

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL – PPGEC**

THAIS GONÇALVES SARTORI

**MEDIDAS DE RETROFIT EM EDIFÍCIOS TÍPICOS EXISTENTES DE UM BAIRRO:
DESEMPENHO E AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA ENERGÉTICO**

VITÓRIA-ES

2018

THAIS GONÇALVES SARTORI

**MEDIDAS DE RETROFIT EM EDIFÍCIOS TÍPICOS EXISTENTES DE UM BAIRRO:
DESEMPENHO E AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA ENERGÉTICO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, na área de concentração Construção Civil.

Orientador: Prof. Dr. Ing. João Luiz Calmon Nogueira da Gama

VITÓRIA-ES

2018

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
(Biblioteca Setorial Tecnológica,
Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

S251m Sartori, Thais Gonçalves, 1985-
Medidas de retrofit em edifícios típicos existentes de um
bairro : desempenho e avaliação do ciclo de vida energético /
Thais Gonçalves Sartori. – 2018.
177f. : il.

Orientador: João Luiz Calmon Nogueira da Gama.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade
Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Edifícios de apartamentos – Conservação de energia –
Jardim Camburi (Vitória, ES). 2. Simulação (Computadores).
3. Energia – Ciclos de vida – Avaliação. 4. Programa Brasileiro
de Etiquetagem de edificações (PBE Edifica). 5. Desempenho da
envoltória. 6. Retrofit. I. Gama, João Luiz Calmon Nogueira da. II.
Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. III.
Título.

CDU: 624

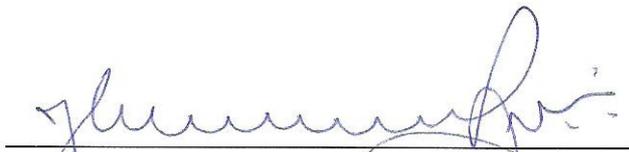
UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

MEDIDAS DE RETROFIT EM EDIFÍCIOS TÍPICOS EXISTENTES DE UM BAIRRO: DESEMPENHO E AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA ENERGÉTICO

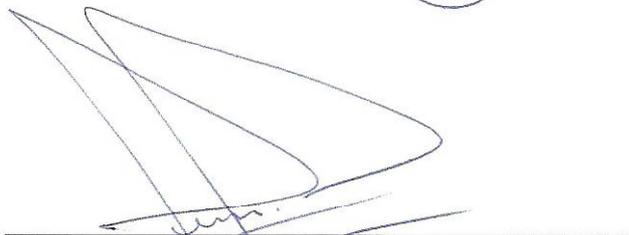
Thais Gonçalves Sartori

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Civil do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de Construção Civil.

Aprovada no dia **28 de maio de 2018** por:



Prof. Dr. João Luiz Calmon Nogueira da Gama
Doutor em Engenharia Civil
Orientador – UFES



Profa. Dra. Cristina Engel de Alvarez
Doutora em Arquitetura e Urbanismo
Examinadora Interna - UFES



Profa. Dra. Márcia Bissoli Dalvi
Doutora em Arquitetura e Urbanismo
Examinadora Externa - UFES

Vitória – ES, maio de 2018



Quino

AGRADECIMENTOS

De todo o aprendizado adquirido e trabalho realizado, de todos os erros e acertos; o sentimento se resume a uma palavra: GRATIDÃO. O mestrado contribui para o amadurecimento pessoal, para treinar a paciência e entender que tudo tem o seu tempo, para praticar a fé e levar a vida com mais leveza.

Assim, agradeço primeiramente a Deus, por permitir que tudo isso fosse possível. Ao Rafael e ao Jimi Jimmy, meus companheiros nessa jornada, e a quem dedico todo esse trabalho. Aos meus amados pais e irmã, Raquel, Deco e Joyce, por se fazerem presentes, mesmo estando longe.

Eterno carinho e gratidão pelos companheiros de LabesBIM, Marianne Cavalcante, Karine Bastos, Adrienne Moreira, Ana Beatriz Suzano, Luan Alves, Ernani Gaspar e Robson Zulcão; e aos monitores, Juliana Machado, Mariane Dantas e Natália Röepke. Obrigada pela troca, pelos cafés e pela agradável companhia. A Regiane, pela generosidade em compartilhar o seu trabalho.

Ao querido professor e orientador, João Luiz Calmon, pela dedicação, pelo companheirismo, pelo carinho, pela amizade, e sobretudo, pelo amor pelo que faz. Obrigada por acreditar e por me fazer acreditar no meu potencial.

À prima querida e grande professora de português, Fabíola Barreto, que tão solícitamente me ajudou na formatação desse trabalho.

Agradeço a Márcio Sorgato e a Roberto Lamberts, ambos da UFSC, por responderem tão solícitamente às dúvidas relativas ao programa de simulação; e a Alexandre Cyan, por me dar as primeiras diretrizes sobre o funcionamento do software.

Aos professores do mestrado, Geilma Vieira, Cristina Engel, Maristela Gomes, Marta Monteiro e Jamila Teixeira, por compartilharem o conhecimento com tanta dedicação. A Ingrid e ao Sidney, importantes nos processos burocráticos do mestrado.

Agradeço à FAPES pelo apoio financeiro, que me deu tranquilidade para me dedicar a este trabalho.

RESUMO

Muitos dos impactos ambientais provenientes da indústria da construção civil estão relacionados com o consumo de energia. As edificações consomem um percentual significativo do total de energia elétrica gerado no Brasil, sobretudo o setor residencial. Uma das formas de reduzir os impactos das edificações é aumentar a sua eficiência energética, seja por meio da adoção de equipamentos mais eficientes ou através da adoção de técnicas e materiais mais compatíveis com as características climáticas. Um dos objetivos do retrofit é aumentar a eficiência operacional e energética da edificação existente através da incorporação de novas tecnologias e conceitos. Entretanto, as medidas de retrofit devem ser avaliadas no âmbito do ciclo de vida do edifício, de forma a avaliar a sua efetiva contribuição na redução dos impactos ambientais. O objetivo da pesquisa é avaliar a influência de medidas de retrofit em edifícios existentes típicos de um bairro, tanto no desempenho da envoltória segundo o Programa Brasileiro de Etiquetagem em Edificações, quanto no ciclo de vida energético das edificações. Utilizou-se como estudo de caso 5 edifícios residenciais típicos existentes do bairro de Jardim Camburi, localizados em Vitória, no Espírito Santo. Para a análise do desempenho da envoltória, utilizou-se o método por simulação, através do software *EnergyPlus*. A Avaliação do Ciclo de Vida Energético dos edifícios foi dividida em energia incorporada e energia operacional, onde foram calculados, além do consumo de energia, as emissões de CO₂ resultantes desse consumo. O índice médio de emissão de carbono por unidade de energia é de 44 Kg CO₂/GJ, apresentando-se maior no edifício que utiliza gás para aquecimento de água. Quanto ao desempenho da envoltória, as medidas mais eficazes referem-se àquelas que modificam as superfícies verticais opacas, como a redução da absorvância e a instalação de fachada ventilada. Tais medidas também foram as mais eficientes no ciclo de vida energético das edificações, com período de amortização similar à média encontrada nos demais trabalhos científicos. O telhado verde mostrou-se ineficiente do ponto de vista do consumo energético no ciclo de vida, devido à necessidade de manutenções periódicas.

Palavras-chave: Retrofit. Desempenho da envoltória. Avaliação do Ciclo de Vida Energético. Programa Brasileiro de Etiquetagem Edifica. Simulação.

ABSTRACT

Many of the environmental impacts from architecture, engineering and construction industry are related to energy consumption, whether from fossil fuels burning or from renewable sources. Buildings consume a significant percentage of the total electric energy generated in Brazil, especially the residential sector. One of the ways to reduce building's environmental impacts is to increase their energy efficiency, either by adopting more efficient equipment or by improving comfort conditions, implementing techniques and materials more compatible with climate circumstances. One of the goals of retrofit is to increase energy operational and efficiency of existing building. The purpose of the research is to evaluate the influence of retrofit measures on typical dwellings from a neighborhood, both in the envelope performance according to Brazilian Program for Building Labeling and in buildings energy life cycle. Five existing residential buildings typical of Jardim Camburi, a neighborhood located in Vitória, Espírito Santo, were used as the case study. For the envelope performance, the simulation method was used, through EnergyPlus software. The Life Cycle Energy Assessment (LCEA) of the buildings was divided into Embodied Energy and Operational Energy (OE), where the CO₂ emissions resulting from this consumption were calculated in addition to the energy consumption. The average carbon emission per unit of energy is 44 Kg CO₂/GJ, which is higher in the building that uses gas for water heating. Regarding envelope performance, the most effective measures are those that modify the opaque vertical surfaces, such as absorptance reduction and implementation of ventilated façade. These measures were also the most effective on building's energy life cycle, with amortization period similar to the average found in similar scientific researches. The green roof proved to be inefficient from the perspective of life cycle energy consumption since it demands more periodic maintenance.

Keywords: Retrofit. Envelope performance. Life Cycle Energy Assessment. Target Brazilian Program Edifica. Simulation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fases de uma ACV.	34
Figura 2 – Métodos de avaliação (<i>midpoint</i> e <i>endpoint</i>) e respectivas categorias de impactos.....	36
Figura 3 – Etapas da ACV de edificações.....	38
Figura 4 – Cadeia do uso da energia.....	42
Figura 5 – Etapas da ACVE e respectivos cálculos de energia.....	43
Figura 6 – Carta Bioclimática da cidade de Vitória (ES).....	48
Figura 7 – Nova proposta de Zoneamento Bioclimático brasileiro.....	50
Figura 8 – Representação esquemática da metodologia.....	60
Figura 9 – Limites do sistema considerado no estudo.....	61
Figura 10 – Mapa de Vitória com destaque para o bairro Jardim Camburi com a identificação das tipologias.....	62
Figura 11 – Edificações do estudo de caso.....	63
Figura 12 – Metodologia de simplificação para cálculo da espessura e densidade equivalentes.....	65
Figura 13 – Modelagem arquitetônica das edificações.....	77
Figura 14 – Aquecedor de água a gás do tipo instantâneo das UH do Edifício 5.....	85
Figura 15 – Camadas do Sistema Modular Alveolar Leve.....	89
Figura 16 – Brises de alumínio para sombreamento das aberturas.....	91
Figura 17 – Imagem esquemática do sistema de fachada ventilada.....	92
Figura 18 - Desempenho da envoltória segundo o PBE Edifica do Edifício 1 nas situações naturalmente ventilada e condicionada artificialmente.....	95
Figura 19 - Desempenho da envoltória segundo o PBE Edifica do Edifício 2 nas situações naturalmente ventilada e condicionada artificialmente.....	105
Figura 20 - Desempenho da envoltória segundo o PBE Edifica do Edifício 3 nas situações naturalmente ventilada e condicionada artificialmente.....	115
Figura 21 - Desempenho da envoltória segundo o PBE Edifica do Edifício 4 nas situações naturalmente ventilada e condicionada artificialmente.....	125
Figura 22 - Desempenho da envoltória segundo o PBE Edifica do Edifício 5 nas situações naturalmente ventilada e condicionada artificialmente.....	135

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Dados das edificações residenciais multifamiliares.....	64
Quadro 2 – Dados da simulação energética do Edifício 1 lançados no <i>EnergyPlus</i> .	67
Quadro 3 – Dados da simulação energética do Edifício 2 lançados no <i>EnergyPlus</i> .	68
Quadro 4 – Dados da simulação energética do Edifício 3 lançados no <i>EnergyPlus</i> .	69
Quadro 5 – Dados da simulação energética do Edifício 4 lançados no <i>EnergyPlus</i> .	70
Quadro 6 – Dados da simulação energética do Edifício 5 lançados no <i>EnergyPlus</i> .	71
Quadro 7 – Parâmetros lançados no <i>software</i> para cálculo dos níveis de eficiência	73
Quadro 8 – Padrão de iluminação nas áreas de permanência prolongada.....	74
Quadro 9 – Especificações técnicas do aquecedor a gás do tipo instantâneo instalado nas Unidades Habitacionais do edifício 5.....	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores de referência de GHR e CR para a cidade de Vitória (ES)	75
Tabela 2 – Valores considerados para cálculo da EI dos materiais construtivos	79
Tabela 3 – Média de consumo de energia elétrica das habitações da região sudeste em relação à sua área construída	80
Tabela 4 – Porcentagem de UH das edificações estudadas para cada nível de consumo.....	81
Tabela 5 – Habitantes por espécie de unidade doméstica para o bairro de Jardim Camburi.....	81
Tabela 6 – Quantidade de pessoas por UH em relação aos níveis de consumo mensal de energia	82
Tabela 7 – Índices para energia primária e produção de CO ₂	82
Tabela 8 – Consumo mensal dos equipamentos por faixa de consumo	83
Tabela 9 – Potência dos aquecedores de água nos períodos quentes e frios do ano	86
Tabela 10 – Dados para cálculo da EI e CI do telhado verde	90
Tabela 11 – Dados para cálculo da EI e CI da película de vidro	90
Tabela 12 – Dados para cálculo da EI e CI da fachada ventilada	92
Tabela 13 – Energia Incorpora (MJ) e Carbono Incorporado (KgCO ₂) do Edifício 1 ..	98
Tabela 14 – EO e emissões de carbono do Edifício 1	101
Tabela 15 – Total de energia e emissões de carbono no ciclo de vida do Edifício 1	103
Tabela 16 – Comparativo da Energia no ciclo de vida do Edifício 1 existente e com as medidas de retrofit.....	104
Tabela 17 – Energia Incorpora (MJ) e Carbono Incorporado (KgCO ₂) do Edifício 2	108
Tabela 18 – EO e emissões de carbono do Edifício 2.....	111
Tabela 19 – Total de energia e emissões de carbono no ciclo de vida do Edifício 2	113
Tabela 20 – Comparativo da Energia no ciclo de vida do Edifício 2 existente e com as medidas de retrofit.....	114

Tabela 21 – Energia Incorpora (MJ) e Carbono Incorporado (KgCO ₂) do Edifício 3	118
Tabela 22 – EO e emissões de carbono do Edifício 3.....	121
Tabela 23 – Total de energia e emissões de carbono no ciclo de vida do Edifício 3	123
Tabela 24 – Comparativo da Energia no ciclo de vida do Edifício 3 existente e com as medidas de retrofit.....	124
Tabela 25 – Energia Incorpora (MJ) e Carbono Incorporado (KgCO ₂) do Edifício 4	128
Tabela 26 – EO e emissões de carbono do Edifício 4.....	131
Tabela 27 – Total de energia e emissões de carbono no ciclo de vida do Edifício 4	132
Tabela 28 – Comparativo da Energia no ciclo de vida do Edifício 4 existente e com as medidas de retrofit.....	133
Tabela 29 – Energia Incorpora (MJ) e Carbono Incorporado (KgCO ₂) do Edifício 5	138
Tabela 30 – EO e emissões de carbono do Edifício 5.....	141
Tabela 31 – Total de energia e emissões de carbono no ciclo de vida do Edifício 5	143
Tabela 32 – Comparativo da Energia no ciclo de vida do Edifício 5 existente e com as medidas de retrofit.....	144

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Participação dos equipamentos no consumo final de energia elétrica na região Sudeste do Brasil	46
Gráfico 2 – Padrão de ocupação nas áreas de permanência prolongada para os dias da semana.....	74
Gráfico 3 – Padrão de ocupação nas áreas de permanência prolongada nos finais de semana	74
Gráfico 4 – Consumo residencial de energia.....	87
Gráfico 5 – Comparativo de GHR e CR da coluna 3 do Edifício 1 existente e com as medidas de retrofit.....	96
Gráfico 6 – EI (MJ) por material do Edifício 1	98
Gráfico 7 – CI (KgCO ₂) do Edifício 1	99
Gráfico 8 – Comparativo de EI e CI do Edifício 1 existente e com as medidas de retrofit	100
Gráfico 9 – Participação das categorias de consumo de EO e emissões de CO ₂ do Edifício 1.....	101
Gráfico 10 – Comparativo de EO e emissões de CO ₂ do edifício 1 existente e com as medidas de retrofit.....	102
Gráfico 11 – Participação da energia e emissões de CO ₂ no ciclo de vida do Edifício 1	103
Gráfico 12 – Comparativo de GHR e CR da coluna 7 do Edifício 2 existente e com as medidas de retrofit.....	107
Gráfico 13 – EI (MJ) do Edifício 2.....	109
Gráfico 14 – CI (KgCO ₂) do Edifício 2	109
Gráfico 15 – Comparativo de EI e CI do Edifício 2 existente e com as medidas de retrofit	110
Gráfico 16 – Participação das categorias de consumo de EO e emissões de CO ₂ do Edifício 2.....	112
Gráfico 17 – Comparativo de EO e emissões de CO ₂ do edifício 2 existente e com as medidas de retrofit.....	112
Gráfico 18 – Participação da energia e emissões de CO ₂ no ciclo de vida do Edifício 2	113

Gráfico 19 – Comparativo de GHR e CR da coluna 3 do Edifício 3 existente e com as medidas de retrofit.....	117
Gráfico 20 – EI (MJ) do Edifício 3.....	119
Gráfico 21 – CI (KgCO ₂) do Edifício 3.....	119
Gráfico 22 – Comparativo de EI e CI do Edifício 3 existente e com as medidas de retrofit.....	120
Gráfico 23 – Participação das categorias de consumo de EO e emissões de CO ₂ do Edifício 3.....	121
Gráfico 24 – Comparativo de EO e emissões de CO ₂ do edifício 3 existente e com as medidas de retrofit.....	122
Gráfico 25 – Participação da energia e emissões de CO ₂ no ciclo de vida do Edifício 3.....	123
Gráfico 26 – Comparativo de GHR e CR da coluna 1do Edifício 4 existente e com as medidas de retrofit.....	126
Gráfico 27 – EI (MJ) do Edifício 4.....	128
Gráfico 28 – CI (KgCO ₂) do Edifício 4.....	129
Gráfico 29 – Comparativo de EI e CI do Edifício 4 existente e com as medidas de retrofit.....	130
Gráfico 30 – Participação das categorias de consumo de EO e emissões de CO ₂ do Edifício 4.....	131
Gráfico 31 – Comparativo de EO e emissões de CO ₂ do edifício 4 existente e com as medidas de retrofit.....	132
Gráfico 32 – Participação da energia e emissões de CO ₂ no ciclo de vida do Edifício 4.....	133
Gráfico 33 – Comparativo de GHR e CR da coluna 4 do Edifício 5 existente e com as medidas de retrofit.....	136
Gráfico 34 – EI (MJ) do Edifício 5.....	138
Gráfico 35 – CI (KgCO ₂) do Edifício 5.....	139
Gráfico 36 – Comparativo de EI e CI do Edifício 5 existente e com as medidas de retrofit.....	140
Gráfico 37 – Participação das categorias de consumo de EO e emissões de CO ₂ do Edifício 5.....	141

Gráfico 38 – Comparativo de EO e emissões de CO ₂ do edifício 5 existente e com as medidas de retrofit.....	142
Gráfico 39 – Participação da energia e emissões de CO ₂ no ciclo de vida do Edifício 5	143
Gráfico 40 – Comparativo da EI, EO e Energia no ciclo de vida dos edifícios existentes	144
Gráfico 41 – Período de amortização das medidas de retrofit de todos os edifícios analisados	146

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
ACVE	Avaliação do Ciclo de Vida Energético
AEC	Arquitetura, Engenharia e Construção
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
APP	Ambiente de Permanência Prolongada
AQUA	Alta Qualidade Ambiental
ASHRAE	<i>American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers</i>
BIM	<i>Building Information Modeling</i>
CA	Consumo Relativo de Aquecimento
CI	Carbono Incorporado
CID	Carbono Incorporado Desperdiçado
CII	Carbono Incorporado Inicial
CIR	Carbono Incorporado Recorrente
COHAB	Companhia de Habitação
CONMETRO	Conselho Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial
CR	Consumo Relativo de Refrigeração
CT	Capacidade Térmica
CVE	Ciclo de Vida Energético
DOE	<i>Department of Energy</i>
ED	Energia de demolição
EI	Energia Incorporada
EID	Energia Incorporada Desperdiçada
EII	Energia Incorporada Inicial
EIR	Energia Incorporada Recorrente
EO	Energia Operacional
FAPES	Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo
FDT	Frequência de Desconforto Térmico
FM	<i>Facility Management</i>
GHR	Graus Hora de Resfriamento

HQE	<i>Haute Qualité Environnementale</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IBICT	Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia
IDF	<i>Input Data File</i>
IEA	International Energy Agency
IFC	<i>International Framework for Dictionaries</i>
INEE	Instituto Nacional de Eficiência Energética
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LabEEE	Laboratório de Eficiência Energética em Edificações
LabesBIM	Laboratório de Engenharia Simultânea e BIM
LBNL	<i>Lawrence Berkeley National Laboratory</i>
LCA	<i>Life Cycle Assessment</i>
NBR	Norma Brasileira
PBACV	Programa Brasileiro de Avaliação do Ciclo de Vida
PBE Edifica	Programa Brasileiro de Etiquetagem em Edificações
PMCMV	Programa Minha Casa Minha Vida
PMV	Prefeitura Municipal de Vitória
PPGEC	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
PROCEL	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
R	Resistência
RQT-R	Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais
TBS	Temperatura de Bulbo Seco
TBU	Temperatura de Bulbo Úmido
TCPO	Tabelas de Composições de Preços para Orçamentos
TRY	<i>Test Reference Year</i>
U	Transmitância
UFES	Universidade Federal do Espírito Santo
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
UH	Unidade Habitacional
UNEP	<i>United Nations Environment Programme</i>
UR	Umidade Relativa
VUP	Vida Útil de Projeto

WBCSD *World Business Council for Sustainable Development*
ZB Zona Bioclimática

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	24
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVAS DA PESQUISA	24
1.2 QUESTÕES DA PESQUISA	26
1.3 OBJETIVOS	27
1.3.1 Objetivo geral	27
1.3.2 Objetivos específicos.....	27
1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	27
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	30
2.1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	30
2.1.1 Retrofit.....	30
2.1.2 Avaliação do Ciclo de Vida (ACV).....	33
2.1.2.1 Definição de objetivo e escopo.....	34
2.1.2.2 Análise de Inventário	35
2.1.2.3 Avaliação de impacto	35
2.1.2.4 Interpretação	37
2.1.3 ACV de edificações	37
2.1.4 ACV energético de edificações	40
2.1.5 Desempenho energético e conforto térmico	47
2.1.6 Selo PROCEL Edifica	52
2.2 PESQUISAS REALIZADAS	55
3 METODOLOGIA.....	60
3.1 ESTUDOS DE CASO – TIPOLOGIAS ANALISADAS	61
3.2 DESEMPENHO DA ENVOLTÓRIA SEGUNDO O PBE EDIFICA.....	65
3.3 ENERGIA INCORPORADA (EI).....	75
3.3.1 Energia Incorporada Inicial (EII).....	76

3.3.2 Energia Incorporada Recorrente (EIR)	78
3.3.3 Energia Incorporada Desperdiçada (EID)	78
3.4 ENERGIA OPERACIONAL (EO).....	79
3.4.1 Equipamentos	83
3.4.2 Iluminação	83
3.4.3 Aquecimento de água	84
3.4.4 Ar condicionado	86
3.4.5 Cocção	86
3.5 ENERGIA NO CICLO DE VIDA.....	87
3.6 PROPOSTAS DE RETROFIT E ANÁLISES PARAMÉTRICAS	88
3.6.1 Telhado verde	89
3.6.2 Película refletora nos vidros	90
3.6.2 Sombreamento das aberturas	91
3.6.3 Absortância (α) da envoltória	91
3.6.4 Fachada ventilada	92
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	94
4.1 EDIFÍCIO 1 – 3 PAVIMENTOS SEM VARANDA	94
4.1.1 Desempenho da envoltória segundo o PBE Edifica	94
4.1.1.1 Edifício existente	94
4.1.1.2 Análises paramétricas com medidas de retrofit.....	95
4.1.2 Energia Incorporada (EI)	97
4.1.2.1 Edifício existente	97
4.1.2.2 Análises paramétricas com medidas de retrofit.....	99
4.1.3 Energia Operacional (EO)	100
4.1.3.1 Edifício existente	100
4.1.3.2 Análises paramétricas com medidas de retrofit.....	102
4.1.4 Energia no ciclo de vida	102

4.1.4.1 Edifício existente	103
4.1.4.2 Análises paramétricas com medidas de retrofit.....	103
4.2 EDIFÍCIO 2 – 03 PAVIMENTOS COM VARANDA.....	104
4.2.1 Desempenho da envoltória segundo o PBE edifica	104
4.2.1.1 Edifício existente	104
4.2.1.2 Análises paramétricas com medidas de retrofit.....	106
4.2.2 Energia Incorporada (EI).....	107
4.2.2.1 Edifício existente	108
4.2.2.2 Análises Paramétricas com medidas de retrofit	110
4.2.3 Energia Operacional (EO).....	111
4.2.3.1 Edifício existente	111
4.2.3.2 Análises paramétricas com medidas de retrofit.....	112
4.2.4 Energia no ciclo de vida	113
4.2.4.1 Edifício existente	113
4.2.4.2 Análises paramétricas com medidas de retrofit.....	114
4.3 EDIFÍCIO 3 – 09 PAVIMENTOS COM VARANDA PEQUENA	114
4.3.1 Desempenho da envoltória segundo o PBE Edifica.....	114
4.3.1.1 Edifício existente	115
4.3.1.2 Análises paramétricas com medidas de retrofit.....	116
4.3.2 Energia Incorporada (EI).....	117
4.3.2.1 Edifício existente	118
4.3.2.2 Análises paramétricas	120
4.3.3 Energia Operacional (EO).....	121
4.3.3.1 Edifício existente	121
4.3.3.2 Análises paramétricas com medidas de retrofit.....	122
4.3.4 Energia no ciclo de vida	123
4.3.4.1 Edifício Existente	123

4.4 EDIFÍCIO 4 – 09 PAVIMENTOS COM VARANDA GRANDE.....	124
4.4.1 Desempenho da envoltória segundo o PBE Edifica.....	124
4.4.1.1 Edifício existente	124
4.4.1.2 Análises paramétricas com medidas de retrofit.....	126
4.4.2 Energia Incorporada (EI).....	127
4.4.2.1 Edifício existente	127
4.4.2.2 Análises paramétricas com medidas de retrofit.....	129
4.4.3 Energia Operacional (EO).....	130
4.4.3.1 Edifício existente	130
4.4.3.2 Análises paramétricas com medidas de retrofit.....	131
4.4.4 Energia no ciclo de vida	132
4.4.4.1 Edifício existente	132
4.4.4.2 Análises paramétricas com medidas de retrofit.....	133
4.5 EDIFÍCIO 5 – 17 PAVIMENTOS COM VARANDA + 1 COBERTURA DUPLEX	
134	
4.5.1 Desempenho da envoltória segundo o PBE Edifica.....	134
4.5.1.1 Edifício existente	134
4.5.1.2 Análises paramétricas com medidas de retrofit.....	135
4.5.2 Energia Incorporada (EI).....	137
4.5.2.1 Edifício existente	137
4.5.2.2 Análises paramétricas com medidas de retrofit.....	139
4.5.3 Energia Operacional (EO).....	140
4.5.3.1 Edifício existente	140
4.5.3.2 Análises paramétricas com medidas de retrofit.....	142
4.5.4 Energia no ciclo de vida	142
4.5.4.1 Edifício existente	142
4.5.4.2 Análises paramétricas com medidas de retrofit.....	143

4.6 COMPARATIVO DE TODAS AS EDIFICAÇÕES.....	144
5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES FINAIS	149
5.1 CONCLUSÕES DE CARÁTER GERAL	149
5.2 CONCLUSÕES RELATIVAS AO DESEMPENHO DAS EDIFICAÇÕES SEGUNDO O PBE EDIFICA	150
5.3 CONCLUSÕES RELATIVAS À ENERGIA INCORPORADA (EI).....	151
5.4 CONCLUSÕES RELATIVAS À ENERGIA OPERACIONAL (EO).....	152
5.5 CONCLUSÕES RELATIVAS À ENERGIA NO CICLO DE VIDA.....	153
5.6 PROPOSTA PARA FUTURAS PESQUISAS	154
REFERÊNCIAS	157
APÊNDICE A – MEMORIAIS DE QUANTITATIVO DE MATERIAIS	169
APÊNDICE B – DADOS DE EI E CI EXTRAÍDOS DO ECOINVENT POR MEIO DO SIMAPRO.....	173
ANEXO A – VITÓRIA BAIRRO A BAIRRO (PMV, 2013) – BAIRRO JARDIM CAMBURI.....	179

Seção 1

Introdução



1 INTRODUÇÃO

As edificações representam em torno de 30% a 40% do consumo energético no mundo e resultam em emissão de carbono maior que o setor de transporte, por exemplo (WBCSD, 2014). Para estabilizar os níveis de concentração de CO₂ estabelecidos pelo IEA (*International Energy Agency*), as edificações devem diminuir suas emissões diretas e indiretas de carbono em, no mínimo, 38% até 2050 (WBCSD, 2014).

No Brasil, o consumo energético em edificações segue a tendência mundial, participando de cerca de 42,5% da parcela correspondente ao consumo de energia elétrica (21,2% do setor residencial, 14,5% do setor comercial e 6,8% do setor público) (BRASIL, 2017). Tamanho consumo motivou setores governamentais a desenvolverem normas e procedimentos a fim de regulamentar as novas edificações. Entretanto, uma das formas de reduzir o consumo de energia é através do retrofit de edificações já existentes. A norma brasileira define retrofit como a “remodelação ou atualização do edifício ou de sistemas, através da incorporação de novas tecnologias e conceitos, normalmente visando à valorização do imóvel, mudança de uso, aumento da vida útil e eficiência operacional e energética” (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013, p. 9). Portanto, diversas ações de retrofit estão voltadas para a remodelação da edificação e incorporação de novas tecnologias com o objetivo de tornar a edificação mais eficiente do ponto de vista energético. Contudo, muitos estudos avaliam a redução de energia apenas na fase operacional da edificação, desconsiderando as demais etapas do ciclo de vida.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVAS DA PESQUISA

Uma das maneiras de medir os impactos ambientais provenientes da produção de um determinado produto é através da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). Segundo John (2007), a ACV é uma ferramenta que possibilita a análise sistêmica dos impactos, que identifica e quantifica os fluxos de insumos e emissões em todas as etapas do ciclo de vida do produto. As etapas incluem a extração de matérias-primas, atividades de transporte, manufatura, montagem, uso e manutenção, descarte e reuso do material. O conjunto de normas NBR ISO 14040 a 14049 (ASSOCIAÇÃO

BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014) detalha a metodologia ACV e reconhece que tais estudos ainda são recentes e carecem de trabalhos práticos para melhor desenvolvimento da metodologia. Ainda mais recentes são as ACVs direcionadas a edificações. Os primeiros estudos iniciaram-se nos anos de 1980 e intensificaram-se nos anos de 1990, quando grupos de discussões foram organizados para normatização da metodologia e houve um significativo aumento nas publicações de trabalhos científicos (BUYLE; BRAET; AUDENAERT, 2013). Portanto, ainda há uma carência de estudos focados nessa área, especialmente no Brasil, onde as publicações ainda são incipientes. Ainda são raros os estudos relacionados à redução dos impactos ambientais proporcionados pelo retrofit no contexto do ciclo de vida.

