional, respectivamente. As emissões de dióxido de carbono nestas mesmas fases somaram aproximadamente 40.311 kg e 27.696 kg. As três tabelas completas geradas no software estão no Apêndice A. Os resultados dos impactos na fase de operação precisam ainda ser somados aos resultados da simulação termo-energética, descritos a seguir.

4.2.2 Resultados no EnergyPlus - 2º passo

A simulação no EnergyPlus gerou resultados do consumo de energia para os 8760 horas do ano. Além disso, os dados de saída forneceram também as

temperaturas horárias em cada zona térmica e temperaturas externas. A partir disso, foi possível analisar de forma mais detalhada os impactos, e verificar também se a configuração da edificação e do sistema de ventilação, resfriamento e aquecimento, foram configurados de forma adequada a garantir o conforto térmico no ambiente interior, mostrando coerência no consumo energético simulado. A seguir estão apresentadas as temperaturas externas e internas simuladas nos meses mais quente e mais frio do ano.

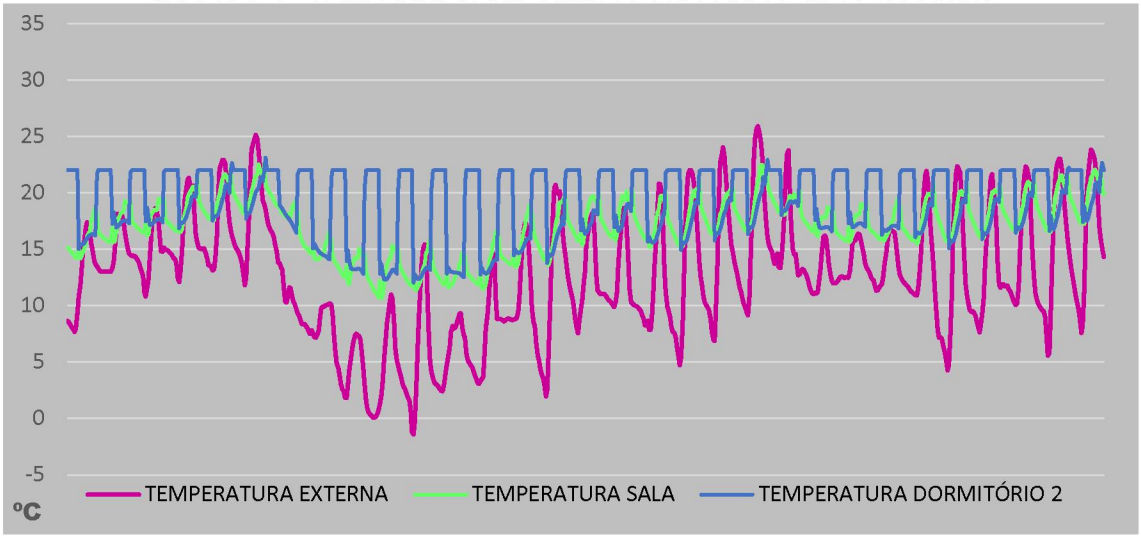
GRÁFICO 3 - TEMPERATURAS SIMULADAS PARA O MÊS DE JANEIRO



FONTE: A autora

As zonas térmicas referentes aos ambientes da sala e dormitório 2 possuem condições térmicas praticamente opostas. A sala possui suas fachadas voltadas para o Norte e Oeste e abertura direcionada ao Norte, recebendo assim maior incidência de radiação solar ao longo dos dias e do ano. E o ambiente sala não é climatizado artificialmente. Por outro lado, o dormitório 2 tem suas fachadas voltada para o Leste e Sul, com janela ao Sul e sistema de aquecimento e resfriamento configurado para funcionar durante a noite. O dormitório 2 também é sombreado pela área de caixa d'água durante o período da tarde até o anoitecer. É possível perceber pelo GRÁFICO 3 e GRÁFICO 4 que há realmente um pequena diferença de temperatura entre os dois ambientes, sendo esta bastante significante nos horários em que o sistema de aquecimento está funcionando no inverno. O resultado da simulação com o temperaturas de todos os ambientes e meses do ano pode ser encontrado no Apêndice B.

GRÁFICO 4 - TEMPERATURAS SIMULADAS PARA O MÊS DE JULHO



FONTE: A autora

Pela TABELA 18 é possível perceber que a energia consumida para o aquecimento dos dormitórios compõe grande parte do consumo total de energia. O GRÁFICO 4 confirma que de fato o aquecimento foi necessário em todos os dias do mês de julho.

TABELA 18 - RESULTADOS DA SIMULAÇÃO – CONSUMO DE ENERGIA E EMISSÃO DE CO_2 DURANTE A OPERAÇÃO DO EDIFÍCIO

USO	CONSUMO ANUAL DE ENERGIA (kWh)	EMISSÃO ANUAL DE CO_2 (kg)
Aquecimento	797,2	82,7
Resfriamento	50,3	5,2
Ventilação	13,5	1,4
Iluminação	397,3	41,2
Cocção	24,4	6,4
Chuveiro	638,8	66,2
Outros equipamentos	967,0	100,3
Soma	**2888,3**	**303,3**
Total em 50 anos	**144.417,0**	**15.166,0**

FONTE: A autora

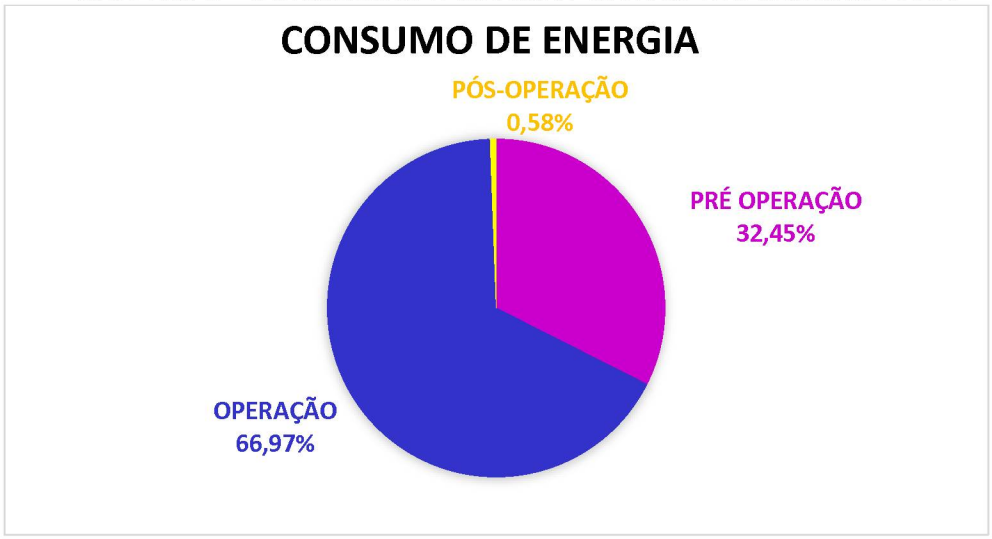
Os resultados da simulação referentes ao consumo de energia foram multiplicados por 50 para encontrar o consumo ao longo dos 50 anos de vida útil da edificação. Para calcular a emissão de dióxido de carbono na fase operacional, os resultados foram multiplicados pelos índices de emissão referentes à energia elétrica

e energia para cocção, apresentados anteriormente na TABELA 13 e TABELA 14, respectivamente.

4.2.3 Resultados final - 3º passo

O GRÁFICO 5 mostra o percentual de cada fase do ciclo de vida no consumo energético total calculado na ACVE. A fase operacional consumiu 699 GJ de energia, representando aproximadamente 67% do consumo total. A fase pré-operacional somou 389 GJ em energia embutida e transporte dos materiais de construção, o que equivale a 32%. Já a fase pós-operacional consumiu apenas 6 GJ, menos de 1% do consumo energético de todo o ciclo.

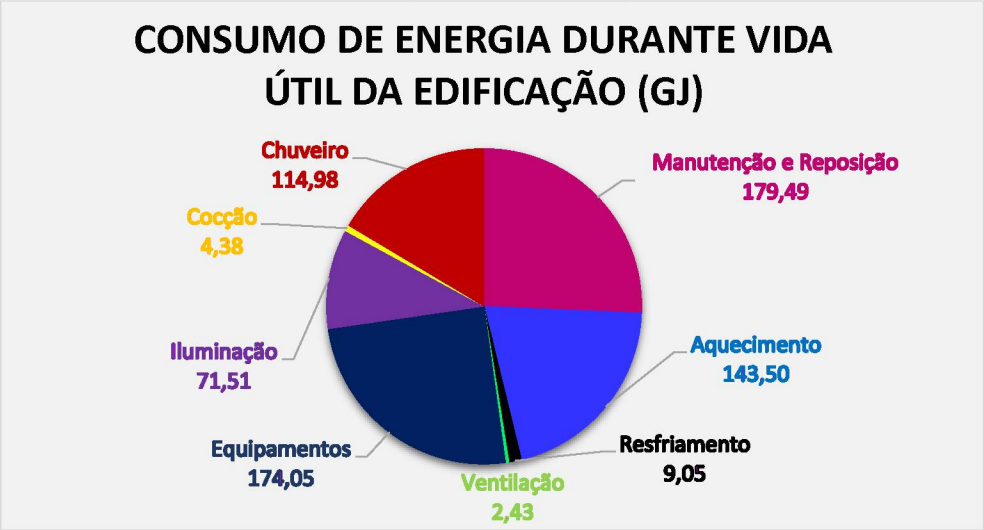
GRÁFICO 5 - CONSUMO DE ENERGIA POR FASE DO CICLO DE VIDA



FONTE: A autora

Considerando apenas a fase de operação, percebe-se que a maior parte do consumo energético simulado no modelo teste ocorreu na utilização dos equipamentos elétrico/eletrônicos, porém, a energia de manutenção ainda é maior se considerarmos o consumo total. O terceiro maior consumo ocorreu através do aquecimento nos dormitórios e em seguida pelos chuveiros elétricos. A energia de cocção e sistema de ventilação dos ambientes representam a menor parte no consumo energético durante a operação do edifício. O GRÁFICO 6 mostra de forma mais detalhada a participação dos diferentes usos no consumo energético durante a operação do edifício.

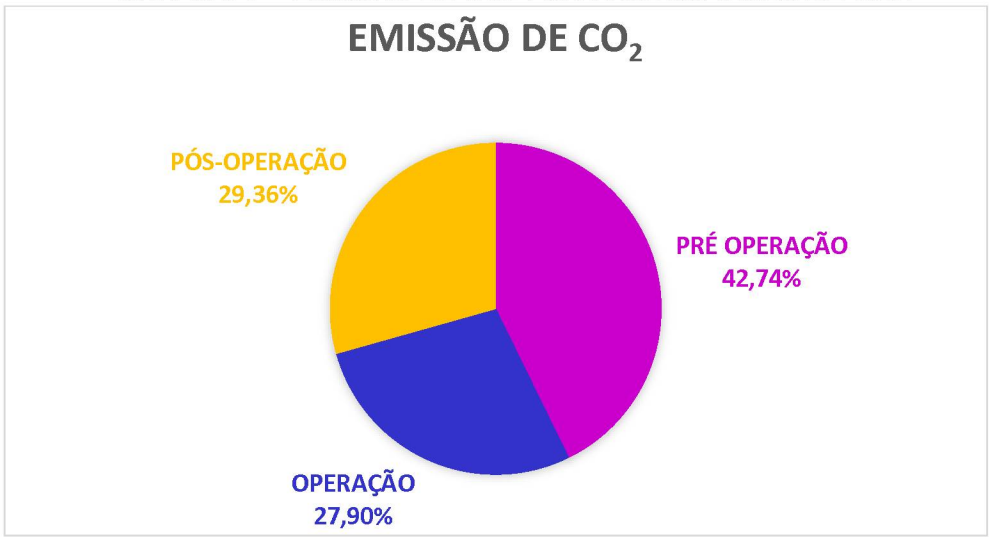
GRÁFICO 6 - CONSUMO ENERGÉTICO POR TIPO DE EQUIPAMENTO EM 50 ANOS DE OPERAÇÃO DA EDIFICAÇÃO



FONTE: A autora

O cenário é um pouco diferente se analisarmos a categoria de impacto de emissões de CO_2. Nos resultados da ACVE realizada no modelo de teste, a fase pré-operacional foi a que mais contribuiu para a emissão de CO_2 de todo o ciclo de vida. Gerando aproximadamente 40 toneladas de dióxido de carbono, a fase pré-operacional é responsável por emitir 43% do principal gás do efeito estufa. Durante os processos de fabricação e transporte de materiais de construção, os sistemas que mais contribuíram para esse resultado foram as estruturas e materiais componentes dos pisos (TABELA 17).

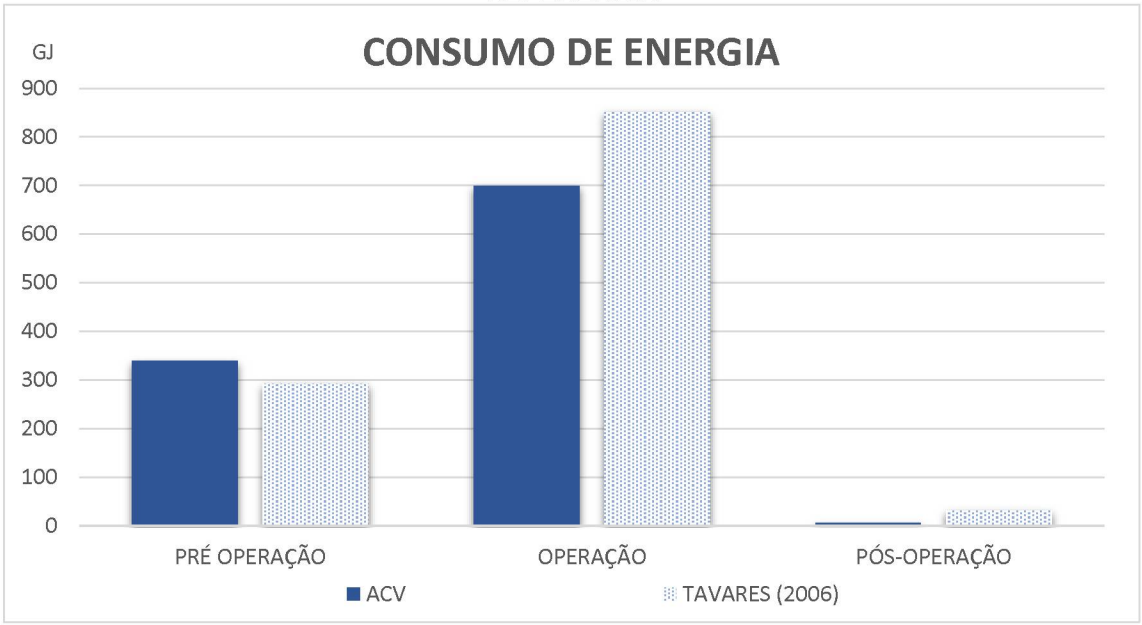
GRÁFICO 7 – EMISSÃO DE CO2 POR FASE DO CICLO DE VIDA



FONTE: A autora

Em seguida, representando 29% das emissões, está a fase de pós-operação. A grande maioria dos materiais componentes do edifício foram considerados como recicláveis ou reutilizáveis, e portanto, não contribuíram para os impactos de consumo de energia e nem de emissões nesta fase. Alguns materiais da cobertura foram os grandes responsáveis pela grande quantidade de CO_2 emitido no fim do ciclo de vida. O gesso componente do forro, apesar de já ser viável sua reciclagem em algumas situações, no presente estudo foi considerado como não reciclável, o que gerou impactos no transporte e aterramento do mesmo. A estrutura de madeira do telhado, caibro e terças, também não foi reciclada no modelo teste, sendo este material transportado e incinerado ao final da vida util. Ou seja, as emissões relativas aos processos do fim da vida de apenas dois materiais, dentre todos componentes da edificação, somaram 27 toneladas de CO_2. Através desta análises, percebe-se a importância de realizar uma avaliação considerando todas as fase do ciclo de vida, avaliando diferentes categorias de impactos. Se tivesse sido feita uma análise somente a partir dos dados apresentados no GRÁFICO 6, os processos da fase pré-operacional seriam aparentemente insignificantes, porém não é isso que percebemos no GRÁFICO 7.

GRÁFICO 8 - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DA ACVE DO MODELO TESTE COM ACVE DE REFERENCIA



FONTE: A autora e Tavares (2006)

Por fim, para validar a consistência dos resultados gerados no presente método de ACVE, os valores finais foram comparados aos resultados do trabalho de Tavares

(2006). A residência do Modelo 1 do autor possui o mesmo padrão da residência (padrão construtivo, classe, e uso da edificação) utilizada no modelo teste, portanto a ACVE do modelo 1 de Tavares (2006) será usada como referência na validação dos resultados encontrado. Os dados do inventários, mais especificamente os valores de energia embutida, e impactos de transporte e desperdício dos materiais aplicados do modelo de teste foram baseados no mesmo trabalho. Portanto, é coerente que os resultados da ACVE do modelo de teste e da ACVE de referência possuam ao menos a mesma ordem de grandeza. O GRÁFICO 8 mostra que os resultados obtidos, referente ao consumo de energia estão próximo e seguem um padrão parecido na distribuição do consumo entre as três fases do ciclo de vida.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O principal intuito em propor um método de ACVE utilizando modelagem em BIM e simulação termo-energética foi permitir e viabilizar que análises ambientais complexas possam ser realizadas por projetistas e consultores durante o projeto de edificações, possibilitando alterações que reduzam os impactos antes que a construção se inicie. Tendo isso em vista, no presente capítulo estão descritas os pontos positivos e facilidades observadas em se aplicar o método de ACVE proposto, quais foram as dificuldades encontradas na aplicação e teste do método e quais são as possibilidades de aplicar o método de forma semelhante fazendo adaptações para casos específicos. É feita, portanto, uma análise qualitativa da aplicação do método de ACVE. Ao final do capítulo 5 está prescrito um passo a passo para aplicar o método desenvolvido de forma objetiva. Também é disponibilizado um link para download de um template no Revit que permite a replicação automática dos parâmetros e tabelas já configurados para ser usado em qualquer projeto desenvolvido nesta ferramenta.

5.1 ANÁLISE QUALITATIVA DO MÉTODO DE ACVE PROPOSTO

Um aspecto significativo observado durante a realização dos procedimentos foi a facilidade com que se pode modificar elementos do projeto sem que seja necessário redesenhar ou inserir e calcular novos dados em elementos ou ambientes que foram afetados pelas mudanças. Por exemplo, ao alterar a área de um ambiente, mudando uma parede de lugar, ou modificar medidas e alturas, os novos volumes de materiais já serão calculados automaticamente pela ferramenta BIM, e consequentemente os valores finais das tabelas de resultados também serão atualizados automaticamente. Na aplicação da ACVE a partir do modelo BIM, todas as tabelas são automaticamente ajustadas. Ou seja, a modificação de propriedades de componentes no projeto são alteradas no modelo e ao mesmo tempo nas tabelas associadas, não permitindo inconsistência ou contradição de informação.

Outra conveniência percebida no uso da ferramenta BIM está relacionada ao processo de inserção de novos parâmetros no modelo. Quando parâmetros compartilhados são criados, é possível utilizá-los em qualquer outro projeto ou modelo. Ao ponto que, uma vez que todos os dados de inventario necessários já tenham sido inseridos anteriormente durante os projetos antigos, para realizar uma

nova a análise de ciclo de vida é necessário apenas aplicar o modelo das tabelas. Neste caso, é preciso alterar também os valores dos parâmetros de consumo de energia emissões atrelados ao transporte, uma vez que estes dependem da distância da construção, eficiência do meio de transporte e combustível utilizado nos trajetos.

Em relação ao processo de transferência de informação do modelo BIM para o EnergyPlus, mostrou-se viável a exportação da geometria e o reconhecimento das coordenadas de todas as superfícies, componentes de janelas, portas e elementos de sombreamento por parte do software. Assim como também houve a transferência de informações referentes aos materiais componentes e suas propriedades térmicas, sendo necessários pequenos ajustes adicionais para realizar a simulação. A atribuição de materiais aos seus respectivos elementos no EnergyPlus tradicionalmente devem ser feitas uma à uma para cada superfície. Com a exportação do modelo, esse processo foi facilitado, pois as informações foram transmitidas através do arquivo gbXML, sendo necessário apenas conferir se os valores e configuração estavam corretas.

Quanto à avaliação dos resultados, o método proposto permite fácil visualização dos resultados de forma geral, e também favorece que os impactos e fluxos com maior peso no resultado final sejam identificados de forma clara, pontual e detalhada. Com a aplicação dos filtros e somas automáticas nas tabelas do Revit, análises mais específicas se tornam simples. Da mesa forma, os arquivos de saída do EnergyPlus podem fornecer os resultados do consumo de energia discriminado por fontes, além de fornecer informações horárias de temperaturas e do consumo energético. Tanto as tabelas do Revit quanto os arquivos de saída da simulação podem ser salvos no formato XLS, permitindo fácil acesso dos resultados para gerar gráficos, listas e relatórios.

O presente método exigem que sejam configurado um sistema de ventilação e/ou climatização artificial, mesmo que na edificação não esteja prevista a implantação dos mesmos. Uma vez que a intenção do método de ACVE aqui desenvolvido é estimar o consumo energético e emissões ainda durante o projeto da edificação, a fim de realizar escolhas de materiais e configurações mais eficientes, faz sentido que as escolhas do projeto incluam também soluções eficientes, que estejam alinhadas às condições de conforto para os usuários. Portanto, ao incluir na avaliação de impactos o consumo energético e emissões referentes a um suposto sistema de resfriamento, aquecimento ou ventilação, torna-se possível avaliar o quanto é necessário consumir

energia para que as temperaturas internas contemplem as condições de conforto térmico. Desta forma, cumpre-se com o objetivo da ACVE em comparar e selecionar melhores possibilidade de projeto, e configurações arquitetônicas. Este foi principal motivo pelo o qual se optou incluir a simulação termo-energética no método de ACVE. O consumo energético por parte dos outros equipamentos pode ser quantificado apenas multiplicando a potência de cada equipamento com o número de horas de funcionamento dos mesmos, sem necessariamente realizar a simulação no EnergyPlus ou em outro software próprio. Como não é possível prever o padrão de uso dos equipamentos elétrico e eletrônicos, uso de chuveiro e o padrão de consumo de energia para cocção, estimou-se um perfil médio para realizar a ACVE. Porém estes padrões de uso independem das configurações do projeto, pois variam conforme o perfil da família que se abrigará na residência e da conscientização dos usuários em geral. Por outro lado, o uso de sistema de climatização e iluminação sofrem grande influência em como a edificação foi projetada e construída.

5.2 DIFICULDADES E DETALHES INTRÍNSECOS ÀS FERRAMENTAS UTILIZADAS

Diversas dificuldades, particularidades e detalhes foram percebidos ao testar a aplicação do método nos software. Muitos desses detalhes podem ser vistos como pontos de atenção fundamentais para a replicabilidade do método e sugestões para aprimoramento das ferramentas por parte de seus desenvolvedores.

O principal ponto de atenção na aplicação do método proposto está nas dificuldades existentes em realizar um levantamento dos quantitativos com exatidão. Esta questão é amplamente discutida no meio acadêmico, principalmente no que diz respeito ao quantitativo para realização de análises BIM 5D, referente ao processo de orçamentação. Conforme observado por Bagno e Arantes (2016), o quantitativo de diversos itens e elementos do projeto podem apresentar erros e diferenças significativas, principalmente devido à problemas de modelagem e limitações do software. Ou seja, é essencial a padronização dos critérios de modelagem para que os modelos sejam concebidos pensando nas etapas e formas de execução da obra. Os quantitativos que apresentam mais problemas, normalmente têm como origem os elementos de parede. A dificuldade em modelar padrões construtivos tradicionais brasileiros, como paredes de alvenaria com camadas não homogêneas, reflete

divergências no levantamento de quantitativos. Não é possível, por exemplo, diferenciar no modelo, camadas com alturas diferentes em um mesmo elemento, que seria o caso de ambientes em que as paredes são revestidas em cerâmica somente até certa altura. O mesmo ocorre para situações nas quais o revestimento da parede vai até a altura do forro, enquanto a alvenaria vai até o fundo de um elemento estrutural. Existe também a possibilidade de sobreposição de paredes com vigas e outras situações do mesmo gênero. Importante citar também o caso da argamassa de assentamento presente entre os tijolos, que não pôde ser modelada como camada separada, de forma semelhante ao que foi feito com o chapisco, reboco e emboço. Assim como foi necessária adaptação desse tipo de parede para a simulação no EnergyPlus, o qual também não permite este tipo de detalhamento, o quantitativo da argamassa de assentamento deveria ter sido estimado à parte do quantitativo gerado na tabela. Estas análises são fundamentais na aplicação do método de ACVE, principalmente se a intenção da ACVE seja comparar dois sistemas construtivos diferentes, sendo uma opção em alvenaria e outra com painéis de camadas homogêneas. Mesmo com a constatação desses empecilhos, o uso de modelos BIM para levantamento de quantitativos e posterior avaliação de impactos ambientais não foi descredibilizado como ferramenta funcional e prática. Essas dificuldades são bastante percebidas também no uso do BIM 5D. Bagno e Arantes (2016) mostraram que o processo de levantamento de quantitativos realizado de forma tradicional também está sujeito a erros e é passível de diferenças, muitas vezes devido a divergências existentes no detalhamento do projeto 2D, o que não ocorre na modelagem BIM 3D. Estes autores também compararam o tempo necessário para realizar os processos de levantamento de material de forma tradicional e por modelagem em BIM, constatando grande proveito no uso de ferramentas BIM neste aspecto.

Da forma semelhante, houve dúvidas e adaptações para realizar o cálculo do volume das tintas a serem utilizadas. No modelo de teste a tinta foi modelada como camada externa dos elementos de parede e forros, sendo atribuída a ela a menor espessura possível que o software reconhece, no caso da versão do Revit 2018 é de 0,8 mm. Sendo assim, foi necessário adaptar também o valor da densidade da tinta, de modo que o cálculo final da massa fosse o mais próximo possível do real.

Durante o processo de exportação do modelo entre os dois software foram verificados alguns detalhes fundamentais para gerar o arquivo gbXML com

informações mais corretas e funcionais. Por exemplo, foi necessário que os pisos, forros, lajes e paredes estivessem selecionados como delimitadores de ambiente no Revit para que a exportação ocorresse de forma correta, com definição adequada das zonas térmicas. Um outro detalhe de extrema importância percebido durante a aplicação e testes do método, foi que antes de exportar o arquivo através no menu principal do Revit no formato gbXML, foi preciso excluir todos os parâmetros do modelo adicionados. Nos testes realizados para exportação do arquivo, quando os parâmetros não foram excluídos do modelo, o arquivo gbXML não carregou informações dos materiais e suas propriedades térmicas. Ou seja, a inserção e criação dos novos parâmetros que possibilitam a realização da primeira etapa da ACVE, são os mesmo parâmetros que prejudicam a interoperabilidade entre o software BIM e a ferramenta de simulação termo-energética. Porém, a aplicação do *template* para inserção automática dos parâmetros e tabelas permite que os parâmetros sejam carregadas novamente no modelo BIM, uma vez que o arquivo gbXML esteja gerado. Todos esses detalhes variam e dependem das versões utilizadas. Tanto o Revit como o EnergyPlus são atualizados anualmente, e portanto algumas configurações simples são constantemente aprimoradas e modificadas. Por exemplo, na pesquisa de Araujo, Tavares e Scheer (2017), foi testada a exportação do modelo BIM desenvolvido no Revit versão 2016 para o EnergyPlus versão 8.4.0, via OpenStudio 1.10.0. No presente trabalho, foi utilizada a mesma metodologia de exportação, porém usando o Revit 2018, EnergyPlus 8.7.0 e OpenStudio 2.2.0. De forma que foi possível perceber algumas diferenças e constatações nos arquivos exportados pelas versões mais antigas e pelas versões atuais. Pelas versões anteriores, o arquivo gbXML não manteve os nomes de zonas térmicas, elementos, e materiais iguais ao do modelo original, sendo estes substituídos por códigos alfanuméricos. Porém, no uso das versões mais atuais, esta configuração já foi aprimorada e durante a transferências de informações, esses nomes não são mais modificados. As propriedades térmicas e espessura dos materiais também não eram exportadas corretamente, e agora este detalhe técnico já foi resolvido.