Com o desenvolvimento da ACV de edificações surgiu uma nova linha de pesquisa focada apenas nos impactos ambientais provenientes do consumo de energia, chamado de Avaliação do Ciclo de Vida Energético (ACVE). A demanda energética em edificação se dá de forma direta e indireta. A energia necessária para construção, operação, manutenção e demolição é denominada direta e a energia incorporada aos materiais, necessária à sua produção, é denominada indireta (SARTORI; HESTNES, 2007). A ACVE de edificações, assim como a ACV, busca quantificar os impactos ambientais, porém, apenas do ponto de vista da produção e consumo da energia necessária para fabricação dos materiais construtivos (energia incorporada), instalação da obra, operação (energia operacional), manutenção (energia incorporada recorrente), demolição, reciclagem, e eventual transporte entre as etapas (SARTORI; HESTNES, 2007).

Estudos apontam que a fase do ciclo de vida da edificação que mais consome energia é a operacional, utilizada em aparelhos de refrigeração/aquecimento, iluminação artificial, dentre outros equipamentos elétricos, e que a energia incorporada dos materiais tem pouca representatividade na quantidade total de energia requerida em todo o ciclo de vida da edificação (SARTORI; HESTNES, 2007). Essa realidade vem mudando aos poucos, devido ao desenvolvimento de equipamentos e iluminação mais eficientes e tecnologia de materiais capazes de atender às demandas climáticas.

Outra maneira de diminuir o consumo de energia nessa etapa é a partir da análise do desempenho térmico da edificação, visando a melhoria do conforto do usuário e a redução da demanda por condicionadores de ar. No Brasil, diversas ações

estão voltadas para a redução do consumo energético das edificações, porém apenas para etapa de operação. Uma das iniciativas é o Programa Brasileiro de Etiquetagem em Edificações (PBE Edifica), que classifica edificações residenciais, comerciais e públicas em níveis que vão de “A” (mais eficientes) até “E” (menos eficiente). Já é obrigatória a obtenção do selo nível “A” para edificações públicas novas ou que passam pelo processo de retrofit (BRASIL, 2014). Tais iniciativas são de suma importância para conscientizar a indústria da construção civil para medidas que priorizem a qualidade construtiva de forma a associar a redução do consumo energético ao conforto do usuário. O retrofit tem essa finalidade e, portanto, necessita de melhor análise dos seus benefícios considerando todas as etapas do ciclo de vida da edificação.

Algumas ferramentas foram desenvolvidas para auxiliar no processo da ACV, como os *softwares* que disponibilizam bancos de dados com informações sobre as emissões provenientes da fabricação dos materiais. No caso das edificações, por serem uma junção de diversos produtos e processos, as pesquisas buscam associar os mecanismos de projeto à ACV, de forma a verificar o impacto de cada decisão projetual no meio ambiente. A integração com *softwares* da plataforma BIM (*Building Information Modeling*), por exemplo, permite a análise dos impactos de forma imediata, a partir de modelagem que agregue informações de energia incorporada dos materiais. Porém, tal integração encontra empecilhos, devido, principalmente, às limitações na interoperabilidade entre os *softwares* necessário à análise.

1.2 QUESTÕES DA PESQUISA

A pesquisa visa responder aos seguintes questionamentos:

- Em edifícios existentes típicos de um bairro, qual a influência da adoção de medidas de retrofit no desempenho da envoltória e no ciclo de vida energético das edificações?
- A energia incorporada ao edifício pelo processo de retrofit foi suficiente para reduzir a energia operacional ao longo da vida útil dos edifícios? Se sim, quanto tempo de uso/operação é necessário para compensar a energia que foi incorporada pelas medidas de retrofit?

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo geral

O objetivo da pesquisa é avaliar a influência de medidas de retrofit em edifícios existentes típicos de um bairro, tanto no desempenho da envoltória segundo o PBE Edifica, quanto no ciclo de vida energético das edificações.

1.3.2 Objetivos específicos

- Verificar a situação atual dos edifícios residenciais típicos existentes, no que tange o desempenho da envoltória segundo os padrões estabelecidos pelo PBE Edifica;
- Calcular a energia incorporada (EI) e carbono incorporado (CI) dos edifícios típicos existentes;
- Calcular a quantidade de energia operacional (EO), bem como a quantidade de CO₂ liberado para geração de energia consumida durante o uso/operação dos edifícios existentes típicos do bairro.
 - Verificar a energia consumida no ciclo de vida das edificações.
 - Fazer análises paramétricas a partir de medidas de retrofit, e verificar seus efeitos, tanto no desempenho da envoltória segundo o PBE Edifica, quanto no ciclo de vida energético das edificações.

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A seção 1 faz uma contextualização da problemática e apresenta a questão que a pesquisa pretende responder. Também apresenta os objetivos gerais e específicos da dissertação.

A seção 2 pretende fazer um embasamento teórico relacionado às questões da pesquisa, tratando dos principais conceitos, e um aprofundamento do estado da arte, a partir de pesquisas já realizadas.

A metodologia é abordada na Seção 3, onde são detalhados os estudos de caso, as ferramentas utilizadas e as variáveis consideradas e suas relações, de forma a alcançar os resultados da pesquisa.

Os resultados são apresentados na Seção 4, onde são discutidas as questões relevantes; e a Seção 5 apresenta as conclusões da pesquisa e as sugestões para trabalhos futuros.

Seção 2

Revisão Bibliográfica



2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para melhor esclarecimento das questões que giram em torno da temática da pesquisa, foi necessário conhecer o estado da arte, por meio de uma revisão bibliográfica. Primeiro apresentou-se os conceitos gerais referentes aos assuntos relacionados ao tema, para em seguida apresentar as pesquisas realizadas que trouxeram questionamentos e motivaram a investigação da questão da pesquisa.

2.1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A seguir, serão apresentados conceitos gerais que fundamentam este estudo.

2.1.1 Retrofit

Reforma ou remodelação da edificação e retrofit são processos que integram a etapa de Gestão de Instalações (ILTER; ERGEN, 2015), ou *Facility Management* (FM). Entretanto, é importante que se faça uma melhor conceituação de ambos termos.

Segundo Gultekin, Anumba e Leicht (2014) a reforma ou remodelação são alterações com intuito principal de atender a requisitos funcionais vinculados ao interesse do proprietário, como modificação nas alvenarias, renovação da estrutura ou mudanças espaciais no layout. O retrofit tem como principal objetivo melhorar o desempenho dos sistemas da edificação (mecânico, elétrico e hidráulico), bem como dos agentes responsáveis pelo conforto térmico e acústico (isolamento das paredes externas por exemplo), trazendo benefícios tanto para o usuário quanto para o meio ambiente. (GULTEKIN; ANUMBA; LEICHT, 2014).

Vilches, Garcia-martinez e Sanchez-montañes (2017), ao estudarem os conceitos de reforma/remodelação e retrofit, avaliaram o primeiro como operações que consideram a redução do consumo de energia da edificação, e o segundo como tipos de intervenções com acréscimo de novos materiais ou elementos, que a priori não estavam previstos. Ou seja, uma reforma ou remodelação pode incluir medidas de retrofit mas também outras melhorias, como estéticas ou melhoras espaciais de

toda edificação ou parte dela (VILCHES; GARCIA-MARTINEZ; SANCHEZ-MONTAÑES, 2017). Entretanto, Ma e outros (2012) consideraram fatores humanos como medidas de retrofit. Tais medidas podem não exigir nenhum tipo de intervenção física na edificação, apenas no comportamento dos usuários.

Nota-se que não há um consenso entre as bibliografias estudadas que conceitue de forma clara o termo retrofit. A norma brasileira define retrofit como “remodelação ou atualização do edifício ou de sistemas, através da incorporação de novas tecnologias e conceitos, normalmente visando à valorização do imóvel, mudança de uso, aumento da vida útil e eficiência operacional e energética” (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013, p. 9). Em grande parte dos casos de retrofit ocorre também sua reforma ou remodelação, e essa ação por si só já implica uma ação favorável ambientalmente, na medida em que prolonga a vida útil da edificação.

Diversas iniciativas de retrofit no Brasil estão vinculadas à valorização imobiliária e adaptação de uso em edificações históricas, especialmente nas grandes capitais, onde há uma tendência das políticas públicas urbanas em retornar os investimentos para as áreas centrais degradadas. Sanches e Alvin (2016) demonstraram que, na cidade de São Paulo, há uma quantidade significativa de edificações de habitação social provenientes do processo de retrofit de imóveis antes desocupados. O número dessas habitações ficou atrás apenas da quantidade de novas habitações sociais construídas no lugar de antigos cortiços. Assim, a recuperação de edificações históricas pelo retrofit, além de torná-los funcionais ao trazê-los às necessidades presentes, possibilita uma intervenção que abrange aspectos históricos, econômicos e ecológicos (MORAES; QUELHAS, 2011).

Bu e outros (2015) destacam que a decisão para realização de um projeto de retrofit se fundamenta em três fases, quais sejam: (1) análise sobre demolir ou realizar o retrofit; (2) análise da urgência, possibilidades e técnicas na decisão de fazer o retrofit e (3) investigação das atividades de retrofit com base no conhecimento, possibilidade de estudo e seriedade da avaliação para verificar disponibilidade de fornecedores e aprovações pela equipe de gerenciamento. Nota-se que a decisão por fazer o retrofit depende do objetivo específico a que se pretende alcançar, podendo abranger questões econômicas, sociais, ambientais ou de preservação do patrimônio histórico.

Doug Gatlin, vice-presidente do *US Green Building Council*, explica que para o retrofit ser considerado sustentável é necessário atualizar uma determinada edificação para melhorar sua performance energética, reduzir o consumo de água e aprimorar os espaços internos em termos de iluminação natural, qualidade do ar e do ruído (BU et al., 2015). O retrofit sustentável¹ está, em muitos casos, associado à redução do consumo energético, que visa a eficiência operacional e energética a partir da remodelação e atualização do edifício incorporando novos conceitos. Muitas dessas atualizações são possíveis graças à aplicação de novas tecnologias, capazes de fornecer sistemas mais eficazes (RHOADS, 2010; MA et al., 2012).

Ascione, Rossi e Vanoli (2011) realizaram o levantamento de dados em uma edificação histórica localizada na Itália e passaram tais informações para um modelo energético. O objetivo da modelagem foi propor ações de retrofit capazes de reduzir a demanda energética. O modelo feito no *EnergyPlus*, após calibrado, foi simulado com algumas propostas de retrofit, como aumento da vedação, troca das luminárias, e substituição do aquecedor por um aparelho mais eficiente. Os autores constataram uma redução de cerca de 22% no consumo da energia primária.

Estudos são realizados na tentativa de propor estratégias de sistematização do processo de retrofit. Ma e outros (2012) dividem o programa de retrofit sustentável em 05 fases. A primeira refere-se à etapa de planejamento e pesquisa, quando se define o escopo e os objetivos a serem alcançados, já que existem conflitos de expectativas, variedade de soluções propostas por diferentes profissionais e incertezas sobre os benefícios econômicos e ambientais (WOO; MENASSA, 2014). A segunda etapa refere-se à auditoria energética e à avaliação do desempenho, que visa fazer um diagnóstico do desempenho da edificação na situação atual, sem as propostas de retrofit, de forma a identificar as áreas com potencial de redução, bem como estabelecer indicadores de desempenho. A fase seguinte visa identificar quais as opções de retrofit que solucionam os problemas identificados nas etapas anteriores, a partir de análise quantitativa, comparando os resultados antes e depois de cada solução de retrofit. A quarta etapa refere-se à implementação das medidas de retrofit selecionadas na etapa anterior. A avaliação dos resultados após a implantação das medidas é feita na última etapa, quando se verificam se os objetivos

¹ O termo “retrofit sustentável” refere-se à tradução dos termos “green retrofit”, utilizado por Bu e outros (2015), “sustainable retrofit”, utilizado por Ma e outros (2012) e Woo e Menassa (2014) e “Low Carbon retrofit” utilizado por Rhoads (2010).

estabelecidos no escopo foram alcançados, e quais os benefícios ambientais e o tempo de retorno dos investimentos.

2.1.2 Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)

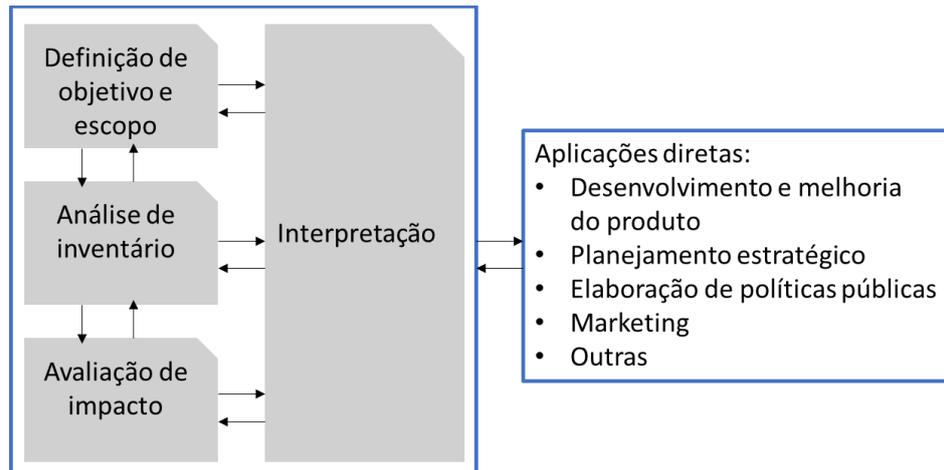
A Avaliação do Ciclo de vida (ACV) é uma metodologia ainda recente capaz de identificar e quantificar os impactos ambientais associados a produtos manufaturados, podendo incluir também sistemas de serviços (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014). O objetivo principal da ACV é estudar “os aspectos ambientais e os impactos potenciais [...] ao longo de todo o ciclo de vida de um produto desde a aquisição da matéria-prima, produção, uso, tratamento pós-uso, reciclagem até disposição final” (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014, p. 2), ou seja, do “berço ao túmulo” (ou *cradle-to-grave*). Embora alguns fabricantes de materiais forneçam análises apenas do berço até o portão da fábrica, denominado “*cradle-to-gate*”, tais dados participam das “declarações ambientais de produto”, fornecendo ao consumidor informações acerca dos impactos ambientais provenientes de sua fabricação (JOHN, 2007).

Observa-se um esforço, por parte das instituições governamentais e tecnológicas brasileiras em promover o desenvolvimento sustentável da indústria, a partir do incentivo à Avaliação do Ciclo de Vida em toda a sua cadeia produtiva. O Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia (IBICT, 2017) vem promovendo parcerias com universidades, associações e indústrias para divulgar a metodologia de elaboração de inventários e incentivar a prática da ACV. O Conselho Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (CONMETRO), considerando a importância da ACV na promoção da sustentabilidade, aprovou o Programa Brasileiro de Avaliação do Ciclo de Vida (PBACV). Entre outros objetivos, o PBACV pretende implantar um sistema capaz de padronizar informações a respeito de inventários de Ciclo de Vida associado à indústria brasileira para, identificar as principais categorias de impactos ambientais (BRASIL, 2010). Entretanto, o CONMETRO admite que há um longo caminho para que isso aconteça, já que no setor produtivo brasileiro existem poucos adeptos à proposta.

Não existe uma forma única nem se chegou ao melhor formato de aplicação da ACV, pois cada organização adapta a análise aos critérios estabelecidos no escopo

e de acordo com suas estratégias e objetivos (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014). Entretanto, para que o objetivo da ACV seja atingido, considera-se o estudo em 04 fases (Figura 1): definição de objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação de impacto e interpretação.

Figura 1 – Fases de uma ACV.



Fonte: ABNT, 2014, p. 5

2.1.2.1 Definição de objetivo e escopo

O escopo deve definir algumas variáveis, dentre elas a unidade funcional e as fronteiras do sistema. Segundo a NBR 14040 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014, p. 6), “uma unidade funcional é uma medida do desempenho das saídas funcionais”, que deve representar a função a qual determinado produto irá desempenhar. Numa edificação, por exemplo, poderá ser definida como unidade funcional o metro quadrado de área construída. A definição da unidade funcional também é importante quando se deseja comparar os resultados com outras ACVs e relacionar dados de entrada e saída.

Shrestha, Biswas e Desjarlais (2014), ao compararem ACVs de diferentes materiais isolantes, definiram como unidade funcional a massa (Kg) de material necessário para cobrir 1m² de área com espessura suficiente para adquirir uma resistência térmica de 1m² K/W. Tal unidade funcional garante que todos os materiais estudados sejam analisados conforme a sua função, que, no caso específico, é isolar termicamente a edificação.

Já as fronteiras do sistema definem quais processos e impactos serão incluídos na ACV, já que é impossível incluir todos os processos envolvidos na fabricação do produto. Por exemplo, o transporte de determinado produto é feito por caminhão, que por sua vez é feito de aço, que foi produzido a partir do minério de ferro, cujo transporte é feito por navios, que por sua vez é feito de aço, e assim por diante. A definição das fronteiras do sistema é importante na medida em que o acréscimo de processos muito detalhados geralmente demanda análises demoradas e que não afetam de forma expressiva os resultados (UNEP, 1996²).

2.1.2.2 Análise de Inventário

A análise do inventário é uma das etapas que mais demandam tempo e a mais trabalhosa (UNEP, 1996), pois se trata da coleta de dados e dos procedimentos de cálculo para quantificar os fluxos de entrada e saída (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014). Portanto, é a etapa mais importante de toda a ACV. As entradas e saídas são de âmbito econômico, como bens e serviços, ou ambientais, como uso de recursos e emissões (UNEP, 1996). Os resultados desse levantamento devem ser processados e ajustados ao fator de escala que corresponda à unidade funcional definida no escopo (UNEP, 1996).

2.1.2.3 Avaliação de impacto

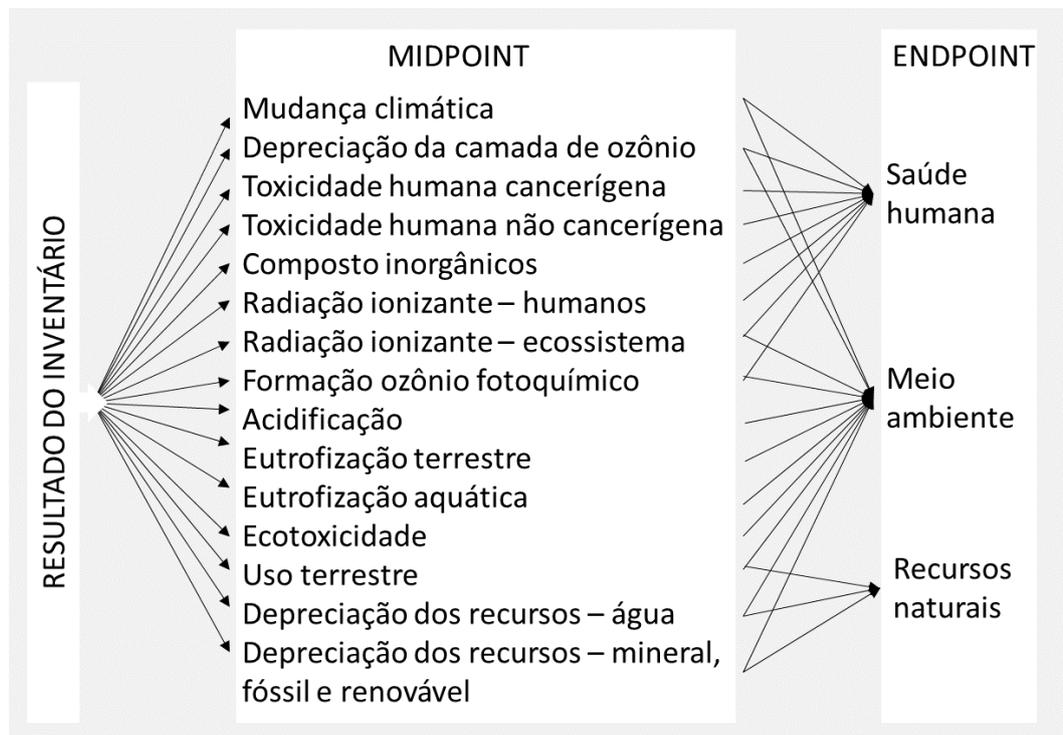
Essa fase implica associar os resultados obtidos na análise de inventário aos impactos ambientais potenciais. Os resultados são classificados, caracterizados ou ponderados a partir das categorias de impactos (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014), tais como aquecimento global, acidificação do solo, toxicidade humana, depreciação da camada de ozônio, entre outras. Uma mesma substância pode estar associada a diversas categorias de impacto, como as emissões de NO_x (Óxidos de Nitrogênio) por exemplo, que afeta tanto a saúde humana quanto o meio ambiente por meio da acidificação do solo e do aquecimento global (UNEP, 1996). Além de qualificar, essa etapa visa indicar o quanto cada substância contribui

² Mesmo passados 22 anos desde a publicação dessa referência, os conceitos intrínsecos à ACV permanecem os mesmos.

para um determinado problema, comparando-as a uma substancia de referênciã. Para aquecimento global, por exemplo, a substância de referênciã é CO₂ (Gás Carbônico). O aquecimento global provocado pelo metano (CH₄) é expresso em quantidade de CO₂ equivalente. No caso específico, a quantidade é 11, o que significa que 1Kg de metano tem o mesmo efeito de aquecimento global que 11Kg de CO₂ (UNEP, 1996).

Os métodos de avaliação podem ser classificados em *midpoints* (direcionado a problemas) e *endpoints* (direcionado a danos), conforme identificados na Figura 2 (BARE, 2000). Os *midpoints* são métodos de impacto cujas categorias estão direcionadas a problemas ambientais, como aquecimento global e acidificação. Já os *endpoints* são métodos de impacto focados no real efeito dos problemas ambientais, avaliando o dano causado à saúde humana, meio ambiente, recursos naturais e mudanças climáticas. Há também os métodos que combinam ambas abordagens, utilizando assim os pontos positivos de cada metodologia. Algumas categorias de impacto ainda não estão bem definidas nos estudos de ACV, e as análises direcionadas a danos (*endpoints*) ainda são raras e necessitam amadurecimento (HAUSCHILD et al., 2012).

Figura 2 – Métodos de avaliação (*midpoint* e *endpoint*) e respectivas categorias de impactos



Fonte: Hauschild et al. (2012). Adaptado pela autora

Existem diversos *softwares* de auxílio à ACV disponíveis no mercado. Eles acessam as bases de dados e obtêm informações dos inventários. Assim, é possível classificar as emissões de poluentes nas diferentes categorias de impactos. Os *softwares* mais comumente utilizados são o GaBi (THINKSTEP, 2017) e o *SimaPro* (SIMAPRO, 2017), e as categorias de impacto analisadas dependem das metodologias disponibilizadas pelos *softwares* de cálculo de ACV (ANAND; AMOR, 2017).

2.1.2.4 Interpretação

Os resultados das etapas anteriores devem ser interpretados de forma que a ACV cumpra o seu objetivo, ou seja, contribuir para a redução dos impactos ambientais potenciais. É necessário, então, que se faça uma investigação das causas dos problemas, e as ações necessárias à sua mitigação. De acordo com a NBR 14040 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014), o objetivo dessa etapa é obter conclusões e recomendações que estejam em concordância com o escopo e objetivo definidos. Segundo John (2007), ao comparar os impactos ambientais dos produtos, a decisão deve passar pelas prioridades ou agenda de desenvolvimento sustentável da instituição interessada na análise, atribuindo-se importâncias relativas para os diferentes impactos.

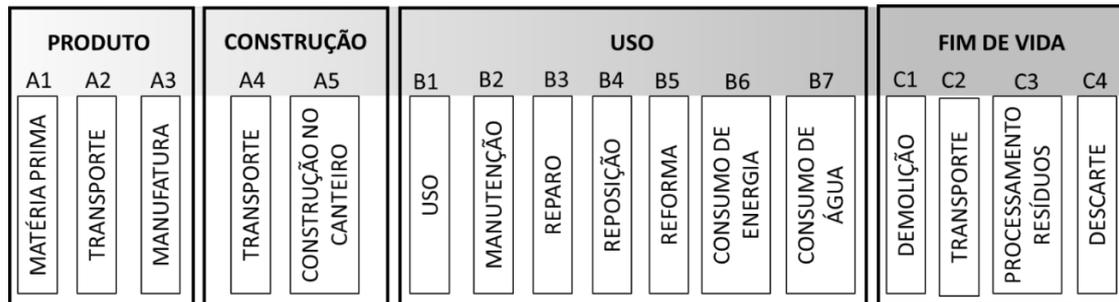
Uma das limitações da ACV é que diferentes métodos aplicados a casos idênticos podem gerar resultados diferentes, comprovando que a ACV não gera valores absolutos e, portanto, tais dados não podem ser utilizados como garantia de sustentabilidade de um determinado produto ou serviço, apenas como parâmetro de comparação com outros produtos ou serviços (BUYLE; BRAET; AUDENAERT, 2013).

2.1.3 ACV de edificações

A aplicação da metodologia em edificações é recente, iniciada nos anos de 1980 e intensificada a partir dos anos de 1990, quando os estudos acerca da sustentabilidade da indústria da construção civil ganharam mais importância (BUYLE; BRAET; AUDENAERT, 2013). Em apenas cinco anos, de 2011 a 2016, o número de publicações sobre esse tema mais do que duplicou (ANAND; AMOR, 2016). A ACV

de edificações segue a mesma metodologia estabelecida pela NBR 14040 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014). A norma europeia EN 15804:2012 (apud VILCHES; GARCIA-MARTINEZ; SANCHEZ-MONTAÑES, 2017), divide a ACV de edificações em 04 etapas: produto, construção, uso e fim de vida (Figura 3).

Figura 3 – Etapas da ACV de edificações



Fonte: EN 15804:2012 (apud VILCHES; GARCIA-MARTINEZ; SANCHEZ-MONTAÑES, 2017). Adaptado pela autora

Para uma ACV de edificação completa, ou seja, do berço ao túmulo, os impactos de todas as fases devem ser analisados, o que torna a ACV de edificações mais trabalhosa, quando comparada com ACV de um único produto. Mais trabalhosa ainda é a comparação entre diferentes ACVs de edificações, pois, para que isso ocorra é necessário que os parâmetros considerados na análise sejam similares (ANAND; AMOR, 2016).

Além de uma edificação ser composta por diversos produtos e sistemas, Cabeza et al. (2014) destacam outros desafios do ACV aplicado às edificações, dentre eles: (a) cada edificação é construída em um sítio diferente, e os impactos dessa localização devem ser considerados (distância de transporte, impactos na vizinhança, dentre outros); (b) a complexidade dos processos construtivos e a singularidade de cada edificação; (c) o cenário mercadológico incerto; e (d) as questões ambientais internas de conforto e saúde do usuário também devem ser consideradas.

Buyle, Braet e Audenaert (2013) acrescentam que algumas das dificuldades na elaboração de ACV em edificações incluem o longo ciclo de vida considerado (entre 50 e 100 anos), e conseqüentemente a imprevisibilidade do comportamento dos componentes da edificação durante esse período. Dessa forma, tendo em vista que

os processos construtivos em edificações não são padronizados, a análise do seu ciclo de vida se torna uma tarefa desafiadora (BUYLE; BRAET; AUDENAERT, 2013).

Uma das formas de superar tais limitações é incentivar a participação da indústria da construção civil no aprimoramento e na criação de inventários, abastecendo-os de dados capazes de retratar os impactos, não apenas ambientais mas também sociais e econômicos (ANAND; AMOR, 2016). Tais informações fazem parte da Declarações Ambientais de Produto³, estratégia ainda pouco utilizada, principalmente nos países em desenvolvimento (ORTIZ-RODRÍGUEZ; CASTELLS; SONNEMANN, 2010).

O desenvolvimento de tecnologia da informação ligada ao setor da construção civil oferece ferramentas para auxiliar no cálculo da ACV de edificações. A utilização do *Building Information Modeling* (BIM)⁴ para Análises do Ciclo de Vida tem como propósito gerar e extrair informações do projeto de forma a otimizar os processos de tomada de decisões. Segundo Eleftheriadis, Mumovic e Greening (2017), os benefícios da utilização dessa plataforma podem ser resumidos em 04 pontos principais: (1) automatiza o lançamento dos dados; (2) permite a análise em tempo real; (3) analisa a edificação como um todo; (4) possui interface amigável para o usuário. Entretanto, apesar desses benefícios, os estudos de caso que utilizam o BIM nas ACVs de edificações ainda não o aplicam em todas as etapas, necessitando de novas pesquisas que desenvolvam essa integração (ELEFTHERIADIS; MUMOVIC; GREENING, 2017).

Ainda são raras as pesquisas que integram as duas ferramentas, principalmente no Brasil, que entre 2009 e 2015 foram encontrados apenas 03 trabalhos sobre o assunto, sendo duas dissertações e um artigo (CALDAS, 2015). Em revisão sistemática de literatura, Barros, Silva e Ruschel (2016) encontraram apenas seis artigos que abordavam ACV e BIM conjuntamente, e constataram que a relação entre as duas ferramentas ou é inexistente ou ainda encontra grandes desafios.

Soust-Verdaguer, Llatas e García-Martínez (2016) identificaram 3 níveis de integração entre BIM e ACV de edificações. O primeiro nível, e o mais comumente identificado nos estudos, refere-se à utilização do BIM como ferramenta de extração de quantitativos de materiais do modelo 3D. O segundo nível, além da modelagem e

³ O termo, mais conhecido em inglês, é Environmental Product Declaration (EPD)

⁴ Traduzido para o português como Modelagem da Informação da Construção

extração de quantidades, integra informações de softwares de análise energética. O último nível envolve o desenvolvimento de processos automatizados, combinando diferentes bases de dados e softwares.

Algumas pesquisas têm como objetivo simplificar o processo de ACV de edificações. Nesse sentido, Huedo, Mulet e López-Mesa (2016) criaram metodologia de ACV simplificada para aplicação em edificações na Espanha, que tem como objetivo auxiliar na escolha do material da envoltória. Todas as etapas foram incluídas na análise, exceto a etapa de demolição. A metodologia cria indicadores, que, por sua vez, descrevem os impactos em termos de emissões atmosféricas, utilização de recursos e geração de resíduos. Os materiais foram categorizados em 03 tipos diferentes (cobertura, fachada e esquadrias), baseando-se nas técnicas construtivas mais comuns do país, chegando-se a uma combinação de 45 tipos. A partir de análise estatística, foi elaborada uma matriz contendo o peso de cada impacto nas diferentes etapas do ciclo de vida da edificação, o que possibilita uma análise comparativa dos resultados.

Edificações localizadas em diferentes países apresentam resultados distintos. Há uma carência de ACV de edificações localizadas em países latino americanos. Ortiz-Rodríguez, Castells e Sonnemann (2010) comparam a ACV de duas residências unifamiliares, sendo uma localizada na Espanha e outra na Colômbia. A análise de berço ao túmulo considerou as características típicas de cada país, como materiais e métodos construtivos, matriz energética, hábitos de consumo, dentre outras. Os resultados mostraram que, na etapa de uso, a residência na Colômbia emite uma quantidade de CO₂ em torno de 73% inferior quando comparada com a residência na Espanha. Isso se deve principalmente às instalações de condicionamento de ar e água quente, que no caso das edificações residenciais colombianas, por estarem localizadas em clima sem invernos rigorosos, não necessitam de aparelhos aquecedores.

2.1.4 ACV energético de edificações

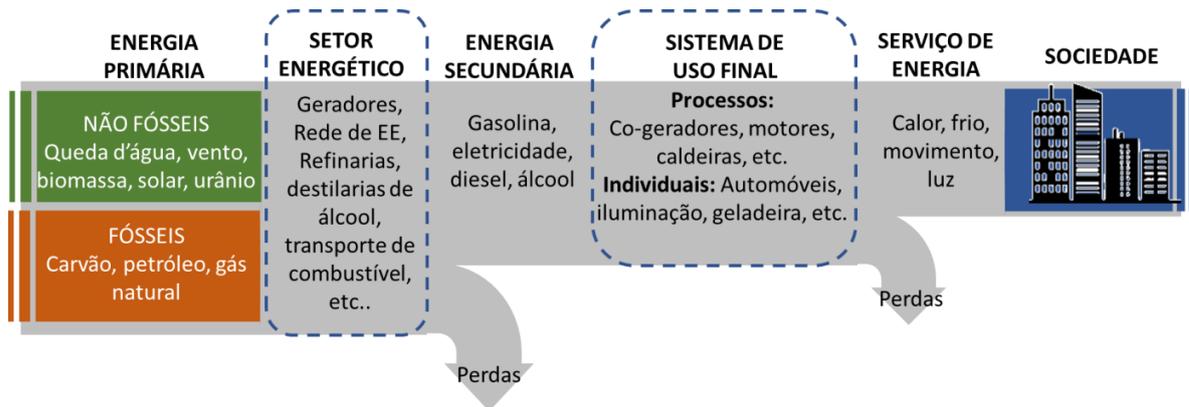
Em muitos estudos de ACV em edificações, os impactos ambientais estão pautados no consumo energético, seja ele medido por fatores indiretos, a partir da produção dos materiais que compõem a edificação, ou de forma direta, calculados no

período de uso, operação e manutenção (SARTORI; HESTNES, 2007). Segundo Cabeza e outros (2014), esses ACVs são conhecidos como Análise do Ciclo de Vida Energético (ACVE).

A produção de energia por si só gera impactos, relacionados à emissão de gases poluentes, poluição da água ou modificação de ecossistemas, como no caso das hidrelétricas, por exemplo. Cada país tem a sua matriz energética e, portanto, produz impactos de forma diferente. Para o cálculo desses impactos, é necessário que se avalie o processo de extração, conversão e perdas na distribuição da energia. Segundo Relatório publicado pela Empresa de Pesquisa Energética (BRASIL, 2016) “o setor elétrico brasileiro emite, em média, apenas 139,6 kg CO₂ para produzir 1 MWh, um índice muito baixo quando se estabelece comparações com países da União Europeia, EUA e China” (BRASIL, 2016, p. 9) Isso se dá porque a participação de fontes renováveis na matriz energética brasileira está entre as mais elevadas do mundo, contribuindo com 41,2% do total da energia gerada no ano de 2015. Com relação à produção de energia elétrica, 75,5% se dá por fontes renováveis, e dessas, 85% é produzida por hidrelétricas (BRASIL, 2016). Entretanto, Tavares (2006) verificou que 70% da energia utilizada na manufatura dos principais materiais construtivos brasileiros provêm de fontes fósseis não renováveis.

A Figura 4 representa o caminho percorrido pela energia, desde a extração dos recursos para sua produção, até a sua distribuição para os diversos setores da economia. A energia primária refere-se à energia proveniente diretamente da natureza, como petróleo, gás natural e energia hidráulica (INEE, 2017). A energia secundária é resultado do processo de transformação da energia primária, como a gasolina, produzida a partir do petróleo; e eletricidade, produzida por usinas hidrelétricas (INEE, 2017). Melhorar a eficiência energética significa encontrar formas de reduzir o consumo de energia primária, seja por meio da redução do consumo ou pela substituição de uma forma de energia por outra (INEE, 2017).

Figura 4 – Cadeia do uso da energia



Fonte: INEE, 2017, adaptado pela autora

Tavares (2006) foi um dos pioneiros nos estudos de ACVE de edificações no Brasil, trazendo para a realidade brasileira valores de consumo de energia em todas as etapas do ciclo de vida da edificação. Para tanto, aplicou a metodologia em cinco edificações residenciais típicas e concluiu que o consumo energético no ciclo de vida gira em torno de 15,01 GJ/m² à 24,17 GJ/m². Tais valores são considerados baixos quando comparados ao consumo em países desenvolvidos, que são entre 50 GJ/m² à 90 GJ/m². A participação da energia incorporada dos materiais no ciclo de vida ficou em aproximadamente 29% a 49%, valor significativo, quando comparado com estudos internacionais (TAVARES, 2006).

Entre os materiais construtivos mais utilizados, o concreto é o que mais causa danos ao meio ambiente, devido ao seu processo produtivo. Faludi, Lepech e Loisos (2012) constataram que a substituição de 25% de cimento por cinza volante gera uma redução de 3,4% da emissão de gases do efeito estufa associada à etapa de produção dos materiais. Assefa e Ambler (2017) fizeram a análise apenas da energia incorporada dos materiais, comparando dois cenários distintos de edificações: um aproveitando a estrutura da edificação existente e outro demolindo a existente e construindo uma nos padrões construtivos atuais. O aproveitamento da estrutura existente reduziu seis das sete categoriais de impacto analisadas. A redução foi entre 20% e 41%, mostrando que o concreto utilizado na estrutura é um dos materiais construtivos que mais agridem o meio ambiente.

Ramesh, Prakash e Shukla (2010) dividem a ACVE de edificações em 3 etapas: manufatura dos materiais, uso e demolição (Figura 5).

Figura 5 – Etapas da ACVE e respectivos cálculos de energia

MANUFATURA		USO	DEMOLIÇÃO
ENERGIA INCORPORADA (EI)		ENERGIA OPERACIONAL (EO)	ENERGIA DE DEMOLIÇÃO (ED)
EI INICIAL (EI_i)	EI RECORRENTE (EI_r)		
$\sum m_i M_i + E_c$	$\sum m_i M_i \left[\left(\frac{L_b}{L_{mi}} \right) - 1 \right]$	$E_{OA} L_b$	$E_D + E_T$
CICLO DE VIDA ENERGÉTICO (CVE) = $EI_i + EI_r + EO + ED$			

Nota: m_i - quantidade de material; M_i - energia incorporada por unidade do material; E_c - Energia para instalação do material no canteiro de obra; L_b - Vida útil da edificação; L_{mi} - Vida útil do material; E_{OA} - Energia operacional anual; E_D - Energia para demolição; E_T - Energia para transporte dos resíduos. Fonte: Ramesh, Prakash e Shukla (2010). Adaptado pela autora

Apesar de a etapa que mais consome energia ser a de uso (SARTORI; HESTNES, 2007), à medida que a indústria evolui tecnologicamente e desenvolve materiais mais eficazes do ponto de vista térmico, somado aos equipamentos cada vez mais eficientes, o foco pela redução dos impactos provenientes da construção civil volta-se para etapa de manufatura, ou seja, para a redução da energia incorporada dos materiais construtivos (DIXIT et al., 2010). O transporte de materiais entre as etapas, muitas vezes, é desprezado nos estudos, por representar uma porção muito pequena no total de energia no ciclo de vida. A esse respeito, Bin e Parker (2011) identificaram que o aumento das distâncias de transporte, apesar de elevar significativamente o valor absoluto de energia, tal consumo ainda é pouco representativo no contexto do ciclo de vida, chegando a 4% no estudo de caso específico. Portanto, em termos de impactos ambientais, tal estudo demonstrou a viabilidade de importar um produto de um local distante, caso o mesmo reduza o consumo energético na etapa de uso (FALUDI; LEPECH; LOISOS, 2012).

Em análise das ACVEs em edificações residenciais, Ghatta e outros (2016) verificaram que a fase de uso representa entre 45% e 95% do total da energia consumida em todo o ciclo de vida. Essa variação se dá devido às diferenças no projeto, na localização geográfica, e no período de análise. Essa porcentagem diminui à medida que se aumenta a performance energética da edificação, e a escolha dos materiais construtivos assume um papel decisivo nessa redução (GHATTA et al., 2016). Buyle, Braet e Audenaert (2013) constataram que, à medida que se aumenta

a energia incorporada dos materiais construtivos, reduz-se a energia operacional na fase de uso da edificação.

Quando às etapas da ACVE, na fase pré-operacional da edificação, calcula-se a energia necessária para manufatura dos materiais, sua instalação no canteiro de obra e a manutenção. Calcula-se a energia incorporada dos materiais que é dividida em duas partes: energia incorporada inicial e energia incorporada recorrente (ver Figura 5). A primeira refere-se à energia necessária à extração de matéria-prima, manufatura dos materiais, bem como o transporte e a instalação no canteiro de obra. A segunda refere-se à energia necessária para manutenção, reparos ou reposição dos materiais, já que nem todos têm a mesma vida útil da edificação. A quantidade de energia incorporada depende do tipo de material utilizado, da fonte primária de energia, e da eficiência nos processos de produção dos materiais construtivos (RAMESH; PRAKASH; SHUKLA, 2010).

Dixit e outros (2010) compararam o resultado de diversos estudos sobre energia incorporada das edificações e constataram um significativo índice de variabilidade. Para as edificações residenciais, a média foi de 5,5 GJ/m², com desvio padrão de 1,56 GJ/m². Para edificações comerciais, a média de energia incorporada foi de 9,19 GJ/m², com desvio padrão de 5,4 GJ/m². Segundo os autores, essa inconsistência nos resultados ocorre por diversos fatores, entre eles, devido às fronteiras do sistema consideradas nos estudos, à metodologia de análise, à localização geográfica, a se a energia calculada foi primária ou distribuída, à fonte dos dados e à tecnologia empregada na manufatura dos materiais.

Dixit e outros (2010) classificam a energia incorporada dos materiais em direta e indireta. A primeira refere-se à etapa de construção no canteiro de obra, das atividades de pré-fabricação e do transporte entre as indústrias de pré-fabricados e canteiro. A energia indireta refere-se à energia incorporada inicial (extração de matéria-prima, manufatura e transporte), recorrente e de demolição.

Há 04 tipos de métodos de análise da energia incorporada (TRELOAR, 1998, TAVARES, 2006, DIXIT et al., 2010):

- Baseada em processos: é um dos métodos mais utilizados por demandar uma análise mais detalhada de todos os processos, gerando resultados mais confiáveis. Consideram-se todas as possíveis entradas de energia das matérias-

primas utilizadas na produção de um determinado material. Entretanto, dependendo da complexidade, os resultados podem ser gerados de forma incompleta.

- Baseada em estatística: como o próprio nome sugere, a análise baseia-se em dados estatísticos gerados pelas fábricas ou órgãos governamentais sobre o consumo energético para fabricação de certos produtos. Indústrias de setores da construção específicos, como de cimento, aço e alumínio, detalham com credibilidade os índices de consumo de energia nos seus processos.
- Baseada em insumo x produto: análise baseada em fluxos financeiros entre diversos setores da indústria, transformando-os em fluxos energéticos, a partir da unidade de moeda correspondente (MJ/R\$).
- Análise híbrida: tem como objetivo unir as vantagens e mitigar os possíveis erros e limitações das demais abordagens metodológicas. A análise híbrida pode ser utilizada dependendo da disponibilidade e dificuldade de obtenção dos dados necessários para o cálculo da energia incorporada.

Na fase de uso, calcula-se a energia operacional, necessária ao funcionamento da edificação durante toda sua vida útil, como aparelhos de condicionamento de ar, iluminação, aquecimento de água e demais equipamentos. A quantidade de energia nessa fase depende dos requisitos de conforto térmico dos usuários, das condições climáticas e dos horários de funcionamento das atividades (RAMESH; PRAKASH; SHUKLA, 2010). Portanto, faz-se necessário conhecer o perfil de consumo dos ocupantes.

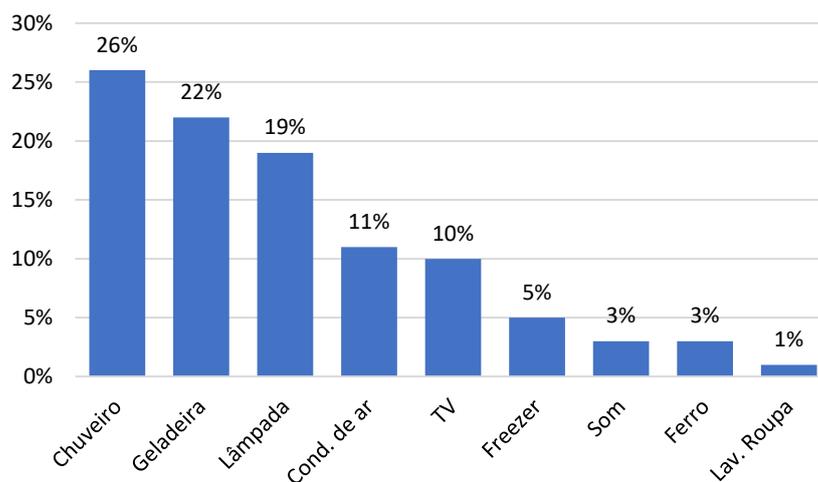
O Departamento de Planejamento e Estudos de Conservação de Energia realizou pesquisa em todo o território brasileiro para identificar quais são os usos e hábitos responsáveis pelo consumo de energia elétrica em edificações (ELETROBRAS, 2007a⁵). Nos setores comercial e público, o consumo maior de energia elétrica está no uso do ar condicionado (47% e 48% respectivamente). No caso do setor residencial, o chuveiro elétrico é o principal consumidor de energia (27%), logo acima da geladeira (22%). O ar condicionado corresponde a 20% de todo o consumo de energia no setor residencial. Entretanto, de acordo com a Eletrobrás (2007a), a participação desse equipamento tende a aumentar, pois ainda é baixo a posse desses aparelhos nas residências, e o seu barateamento incentiva a aquisição.

⁵ A última pesquisa sobre uso e hábitos de consumo no Brasil foi feita há 11 anos. Acredita-se que não houve mudanças significativas nos hábitos de consumo dos brasileiros. Entretanto, sabe-se da necessidade de pesquisas mais recentes sobre essa temática.

A iluminação também é responsável por boa parte do consumo de energia, participando de 14% do consumo do setor residencial, 22% no comercial e 23% no setor público (ELETROBRAS, 2007a).

O Gráfico 1 exemplifica a participação dos equipamentos no consumo final de energia elétrica para as habitações localizadas na região sudeste (ELETROBRAS, 2007b). O consumo por equipamento seguiu a tendência nacional, com maior participação do chuveiro elétrico, seguido da geladeira, lâmpadas e ar condicionado. Nota-se que a utilização de condicionadores de ar não é uma prática comum nas residências brasileiras, especialmente na região Sudeste, cuja posse e participação do ar condicionado no consumo final de energia elétrica apresentou os valores mais baixos, quando comparado com as outras regiões do país.

Gráfico 1 – Participação dos equipamentos no consumo final de energia elétrica na região Sudeste do Brasil



Fonte: ELETROBRAS, 2007b. Adaptado pela autora.

Segundo Sartori e Hestnes (2007), a etapa que mais consome energia é a de uso, mesmo nas edificações construídas com intuito de diminuir o consumo energético durante a operação (*low-energy buildings*). Por isso, muitas pesquisas focam apenas nas estratégias necessárias para redução do consumo energético nessa etapa. A energia consumida na fase de uso está relacionada ao desempenho térmico da edificação, já que, em muitos edifícios, o condicionamento térmico para manter os requisitos de conforto do usuário representa grande parte do total da energia consumida. Caldas, Pedroso e Sposto (2016), para cálculo da energia operacional,

adotaram 4 cenários de consumo distintos, considerando o chuveiro elétrico e ar condicionado como os principais equipamentos. Os autores concluíram que o consumo de energia para ambos é expressivo, e que se deve incentivar tanto a implementação de aquecedores solares quanto mecanismos que visem à melhoria do desempenho térmico da envoltória.

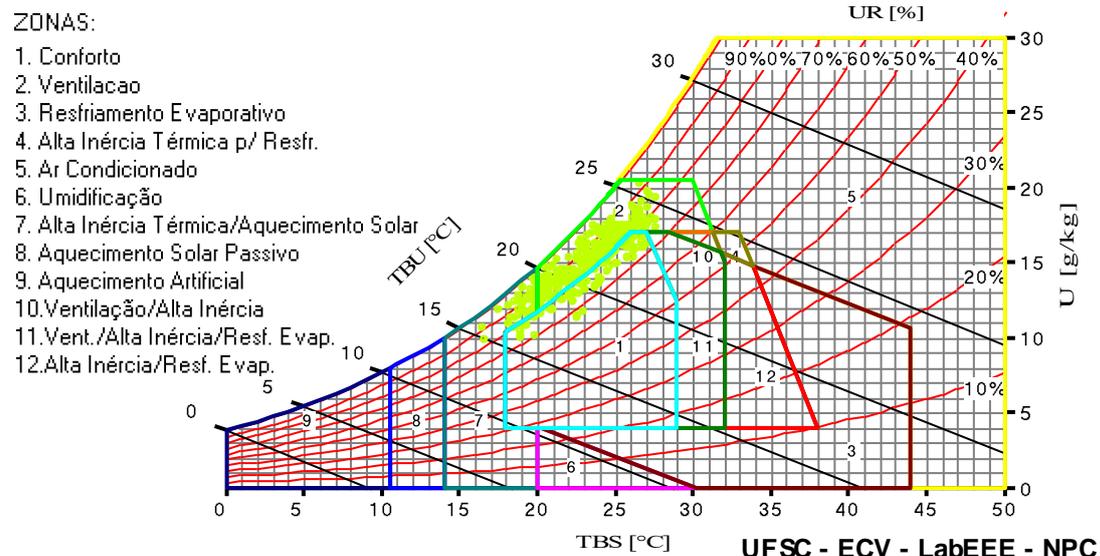
A etapa de demolição, como o próprio nome sugere, corresponde ao cálculo do consumo de energia necessária à desconstrução da edificação e ao transporte dos resíduos para o descarte em aterros ou para reciclagem. A energia consumida na etapa de demolição, em muitos casos, é insignificante ou até mesmo desconsiderada (RAMESH, PRAKASH E SHUKLA, 2010).

2.1.5 Desempenho energético e conforto térmico

Grande parte das iniciativas de diminuir o consumo de energia primária em edificações e, portanto, melhorar o desempenho, estão focadas apenas na etapa operacional. Uma das formas de associar a redução do consumo energético com a melhoria do conforto do usuário é através da implementação de estratégias de arquitetura bioclimática. Tal prática tira partido dos fenômenos físicos naturais decorrentes tanto das características climáticas do local quanto do comportamento térmico dos materiais e métodos construtivos, de forma a equilibrar o ambiente às condições de conforto necessárias ao bem-estar do usuário (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2013).

Uma das formas de definir estratégias de projeto é por meio da elaboração de cartas bioclimáticas. A carta bioclimática é traçada a partir de valores médios de temperatura de bulbo seco (TBS), temperatura de bulbo úmido (TBU), umidade absoluta do ar (U), e umidade relativa do ar (UR) da região onde se pretende estudar. Com base nesses dados, é possível identificar a zona de conforto, ou seja, os valores das variáveis climáticas para os quais não há necessidade de promover nenhum tipo de ação. Fora dos limites da zona de conforto, estabelecem-se diretrizes de projeto necessárias, tais como: ventilação, ar condicionado, umidificação, entre outras.

Figura 6 – Carta Bioclimática da cidade de Vitória (ES)



Nota: TBS (°C) Temperatura de bulbo seco; TBU (°C) Temperatura de bulbo úmido, U (g/Kg) umidade absoluta do ar; UR (%) Umidade relativa do ar. Fonte: Elaborado pela autora a partir do software Analysis BIO

A Figura 6 é um exemplo de carta bioclimática da cidade de Vitória (ES) produzida pelo software *Analysis BIO* (LabEEE, 2017), que avalia as condições de conforto térmico segundo a ISO 7730:2005 (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2005), a partir de arquivos climáticos e anuais. Os pontos amarelos representam as médias diárias de temperatura, durante todo o ano. Nota-se que, para a cidade de Vitória, alguns pontos encontram-se na zona de conforto (zona 1) porém a maioria dos pontos está na zona 2, que indica necessidade de ventilação.

Segundo a norma ANSI/ASHRAE 55 (ANSI, 2010), a condição de conforto depende de fatores como temperatura do ar, radiação térmica, umidade, velocidade do ar, nível de atividade e isolamento térmico da vestimenta. Tendo em vista que as condições de conforto são diferentes para cada indivíduo, pois dependem de aspectos fisiológicos e psicológicos, a norma americana de conforto adaptativo (ANSI, 2010) define um nível mínimo de satisfação de 80% dos usuários.

Lamberts e outros (2010a) destacam que há uma diferença entre comportamento térmico e desempenho térmico. O primeiro refere-se à resposta física dos materiais que compõem a edificação quando submetidos ao clima externo, bem como às solicitações internas, como cargas térmicas provenientes de pessoas e equipamentos. Avaliar o desempenho térmico da edificação é quando o seu comportamento térmico é confrontado com parâmetros de referência, ou seja,

requisitos pré-estabelecidos por normas que indicam os valores limites visando o bem-estar do usuário.

As trocas de calor que definem o comportamento térmico da edificação podem ocorrer por condução, convecção ou radiação. A condução ocorre quando a transferência de calor se dá em um meio sólido, como nas alvenarias opacas por exemplo. A convecção se dá através do movimento de fluidos, como o fluxo de ar numa edificação, que acontece naturalmente pela diferença de densidade e pressão. A radiação ocorre através de ondas eletromagnéticas provenientes do sol, e materiais translúcidos, como o vidro por exemplo, são protagonistas nesse tipo de fluxo energético.

Os materiais que compõem a envoltória da edificação são elementos fundamentais para o desempenho térmico, já que são responsáveis pelas trocas de calor entre o meio externo e interno. Existem as propriedades que são intrínsecas aos materiais, medidas em laboratório com metodologias e procedimentos específicos, tais como densidade⁶ (ρ), condutividade⁷ (λ), calor específico⁸ (c), absorvância⁹ (α) e emissividade¹⁰ (ϵ). A partir dessas propriedades básicas e através do método de cálculo prescrito na NBR 15220 (ABNT, 2005c) é possível calcular a transmitância (U), resistência (R) e a capacidade térmica (CT). A primeira representa a capacidade de conduzir calor por unidade de área e de diferença de temperatura (W/m^2K). É o inverso da Resistência térmica (m^2K/W). A capacidade térmica (CT) indica a quantidade de calor necessária para elevar em 1K a temperatura de um sistema (KJ/m^2K). Ademais, quanto maior a CT de um componente construtivo, maior a sua inércia térmica, ou seja, maior a sua capacidade de amortecer as temperaturas internas em relação às externas.

As normas brasileiras que tratam do desempenho de edificações estabelecem valores limites para essas propriedades, levando em conta as características

⁶ Quociente da massa pelo volume aparente de um corpo, medida em Kg/m^3 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005a).

⁷ Capacidade do material de conduzir energia térmica, medida em $W/m.K$ (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005a).

⁸ Quantidade de calor necessária para que 1g de uma substância varie sua temperatura em $1^\circ C$, medido em $J/Kg.K$ (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005a).

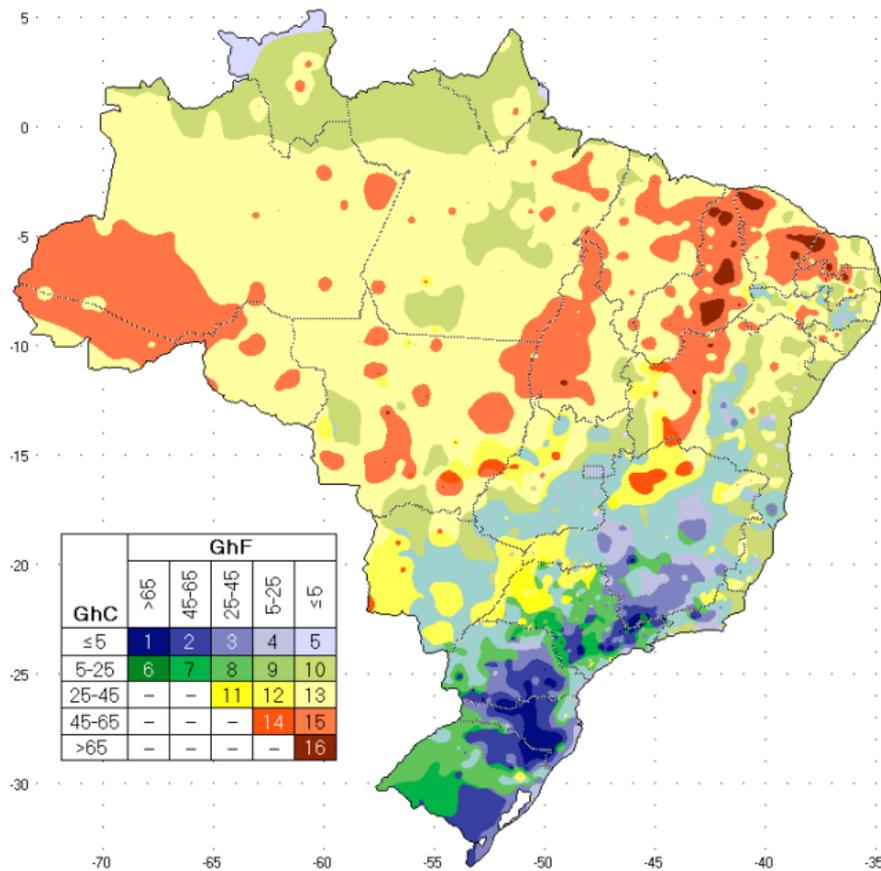
⁹ É a porcentagem de radiação solar incidente que é absorvida pela superfície. Está relacionada à cor da superfície. Quanto mais escura, maior o valor da absorvância (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005a).

¹⁰ Capacidade do material de emitir radiação eletromagnética (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005a).

climáticas das diferentes regiões do país. A NBR 15220 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005c) divide o país em 8 Zonas Bioclimáticas (ZB), cujas características foram determinadas a partir da metodologia das cartas climáticas. Mais da metade do território brasileiro encontra-se na ZB 8, que tem como característica clima quente e úmido. Para essa zona, a norma sugere a adoção de grandes aberturas para ventilação e sombreamento. Para o material de vedação externa (paredes externas e cobertura), a norma recomenda a utilização de materiais leves refletores, com valores máximos de transmitância e ventilação cruzada permanente como estratégia de condicionamento térmico passivo.

Encontra-se em andamento uma proposta de revisão do zoneamento bioclimático brasileiro (RORIZ, 2012), que retrate de forma mais apurada os diversos padrões climáticos de todo o território. A Figura 7 apresenta a nova proposta, que conta com 16 zonas bioclimáticas definidas a partir dos parâmetros anuais de graus-horas de calor (GhC) e graus horas de frio (GhF).

Figura 7 – Nova proposta de Zoneamento Bioclimático brasileiro



Fonte: Roriz (2012, p. 10)

A NBR 15.575 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013a) representou um significativo avanço na indústria da construção civil, ao estabelecer uma série de requisitos, critérios de desempenho e métodos de avaliação para os diferentes elementos construtivos (estrutura, piso, vedação, cobertura e instalações hidrossanitárias), com foco na segurança, habitabilidade e sustentabilidade (CBIC, 2013).

No que se refere ao desempenho térmico, a norma apresenta duas formas de avaliação. A primeira é a forma simplificada, cujo procedimento baseia-se no atendimento aos valores máximos de transmitância térmica (U) e mínimos de capacidade térmica (CT) do material da envoltória da edificação. Quando à avaliação simplificada, esta não atende os requisitos estabelecidos, recorre-se assim ao segundo tipo de avaliação, feita por meio de simulação computacional. A norma recomenda a utilização do programa *EnergyPlus* e estabelece critérios a ser considerados na simulação, como dados das propriedades térmicas dos materiais e ambientes críticos passíveis de análise. Para ambos os procedimentos, há três níveis de desempenho: mínimo, intermediário e superior.

D'ell Santo, Alvarez e Nico-Rodrigues (2013) encontraram inconsistências na NBR 15575 (ABNT, 2013), ao confrontar seus requisitos de conforto aos parâmetros adotados por outras referências já conhecidas, como o conforto adaptativo da ASHRAE¹¹ e o índice Frequência de Desconforto Térmico (FDT). Isso se deve à simplificação do método de análise da referida norma, que desconsidera os ganhos térmicos com ocupação e equipamentos e analisa somente os valores máximos diários de temperatura.

Nudel (2017) também encontrou deficiências na norma de desempenho, ao verificar que o método simplificado não considera vidros nem elementos sombreadores na avaliação do desempenho. Ao avaliar apenas as propriedades de transmitância e capacidade térmica dos elementos opacos, a norma permite a concepção de “edifícios estufa”, como o edifício Vitra em São Paulo, por exemplo. A edificação residencial de alto padrão se apresenta como ícone de sustentabilidade e desempenho, por possuir certificação ambiental. Entretanto, a obra foi analisada pelo método da simulação e se constatou acúmulo de carga térmica solar por condução, acarretando significativo aumento da temperatura do ambiente interno.

¹¹ *American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers*

2.1.6 Selo PROCEL Edifica

A etiquetagem de edificações, bem como os órgãos certificadores de sustentabilidade, está se tornando uma prática cada vez mais comum. Em diversos países da Europa a etiquetagem de edificações já é obrigatória para todos os setores construtivos. No Brasil, a Eletrobrás é o órgão do governo responsável pela execução do PROCEL (Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica).

O PROCEL foi criado em 1985 com objetivo de promover o uso eficiente da energia elétrica e instituiu em 1993 o Selo Procel de Economia de Energia, o qual estimula a fabricação e a comercialização de produtos mais eficientes a partir da divulgação ao consumidor do seu nível de eficiência no ato da compra do produto (BRASIL, 2015).

Em 2001, após o episódio que ficou conhecido como “apagão”, foi sancionada a lei federal 10.295 (BRASIL, 2001) que obrigou os fabricantes de máquinas e aparelhos elétricos a obedecer e a comprovar níveis máximos de consumo de energia e mínimos de eficiência energética. A nova lei também estimulou o poder executivo a desenvolver mecanismos que promovam a eficiência energética nas edificações.

Em novembro de 2014, foi criado o Selo Procel Edifica, cujo principal objetivo é motivar o mercado consumidor a adquirir imóveis mais eficientes, por meio da classificação quanto ao seu nível de eficiência energética (BRASIL, 2015). O Programa Brasileiro de Etiquetagem em Edificações (PBE Edifica) classifica edificações residenciais, comerciais e públicas em níveis que vão de “A” (mais eficientes) até “E” (menos eficiente). Já é obrigatória a obtenção do selo nível “A” para edificações públicas novas ou que passam pelo processo de retrofit (BRASIL, 2014).

O Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (RTQ-R) apresenta os requisitos técnicos e apresenta os métodos para classificação das edificações residenciais no que se refere à eficiência energética (BRASIL, 2012). Cada nível de eficiência equivale a um número de pontos, que vão de 1 a 5, referente aos níveis E ao A, respectivamente. Assim como na norma de desempenho, o RQT-R apresenta dois métodos de avaliação da eficiência, o prescritivo e por meio de simulação. Independentemente do método de avaliação, o nível de eficiência é determinado pelo seu Equivalente Numérico, resultado de uma

equação, cujas variáveis correspondem à região geográfica, ao desempenho térmico da envoltória, ao sistema de aquecimento de água e às bonificações.