5.3 Replicabilidade do artefato

Estudos realizados com a metodologia do DSR preveem que o artefato desenvolvido possa ser replicado por terceiros, inclusive em situações semelhantes,

salvo adaptação necessárias em cada caso. O método de ACVE proposto pode ser replicado em outros projetos desde que estes sejam realizados a partir de um modelo BIM, cujas composições e materiais sejam passível de serem quantificados e relacionados a bases de dados. A fim de permitir que o método possa ser aplicado por outros projetistas e/ou por consultores, nos escritórios de AEC, a seção 5.4 a seguir prescreve de forma objetiva o método desenvolvido. Desta forma, é possível utilizar o método de ACVE a partir de uma análise de inventário adequada ao projeto Ou seja, há possibilidade de replicar o método, desde que sejam alterando os valores dos índices de energia embutida e emissão de CO_2, distâncias, meios de transporte, etc (parâmetros do modelo), e padrões de consumo energético, conforme a realidade e condições locais em que o caso esteja inserido. Como já mencionado, a credibilidade dos resultados da ACVE irá depender da fonte em que foram retirados os dados de impacto. As informações que são inseridas como banco de dados dentro do processo de ACVE devem provir de uma fonte confiável, desenvolvida com rigor teórico.

5.4 PRESCRIÇÃO DO MÉTODO DE ACVE USANDO REVIT E ENERGYPLUS

1) Baixar *template* ou modelo do Revit 2018 pelo link:
<https://drive.google.com/drive/folders/15-_mEGhhkVPn1gj3lgshhN4AJpDWDJe5?usp=sharing>
2) Desenvolver projeto da edificação para cada disciplina utilizando o mesmo modelo/*template*: incluindo arquitetônico, estrutural, hidráulico, elétrico e outros.
3) Realizar análise do inventário
    a) levantar dados de índices de impacto (consumo de energia e emissão de CO_2) para fabricação, transporte e taxa de desperdício de cada material ou elemento; distância da fábrica dos materiais de construção até fornecedor e/ou distância até a obra; meios de transportes utilizados, respectivos consumos de energia e emissão (considerando tipo de combustível e eficiência); densidade dos materiais; vida útil dos materiais; determinar se cada elemento é separável, e se respectivos materiais são reutilizáveis e/ou recicláveis, ou se contém material com características de periculosidade;, definir futuro local de deposição ou tratamento dos materiais na forma de

resíduos, assim como definir as distâncias e meio de transporte utilizado para este fim.

b) Definir padrão de ocupação e uso dos equipamentos durante a fase de operação.

c) Definir índices de emissão de CO_2 atrelados ao consumo de energia durante uso da edificação

4) Em cada disciplina separadamente, inserir nos projetos os valores dos dados levantados nos respectivos parâmetro das tabelas (já disponibilizadas no *template*), preenchendo todos os campos marcados em vermelho. Os elementos que forem detalhados sem especificações e detalhamentos de materiais, como painéis, lajes e outros sistemas pré-fabricados, ou elementos e materiais que foram configurados de forma a não aparecer no levantamento de materiais, devem ser quantificados através das tabelas de quantidades.
5) Após inserção de todos valores, salvar os arquivos como projeto do Revit.
6) Utilizando apenas o projeto arquitetônico, carregar como vínculos os outros projetos.
7) Avaliar os resultados obtidos nas tabelas (colunas em azul mostram os impactos totais para cada fase do ciclo de vida).
8) Excluir todos os parâmetros e vínculos
9) Configurar arquivo para exportação pelo menu do Revit no formato gbXML: delimitar Ambientes e/ou Espaços; ajustar e confirmar propriedades físicas e térmicas dos materiais e componentes; ativar o cálculo de volumes; exportar modelo na vista 3D aberta.
10) Transformar o arquivo gbXML para o formato IDF através do OpenStudio
11) No Sketchup, usando o plug-in Euclid, conferir se a geometria foi exportada corretamente no arquivo IDF e, caso necessário, realizar ajustes com o auxílio das ferramentas de desenho.
12) Abrir arquivo no IDF Editor e conferir informações exportadas (materiais, propriedades térmicas, espessuras, etc.), realizando ajustes, caso necessário.
13) Configurar arquivo para simulação termo-energética e rodar simulação(ões)
14) Analisar resultados, juntamente com resultados gerados previamente no Revit.

6 CONCLUSÕES

Acredita-se que a preocupação ambiental na indústria da construção civil brasileira ainda ocorre de forma incipiente. Seja por falta de interesse e comprometimento dos envolvidos em contribuir de forma benéfica pelo bem coletivo ambiental e social, seja por falta de conhecimento e conscientização por parte da população de forma geral, ou até por falta de incentivos fiscais, políticas públicas e programas governamentais. O fato é que a execução e aplicação prática em se fazer cumprir as metas e planos nacionais de redução de impactos ambientais, eficiência energética, emissões de gases do efeito estufa, de redução de resíduos e outros, é muito complexa e requer certo tempo para serem implementados. A adaptação de todo um setor industrial e tradicional como o da construção civil não é uma tarefa simples. O BIM vem trazendo grandes desafios de implementação pois exige mudanças e processos em todas as etapas, tanto na forma de se projetar, orçamentar, planejar, construir, gerenciar, e também na normalização e legislação. O BIM atrelado à análises de sustentabilidade torna essa adaptação ainda mais complexa. Neste sentido, o presente trabalho pretende contribuir para que a atual fase de transição para processos mais tecnológicos seja facilitada e aprimorada. As tecnologias estão sendo melhoradas e modificadas constantemente, e portanto é essencial que as pesquisas acadêmicas acompanhem estas transformações em tempo real.

Tendo isso em vista, ainda é pouco comum realizar ACVE de edificações durante o projeto. Porém, o método proposto pode facilitar e atender algumas necessidades e processos dos empreendimentos que pretendem ser mais sustentáveis. Existe um potencial de aplicação do método de ACVE nos projetos que visam obter certificação ambiental de construções, como LEED, AQUA-HQE, Selo Azul da Caixa, e outros. Tais certificações necessitam de ferramentas que auxiliem na justificativa das escolhas e decisões tomadas, objetivando a redução de impactos ambientais. O método também pode ser atrelado à algumas exigências da etiqueta PBE Edifica, e da norma NBR 15575, uma vez que estas preveem o uso de simulações termo-energéticas.

O método de ACVE desenvolvido a partir do uso do Revit e EnergyPlus se mostrou satisfatório como ferramenta de auxílio na seleção de materiais e tomada de decisão em projetos. O processo de criação de parâmetros para impactos ambientais atrelados à quantitativos dentro do modelo BIM permite a realização de ACVE de

forma menos complexa e trabalhosa. Um processo convencional de ACV utiliza, geralmente, listas e planilhas eletrônicas para calcular os resultados. Os volumes, massas e quantitativos são estimados com base na área construída, através de dados médios de construções anteriores. Nesses casos, quando um elemento é modificado e áreas são alteradas no projeto, todos os dados e valores devem ser estimados novamente e inseridos manualmente nas planilhas para que novos resultados sejam gerados. De forma semelhante é feito com o uso de ferramentas próprias para ACV. Além do exaustivo retrabalho nestas situações, ainda existe maior risco de ocorrerem inconsistências de informações se comparado aos quantitativos realizado por uma ferramenta BIM. Outro ponto positivo percebido foi a possibilidade de criar bibliotecas próprias, com parâmetros compartilhados. Isto permite que o método seja aplicado diversas vezes pelo projetista ou profissional responsável pelas análises energéticas e de ciclo de vida. Dessa forma, com o passar do tempo será criada uma biblioteca de elementos e materiais diversificados com parâmetros e respectivos índices de impacto já pré-definidos, tornando todo o processo ainda mais automatizado.

O processo de exportação do modelo para simular o edifício pode trazer vantagens significativas, principalmente quanto à atribuição dos materiais aos seus respectivos elementos. O plug-in do Sketchup, Euclid, o qual é utilizado no presente método, permite que novas geometrias sejam modeladas de forma rápida e prática em um arquivo de formato reconhecido pelo EnegyPlus. Portanto, o desenvolvimento de uma nova geometria não é um empecilho caso o projetista e consultor prefiram modelar novamente a edificação usando o Sketchup, sem precisar configurar o arquivo para ser exportado do software BIM via gbXML. Porém, neste caso, haveria a necessidade de configurar novamente a espessura e propriedades térmicas de cada material, assim como relacionar os materiais a todos os elementos e depois atribuir o tipo de elemento que compõe cada superfície da edificação. Portanto em um projeto grande, com superfícies mais complexas, seria bastante trabalhoso inserir tais informações novamente. Por outro lado, de acordo com o Guia para Avaliação de desempenho energético em Projetos BIM (ABDI, 2017), é importante lembrar que quanto maior a complexidade de um modelo geométrico, maior também é o risco de erros na tradução dessa geometria para uma ferramenta de análise de energia, e portanto, os elementos desnecessários devem ser minimizados.

Uma das principais considerações que devem ser feitas em relação ao que foi proposto é que a quantificação dos impactos ambientais estimados a partir do método

testado não poderá servir como base para comparar os impactos causado por duas edificações completamente diferentes. Não faz sentido comparar o consumo de energia e emissões de gás carbônico entre construções que estão localizadas em diferentes contextos climáticos, culturais, regionais e geográficos. Estas condições tem influência direta nos resultados. Portanto, o artefato desenvolvido é útil apenas para comparações de uma mesma edificação, variando suas as composições, layout arquitetônico, sistemas construtivos, estruturas e sistemas complementares, fatores estes que devem ser definidos durante o projeto.

Outro ponto de muita atenção necessário é que como muitos dados são estimados e extrapolados para o futuro na quantificação dos impactos nas fases de operação e pós-operação, seria preciso calibrar o modelo BIM e o modelo de simulação energética com informações reais da edificação uma vez que esta for construída. Uma ACVE realizada durante a fase de projeto pode auxiliar na tomada de decisões e comparar algumas alternativas de projeto, porém para saber o real impacto causado pela edificações seria necessário confirmar o modelo com o *as built* da edificação. Os padrões de consumo durante a operação da casa e informações referentes à desconstrução também precisariam ser atualizadas para a quantificação real dos impactos.

O método de ACVE proposto e testado neste trabalho foi desenvolvido com o intuito de ser replicável, porém é necessário que o mesmo seja aplicado por pessoas que tenham um mínimo de conhecimento sobre análises ambientais e Avaliação do Ciclo de Vida. Somente desta forma a análise dos resultados e interpretação pode ser realizada de forma sensata. A aplicação do método proposto também depende fortemente do conhecimento e domínio que o projetista ou consultor possui das ferramentas utilizadas, assim como depende das atualizações e disponibilidade dos software por parte de seus desenvolvedores no futuro. É importante compreender que com o aperfeiçoamento das ferramentas, assim como o desenvolvimento de novos software, os processos de análises ambientais durante o projeto podem se tornar cada vez mais práticos, simples e viáveis, e talvez os processos aqui prescritos precisem ser adaptados.

Além disso, a consistência dos resultados quantitativos da ACVE está diretamente relacionada ao rigor e veracidade das informações levantadas na etapa de análise do inventário, ou seja, depende da credibilidade do banco de dados utilizado como entrada. Neste sentido, dentre as diversas dificuldades em se aplicar o

método, seja devido à complexidade das duas principais ferramentas utilizadas, ou mesmo pela possível falta de domínio dos usuários na execução dos processos, acredita-se que o maior desafio na execução de uma ACVE consistente seja a avaliação do inventário e levantamento dos dados de entrada. É muito importante que a base de dados de impactos ambientais seja confiável e adequada à edificação em questão. Diversos países possuem bases de dados oficiais com índices médios de energia e CO_2 embutido nos materiais de construção, referentes à extração, fabricação e transporte dos mesmos. Uma vez que quantificar esses índices de cada fabricante e para cada material componente do edifício é um trabalho inviável, o usual em ACV de construções é utilizar base de dados com índices médios. Porém, no Brasil ainda não existe uma base de dados sólida e abrangente que reflita os impactos gerados por produções nacionais. Em uma situação ideal, cada fabricante deveria realizar sua própria declaração ambiental, realizando o levantamento destas informações. As declarações ambientais Tipo II ou Tipo III são previstas por norma, porém ainda não são compulsórias. Se houvesse uma EPD (*Environmental Product Declarations*) de cada produto previsto para ser utilizado no projeto, a realização da ACV se tornaria mais simplificada e consistente. Ligando isto à aplicação do BIM, torna possível o uso de "passaportes" ambientais, que são arquivos com informações de materiais e produtos que podem ser registrados em todo ciclo de vida. Todos esses processos estão fortemente relacionados aos conceitos de economia circular, que consiste em permitir que todo material, ao invés de ser descartado no final de seu ciclo de vida, possa retornar para o ciclo econômico na forma de um novo produto.

6.1 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS E POSSIBILIDADES UTILIZANDO OUTRAS FERRAMENTAS

Visto que existem diversos software com variadas tecnologias de projetos e análises ambientais disponíveis atualmente, as possibilidades de se complementar, aprimorar e aplicar o método proposto em análises de outra natureza podem ser inúmeras. Possivelmente outros software BIM de modelagem 3D permitam realizar a inserção de parâmetros e uso de fórmulas de forma semelhante ao método proposto. O Archicad, por exemplo, é um software de projeto bastante utilizado que inclusive já possui alguns parâmetros de emissão de CO_2, vinculados à uma base de dados própria e que possui grande potencial para aplicações parecidas. Da mesma forma, o

método também pode ser adaptado e testado utilizando outras ferramentas de simulação termo-energética. Por exemplo, o *Green Building Studio*, do mesmo desenvolvedor do Revit, que também permite transferência de dados do modelo. Uma sugestão interessante para novas pesquisas seria aplicar o mesmo método, usando os mesmo programas, ou semelhantes, porém adaptado aos procedimentos descritos no Guia 5 da Coletânea Guias BIM ABDI-MDIC. Tal guia prevê um zoneamento térmico do projeto, ou seja, uma separação dos ambientes condicionados e não-condicionados, agrupando os ambientes não condicionados para formar uma única zona térmica não-condicionada e agrupar os ambientes condicionados, quando possível (mesma orientação), em uma única zona térmica condicionada. Outras sugestões estão previstas neste guia para avaliação de desempenho energético em projetos BIM.

Imagina-se também que a ACVE como ferramenta de tomada de decisão dificilmente será utilizada sozinha. Normalmente ela estará atrelada a uma análise de custos, no mínimo, e também à avaliação de cronogramas, preferencias e exigências do clientes, entre outros fatores. Neste sentido, o método proposto permite que os processos sejam atrelados e adaptados, de forma superficial, para Analises de Custo de Ciclo de Vida, por exemplo. Se forem inseridos parâmetros, de forma semelhante ao que foi feito, e relacionados estes aos valores e preços dos materiais, custos necessários de transporte e custo de energia durante a operação, seria possível realizar uma análise de custo em paralelo à ACVE. Inclusive no próprio EnergyPlus também é possível entrar com dados de custos, o que torna este tipo de aplicação mais pertinente.

Uma vez que o método de ACVE desenvolvido não inclui os impactos gerados nas etapas de construção e desconstrução do edifício, seria extremamente significativo aprimorar alguns processos para incluir tais etapas na delimitação da ACVE. Isto poderia ser viável se houvesse uma forma de relacionar índices de consumo de energia e emissões junto com análises BIM 4D. O Navisworks, por exemplo, é um software BIM, também desenvolvido pela Autodesk, que permite simular e controlar processos e logísticas da obra de forma cronológica, incluindo o planejamento do uso de equipamentos e mão de obra. Outra possibilidade para detalhar melhor a emissão de CO_2 na ACVE seria utilizar a ferramenta do EnergyPlus que calcula a concentração de CO_2 nos ambientes em função da ocupação e emissões no uso de fluidos refrigerantes dos sistemas de climatização.

O OpenStudio, mesmo software utilizado para realizar a transferência de dados do Revit para o EnergyPlus, também permite configurar arquivos para simular iluminação natural e artificial dos ambientes, a partir do *Radiance.* A aplicação e teste de um método de ACVE que contemple além da simulação termo-energética, simulação luminotécnica, poderia ser objeto de estudos futuros.

O método de ACVE proposto ainda pode ser aprimorado e testado de diversas outras maneiras:

- Aplicando estudos de caso para comparar de fato dois ou mais sistemas construtivos ou aplicação de diferentes materiais.
- Desenvolvendo rotinas de programação em Python dentro do Revit para criar plug-ins que permitam a inserção automática dos dados de inventário a partir de bancos de dados prontos e ferramentas próprias de ACV, como SimaPro, Athena e outros.
- Desenvolvendo métodos para sistematizar e automatizar a saída de dados e leitura do resultados, como por exemplo: programar através do Dynamo (ferramenta de código aberto, desenvolvida para estender as funcionalidades do Autodesk Revit), um formato de arquivo de saída configurado para gerar gráficos e relatórios; ou então utilizar o próprio OpenStudio, que também possui o código aberto, para a mesma finalidade porém aplicado aos resultados da simulação no EnergyPlus.

REFERÊNCIAS

ABANDA, F. H.; BYERS, L. An investigation of the impact of building orientation on energy consumption in a domestic building using emerging BIM (Building Information Modelling). **Energy**, v. 97, p. 517–527, 2016.

AGÊNCIA BRASILEIRA DE DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL (ABDI). **Avaliação de desempenho energético em Projetos BIM: Coletânea Guias BIM ABDI-MDIC**. Brasilia, v. 5, 22 p., 2017.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Atlas de energia elétrica do Brasil**. Brasília, ed. 3, 2008.

AKINADE, O. O. et al. Waste minimisation through deconstruction: A BIM based Deconstructability Assessment Score (BIM-DAS). **Resources, Conservation and Recycling**, v. 105, p. 167–176, 2015.

ANĐELKOVIĆ, A. S.; MUJAN, I.; DAKIĆ, S. Experimental validation of a EnergyPlus model: Application of a multi-storey naturally ventilated double skin façade. **Energy and Buildings**, v. 118, p. 27–36, 2016.

ANTÓN, L. Á.; DÍAZ, J. Integration of Life Cycle Assessment in a BIM Environment. **Procedia Engineering**, v. 85, p. 26–32, 2014a

ANTÓN, L. Á.; DÍAZ, J. Integration of LCA and BIM for Sustainable Construction. **World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Social, Education, Economics and Management Engineering,** v. 8, n. 5, p. 1356–1360, 2014b.

ARAUJO, A. M. F.; TAVARES, S. F.; SCHEER, S. Análise do processo de exportação de modelo BIM desenvolvido no Revit para o EnergyPlus via Openstudio. In: Encontro Latino-Americano e Europeu sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis (Euro-ELECS). **Anais...**São Leopoldo: 2017. p. 1817-1827.

ARAUJO, A. M. F. DE; TAVARES, S. F. Building life cycle energy assessment on pre operation phase using BIM. In: Sustainable Urban Communities towards a Nearly Zero Impact Built Environment - SBE 16 Brazil & Portugal. **Anais...**Vitória: 2016. p. 519-528

ARAUJO, A. M. F. et al. Interoperabilidade de ferramentas BIM e avaliação do ciclo de vida de edificações. In: 1º Simpósio Brasileiro de Tecnologia da Informação e Comunicação na Construção - SBTIC e 10º Simpósio Brasileiro de Gestão e Economia da Construção - SIBRAGEC. **Anais**...Fortaleza: 2017. p. 251-259.

ARIYARATNE, C. I.; MONCASTER, A. M. Stand-alone Calculation Tools are not the Answer to Embodied Carbon Assessment. **Energy Procedia**, v. 62, p. 150–159, 2014.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS, INC. (ASHRAE). **Ashrae Handbook: Fundamentals, I-P Edition**. Atlanta: ASHRAE, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 12721:** Avaliação de custos unitários de construção para incorporação imobiliária e outras disposições para condomínios edilícios — Procedimentos. Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15220:** Desempenho térmico de edificações. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15575:** Desempenho de Edificações Habitacionais. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR ISO 14025:** Rótulos e declarações ambientais - Declarações ambientais de Tipo III - Princípios e procedimentos. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR ISO 14040:** Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida - Princípios e Estrutura. Rio de Janeiro, 2009.

ATHENA SUSTAINABLE MATERIALS INSTITUTE. Disponível em: <http://www.athenasmi.org>. Acesso em 30 de março de 2017.

AYRES FILHO, C. **Acesso ao Modelo Integrado do Edifício**. 149 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Departamento de Construção Civil, Universidade Federal Do Paraná, Curitiba, 2009.

BAGNO, R.; ARANTES, E. BIM no processo de orçamentação de um empreendimento residencial. In: XVI Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. **Anais...**Porto Alegre: ANTAC, 2016. p. 4661-4678.

BARBOSA, S. A.; TIBÚRCIO, T. M. S.; CARLO, J. C.; GUIMARÃES, I. B. B. Método de utilização do programa Energyplus para verificação de desempenho térmico de ambientes com fachadas duplas**. Ambiente Construído**, v. 13, n. 4, p. 121–134, 2013.

BARRETO, B. D. H. T. **Arquitetura temporária: proposição de módulo educacional temporário para instituições públicas do Brasil dedicados à educação de jovens e adultos no meio rural sob a ótica de minimização do gasto energético**. 149 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Departamento de Construção Civil, Universidade Federal Do Paraná, Curitiba, 2017.

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, 2013.

BATISTA, J. O.; LAMBERTS, R.; GÜTHS, S. Influências dos algoritmos de condução e convecção sobre os resultados de simulações do comportamento térmico de edificações. **Ambiente Construído**, v. 11, n. 4, p. 79–97, 2011.

BIM FORUM. **Level of Development Specification.** BIM Forum, 2016. Disponível em: <https://store.bimforum.org/ItemDetail?iProductCode=7804&Category=BIM_PRODS&WebsiteKey=696f03a9-ff18-4d68-b9bd-80f83a3158ab>.
Acesso em 22 de agosto de 2017.

BORGES, J. G.; CALDAS, L. R., PAULSE, P. C., HORA, K. E. R., CARVALHO, M. T. M. Uso do BIM no processo de quantificação de emissões de CO_2 no projeto de edificações : estudo de caso para o software designbuilder. **Revista Eletrônica de Engenharia Civil**. v. 14, p. 142–156, 2018.

BRITO, A. C.; SALES, E. M.; CASTRO, G. M.; AKUTSU, M. Análise da resposta do programa energy plus para simulação do comportamento térmico de recinto com materiais de mudança de fase. In: XIII Encontro Nacional e IX Encontro Latino-americano de Conforto no Ambiente Construído. **Anais...** Campinas, 2015.

BUENO, C. **Avaliação de desempenho ambiental de edificações habitacionais: Análise comparativa dos sistemas de certificação no contexto brasileiro**. 123 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

BUENO, C.; ROSSIGNOLO, J. A.; OMETTO, A. R. Life cycle assessment and the environmental certification systems of buildings. **Gestão & Tecnologia de Projetos**, v. 1, n. 8, p. 7, 2013.

BUENO, C.; FABRICIO, M. M. Aplicação da modelagem de informação da construção (BIM) para a realização de estudos de avaliação de ciclo de vida de edifícios. **Revista do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da FAUUSP**, v. 23, n. 40, p. 96–121, 30 nov. 2016.

CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO (CBIC). **Implementação BIM - Parte 1: Implementação do BIM para Construtoras e Incorporadoras**. Brasília, 2016.

CARLO, J. C., LAMBERTS, R. **Relatório Técnico LabEEE – 200504: Processamento de arquivos climáticos para simulação do desempenho energético de edificações.** Florianópolis, Universidade Federal de Santa Catarina. Eletrobrás/Procel, 2005.

CENTRO BRASILEIRO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES (CB3E). **Manual de simulação computacional de edifícios naturalmente ventilados no programa EnergyPlus**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2008.

COELHO, A.; BRITO, J. Environmental analysis of a construction and demolition waste recycling plant in Portugal – Part I: Energy consumption and CO2 emissions. **Waste Management**, v. 33, n. 5, p. 1258–1267, 2013.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE- CONAMA. Resolução nº 307, de 5 de julho de 2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. **DOU:** 136, Seção 1, páginas 95-96. 17 de julho de 2002.

Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/processos/18018FE8/PropResol_EMENDAS_ 2oGT. pdf>

DEPARTAMENTO INTERSINDICAL DE ESTATÍSTICA E ESTUDO SOCIOECONÔMICO (DIEESE). **Nota Técnica número 147:** Comportamento das tarifas de energia elétrica no Brasil. Brasilia, 2015.

DING, Z.; WANG, Y.; ZOU, P. X. W. An agent based environmental impact assessment of building demolition waste management: Conventional versus green management. **Journal of Cleaner Production**, v. 133, p. 1136–1153, 2016.

DRESCH, A., LACERDA, D. P., ANTUNES JÚNIOR, J. A. V.**Design science research: método de pesquisa para avanço da ciência e tecnologia.** Porto Alegre: Bookman, 2015.

DUPUIS, M., APRIL. A., LESAGE, P., FORGUES, D. Method to enable LCA analysis through each level of development of a BIM model. **Procedia Engineering**, v. 196, n. p. 857–863, 2017.

EASTMAN, C. et al. **BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors**. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2011. v. 2

ELETROBRAS; PROCEL; EQUIPE PROCEL EDIFICA; UFSCCA. **Manual para aplicação do RTQ-R**, 2012.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉRTICA (EPE). **Balanço energético nacional - BEN 2016**. Ministério de Minas e Energia (MME): Brasília, 2017. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/>. Acesso em: setembro de 2017.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉRTICA (EPE). **Demanda de Energia 2050: PNE 2050 - NOTA TÉCNICA DEA 13/15**. Ministério de Minas e Energia (MME): Rio de Janeiro, 2016. Disponível em:<http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Plano-Nacional-de-Energia-2050>. Acesso em: setembro de 2017.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉRTICA (EPE). **Plano decenal de expansão de energia 2023**. Ministério de Minas e Energia (MME): Rio de Janeiro, 2014. Disponível em:<http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Plano-Decenal- de-Expansao -de-Energia-2023>. Acesso em: setembro de 2016.

FISCHER, R. S. **Estratégias de adaptabilidade na habitação social : implicações no ciclo de vida energético do edifício.** 149 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Departamento de Construção Civil, Universidade Federal Do Paraná, Curitiba, 2017

GAYARRE, F. L.; PÉREZ, J. G.; PÉREZ, C. L.-C.; LÓPEZ, M. S.; MARTÍNEZ, A. L. Life cycle assessment for concrete kerbs manufactured with recycled aggregates. **Journal of Cleaner Production**, v. 113, p. 41–53, 2016.

GIBBONS, M.; LIMOGES, C.; NOWOTONY, H.; SCHWARTZMAN, S.; SCOTT, P.; TROW, M. **The new production of knowledge: the dynamics of science and research in conttemporary societes**. Londres: Sage, 1994

GOMES, K. S. A. **Validação da modelação de um edifício de habitação com o programa energyplus por comparação com medições "in situ"**. 100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Porto, Porto, 2010.

GRAF, H. F. **Transmitância Térmica & Energia Incorporada Na Arquitetura**. 2011. 158 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Departamento de Construção Civil, Universidade Federal Do Paraná, Curitiba, 2011.

GRANN, B. **A Building Information Model (BIM) based lifecycle assessment of a university hospital building built to passive house standards**. 112 p. Thesis (Master in Industrial Ecology). Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, 2012.