No método prescritivo, cada variável é representada por um indicador, cujo valor foi obtido através de regressões múltiplas baseadas em mais de 150 mil simulações (VERSAGE, 2011). Caso o nível de eficiência seja calculado por simulação, para o cálculo de desempenho da envoltória, deve-se testar a edificação em duas situações: naturalmente ventilada e condicionada artificialmente. Na primeira, o desempenho é determinado pela quantidade de graus-horas de resfriamento (GHR) nos ambientes de permanência prolongada (quartos e sala). Para a edificação condicionada artificialmente, calcula-se o consumo relativo de energia para refrigeração (CR) e aquecimento (CA¹²). Outro requisito importante descrito no RTQ-R refere-se ao programa de simulação, que, entre outras características, deve ser verificado pela ASHRAE, modelar 8.760 horas por ano e produzir relatórios horários.

Segundo Silva, Almeida e Guisi (2013), o método prescritivo aponta de forma equivocada bons níveis de eficiência, por representar uma simplificação do método de avaliação por simulação. Entretanto, ainda são poucos os profissionais que dominam os softwares de desempenho energético, o que faz com que método prescritivo ainda seja o mais utilizado (CARVALHO et al., 2010).

Para o cálculo do consumo energético na etapa de uso, podem-se utilizar *softwares* específicos para simular o desempenho da edificação. O Departamento de Energia dos Estados Unidos lista um total de 150 programas de simulação de desempenho de edificações (DOE, 2017). Crawley et al. (2008) compararam as características e capacidades dos 20 *softwares* de simulação mais utilizados e concluíram que não há uma linguagem única para descrever as capacidades da ferramenta, mesmo aquelas que estão há mais tempo no mercado.

Uma das vantagens da utilização dessa ferramenta é a possibilidade de testar diferentes alternativas, tanto relacionadas ao projeto propriamente quanto à localização geográfica da edificação. Dentre os dados de entrada requeridos, destacam-se a geometria da edificação, sua orientação solar, características climáticas da região (temperaturas de bulbo seco e úmido, velocidade e predominância dos ventos e radiação solar), características térmicas dos materiais

¹² O CA só é calculado para as Zonas Bioclimáticas 1 a 4.

que compõem a edificação, sistema de condicionamento de ar, cargas internas (pessoas, equipamentos, luminárias), horários de funcionamento, dentre outras variáveis (BAHAR et al., 2013).

O *EnergyPlus* é um software de cálculo de desempenho energético que atende a todos os pré-requisitos descritos no RTQ-R (SILVA; ALMEIDA; GUIZI, 2013) e, por ser um software livre, é o mais utilizado para cálculo da etiquetagem da envoltória (GIACOMIN, 2017). Criado pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos, e administrado pelo *Lawrence Berkeley National Laboratory* (LBNL), o *EnergyPlus* funciona como uma calculadora abastecida de algoritmos matemáticos e termodinâmicos, cujos dados de entrada e saída são expressos em arquivos de texto (MAILE; FISCHER; BAZJANAC, 2007).

Maile, Fischer e Bazjanac (2007) fizeram análise das funcionalidades de dois softwares desenvolvidos pelo LBNL: DOE-2 e *EnergyPlus*. Os autores concluíram que a falta de uma plataforma gráfica é uma das limitações para o uso mais abrangente dessas ferramentas. A utilização desses programas, não apenas na fase de projeto mas também na fase de operação da edificação, incentiva o desenvolvimento desses softwares no sentido de aproximar o resultado das simulações às condições reais (MAILE; FISCHER; BAZJANAC, 2007).

Para melhorar a interface com o usuário foram desenvolvidas ferramentas de modelagem que facilitam a visualização da edificação e dos resultados. Uma dessas ferramentas é o *Euclid* (BIG LADDER SOFTWARE, 2017), um plugin do Sketchup que possibilita utilizar suas ferramentas de modelagem a fim de facilitar a visualização espacial da edificação a ser simulada. Apesar de ser uma ferramenta gratuita e de fácil utilização, o *Euclid* acessa apenas as ferramentas mais básicas do *EnergyPlus*. Para componentes mais específicos ou simulações mais detalhadas, o projetista deve recorrer ao próprio *EnergyPlus* (THE AMERICAN INSTITUTE OF ARCHITECTS, 2012). Entretanto, vale ressaltar que, apesar da fácil visualização, é fundamental que o usuário tenha conhecimento prévio dos mecanismos de cálculo para que possa analisar as simulações baseando-se em resultados que se enquadram à realidade da edificação.

Um dos inputs necessários à simulação são os dados climáticos da região onde o edifício está situado. O Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (LabEEE), da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), disponibiliza arquivos

climáticos de 14 cidades brasileiras, que são utilizados em programas de cálculo de desempenho que necessitam de dados horários de um ano completo (8760 horas). Tais arquivos são denominados TRY (*Test Reference Year*), traduzido como Ano Climático de Referência. As informações contidas nesses arquivos (temperatura de bulbo seco, temperatura de bulbo úmido, velocidade e direção dos ventos, dentre outras) são extraídas de estações automáticas, geralmente localizadas em aeroportos ou estações climáticas (CARLO, 2005).

Lamberts et al. (2010b) utilizaram o *software EnergyPlus* em várias etapas da “Casa Eficiente”¹³. Na etapa de projeto, foram testados 10 modelos, cada um contendo uma proposta de acréscimo de tecnologia diferente, de modo a testar a opção mais eficiente e compará-la com o modelo de referência. O *EnergyPlus* apresentou limitações ao simular o impacto da ventilação natural, que foi realizado de forma simplificada. Tais limitações foram resolvidas nas versões mais atualizadas do *software*. Após a edificação já construída, o modelo do *EnergyPlus* foi calibrado, a partir da comparação de dados adquiridos por medição na casa com os dados obtidos por simulação.

2.2 PESQUISAS REALIZADAS

Giacomin (2017) verificou que nos últimos 10 anos foram identificadas 105 publicações científicas que tratam do desempenho de edifícios nos padrões do PBE Edifica. Dessas, 43 analisaram edificações residenciais. Grande parte desses estudos fez análise de residências unifamiliares ou de edifícios multifamiliares em projetos de habitação social.

Triana, Lamberts e Sassi (2015) avaliaram o desempenho das principais tipologias de edificações residenciais brasileiras, baseando-se no método prescritivo. Os autores concluíram que as edificações apresentam um baixo grau de desempenho, especialmente no setor de baixa renda, como as edificações do Programa Minha Casa Minha Vida (PMCMV). As edificações apresentaram pior desempenho no período do verão, entre os níveis D e E, o que é uma contradição, já que 53,7% do território

¹³ Edificação residencial unifamiliar, desenvolvida pela UFSC com objetivo de testar diversas tecnologias ligadas ao desempenho energético e aproveitamento de água da chuva, bem como avaliar a eficácia de medidas passivas de condicionamento térmico.

brasileiro está localizado na Zona Bioclimática 8, cujo clima é quente e úmido (ABNT, 2005c).

Moreno, Morais e Souza (2017) também fizeram análise de uma residência unifamiliar nos padrões do PMCMV, porém, pelo método de simulação. As residências construídas nos padrões desse programa habitacional não consideram as particularidades climáticas de cada zona bioclimática brasileira. Em geral, os autores identificaram que paredes feitas com material cerâmico, cores claras da envoltória e proteção térmica com folhas de alumínio no telhado foram as soluções construtivas que obtiveram melhor desempenho. Os autores sugerem que mais estudos de desempenho devem ser realizados em zonas específicas, de modo a auxiliar no desenvolvimento de novos regulamentos construtivos, respeitando as condições climáticas locais.

Resultados nas diversas zonas bioclimáticas brasileiras também foram analisados no estudo feito por Oliveira et al. (2015) para um edifício de 4 pavimentos nos padrões de habitação social. Foi observada uma variabilidade de desempenho nas diversas cidades, considerando o mesmo padrão construtivo.

Silva e Ghisi (2013) compararam o desempenho de uma residência unifamiliar a partir da modificação das variáveis independentes, como a propriedade térmica da envoltória, as propriedades das aberturas e o contato das superfícies com o exterior. Os parâmetros mais influentes foram a absorvância solar e a emissividade da cobertura. Os autores destacaram a importância da análise da variabilidade dos parâmetros para que a etiquetagem se torne um método confiável de avaliação do desempenho.

Giacomin (2017) realizou levantamento no bairro Jardim Camburi, localizado na cidade de Vitória, estado do Espírito Santo. Tal levantamento visou conhecer as principais tipologias construtivas que compõe o bairro. Para cada edifício representativo da tipologia, a autora analisou o desempenho energético baseando-se no RTQ-R, pelo método prescritivo. Os resultados podem contribuir para a adoção de uma política mais eficiente para a indústria da habitação.

Nota-se, nos estudos apresentados sobre desempenho energético nos padrões PBE Edifica, a necessidade de estudos em edifícios localizados em regiões específicas, como para a cidade de Vitória (ES), por exemplo. Observa-se também uma carência de análises em edifícios residenciais que saiam do padrão de habitação

social, como edifícios multifamiliares acima de 4 pavimentos. As análises paramétricas da envoltória, como as realizadas em caso de retrofit, auxiliam na proposição de soluções construtivas mais eficazes, que ajudam no desempenho energético e no conforto do usuário.

Apesar de as medidas de retrofit se mostrarem eficazes na redução dos impactos ambientais (VILCHES; GARCIA-MARTINEZ; SANCHEZ-MONTAÑES, 2016), diversos estudos sugerem que pesquisas utilizando a abordagem da ACV em retrofit de edificações ainda são raras e necessitam de desenvolvimento (ANAND; AMOR, 2016, CABEZA et al. 2014, RAMESH; PRAKASH; SHUKLA, 2010, VILCHES; GARCIA-MARTINEZ; SANCHEZ-MONTAÑES, 2016). Muitas análises estão pautadas apenas no consumo de energia na fase operacional da edificação, desconsiderando as outras etapas do ciclo de vida e os demais impactos ambientais provenientes desse consumo (HAMMOND et al., 2014; CROSBIE et al., 2011). Vale ressaltar que as medidas ditas sustentáveis só podem ser aferidas após um balanço de todos os impactos, desde a extração da matéria-prima para fabricação dos materiais até a sua reciclagem após o descarte.

ACVs em casos de retrofit também são importantes para verificar a viabilidade das ações, comparando-as com a decisão de demolir e construir uma nova edificação. Weiler, Harter e Eicker (2017) fizeram estudo de ACV do berço-ao-túmulo em um edifício multifamiliar comparando quatro cenários distintos: sem retrofit, com poucas ações de retrofit, com aplicação de muitas ações de retrofit, e demolição e construção de nova edificação. A edificação com elevado nível de modificação apresentou também o maior valor de energia incorporada, devido ao acréscimo de materiais de isolamento da envoltória e troca das esquadrias. Entretanto, tal edificação foi a que apresentou o melhor desempenho na fase de uso. O período de amortização necessário para compensar a energia acrescida pela incorporação dos materiais foi de aproximadamente 4,5 anos de operação.

Bin e Parker (2012) calcularam um período de amortização de apenas dois anos de operação. Com as propostas de retrofit numa edificação unifamiliar histórica, houve um acréscimo de 51% no total da energia incorporada dos materiais, devido principalmente às estratégias de isolamento da envoltória. Entretanto, a edificação apresentou uma economia de 90% na energia necessária para aquecimento da edificação. Tal economia, acrescida ao curto período de amortização, mostra que a

decisão pelo retrofit é eficaz na redução dos impactos ambientais (BIN; PARKER, 2012).

Dodoo, Gustavsson e Sathre (2010) simularam medidas de retrofit em um edifício residencial construído em 1995 na Suécia. O objetivo das medidas era minimizar o consumo de energia primária utilizada para aquecimento dos ambientes internos. As principais ações foram direcionadas à envoltória, aumentando a sua propriedade isolante. Os autores testaram o resultado do retrofit considerando quatro tipos de sistemas de aquecimento diferentes. Desse modo, constatou-se que quanto maior a eficiência do sistema de aquecimento, menor os benefícios da implantação das medidas de retrofit. A redução do consumo de energia primária, devido ao retrofit, foi de 32% para o sistema menos eficiente e 6% para o sistema mais eficiente. O consumo energético na fase de operação continuou sendo o mais elevado, mesmo após o retrofit. Entretanto, houve redução da representatividade da etapa de operação no ciclo de vida, elevando a importância do consumo de energia primária para as demais etapas, como a de manufatura dos materiais e demolição.

Assefa e Ambler (2017) concluíram que se apenas 10% das edificações comerciais e institucionais canadenses passassem pelo processo de retrofit, em vez de serem demolidas e novas edificações construídas, a quantidade de CO₂equiv. que deixaria de ser lançado no meio ambiente equivale a 23% da quantidade de gases do efeito estufa emitidos no ano de 2013 provenientes das atividades humanas em todo o território canadense.

Nota-se que grande parte dos estudos que envolvem ACV de edificações com retrofit são edifícios localizados em clima temperado, onde se utilizam diferentes métodos construtivos e o consumo de energia na etapa de operação é elevado devido à exigência de sistemas de aquecimento. Dessa forma, fundamentado na revisão bibliográfica e em pesquisas já realizadas, este estudo tem como objetivo avaliar a influência de medidas de retrofit em edifícios existentes típicos de um bairro, tanto no desempenho da envoltória segundo o PBE Edifica quanto no ciclo de vida energético das edificações. Uma das principais contribuições deste estudo refere-se à análise de edifícios residenciais multifamiliares localizados em região de clima tropical, abordando os efeitos da implementação de medidas de retrofit no ciclo de vida energético dos edifícios, bem como na etiquetagem dos ambientes.

Seção 3

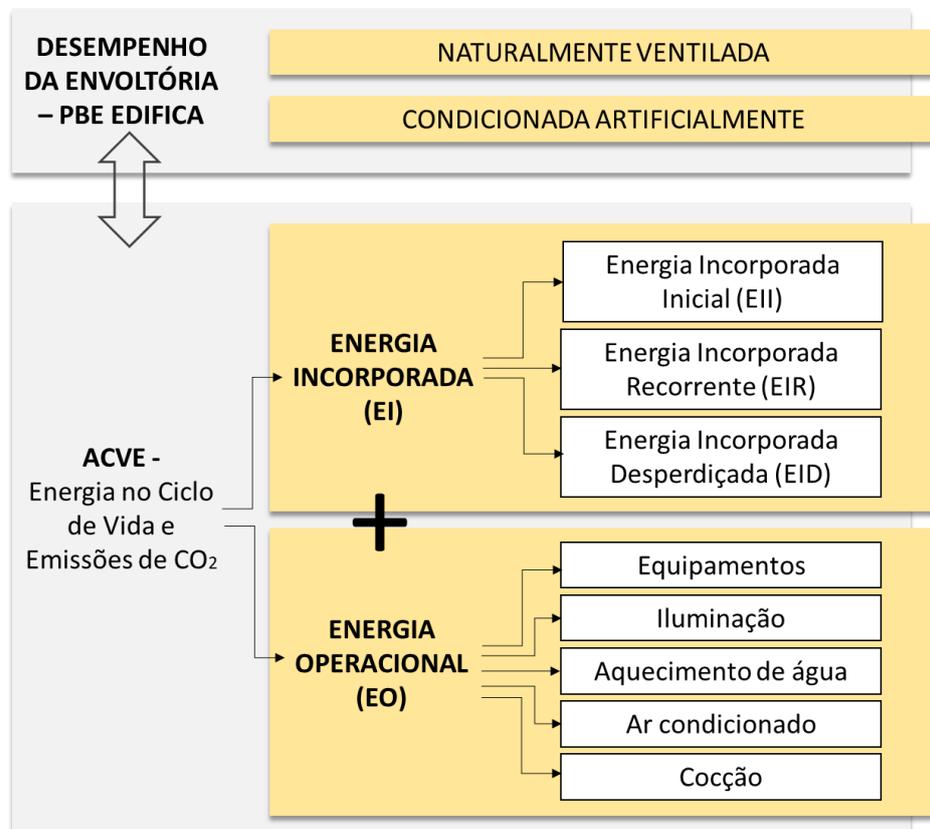
Metodologia



3 METODOLOGIA

Apresenta-se a seguir a metodologia utilizada para fins da presente pesquisa. A Figura 8 consiste em uma representação esquemática da metodologia aplicada às edificações do estudo de caso. Foram feitas duas análises paralelas. A primeira refere-se ao desempenho da envoltória segundo os padrões estabelecidos pelo PBE Edifica. Analisou-se a envoltória dos edifícios nas situações naturalmente ventilada e condicionada artificialmente.

Figura 8 – Representação esquemática da metodologia

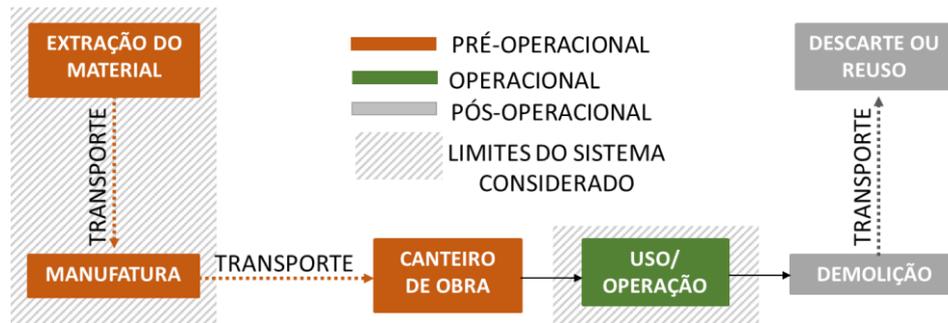


Fonte: Elaborado pela autora

A segunda análise refere-se à ACVE dos edifícios existentes. A Figura 9 representa os limites do sistema considerados na ACVE das edificações analisadas neste trabalho. Para a etapa pré-operacional, considerou-se a energia necessária à extração da matéria-prima, transporte da mesma à fábrica e energia necessária à manufatura do material. Para a etapa operacional, além da energia necessária ao uso da edificação, como equipamentos, ar condicionado, iluminação e aquecimento de

água, considera-se também aquela necessária à manutenção e reposição dos materiais. Já a energia para a construção no canteiro de obras não foi considerada por indisponibilidade de dados¹⁴. As etapas de construção e demolição, bem como o transporte entre essas etapas não foram consideradas, devido à imprecisão dos dados necessários ao cálculo do consumo energético nessas etapas.

Figura 9 – Limites do sistema considerado no estudo



Fonte: Elaborado pela autora

Para melhor compreensão dos impactos causados pelas medidas de retrofit, a energia no ciclo de vida foi dividida em Energia Incorporada (EI) e Energia Operacional (EO). Isso porque, como verificado em estudos anteriores, à medida que a EI aumenta a partir do acréscimo de materiais pelo retrofit, ocorre a redução da EO. Quanto às emissões associadas ao consumo de energia, considerou-se apenas as emissões de carbono (CO₂).

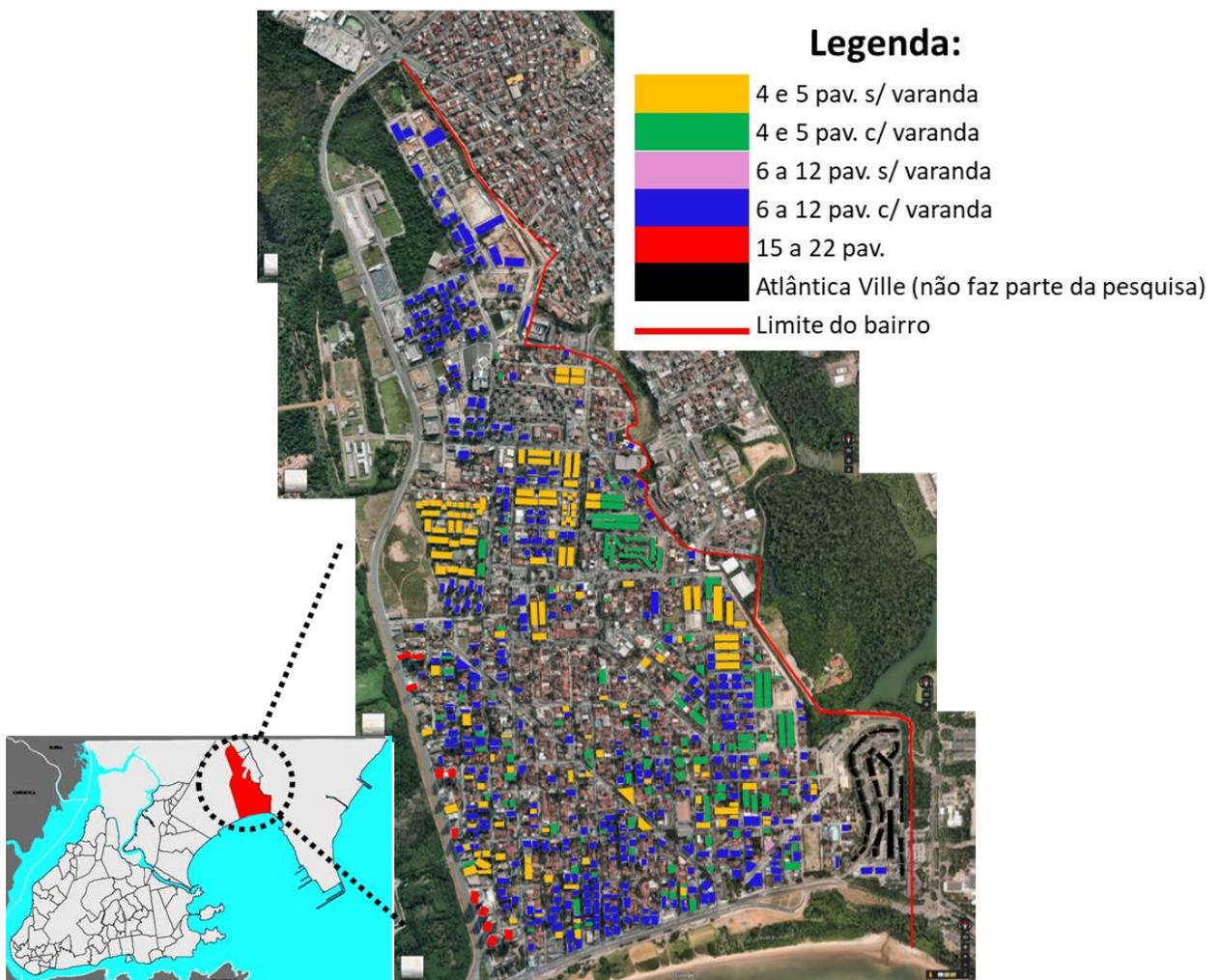
3.1 ESTUDOS DE CASO – TIPOLOGIAS ANALISADAS

O estudo de caso refere-se a 5 (cinco) edificações residenciais multifamiliares localizadas no bairro Jardim Camburi, Vitória (ES). A escolha baseia-se no levantamento feito por Giacomini (2017). A autora dividiu todas as edificações residenciais multifamiliares desse bairro em tipologias, baseadas na quantidade de pavimentos e se contêm ou não varanda, pois é um importante elemento de sombreamento. A Figura 10 é a imagem aérea do bairro Jardim Camburi, identificando a localização e a quantidade de edifícios para cada tipologia. Foram contabilizados

¹⁴ Algumas construtoras foram acionadas a fim de captar dados sobre o consumo de energia durante a construção. Porém as respostas obtidas, ou foram nulas, ou insuficientes para análises conclusivas.

663 edifícios residenciais multifamiliares. Desses, aproximadamente 57% enquadram-se na tipologia de edifícios que têm entre 6 e 12 pavimentos com varanda, identificados pela cor azul. Nota-se também que há uma concentração de edifícios entre 4 e 5 pavimentos (cores verde e amarelo) em uma determinada região, onde se encontram as edificações mais antigas, e por onde o bairro se estabeleceu. Em vermelho, estão as edificações mais novas, entre 15 e 22 pavimentos, localizadas próximas entre si, ao longo da via principal que limita o bairro.

Figura 10 – Mapa de Vitória com destaque para o bairro Jardim Camburi com a identificação das tipologias.



Fonte: GIACOMIN, 2017. Adaptado pela autora.

As edificações escolhidas para este estudo são as mesmas da Giacomini (2017), com acréscimo da tipologia de 15 a 22 pavimentos, que, apesar de pouco representativa, é a tipologia que representa as edificações mais novas do bairro. Por

ser muito representativa do bairro, Giacomini (2017) optou por calcular o desempenho de duas edificações da tipologia de edifícios que têm entre 6 e 12 pavimentos com varanda. A Figura 11 apresenta a imagem dos edifícios do estudo de caso.

Portanto, as denominações dos edifícios e respectivas tipologias são:

- Edifício 1 – representa a tipologia de 4 e 5 pavimentos sem varanda;
- Edifício 2 – representa a tipologia 4 e 5 pavimentos com varanda;
- Edifício 3 – representa a tipologia 6 a 12 pavimentos com varanda pequena;
- Edifício 4 – representa a tipologia 6 a 12 pavimentos com varanda grande;
- Edifício 5 – representa a tipologia 15 a 22 pavimentos.

Figura 11 – Edificações do estudo de caso.

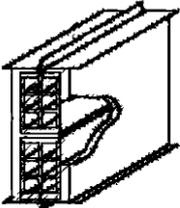


Nota: (1) Edifício 1; (2) Edifício 2; (3) Edifício 3; (4) Edifício 4; (5) Edifício 5. Fonte: GIACOMINI, 2017. Adaptado pela autora.

O bairro Jardim Camburi está localizado na cidade de Vitória, no estado do Espírito Santo (ES). Segundo a NBR 15220 (ABNT, 2005) a cidade de Vitória situa-se na Zona Bioclimática (ZB) 8. De acordo com a Prefeitura Municipal de Vitória (PMV, 2012), Jardim Camburi é um dos maiores e mais populosos bairros da cidade, com 39.157 habitantes (12,27% da população da cidade) e 2,61 Km² de área (2,8% do território da cidade). De acordo com o censo demográfico, entre 2000 e 2010, o bairro teve um crescimento populacional de 64% (PMV, 2013). A média de moradores por residência é de 2,7. A maioria dos domicílios (63%) é habitada por famílias cujo

rendimento mensal encontra-se entre 5 e 20 salários mínimos¹⁵, e a renda nominal média por domicílio do tipo apartamento é de R\$5.365,79 (PMV, 2013). O anexo A apresenta com mais detalhes dados relativos às características da população do bairro, bem como informações sobre atividades econômicas e investimentos realizados pela Prefeitura Municipal de Vitória (PMV). O Quadro 1 apresenta os dados dos edifícios residenciais multifamiliares do estudo de caso.

Quadro 1 – Dados das edificações residenciais multifamiliares

Dados	Edifício 1	Edifício 2	Edifício 3	Edifício 4	Edifício 5
Ano de aprovação do projeto na PMV	1981	1981	1996	2012	2014
Área da Unidade Habitacional (UH)	58,80 m ²	75,23 m ²	Tipo 1 = 54,66 m ² e Tipo 2 = 55,15 m ²	93,00 m ²	Tipo 1 = 154,70 m ² e Tipo 2 = 139,00 m ²
Qtd. Pavimentos tipos	03	03	09	09	17 + 1 cobertura duplex
UHs por pav.	08	08	06	02	04
Pé-direito (piso à teto)	2,71 m	2,71 m	2,80 m	2,70 m	2,70
Quartos por UH	02	03	02	03	04
Banheiros por UH	02	02	01	03	04
Aquecimento de água	Elétrico	Elétrico	Elétrico	Elétrico	Gás
Paredes da envoltória 	Bloco cerâmico 9cm e argamassa	Bloco cerâmico 9cm e argamassa	Bloco cerâmico 9cm e argamassa	Bloco cerâmico 9cm e argamassa	Bloco cerâmico 9cm e argamassa
Material cobertura 	Laje maciça 10cm e telha de fibrocimento	Laje maciça 10cm e telha de fibrocimento	Laje maciça 10cm e telha de fibrocimento	Laje plana pós tencionada 18cm e telha de fibrocimento	Laje plana tensionada 18cm e telha de fibrocimento

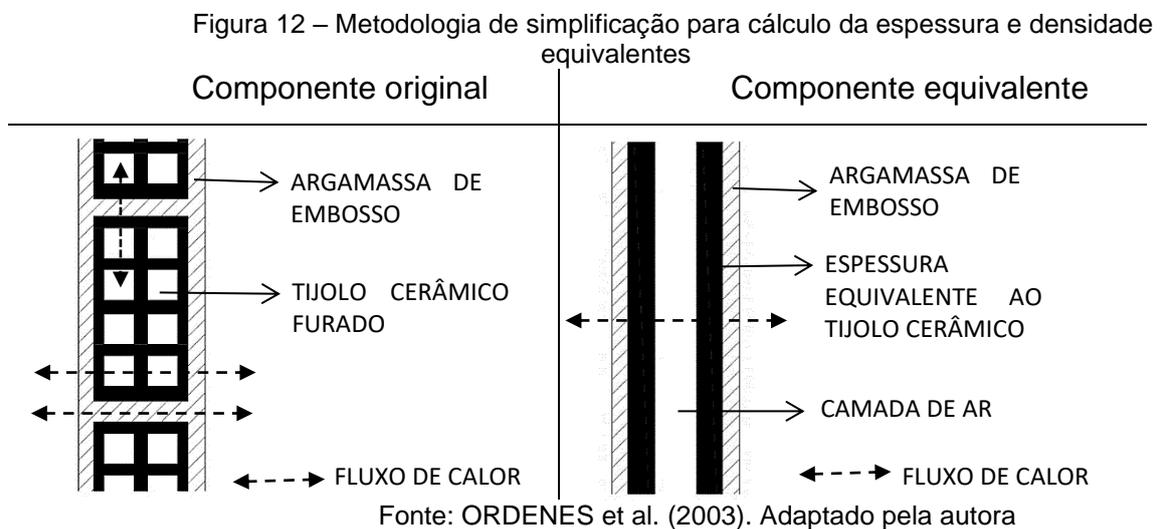
Fonte: GIACOMIN, 2017. Adaptado pela autora

¹⁵ O salário mínimo do ano de 2010 era de R\$510,00.

3.2 DESEMPENHO DA ENVOLTÓRIA SEGUNDO O PBE EDIFICA

Para o cálculo do desempenho da envoltória, segundo o PBE Edifica, adotou-se o método de simulação descrito pelo RTQ-R (BRASIL, 2012). Para tanto, utilizou-se o software *EnergyPlus* 8.4.0 (U.S DEPARTMENT OF ENERGY, 2016). Para modelagem energética, utilizou-se o *Euclid* 0.9.0 (BIG LADDER SOFTWARE, 2017), um *plug-in* que aproveita as ferramentas de desenho do *Sketchup* e cria arquivos em formato .idf para simulação no *EnergyPlus*.

O mecanismo de cálculo estipulado pela NBR 15220 (ABNT, 2005a) difere daquele estabelecido pelo *EnergyPlus*. Para lançamento dos dados relativos às propriedades térmicas dos materiais construtivos, adotou-se a metodologia de simplificação proposta por Ordenes et al. (2003), como mostra a Figura 12. Nesse caso, adotaram-se espessuras e densidades equivalentes dos materiais construtivos quando não estão dispostos em camadas homogêneas, como as alvenarias de tijolo, por exemplo, cujo fluxo de calor ocorre tanto no sentido transversal quanto no longitudinal.