GRIGOLETTI, G. DE C.; FLORES, M. G.; SANTOS, J. C. P. DOS. **Tratamento de dados climáticos de Santa Maria, RS, para análise de desempenho térmico de edificações**. Ambiente Construído, v. 16, n. 1, p. 123–141, 2015.

HORNE, R.; GRANT, T.; VERGHESE K. **Life Cycle Assessment: Principles, Practice and Prospects.** Austrália: CSIR Publishing, 2009. **Journal of Cleaner Production** , v. 17, p. 1530, 2009. Book Review

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍTICAS (IBGE). **Pesquisa de orçamento familiares 2008-2009**. IBGE, 2010.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍTICAS (IBGE). **Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílio 2001-2011**. IBGE, 2012.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 14040. Environmental management - Life cycle assessment: Principles and** framework. Genebra, 2006. 20p.

INYIM, P.; RIVERA, J.; ZHU, Y. Integration of Building Information Modeling and Economic and Environmental Impact Analysis to Support Sustainable Building Design**. Journal of Management in Engineering**, v. 31, n. 1, 2015.

JRADE, A.; ABDULLA, R. Integrating Building Information Modeling and Life Cycle Assessment Tools To Design Sustainable Buildings. In: CIB W78 2012: 29th International Conference. **Anais...** Beirut, 2012.

JRADE, A.; JALAEI, F. Integrating building information modelling with sustainability to design building projects at the conceptual stage**. Building Simulation**, v. 6, n. 4, p. 429–444,. 2013.

KLOPFFER, W.; GRAH, B. **Life Cycle Assessment (LCA): A Guide to Best Pratice.** Germany: Wiley-VCH, 2014.

KRANTZ, J. et al. Assessing Embodied Energy and Greenhouse Gas Emissions in Infrastructure Projects. **Buildings**, v. 5, n. 4, p. 1156–1170, 2015.

KULAHCIOGLU, T.; DANG, J.; TOKLU, C. A 3D analyzer for BIM-enabled life cycle assessment of the whole process of construction. **HVAC & R Research**, v. 18, p. 283, 2012.

LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES. **Arquivos climáticos em formato TRY, SWERA, CSV e BIN**. Disponível em: <http://www.labeee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos/formato-try-swera-csv-bin>. Acesso em 22 de agosto de 2016.

LAMBERTS, R. et al. **Apostila: Desempenho térmico de edificações.** Florianópolis: Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (LABEEE UFSC), 2011.

LEE, K. O.; MEDINA, M. A.; SUN, X**.** Development and verification of an EnergyPlus-based algorithm to predict heat transfer through building walls integrated with phase change materials. **Journal of Building Physics**, v. 40, n. 1, p. 77–95, 2016.

LIMA, Â. M. F.; KIPERSTOK, A. Avaliação do ciclo de vida (ACV) no mundo e no Brasil. In: 24º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. **Anais**...Belo Horizonte, 2007

LOBO, F. H. R. **Inventário de emissão equivalente de dióxido de carbono e energia embutida na composição de serviços em obras públicas: estudo de caso no estado do Paraná**..139 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Departamento de Construção Civil, Universidade Federal Do Paraná, Curitiba,. 2010.

MACEDO, D. B. G. **Metodologia de avaliação do ciclo de vida de sistemas construtivos – aplicação em um sistema estruturado em aços**. 246 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

MACLEAMY P. **Collaboration, integrated information and the project lifecycle in building design, construction and operation**. CURT - WP-1202 ,2004

MARCOS, M. H. C. **Análise da emissão de CO_2 na fase pré-operacional da construção de habitações de interesse social através da utilização de uma ferramenta CAD-BIM**. 130 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Departamento de Construção Civil, Universidade Federal Do Paraná, Curitiba, 2009.

MARTINS, M. R. **Verificação computacional das recomendações da norma NBR 15.220 - parte 3/2005 para conforto térmico na cidade de Curitiba**. 102 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Departamento de Construção Civil, Universidade Federal Do Paraná, Curitiba, 2016.

MASS, B. H. **Resíduos de construção civil na obra de uma edificação e seus impactos: estudo de caso de uma residência em light steel framing e simulação de uma em alvenaria**. 141 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Departamento de Construção Civil, Universidade Federal Do Paraná, Curitiba, 2017.

MATOS, M. et al. Análise do desempenho térmico de edificações residenciais através de simulação computacional no energyplus baseada nos requisitos da norma NBR 15220. In: XI Encontro Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído. **Anais...** Florianópolis, 2006. p. 554–563

MAZZAFERRO, L. et al. **Manual de simulação computacional de edifícios naturalmente ventilados no programa EnergyPlus**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina e CB3E, 2013.
MCGRAW HILL CONSTRUCTION. **Green BIM: How Building Information Modeling is Contributing to Green Design and ConstructionIndianalolis:** Wiley Publishing, IN, 2010.

MELO, A. P.; SORGATO, M. J.; LAMBERTS, R. Building energy performance assessment: Comparison between ASHRAE standard 90.1 and Brazilian regulation. **Energy and Buildings**, v. 70, p. 372–383, 2014.

MENDES, M. R.; ARAMAKI, T.; HANAKI, K. Comparison of the environmental impact of incineration and landfilling in São Paulo City as determined by LCA. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 41, n. 1, p. 47–63, 2004.

MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO, INDÚSTRIA E COMÉRCIO EXTERIOR (MDIC), *et. al*. **Brasil maior - Agendas estratégicas setoriais**, Brasília; 2013.

MONICH, C. R. **Avaliação ambiental de uma habitação de interesse social pré-fabricada em madeira no sistema wood frame no estado do Paraná**. 126 p. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Departamento de Construção Civil, Universidade Federal Do Paraná, Curitiba, 2012.

MONTES, M. A. T. **Abordagem integrada no ciclo de vida de habitação de interesse social considerando mudanças climática.** 473 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

MOTTA, W. H. Análise do Ciclo de Vida: Os programas Brasileiros. In: X Congresso Nacional de Excelência em Gestão. **Anais**... Rio de Janeiro, 2014

NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY. Disponível em: <https://www.nist.gov>. Acesso em 30 de março de 2017.

OBA, M. M. **O projeto de readequação visando a construção mais sustentável no edifício moderno: Estudo de caso sobre o centro politécnico da UFPR**. 130 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Departamento de Construção Civil, Universidade Federal Do Paraná, Curitiba, 2014.

OLIVEIRA, A. S. **Análise ambiental da viabilidade de seleção de produtos da construção civil através da ACV e do software BEES 3.0**. 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

OLIVEIRA, E. **contribuição para análise do ciclo de vida no ambiente construído visando a energia e o CO_2 embutidos no sistema construtivo wood frame**.125 p. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Departamento de Construção Civil, Universidade Federal Do Paraná, Curitiba, 2016.

OLIVEIRA, L. DA S. et al. Importância da definição da temperatura do solo para o processo de simulação termoenergética de edificações. In: XIV Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído - ENTAC. **Anais...**Juiz de Fora: 2012. p. 2350-2358.

OPENLCA. Disponível em: <http://www.openlca.org>. Acesso em 30 de março de 2017.

ORDENES, M. et al. **Metodologia utilizada na elaboração da biblioteca de materiais e componentes construtivos brasileiros para simulações no VisualDOE-3.1**. Florianópolis: UFSC, p. 1–19, 2003.

PAINEL INTERGOVERNAMENTAL SOBRE MUDANÇAS CLIMÁTICAS (IPCC). **Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Energy**. Hayama: Institute for Global Environmental Strategies – IGES, v. 2, 2006.

PENG, C.; WU, X. Case Study of Carbon Emissions from a Building's Life Cycle Based on BIM and Ecotect. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2015, p. 1–15, 2015.

QUEIRÓZ, G.; SANTOS, J.; GRIGOLETTI, G. Estudo das exportações de modelos digitais produzidos no Autodesk Revit para simulações de edificações no Energy Plus. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 16., 2016, São paulo. **Anais...** Porto Alegre: 2016

SAADE, M. R. M.; SILVA, M. G.; GOMES, V. Methodological discussion and piloting of lca-based environmental indicators for product stage assessment of brazilian buildings. **Gestão e Tecnologia de Projetos**, v. 9, n. 1, p. 43–62, 2014.

SANCHES-PEREIRA, A.; TUDESCHINI, L. G.; COELHO, S. T. Evolution of the Brazilian residential carbon footprint based on direct energy consumption. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 54, p. 184–201, 2016.

SHABUNKO, V.; LIM, C. M.; MATHEW, S. EnergyPlus models for the benchmarking of residential buildings in Brunei Darussalam. **Energy and Buildings**, 2016.

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, mar. 2015.

SILVA, L. P. **Análise do ciclo de vida energético de habitações de interesse social**.184 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade Fedral do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

SILVA, A. S.; ALMEIDA, L. S. S.; GHISI, E. Decision-making process for improving thermal and energy performance of residential buildings: A case study of constructive systems in Brazil. **Energy and Buildings**, v. 128, p. 270–286, 2016.

SIMAPRO. Disponível em: <https://simapro.com>. Acesso em 30 de março de 2017.

SORGATO, M. J.; MELO, A. P.; LAMBERTS, R**. Análise do método de simulação de desempenho térmico da norma NBR 15.575**. Paranoá: Cadernos de Arquitetura e Urbanismo, n. 12, p. 13–21, 2014.

SOUST-VERDAGUER, B.; LLATAS, C.; GARCÍA-MARTÍNEZ, A. Critical review of bim-based LCA method to buildings. **Energy and Buildings**, v. 136, p. 110–120, 2017.

SU, X.; ZHANG, X. A detailed analysis of the embodied energy and carbon emissions of steel-construction residential buildings in China. **Energy and Buildings**, v. 119, p. 323–330, 2016.

SUZER, O. A comparative review of environmental concern prioritization: LEED vs other major certification systems. **Journal of Environmental Management**, v. 154, p. 266–283, 2015.

TABARES-VELASCO, P. C.; CHRISTENSEN, C.; BIANCHI, M. Verification and validation of EnergyPlus phase change material model for opaque wall assemblies. **Building and Environment**, v. 54, p. 186–196, 2012.

TALLY. Disponível em: <http://choosetally.com>. Acesso em 30 de março de 2017.

TAM, V. W. Y.; TAM, C. M. Evaluations of existing waste recycling methods: A Hong Kong study. **Building and Environment**, v. 41, n. 12, p. 1649–1660, 2006.

TAVARES, S. F. **Metodologia de análise do ciclo de vida energético de edificações residenciais brasileiras**. 225 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

TAVARES, S. F.; BRAGANÇA, L. Índices de CO2 para materiais de construção em edificações brasileiras. In: Sustainable Urban Communities towards a Nearly Zero Impact Built Environment - SBE 16 Brazil & Portugal **Anais...**Vitória: 2016. p. 927-936.

THINKSTEP GABI. Disponível em: <http://www.gabi-software.com>. Acesso em 30 de março de 2017.

WEISSENBERGE, M.; JENSCH, W.; LANG, W. The convergence of life cycle assessment and nearly zero-energy buildings: The case of Germany. **Energy and Buildings**, v. 76, p. 551–557, 2014.

YANG, J.; FU, H.; QIN, M. Evaluation of different thermal models in energyplus for calculating moisture effects on building energy consumption in different climate conditions. **Procedia Engineering**, v. 121, p. 1635–1641, 2015.

YUNG, P.; WANG, X. A 6D CAD model for the automatic assessment of building sustainability**. International Journal of Advanced Robotic Systems**, v. 11, n. 1, 2014.

ZHANG, R.; LAM K. P.; YAO, S.; ZHANG, Y. Coupled EnergyPlus and computational fluid dynamics simulation for natural ventilation. **Building and Environment**, v. 68, p. 100–113, 2013.

17	0.0741	0	0.00162	50	0.0741	2.43	0.9	Sim	Sim	Não	2125.44	1997.91	275.46	733.23	202.19	407.45	20.41	149
24	0.0741	0	0.00162	50	0.0741	2.43	0.9	Sim	Sim	Não	178.01	274.14	23.07	99.05	16.67	43.15	1.71	15.5
24	0.0741	0	0.00162	50	0.0741	2.43	0.9	Sim	Sim	Não	178.01	274.14	23.07	99.05	16.67	43.15	1.71	15.5
24	0.0741	0	0.00162	50	0.0741	2.43	0.9	Sim	Sim	Não	178.01	274.14	23.07	99.05	16.67	43.15	1.71	15.5
24	0.0741	0	0.00162	50	0.0741	2.43	0.9	Sim	Sim	Não	178.01	274.14	23.07	99.05	16.67	43.15	1.71	15.5
24	0.0741	0	0.00162	50	0.0741	2.43	0.9	Sim	Sim	Não	178.01	274.14	23.07	99.05	16.67	43.15	1.71	15.5
24	0.0741	0	0.00162	50	0.0741	2.43	0.9	Sim	Sim	Não	178.01	274.14	23.07	99.05	16.67	43.15	1.71	15.5
24	0.0741	0	0.00162	50	0.0741	2.43	0.9	Sim	Sim	Não	178.01	274.14	23.07	99.05	16.67	43.15	1.71	15.5
24	0.0741	0	0.00162	50	0.0741	2.43	0.9	Sim	Sim	Não	178.01	274.14	23.07	99.05	16.67	43.15	1.71	15.5
24	0.0741	0	0.00162	50	0.0741	2.43	0.9	Sim	Sim	Não	178.01	274.14	23.07	99.05	16.67	43.15	1.71	15.5
24	0.0741	0	0.00162	50	0.0741	2.43	0.9	Sim	Sim	Não	178.01	274.14	23.07	99.05	16.67	43.15	1.71	15.5
24	0.0741	0	0.00162	50	0.0741	2.43	0.9	Sim	Sim	Não	114.44	176.23	14.83	63.67	10.72	27.74	1.1	10.0
24	0.0741	0	0.00162	50	0.0741	2.43	0.9	Sim	Sim	Não	114.44	176.23	14.83	63.67	10.72	27.74	1.1	10.0
24	0.0741	0	0.00162	50	0.0741	2.43	0.9	Sim	Sim	Não	114.44	176.23	14.83	63.67	10.72	27.74	1.1	10.0
24	0.0741	0	0.00162	50	0.0741	2.43	0.9	Sim	Sim	Não	114.44	176.23	14.83	63.67	10.72	27.74	1.1	10.0
24	0.0741	0	0.00162	50	0.0741	2.43	0.9	Sim	Sim	Não	688.32	1060.01	89.21	382.98	64.46	166.85	6.61	60.2
24	0.0741	0	0.00162	50	0.0741	2.43	0.9	Sim	Sim	Não	678.14	1044.34	87.89	377.32	63.51	164.38	6.51	59.3
24	0.0741	0	0.00162	50	0.0741	2.43	0.9	Sim	Sim	Não	688.32	1060.01	89.21	382.98	64.46	166.85	6.61	60.2
24	0.0741	0	0.00162	50	0.0741	2.43	0.9	Sim	Sim	Não	565.49	870.86	73.29	314.64	52.96	137.08	5.43	49.5
24	0.0741	0	0.00162	50	0.0741	2.43	0.9	Sim	Sim	Não	555.32	855.19	71.97	308.98	52.01	134.61	5.33	48.6
24	0.0741	0	0.00162	50	0.0741	2.43	0.9	Sim	Sim	Não	575.66	886.52	74.61	320.3	53.91	139.54	5.53	50.4
24	0.0741	0	0.00162	50	0.0741	2.43	0.9	Sim	Sim	Não	555.32	855.19	71.97	308.98	52.01	134.61	5.33	48.6
24	0.0741	0	0.00162	50	0.0741	2.43	0.9	Sim	Sim	Não	576.42	887.69	74.7	320.72	53.98	139.72	5.54	50.4
24	0.0741	0	0.00162	50	0.0741	2.43	0.9	Sim	Sim	Não	185.05	284.97	23.98	102.96	17.33	44.86	1.78	16.2
24	0.0741	0	0.00162	50	0.0741	2.43	0.9	Sim	Sim	Não	370.44	570.47	48.01	206.11	34.69	89.79	3.56	32.4
24	0.0741	0	0.00162	50	0.0741	2.43	0.9	Sim	Sim	Não	372.22	573.22	48.24	207.1	34.86	90.23	3.57	32.6
24	0.0741	0	0.00162	50	0.0741	2.43	0.9	Sim	Sim	Não	94.85	146.06	12.29	52.77	8.88	22.99	0.91	8.31
24	0.0741	0	0.00162	50	0.0741	2.43	0.9	Sim	Sim	Não	372.22	573.22	48.24	207.1	34.86	90.23	3.57	32.6
24	0.0741	0	0.00162	50	0.0741	2.43	0.9	Sim	Sim	Não	108.5	167.09	14.06	60.37	10.16	26.3	1.04	9.5
24	0.0741	0	0.00162	50	0.0741	2.43	0.9	Sim	Sim	Não	111.6	171.87	14.46	62.1	10.45	27.05	1.07	9.7
24	0.0741	0	0.00162	50	0.0741	2.43	0.9	Sim	Sim	Não	161.82	249.21	20.97	90.04	15.15	39.23	1.55	14.1
24	0.0741	0	0.00162	50	0.0741	2.43	0.9	Sim	Sim	Não	203.44	313.3	26.37	113.2	19.05	49.31	1.95	17.8
24	0.0741	0	0.00162	50	0.0741	2.43	0.9	Sim	Sim	Não	233.79	360.04	30.3	130.08	21.89	56.67	2.25	20.4
24	0.0741	0	0.00162	50	0.0741	2.43	0.9	Sim	Sim	Não	158.48	244.06	20.54	88.18	14.84	38.42	1.52	13.8
24	0.0741	0	0.00162	50	0.0741	2.43	0.9	Sim	Sim	Não	158.48	244.06	20.54	88.18	14.84	38.42	1.52	13.8
24	0.0741	0	0.00162	50	0.0741	2.43	0.9	Sim	Sim	Não	213.45	328.71	27.66	118.76	19.99	51.74	2.05	18.6
17	0.0741	0	0.00162	50	0.741	2.43	0.9	Sim	Sim	Não	347.77	326.9	323.29	119.97	237.29	66.67	23.96	24.4
17	0.0741	0	0.00162	50	0.741	2.43	0.9	Sim	Sim	Não	347.77	326.9	323.29	119.97	237.29	66.67	23.96	24.4
17	0.0741	0	0.00162	50	0.741	2.43	0.9	Sim	Sim	Não	347.77	326.9	323.29	119.97	237.29	66.67	23.96	24.4
17	0.0741	0	0.00162	50	0.741	2.43	0.9	Sim	Sim	Não	347.77	326.9	323.29	119.97	237.29	66.67	23.96	24.4
17	0.0741	0	0.00162	50	0.741	2.43	0.9	Sim	Sim	Não	347.77	326.9	323.29	119.97	237.29	66.67	23.96	24.4
17	0.0741	0	0.00162	50	0.741	2.43	0.9	Sim	Sim	Não	347.77	326.9	323.29	119.97	237.29	66.67	23.96	24.4
17	0.0741	0	0.00162	50	0.741	2.43	0.9	Sim	Sim	Não	347.77	326.9	323.29	119.97	237.29	66.67	23.96	24.4
17	0.0741	0	0.00162	50	0.741	2.43	0.9	Sim	Sim	Não	347.77	326.9	323.29	119.97	237.29	66.67	23.96	24.4

	0.0741	6	0.00162	50	0.0741	2.43	0.9	Sim	Sim	Não	13.13	853.62	1.7	128.04	0.51	46.88	0.13	7.03
	0.0741	0	0.00162	50	0.0741	2.43	0.9	Sim	Sim	Não	976.78	2832.67	126.59	424.9	37.98	166.05	9.38	24.9
	0.0741	0	0.00162	50	0.0741	2.43	0.9	Sim	Sim	Não	99.29	99.29	12.87	20.85	5.4	21.84	0.95	4.59
2	0.0741	0	0.00162	50	0.0741	2.43	0.9	Sim	Sim	Não	179.77	233.71	23.3	39.73	7.92	45.3	1.73	7.7
9	0.0741	0	0.00162	50	0.0741	2.43	0.9	Sim	Sim	Não	179.77	251.68	23.3	47.82	8.85	46.56	1.73	8.85
3	0.0741	0	0.00162	50	0.0741	2.43	0.9	Sim	Sim	Não	119.69	143.63	15.51	24.42	5.27	27.89	1.15	4.74
	0.0741	6	0.00162	50	0.0741	2.43	0.9	Sim	Sim	Não	17.12	1112.6	2.22	166.89	0.67	61.11	0.16	9.17
	0.0741	0	0.00162	50	0.0741	2.43	0.9	Sim	Sim	Não	1478.8	4288.53	191.65	643.28	57.5	251.4	14.2	37.7
	0.0741	0	0.00162	50	0.0741	2.43	0.9	Sim	Sim	Não	150.32	150.32	19.48	31.57	8.18	33.07	1.44	6.94
2	0.0741	0	0.00162	50	0.0741	2.43	0.9	Sim	Sim	Não	272.17	353.82	35.27	60.15	11.99	68.59	2.61	11.6
9	0.0741	0	0.00162	50	0.0741	2.43	0.9	Sim	Sim	Não	272.17	381.04	35.27	72.4	13.4	70.49	2.61	13.3
3	0.0741	0	0.00162	50	0.0741	2.43	0.9	Sim	Sim	Não	181.21	217.45	23.49	36.97	7.98	42.22	1.74	7.18
	0.0741	6	0.00162	50	0.0741	2.43	0.9	Sim	Sim	Não	25.91	1684.43	3.36	252.66	1.01	92.51	0.25	13.8
	0.0741	0	0.00162	50	0.0741	2.43	0.9	Sim	Sim	Não	1122.23	3254.47	145.44	488.17	43.63	190.78	10.78	28.6
	0.0741	0	0.00162	50	0.0741	2.43	0.9	Sim	Sim	Não	114.08	114.08	14.78	23.96	6.21	25.1	1.1	5.27
2	0.0741	0	0.00162	50	0.0741	2.43	0.9	Sim	Sim	Não	206.54	268.51	26.77	45.65	9.1	52.05	1.98	8.85
9	0.0741	0	0.00162	50	0.0741	2.43	0.9	Sim	Sim	Não	206.54	289.16	26.77	54.94	10.17	53.49	1.98	10.1
3	0.0741	0	0.00162	50	0.0741	2.43	0.9	Sim	Sim	Não	137.52	165.02	17.82	28.05	6.06	32.04	1.32	5.45
	0.0741	6	0.00162	50	0.0741	2.43	0.9	Sim	Sim	Não	19.67	1278.27	2.55	191.74	0.76	70.21	0.19	10.5
	0.0741	0	0.00162	50	0.0741	2.43	0.9	Sim	Sim	Não	741.79	2151.2	96.14	322.68	28.84	126.11	7.12	18.9
	0.0741	0	0.00162	50	0.0741	2.43	0.9	Sim	Sim	Não	75.4	75.4	9.77	15.83	4.1	16.59	0.72	3.48
2	0.0741	0	0.00162	50	0.0741	2.43	0.9	Sim	Sim	Não	136.53	177.48	17.69	30.17	6.02	34.4	1.31	5.85
9	0.0741	0	0.00162	50	0.0741	2.43	0.9	Sim	Sim	Não	136.53	191.14	17.69	36.32	6.72	35.36	1.31	6.72
3	0.0741	0	0.00162	50	0.0741	2.43	0.9	Sim	Sim	Não	90.9	109.08	11.78	18.54	4.01	21.18	0.87	3.6
	0.0741	6	0.00162	50	0.0741	2.43	0.9	Sim	Sim	Não	13	844.94	1.68	126.74	0.51	46.41	0.12	6.96
	0.0741	0	0.00162	50	0.0741	2.43	0.9	Sim	Sim	Não	747.71	2168.37	96.9	325.26	29.07	127.11	7.18	19.0
	0.0741	0	0.00162	50	0.0741	2.43	0.9	Sim	Sim	Não	76.01	76.01	9.85	15.96	4.14	16.72	0.73	3.51
2	0.0741	0	0.00162	50	0.0741	2.43	0.9	Sim	Sim	Não	137.62	178.9	17.83	30.41	6.06	34.68	1.32	5.9
9	0.0741	0	0.00162	50	0.0741	2.43	0.9	Sim	Sim	Não	137.62	192.66	17.83	36.61	6.78	35.64	1.32	6.77
3	0.0741	0	0.00162	50	0.0741	2.43	0.9	Sim	Sim	Não	45.81	54.97	5.94	9.35	2.02	10.67	0.44	1.81
	0.0741	6	0.00162	50	0.0741	2.43	0.9	Sim	Sim	Não	6.55	425.84	0.85	63.88	0.25	23.39	0.06	3.51
1	0.0741	1	0.00162	50	0.0741	2.43	0.9	Sim	Sim	Não	46.52	74.44	6.03	14.14	2.29	15.86	0.45	3.01
	0.0741	1	0.00162	50	0.0741	2.43	0.9	Sim	Sim	Não	11.87	73.58	1.54	11.04	0.46	3.44	0.11	0.52
	0.0741	0	0.00162	50	0.0741	2.43	0.9	Sim	Sim	Não	850.5	2466.45	110.22	369.97	33.07	144.59	8.17	21.6
	0.0741	0	0.00162	50	0.0741	2.43	0.9	Sim	Sim	Não	86.45	86.45	11.2	18.16	4.71	19.02	0.83	3.99
2	0.0741	0	0.00162	50	0.0741	2.43	0.9	Sim	Sim	Não	156.53	203.49	20.29	34.59	6.9	39.45	1.5	6.71
9	0.0741	0	0.00162	50	0.0741	2.43	0.9	Sim	Sim	Não	156.53	219.15	20.29	41.64	7.71	40.54	1.5	7.7