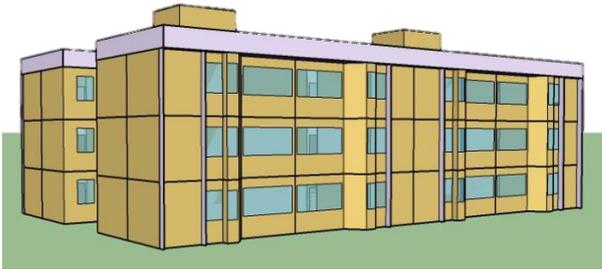
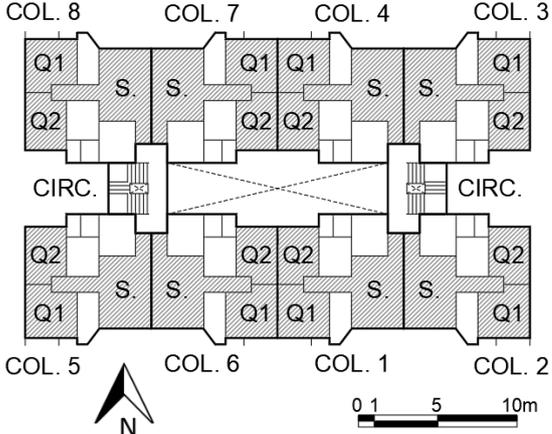


Modelou-se uma zona térmica para cada ambiente de permanência prolongada (quartos e sala). As áreas molhadas e as áreas de uso comum foram modeladas como uma única zona térmica. As zonas possuem orientação solar, características geométricas e propriedades térmicas dos materiais construtivos idênticas ao projeto.

Para as edificações acima de 3 pavimentos (tipologias 3, 4 e 5), somente as zonas térmicas do primeiro, do meio e do último pavimento foram analisados. O primeiro e o último pavimentos estão em situações específicas, por possuírem mais superfícies em contato direto com o meio externo. Considerou-se que os resultados do pavimento intermediário representam a média de todos os demais pavimentos, exceto o primeiro e último. Porém, para um resultado mais preciso, os pavimentos adjacentes aos analisados também foram modelados. Os demais pavimentos foram modelados como uma única zona térmica.

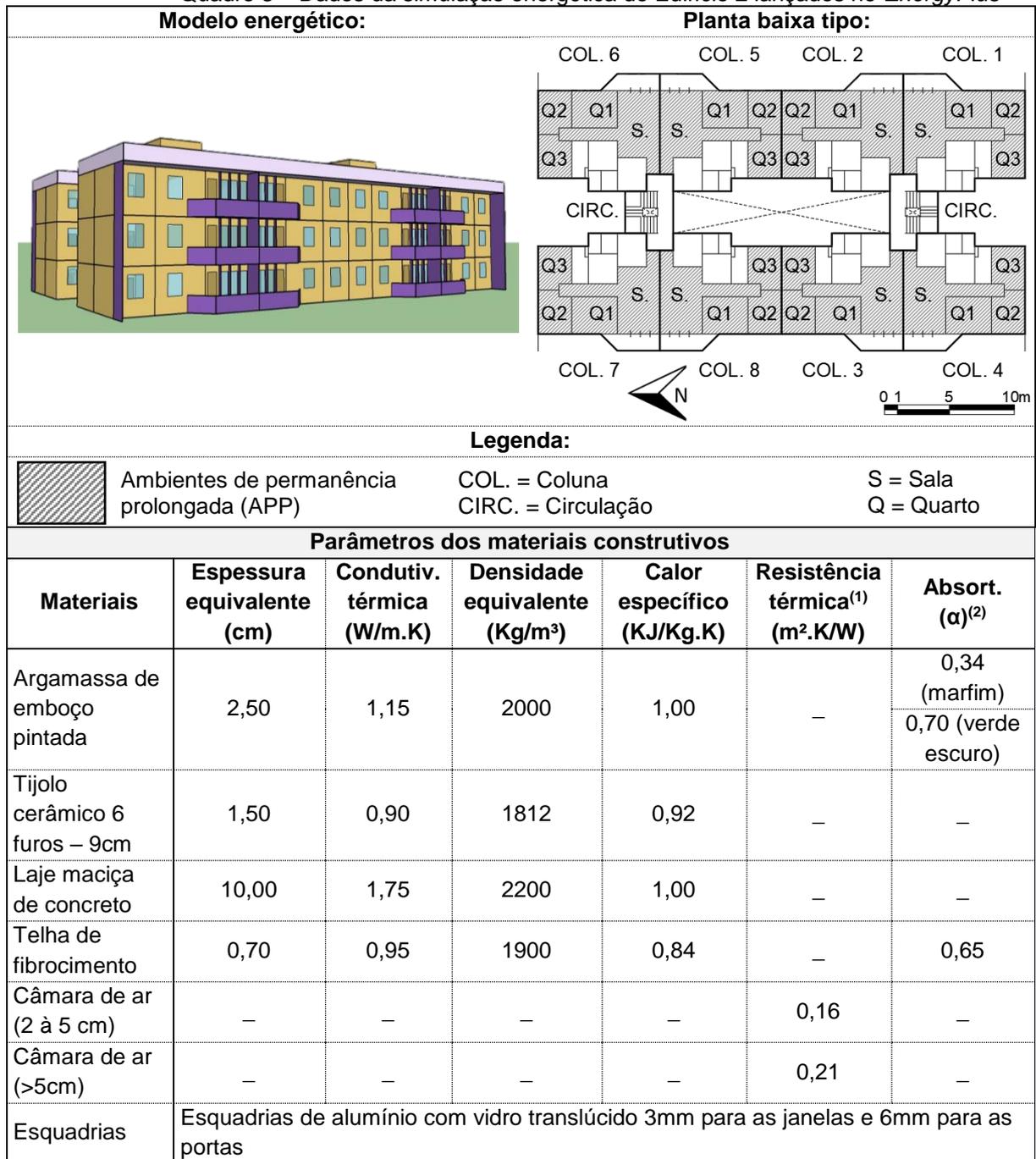
Os Quadros 2, 3, 4, 5 e 6 apresentam os dados das propriedades térmicas dos materiais construtivos dos edifícios 1 ao 5 respectivamente. Os quadros apresentam a figura do modelo energético e da planta baixa do pavimento tipo, destacando-se os ambientes de permanência prolongada (APP). Apenas os resultados das APPs foram considerados para análise. Os quadros também apresentam os materiais considerados de cada edifício, bem como os respectivos valores das propriedades térmicas lançados no *EnergyPlus*.

Quadro 2 – Dados da simulação energética do Edifício 1 lançados no *EnergyPlus*

Modelo energético:		Planta baixa tipo:				
						
Legenda:						
	Ambientes de permanência prolongada (APP)	COL. = Coluna	CIRC. = Circulação	S = Sala	Q = Quarto	
Parâmetros dos materiais construtivos						
Materiais	Espessura equivalente (cm)	Condutiv. térmica (W/m.K)	Densidade equivalente (Kg/m ³)	Calor específico (KJ/Kg.K)	Resistência térmica ⁽¹⁾ (m ² .K/W)	Absort. (α) ⁽²⁾
Argamassa de emboço pintada	2,50	1,15	2000	1,00	–	0,34 (marfim) 0,70 (verde escuro)
Tijolo cerâmico 6 furos – 9cm	1,50	0,90	1812	0,92	–	–
Laje maciça de concreto	10,00	1,75	2200	1,00	–	–
Telha de fibrocimento	0,70	0,95	1900	0,84	–	0,65
Câmara de ar (2 à 5 cm)	–	–	–	–	0,16	–
Câmara de ar (>5cm)	–	–	–	–	0,21	–
Esquadrias	Esquadrias de alumínio com vidro translúcido 3mm					

Nota: (1) Para os materiais opacos, essa propriedade é calculada automaticamente pelo programa a partir das demais propriedades térmicas. No entanto, para camada de ar, necessita-se apenas indicar a resistência térmica. (2) A propriedade de absorvância só foi identificada nos materiais da envoltória, onde há incidência solar.

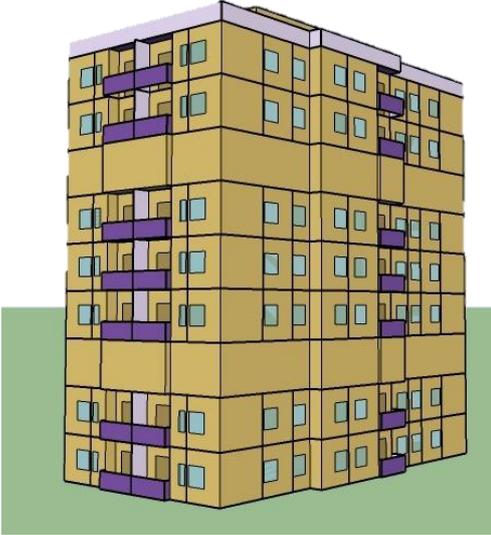
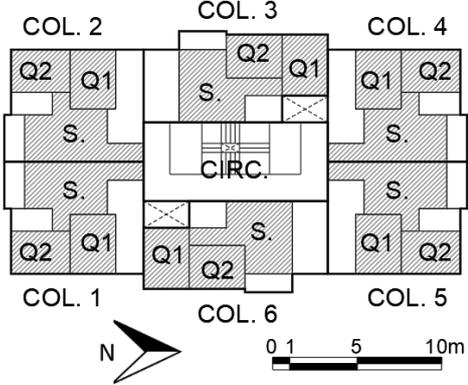
Fonte: ABNT (2005b); Dornelles (2008); Ordenes et al. (2003). Adaptado pela autora.

Quadro 3 – Dados da simulação energética do Edifício 2 lançados no *EnergyPlus*

Nota: (1) Para os materiais opacos, essa propriedade é calculada automaticamente pelo programa a partir das demais propriedades térmicas. No entanto, para camada de ar, necessita-se apenas indicar a resistência térmica. (2) A propriedade de absorvância só foi identificada nos materiais da envoltória, onde há incidência solar.

Fonte: ABNT (2005b); Dornelles (2008); Ordenes et al. (2003). Adaptado pela autora.

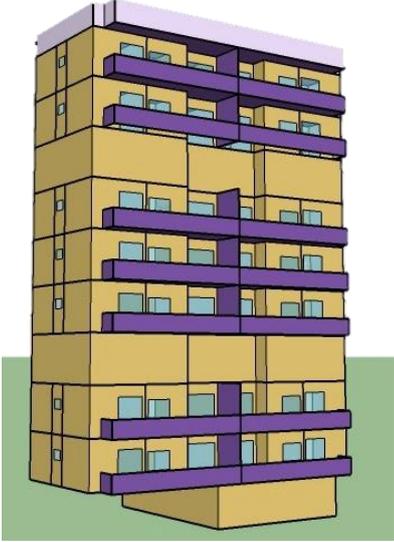
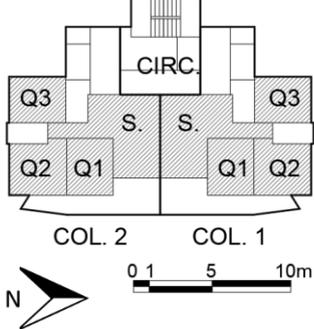
Quadro 4 – Dados da simulação energética do Edifício 3 lançados no *EnergyPlus*

Modelo energético:		Planta baixa tipo:				
						
Legenda:						
	Ambientes de permanência prolongada (APP)	COL. = Coluna	CIRC. = Circulação	S = Sala	Q = Quarto	
Parâmetros dos materiais construtivos						
Materiais	Espessura equivalente (cm)	Condutiv. térmica (W/m.K)	Densidade equivalente (Kg/m ³)	Calor específico (KJ/Kg.K)	Resistência térmica ⁽¹⁾ (m ² .K/W)	Absort. (α) ⁽²⁾
Argamassa de emboço pintada	2,50	1,15	2000	1,00	–	0,42 ⁽³⁾
Tijolo cerâmico 6 furos – 9cm	1,50	0,90	1812	0,92	–	–
Laje maciça de concreto	10,00	1,75	2200	1,00	–	–
Telha de fibrocimento	0,70	0,95	1900	0,84	–	0,65
Câmara de ar (2 à 5 cm)	–	–	–	–	0,16	–
Câmara de ar (>5cm)	–	–	–	–	0,21	–
Esquadrias	Esquadrias de alumínio com vidro translúcido 3mm para as janelas e 6mm para as portas					

Nota: (1) Para os materiais opacos, essa propriedade é calculada automaticamente pelo programa a partir das demais propriedades térmicas. No entanto, para camada de ar, necessita-se apenas indicar a resistência térmica. (2) A propriedade de absorvância só foi identificada nos materiais da envoltória, onde há incidência solar. (3) Valor de absorvância ponderada pela área da fachada, considerando 50% com $\alpha = 0,50$ (cor flamingo) e 50% com $\alpha = 0,34$ (cor marfim).

Fonte: ABNT (2005b); Dornelles (2008); Ordenes et al. (2003). Adaptado pela autora.

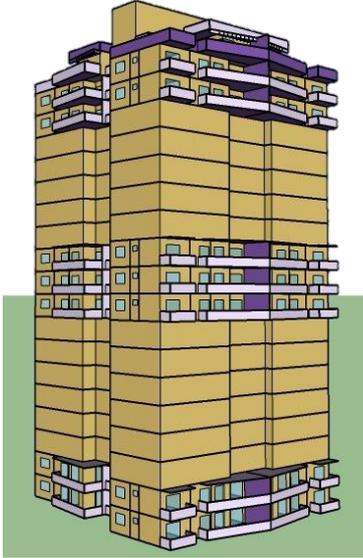
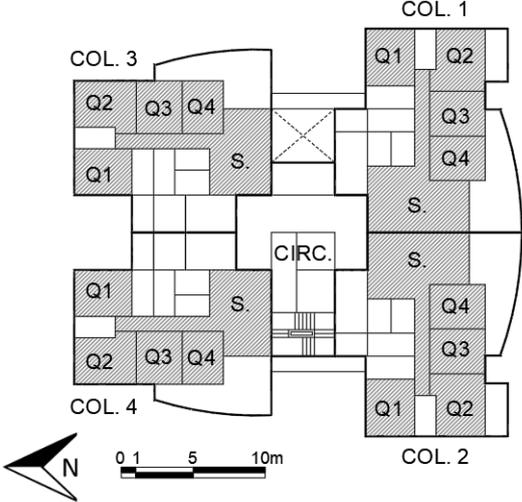
Quadro 5 – Dados da simulação energética do Edifício 4 lançados no *EnergyPlus*

Modelo energético:		Planta baixa tipo:				
						
Legenda:						
	Ambientes de permanência prolongada (APP)	COL. = Coluna	CIRC. = Circulação	S = Sala	Q = Quarto	
Parâmetros dos materiais construtivos						
Materiais	Espessura equivalente (cm)	Condutiv. térmica (W/m.K)	Densidade equivalente (Kg/m³)	Calor específico (KJ/Kg.K)	Resistência térmica ⁽¹⁾ (m².K/W)	Absort. (α) ⁽²⁾
Argamassa de emboço pintada	2,50	1,15	2000	1,00	–	0,45 (areia)
Tijolo cerâmico 6 furos – 9cm	1,50	0,90	1812	0,92	–	–
Laje plana pós tensionada	18,00	1,75	2200	1,00	–	–
Telha de fibrocimento	0,70	0,95	1900	0,84	–	0,65
Câmara de ar (2 à 5 cm)	–	–	–	–	0,16	–
Câmara de ar (>5cm)	–	–	–	–	0,21	–
Esquadrias	Esquadrias de alumínio com vidro translúcido 3mm para as janelas e 6mm para as portas. Guarda corpo das varandas em vidro 6mm bronze.					

Nota: (1) Para os materiais opacos, essa propriedade é calculada automaticamente pelo programa a partir das demais propriedades térmicas. No entanto, para camada de ar, necessita-se apenas indicar a resistência térmica. (2) A propriedade de absorvância só foi identificada nos materiais da envoltória, onde há incidência solar.

Fonte: ABNT (2005b); Dornelles (2008); Ordenes et al. (2003). Adaptado pela autora.

Quadro 6 – Dados da simulação energética do Edifício 5 lançados no *EnergyPlus*

Modelo energético:		Planta baixa tipo:				
						
Legenda:						
	Ambientes de permanência prolongada (APP)	COL. = Coluna	CIRC. = Circulação	S = Sala	Q = Quarto	
Parâmetros dos materiais construtivos						
Materiais	Espessura equivalente (cm)	Condutiv. térmica (W/m.K)	Densidade equivalente (Kg/m ³)	Calor específico (KJ/Kg.K)	Resistência térmica ⁽¹⁾ (m ² .K/W)	Absort. (α) ⁽²⁾
Argamassa de emboço pintada	2,50	1,15	2000	1,00	–	0,41 ⁽³⁾
Tijolo cerâmico 6 furos – 9cm	1,50	0,90	1812	0,92	–	–
Laje tensionada de concreto	18,00	1,75	2200	1,00	–	0,45
Laje maciça do deck da piscina - cobertura	10,00	1,75	2200	1,00	–	0,75 ⁽⁴⁾
Telha de fibrocimento	0,70	0,95	1900	0,84	–	0,16 ⁽⁵⁾
Câmara de ar (2 à 5 cm)	–	–	–	–	0,16	–
Câmara de ar (>5cm)	–	–	–	–	0,21	–
Esquadrias	Esquadrias de alumínio com vidro translúcido 3mm para as janelas e 6mm para as portas. Guarda corpo das varandas em vidro 6mm verde.					

Nota: (1) Para os materiais opacos, essa propriedade é calculada automaticamente pelo programa a partir das demais propriedades térmicas. No entanto, para camada de ar, necessita-se apenas indicar a resistência térmica. (2) A propriedade de absorvância só foi identificada nos materiais da envoltória, onde há incidência solar. (3) Valor de absorvância ponderada pela área da fachada, considerando 80% com $\alpha = 0,34$ (cor marfim) e 20% com $\alpha = 0,70$ (verde escuro). (4) O deck é revestido com cerâmica imitando madeira. (5) Por meio de informação passada por um morador, a telha de fibrocimento recebeu tratamento térmico com pintura branca.

Fonte: ABNT (2005b); Dornelles (2008); Ordenes et al. (2003). Adaptado pela autora.

Simulou-se o desempenho da edificação em duas situações: (a) naturalmente ventilada; (b) condicionada artificialmente. Para a situação em que a edificação é naturalmente ventilada, calcula-se a quantidade de graus-horas de resfriamento (GHR) anual conforme a Equação 1 (BRASIL, 2012). A temperatura operativa horária (T_o) é calculada através da Equação 2.

$$GH_R = \sum (T_o - 26^{\circ}C)^{16} \quad (1)$$

Onde, T_o = temperatura operativa horária ($^{\circ}C$).

$$T_o = A \cdot T_a + (1 - A) \cdot T_r \quad (2)$$

Onde, T_o = Temperatura operativa horária ($^{\circ}C$)

$A = 0,5$ (constante quando velocidade do ar é menor ou igual a $0,2m/s$)

T_a = Temperatura do ar no ambiente ($^{\circ}C$)

T_r = Temperatura radiante média ($^{\circ}C$)

Para a simulação em que a edificação é condicionada artificialmente, calcula-se o consumo relativo de energia necessária para refrigeração (CR), em KWh/m^2 . A capacidade do sistema de refrigeração é automaticamente calculada pelo programa de simulação, a partir dos parâmetros indicados no RTQ-R (BRASIL, 2012). No caso de edificações residenciais, consideram-se apenas os quartos condicionados artificialmente no período de 21h às 8h. Nos demais horários, considera-se a edificação naturalmente ventilada. O Quadro 7 apresenta um resumo dos parâmetros a ser considerados no *software* para cálculo dos níveis de eficiência, conforme especificações do PBE Edifica (BRASIL, 2012).

¹⁶ $26^{\circ}C$ é a temperatura base para cálculo dos graus-horas de resfriamento.

Quadro 7 – Parâmetros lançados no *software* para cálculo dos níveis de eficiência

Item	Parâmetro	Valor
Ventilação natural	Coeficiente de rugosidade do entorno	0,33
	Coeficiente de descarga (C_D)	0,60
	Coeficiente do fluxo de ar por frestas (C_Q)	0,001 Kg/s.m
	Expoente do fluxo de ar (n)	0,65
	Temperatura do termostato	20°C ¹⁷
Ocupação	Quantidade de pessoas	2 por dormitório
	Taxa metabólica sala	108 W ¹⁸
	Taxa metabólica quarto	81 W ¹⁹
	Padrão de ocupação	Gráficos 2 e 3
Iluminação	Densidade de Potência Instalada (DPI) sala	6,0 W/m ²
	DPI dormitórios	5,0 W/m ²
	Padrão de uso da iluminação	Quadro 8
Equipamentos	Carga interna para sala	1,5 W/m ²
	Padrão de utilização	Ligado 24 hrs
Ar condicionado	Temperatura do termostato	24°C
	Taxa de fluxo de ar por pessoa	0,00944 m/s
	Modo de operação do ventilador	Contínuo
	Eficiência do ventilador	70%
	Eficiência do motor	90%
	Razão entre o calor retirado do ambiente e a energia consumida pelo equipamento	3,00 WW
	Razão entre o calor fornecido ao ambiente e a energia consumida pelo equipamento	2,75 WW
	Número máximo de horas não atendidas do sistema de condicionamento de ar	10%

Fonte: BRASIL, 2012. Adaptado pela autora

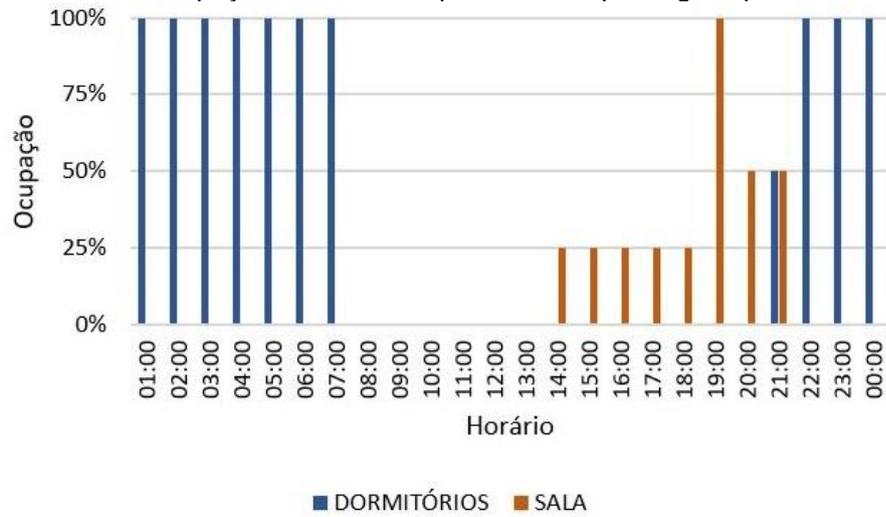
Os Gráficos 2 e 3 apresentam o padrão de ocupação nos dias de semana e nos finais de semana, respectivamente, dos ambientes de permanência prolongada. O Quadro 8 apresenta o padrão de iluminação dos dormitórios e da sala.

¹⁷ Controle automático de abertura das janelas, que abre as janelas quando a temperatura interna do ambiente é igual ou maior que a temperatura indicada no termostato.

¹⁸ Calor produzido de 60 W/m² para área de pele igual a 1,80m².

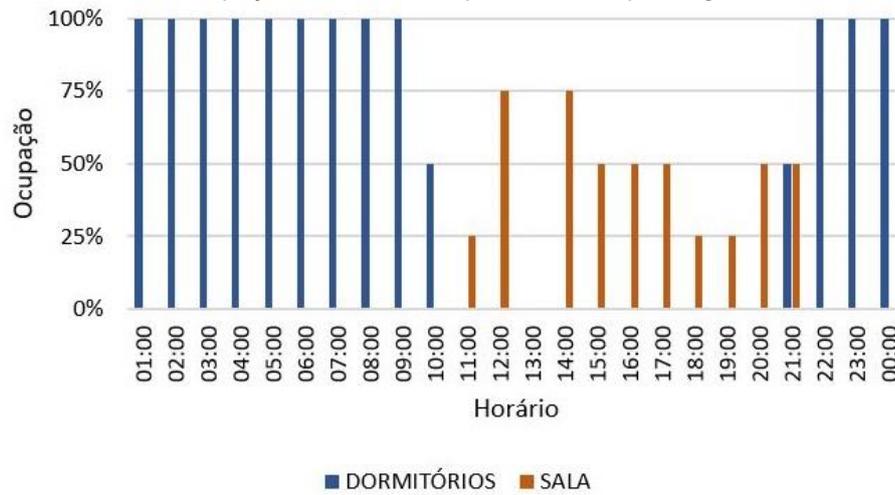
¹⁹ Calor produzido de 45 W/m² para área de pele igual a 1,80m².

Gráfico 2 – Padrão de ocupação nas áreas de permanência prolongada para os dias da semana



Fonte: BRASIL, 2012. Adaptado pela autora

Gráfico 3 – Padrão de ocupação nas áreas de permanência prolongada nos finais de semana



Fonte: BRASIL, 2012. Adaptado pela autora

Quadro 8 – Padrão de iluminação nas áreas de permanência prolongada

HORA		1:00	2:00	3:00	4:00	5:00	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00	0:00	
DORMIT.	DIA DE SEMANA							■															■	■		
	FINAL DE SEMANA									■														■	■	
SALA	DIA DE SEMANA																		■	■	■	■	■			
	FINAL DE SEMANA											■	■						■	■	■	■	■			

■ ILUMINAÇÃO LIGADA
□ ILUMINAÇÃO DESLIGADA

Fonte: BRASIL, 2012. Adaptado pela autora

Os resultados das simulações foram comparados com valores de referência para a cidade de Vitória (ES), descritos na Tabela 1. Outros requisitos de desempenho estabelecidos no PBE Edifica para etiquetagem, como sistema de aquecimento de água e bonificações, não serão abordados nesse estudo.

Tabela 1 – Valores de referência de GHR e CR para a cidade de Vitória (ES)

Eficiência	EqNum	GHR (horas)		CR (kWh/m².ano)	
A	5,00		GHR ≤ 1847,60		CR ≤ 35,13
B	4,00	1848	< GHR ≤ 3895,27	35,126	< CR ≤ 53,58
C	3,00	3895	< GHR ≤ 5404,81	53,578	< CR ≤ 75,24
D	2,00	5405	< GHR ≤ 7255,43	75,241	< CR ≤ 92,94
E	1,00	7255	< GHR	92,938	< CR

Fonte: PBE EDIFICA, 2017

3.3 ENERGIA INCORPORADA (EI)

A EI, conforme descrito na Equação 3, é o somatório da Energia Incorporada Inicial (EII), necessária para extração e manufatura dos materiais; Energia Incorporada Recorrente (EIR), necessária para manutenção, e Energia Incorporada Desperdiçada (EID), calculada a partir dos índices de perda do material no canteiro.

$$EI = \sum EII + EIR + EID \quad (3)$$

Onde: EII = Energia Incorporada Inicial (MJ); EIR = Energia Incorporada Recorrente (MJ); EID = Energia Incorporada Desperdiçada (MJ)

Calculou-se também as emissões de carbono associadas ao consumo energético, que dependem do processo de produção do material. As emissões de carbono resultantes do consumo de energia para extração e manufatura dos materiais são chamadas de Carbono Incorporado Inicial (CII). Já a manufatura e a reposição dos materiais durante a operação são chamadas de Carbono Incorporado Recorrente (CIR) e as emissões de CO₂ resultantes do consumo de energia do material que é perdido no canteiro de obras são chamadas de Carbono Incorporado Desperdiçado

(CID). Assim como no cálculo da EI, o cálculo do Carbono Incorporado total (CI) é o somatório do CII, CIR e CID.

A Tabela 2 (p. 79) apresenta os valores de EI (MJ) e CI (kgCO₂) por kg de material construtivo. Grande parte dos valores unitários de EI e CI foi extraída de Tavares (2006). Sabe-se que, apesar dos esforços em trazer os valores de energia e carbono incorporados para a realidade brasileira, ainda são escassas literaturas técnicas que tenham esse objetivo. Os resultados, portanto, devem ser analisados com cautela e de forma relativa, comparando-os com estudos similares.

3.3.1 Energia Incorporada Inicial (EII)

Para o cálculo da EII é necessário conhecer o tipo de material empregado, a sua quantidade e a EII por unidade desse material. Calcula-se a EII por meio da Equação 4.

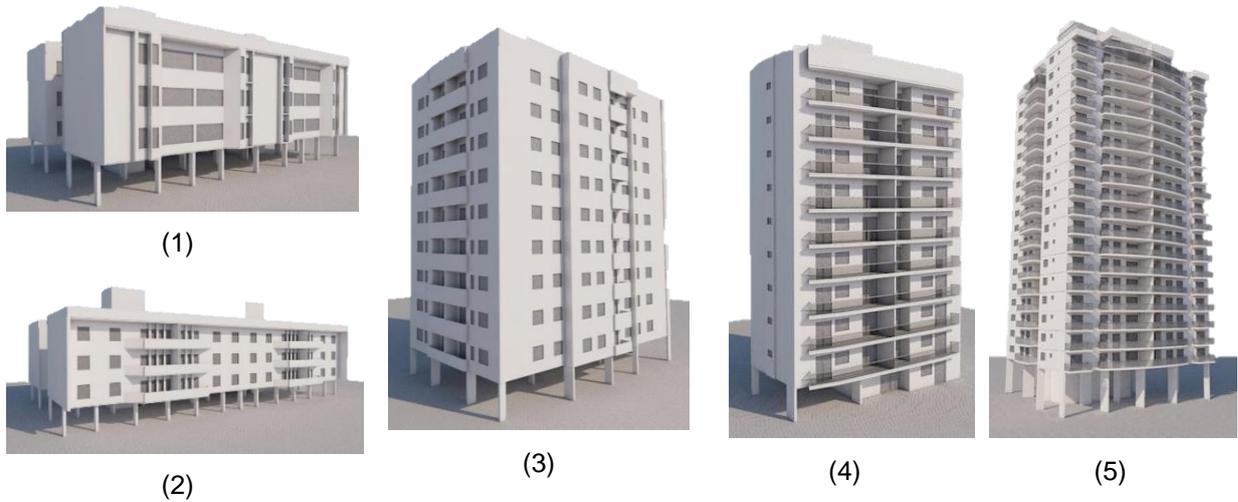
$$EII = \sum m_i \cdot M_i \quad (4)$$

Onde: m_i = quantidade de material (Kg); M_i = valor de EII por unidade do material (MJ/Kg)

O CII é calculado da mesma forma, multiplicando-se o total de material pela quantidade de CO₂ emitido por Kg de material.

A ferramenta utilizada para cálculo do quantitativo de material (m_i) foi o *software* de modelagem 3D *Archicad* (GRAPHISOFT, 2017), que utiliza a plataforma do *Building Information Modeling* (BIM) para extrair informações da edificação em formato de tabelas. A Figura 13 apresenta a modelagem arquitetônica das edificações, que seguiu as especificações de projeto, sendo modelados as alvenarias internas e externas, os elementos estruturais, as portas internas de madeira, as esquadrias e os guarda-corpos metálicos, bem como os acabamentos internos. Todos os demais elementos, como aço, materiais para fundação e demais instalações foram estimados.

Figura 13 – Modelagem arquitetônica das edificações



Nota: (1) Edifício 01; (2) Edifício 02; (3) Edifício 03; (4) Edifício 04; (5) Edifício 05. Fonte: Elaborado pela autora.

Quanto à fundação, considerou-se um índice de $0,12 \text{ m}^3$ de concreto por m^2 de área construída. Esse índice foi extraído de um projeto cujas quantidades de fundação eram conhecidas. Quanto à quantidade de aço da estrutura e da fundação, foi considerado uma demanda média de aço de $91,68 \text{ Kg}$ por m^3 de concreto (PINI, 2008).

O quantitativo de materiais para as instalações elétricas e hidrossanitárias foi estimado a partir do estudo de Vechi e Guisi (2015), cujos materiais para instalações de diferentes aquecedores de água e suas respectivas quantidades foram calculados. Portanto, para estimar o volume de materiais necessários para instalações das edificações estudadas, multiplicou-se o quantitativo do prédio de referência por um índice, cujo valor é igual à média aritmética de dois outros índices: (1) a razão entre as áreas construídas da edificação estudada pelo prédio referência; (2) a razão entre as quantidades de banheiros da edificação estudada pelo prédio referência. Dessa forma, o volume de material necessário para as instalações está relacionado tanto à área construída quanto à quantidade de banheiros da edificação, onde se verifica um volume maior de material para instalações. Portanto, estimou-se a quantidade de instalações para chuveiro elétrico nas edificações 1 a 4, e aquecimento a gás para a edificação 5. O apêndice A apresenta com mais detalhes os cálculos para estimativa dos quantitativos de instalações.

Para a instalação do gás na cozinha de todas as edificações e de ar condicionado Split das edificações 4 e 5 utilizou-se os índices de consumo de material por ponto estabelecido pelo TCPO (PINI, 2008).

3.3.2 Energia Incorporada Recorrente (EIR)

Para o cálculo da EIR, necessária à manutenção, deve-se conhecer a vida útil dos materiais construtivos empregados, bem como a vida útil da edificação. A NBR 15575 (ABNT 2013a) estabelece a vida útil de projeto (VUP), ou seja, um período estimado para o qual um sistema é projetado, que pode ou não ser igual à vida útil. De acordo com a mesma norma, o VUP de todas as partes do edifício é calculado em função da VUP da estrutura, que é de 50 a 75 anos. Em revisões bibliográficas sobre ACVE em edificações, a maioria dos estudos estabelece um período de vida útil de 50 anos (BUYLE; BRAET; AUDENAERT, 2013, CABEZA et al., 2014, RAMESH; PRAKASH; SHUKLA, 2010, RASHID; YUSOFF, 2015). Portanto, para este estudo, considerou-se que os edifícios possuem vida útil de 50 anos. Calcula-se a EIR através da Equação 5.

$$EIR = \sum m_i \cdot M_i \cdot (F_r - 1) \quad (5)$$

Onde: m_i = quantidade de material (Kg); M_i = valor de EI por unidade do material (MJ/Kg); F_r = fator de reposição. O fator de reposição (F_r) equivale à razão entre a vida útil da edificação e a vida útil do material.

O CIR é calculado da mesma forma, porém considerando o valor de CI por unidade do material (KgCO₂/Kg). Para a vida útil dos materiais, considerou-se o tempo máximo da Vida Útil de Projeto (VUP) estabelecido pela NBR 15575 (ABNT, 2013a).

3.3.3 Energia Incorporada Desperdiçada (EID)

A EID calcula a quantidade de materiais que é desperdiçada durante o processo de transporte, estocagem e manuseio do material no canteiro de obra. Os índices de perda foram extraídos de Agopyan e outros (1998) e do Tabelas de Composições de Preços para Orçamentos - TCPO (PINI, 2008). A EID é calculada a partir da Equação 6.

$$EID = \sum (EII + EIR) \cdot F_p \quad (6)$$

Onde: EII = Energia Incorporada Inicial (MJ); EIR = Energia Incorporada Recorrente (MJ); F_p = Fator de perda (%)

O CID é calculado da mesma forma, multiplicando-se o total de material pela quantidade de CO₂ emitido por Kg de material. A Tabela 2 apresenta os valores considerados para cada material construtivo de densidade (Kg/m³), EI (MJ/Kg), CI (KgCO₂/Kg), VUP (anos), F_r e F_p .

Tabela 2 – Valores considerados para cálculo da EI dos materiais construtivos

Material	Densidade (kg/m ³)	EI ¹ (MJ/kg)	CI ¹ (kgCO ₂ /kg)	VUP ² (anos)	F_r	F_p ³
Aço	7850	30,00	2,31	73	1,00	10%
Alumínio	2700	210,00	9,15	30	1,67	0%
Concreto	2300	1,20	0,09	75	1,00	9%
Fibrocimento	1900	6,00	0,42	30	1,67	19%
Cobre (inst. Elét.)	8933	75,00	3,17	30	1,67	25%
Latão (inst. Hidro.)	8530	80,00	3,38	30	1,67	20%
Madeira	650	7,50	0,52	12	4,17	0%
PVC	1300	80,00	4,20	30	1,67	20%
Reboco	2000	1,47	0,11	60	1,00	13%
Tijolo Cerâmico	1400	2,90	0,23	60	1,00	17%
Tinta	1300	65,00	4,49	12	4,17	16%
				4 (interna)		
Cerâmica revestimento	2050	5,10	0,26	20	2,50	16%
Argamassa assentamento	1860	2,10	0,16	20	2,50	18%
Vidro	2500	18,50	0,89	30	1,67	0%

Nota: EI = Energia incorporada por kg do material; CI = Carbono incorporado por kg do material; VUP= Vida útil de projeto; F_r = Fator de reposição; F_p = Fator de perda.

Fonte: (1) TAVARES, 2003; (2) ABNT, 2013a; (3) AGOPYAN et al. 1998, PINI, 2008.

Adaptado pela autora

3.4 ENERGIA OPERACIONAL (EO)

Nessa etapa, calcula-se a energia necessária para funcionamento dos equipamentos, iluminação, condicionamento de ar e aquecimento de água. Para o

cálculo da EO, traçaram-se perfis de consumo de energia, baseados na pesquisa de posse de equipamentos e hábitos de uso para as habitações localizadas na região sudeste do Brasil (ELETROBRAS, 2007b). A Tabela 3 (ELETROBRAS, 2007b) representa a média de consumo de energia elétrica das habitações da região sudeste em relação à sua área construída. Nota-se que à medida que a área construída aumenta, a porcentagem de habitações com consumo mensal entre 0 e 200 KWh diminui, aumentando a quantidade de habitações com consumo superior a 300 KWh.

Tabela 3 – Média de consumo de energia elétrica das habitações da região sudeste em relação à sua área construída

		ÁREA CONSTRUÍDA DA HABITAÇÃO			
		Até 50 m ²	51 à 75 m ²	76 à 100 m ²	101 à 150 m ²
NÍVEIS DE CONSUMO DE ENERGIA MENSAL	0 - 200 KWh	88%	72%	48%	41%
	201 - 300 KWh	7,5%	19%	28%	19%
	> 300 KWh	4,5%	9%	24%	40%

Fonte: ELETROBRAS, 2007b. Adaptada pela autora

Para este estudo, adotaram-se 3 (três) cenários distintos de consumo mensal por unidade habitacional: (1) consumo mínimo, cujo consumo de energia elétrica é inferior a 200 KWh mensal; (2) consumo médio, cujo consumo de energia elétrica está na faixa de 201 a 300 KWh mensal; (3) consumo máximo, cujo consumo de energia elétrica é superior a 300 KWh mensal. A quantidade de unidades habitacionais para cada perfil de consumo dependerá da sua área, conforme descrito na Tabela 3. Por exemplo, para uma edificação cujas unidades habitacionais (UH) possuem área construída entre 51 a 75 m², 72% das UH dessa edificação tem nível mínimo de consumo mensal, 19% nível médio e 9% nível máximo, ou seja, consomem acima de 300 KWh de energia por mês.

A exceção se aplica aos edifícios 1 e 2 que, por serem construção mais antigas e não possuírem elevador, a proporção dos níveis de consumo não corresponde às áreas construídas das UH. Dessa forma, para o edifício 1, apesar de a área de suas UH ser igual a 58,80 m², o seu consumo equivale a uma edificação cujas UH tem área inferior a 50 m². Da mesma forma, para o edifício 2, que possui UH com 75,23 m², considerou-se consumo de energia mensal equivalente a um edifício cujas UH tem entre 51 e 75m². A Tabela 4 especifica a média de UH para cada faixa de consumo mensal de energia das edificações estudadas.

Tabela 4 – Porcentagem de UH das edificações estudadas para cada nível de consumo

	NÍVEL DE CONSUMO		
	Mínimo	Médio	Máximo
Edifício 1	88%	7,5%	4,5%
Edifício 2	72%	19%	9%
Edifício 3	72%	19%	9%
Edifício 4	48%	28%	24%
Edifício 5	41%	19%	40%

Fonte: Elaborada pela autora

O consumo de energia também está relacionado à quantidade de pessoas por UH. Para tanto, consideraram-se os dados levantados pela Prefeitura de Vitória a partir do Censo 2010 (PMV, 2012). A Tabela 5 indica que a média de morador por domicílio é de 2,70, considerando todas as espécies de unidade doméstica. Para a espécie de unidade doméstica nuclear²⁰, que compõe a maioria das residências do bairro, a média de morador por domicílio é de 2,94. A média máxima de moradores por domicílio é de 3,69, que corresponde à espécie de unidade doméstica do tipo estendida²¹ que, assim como as unidades domésticas do tipo unipessoal²² e composta²³, possui pouca representatividade no bairro.

Tabela 5 – Habitantes por espécie de unidade doméstica para o bairro de Jardim Camburi

	TOTAL	ESPÉCIE DE UNIDADE DOMÉSTICA			
		UNIPESSOAL	NUCLEAR	ESTENDIDA	COMPOSTA
DOMICÍLIOS	14451,00	2456,00	9745,00	1643,00	607,00
	100,0%	17,0%	67,4%	11,4%	4,2%
MORADORES EM DOMICÍLIOS	39077,00	2456,00	28620,00	6063,00	1938,00
	100,0%	6,3%	73,2%	15,5%	5,0%
MÉDIA DE MORADORES	2,70	1,00	2,94	3,69	3,19

Fonte: PMV, 2012, p. 559. Adaptado pela autora.

²⁰ Quando constituída somente por um casal, um casal com filhos ou enteados, ou uma pessoa com filhos ou enteados.

²¹ Quando constituída somente pela pessoa responsável com pelo menos um parente, formando uma família que não se enquadre em um dos tipos descritos como nuclear.

²² Quando constituída por uma única pessoa.

²³ Quando constituída por uma pessoa responsável e com pelo menos uma pessoa sem parentesco agregado.

A Tabela 6 apresenta a quantidade de pessoas por unidade habitacional (UH) em relação aos níveis de consumo mensal de energia. Estimaram-se 2 habitantes/UH para o nível de consumo mínimo, 3 habitantes/UH para o nível médio, e 4 habitantes/UH para a máxima faixa de consumo mensal.

Tabela 6 – Quantidade de pessoas por UH em relação aos níveis de consumo mensal de energia

	NÍVEL DE CONSUMO		
	Mínimo	Médio	Máximo
Quantidade de pessoas por UH	2	3	4

Fonte: Elaborado pela autora.

Após o cálculo anual de consumo de energia por edifício, considerando a proporção de UH por faixa de consumo estabelecidas na Tabela 4, multiplicou-se esse valor pela vida útil da edificação, ou seja, 50 anos. Essa é a quantidade de energia secundária necessária para abastecimento da edificação. Para verificar a quantidade de energia primária, utilizou-se o índice de 1,60 para a energia elétrica (COLTRO, GARCIA E QUEIROZ, 2003) e 1,10 para a energia proveniente do gás natural (PAULSEN E SPOSTO, 2013). Quanto às emissões de CO₂, considerou-se a produção 0,034 KgCO₂/MJ de energia elétrica distribuída, ou seja, 0,02125 KgCO₂/MJ na fonte primária (COLTRO, GARCIA E QUEIROZ, 2003). Quando a energia é proveniente do gás natural, considerou-se um índice de 0,0631 KgCO₂/MJ (GOMEZ, WATTERSON, 2006).

A Tabela 7 apresenta os valores dos índices considerados para converter a energia secundária em primária e os índices de produção de CO₂ por MJ de energia, tanto a elétrica, quanto à gerada pelo gás natural.

Tabela 7 – Índices para energia primária e produção de CO₂

Fonte secundária	Índice multiplicador para energia primária	Índice de produção de CO₂ (KgCO₂/MJ)
Eletricidade	1,60	0,02125
Gás natural	1,10	0,0631

Fonte: COLTRO; GARCIA; QUEIROZ, 2003; GOMEZ; WATTERSON, 2006; PAULSEN; SPOSTO, 2013. Adaptado pela autora

O consumo de energia operacional foi dividido em categorias: equipamentos, iluminação, aquecimento de água, ar condicionado e cocção. Para cada uma das categorias calculou-se o consumo nos três níveis estabelecidos.

3.4.1 Equipamentos

O tipo de equipamento baseou-se no Gráfico 1 (p. 46), que mostra os equipamentos mais utilizados, bem como a participação deles no consumo final de energia elétrica das residências localizadas na região sudeste. A Tabela 8 mostra o consumo mensal estimado dos equipamentos para as residências nos três níveis de consumo de energia. Considerou-se o consumo de energia dos equipamentos constante durante todo o ano. Os equipamentos consomem mensalmente em média 86,0 KWh, 100,6 KWh e 162,7 KWh para as faixas de consumo mínimo, médio e máximo respectivamente.

Tabela 8 – Consumo mensal dos equipamentos por faixa de consumo

EQUIPAMENTO	POTENCIA (W)*	DIAS ESTIMADOS DE USO / MÊS*	MÉDIA DE UTILIZAÇÃO POR DIA (HORAS)			CONSUMO MÉDIO MENSAL (KWH)		
			MÍNIMO	MÉDIO	MÁXIMO	MÍNIMO	MÉDIO	MÁXIMO
Geladeira	79,00	30,00	24,00	24,00	24,00	56,88	56,88	56,88
Freezer vertical/horizontal	66,04	30,00	0,00	0,00	24,00	-	-	47,55
TV em cores - 40"	83,00	30,00	2,50	3,75	5,00	6,23	9,34	12,45
Aparelho de som	110,00	20,00	1,50	2,25	3,00	3,30	4,95	6,60
Ferro elétrico	600,00	12,00	0,50	0,75	1,00	3,60	5,40	7,20
Lavadora de roupas	146,67	12,00	0,50	0,75	1,00	0,88	1,32	1,76
Computador	63,00	30,00	4,00	6,00	8,00	7,56	11,34	15,12
Forno micro-ondas	1.398,00	30,00	0,17	0,25	0,33	6,99	10,49	13,98
Liquidificador	213,33	15,00	0,13	0,19	0,25	0,40	0,60	0,80
Batedeira	150,00	8,00	0,17	0,25	0,33	0,20	0,30	0,40
TOTAL CONSUMO MENSAL DOS EQUIPAMENTOS (KWH)						86,04	100,61	162,74

Fonte: PROCELINFO, 2017. Adaptado pela autora

3.4.2 Iluminação

A quantidade de energia por iluminação foi obtida por simulação, obedecendo ao padrão de utilização estabelecido pelo RTQ-R (Quadro 8, p. 74), e consumo médio de 6 W/m² para a sala e 5 W/m² para os quartos. Para a iluminação das áreas molhadas, consideraram-se os mesmos parâmetros de uso da sala. Considerou-se que o resultado obtido por simulação refere-se à faixa de maior consumo. Para as

demais faixas, a quantidade de energia por iluminação foi proporcional ao número de pessoas.

3.4.3 Aquecimento de água

Segundo o Relatório da Região Sudeste (ELETROBRAS, 2007b), o tempo médio de banho para todos os níveis de consumo de energia é de 10 minutos. Dessa forma, para o cálculo do consumo de energia para aquecimento de água considerou-se 1 banho por dia por morador com duração de 10 minutos por banho.

Quanto ao posicionamento da chave do chuveiro, a pesquisa mostrou que nos três níveis de consumo de energia a maioria dos entrevistados declarou que diminui a potência do chuveiro durante o verão (ELETROBRAS, 2007b). No caso do chuveiro elétrico, presente nos edifícios 1, 2, 3 e 4, considerou-se a potência reduzida pela metade durante os meses mais quentes do ano, ou seja, janeiro a abril, e novembro e dezembro. Os demais meses, ou seja, maio a outubro, estimou-se a utilização de 100% da potência do chuveiro.

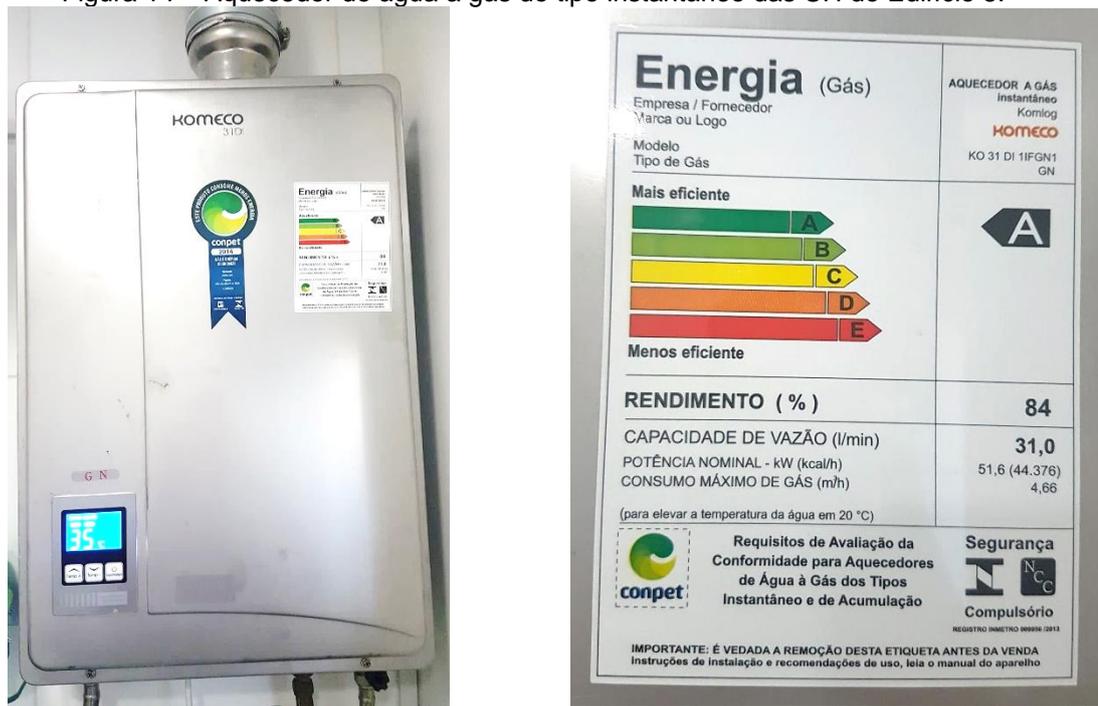
No caso do edifício 5, cujo sistema de aquecimento de água se dá por meio de aquecedor a gás instantâneo, a potência do aparelho depende do somatório das vazões dos pontos de consumo, bem como da diferença de temperatura entre a água fria que entra no aquecedor e a água quente que sai do chuveiro. Portanto, a potência é calculada pela Equação 7 (BRASIL, 2012).

$$Q = \frac{m_{m\acute{a}xima} \cdot c \cdot (T_{consumo} - T_{\acute{a}gua\ fria})}{860} \quad (7)$$

Onde, Q: potência útil do aquecedor (kw);
 $m_{m\acute{a}xima}$: vazão máxima de água demandada simultaneamente (litros/h);
 c: calor específico da água (igual a 1,00 cal/g°C);
 $T_{consumo}$: temperatura de consumo de utilização (°C)
 $T_{\acute{a}gua\ fria}$: temperatura da água fria (°C)

A Figura 14 representa a imagem do aquecedor de água a gás do tipo instantâneo das unidades habitacionais (UH) do edifício 5, instalado pela construtora. O Quadro 9 representa as especificações técnicas do aparelho.

Figura 14 – Aquecedor de água a gás do tipo instantâneo das UH do Edifício 5.



Fonte: Arquivo fotográfico de uma das moradoras do edifício 5.

Quadro 9 – Especificações técnicas do aquecedor a gás do tipo instantâneo instalado nas Unidades Habitacionais do edifício 5

Marca	<i>Komeco</i>
Modelo	<i>KO 31 DI 1IFGN1</i>
Tipo de gás	<i>Gás Natural</i>
Classificação INMETRO	<i>A</i>
Rendimento	<i>84%</i>
Capacidade de vazão	<i>31,0 l/min</i>
Potência nominal	<i>51,6 W (44.376 Kcal/h)</i>
Consumo máximo de gás (m³/h)	<i>4,66 m³/h</i>

Fonte: KOMEKO, 2018. Adaptado pela autora

Para o cálculo da potência do aparelho considerou-se uma vazão média igual à metade da capacidade de vazão do aparelho, ou seja, 15 l/min ou 900 l/hora. A diferença de temperatura da água nos meses mais e menos quentes levou em conta a média da temperatura ambiente nas duas situações, que são 25°C nos meses mais quentes e 20°C nos meses mais frios. Para a temperatura da água quente, considerou-se a temperatura mínima do aparelho no verão e máxima indicada para

banho no inverno (KOMEÇO, 2018), que são 35 °C e 40°C, respectivamente. Ou seja, estimou-se que a diferença de temperatura da água nos meses mais quentes é de 10°C, e, nos demais meses, 20°C. Logo, a potência útil média do aquecedor durante os meses de janeiro à abril, e novembro e dezembro é de 10,5 KW, e 21 KW entre maio e outubro.

A Tabela 9 apresenta a potência dos aquecedores de água nos períodos quentes e frios do ano, considerando chuveiro elétrico nos edifícios 1, 2, 3 e 4 e aquecedor de passagem a gás no edifício 5.

Tabela 9 – Potência dos aquecedores de água nos períodos quentes e frios do ano

	Potência média do chuveiro (W) – Edificação 1, 2, 3 e 4	Potência média do aquecedor a gás (W) – Edificação 5
Nos meses frios (maio a outubro)	5.500	2.100
Nos meses quentes (janeiro a abril, novembro e dezembro)	2.750	1.050

Fonte: Elaborado pela autora

3.4.4 Ar condicionado

Para o consumo do ar condicionado, estabeleceu-se que a faixa de consumo mínimo não possui o aparelho. As habitações com faixa de consumo médio possuem apenas 1 aparelho no quarto de maior área. Para a faixa de consumo máximo, considerou-se ar condicionado nos 2 quartos de maior área. Para o cálculo do consumo dos aparelhos, consideraram-se os resultados obtidos por simulação para a edificação artificialmente condicionada, cujo padrão de utilização está descrito no item 0 desta dissertação.

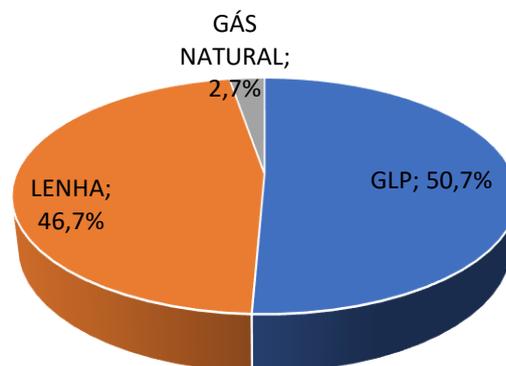
3.4.5 Cocção

A energia necessária à cocção é definida pelo Balanço Energético Nacional - BEN (BRASIL, 2017) como toda a energia consumida no setor residencial exceto a elétrica, como o Gás Liquefeito de Petróleo (GLP), gás natural, lenha e carvão vegetal. De acordo com a estimativa nacional, no ano de 2016, foram consumidos 13.418 x

10^3 tep^{24} de energia para cocção. Dividindo-se esse valor pelo número de habitantes, estima-se que um habitante consuma em média 754,24 KWh de energia necessária à cocção. O Gráfico 4 mostra que, das fontes de energia utilizadas para cocção, quase metade é composto por fonte de energia provinda da lenha, e 51,6% vem de fonte GLP e gás natural.

Dessa forma, como as edificações estudadas utilizam gás como combustível para cocção, considerou-se o consumo anual por pessoa proporcional à estatística de uso por fonte, ou seja 389,2 KWh anuais. Esse valor foi multiplicado pelo número de habitantes das respectivas faixas de consumo.

Gráfico 4 – Consumo residencial de energia



Fonte: BRASIL, 2017. Adaptado pela autora

3.5 ENERGIA NO CICLO DE VIDA

O total de energia consumido no ciclo de vida de edificação é expresso pela Equação 8.

$$E_{total} = EI + EO \quad (8)$$

Onde, EI = Energia Incorporada total; EO = Energia Operacional total.

Um dos objetivos da implementação de medidas de retrofit é reduzir a energia no ciclo de vida das edificações. Portanto, faz-se necessário analisar se o acréscimo de EI causado pelo processo de retrofit foi suficiente para reduzir a EO durante o uso/operação. Quando há redução efetiva de energia no ciclo de vida, calcula-se o período de amortização (PA), que é o tempo de operação necessário para compensar a energia que foi incorporada pelas medidas de retrofit. Esse dado também serve para

²⁴ 1 tep equivale a 11.630 KWh

verificar a viabilidade das propostas. Por exemplo, se o PA for igual a 25, isso significa que serão necessários 25 anos de operação para que a EI à edificação pelo retrofit comece a reduzir a energia no ciclo de vida. Nesse caso, quanto menor o PA, maior é a viabilidade das propostas, já que mais rápido será o retorno ambiental proporcionado pelo retrofit. O período de amortização é calculado pela Equação 9.

$$PA = \frac{EI_{ret} - EI_{exist}}{EO_{exist} - EO_{ret}} \cdot VU \quad (9)$$

Onde: PA = Período de amortização;

El_{ret} = EI do edifício com a medida de retrofit;

El_{exist} = EI do edifício existente;

EO_{exist} = EO do edifício existente;

EO_{ret} = EO do edifício com a medida de retrofit;

VU = Vida Útil do edifício, que no caso específico, é de 50 anos.

3.6 PROPOSTAS DE RETROFIT E ANÁLISES PARAMÉTRICAS

A metodologia foi aplicada às edificações da forma como elas se encontram atualmente, para, em seguida, verificar a influência das propostas de retrofit, tanto no desempenho da envoltória, segundo os padrões PBE Edifica, quanto na energia consumida e emissões de CO₂ no ciclo de vida das edificações.

As propostas de retrofit para as edificações típicas do bairro foram selecionadas a fim de proporcionarem melhorias no desempenho térmico, considerando a envoltória como principal vetor. Verificou-se ainda a viabilidade das propostas no que tange à facilidade na instalação e manutenção, com interferência mínima na estética da fachada. Buscou-se também não interferir nos ambientes internos nem nos hábitos de consumo dos habitantes, já que esses são fatores de difícil controle dentro do contexto de habitações multifamiliares.

Foram propostas 5 (cinco) medidas de retrofit, simuladas separadamente e depois reunidas em um único modelo. Dessa forma, para as análises paramétricas, foram apresentados os resultados dos edifícios em 7 (sete) situações:

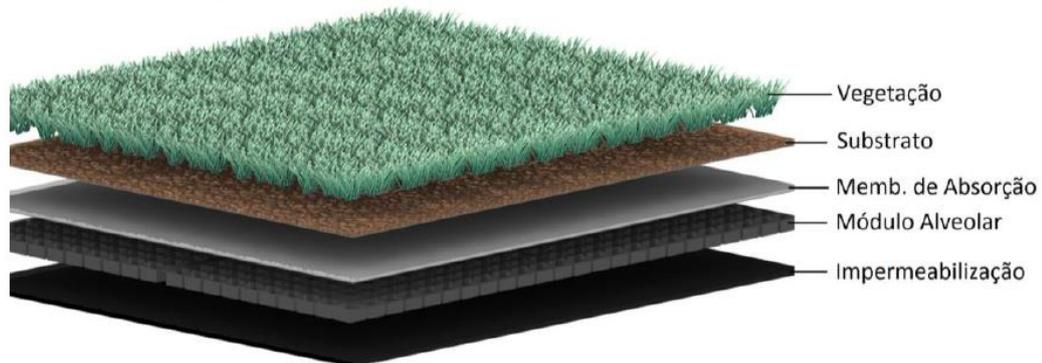
- Situação 1 – Edifício existente;
- Situação 2 – Substituição da cobertura existente por um telhado verde;
- Situação 3 – Instalação de película refletora nos vidros das janelas e portas de correr;
- Situação 4 – Brises de alumínio para sombreamento das aberturas;

- Situação 5 – Pintura das superfícies opacas da envoltória em cores claras, de forma a reduzir a absorção das paredes externas e da cobertura;
- Situação 6 – Instalação de fachada ventilada em placas pré-moldadas de concreto;
- Situação 7 – Todas as medidas reunidas.

3.6.1 Telhado verde

O sistema de telhado verde considerado neste estudo é o Sistema Modular Alveolar Leve (ECOTELHADO, 2017), pois, como o próprio nome sugere, tem pouco peso e é recomendado para telhados onde há pouca circulação.

Figura 15 – Camadas do Sistema Modular Alveolar Leve



Fonte: Ecotelhado (2017, p. 5)

Conforme especificado na Figura 15, a instalação do telhado verde necessita de impermeabilização de toda a superfície da cobertura. A Tabela 10 apresenta os dados de EI e CI obtidos pelo *SimaPro* (SIMAPRO, 2017) que calcula ACV dos materiais a partir do banco de dados Ecoinvent (ECOINVENT, 2017). Utilizou-se no *SimaPro* o “cumulative energy demand” como método de avaliação de impacto para cálculo da Energia Incorporada e o “selected LCI results”, no qual foi selecionada a quantidade de CO₂. O apêndice B apresenta com mais detalhes os valores de energia e carbono extraídos do Ecoinvent pelo *SimaPro*.

Tabela 10 – Dados para cálculo da EI e CI do telhado verde

Material	Densidade (kg/m ³) ¹	EI (MJ/kg) ²	CI (kgCO ₂ /kg) ²	VUP (anos) ³	F _r	F _p
Manta impermeabilizante	1125	52,90	0,48	10	5,00	0%

Nota: EI = Energia incorporada por kg do material; CI = Carbono incorporado por kg do material; VUP= Vida útil de projeto; F_r = Fator de reposição; F_p = Fator de perda.

Fonte: (1)DERBIGUM, 2017, (2)ECOINVENT, 2017, (3)ABNT, 2013a. Adaptado pela autora

Para a simulação do edifício no *software* de simulação de desempenho, utilizou-se a pré-configuração do *EnergyPlus*, que apresenta um padrão de propriedades para o telhado verde.

3.6.2 Película refletora nos vidros

As películas de superfície são feitas com material PVC, e possuem espessura média de 0,76mm (ARCOWEB, 2017). São utilizadas para controle dos raios solares e podem ser coloridas e/ou metalizadas. A Tabela 11 apresenta os dados para cálculo da EI e CI da película de vidro, que foram obtidos a partir do banco de dados Ecoinvent (ECOINVENT, 2017) e acessados pelo *software SimaPro* (SIMAPRO, 2017). Considerou-se um fator de perda (F_p) de 20%, já que o produto é fornecido em bobinas e não é permitido emendas (ARCOWEB, 2017).