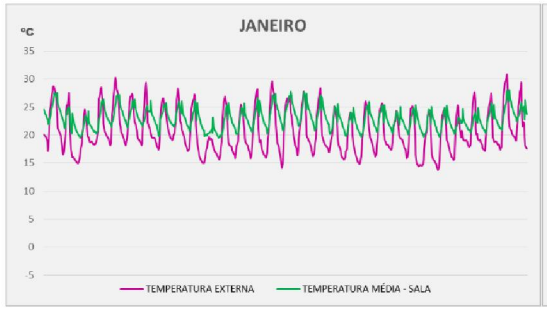
0.259	0.0741	0	0.00162	50	0.0741	2.43	0.9	Sim	Sim	Não	87.47	122.46	11.34	23.27	4.31	22.66	0.84
0.233	0.0741	0	0.00162	50	0.0741	2.43	0.9	Sim	Sim	Não	43.68	52.42	5.66	8.91	1.92	10.18	0.42
3.57	0.0741	6	0.00162	50	0.0741	2.43	0.9	Sim	Sim	Não	6.25	406.02	0.81	60.9	0.24	22.3	0.06
0.341	0.0741	1	0.00162	50	0.0741	2.43	0.9	Sim	Sim	Não	53.23	85.17	6.9	16.18	2.62	18.15	0.51
0.29	0.0741	1	0.00162	50	0.0741	2.43	0.9	Sim	Sim	Não	113.16	701.59	14.67	105.24	4.4	32.82	1.09
0.17	0.0741	0	0.00162	50	0.0741	2.43	0.9	Sim	Sim	Não	601.04	1743.01	77.89	261.45	23.37	102.18	5.77
0.22	0.0741	0	0.00162	50	0.0741	2.43	0.9	Sim	Sim	Não	61.1	61.1	7.92	12.83	3.33	13.44	0.59
0.252	0.0741	0	0.00162	50	0.0741	2.43	0.9	Sim	Sim	Não	73.73	95.85	9.56	16.29	3.25	18.58	0.71
0.259	0.0741	0	0.00162	50	0.0741	2.43	0.9	Sim	Sim	Não	73.76	103.27	9.56	19.62	3.63	19.1	0.71
0.233	0.0741	0	0.00162	50	0.0741	2.43	0.9	Sim	Sim	Não	36.82	44.18	4.77	7.51	1.62	8.58	0.35
3.57	0.0741	6	0.00162	50	0.0741	2.43	0.9	Sim	Sim	Não	5.26	342.22	0.68	51.33	0.2	18.8	0.05
0.341	0.0741	1	0.00162	50	0.0741	2.43	0.9	Sim	Sim	Não	44.89	71.82	5.82	13.65	2.21	15.31	0.43
0.29	0.0741	1	0.00162	50	0.0741	2.43	0.9	Sim	Sim	Não	95.43	591.65	12.37	88.75	3.71	27.67	0.92
0.17	0.0741	0	0.00162	50	0.0741	2.43	0.9	Sim	Sim	Não	873.09	2531.96	113.15	379.79	33.95	148.43	8.38
0.22	0.0741	0	0.00162	50	0.0741	2.43	0.9	Sim	Sim	Não	88.75	88.75	11.5	18.64	4.83	19.53	0.85
0.252	0.0741	0	0.00162	50	0.0741	2.43	0.9	Sim	Sim	Não	107.13	139.26	13.88	23.67	4.72	27	1.03
0.259	0.0741	0	0.00162	50	0.0741	2.43	0.9	Sim	Sim	Não	107.13	149.98	13.88	28.5	5.28	27.75	1.03
0.233	0.0741	0	0.00162	50	0.0741	2.43	0.9	Sim	Sim	Não	53.49	64.19	6.93	10.91	2.36	12.46	0.51
3.57	0.0741	6	0.00162	50	0.0741	2.43	0.9	Sim	Sim	Não	7.65	497.25	0.99	74.59	0.3	27.31	0.07
0.341	0.0741	1	0.00162	50	0.0741	2.43	0.9	Sim	Sim	Não	65.19	104.31	8.45	19.82	3.21	22.23	0.63
0.29	0.0741	1	0.00162	50	0.0741	2.43	0.9	Sim	Sim	Não	138.59	859.23	17.96	128.88	5.39	40.19	1.33
0.17	0.0741	0	0.00162	50	0.0741	2.43	0.9	Sim	Sim	Não	601.04	1743.01	77.89	261.45	23.37	102.18	5.77
0.22	0.0741	0	0.00162	50	0.0741	2.43	0.9	Sim	Sim	Não	61.1	61.1	7.92	12.83	3.33	13.44	0.59
0.252	0.0741	0	0.00162	50	0.0741	2.43	0.9	Sim	Sim	Não	73.73	95.85	9.56	16.29	3.25	18.58	0.71
0.259	0.0741	0	0.00162	50	0.0741	2.43	0.9	Sim	Sim	Não	73.76	103.27	9.56	19.62	3.63	19.1	0.71
0.233	0.0741	0	0.00162	50	0.0741	2.43	0.9	Sim	Sim	Não	36.82	44.18	4.77	7.51	1.62	8.58	0.35

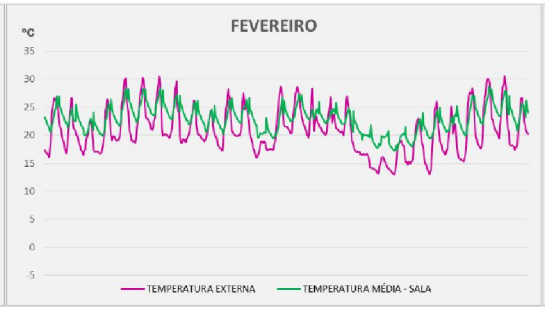
	0.0741	1	0.00162	50	0.0741	2.43	0.9	Sim	Sim	Não	168.38	841.9	21.82	336.76	17.46	48.83	1.62	19.5
	0.0741	0	0.00162	50	0.0741	2.43	0.9	Sim	Não	Não	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0.0741	1	0.00162	50	0.0741	2.43	0.9	Sim	Sim	Não	144.74	202.64	18.76	40.53	7.5	35.46	1.39	7.09
	0.0741	1	0.00162	50	0.0741	2.43	0.9	Sim	Sim	Não	341.22	1706.09	44.22	682.44	35.38	98.95	3.28	39.5
	0.0741	0	0.00162	50	0.0741	2.43	0.9	Sim	Não	Não	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0.0741	0	0.00162	50	0.0741	2.43	0.9	Sim	Sim	Não	9365.24	8500.83	1213.73	1032.85	294.94	1676.38	89.94	203
9	0.0741	0	0.00162	50	0.0741	2.43	0.9	Sim	Sim	Não	906.6	822.92	117.49	99.98	28.55	162.28	8.71	19.7
4	0.0741	0	0.00162	50	0.0741	2.43	0.9	Sim	Sim	Não	9376.73	9376.73	1215.22	1031.44	267.35	1631.55	90.05	179
	0.0741	1	0.00162	50	0.0741	2.43	0.9	Sim	Sim	Não	0.43	41.23	0.06	0	0	1.12	0	0
	0.0741	1	0.00162	50	0.0741	2.43	0.9	Sim	Sim	Não	6.5	617.59	0.84	0	0	16.77	0.06	0
	0.0741	1	0.00162	50	0.0741	2.43	0.9	Sim	Sim	Não	0.08	6.35	0.01	0	0	0.2	0	0
	0.0741	1	0.00162	50	0.0741	2.43	0.9	Sim	Sim	Não	968.36	5810.16	125.5	2033.55	87.85	697.22	9.3	244
												254608.57	15231.89	45391.77	8513.35	28412.88	1128.64	6

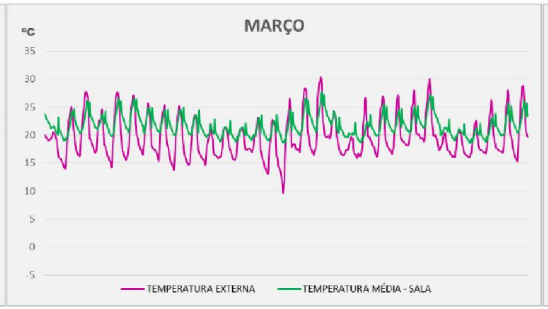
Tabela de montante (Parametros + Fórumlas)

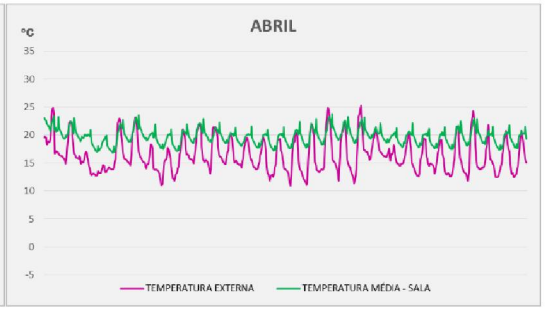
2 Mat g /Kg)	CO2 Transp (Kg/MJ)	Reposição (número)	Energ. Transp. Resíduos (MJ/Kg/Km)	Dist. Deposição (Km)	CO2 Transp resíduos (Kg/MJ)	Energ. Aterro (MJ/Kg)	CO2 Aterro (Kg/Kg)	Separável	Reutilizável/Reciclável	Perigoso	Massa (kg)	EE Materiais (MJ)	EE Trasporte (MJ)	EE Desp (MJ)	EE Transp Desp (MJ)	CO2 Mat (Kg)	CO2 Transp (Kg)	CO
	0.0741	1	0.00162	50	0.0741	0.74	0.6	sim	não		116.352	407.232	15.079219	61.0848	4.5237658	12.79872	1.11737	1.9
	0.0741	1	0.00162	50	0.0741	0.74	0.6	sim	não		993.6	3477.6	128.77056	521.64	38.631168	109.296	9.5419	16.3
	0.0741	1	0.00162	50	0.0741	0.74	0.6	sim	não		1144.8	4006.8	148.36608	601.02	44.509824	125.928	10.9939	18.8
	0.0741	1	0.00162	50	0.0741	0.74	0.6	sim	não		180	630	23.328	94.5	6.9984	19.8	1.7286	2.9
	0.0741	1	0.00162	50	0.0741	0.74	0.6	sim	não		316.8	1108.8	41.05728	166.32	12.317184	34.848	3.04234	5.2
	0.0741	1	0.00162	50	0.0741	0.74	0.6	sim	não		180	630	23.328	94.5	6.9984	19.8	1.7286	2.9
	0.0741	1	0.00162	50	0.0741	0.74	0.6	sim	não		43.2	151.2	5.59872	22.68	1.679616	4.752	0.41487	0.7
												10411.63	385.53	1561.74	115.66	327.22	28.57	