Tabela 11 – Dados para cálculo da EI e CI da película de vidro

Material	Densidade (kg/m ³)	EI (MJ/kg) ¹	CI (kgCO ₂ /kg) ¹	VUP (anos) ²	F _r	F _p
Película de vidro em PET	1380	186,40	6,92	25	2,00	20%

Nota: EI = Energia incorporada por kg do material; CI = Carbono incorporado por kg do material; VUP= Vida útil de projeto; F_r = Fator de reposição; F_p = Fator de perda.

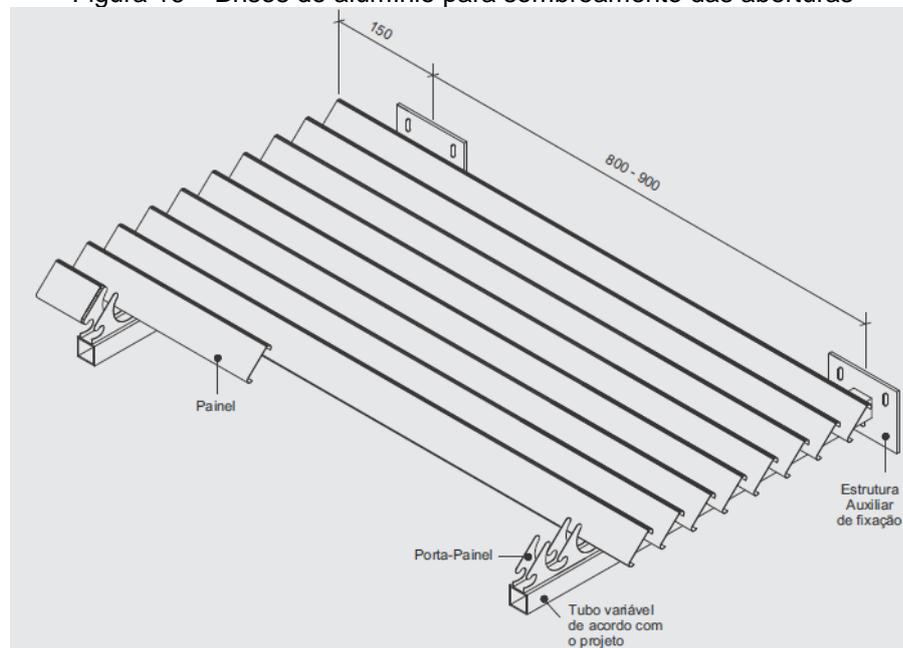
Fonte: (1) ECOINVENT, 2017, (2) ABNT, 2013a. Adaptado pela autora

Quanto às propriedades térmicas do vidro após aplicação da película refletora, optou-se por utilizar a pré-configuração do *software EnergyPlus* para vidro de cor bronze.

3.6.2 Sombreamento das aberturas

Optou-se por fazer o sombreamento das aberturas por sistema de brise em ângulo fixo de 45°, constituído por painéis fabricados em chapa de alumínio, conforme Figura 16. De acordo com informações do fabricante (LUMIBRISE, 2018), esse sistema pesa 2,3 Kg/m². Para todos os edifícios do estudo de caso considerou-se que os brises são instalados em todo o comprimento das aberturas com projeção de 1,00m. Os dados para cálculo da EI e CI estão especificados na Tabela 2 (p. 79).

Figura 16 – Brises de alumínio para sombreamento das aberturas



Fonte: Lumibrise (2018, p. 2)

3.6.3 Absortância (α) da envoltória

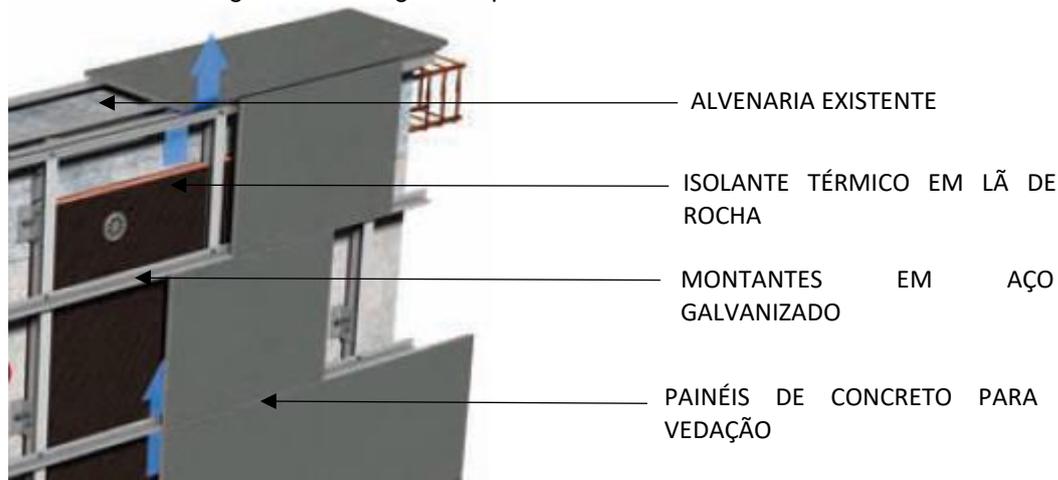
Para todos os edifícios do estudo de caso, modificou-se a absortância das paredes externas e cobertura para o valor de 0,20, que corresponde às cores claras, como branco, pérola ou marfim (DORNELLES, 2008). A única exceção se aplica à cobertura do edifício 5, que já possui tratamento térmico no telhado e, portanto, não foi necessário alterar essa propriedade.

Quanto ao cálculo da EI e CI, consideraram-se os valores da Tabela 2 (p. 79) para o material tinta. Como o serviço de pintura já é feito de forma periódica ao longo do ciclo de vida dos edifícios, considerou-se fator de reposição (F_r) do material tinta para o retrofit igual a 1.

3.6.4 Fachada ventilada

A fachada ventilada é um sistema de revestimento que cria uma camada de ar entre a superfície da fachada principal e o material de revestimento. A Figura 17 mostra a imagem esquemática do sistema, que é composto por uma camada de isolante térmico e painéis de concreto para vedação, que são fixados por meio de montantes em aço galvanizado.

Figura 17 – Imagem esquemática do sistema de fachada ventilada



Fonte: Ulma (2018). Adaptado pela autora.

A Tabela 12 apresenta os dados para cálculo da EI e CI, que foram obtidos a partir do banco de dados Ecoinvent (ECOINVENT, 2017) e acessados pelo *software SimaPro* (SIMAPRO, 2017). Os dados relativos aos painéis de vedação em concreto foram extraídos da Tabela 2 (p. 79).

Tabela 12 – Dados para cálculo da EI e CI da fachada ventilada

Material	Densidade (kg/m ³)	EI (MJ/kg) ¹	CI (kgCO ₂ /kg) ¹	VUP (anos) ²	F _r	F _p
Lã de rocha	64	16,60	1,22	50	1,00	0%
Perfis aço galvanizado	7850	33,8	1,63	50	1,00	0%

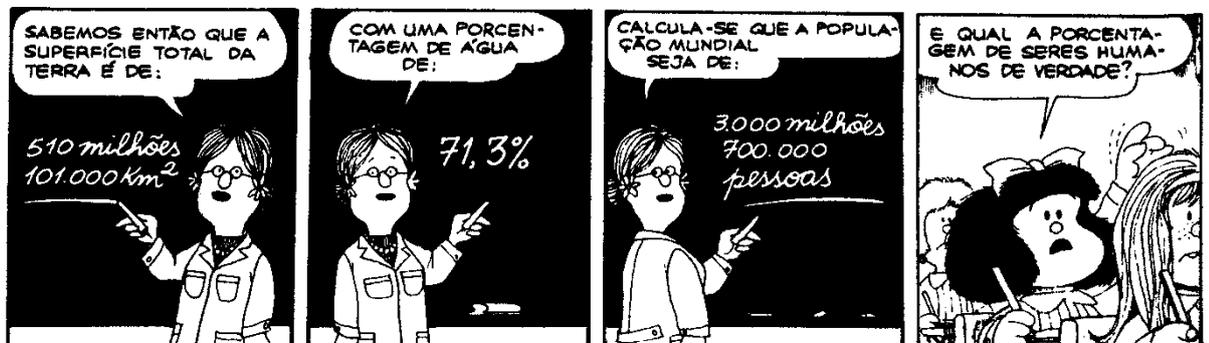
Nota: EI = Energia incorporada por kg do material; CI = Carbono incorporado por kg do material; VUP= Vida útil de projeto; F_r = Fator de reposição; F_p = Fator de perda.

Fonte: (1) ECOINVENT, 2017, (2) ABNT, 2013a

Para inclusão da fachada ventilada nos modelos energéticos, utilizou-se a propriedade de superfície “*other side condition model*”, do tipo “*gap convection radiation*”, que permite simular o efeito na convecção do ar entre camadas de revestimento (LAWRENCE BERKELEY NATIONAL LABORATORY, 2016).

Seção 4

Resultados e Discussões



4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos para cada edifício serão apresentados em 4 partes: (1) Desempenho da envoltória segundo o PBE Edifica; (2) Energia Incorporada – EI; (3) Energia Operacional – EO; (4) Energia no Ciclo de Vida. Para cada parte serão apresentados os resultados dos edifícios existentes e em seguida o resultado das análises paramétricas após aplicação das medidas de retrofit.

4.1 EDIFÍCIO 1 – 3 PAVIMENTOS SEM VARANDA

Apresentaremos, a seguir, os dados referentes ao edifício 1, como desempenho da envoltória e energias.

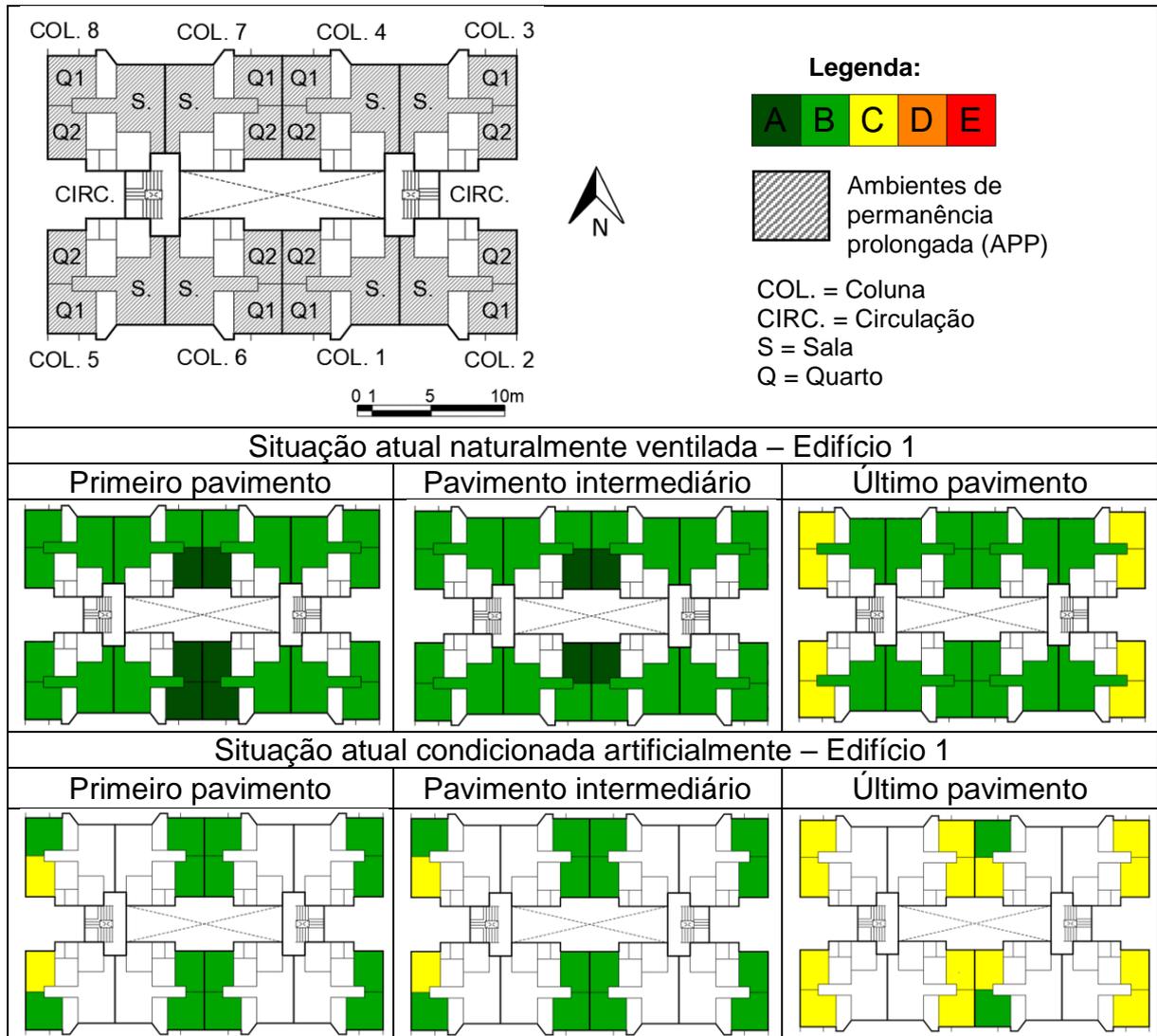
4.1.1 Desempenho da envoltória segundo o PBE Edifica

Em relação ao desempenho da envoltória, consideramos os padrões estabelecidos pelo PBE Edifica, conforme dados a ser apresentados.

4.1.1.1 Edifício existente

A Figura 18 apresenta o resultado do desempenho da envoltória segundo os padrões estabelecidos pelo PBE Edifica. Nota-se que grande parte dos ambientes de permanência prolongada (APP) estão na categoria B de desempenho e que alguns ambientes no primeiro e segundo pavimentos alcançaram o nível A. Isso se deve principalmente à localização do edifício, que tem o seu maior eixo no sentido leste-oeste, o que minimiza os efeitos solares nas fachadas de maior área. Os ambientes com melhor desempenho são sombreados na maior parte do dia, pois estão voltados para o vão de ventilação. Os ambientes com pior desempenho encontram-se nas extremidades do edifício, bem como no último pavimento, pois estes estão mais suscetíveis aos efeitos da insolação.

Figura 18 - Desempenho da envoltória segundo o PBE Edifica do Edifício 1 nas situações naturalmente ventilada e condicionada artificialmente



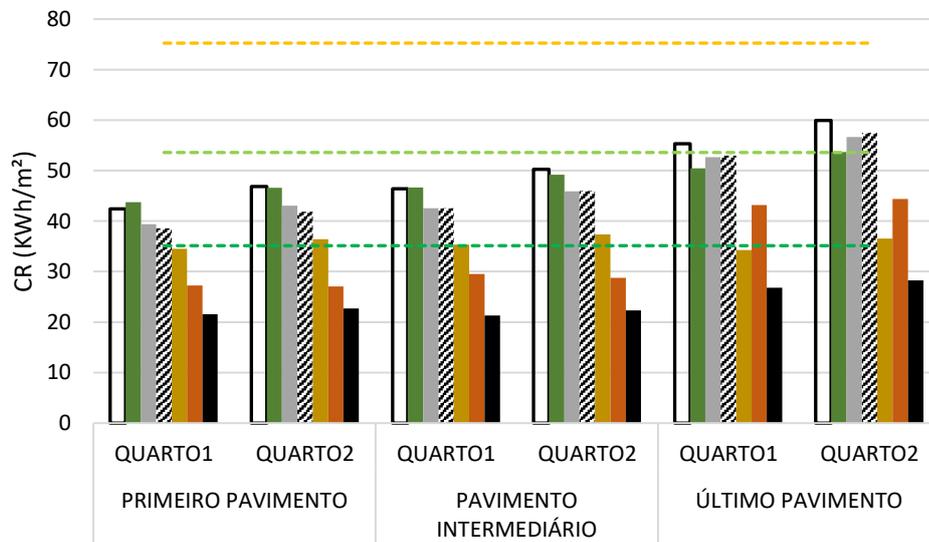
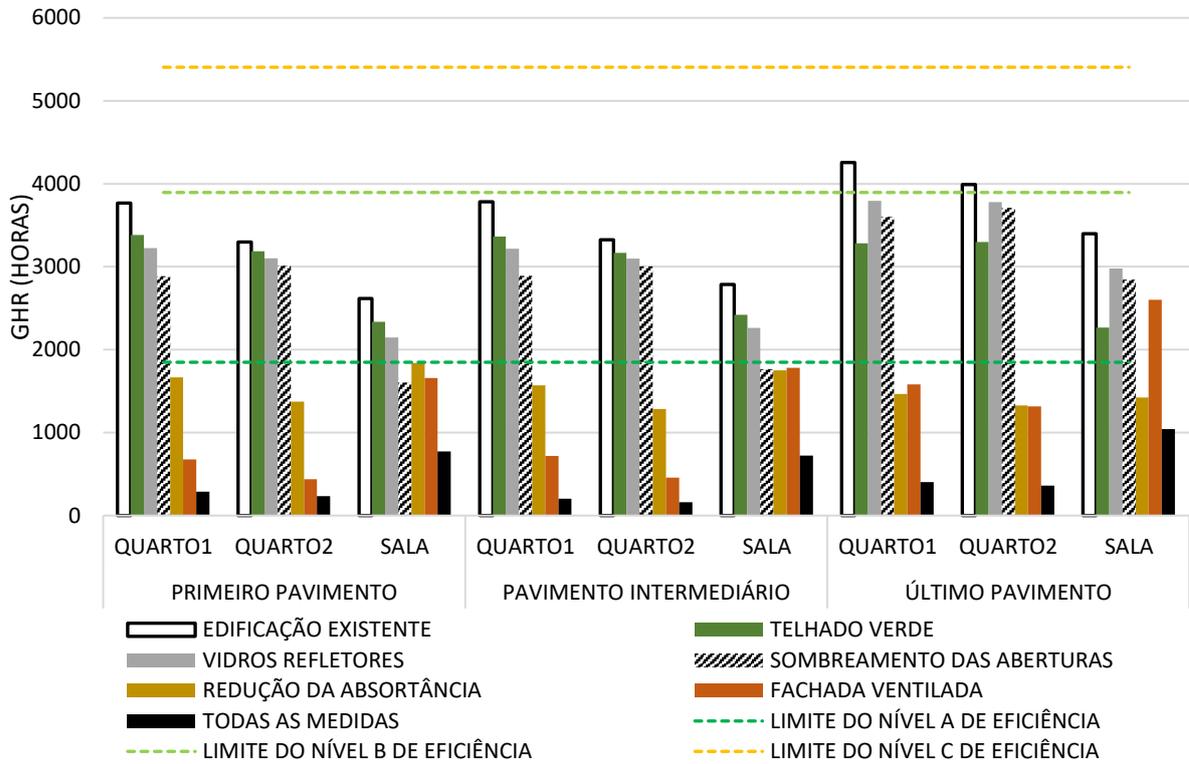
Fonte: Elaborado pela autora

4.1.1.2 Análises paramétricas com medidas de retrofit

O Gráfico 5 apresenta os resultados do GHR e do CR da coluna 3, que obtiveram o pior desempenho na situação naturalmente ventilada. Isso se deve principalmente à sua posição desfavorável em relação ao sol.

Quanto à situação naturalmente ventilada, todas as medidas conseguiram reduzir o GHR dos ambientes analisados, especialmente a mudança na absorvância e a fachada ventilada. No último pavimento, a mudança da absorvância se mostrou a medida mais eficiente, devido à mudança da cor da cobertura. O telhado verde se mostrou eficiente especialmente no último pavimento, porém, foi o que menos influenciou o GHR nos demais pavimentos.

Gráfico 5 – Comparativo de GHR e CR da coluna 3 do Edifício 1 existente e com as medidas de retrofit



Fonte: Elaborado pela autora

Quanto à situação onde o edifício é condicionado artificialmente, as medidas mais eficazes foram a redução da absorvância e a fachada ventilada. Assim como na situação naturalmente ventilada, a redução da absorvância da envoltória, ou seja, paredes externas e cobertura, mostrou-se mais eficiente do que a fachada ventilada. A medida menos eficiente para o primeiro pavimento e pavimento intermediário foi o

telhado verde. No entanto, para o último pavimento, essa medida obteve melhor desempenho quando comparado aos vidros refletivos e sombreamento das aberturas.

De modo geral, a redução da absorvância e a instalação de fachada ventilada foram as medidas que mais trouxeram benefícios em ambas situações. Após a adoção de todas as medidas de retrofit, todas as zonas obtiveram nível A de desempenho.

4.1.2 Energia Incorporada (EI)

Em relação à Energia Incorporada (EI) do edifício 1, foram consideradas as quantidades necessárias, conforme dados a ser apresentados.

4.1.2.1 Edifício existente

A Tabela 13 apresenta os resultados de EI e CI do Edifício 1, considerando as quantidades necessárias para produção dos materiais, manutenção e desperdício. O total de energia e carbono incorporados por m² de área útil é de 7,1 GJ e 491,8 KgCO₂, respectivamente.

O Gráfico 6 apresenta a EII, EIR e EID dos materiais construtivos que compõem o edifício 1. Grande parte da EI está concentrada no concreto, aço e tijolo cerâmico, que somados representam 51% do total de EI de toda a edificação. A energia incorporada recorrente (EIR), necessária à manutenção e reposição dos materiais, representa 25% de toda a EI do edifício. A tinta é o material que mais acumula EIR, já que o serviço de pintura é realizado diversas vezes ao longo do ciclo de vida do edifício. O desperdício representa 11% do total de EI, sendo que, desse total, 49% estão associadas a concreto, aço e tijolo.

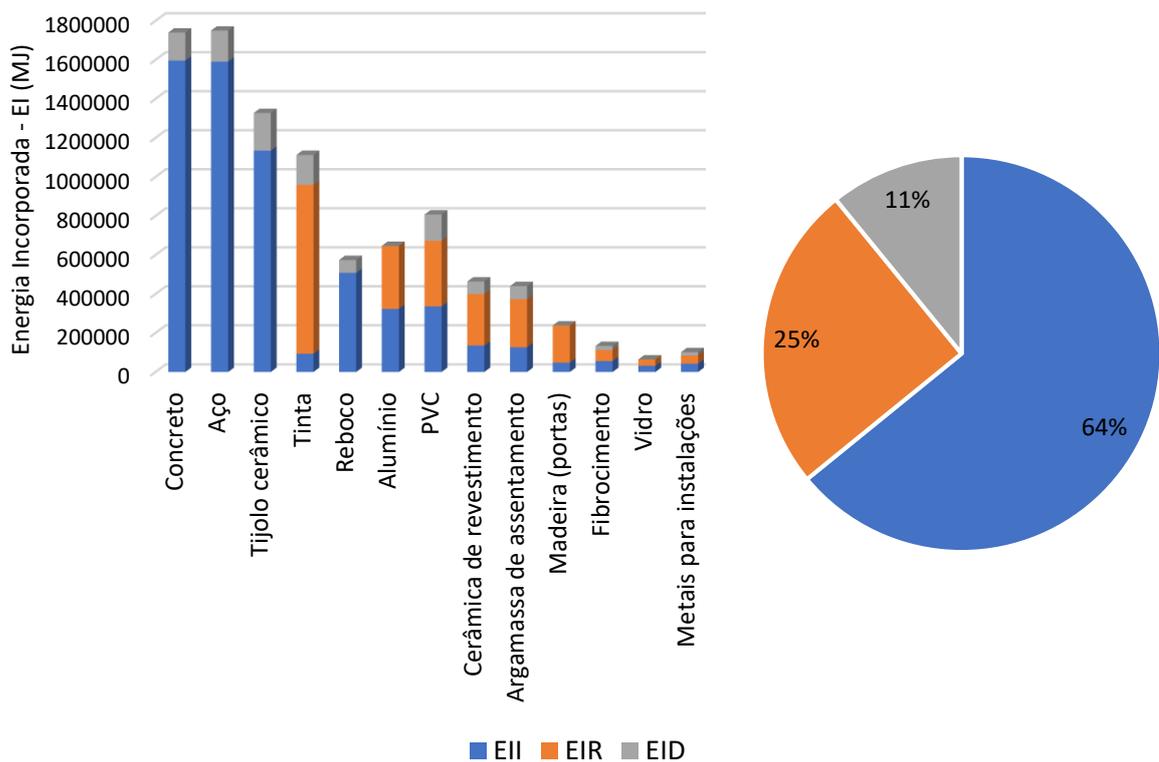
O Gráfico 7 apresenta o CII, CIR e CID dos materiais construtivos que compõem o edifício 1. Nota-se que o gráfico segue a mesma tendência do consumo de energia. Concreto, aço e tijolo participam de 57% de todo o CI.

Tabela 13 – Energia Incorporada (MJ) e Carbono Incorporado (KgCO₂) do Edifício 1

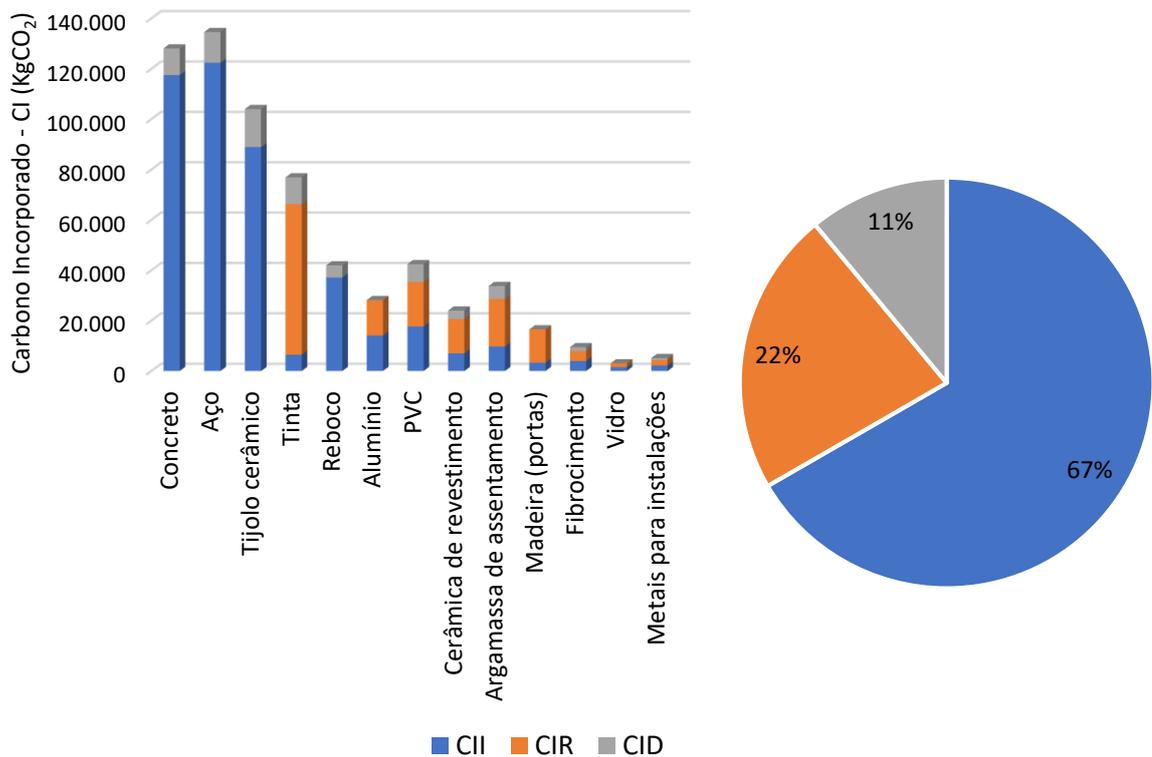
MATERIAL	ENERGIA INCORPORADA (MJ)				CARBONO INCORPORADO - CI (KgCO ₂)			
	EII	EIR	EID	EI (TOTAL)	CII	CIR	CID	CI (TOTAL)
Concreto	1.596.597,98	-	143.693,82	1.740.291,79	117.508,01	-	10.575,72	128.083,74
Aço	1.591.044,59	-	159.104,46	1.750.149,05	122.378,38	-	12.237,84	134.616,21
Tijolo cerâmico	1.134.728,99	-	192.903,93	1.327.632,92	88.889,00	-	15.111,13	104.000,13
Tinta	93.334,11	865.983,39	153.490,80	1.112.808,31	6.449,29	59.838,52	10.606,05	76.893,86
Reboco	508.122,55	-	66.055,93	574.178,48	37.119,88	-	4.825,58	41.945,46
Alumínio	323.190,00	323.190,00	-	646.380,00	14.076,86	14.076,86	-	28.153,73
PVC	336.340,00	336.340,00	134.536,00	807.216,00	17.674,67	17.674,67	7.069,87	42.419,20
Cerâmica de revestimento	135.476,49	264.179,15	63.944,90	463.600,54	7.006,17	13.662,02	3.306,91	23.975,10
Argamassa de assentamento	126.515,34	246.704,91	67.179,65	440.399,90	9.692,59	18.900,56	5.146,77	33.739,92
Madeira (portas)	47.665,80	190.663,20	-	238.329,00	3.303,76	13.215,06	-	16.518,82
Fibrocimento	56.124,48	56.124,48	21.327,30	133.576,26	3.975,41	3.975,41	1.510,66	9.461,47
Vidro	31.912,50	31.912,50	-	63.825,00	1.538,50	1.538,50	-	3.077,00
Metais para instalações	42.473,69	42.473,69	16.607,57	101.554,95	2.183,66	2.183,66	779,42	5.146,75
TOTAL	6.023.526,53	2.357.571,32	1.018.844,36	9.399.942,21	431.796,18	145.065,26	71.169,94	648.031,38
TOTAL / m²	4.571,17	1.789,13	773,19	7.133,49	327,68	110,09	54,01	491,78

Nota: EII = Energia Incorporada Inicial; EIR = Energia Incorporada Recorrente; EID = Energia Incorporada Desperdiçada; CII = Carbono Incorporado Inicial; CIR = Carbono Incorporado Recorrente; CID = Carbono Incorporado Desperdiçado. Fonte: Elaborado pela autora

Gráfico 6 – EI (MJ) por material do Edifício 1



Nota: EII = Energia Incorporada Inicial; EIR = Energia Incorporada Recorrente; EID = Energia Incorporada Desperdiçada. Fonte: Elaborado pela autora

Gráfico 7 – CI (KgCO₂) do Edifício 1

Nota: CII = Carbono Incorporado Inicial; CIR = Carbono Incorporado Recorrente; CID = Carbono Incorporado Desperdiçado. Fonte: Elaborado pela autora

4.1.2.2 Análises paramétricas com medidas de retrofit

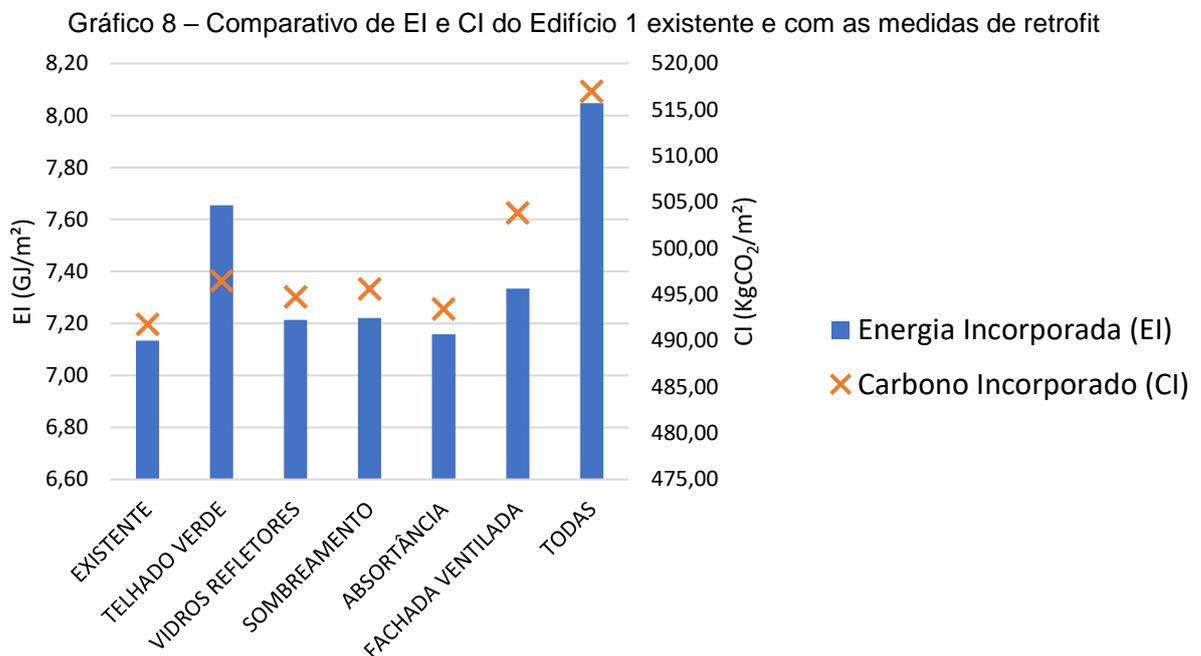
O Gráfico 8 apresenta os valores de Energia Incorporada (EI) e Carbono Incorporado (CI) do Edifício 1 existente e após a adoção das medidas de retrofit. Todas as medidas proporcionaram um acréscimo na EI e CI, especialmente o telhado verde e a fachada ventilada.