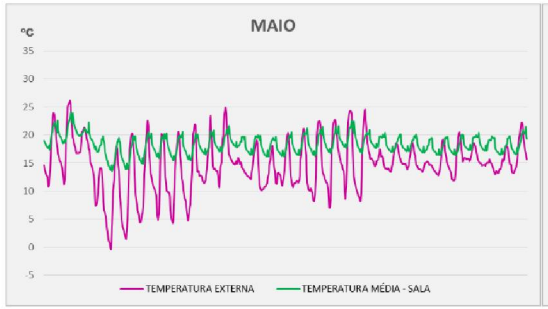
APÊNDICE B – RESULTADOS DAS TEMPERATURAS MENSAIS SIMULADAS PARA CADA AMBIENTE

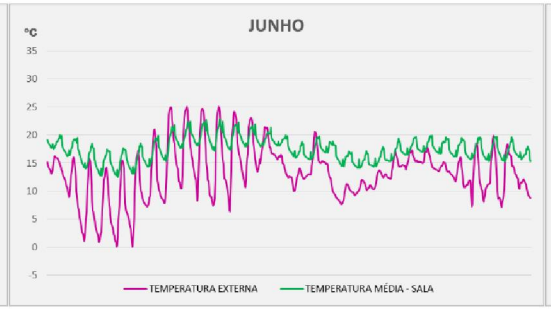


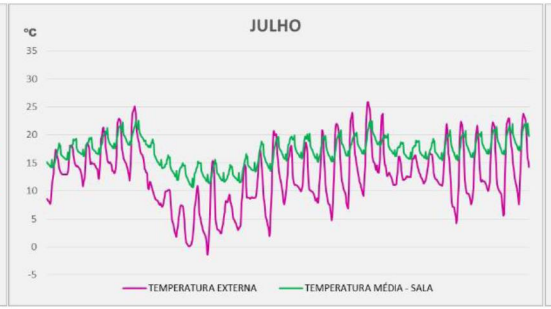


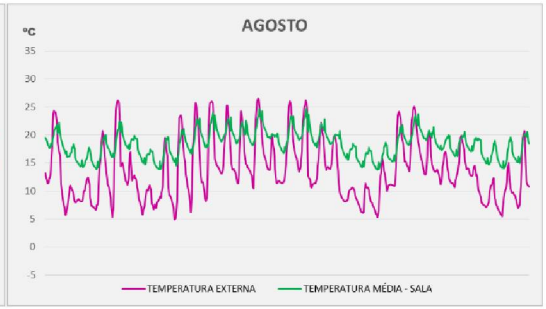


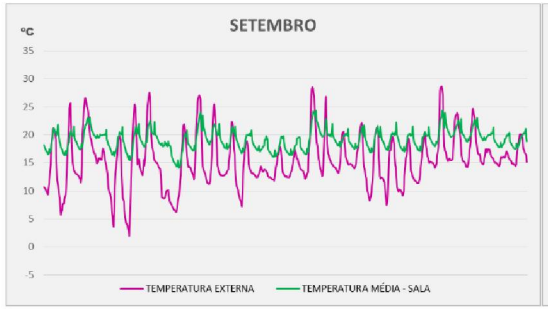


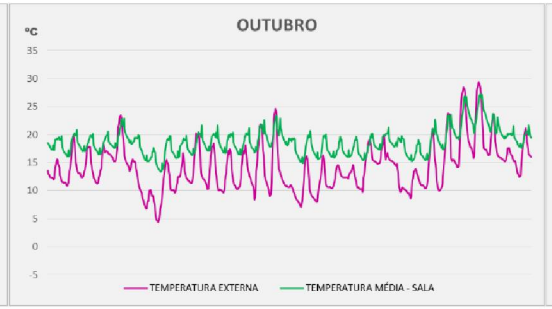


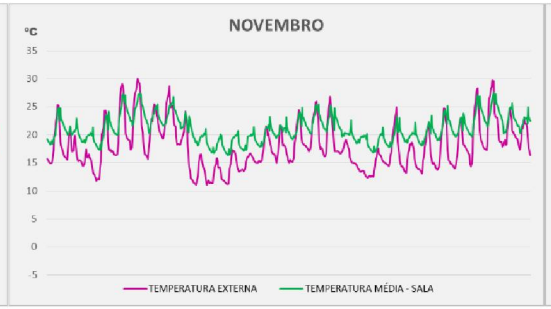


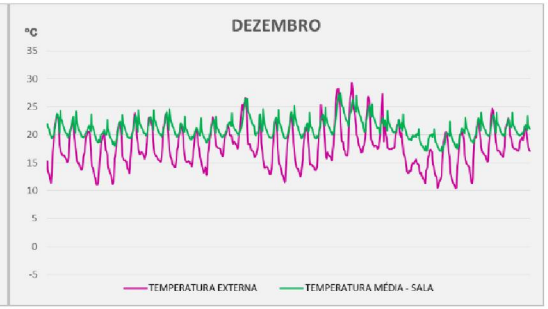


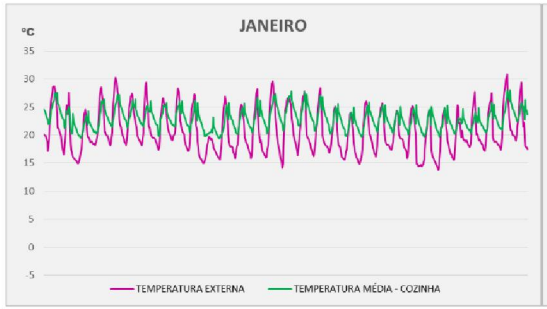


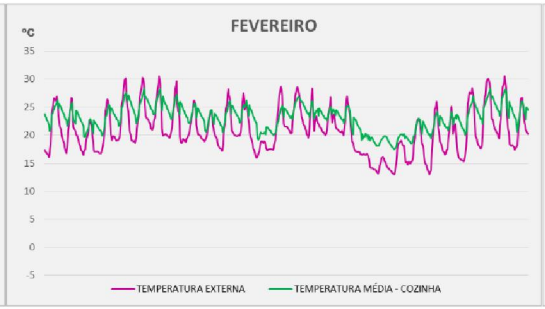


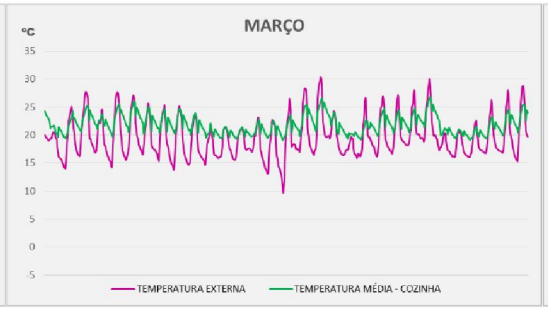


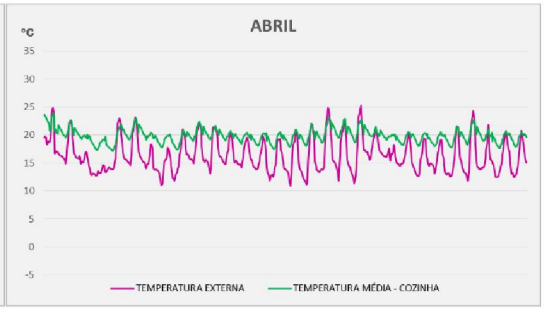


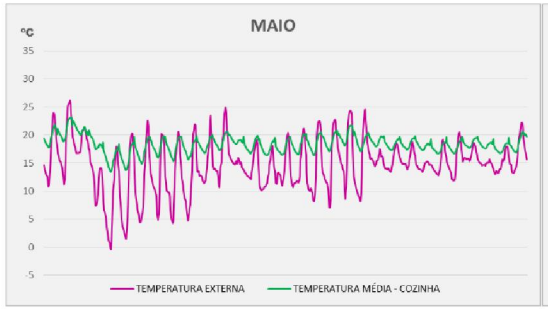


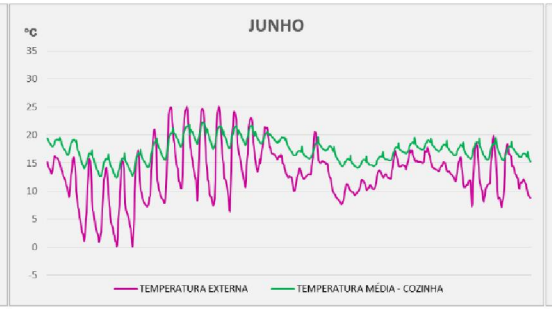

JANEIRO
°C
35
30
25
20
15
10
5
0
-5
TEMPERATURA EXTERNA
TEMPERATURA MÉDIA - COZINHA

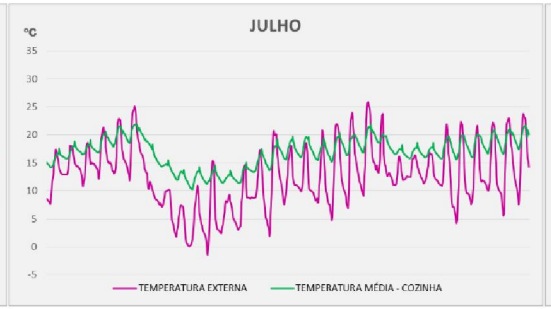

FEVEREIRO
°C
35
30
25
20
15
10
5
0
-5
TEMPERATURA EXTERNA
TEMPERATURA MÉDIA - COZINHA

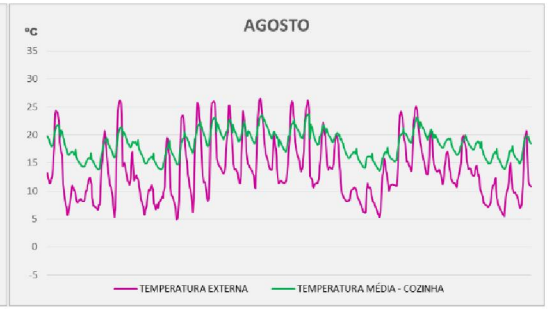

MARÇO
°C
35
30
25
20
15
10
5
0
-5
TEMPERATURA EXTERNA
TEMPERATURA MÉDIA - COZINHA

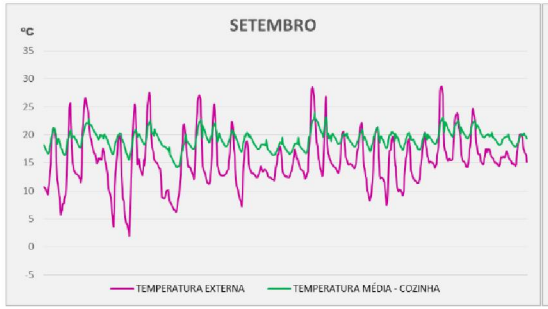

ABRIL
°C
35
30
25
20
15
10
5
0
-5
TEMPERATURA EXTERNA
TEMPERATURA MÉDIA - COZINHA

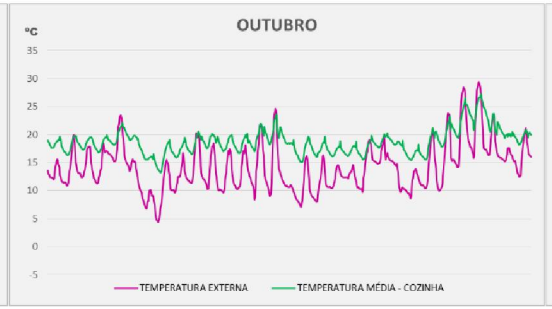

MAIO
°C
35
30
25
20
15
10
5
0
-5
TEMPERATURA EXTERNA
TEMPERATURA MÉDIA - COZINHA

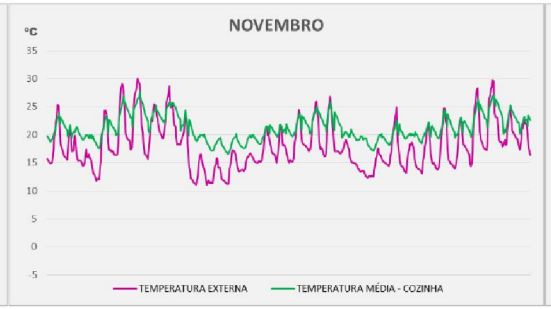

JUNHO
°C
35
30
25
20
15
10
5
0
-5
TEMPERATURA EXTERNA
TEMPERATURA MÉDIA - COZINHA

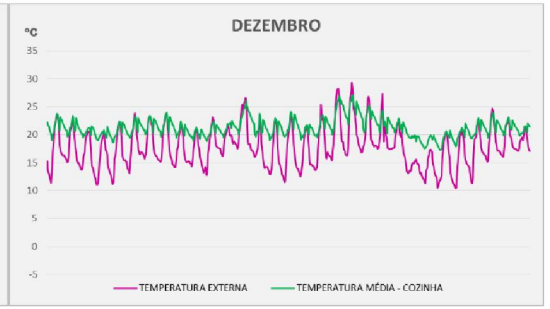

JULHO
°C
35
30
25
20
15
10
5
0
-5
TEMPERATURA EXTERNA
TEMPERATURA MÉDIA - COZINHA

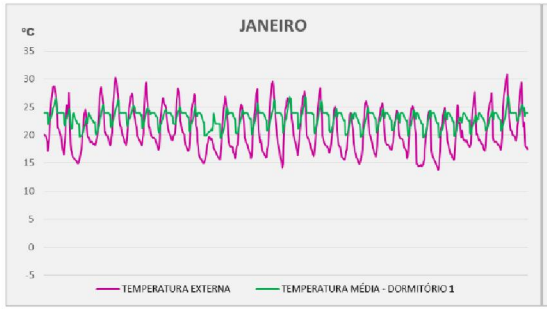

AGOSTO
°C
35
30
25
20
15
10
5
0
-5
TEMPERATURA EXTERNA
TEMPERATURA MÉDIA - COZINHA

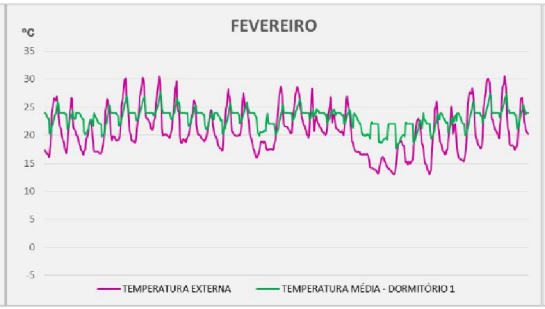

SETEMBRO
°C
35
30
25
20
15
10
5
0
-5
TEMPERATURA EXTERNA
TEMPERATURA MÉDIA - COZINHA

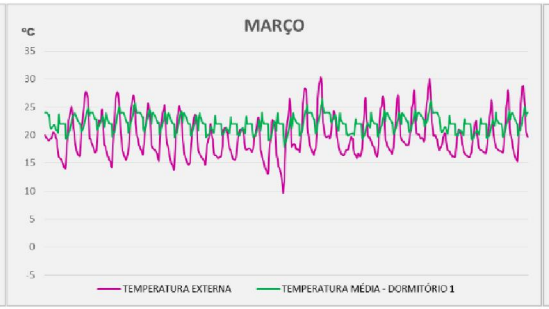

OUTUBRO
°C
35
30
25
20
15
10
5
0
-5
TEMPERATURA EXTERNA
TEMPERATURA MÉDIA - COZINHA

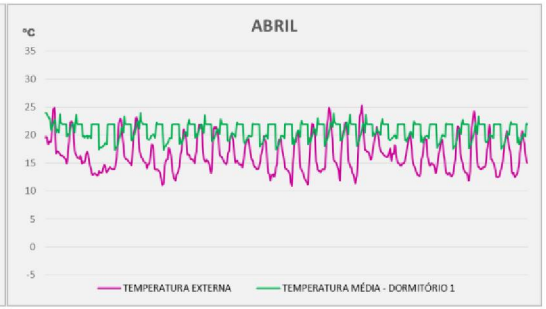

NOVEMBRO
°C
35
30
25
20
15
10
5
0
-5
TEMPERATURA EXTERNA
TEMPERATURA MÉDIA - COZINHA

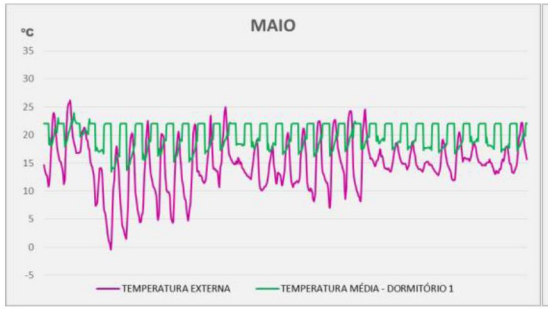

DEZEMBRO
°C
35
30
25
20
15
10
5
0
-5
TEMPERATURA EXTERNA
TEMPERATURA MÉDIA - COZINHA

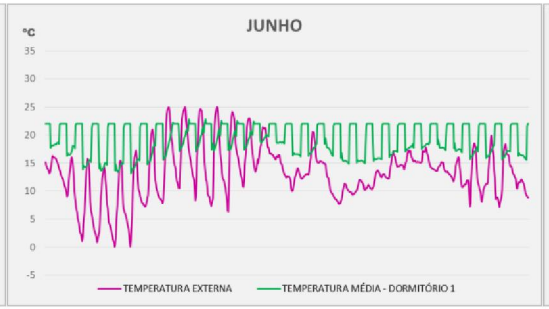

JANEIRO
°C
35
30
25
20
15
10
5
0
-5
TEMPERATURA EXTERNA
TEMPERATURA MÉDIA - DORMITÓRIO 1

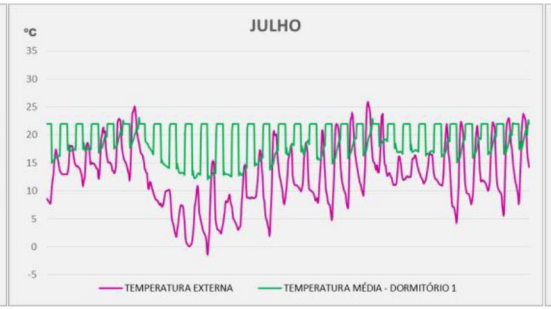

FEVEREIRO
°C
35
30
25
20
15
10
5
0
-5
TEMPERATURA EXTERNA
TEMPERATURA MÉDIA - DORMITÓRIO 1

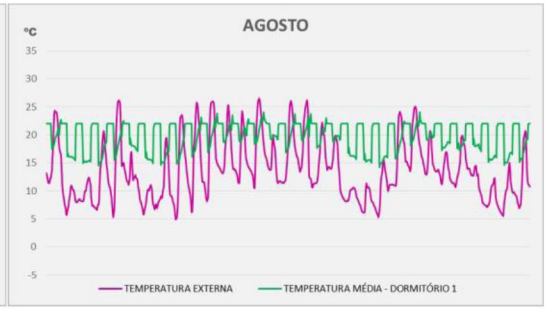

MARÇO
°C
35
30
25
20
15
10
5
0
-5
TEMPERATURA EXTERNA
TEMPERATURA MÉDIA - DORMITÓRIO 1

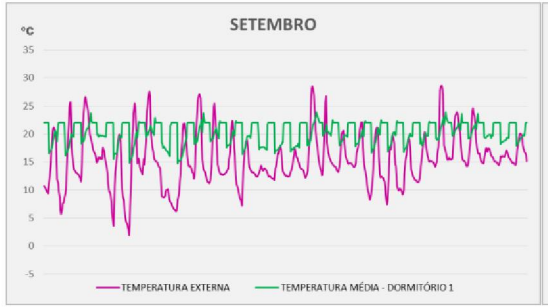

ABRIL
°C
35
30
25
20
15
10
5
0
-5
TEMPERATURA EXTERNA
TEMPERATURA MÉDIA - DORMITÓRIO 1

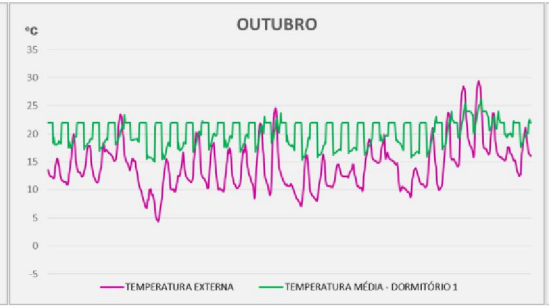

MAIO
°C
35
30
25
20
15
10
5
0
-5
TEMPERATURA EXTERNA
TEMPERATURA MÉDIA - DORMITÓRIO 1

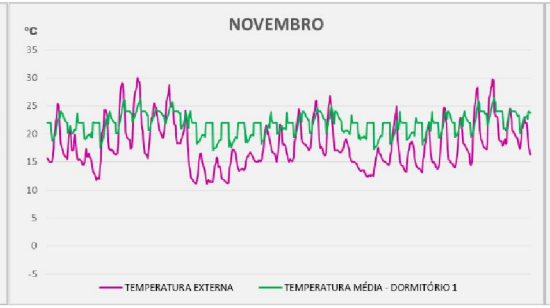

JUNHO
°C
35
30
25
20
15
10
5
0
-5
TEMPERATURA EXTERNA
TEMPERATURA MÉDIA - DORMITÓRIO 1

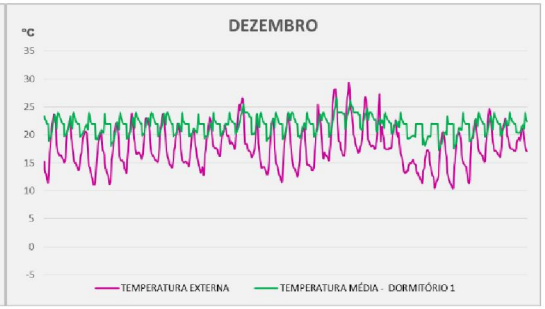

JULHO
°C
35
30
25
20
15
10
5
0
-5
TEMPERATURA EXTERNA
TEMPERATURA MÉDIA - DORMITÓRIO 1

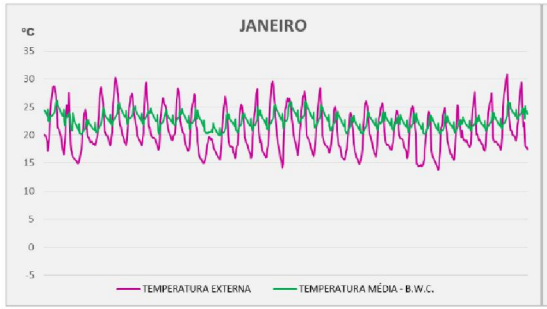

AGOSTO
°C
35
30
25
20
15
10
5
0
-5
TEMPERATURA EXTERNA
TEMPERATURA MÉDIA - DORMITÓRIO 1

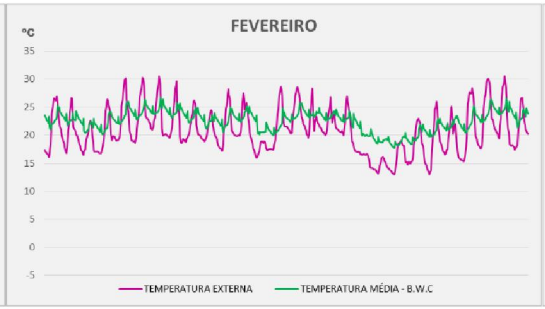

SETEMBRO
°C
35
30
25
20
15
10
5
0
-5
TEMPERATURA EXTERNA
TEMPERATURA MÉDIA - DORMITÓRIO 1

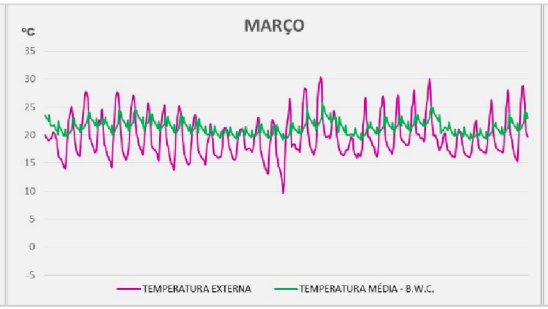

OUTUBRO
°C
35
30
25
20
15
10
5
0
-5
TEMPERATURA EXTERNA
TEMPERATURA MÉDIA - DORMITÓRIO 1

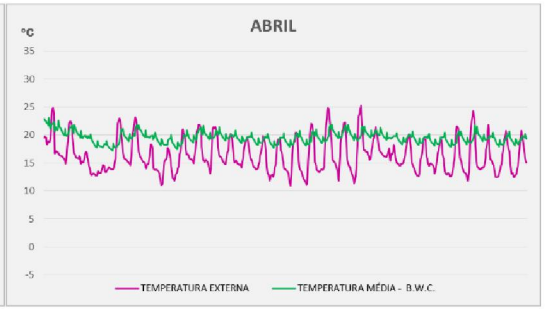

NOVEMBRO
°C
35
30
25
20
15
10
5
0
-5
TEMPERATURA EXTERNA
TEMPERATURA MÉDIA - DORMITÓRIO 1

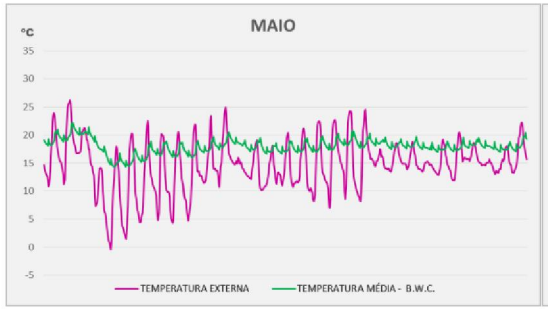

DEZEMBRO
°C
35
30
25
20
15
10
5
0
-5
TEMPERATURA EXTERNA
TEMPERATURA MÉDIA - DORMITÓRIO 1

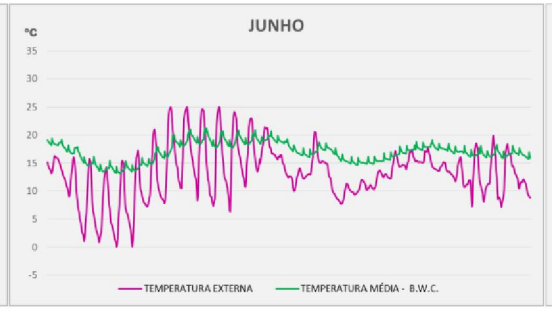

JANEIRO
°C
35
30
25
20
15
10
5
0
-5
TEMPERATURA EXTERNA
TEMPERATURA MÉDIA - B.W.C.

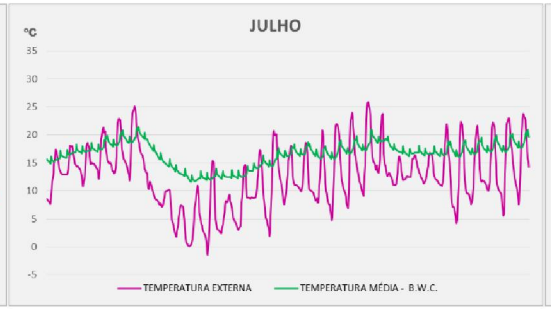

FEVEREIRO
°C
35
30
25
20
15
10
5
0
-5
TEMPERATURA EXTERNA
TEMPERATURA MÉDIA - B.W.C

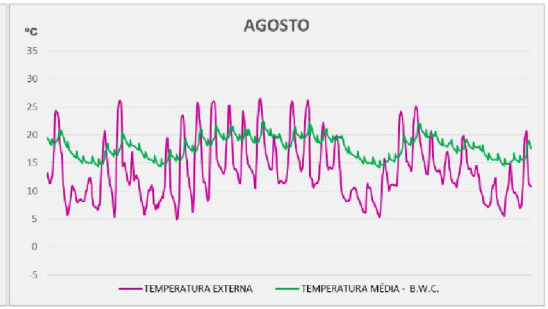

MARÇO
°C
35
30
25
20
15
10
5
0
-5
TEMPERATURA EXTERNA
TEMPERATURA MÉDIA - B.W.C.

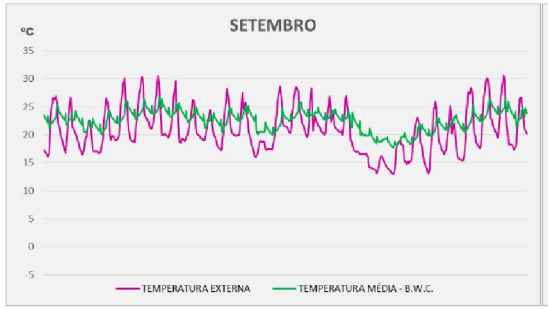

ABRIL
°C
35
30
25
20
15
10
5
0
-5
TEMPERATURA EXTERNA
TEMPERATURA MÉDIA - B.W.C.

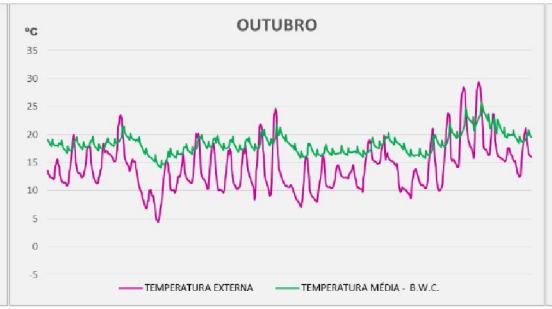

MAIO
°C
35
30
25
20
15
10
5
0
-5
TEMPERATURA EXTERNA
TEMPERATURA MÉDIA - B.W.C.

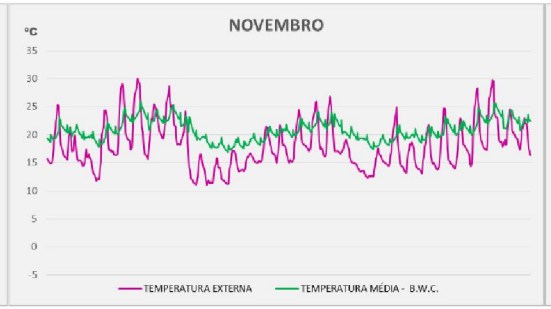

JUNHO
°C
35
30
25
20
15
10
5
0
-5
TEMPERATURA EXTERNA
TEMPERATURA MÉDIA - B.W.C.

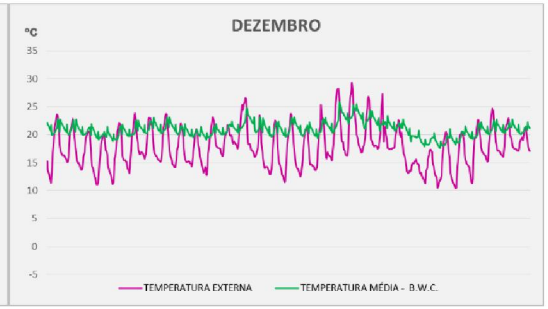

JULHO
°C
35
30
25
20
15
10
5
0
-5
TEMPERATURA EXTERNA
TEMPERATURA MÉDIA - B.W.C.

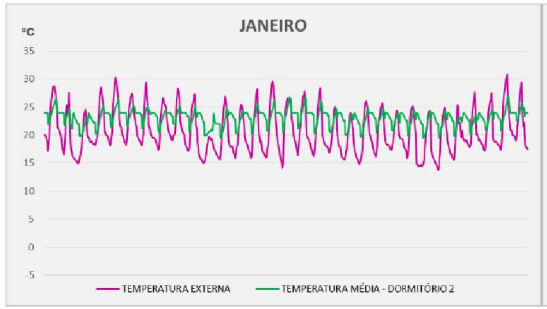

AGOSTO
°C
35
30
25
20
15
10
5
0
-5
TEMPERATURA EXTERNA
TEMPERATURA MÉDIA - B.W.C.

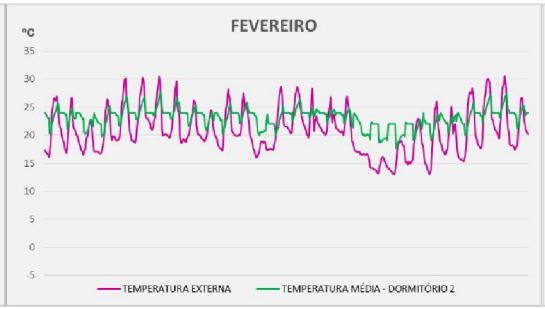

SETEMBRO
°C
35
30
25
20
15
10
5
0
-5
TEMPERATURA EXTERNA
TEMPERATURA MÉDIA - B.W.C.

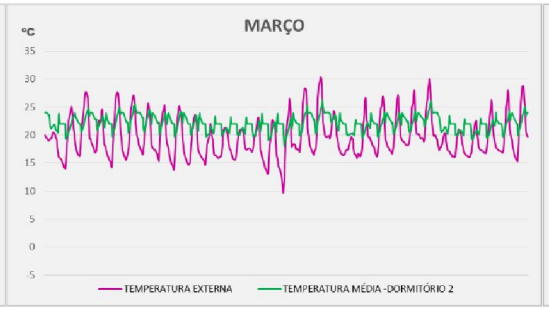

OUTUBRO
°C
35
30
25
20
15
10
5
0
-5
TEMPERATURA EXTERNA
TEMPERATURA MÉDIA - B.W.C.

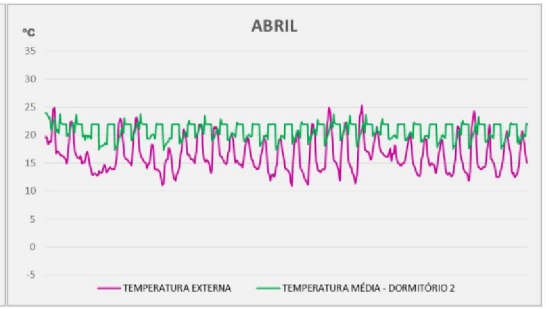

NOVEMBRO
°C
35
30
25
20
15
10
5
0
-5
TEMPERATURA EXTERNA
TEMPERATURA MÉDIA - B.W.C.

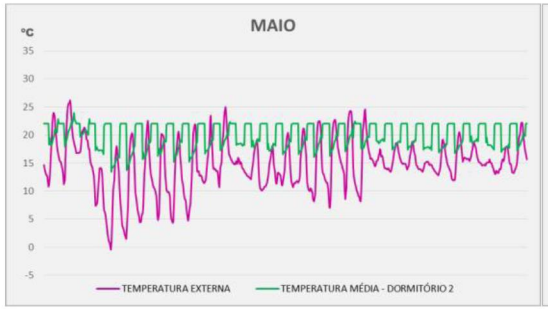

DEZEMBRO
°C
35
30
25
20
15
10
5
0
-5
TEMPERATURA EXTERNA
TEMPERATURA MÉDIA - B.W.C.

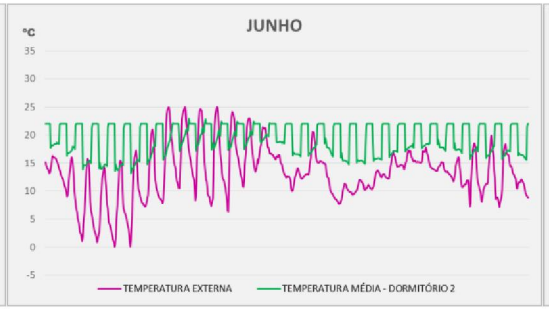

JANEIRO
°C
TEMPERATURA EXTERNA
TEMPERATURA MÉDIA - DORMITÓRIO 2

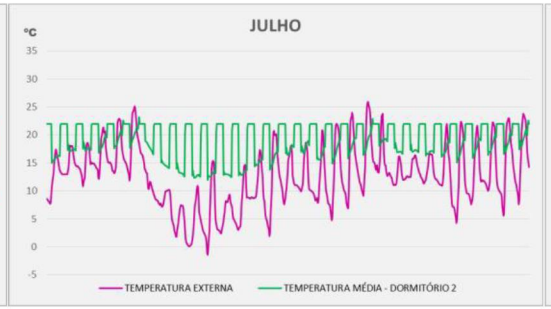

FEVEREIRO
°C
TEMPERATURA EXTERNA
TEMPERATURA MÉDIA - DORMITÓRIO 2

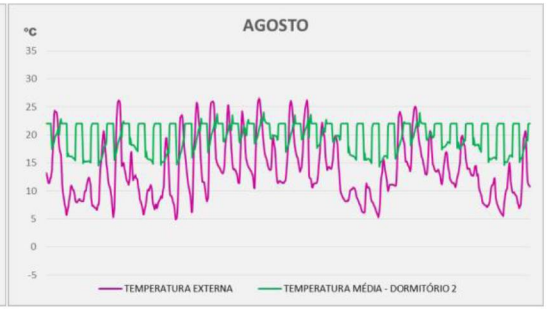

MARÇO
°C
TEMPERATURA EXTERNA
TEMPERATURA MÉDIA -DORMITÓRIO 2

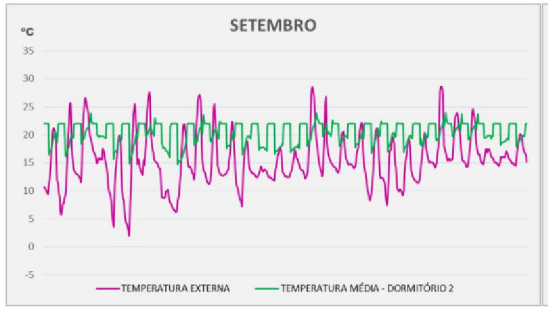

ABRIL
°C
TEMPERATURA EXTERNA
TEMPERATURA MÉDIA - DORMITÓRIO 2

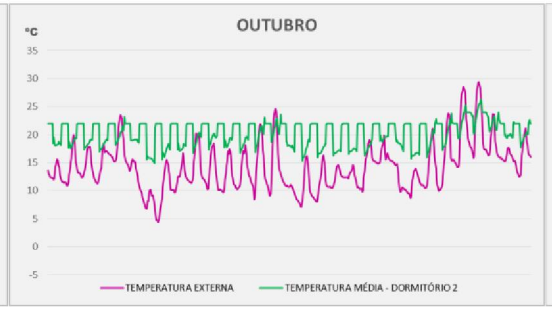

MAIO
°C
TEMPERATURA EXTERNA
TEMPERATURA MÉDIA - DORMITÓRIO 2

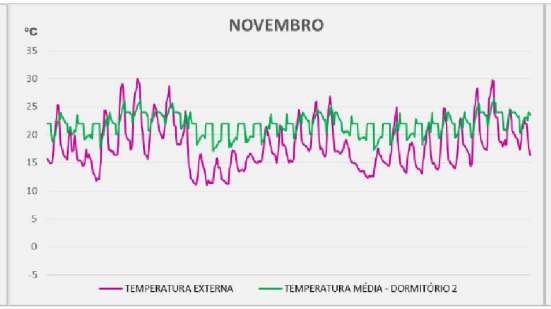

JUNHO
°C
TEMPERATURA EXTERNA
TEMPERATURA MÉDIA - DORMITÓRIO 2

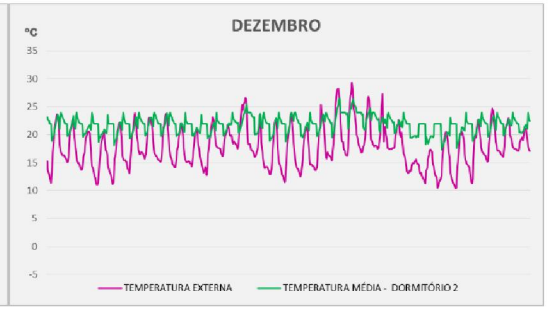

JULHO
°C
TEMPERATURA EXTERNA
TEMPERATURA MÉDIA - DORMITÓRIO 2


AGOSTO
°C
TEMPERATURA EXTERNA
TEMPERATURA MÉDIA - DORMITÓRIO 2


SETEMBRO
°C
TEMPERATURA EXTERNA
TEMPERATURA MÉDIA - DORMITÓRIO 2


OUTUBRO
°C
TEMPERATURA EXTERNA
TEMPERATURA MÉDIA - DORMITÓRIO 2


NOVEMBRO
°C
TEMPERATURA EXTERNA
TEMPERATURA MÉDIA - DORMITÓRIO 2


DEZEMBRO
°C
TEMPERATURA EXTERNA
TEMPERATURA MÉDIA - DORMITÓRIO 2

ANEXO 1 – ARTIGO: INTEROPERABILIDADE DE FERRAMENTAS BIM E AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE EDIFICAÇÕES

2017 SBTIC+ SIBRAGEC

1º Simpósio Brasileiro de Tecnologia da Informação e Comunicação na Construção

10º Simpósio Brasileiro de Gestão e Economia da Construção

8 a 10 de novembro de 2017 - Fortaleza - Ceará - Brasil

INTEROPERABILIDADE DE FERRAMENTAS BIM E AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE EDIFICAÇÕES

ARAUJO, Aline M. F. (1); CRIPPA, Julianna (2); UEHARA, Letícia K. S. (3), LOPES, Thais V. (4), SCHEER, Sergio (5)

(1) Mestranda, Universidade Federal do Paraná (UFPR), e-mail: aline.mfaraujo@hotmail.com, (2) Mestranda, UFPR, e-mail: julianna.crippa@gmail.com, (3) Mestranda, UFPR, e-mail: leticia.uehara@ufpr.br, (4) Mestranda, UFPR, e-mail: thaisvielo@gmail.com, (5) Prof. Doutor, UFPR, e-mail: scheer@ufpr.br

RESUMO

Pesquisas relacionadas à sustentabilidade na indústria da AEC estão constantemente presentes no meio acadêmico. Enquanto isso, o uso de ferramentas e modelos em BIM vem crescendo mundialmente no desenvolvimento de projetos de edificações e infraestrutura. A ACV dimensiona e caracteriza os efeitos resultantes de construções no meio ambiente, levando em consideração os impactos durante todo ciclo de vida da edificação. O uso da modelagem da informação da construção permite realizar análises complexas, extrair parâmetros e a simular o ciclo de vida de edificações ainda durante o projeto, facilitando assim a tomada de decisão em projetos que visam à redução de impactos ambientais. Desse modo, este trabalho realizou uma revisão sistemática da literatura para identificar estudos que relacionam ACV e ferramentas BIM, com o objetivo de investigar a abrangência destas pesquisas, quais métodos têm sido desenvolvidos neste sentido e, principalmente, como ocorre a interoperabilidade entre os softwares utilizados em cada método. Selecionou-se 17 artigos científicos que estabelecem métodos de interoperabilidade das ferramentas BIM e ACV. Observou-se que, na opinião da maioria dos autores, os métodos ainda apresentam alta complexidade, muitas vezes são bastante trabalhosos e têm foco principal nas áreas de pesquisas e consultorias.

Palavras-chave: Modelagem da Informação da Construção, Análise de Ciclo de Vida, ACV, BIM.

ABSTRACT

Sustainability researches in the Architecture, Engineering and Construction (AEC) industry are constantly present in academia. Meanwhile, use of tools and models in BIM has been growing worldwide in the development of building and infrastructure projects. The Life Cycle Assessment (LCA) measure and identifies the resulting construction effects on environment, taking into account the impacts throughout buildings whole life cycle. Building Information Modeling (BIM) allows complex analysis, parameters extraction and simulation of the building life cycle, even during the project, therefore facilitating design decisions that aim to reduce environmental impacts. This work performs a systematic literature review to identify papers that relates LCA and BIM tools, in order to investigate the extension of these researches, which methods have been developed related to this, and moreover, how works the interoperability between the software used in each method. It was selected 17 scientific papers that established methods of interoperability between BIM and LCA tools. It was noticed that, in the opinion of most authors, the methods still presents high complexity, are usually laborious and have the main focus in the research and consultancy areas.

Keywords: *Building Information Modeling , Life Cycle Assessment, LCA, BIM*

1 INTRODUÇÃO

No atual cenário global, é notório o impacto negativo sobre o meio ambiente causado

pelas atividades da indústria da construção civil acumuladas ao longo dos anos. Além dos critérios considerados nos projetos, como construtibilidade e custo, é visto uma evolução na preocupação quanto à sustentabilidade. Em paralelo a isso, a Modelagem da Informação da Construção, ou *Building Information Modeling* (BIM), vem tomando um espaço cada vez maior dentro dos escritório de projetos em Arquitetura, Engenharia e Construção (AEC). A tecnologia BIM tem como principais propostas a otimização de processos de projeto e a colaboração interdisciplinar. Ao relacionar a sustentabilidade com a tecnologia da informação, obtém-se uma área de desenvolvimento que parece muito promissora. A integração de ferramentas de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) com modelos BIM possibilita estimativas complexas de impactos ambientais através de métodos mais eficientes e aplicáveis pelos projetistas.

A ACV ou em inglês *Life Cycle Assessment* (LCA), é reconhecida pela ISO 14040 (2006) como um método que analisa todas as fases de um produto e todos os processos interativos que o compõe. Ciclo de vida são os estágios sucessivos e encadeados de um produto. Em cada um dos estágios são contabilizadas as entradas e saídas de materiais, energia, produtos e emissões. A ACV no setor da construção dimensiona e caracteriza os efeitos resultantes de construções no meio ambiente, levando em consideração os impactos desde a extração das matérias, transporte, concepção da edificação até o descarte final dos seus insumos. Realizar uma ACV em edifícios inteiros é uma tarefa exaustiva devido a trabalhos de natureza manual e repetitiva (MONICH, 2012).

BIM é uma tecnologia de modelagem que apresenta todo o conjunto real do edifício, uma vez que considera todas informações digitalizadas e relacionadas ao projeto, fornecendo desenhos conceituais e detalhados (FLORIO, 2007). O BIM é um ramo da tecnologia da informação aplicada à construção civil, materializada em softwares que oferecem novas funcionalidades aplicáveis a todo ciclo de vida de um empreendimento. Os softwares BIM não são ferramentas que possibilitam apenas a modelagem e visualização gráfica em 3D, mas também apresentam soluções baseadas em objetos paramétricos e inteligentes que permitem atualizações automáticas (CBIC, 2016).

Apesar de já existirem pesquisas que integrem ACV e BIM, são raros os estudos que de fato desenvolveram e testaram metodologias de forma prática. Portanto, o presente trabalho tem como objetivo discutir e avaliar métodos estabelecidos por diversos autores para realizar ACV de edificações em modelos BIM. Desta forma, será possível realizar uma análise de como ocorre a interoperabilidade entre diferentes ferramentas. Segundo Eastman et al. (2011), a interoperabilidade, ou forma de intercâmbio de dados entre duas aplicações BIM diferentes pode ser feito através de ligações diretas e proprietárias entre ferramentas específicas, através de formatos de arquivos de intercâmbio proprietários ou públicos, e também por formatos de intercâmbio baseados em XML.

2 METODOLOGIA

A metodologia utilizada nesta pesquisa foi a Revisão Sistemática da Literatura (RSL) a partir das bases de dados online: *Web of Science*, *Science Direct* e Portal de Periódicos CAPES/MEC. Segundo Galvão e Pereira (2014) os métodos para realizar uma revisão sistemática preveem: elaboração de pergunta de pesquisa; busca pela literatura; seleção dos artigos; extração de dados; avaliação da qualidade metodológica; metanálise; avaliação da qualidade das evidências e; redação dos resultados. Na presente pesquisa, a pergunta definida para realizar a RSL foi: Quais são os meios utilizados para realizar ACV de edificações durante a etapa de projeto e planejamento com softwares BIM?

Foram testadas buscas com algumas palavras chaves ("*Building Information Modeling*",

"BIM", "LCA" e "*Building*"), resultando em 15 mil artigos. Em seguida, foram aplicados filtros com o intuito de reduzir o número de artigos encontrados, conforme apresenta o Quadro 1. A pesquisa nas bases de dados abrangeu artigos de periódicos e congressos publicados até o ano de 2015, excluindo livros e outros materiais. Ainda na etapa de seleção do artigos, após a primeira triagem através da aplicação dos filtros, foi adotado o método de exclusão com base na leitura dos resumos ou abstract. Por fim, foram lidos todos os artigos que não foram recusados pelos filtros e critérios de exclusão. A partir disto, foi possível selecionar as pesquisas que contribuem para responder a pergunta de pesquisa, e mais especificamente, foram analisados os diferentes métodos e como ocorre a interoperabilidade entre ferramentas utilizadas.

3 RESULTADOS

3.1 Resultados da RSL

Foram selecionados os artigos que preenchiam os seguintes critérios: abordaram de forma específica e contextualizaram ACV de edificações em modelos BIM e/ou desenvolveram, analisaram ou testaram métodos através da aplicação de softwares. Foram excluídos os artigos em duplicidade (108 artigos), os que não se encontram disponíveis online (6 artigos), e os que não relacionam diretamente ACV com BIM ou possuíam foco mais direcionado para aspectos mais amplos da sustentabilidade (345 artigos). Do total dos 27 artigos que foram lidos na íntegra, 10 deles foram rejeitados. Sendo assim, foram selecionados, por fim, 17 artigos que atendiam aos critérios anteriormente definidos. O Quadro 1 apresenta os resultados do número de artigos encontrados na busca com as palavras chaves e aplicação de filtros.

Quadro 1 – Resultados obtidos com aplicação de filtros

Resultados com Filtros Aplicados: título, palavras chaves e resumo				
Palavras chaves	Base de dados			Total
	Science Direct	Portal da Capes	Web of Science	
BIM e *Environmental*	31	8	136	175
BIM e "*Early Stage Design*"	1	4	2	7
BIM e *Sustainability*	9	5	70	87
BIM e *LCA*	8	5	19	32
LCA; *Building e Planning*	8	15	98	121
BIM; *Sustainability* e *Decision*	10	4	26	40
BIM; LCA e "*Life Cycle*"	2	7	18	27
Total	69	48	369	486

Fonte: Os autores 2017

3.2 Avaliação das pesquisas selecionadas e métodos desenvolvidos

Selecionou-se 4 artigos que, apesar de não aplicarem um método de ACV relacionado ao BIM, apresentaram considerações significativas sobre o assunto. Yung e Wang (2014), Alwan e Jones (2014) e Anton e Diaz (2014) defendem que a ACV aplicada em modelos BIM pode possibilitar grandes benefícios no contexto da sustentabilidade e precisam ser utilizadas em fases iniciais, integradas no processo de tomada de decisões, a fim de alcançar uma visão holística do projeto, agregando valor ao mesmo. Dentre as vantagens de integrar BIM a ACV estão: inserção do dado uma única vez; comparação de diferentes

alternativas; obtenção de resultados mais precisos; utilização de diversos indicadores ambientais simultaneamente; avaliação em tempo real. Dentre as desvantagens, pode-se citar: o desenvolvimento da ACV não está inserido na tecnologia BIM, portanto, a interoperabilidade entre os modelos BIM e ferramentas de ACV ainda precisa ser melhor desenvolvida. Ariyaratne e Moncaster (2014) constataram que os projetistas vêm reconhecendo a necessidade de abordar aspectos ambientais da construção e que existem algumas ferramentas disponíveis no mercado que procuram atender a estes requisitos. Contudo, tais ferramentas foram apontadas como pouco flexíveis, difíceis de serem adotadas por um grande número de profissionais nos estágios iniciais do projeto, principalmente devido à extensiva quantidade de dados que precisam ser inseridos manualmente. Os autores apontaram também que a falta de conhecimento dos profissionais da área de construção civil em relação à energia embutida e emissão de CO2 é um fator complicador.

O Quadro 2 apresenta os 13 artigos restantes que apresentaram métodos para realizar uma ACV em BIM de forma prática. A partir disso, avaliou-se como se deram os processos de interação entre as diferentes ferramentas utilizadas, e quais as principais facilidades e dificuldades encontrados em cada método.

De forma geral, os autores utilizaram os modelos BIM desenvolvidos para calcular de forma automática os quantitativos dos materiais que compuseram as construções, para posteriormente aplicar tais valores a banco de dados externos com índices de impacto ambiental. O software mais utilizado para modelagem BIM foi o Revit. Alguns métodos utilizaram ferramentas para simular o consumo energético de uma edificação durante a fase operacional do ciclo de vida. Para a realização desta etapa, diversos autores tentaram exportar o modelo BIM, ou o modelo 3D diretamente para o software de simulação energética através de formatos de arquivo compatíveis ou com o auxílio de plug-ins. Porém, em alguns casos, o processo de exportação não foi possível, ou apresentou falhas, então, foi necessária a realização de nova modelagem no próprio software de simulação. Em outros métodos foram incluídos softwares específicos de ACV, os quais possuem bases de dados com índices de impactos ambientais para cada material. O SimaPro, por exemplo, é uma ferramenta para realização de ACV que pode abranger diversos setores, já o Athena Ecocalculator e GABI são específicos para ACV de edificações. O problema é que nenhum deles é totalmente compatível com a tecnologia BIM, e portanto, quando tais ferramentas foram utilizadas, foi necessário inserir os dados, com o auxílio de planilhas eletrônicas e ferramentas de apoio para compilação e organização de dados.

Jrade e Abdulla (2012) descreveram um protótipo desenvolvido e validado por meio da ferramenta Athena EcoCalculator. Esta ferramenta é baseada em planilhas eletrônicas do Excel. Os dados foram transferidos do modelo BIM desenvolvido no Revit através do formato IFC e organizados com o auxílio de macros no Excel. Segundo os autores, a ferramenta Athena utiliza dados e incorpora sistemas de construção apenas para o Canadá e EUA, o que impede a realização de uma ACV efetiva em outras localidades. Por outro lado, foi ressaltado que a ACV pode ser realizada com facilidade, necessitando habilidade somente no uso do Revit e do Excel. Jrade e Jalaei (2013) também testaram um método a partir do Revit, Athena e Excel porém, incluíram um módulo para certificação LEED e para o custo. A coleta de dados foi realizada a partir de componentes publicados pelos fornecedores, criando uma biblioteca com 3000 componentes. Os autores propõem um modelo simples, e de fácil utilização, onde as entradas dos usuários e previsões de erro são minimizadas, o que gera redução de tempo, velocidade nos cálculos e relatórios de saídas, entre outras vantagens. É descrita como principal desvantagem o fato do modelo não permitir a aplicação na fase de projeto executivo e detalhamento, uma vez que o

modelo armazena um banco de dados de informações apenas para os componentes mais comumente utilizados em projeto de construção.

Quadro 2 – Artigos selecionados que desenvolveram ACV em BIM

Autores	Software	Categoria de impacto	Fronteiras
Dawood, S.; Lord, R.; Dawood, N.(2009)	Revit; IES-VE; SimaPro7	Custo, emissão de CO_2, consumo de energia, reciclagem e gerenciamento de resíduos, uso da terra	ACV completo
Kulahcioglu, T.; Dang, J.; Toklu, C. (2012)	Blender (python), GABI, SketchUp.	Energia, aquecimento global, emissão de CO_2, acidificação.	ACV completo
Jrade, A; Abdulla, R (2012)	Revit, Excel, Athena	Consumo de energia, acidificação, aquecimento global, efeitos na saúde humana, depleção da camada de ozônio, smog fotoquímico, eutrofização, uso de recursos naturais.	ACV completo
Basbagill, J.; Flager, F.; Lepech, M.; Fischer, M. (2013)	Dprofiler, CostLab, eQUEST, SimaPro, Athena, Excel, ModelCenter, ScriptWrapper e Design Explorer	Emissão de CO_2	Pré-operacional (excluindo construção), operacional e manutenção
Jrade, a.; Jalaei, F. (2013)	Revit, Excel, Athena	Consumo de energia, acidificação, aquecimento global, efeitos na saúde humana, depleção da camada de ozônio, smog fotoquímico, eutrofização, custo	Pré-operacional
Peng, C.; Wu, X. (2013)	Revit e Ecotect	Emissão de CO_2	ACV completo
Shoubi, M. V.; Bagchi, A.; Barough, A. S. (2015)	Revit, Ecotect, 3DMax	Energia e emissão de CO_2	Operacional
Krantz, J.; Larsson, J.; Lu, W.; Olofsson, T. (2015)	Revit, SimioDES	Energia e emissão de CO_2	Pré-operacional
Liu, S.; Meng, X.; Tam, C. (2015)	Ecotect Analysis	Custo e emissão de CO_2	ACV Completo
Inyim, P.; Rivera, J.; Zhu, Y. (2015)	SimulEICon, Revit, Microsoft Access, Athena	Tempo, custo e emissão de CO_2	Pré-operacional
Shin, Y.; Cho, K. (2015)	ArchiCAD, EcoDesigner e Excel	Custo e emissão de CO_2	ACV Completo
Lee, S.; Tae, S.; Roh, S.; Kim, T. (2015)	Revit	Aquecimento global, acidificação, eutrofização, depleção abiótica, depleção da camada de ozônio e smog fotoquímico	ACV Completo
Oti, A. H.; Tizani, W. (2015)	Visual Studio e Revit Structures	Custo, emissão de CO_2 e impacto ecológico	ACV Completo

Fonte: Os autores 2017

Inyim et al. (2015), introduziram o SimulEICon, um utilitário que fornece a análise do impacto econômico e ambiental. Funciona como um add-on para Revit e utiliza o Microsoft Access para operar bancos de dados relacionados. O algoritmo genético NSGA-II, foi utilizado para a otimização, a fim de encontrar soluções em conformidade com os objetivos do projeto. A estimativa de emissão de CO_2 foi calculada com a base de dados do Athena. Com o SimulEICon é possível encontrar as melhores soluções para todos os componentes ou apenas para componentes específicos, apoiando o processo de tomada de decisão. A limitação do método é que o plug-in considera apenas três principais

objetivos (tempo, custo e impacto ambiental) do projeto para a tomada de decisão. Dawood *et al.* (2009) desenvolveram um modelo BIM no Revit, no qual foram inseridas informações relacionadas à localização e orientação da edificação, arquitetura e propriedade físicas dos materiais, formas, pesos, entre outros. Depois, usando o IES-VE, foram acessadas as variáveis ambientais e de custos para analisar e comparar os impactos. O *software* pode comparar e contrastar como diferentes escolhas de projeto afetam o desempenho de uma ampla gama de elementos de construção, como o desempenho térmico, de fluxo de ar e iluminação e consumo de energia e emissão de CO_2. Com o uso do o SimaPro 7, foram aplicados dados e variáveis nos componentes selecionados na etapa anterior. O método apresentou uma ferramenta genérica porém com diversos aspectos positivos, contemplando processos integrados, simulação do edifício completo, resultados quantitativos e qualitativos, além de possibilitar uma exportação de dados para o EnergyPlus.

Oti e Tizani (2015) desenvolveram um sistema protótipo que avalia três indicadores: custo, impacto ecológico e quantidade de CO_2 incorporado de diferentes sistemas estruturais. O sistema é implementado usando programação em C# (C Sharp) através do .NET Framework no Microsoft Visual Studio que funciona como um *add-in* do Revit Structures. O sistema avalia soluções alternativas de concepção usando análise de desempenho multicritério. O programa pode ser acessado pelo projetista durante a modelagem estrutural através de um *link* externo embutido no Revit. No estudo de Lee *et al.* (2015), foi definido o nível de detalhe do modelo, ou *level of detail* (LOD) igual a 300. Foi desenvolvida uma base de dados com os fatores e coeficientes de impactos embutidos para os 6 principais materiais de construção, adotando assim, uma abordagem baseada na ACV. As unidades da base de dados foram inseridas diretamente no Revit. A partir disto, foi possível gerar tabelas com os impactos embutidos totais em cada elemento da construção, permitindo que o usuário verifique os impactos de suas escolhas. Os resultados foram validados em comparação com os valores reais, resultando em um erro de 5%, provando, assim, que a ferramenta é eficaz.

Peng e Wu (2015) realizaram um estudo de caso combinando três métodos para estimar as emissões de CO_2 durante o ciclo de vida de um edifício de escritório. Os quantitativos de materiais foram gerados no Revit e o consumo de energia durante a fase operacional do edifício foi obtido por meio de simulação no Ecotect. Por fim, uma análise de sensibilidade foi realizada alterando parâmetros alternativos a fim de identificar o que causa maior impacto sobre o desempenho do edifício. As limitações encontradas incluem a dificuldade em determinar dados de fabricação de todos componentes da edificação e informação quanto à ocupação e consumos durante a fase operacional e fase de demolição. Os autores concluíram que os dois *softwares* utilizados não se integram completamente, não havendo sobreposição virtual em relação a ferramentas, terminologias e estrutura de dados, ainda que ambas as ferramentas tenham sido desenvolvidas pela Autodesk. O edifício foi modelado separadamente no Revit e no Ecotect, e segundo os autores, não existe fluxo direto de informação entre as ferramentas, porém não foi informado de que forma foi testado este fluxo. Por outro lado, em outra pesquisa que também utilizou os dois *softwares*, Shoubi *et al.* (2015) observaram que o Ecotect conseguiu identificar os elementos modelados no Revit. Primeiramente, foi necessário criar zonas e ambientes no modelo e exportar o arquivo no formato gbXML, no qual foram atribuídas características para a modelagem de energia (localização e tipo do edifício). No Ecotect, foram atribuídas características como atividade, tipo do sistema e variação de temperatura confortável. O 3D Max foi utilizado para identificar soluções de projeto alternativas que possam contribuir para a redução do consumo de energia.

Liu *et al.* (2015) desenvolveram um método de revisão de um algoritmo PSO, ou método do enxame de partículas, aplicado para procurar a relação inversa entre os custos e as emissões de CO_2 no ciclo de vida em projetos de construção. O modelo proposto considera fatores de desempenho térmico e de iluminação, simulados no Ecotect, e não abrange aquecimento, ar condicionado e ventilação. Os autores descrevem uma série de equações, baseadas em algoritmos PSO para determinar a otimização e criar um esquema de desenho de projeto ótimo, acelerando a velocidade de projeto. Para aplicação do método proposto, os autores criaram duas hipóteses: a única fonte de energia utilizada na fase de operação é a eletricidade, e presumiram que todos os materiais de construção vieram de áreas próximas. O modelo baseado em IFC, desenvolvido por Kulahcioglu *et al.* (2012), foi analisado através de uma interface de GABI. Como plataforma de implementação, foi utilizado o Blender, uma fonte aberta 3D de criação de conteúdo livre que funciona através de programação em Python. No entanto, como não há nenhuma maneira direta para importar arquivos IFC em Blender, o arquivo IFC foi convertido em um formato de arquivo intermediário KMZ (versão compactada do *Keyhole Markup Language*, obtida através de um *plug-in* usando o Sketchup), para em seguida ser importado para Blender. Embora tenham sido superados diversos problemas de entrada de dados e de precisão com o uso de dados em IFC, foi necessário realizar algumas conversões de dados e integração para tornar o método mais automático. E mesmo havendo uma rica fonte de dados, algumas informações e escolhas ainda foram necessárias por meio da entrada do usuário, principalmente dados considerados mais subjetivos.

Shin e Cho (2015) avaliaram uma maneira de obter informações de forma fácil e precisa a partir de um modelo desenvolvido no ArchiCAD, e posteriormente, desenvolveram uma estrutura baseada em planilhas do Excel para a implementação simultânea de ACV e Avaliação do Custo de Ciclo de Vida. Nesse método, foi utilizada uma extensão do ArchiCAD, o EcoDesigner para realizar simulações durante a fase de operação. Segundo os autores, não foi possível verificar a exatidão dos resultados encontrados nesta pesquisa. Enquanto isso, Basbagill *et al.* (2013) criaram um modelo BIM no DProfiler, que fornece um quantitativo de material detalhado e um relatório de análise de energia. O programa de simulação de energia, eQuest, foi utilizado para calcular o impacto dos equipamentos. O SimaPro auxiliou na obtenção dos impactos de CO_2, assim como o Athena EcoCalculator. Uma rotina de Manutenção, Reparo e Substituição foi utilizada para determinar o impacto na fase operacional associado aos componentes do edifício, por meio de um banco de dados de referência de operações de facilidade *online*, o CostLab. Os dados foram extraídos manualmente dos outros *softwares* e as operações de cada interação foram realizadas no Excel. O ModelCenter faz uma análise de sensibilidade através da integração do DProfiler e do Excel em um ambiente comum, por meio do utilitário ScriptWrapper. E por fim, o Design Explorer permitiu que a análise de sensibilidade fosse desenvolvida em todos os modelos, a fim de determinar os valores limites de impacto incorporado para cada componente de edifício. Observou-se que o método utilizado não é totalmente integrado, porém, a integração pode ocorrer no Dprofiler, que exporta o modelo automaticamente para o eQuest, sem a necessidade de interface com o eQuest; e o DProfiler e o Excel também podem se integrar por meio do ModelCenter.

Krantz *et al.* (2015) elaboraram um modelo especificamente adaptado para abordar a dinâmica de projetos de construção de infraestrutura. Este estudo usou BIM e DES (Discreta Simulação de Eventos) para avaliar o uso de energia e emissões de gases de efeito estufa. O modelo BIM gera dados de entrada (quantidades de componentes e materiais utilizados na construção) e o SimioDES é usado para modelar os processos de

construção no local. As limitações encontradas no método foram: o modelo considera apenas a energia incorporada do berço ao portão; o processo de obtenção e entrada de dados são relativamente complexos e demorados, porém é possível a reutilização desses dados em outros projetos; dificuldade na obtenção dos dados associado ao transporte de materiais e equipamentos; aspectos importantes foram deixados de fora e os resultados não foram validados.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

De todos os artigos analisados houveram alguns destaques. Em um dos métodos descritos, o uso do SimulEICon foi apontado como sendo um diferencial, uma vez que é compatível com o Revit e funciona como um *plug-in* facilitando a operação e manuseio. Além disso, ele é um facilitador para tomada de decisão, e leva em consideração tempo, custo e impacto ambiental. Houveram metodologias que abordaram o uso do Ecotect. O interessante desta ferramenta é que além da ACV, pode-se fazer análises de iluminação, conforto térmico e etc. No entanto, apesar de ter sido parcialmente incorporado ao Revit e ao Green Building Studio, o Ecotect encontra-se atualmente indisponível no mercado, fazendo com que estas metodologias estejam ultrapassadas. Também é válido ressaltar o uso do Athena Ecocalculator, que apesar de possuir dados disponíveis apenas para dois países, pode ser operada no próprio Excel e, portanto, ao se fazer uma programação utilizando Macro é possível automatizar o processo de interoperabilidade das ferramentas com eficiência.

As abordagens utilizadas para avaliar os impactos ambientais através de ACV deveriam considerar todas as fases do ciclo de vida da construção. No entanto, a partir dos artigos verificados nesta revisão, foi observado que muitas abordagens de ACV atuais tendem a fazer suposições gerais, que não fazem justiça à dinâmica inerentes a projetos de construção, além disso, raramente consideram o período pós-operacional da edificação. Ao final das análises e comparações foi possível notar a complexidade dos métodos criados pelos autores selecionados neste trabalho. Os processos que visam automatizar e viabilizar a interoperabilidade das ferramentas BIM e ACV ainda são bastante voltados para pesquisadores e consultores. Sendo também muitas vezes trabalhosos e manuais, dificultando o acesso e a aplicação em escritórios de arquitetura e engenharia. Sugere-se, então, a criação de métodos mais fáceis e voltados principalmente para o mercado de AEC, assim como, o desenvolvimento de APIs (Application Programming Interface, ou em português, Interface de Programação de Aplicativos) no ambiente BIM que auxiliem a interoperabilidade com a ACV. Além disso, sugere-se estudos que analisem a viabilidade de implementação em escritórios, e que apresentem pesquisas de satisfação dos usuários.

REFERÊNCIAS

ALWAN, Z.; JONES, P. The importance of embodied energy in carbon footprint assessment, **Structural Survey**, v. 32, n. 1, p. 49–60, 2014.

ANTÓN, L. Á.; DÍAZ, J. Integration of Life Cycle Assessment in a BIM Environment. **Procedia Engineering**, v. 85, p. 26–32, 2014.

ARIYARATNE, C.; MONCASTER, A. Stand-alone calculation tools are not the answer to embodied carbon assessment. **Energy Procedia**, v. 62, p. 150–159, 2014.

BASBAGILL, J.; FLAGER, F.; LEPECH, M.; FISCHER, M. Application of life-cycle assessment to early stage building design for reduced embodied environmental impacts. **Building and Environment**, v. 60, p. 81–92, 2013.

CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO (CBIC). Implementação BIM - Parte 1: Implementação do BIM para Construtoras e Incorporadoras. Brasília, 2016.

DAWOOD, S.; LORD, R.; DAWOOD, N. Development of a visual whole life-cycle energy assessment framework for built environment. In: 2009 WINTER SIMULATION CONFERENCE. Proceedings... p.2653–2663, 2009.

FLORIO, W. Contribuições do Building Information Modeling no processo de projeto em Arquitetura. In: ENCONTRO DE TECNOLOGIA DE INFORMAÇÃO E COMUNICAÇÃO NA CONSTRUÇÃO CIVIL, 3, 2007, Porto Alegre. Anais... Porto Alegre: ANTAC, 2007.

GALVÃO, T. F.; PEREIRA, M. G. Revisões sistemáticas da literatura: passos para sua elaboração. **Epidemiologia e Serviços de Saúde**, v. 23, n. 1, p. 183–184, 2014.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 14040** - Environmental management - Life cycle assessment: Principles and framework. Genebra, 2006.

INYIM, P.; RIVERA, J.; ZHU, Y. Integration of building information modeling and economic and environmental impact analysis to support sustainable building design. **Journal of Management in Engineering**, v. 31, n. 1, p. A4014002, 2014.

JRADE, A.; ABDULLA, R. Integrating building information modeling and life cycle assessment tools to design sustainable buildings. In: CIB: 29TH INTERNATIONAL CONFERENCE., out. 2012, Beirut, Lebanon. Proceedings... Beirut, 2012.

JRADE, A.; JALAEI, F. Integrating building information modelling with sustainability to design building projects at the conceptual stage. **Building simulation**. Springer Berlin Heidelberg, 2013. p. 429-444.

KRANTZ, J.; LARSSON, J.; LU, W.; OLOFSSON, T. Assessing Embodied Energy and Greenhouse Gas Emissions in Infrastructure Projects. **Buildings**, v. 5, n. 4, p. 1156–1170, 2015.

KULAHCIOGLU, T.; DANG, J.; TOKLU, C. A 3D analyzer for BIM-enabled Life Cycle Assessment of the whole process of construction. **HVAC&R Research**, v. 18, n. 1-2, p. 283-293, 2012.

LEE, S.; TAE, S.; ROH, S.; KIM, T. Green Template for Life Cycle Assessment of Buildings Based on Building Information Modeling: Focus on Embodied Environmental Impact. **Sustainability**, v. 7, n. 12, p. 16498–16512, 2015.

LIU, S.; MENG, X.; TAM, C. Building information modeling based building design optimization for sustainability. **Energy and Buildings**, v. 105, p. 139–153, 2015.

MONICH, C. R. **Avaliação Ambiental de uma habitação de interesse social pré-fabricada em madeira no sistema wood frame no estado do Paraná**. 2012.Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós Graduação em Engenharia da Construção Civil da Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

OTI, A. H.; TIZANI, W. BIM extension for the sustainability appraisal of conceptual steel design. **Advanced Engineering Informatics**, v. 29, n. 1, p. 28–46, 2015.

PENG, C.; WU, X. Case Study of Carbon Emissions from a Building's Life Cycle Based on BIM and Ecotect. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2015, p. 1–15, 2015.

SHIN, Y.; CHO, K. BIM Application to Select Appropriate Design Alternative with Consideration of LCA and LCCA. **Mathematical Problems in Engineering**, v. 2015, 2015.

SHOUBI, M. V.; BAGCHI, A.; BAROUGH, A. S. 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.

YUNG, P.; WANG, X. A 6D CAD model for the automatic assessment of building sustainability. **International Journal of Advanced Robotic Systems**, v. 11, 2014.

View publication stats

ANEXO 2 – ARTIGO: BUILDING LIFE CYCLE ENERGY ASSESSMENT ON PRE OPERATION PHASE USING BIM

Building life cycle energy assessment on pre operation phase using BIM

Aline Medeiros Ferreira de Araujo
Federal University of Paraná, Department of Civil Construction, Curitiba (PR), Brazil.
aline.mfaraujo@hotmail.com

Sergio Fernando Tavares
Federal University of Paraná, Department of Architecture and Urbanism, *Curitiba (PR), Brazil.*
sergioftavares@gmail.com

ABSTRACT: Life Cycle Assessment (LCA) is a very important tool for several analyses and it is used to quantify environmental impacts related to products or services. It is essential that building LCA be done during pre-design stage, in order to avoid impacts caused by material waste and lack of planning. Life Cycle Energy Assessment is a LCA method, which analyze energy consumption impacts. Building energy life cycle can be divided into pre operation phase, operation phase and post operation phase. This paper presents a methodology to calculate building embodied energy for pre operation phase during the design stage, using the software Revit Architecture to improve material selection processes. Building Information Modeling (BIM) aims to reduce rework, to properly manage projects information, to model and simulate building performance through temporal, economic and sustainable perspective. The proposed methodology has proved as a feasible and practical tool, since it easily provides results about embodied energy, once materials and model settings are defined.

Keywords *Life Cycle Energy Assessment. Embodied Energy. Building Information Modeling.*

ISBN: 978-85-92631-00-0

1. INTRODUCTION

Despite the importance of environmental concerns, buildings performances has been measured traditionally in terms of quality, time and money. Environmental performances analysis are relatively new, therefore it presents great methodological challenges, which limits its practicality and reliability (Saade, 2014). Construction is regarded to be the industry with less investment in research and development. This fact naturally hinders any improvement and technological developments. Small and medium sized companies are the majority in construction industry, while large companies are those with most resources for research. Temporary alliances on individual projects is also an aspect that delays the application of new methods of design and construction (Antón & Díaz, 2014). This paper aims to propose a Life Cycle Energy Assessment methodology on buildings pre-operation phase, applied to a residential housing in Brazil. This methodology uses the Revit Architecture software to quantify embodied energy values in selected construction materials during the design stage and project.

2. LIFE CYCLE ASSESSMENT

Through building Life Cycle Assessment (LCA), businesses, governments and organizations are able to identify opportunities, to plan and establish better strategies for construction industry. Thus, it becomes feasible the improvement of environmental construction aspects, allowing proper selection of material and suppliers (Silva, 2012). From environmental perspective, LCA provides a complete inventory of mass and energy flows for each system, and it allows that appraisal about generated impacts to be compared (Bueno et al., 2013).

Life Cycle Energy Assessment (LCEA) is a simplified but relevant way to evaluate environmental impacts. This analysis is based on ISO 14040 standard (ISO, 2006), and it is performed by energy consumptions inventory data of direct and indirect processes. Through LCEA it is also possible to identify environmental impacts, and since it has more simplified structure than a complete LCA, it demands lower cost and less effort (Tavares, 2006). According to Bueno et. at. (2010), building life cycle includes: construction materials fabricating, building construction itself, operation and maintenance, disassembly or deconstruction and waste management phases. All stages should be considered in a full LCA, i.e. all processes from "cradle to grave".

Initial Embodied Energy (EE) is defined as a sum of all energy inputs required to extract raw materials, to processing, manufacturing and transporting products and materials that will be used in construction, including transportations to construction site, and all energy spent in construction processes itself. Besides EE, there is also a large energy consumption from home appliances and several devices used during the whole building life, called operational energy. This operational energy includes all energy demand with lighting, cooking, entertainment, climate control, and numerous activities. The post-operational phase of building life cycle begins when building is considered as non-suitable for proper use and performance, and in that moment it starts the deconstruction processes. The energy consumption during this phase comes from machines used in demolition or deconstruction processes, also due to waste transportation to its final disposal site, or in reuse and recycling procedures (Tavares, 2006).

ISBN: 978-85-92631-00-0

3. BUILDING INFORMATION MODELING

Building Information Modeling (BIM) is one of the most promising progress on Architecture, Engineering and Construction (AEC) industry. With BIM it is possible to create building virtual models accurately. Once these models are finished, they contains precise geometries and significant data representing project's information that can help construction, manufacturing, products purchase and analyses. BIM also provides many essential functions for modeling wholly building life cycle, giving possibilities for new and most appropriate designs and projects improvement. When BIM systems are correctly implemented, it easily provides more integrated projects and processes, which results in better constructions with ideal quality on low costs and reduced project time (Eastman et al., 2011).

BIM is a technique that uses 3D models together with intelligent tools, for example, using information about schedules and timelines (4D), or cost-related and financial aspects (5D). About the sixth BIM dimension, there is not a very well defined concept among authors and researches yet, but it is possible to affirm that the term BIM 6D consists in building life cycle analyses, related to performance, maintaining and sustainability (Yung & Wang, 2014).

Environmental friendly services requires collaborative tools support and BIM can contribute for communication and collaboration improvement between different actors involved in a project. There is an advantageous synergy between BIM and sustainable constructions since BIM offers integrated model, global view and it provides facilities at projects. BIM systems provides means to information flows in order to increase quality and performance. Supporting collaborative working for all people involved in a project, during the design stage, could avoid future mistakes, costs and unnecessary reworks. BIM models provides structured data that also could be very useful in industrialization processes, as pre-fabricated constructions (Antón & Díaz, 2014).

4. METODOLOGY

The proposed methodology could be defined as a simplified Life Cycle Energy Assessment that considerate only pre-operation phase inside the system. That is, operation phase and post operation phase are not included on the method developed. It was used the Revit Architecture 2014 software to test this methodology, and thus it was possible to create a simple residence model as an example. It is a nonexistent house, created just as a sample that has one bedroom, one bathroom, a dining/living room and a kitchen. The total area is 106 m^2, and its floor plan is presented in Figure 1. Once consumption energy in operation phase will not be estimated in this paper, than the amount residents, its consumption pattern and types of devices in the house were not defined. Only building systems and materials components are specified in here.

ISBN: 978-85-92631-00-0

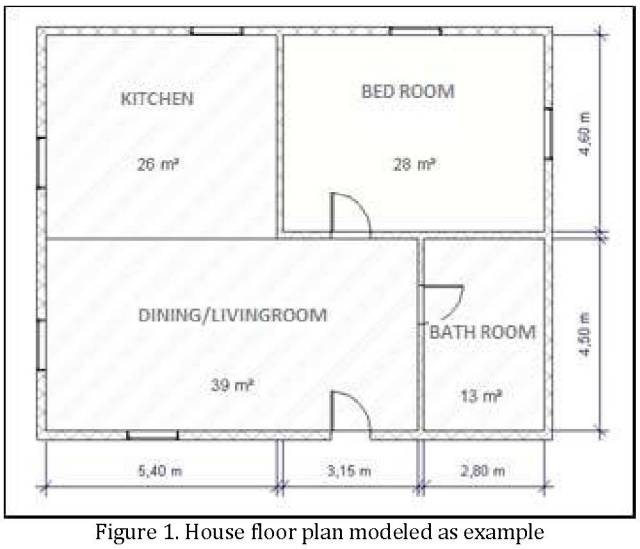


Figure 1. House floor plan modeled as example

4.1 Creating elements and specifying materials

Materials specifications used at the test model are listed at Table 1. It is essential to emphasize that the produced model aims to experiment the practical application of energy LCA methodology only, and not to judge construction systems, performances or materials as appropriated or not.

Table 1. Description of elements and materials defined on the model

Elements	Description of materials
Walls	Brick with concrete in internal and external layers
Floor	Floating wood tile on bedroom and ceramic tile in the rest
Ceiling	Gypsum board on all rooms
Slab	Concrete
Roof	Red ceramic roof tile
Doors	Planed wood
Windows	Glass and wood

Each building element used on the project was created with desired specifications. Revit has already several construction components registered in its library, such as walls, doors, windows, plumbing, etc. Components are separated into Families, which are subdivided into subcategories and then into Types. Each Type is a specific element that has an individual function and it has special characteristics defining materials, thicknesses, physical and mechanical proprieties, appearances, shapes and varied parameters.

It is possible to insert new elements that are not registered in Revit libraries, therefore, new elements types were created according to chosen specifications. Elements Type had its structures, materials, layers, finishing and parameters detailed in Revit. And for each material inserted in a new element, also it is possible to edit features as the name, composition, colors, physical and thermal proprieties. This procedure was done for each element in BIM model. It is possible also to save the created Families, so then, new elements could be used in others and future projects.

ISBN: 978-85-92631-00-0

4.2 Inserting energy parameters

The next step performed was to determine Embodied Energy (EE) of all elements. At "Manage" tab the option "Shared Parameters" was selected in order to create new parameters, which could be used on several Families. All Shared Parameters created are listed on Table 2.

Table 2. List of parameters inserted in Revit and theirs adopted symbols

Description	Parameters name assigned in Revit	Symbols used in equations
Density	Density (kg/m³)	d
Materials Embodied Energy	EE Material (MJ/kg);	EE
Wastage rate	Wastage (%)	w
Embodied Energy in material wastage	EE Wastage (MJ/kg);	EE_w
Energy consumption in material transportation	EE Material Transportation(MJ/kg);	EE_t
Energy consumption in material wastage transportation	EE Wastage Transportation (MJ/kg),	EE_{wt}

Once the new Shared Parameters were completed, it was necessary to create "Type Parameters", which specify parameters that could be added in elements categories of a model and then, it could be used and showed in tables. Numeric values can be attributed on Type Parameters, and these numbers will appear in all parameters of all same elements type automatically. For example, for all floors that was defined as "Floor Type 1", parameters of EE would have the same value on BIM model. Figure 2 presents an image of parameters showed in type proprieties window.

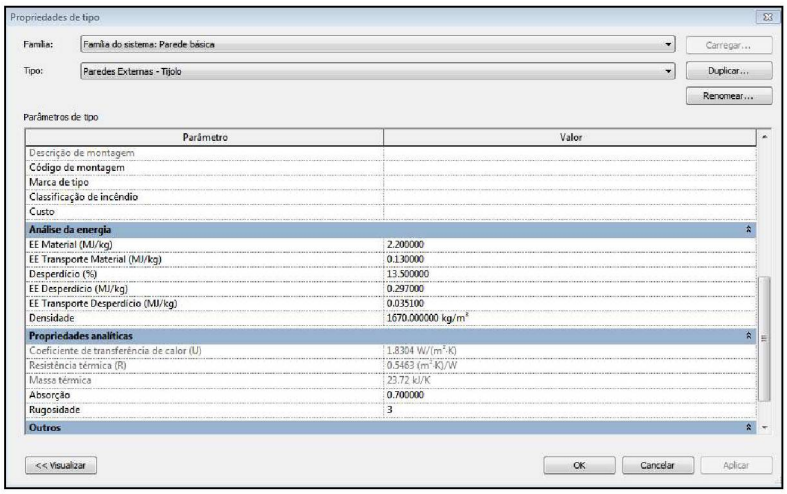


Figure 2. New parameters in Type properties window

4.3 Attributing and calculating energy parameters values

It was used values determined by Tavares (2006) to attribute energy values in each element. As done in Araujo (2015) method, for those elements that have more than one material in its composition, such as walls with various layers, doors and windows, the values of energy

ISBN: 978-85-92631-00-0

parameters was calculated based on material proportion related at total volume and their densities. The next example presents how parameters of internal walls were calculated. These walls were created on software as composed by with 9.0 cm brick thickness and 3.0 cm of concrete on both side representing mortar and plaster. The total sum results wall thickness of 15.0 cm. Table 3 presents density and embodied energy values for each materials and theirs wastage rate, using as example the Internal Wall Type.

Table 3. Energy values assigned for materials used on Internal Wall Type

Material	EE_{brick}	$EE1_{brick}$	w	d
	MJ/kg	MJ/m³	%	kg/ m³
Brick	2.90	4060.00	15	1400.00
Concrete	1.20	2760.00	10	2300.00

Equations 1 and 2 are used to calculate brick and concrete proportions at 1 meter of wall:

$$P_{brick} = e_{brick} / e_{wall} \quad (1)$$

$$P_{conc.} = e_{conc.} / e_{wall} \quad (2)$$

where e is thickness and P is proportion of each wall material. The proportion founded is 0.60 of brick and 0.40 of concrete. The Equation 3 are used to calculate the wall density in kg/ m³

$$P_{brick} \times d_{brick} + P_{conc.} \times d_{conc.} = d_{wall} \quad (3)$$

$$0.60 \times 1400 + 0.40 \times 2300 = 1760.00$$

Calculus of internal wall energy embodied is presented on Equation 4 in MJ/ m³ and in MJ/kg on Equation 5. Equation 6 represents calculus of wastage rate (w) in percentage.

$$P_{brick} \times EE1_{brick} + P_{conc.} \times EE1_{conc.} = EE1_{wall} \quad (4)$$

$$0.60 \times 4060 + 0.40 \times 2760 = 3540.00$$

$$EE1_{wall} \div d_{wall} = EE_{wall} \quad (5)$$

$$3540 \div 1760.00 = 2.01$$

$$P_{brick} \times w_{brick} + P_{conc} \times w_{conc} = w_{wall} \quad (6)$$

$$0.60 \times 15.0 + 0.40 \times 10.0 = 13.00$$

The embodied energy value of material wastage is equal to EE multiplied by its wastage rate.

$$EE_w = EE \times w \div 100 \quad (7)$$

To estimate energy consumption for materials transportation, distances from factories to construction site were not considerate, since the project is a nonexistent house. So it was attributed 80.0 km as a default distance, as Tavares (2006) method. The distance is applied at energy consumption index for diesel vehicles, 1.62 MJ/t/km, resulting in 0.13 MJ/kg. That index was considerate for all materials transportation in this paper. Material wastages need double transportation distance, since it comes and go to construction site, then, in these cases, transportation index is 0.26 MJ/kg.

ISBN: 978-85-92631-00-0

$$EE_{wt} = 0.26 \times w \div 100 \quad (8)$$

Same calculus procedure and equations were used for all others buildings elements. It was not considerate on BIM model any foundation, structural, mechanical, electrical and hydraulic components, such as plumbing, column, beam, etc. Once model was created to test the methodology only, projects were simplified in this study. However, for another elements, values entry way and parameters calculus should be done with same processes described.

4.4 Creating tables

After parameters insertion and calculation for all elements on the model, it was created tables by tools available in Revit to quantify and to sum values of energy embodied. One table for each Family were created, specifying previous existent parameters and the new ones related with EE. In the end is possible to add more columns on tables and insert equations and formulas in it in order to perform operations with table values. So, one more column was added to multiply volume column to the densities one and resulting in a Mass elements parameter, in kilogram unit.

Lastly, other column was added to calculate the Total Energy Embodied, which is the sum of all four energy parameters created (item 4.2), multiplied to elements mass, according Equation 9. It is possible to generate the sum of all total energy embodied, as displayed in Figure 3, that present an example of created table.

$$EE_{Total} = Mass \times (EE + EE_t + EE_w + EE_{wt}) \quad (9)$$

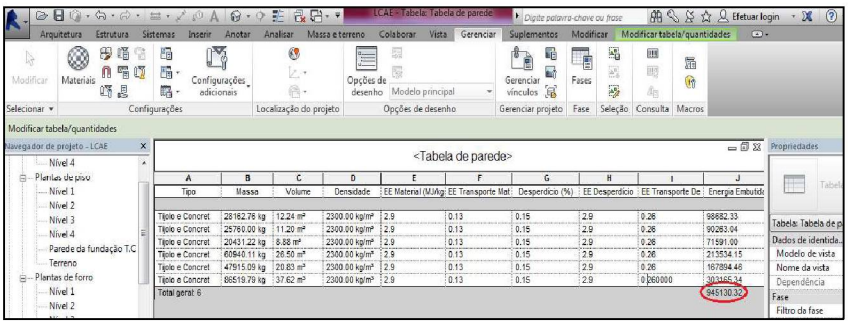


Figure 3. Example of table created for generating result of total EE

5. RESULTS

Through the Life Cycle Energy Assessment methodology proposed in this paper, it was possible to generate several tables, one for each Family category , in which are specified elements Types, parameters values and the sum of all energies embodied calculated. Total of seven tables were created, one for each Family, that is: ceiling, window, door, floor, roof, slab and wall. The software does not allow to insert all data at same table, if it would, probably the sum of all energy values would be simpler. Therefore, energy embodied values for each families needed to be sum separately before find the final result. However, it is allowed to export table as text file (.txt) and then, it is possible to work the results in several ways, including as spreadsheets.

On Table 4 are detailed all entry parameters values, mass and EE values calculated.

ISBN: 978-85-92631-00-0

Table 4. Results generated in Revit tables

Type	Mass	EE Material	EE Material Transportation	EE Material Wastage	EE Wastage Transportation	EE Total
		(MJ/kg)	(MJ/kg)	(MJ/kg)	(MJ/kg)	(MJ)
Gypsum board ceiling	370.39	6.10	0.13	0.00	0.00	2307.54
Gypsum board ceiling	855.36	6.10	0.13	0.00	0.00	5328.89
Gypsum board ceiling	166.32	6.10	0.13	0.00	0.00	1036.17
Bat room window	9.30	15.60	0.13	0.39	0.01	149.95
Bathroom window	9.30	15.60	0.13	0.39	0.01	149.95
Generic window	1.82	16.72	0.13	0.53	0.01	31.58
Generic window	1.82	16.72	0.13	0.53	0.01	31.58
Generic window	1.82	16.72	0.13	0.53	0.01	31.58
Generic window	1.82	16.72	0.13	0.53	0.01	31.58
Generic window	1.82	16.72	0.13	0.53	0.01	31.58
Generic window	1.82	16.72	0.13	0.53	0.01	31.58
External Wall	9109.02	2.20	0.13	0.30	0.04	24,249.11
External Wall	11,350.16	2.20	0.13	0.30	0.04	30,215.25
External Wall	9266.00	2.20	0.13	0.30	0.04	24,667.01
External Wall	100,606.40	2.20	0.13	0.30	0.04	28,235.30
Internal Wall	3703.92	2.01	0.13	0.26	0.03	9025.28
Internal Wall	4517.01	2.01	0.13	0.26	0.03	11,006.52
Internal Wall s	3107.91	2.01	0.13	0.26	0.03	7572.99
Ceramic floor tile	3888.00	5.00	0.13	0.00	0.00	19,945.44
Ceramic floor tile	756.00	5.00	0.13	0.00	0.00	3878.28
Floating wood tile	547.17	7.50	0.13	1.13	0.04	4811.81
Wood door.	57.92	3.50	0.13	0.00	0.00	210.23
Wood door.	57.92	3.50	0.13	0.00	0.00	210.23
Wood door.	57.92	3.50	0.13	0.00	0.00	210.23
Red ceramic roof tile	5813.58	5.40	0.13	0.00	0.00	32,149.08
Slab	13,372.49	1.20	0.13	0.12	0.03	19,737.79
Total						**225,286.53**

As presented in Table 4, the Total Energy Embodied, summing all elements results of this model, was 2225,286.53 MJ, or 225.29 GJ. According Tavares (2006), some international researches presented values of building energy embodied around 4.0 and 4.5 GJ/m^2. However in a Brazilian scenery, considering that environmental analyses inputs are not properly detailed in construction sector, existing data shows numbers around 3.0 a 4.0 GJ/m^2. The residence model tested in this paper has 106 m^2, and so the final embodied energy value is 2.13 GJ/m^2. This can be considerate a reasonable result, once the level of detail is minimum because only seven elements composed the BIM model.

The proposed methodology generated results in non-editable tables, so using others software as a complement became necessary to process and compile data on a useful way. However, the primary advantage observed was the facility and processes simplification. When Shared Parameters are created, it is possible to use them in any project or model. The same thing occurs with Type Parameters, whose values will be automatically generate every time that these parameters are used again to specify a Family element, since it has been correctly saved. So if the method is applied many times by the professional who does project review or environmental and life cycle analyses, over time it will be created a complete and diverse element library with parameters previously defined. Then, once all data had been insert already, during antecedent projects, to apply a new assessment it would be necessary

ISBN: 978-85-92631-00-0

just to generate tables from new model. Except to transportations parameters, that changes in function of distances, type of vehicle and fuel.

Using BIM tools allows to rise projects performances, making it easy and reducing time of work. Therefore, it is relevant that these aspects be achieved by proposed methodology. Another significant characteristic observed during methodology processes is the facility in to modify project elements, shapes and anything else, without need to calculate or reinsertion data and numbers of elements changed. For example, if you change the room area by modifying wall position or its measures, so Revit will calculate new volumes automatically, and then the final results also will be updated at the same time. Conventional LCA process usually uses spreadsheets to calculate energy parameters from estimated volumes and materials quantitative, based on building areas, So in those cases, if changes are made on elements or areas, values alterations will be done manually at the spreadsheet, and all volumes would need to be recalculate, modifying again the materials quantitative to generate new results. It is an exhausting rework and also would have a risk to occurs several errors, because usually a lot of modifications are made in a project during deseing stage.

6. CONCLUSION

The proposal of testing a new methodology of a building Life Cycle Energy Assessment for pre-operation phase occurs from lack of simple tools and practices that help in selection of materials by designers in AEC industry. Results obtained in this paper are satisfactory once the proposed methodology is viable and accessible. The main differential characteristic of the method is the facility to calculate values of embodied energy, testing many different materials and several design layouts, without need a lot effort in data insertion, volumes and mass calculus or to estimate quantities.

Thus, it is possible to legitimize achievement for what BIM is aiming to: reducing efforts; rising projects its processes performance; and to accurate and organize information. There are still some little troubles and difficulties on new BIM tools, but it is in constantly technological evolution.

Finally, the proposed method in this paper contribute to impulse and to incentive environmental impacts analyses on construction industry, allowing it to be used in first design stage to appropriate material selection and improving sustainable choices. Building materials and processes decisions based on energy consumption should measure all impacts caused from all production cycle and resource transportations, connecting this with building energy performance and its further deconstruction and recycle. For that reason, this study also propose a link from BIM model and embodied energy analyses to a sequel on the LCA, involving building efficiency energy simulations and thermal and acoustic comfort conditions in operation phase at future researches.

REFERERENCES

Antón, L. A. & Díaz J. 2014. Integration of life cycle assessment in a BIM environment. *Procedia Engineering: Elsevier* 85: 26-32

Araujo, A. M. F. 2015. Avaliação do ciclo de vida energético de construções durante a fase pré-operacional com auxílio de ferramentas BIM (in Portuguese). Monograph (Postgraduate degree in Sustainable Constructions) – Federal Technologic University of Paraná, Curitiba, 53 p.

ISBN: 978-85-92631-00-0

Brazilian Association of Technical Standards (ABNT - in Portuguese). 2013 NBR 15575: Desempenho de edificações habitacionais. Brazil: Rio de Janeiro

Bueno, C.; Rossignolo, J. A.; Ometto, A. R. 2013. Life cycle assessment and the environmental certification systems of buildings. *Gestão e Tecnologia de Projeto* 8: 7-18.

Eastman, C.; Teicholz, P.; Sacks, R.; Liston, K. (2 ed.) 2011. BIM Handbook: A guide to Building Information Modeling for owners, designers, engineers and contractors. New Jersey: Jhon Wiley & Sons, Hoboken.

International Organization for Standardization. ISO 14040: 2006. Environmental management - Life cycle assessment: Principles and framework. Genebra, 20p.

Saade, M. R. M.; Silva, M. G.; Gomes, V. 2014. Methodological discussion and piloting of LCA-based environmental indicators for product stage assessment of Brazilian buildings. *Gestão e Tecnologia de Projetos*, São Paulo, v. 9, n. 19, 43-62.

Silva, L. P. 2012. Análise do ciclo de vida energético de habitações de interesse social (in Portuguese).. Tesis (Master degree in Engineering) – Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 185 p.

Tavares, S. F. 2006. Metodologia de análise do ciclo de vida energético de edificações residenciais brasileiras (in Portuguese). Tesis (Doctoral degree in Civil Engineering) - Federal University of Santa Catarina, Florianópolis, 225 p.

Yung, P. & Wang, X. 2014. A 6D CAD Model for the automatic assessment of building sustainability. *International Journal of Advanced Robotic Systems* 11: 131, 10 p.

ANEXO 3 – ARTIGO: ANÁLISE DO PROCESSO DE EXPORTAÇÃO DE MODELO BIM DESENVOLVIDO NO REVIT PARA O ENERGYPLUS VIA OPENSTUDIO

481. ANÁLISE DO PROCESSO DE EXPORTAÇÃO DE MODELO BIM DESENVOLVIDO NO REVIT PARA O ENERGYPLUS VIA OPENSTUDIO

*ARAUJO, Aline M. F * [1](aline.mfaraujo@hotmail.com); TAVARES, Sergio Fernando [1] (sergioftavares@gmail.com); SCHEER, Sergio [1] (scheer@ufpr.br).*

[1] Universidade Federal do Paraná (UFPR), Brasil.

**Autor correspondente*

RESUMO

É fundamental a realização de analises ambientais e estimativas de consumo de recursos naturas, como água e energia nos novos projetos na indústria de AEC para que tais consumos possam ser planejados e minimizados. O presente trabalho tem como objetivo avaliar a exportação de um modelo arquitetônico de uma edificação residencial desenvolvido no Revit para o software de simulação termo-energética EnergyPlus com o auxílio do Plug-in OpenStudio. O OpenStudio é capaz de receber o modelo BIM com todas suas informações no formato gbXML e transformar o mesmo arquivo no formato IDF (*EnergyPlus Input Data Files*), mantendo as informações do modelo original. Após a exportação do modelo, os dados e informações relativas à localização, coordenadas, geometrias, reconhecimento das diferentes zonas térmicas, padrões de consumo energético, entre outras, foram verificados. Em seguida foi simulado o consumo energético anual da edificação no EnergyPlus utilizando os parâmetros e geometria do modelo BIM exportado. Paralelamente, outra simulação foi realizada a partir de geometria e parâmetros inseridos de forma manual no mesmo software, diretamente no arquivo IDF, mantendo as mesmas condições, dimensões e materiais especificados. Os resultados das duas simulações foram comparados. O processo de exportação do modelo BIM foi considerado parcialmente satisfatório.

Palavras-chave: BIM; Interoperabilidade; Revit; OpenStudio; EnergyPlus

EXPORTATION PROCESS ANALYSIS OF BIM MODEL FROM REVIT TO ENERGYPLUS USING OPENSTUDIO

ABSTRACT

It is essential to conduct environmental analyzes to estimate consumption of natural resources such as water and energy in AEC industry new projects. This paper aims to evaluate the process of exporting architectural model developed on Revit to EnergyPlus with OpenStudio plug-in. OpenStudio is able to receive BIM model as gbXML format and then, to transform the same file into EnergyPlus Input Data Files (IDF) format, keeping original data. After exportation process, model data and information about location, coordinates, geometries, thermal zones, energy consumption patterns, and others, were verified. Then, annual building energy consumption was simulated on EnergyPlus using exported parameters. Another simulation was performed with directly IDF file inputs, maintaining same conditions, dimensions and materials. The results about the exportation process and thermal simulations was partially satisfactory.

Keywords: BIM; Interoperability; Revit; OpenStudio; EnergyPlus.

1. INTRODUÇÃO

Segundo Eastman et al. (2011), os problemas mais comuns associados à troca de informação e comunicação através das bases em 2D durante a fase de projeto são a demanda de tempo e despesas necessárias para gerar informações significativas sobre o projeto proposto. Normalmente análises são realizadas de forma aprofundada somente durante a obra ou quando a edificação já

está finalizada, impossibilitando ajustes e soluções eficientes. Devido à falta de processos interativos no projeto, algumas inconsistências só podem ser percebidas na execução, o que pode comprometer o projeto original e todo seu andamento. Portanto, é fundamental o uso de tecnologias que envolvam modelos inteligentes e troca de informação para o desenvolvimento de construções mais sustentáveis. Visto isso, o presente trabalho pretende analisar a interoperabilidade entre duas ferramentas que vêm sendo amplamente utilizadas em projetos que envolvem modelagem BIM e análises energéticas.

1.1 Modelagem da Informação da Construção e Interoperabilidade

O *Building Information Modeling* (BIM), em português, Modelagem da Informação da Construção, é um conceito de modelagem que apresenta todo o conjunto real do edifício, uma vez que considera todas informações digitalizadas e relacionadas ao projeto, fornecendo desenhos conceituais e detalhados, permitindo que a construtibilidade seja analisada antes da execução. O BIM é um dos avanços mais promissores na indústria de arquitetura, engenharia e construção (AEC). Com esta tecnologia é possível criar modelos virtuais de edificações de forma extremamente acurada. Quando prontos, estes modelos gerados contêm geometrias precisas e dados necessários para representar e auxiliar a construção, fabricação e também a aquisição de produtos para a edificação (EASTMAN et al., 2011). Segundo Yung e Wang (2014), o BIM é uma técnica que usa modelos 3D em conjunto com outras ferramentas inteligentes para se obter informações importantes sobre o projeto e construção, como por exemplo, informações relacionadas ao tempo e cronogramas (4D), e custos e orçamentos (5D). Em relação à sexta dimensão do BIM, ainda não há um conceito bem definido entre os diversos autores e pesquisadores da área, porém pode-se afirmar que o termo BIM 6D abrange o ciclo de vida da construção voltado ao desempenho, manutenção e sustentabilidade. Ou seja, uma vez que o BIM permite que informações multidisciplinares estejam presentes em um modelo, cria-se uma oportunidade para que índices de sustentabilidade sejam incorporados ao longo do processo de concepção (JRADE; ABDULLA, 2012).

O intercâmbio de dados entre duas aplicações diferentes pode ser feito de quatro maneiras: a) através de ligações diretas entre ferramentas BIM específicas; b) por formatos de arquivos de intercambio proprietários, desenvolvidos por uma empresa para interfacear outro aplicativo daquela mesma companhia ou outra específica; c) formatos públicos de intercambio, os quais envolvem o uso de um padrão aberto para os modelos. O Industry Foundation Classes (IFC), por exemplo, é uma das principais opções internacionais de formato de intercambio público, foi desenvolvido para criar um grande conjunto de dados e informações e permitir que estes sejam intercambiados entre diversas aplicações na indústria de AEC; d) formatos de intercambio baseados em *eXtensible Markup Language* (XML), que é uma extensão para o HTML, a linguagem usada para enviar informações pela web. Diversas plataformas oferecem a alternativa de transferência de arquivo no formato *Green Building* XML (gbXML), o qual foi desenvolvido para transferir informações necessárias para análise de energia e do envelope de construções, zonas térmicas e simulação de equipamentos mecânicos (EASTMAN et al., 2011).

Segundo Miller et al. (2014), o acesso convencional às informações contidas nos modelos BIM basea-se em formatos de dados como gbXML e arquivos IFC para interoperabilidade com programas de simulação energética. Porém, usuários destes formatos possuem pouco controle sobre como eles são criados ou carregados, e portanto, a extração de dados e a interoperabilidade ficam limitados. Ugliotti et al. (2016) também concorda que indústria da construção ainda é muito inconsistente em termos de adoção da exportação de dados do BIM para software de análise. A

principal limitação é que a exportação de modelos por formatos IFC e XML é imperfeita e nem sempre fornece uma fonte confiável de dados geométricos. Por outro lado, a maior parte dos pesquisadores concordam que há muito potencial neste processo. A dificuldade para a exportação adequada se dá por diversos fatores, como: a grande variedade de software disponíveis e tipos de análises; do nível de experiência do usuário; meios de obenção de propriedades físicas do edifício; preferências pessoais em termos de fluxo de trabalho; e o nível de detalhamento do modelo. Por conseguinte, são necessárias novas investigações e maior desenvolvimento no sentido de otimizar o compartilhamento de dados e automatizar os processos através de padrões comuns, tornando rentável a simulação energética durante a etapa de projeto de edificações.

1.2 Software de simulação energética

O Revit é uma ferramenta desenvolvida pela Autodesk para a criação de projetos em BIM. O software está disponível comercialmente e permite a modelagem parametrizada em 3D para projetos arquitetônicos, estruturais e complementares. O programa também apresenta uma ferramenta chamada Energy Analysis que permite realizar simulações energéticas dos modelos, produzindo relatórios do comportamento energético da edificação. Porém, as análises possuem algumas restrições e muitas vezes apresentam informações superficiais e insuficientes, necessitando de ferramentas complementares para análises mais detalhadas do desempenho (QUEIRÓZ et al. 2015). Ferramentas específicas para análises energéticas do edifício também foram disponibilizadas pela própria empresa desenvolvedora do Revit oferecendo mais opções de compatibilidade de dados, como por exemplo o Ecotect e Green Building Studio.
Por outro lado, o EnergyPlus é um software gratuito amplamente utilizado em pesquisas de simulação energética no mundo todo. De acordo com Silva et al. (2016), o EnergyPlus é um programa de código aberto que foi desenvolvido em colaboração entre diversos institutos acadêmicos, pesquisadores e laboratórios nacionais do Departamento de Energia dos EUA (DOE). A ferramenta possui uma longa história de testes analíticos e comparativos, sendo constantemente atualizado com novas versões.
O programa EnergyPlus foi escolhido para este estudo de interoperabilidade com o Revit devido ao seu reconhecimento como ferramenta para simulação dinâmica de edifício. Diversas publicações analisam e validam o uso desta ferramenta de forma positiva. Gomes (2010) estudou a validação da modelagem com o programa EnergyPlus por comparação de medições *in situ*. No estudo de Shabunko et al. (2016) foram desenvolvidos modelos no EnergyPlus para de projetos de construção tipicamente usado em habitações na Ásia, comparando o desempenho energético de 400 edifícios. Yang et al. (2015) avaliaram a precisão e a aplicabilidade de modelos térmicos no EnergyPlus para calcular os efeitos da umidade e das taxas de infiltração sobre o consumo de energia. Já, Barbosa et al. (2013) avaliaram o desempenho térmico de um ambiente com fachada dupla, mostrando vantagens do EnergyPlus em relação às simulações por Dinâmica dos Fluidos Computacional (*Computacional Fluid Dynamics* - CFD) por considerar as variações anuais das condições de contorno. Batista et al. (2011) avaliaram os algoritmos que o software utiliza para a simulação dos processos de condução e convecção, assim como Anđelković et al. (2016), que empregam o modelo de rede *Airflow Network* para ventilação natural, e apresentam como resultado um alto nível de correspondência entre valores reais medidos e valores simulados. A NBR 15.575 (ABNT, 2013) também recomenda o emprego do EnergyPlus para a realização das simulações computacionais de desempenho térmico. A norma permite a utilização de outros programas, desde sejam validados pela *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers* (ASHRAE) - Standard 140. O Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de

Edificações Residenciais (RTQ-R), elaborado pela Eletrobras e Procel (2012), também recomenda o uso deste programa.

Yu et al. (2015) consideram o EnergyPlus como parte da nova geração de software de análise de consumo de energia. Porém, os autores consideram a interface do programa extremamente hostil e sua operabilidade complicada. A edição do arquivo de entrada é demorada e os dados devem ser absolutamente precisos. Os usuários precisam examinar o arquivo de erros e modificar repetidamente. Por isso, exige um operador experiente para edição do arquivo de entrada. A fim de incentivar e também facilitar o uso do EnergyPlus, algumas ferramentas foram desenvolvidas para criar interfaces mais "amigáveis" com o software, como por exemplo o OpenStudio, uma plataforma de ferramentas que dão suporte em simulações energéticas no EnergyPlus. Entre as aplicações gráficas, está incluso o *plug-in* do OpenStudio para o SketchUp (Trimble), que permite aos usuários criar rapidamente a geometria necessária para a simulação.

Diversos autores vêm estudando as diferentes formas de se exportar modelos BIM desenvolvidos no Revit para o EnergyPlus, a fim de realizar análises e simulações energéticas mais precisas e evitar a reentrada de informação e modelagem da geometria. Gouveia et al. (2014) analisaram a possibilidade de exportação da geometria do Revit no formato gbXML para o EnergyPlus com o auxílio do programa Ecotect Analysis, Sketchup e Legacy OpenStudio. Foi verificado o reconhecimento das zonas térmicas e geometria parcial, porém ocorreu supressão das espessuras de paredes, pisos e cobertura. Miller et al. (2014) também desenvolveram um modelo no Revit para ser extraído para o EnergyPlus por meio do Design Performance Viewer (DPV). Foi utilizado o RevitPythonShell (RPS) para converter o modelo de dados BIM em uma representação geométrica no formato IDF para o EnergyPlus. O processo de tradução da geometria incluiu muitos desafios no que diz respeito à criação de zonas e simplificação de modelos e alguns detalhes precisaram ser ajustados manualmente após o processo de extração, uma vez que o modelo de geometria inicialmente produzido possuía algumas incompatibilidades.

Queiróz et al. (2016) analisaram as diversas possibilidades para exportação de modelos digitais de edificações produzidos no Revit 2016 para EnergyPlus 8.4.0. Foram exportados, nos formatos de arquivos IDF e gbXML, modelos produzidos no Revit com diferentes opções de configurações do programa, e posteriormente, estes foram comparados com o modelo de referência produzido diretamente no EnergyPLus. A verificação dos arquivos exportados foi realizada com o auxílio do plug-in Legacy OpenStudio no SketchUp, identificando parâmetros definidos na geometria e propriedades dos materiais empregados no modelo BIM. Os resultados apontaram que os modelos exportados como massas conceituais, assim como as exportações realizadas a partir dos resultados de analises do Revit, ou pelo Green Building Studio, apresentaram maiores distorções geométricas, e não foram capazes de identificar os materiais e respectivas propriedades térmicas do modelo. O modelo de construção, proveniente do arquivo gbXML, exportado do menu principal do Revit, configurou-se como melhor opção para utilização no EnergyPlus.

2. OBJETIVO

O presente trabalho tem como objetivo avaliar e validar a exportação do modelo BIM de uma edificação residencial desenvolvido no Revit para o software de simulação termo-energética EnergyPlus utilizando o OpenStudio. A partir disso, será possível identificar as dificuldades de interoperabilidade entre os dois softwares e apontar os recursos necessários para aprimorar este processo, e desta forma, contribuir para o desenvolvimento de um fluxo de trabalho na utilização do BIM em análises energéticas.

3. MÉTODO DE PESQUISA

A metodologia desenvolvida foi realizada em quatro etapas principais, e em cada uma delas foi analisada transferência de informação entre os arquivos.

3.1 Criação do modelo BIM

Foi desenvolvido o modelo de uma edificação residencial utilizando o Revit 2016. O protótipo criado para a realização deste estudo é o modelo de uma casa composta por uma sala, dois dormitórios, um banheiro e uma cozinha integrada com a área de serviço, distribuídos em aproximadamente 58 m^2. Foi atribuído ao modelo a localização de um terreno situado na cidade de Curitiba-PR, com as janelas dos dois dormitórios voltadas para a direção Norte. Para cada elemento componente do modelo foram especificados materiais. Foram atribuídos, em cada material componente da casa, valores numéricos para espessuras, condutividade térmica, calor específico e densidade. Com a espessura e condutividade térmica dos materiais, o Revit calcula automaticamente a resistência térmica de cada superfície.

O Revit disponibiliza dois componentes independentes para delimitar uma área de interesse no projeto: Ambiente e Espaço. A definição destes componentes no modelo é essencial para realizar análises energéticas e exportações por gbXML. Um Ambiente armazena valores em parâmetros variados que afetam a análise de cargas para aquecimento ou resfriamento. Os Ambientes são componentes de arquitetura utilizados para manter as informações sobre áreas de ocupação onde são colocados. Já os espaços, são usados nas disciplinas de instalações complementares ou MEP (Mechanical, Electrical and Plumbing) para analisar volumes, não necessariamente ocupados.

Antes de exportar o modelo pronto, foram ajustados todos os parâmetros de rotinas de cronograma (*schedules*) de ocupação, cargas térmicas para iluminação e equipamentos. Foram delimitados também os Ambientes e Espaços do modelo para que as informações de cada cômodo possam ser armazenadas e exportadas de forma adequada. Os Ambientes e Espaços delimitados devem, posteriormente, ser identificados no EnergyPlus como zonas térmicas para a simulação energética. A metodologia incluiu exportações no formato gbXML especificado por Ambientes e também por Espaços, com o intuito de comparar estes dois componentes e respectivos formatos de compartilhamento de informações.

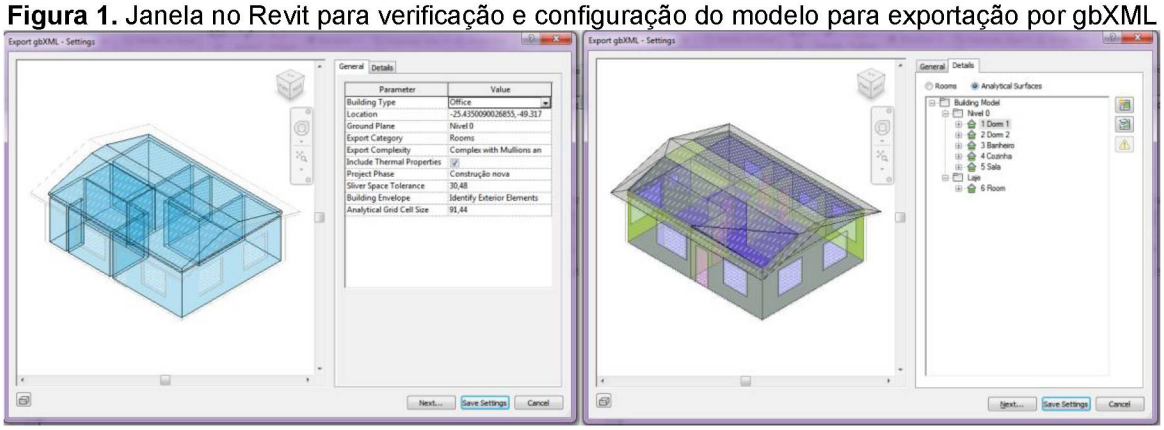
3.2 Exportação no formato gbXML

Os cinco cômodos foram especificados como Ambientes, assim como a área entre a laje e o telhado. Depois de todos ajustes realizados, o modelo foi exportado no formato gbXML no menu principal do Revit. Porém, antes de finalizar a exportação, é necessário configurar as informações do projeto. Foi solicitado ao software a exportação por ambientes, com superfícies complexas e propriedades térmicas inclusas, identificando as superfícies externas. Nesta etapa é possível verificar os ambientes delimitados, e observar as superfícies analíticas reconhecidas pelo programa. Caso haja erros de identificação das superfícies e/ou ambientes, estes serão apresentados nesta etapa, possibilitando ao usuário corrigi-los antes de efetuar a exportação, e consequentemente, reduzir erros de geometria e camadas de materiais para o arquivo gbXML. Por padrão, o Revit não calcula automaticamente os volumes de Ambientes, portanto, nesta etapa é necessário ativar o cálculo de volumes, e corrigir os mesmos, caso necessário.

A exportação por Espaços é feita da mesma forma que pela categoria Ambientes, porém, existem diferentes opções de configuração. Durante a exportação do arquivo é possível optar por gerar

padrões conceituais, já pré-definidos pelo programa. Porém, como no estudo realizado foi exportado o modelo com as características originais, esta opção não foi selecionada.

Figura 1. Janela no Revit para verificação e configuração do modelo para exportação por gbXML



3.3 Importação dos arquivos para o EnergyPlus com o OpenStudio

Após a exportação do modelo, na barra de extensões do Sketchup 2016, foi selecionado o *plug-in* OpenStudio 1.10.0 para realizar a importação do arquivo gbXML. O modelo importado pode ter sua geometria analisada, conforme mostra a Figura 2, e caso seja necessário, as superfícies podem ser facilmente modificadas no Sketchup. Posteriormente, este novo arquivo foi exportado no formato IDF. Os arquivos IDF do modelo foram abertos no *IDF Editor* do EnergyPlus 8.4.0. Nesse editor de arquivo é onde são inseridos todos os parâmetros de entrada do software para configurar a simulação da forma desejada. Nesta etapa foram analisadas as informações do modelo que foram reconhecidas, ou não, no processo de exportação. Foram observados os parâmetros de entrada descritos na Tabela 1.

Figura 2. Vista de modelo 3D desenvolvido no Revit (esquerda) e vista geometria exportada no Sketchup

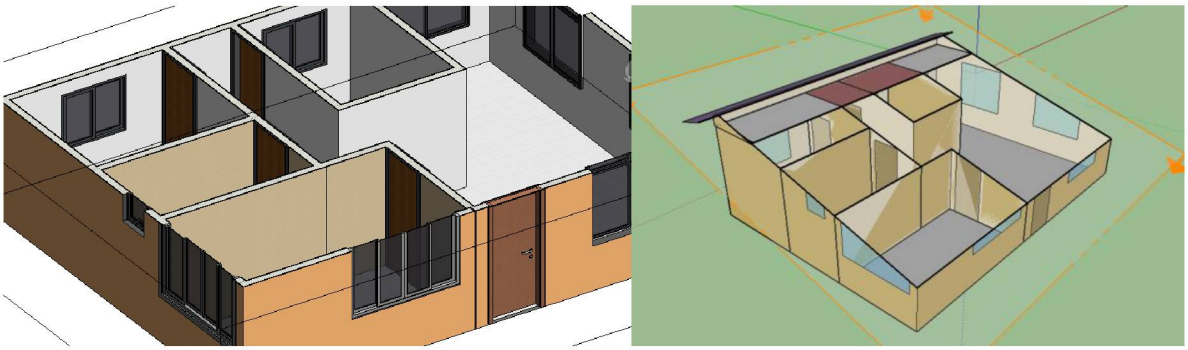


Tabela 1. Parâmetros de entrada observados no EnergyPlus

CLASSE	LISTA	DESCRIÇÃO
Location and Climate	*Site: Location*	coordenadas geográficas, fuso horário e altitude
Schedules	Todas	rotinas de cronograma diárias, semanais e anuais
Surface Construction Elements	*Material*	rugosidade, espessura, condutividade, densidade, calor específico, absortância
	Material: NoMass	rugosidade, resistência térmica, absortância
	Window Material: SimpleGlazingSystem	fator U, coeficiente de ganho de calor por radiação e transmitância visível da janela
	Construction	elementos construtivos e respectivas camadas
Thermal Zones and Surfaces	*Zones*	zonas térmicas
	BuildingSurface: Detailed	superfícies e respectivos elementos construtivos
	FenestrationSurface: Detailed	elementos de portas e janelas
	Shading; Building: Detailed	objetos e superfícies de sombreamento
Internal Gains	*People, Lights e Electric Equipment*	ganhos de calor, relacionados com as *Schedules*

3.4 Simulação no EnergyPlus

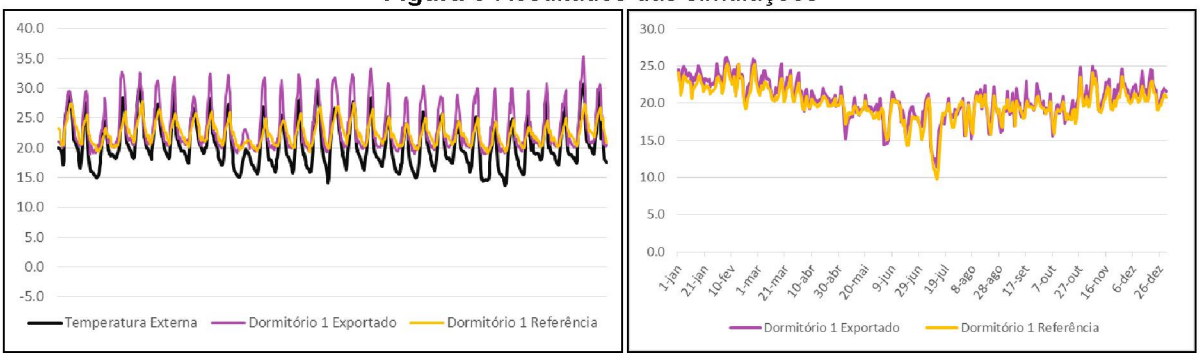
Os dois arquivos exportados foram configurados com os mesmos padrões do arquivo de referência criado no EnergyPlus. Foram feitos os ajustes necessários e a configuração do sistema de ventilação natural com abertura das janelas. Foi adicionado o arquivo climático *Test Reference Year* (TRY) de Curitiba, desenvolvido pelo Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (LabEEE) da UFSC. De acordo com Melo et al. (2009), o arquivo climático TRY representa um ano de dados médios para um local específico, sem extremos de temperatura. Este arquivo compreende as variáveis de temperatura de bulbo seco, temperatura de orvalho, umidade relativa do ar, direção e velocidade dos ventos, nebulosidade, pressão barométrica e radiação solar. Após zerados os erros, as simulações dos três arquivos foram executadas, gerando resultados de temperatura média por hora em cada zona térmica, durante um ano.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O arquivo exportado do Revit definido como Ambiente e o definido por Espaço geraram arquivos IDF praticamente idênticos. As informações referentes à localização e coordenadas da edificação não foram identificadas no processo de exportação. Porém, é possível reconhecer que a orientação do modelo não foi alterada, uma vez que o eixo verde do Sketchup, por padrão, é a direção Norte.
Quanto às informações de *schedules*, a exportação por Ambiente não reconheceu nenhum padrão. A exportação por Espaços reconheceu automaticamente as duas rotinas diárias, semanais e anuais configuradas no Revit. Porém, estes *schedules* não foram relacionados com as listas de *Internal Gains* para configurar as rotinas de ocupação, iluminação e equipamentos elétricos, sendo necessária configuração manual destes parâmetros.
Dos 13 materiais definidos no modelo para compor a edificação, 12 foram exportados automaticamente. Sendo que, o material que compõe os elementos de porta foi o único identificado na lista de material com espessura, condutividade térmica e calor específico. Os outros 11 materiais foram reconhecidos no arquivo IDF como materiais sem massa, nos quais foram identificados apenas a resistência térmica calculada pelo Revit e a rugosidade, que foi classificada como lisa para todos eles. Segundo Gomes (2010), o parâmetro de rugosidade do material afeta o cálculo do coeficiente de transporte por convecção. A lista de materiais sem massa no EnergyPlus deve ser

utilizada para materiais com apenas resistência térmica conhecida e para todos os materiais que não acumulam calor na sua massa, geralmente mantas isolantes ou estanques, as quais contribuem pouco para a inércia térmica do ambiente. Ou seja, ainda que os valores de resistência térmica estejam corretos, os materiais que compõem as paredes, pisos e cobertura foram reconhecidos como materiais sem espessura pelo software de simulação, com rugosidade diferente da real e diferente do modelo de referência. Estes fatores podem afetar amplamente os resultados das simulações. Os materiais de janela não foram exportados no arquivo e, portanto, foi necessário adicioná-los manualmente e atrelar às superfícies de janela na lista *FenestrationSurface: Detailed*.
Os elementos construtivos foram exportados corretamente, com camadas de material bem definidas, excluindo apenas o elemento referente à janela. As seis zonas térmicas definidas como Ambiente ou Espaços, também foram corretamente identificadas. A geometria do modelo, quando observada visualmente no Sktetchup, não apresentou erros ou deformações em nenhum dos arquivos exportados. As superfícies detalhadas no EnergyPlus também foram corretamente identificadas, com coordenadas coerentes e relação de materiais componentes fiéis ao modelo original. É valido citar que os nomes dos materiais, elementos construtivos, zonas térmicas e outros, foram transformados em códigos numéricos. Porém, suas propriedades térmicas e geográficas se mantiveram corretas na exportação. Além da adição de elementos de janela e das rotinas de consumo energético, nenhum outro parâmetro de entrada citado foi modificado para realizar as simulações.
Por fim, como esperado, os resultados das simulações energéticas foram idênticos entre os dois arquivos exportados, porém, diferentes dos resultados do modelo de referência. Conforme os gráficos a seguir, é possível perceber que as temperaturas simuladas seguem uma tendência com um mesmo padrão e médias diárias aproximadas. Porém, as temperaturas internas em todos as zonas térmicas na simulação dos arquivos exportados sofreram maior amplitude térmica, ou seja, maiores máximos e mínimos diários, se comparados com a simulação do modelo de referência. Isso ocorreu porque os materiais das envoltórias foram reconhecidos no EnergyPlus como materiais sem massa e, portanto, com capacidade térmica nula. O gráfico apresentado no lado esquerdo da Figura 3 representa as temperaturas horárias na zona térmica Dormitório 1 simuladas para os arquivos exportados e modelo de referência em graus Celsius (ºC) ao longo do mês de janeiro. O gráfico à direita representa as temperaturas médias ao logo do ano para a mesma zona térmica.

Figura 3 Resultados das simulações



Fonte: Os autores

Os valores de transmitância térmica das paredes e cobertura foram reconhecidos corretamente pelo software no processo de exportação. Esta propriedade define a transmissão de calor em unidade de tempo através de uma área unitária de um componente construtivo, incluindo as resistências

superficiais interna e externa, induzida pela diferença de temperatura entre dois ambientes. Sua unidade no sistema internacional é [W/(m².K)]. A transmitância térmica é o inverso da resistência térmica total. Por outro lado, a capacidade térmica representa a quantidade de calor necessária para variar em uma unidade a temperatura de um sistema em [(kJ/m².K)]. A capacidade térmica de componentes formados por camadas homogêneas perpendiculares ao fluxo de calor é obtida pela multiplicação da espessura com a densidade e calor específico de cada material componente.

5. CONCLUSÃO

Com base no que foi identificado durante a revisão bibliográfica da literatura, foi desenvolvido o método aplicado neste estudo para realizar de forma eficaz a exportação de um modelo BIM desenvolvido no Revit para o software de simulação energética EnergyPlus. A partir dos resultados obtidos, é possível concluir que o processo de exportação, conforme realizado, foi parcialmente satisfatório.

Os dois arquivos exportados apresentaram uma geometria correta, sem erros e distorções aparentes, reconhecendo as coordenas de todas as superfícies, componentes de janelas, portas e elementos de sombreamento, não sendo necessário ajuste adicional da geometria para a simulação. Este resultado por si só já pode ser considerado como um avanço, uma vez que a grande parte dos pesquisadores normalmente identifica pequenas divergências nesta etapa. As seis zonas térmicas também foram reconhecidas como desejado. Os materiais componentes do modelo tiveram as propriedades de resistência térmica corretamente identificadas. Porém, ficaram listados como materiais sem massa no software, o que causou alterações significativas nos resultados. O ideal seria que estes materiais fossem identificados como complexos, com todas as propriedades detalhadas. Os *schedules* também tiveram informações faltantes, assim como a localização.

De forma geral, as informações inexistentes ou incorretas necessitam de processos simples de correção e modificação, que não demandam grande quantidade de tempo do usuário, como seria caso a geometria do modelo estivesse incorreta. Desta forma, o processo escolhido para exportação do modelo BIM para o software de simulação energética mostrou um grande potencial prático, capaz de aprimorar o fluxo de trabalho nesta área, necessitando apenas de pequenos ajustes de interoperabilidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANĐELKOVIĆ, A. S.; MUJAN, I.; DAKIĆ, S. Experimental validation of a EnergyPlus model: Application of a multi-storey naturally ventilated double skin façade. Energy and Buildings, v. 118, p. 27–36, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15575-1: Edificações Habitacionais Desempenho Parte 1 : Requisitos gerais Prefácio. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2013.

BARBOSA, S. A.; TIBÚRCIO, T. M. DE S.; CARLO, J. C.; GUIMARÃES, Í. B. B. Método de utilização do programa Energyplus para verificação de desempenho térmico de ambientes com fachadas duplas. Ambiente Construído, v. 13, n. 4, p. 121–134, 2013.

BATISTA, J. O.; LAMBERTS, R.; GÜTHS, S. Influências dos algoritmos de condução e convecção sobre os resultados de simulações do comportamento térmico de edificações. Ambiente Construído, v. 11, n. 4, p. 79–97, 2011.

EASTMAN, C.; TEICHOLZ, P.; SACKS, R.; LISTON, K. BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for owners, managers, designers, engineers and contractors. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2011.

ELETROBRAS; PROCEL. Manual para aplicação do RTQ-R, 2012.

GOMES, K. S. A. Validação da modelação de um edifício de habitação com o programa energyplus por comparação com medições "in situ", Porto, 100 p.,2010. Dissertação (Mestrado) – Universidade do Porto.

GOUVEIA, A. C. A.; ANDRADE, L. DE S.; ALVIM, L. G.; MAGALHÃES, A. G. DE. Obtenção de coordenadas da geometria de uma edificação para arquivo do energyplus utilizando o Revit. Construindo, v. 6, n. 2, p. 50–55, 2014.

JRADE, A.; ABDULLA, R. Integrating Building Information Modeling and Life Cycle Assessment Tools to design sustainable buildings. CIB W78 2012: 29th International Conference, , n. 29, p. 1–10, 2012. Beirut, Lebanon.

MELO, A. P.; WESTPHAL, F. S.; MATOS, M. Apostila Do Curso Básico Do Programa Energyplus. 2009.

MILLER, C.; THOMAS, D.; IRIGOYEN, S. D.; et al. BIM-extracted energyplus model calibration for retrofit analysis of a historically listed building in Switzerland. ASHRAE/IBPSA-USA Building Simulation Conference, 2014.

QUEIRÓZ, G. R.; SCHIMANIAK, N. K.; SANTOS, J. C. P.; GRIGOLETTI, G. C. Autodesk Revit como ferramenta BIM aplicada à simulação térmica de edificações. Revista de Arquitetura IMED, v. 4, n. 2, p. 33–41, 2015.

QUEIRÓZ, G.; SANTOS, J.; GRIGOLETTI, G. Estudo das exportações de modelos digitais produzidos no Autodesk Revit para simulações de edificações no Energy Plus. In: ANTAC (org.); Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, p.4975–4990, 2016. Porto Alegre.

SHABUNKO, V.; LIM, C. M.; MATHEW, S. EnergyPlus models for the benchmarking of residential buildings in Brunei Darussalam. Energy and Buildings, 2016.

SILVA, A. S.; ALMEIDA, L. S. S.; GHISI, E. Decision-making process for improving thermal and energy performance of residential buildings: A case study of constructive systems in Brazil. Energy and Buildings, v. 128, p. 270–286, 2016.

UGLIOTTI, F. M.; DELLOSTA, M.; OSELLO, A. BIM-based Energy Analysis Using Edilclima EC770 Plug-in, Case Study Archimede Library EEB Project. Procedia Engineering. v. 161, 2016.

YANG, J.; FU, H.; QIN, M. Evaluation of Different Thermal Models in EnergyPlus for Calculating Moisture Effects on Building Energy Consumption in Different Climate Conditions. Procedia Engineering, v. 121, p. 1635–1641, 2015.

YU, S.; CUI, Y.; XU, X.; FENG, G. Impact of Civil Envelope on Energy Consumption based on EnergyPlus. Procedia Engineering, v. 121, p. 1528–1534, 2015.

YUNG, P.; WANG, X. A 6D CAD model for the automatic assessment of building sustainability. International Journal of Advanced Robotic Systems, v. 11, n. 1, 2014.