Após a adoção do telhado verde, o total de EI passou de 7,1 GJ/m² do edifício existente para 7,7 GJ/m². Grande parte desse acréscimo deve-se à Energia Incorporada Recorrente (EIR) necessária à manutenção da manta impermeabilizante. Além disso, o edifício 1 é horizontal, ou seja, possui o comprimento e/ou largura maiores do que a altura. Isso faz com que o volume de material por m² de área útil necessário para instalação do telhado verde seja elevado.

A fachada ventilada, apesar do grande volume de material para sua instalação, possui VUP igual ao do edifício, ou seja, não necessita de grandes manutenções ou reposição de materiais ao longo da sua vida útil. As perdas também são reduzidas, já que o material é pré-moldado.

A instalação de películas refletoras nos vidros, bem como o sombreamento das aberturas com brises de alumínio representaram um acréscimo de aproximadamente 1% na EI do edifício existente. A redução da absorvância da fachada foi a medida menos expressiva em termos de EI, pois o volume de material necessário é baixo, representando um acréscimo de 0,3% na EI do edifício existente.

Após a aplicação de todas as medidas de retrofit, o edifício 1 apresentou valores de EI e CI iguais a 8,1 GJ/m² e 517,0 KgCO₂/m² respectivamente. Esses valores representam um acréscimo de 13% na EI e 5% no CI.



Fonte: Elaborado pela autora

4.1.3 Energia Operacional (EO)

Os dados a seguir apresentam o consumo de Energia Operacional do edifício 1.

4.1.3.1 Edifício existente

A Tabela 14 apresenta os valores de consumo de energia na etapa de operação do edifício 1, separados por faixas de consumo e por categorias (equipamentos, aquecimento de água, iluminação, ar condicionado e cocção). O total

de energia primária e emissões de CO₂ resultantes desse consumo é de 14 GJ/m² e 426 KgCO₂/m² respectivamente.

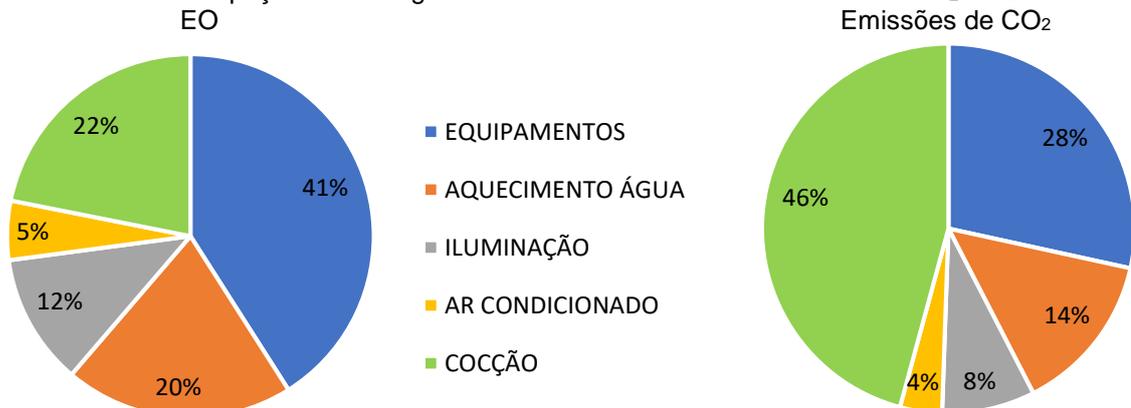
De acordo com o Gráfico 9, os equipamentos são responsáveis por 41% da energia consumida; seguidos pela cocção, com 22%; pelo aquecimento de água, com 20%; pela iluminação, com 12%; e pelo ar condicionado, com 5%. O ar condicionado é pouco representativo, já que grande parte das UH do edifício 1 está dentro da faixa mínima de consumo (ver Tabela 4) e, portanto, não possui aparelho de ar condicionado. No entanto, em termos de emissões de CO₂, o gás natural utilizado na cocção dos alimentos é responsável por quase metade do total de emissões, seguido dos equipamentos com 28%, aquecimentos de água 14%, iluminação 8% e ar condicionado 4%.

Tabela 14 – EO e emissões de carbono do Edifício 1

	EO POR FAIXAS DE CONSUMO (MJ)			EO (MJ)	EMIÇÃO DE CO ₂ (KgCO ₂)
	MÍNIMO	MÉDIO	MÁXIMO		
EQUIPAMENTOS	6.279.756,60	625.890,24	607.423,80	7.513.070,63	159.652,75
AQUECIMENTO ÁGUA	3.010.867,20	384.912,00	307.929,60	3.703.708,80	78.703,81
ILUMINAÇÃO	1.733.453,57	221.606,28	177.285,02	2.132.344,87	45.312,33
AR CONDICIONADO	-	440.868,54	522.001,68	962.870,22	20.460,99
COCÇÃO	3.255.081,98	416.132,64	332.906,11	4.004.120,74	257.064,55
TOTAL				18.316.115,26	561.194,43
TOTAL/m²				13.899,85	425,88

Fonte: Elaborado pela autora

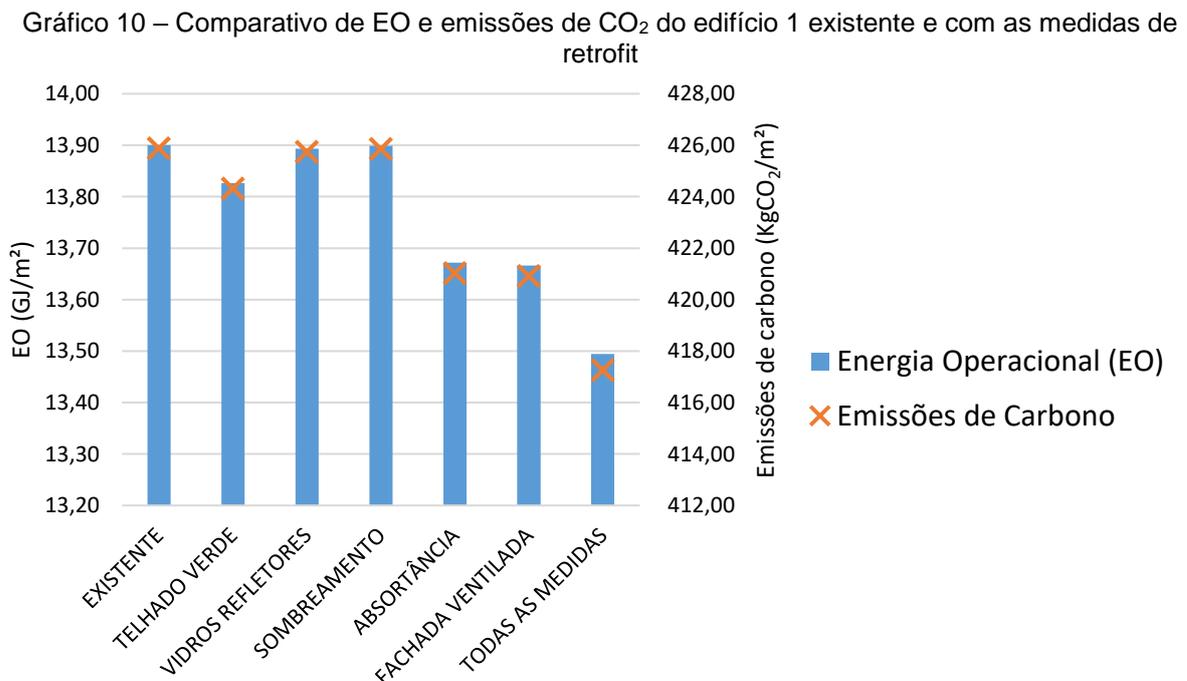
Gráfico 9 – Participação das categorias de consumo de EO e emissões de CO₂ do Edifício 1



Fonte: Elaborado pela autora

4.1.3.2 Análises paramétricas com medidas de retrofit

O Gráfico 10 apresenta o comparativo de EO e emissões de CO₂ na etapa de operação. De maneira geral, todas as medidas proporcionaram redução no consumo. As medidas menos expressivas foram os vidros refletores e o sombreamento das aberturas. O telhado verde reduziu o consumo energético em apenas 0,5%, já que apenas os ambientes do último pavimento são realmente influenciados por essa medida. A fachada ventilada e a redução na absorvância tiveram performances similares em termos de redução do consumo energético. Após a aplicação de todas as medidas, a EO reduziu de 13,9 GJ/m² do edifício existente para 13,5 GJ/m² com todas as medidas de retrofit.



Fonte: Elaborado pela autora

4.1.4 Energia no ciclo de vida

Os dados a seguir apresentam o consumo de no ciclo de vida do edifício 1.

4.1.4.1 Edifício existente

A Tabela 15 apresenta os valores do consumo de energia e as emissões de carbono no ciclo de vida do edifício 1 existente, resultando um total de 21 GJ/m² e 917,7 KgCO₂/m², respectivamente. O índice de emissões de carbono por unidade de energia consumida foi de 43,6 KgCO₂/GJ.

De acordo com o Gráfico 11, a energia operacional contribui com 66% do total de energia no ciclo de vida. Entretanto, em termos de emissões de carbono, a energia necessária para operação da edificação gera 46% do total de CO₂ no ciclo de vida.

Tabela 15 – Total de energia e emissões de carbono no ciclo de vida do Edifício 1

	ENERGIA		CARBONO	
	MJ	GJ/m ²	KgCO ₂	KgCO ₂ /m ²
INCORPORADA	9.399.942,21	7,13	648.031,38	491,78
OPERACIONAL	18.316.115,26	13,90	561.194,43	425,88
TOTAL	27.716.057,47	21,03	1.209.225,82	917,67

Fonte: Elaborado pela autora

Gráfico 11 – Participação da energia e emissões de CO₂ no ciclo de vida do Edifício 1



Fonte: Elaborado pela autora

4.1.4.2 Análises paramétricas com medidas de retrofit

A Tabela 16 apresenta os resultados da energia no ciclo de vida comparando o edifício existente e com as medidas de retrofit. Para todas as medidas, houve acréscimo na EI e redução da EO, ou seja, os acréscimos de materiais pelo processo de retrofit contribuíram para reduzir o consumo de energia operacional. Entretanto, apenas para as medidas relativas à diminuição da absorvância da envoltória e

instalação de fachada ventilada é que houve redução efetiva do consumo energético no ciclo de vida.

Apesar de reduzir o consumo no ciclo de vida, a fachada ventilada apresentou um período de amortização muito longo, de aproximadamente 43 anos. A redução da absorvência, por sua vez, apresentou um período de amortização de 5 anos.

Para as demais medidas, a quantidade de energia incorporada à edificação pelo processo de retrofit foi superior à economia de energia que tais medidas proporcionam na operação do edifício. O telhado verde apresentou o pior resultado, aumentando a energia no ciclo de vida em 2,1%.

Tabela 16 – Comparativo da Energia no ciclo de vida do Edifício 1 existente e com as medidas de retrofit

	EDIFÍCIO EXISTENTE (GJ/m ²)	TELHADO VERDE	VIDROS REFLETORES	SOMBREAMENTO	ABSORVÊNCIA	FACHADA VENTILADA	TODAS AS MEDIDAS
ENERGIA INCORPORADA (EI)	7,13	▲ 7,3%	▲ 1,1%	▲ 1,2%	▲ 0,3%	▲ 2,8%	▲ 12,8%
ENERGIA OPERACIONAL (EO)	13,90	▼ -0,5%	▼ 0,0%	▼ 0,0%	▼ -1,6%	▼ -1,7%	▼ -2,9%
ENERGIA NO CICLO DE VIDA	21,03	▲ 2,1%	▲ 0,4%	▲ 0,4%	▼ -1,0%	▼ -0,2%	▲ 2,4%
PERÍODO DE AMORTIZAÇÃO (ANOS)	–	–	–	–	5,34	42,80	–

Fonte: Elaborado pela autora

4.2 EDIFÍCIO 2 – 03 PAVIMENTOS COM VARANDA

Apresentaremos, a seguir, os dados referentes ao edifício 2, como desempenho da envoltória e energias.

4.2.1 Desempenho da envoltória segundo o PBE edifica

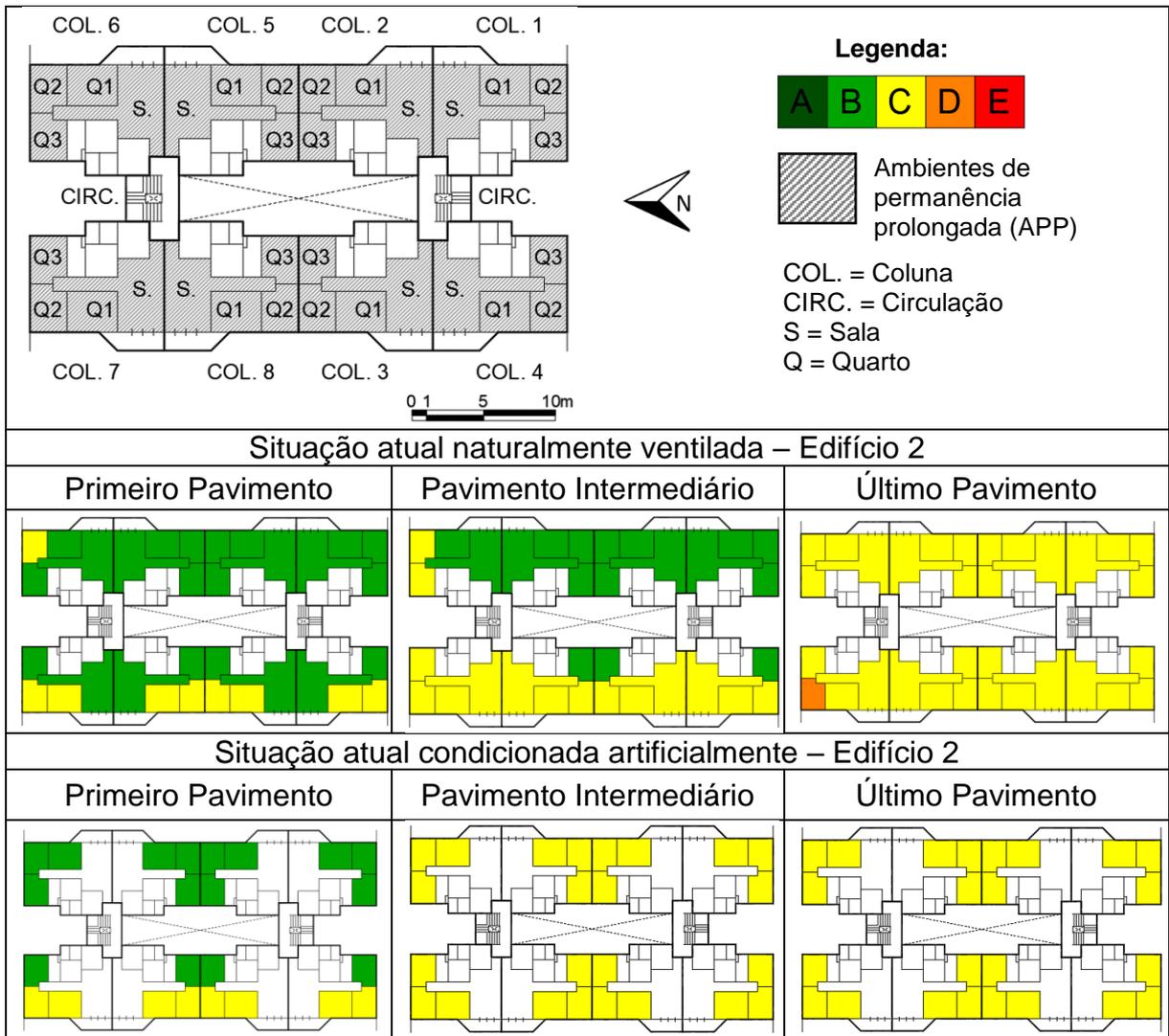
Em relação ao desempenho da envoltória, consideramos os padrões estabelecidos pelo PBE Edifica, conforme dados a ser apresentados.

4.2.1.1 Edifício existente

A Figura 19 apresenta o resultado do desempenho da envoltória segundo os padrões estabelecidos pelo PBE Edifica para o edifício 2. Nota-se que grande parte dos ambientes de permanência prolongada (APP) está na categoria C de

desempenho. Isso se deve principalmente à localização do edifício, que tem o seu maior eixo no sentido norte-sul, fazendo com que as fachadas de maior área fiquem mais expostas ao sol. Os ambientes com melhor desempenho estão voltados para o vão de ventilação e recebem sombreamento da própria edificação. Os ambientes com pior desempenho encontram-se na face oeste do edifício, bem como no último pavimento, pois estes estão mais suscetíveis aos efeitos da insolação. O único ambiente que atingiu nível D de desempenho para a situação naturalmente ventilada foi o quarto 2 da coluna 7 do último pavimento, que possui as duas paredes externas voltadas para a direção norte e oeste.

Figura 19 - Desempenho da envoltória segundo o PBE Edifica do Edifício 2 nas situações naturalmente ventilada e condicionada artificialmente



Fonte: Elaborado pela autora

4.2.1.2 Análises paramétricas com medidas de retrofit

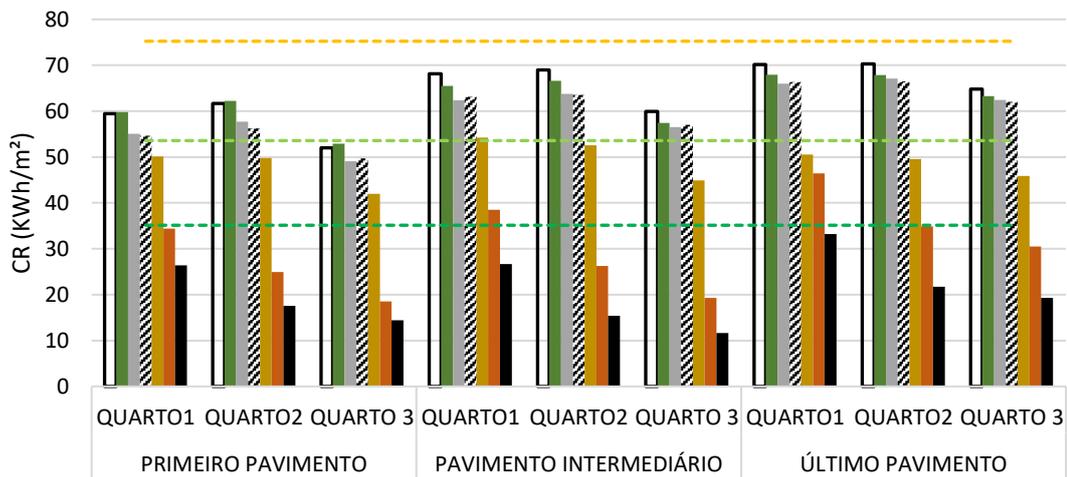
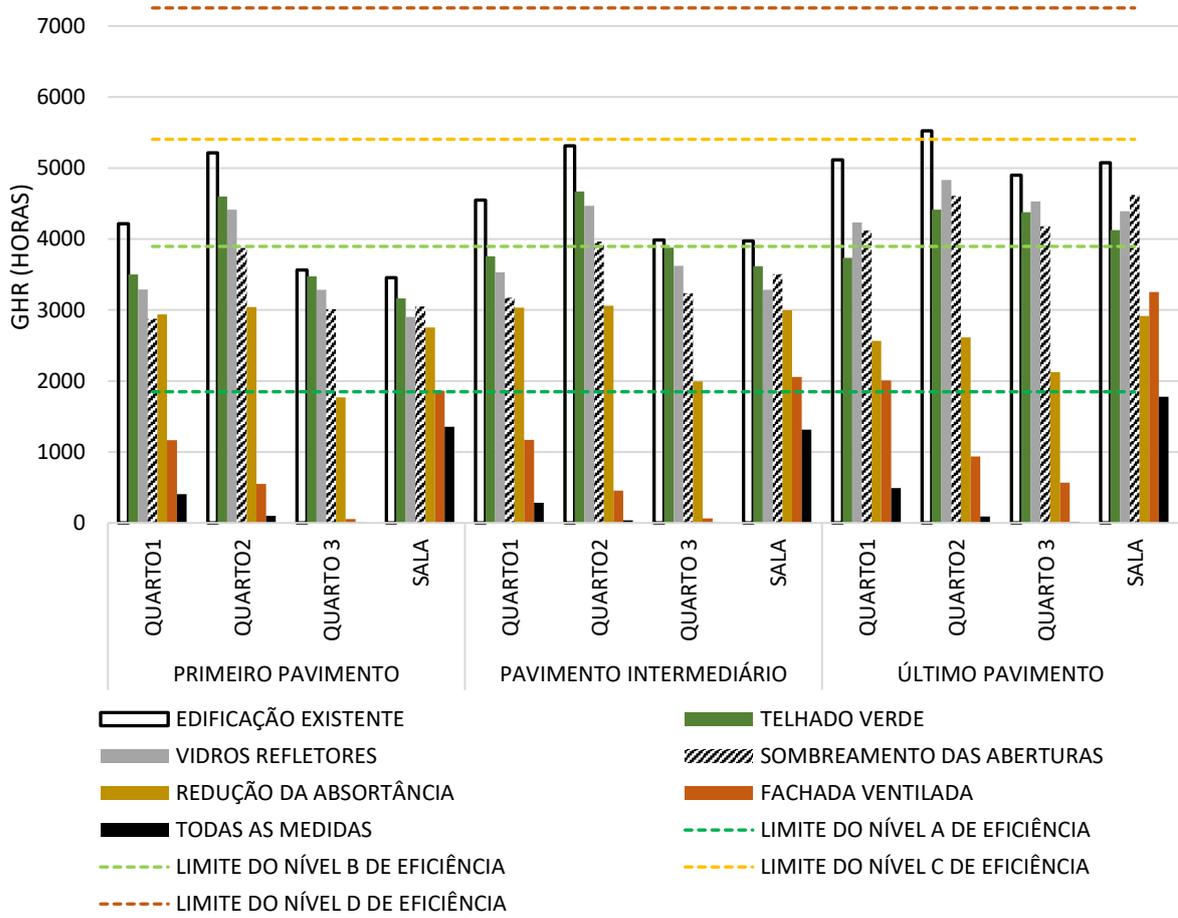
O Gráfico 12 apresenta os resultados do GHR e do CR da coluna 7, que obteve o pior desempenho na situação naturalmente ventilada.

Quanto à situação naturalmente ventilada, todas as medidas conseguiram reduzir o GHR dos ambientes analisados, especialmente a mudança na absorvância e a fachada ventilada. O telhado verde se mostrou eficiente especialmente no último pavimento, porém, foi o que menos influenciou o GHR nos demais pavimentos.

Quanto à situação onde o edifício é condicionado artificialmente, as medidas mais eficazes foram a redução da absorvância e a fachada ventilada. As medidas menos eficientes foram o telhado verde, vidros refletivos e sombreamento das aberturas.

De modo geral, a redução da absorvância e a instalação de fachada ventilada foram as medidas que mais trouxeram benefícios em ambas situações. Após a adoção de todas as medidas de retrofit, todas as zonas obtiveram nível A de desempenho.

Gráfico 12 – Comparativo de GHR e CR da coluna 7 do Edifício 2 existente e com as medidas de retrofit



Fonte: Elaborado pela autora

4.2.2 Energia Incorporada (EI)

Em relação à Energia Incorporada (EI) do edifício 2, foram consideradas as quantidades necessárias, conforme dados a ser apresentados.

4.2.2.1 Edifício existente

A Tabela 17 apresenta os resultados de EI e CI do Edifício 2, considerando as quantidades necessárias para produção dos materiais, manutenção e desperdício. O total de energia e carbono incorporados por m² de área útil é de 7,7 GJ e 528,4 KgCO₂ respectivamente.

O Gráfico 13 apresenta a EII, EIR e EID dos materiais construtivos que compõem o edifício 2. Grande parte da EI está concentrada no concreto, aço e tijolo cerâmico, que somados representam 53% do total de EI de toda a edificação. A energia incorporada recorrente (EIR), necessária à manutenção e reposição dos materiais, representa 24% de toda a EI do edifício. A tinta é o material que mais acumula EIR, já que o serviço de pintura é realizado diversas vezes ao longo do ciclo de vida do edifício. O desperdício representa 11% do total de EI, sendo que metade desse total está associado ao concreto, aço e tijolo.

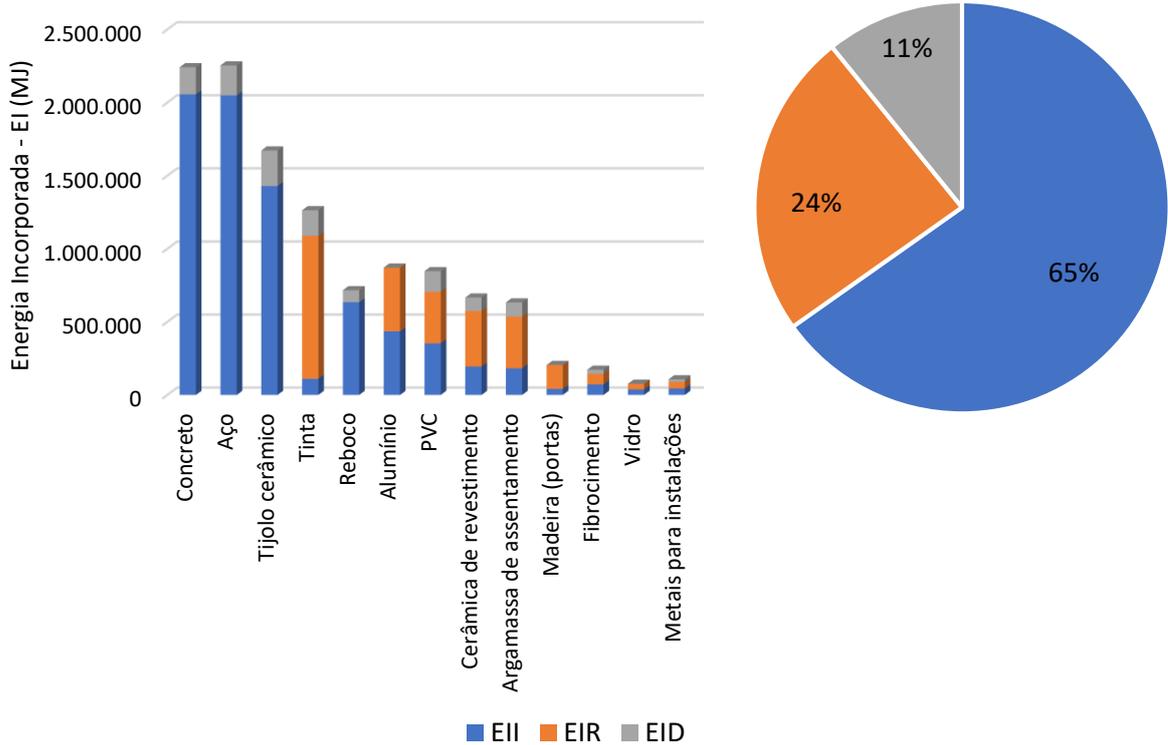
O Gráfico 14 apresenta o CII, CIR e CID dos materiais construtivos que compõem o edifício 2. Nota-se que o gráfico segue a mesma tendência do consumo de energia. Concreto, aço e tijolo participam de 58% de todo o CI.

Tabela 17 – Energia Incorporada (MJ) e Carbono Incorporado (KgCO₂) do Edifício 2

MATERIAL	ENERGIA INCORPORADA (MJ)				CARBONO INCORPORADO - CI (KgCO ₂)			
	EII	EIR	EID	TOTAL	CII	CIR	CID	TOTAL
Concreto	2.056.228,60	-	185.060,57	2.241.289,17	151.336,37	-	13.620,27	164.956,64
Aço	2.049.076,50	-	204.907,65	2.253.984,15	157.608,82	-	15.760,88	173.369,70
Tijolo cerâmico	1.428.795,20	-	242.895,18	1.671.690,38	111.924,67	-	19.027,19	130.951,87
Tinta	109.882,16	978.936,89	174.211,05	1.263.030,09	7.592,74	67.643,48	12.037,80	87.274,02
Reboco	634.069,80	-	82.429,07	716.498,87	46.320,70	-	6.021,69	52.342,39
Alumínio	435.456,00	435.456,00	-	870.912,00	18.966,72	18.966,72	-	37.933,44
PVC	352.796,80	352.796,80	141.118,72	846.712,32	18.539,47	18.539,47	7.415,79	44.494,73
Cerâmica de revestimento	194.598,44	379.466,96	91.850,46	665.915,87	10.063,66	19.624,13	4.750,05	34.437,84
Argamassa de assentamento	181.726,65	354.366,97	96.496,85	632.590,47	13.922,44	27.148,76	7.392,82	48.464,02
Madeira (portas)	40.950,00	163.800,00	-	204.750,00	2.838,29	11.353,14	-	14.191,43
Fibrocimento	72.276,00	72.276,00	27.464,88	172.016,88	5.119,45	5.119,45	1.945,39	12.184,30
Vidro	38.073,00	38.073,00	-	76.146,00	1.835,50	1.835,50	-	3.671,00
Metais para instalações	44.639,04	44.639,04	17.679,29	106.957,37	2.275,13	2.275,13	824,69	5.374,94
TOTAL	7.638.568,18	2.819.811,66	1.264.113,73	11.722.493,57	548.343,96	172.505,80	88.796,57	809.646,32
TOTAL / m²	4.985,10	1.840,27	824,99	7.650,36	357,86	112,58	57,95	528,39

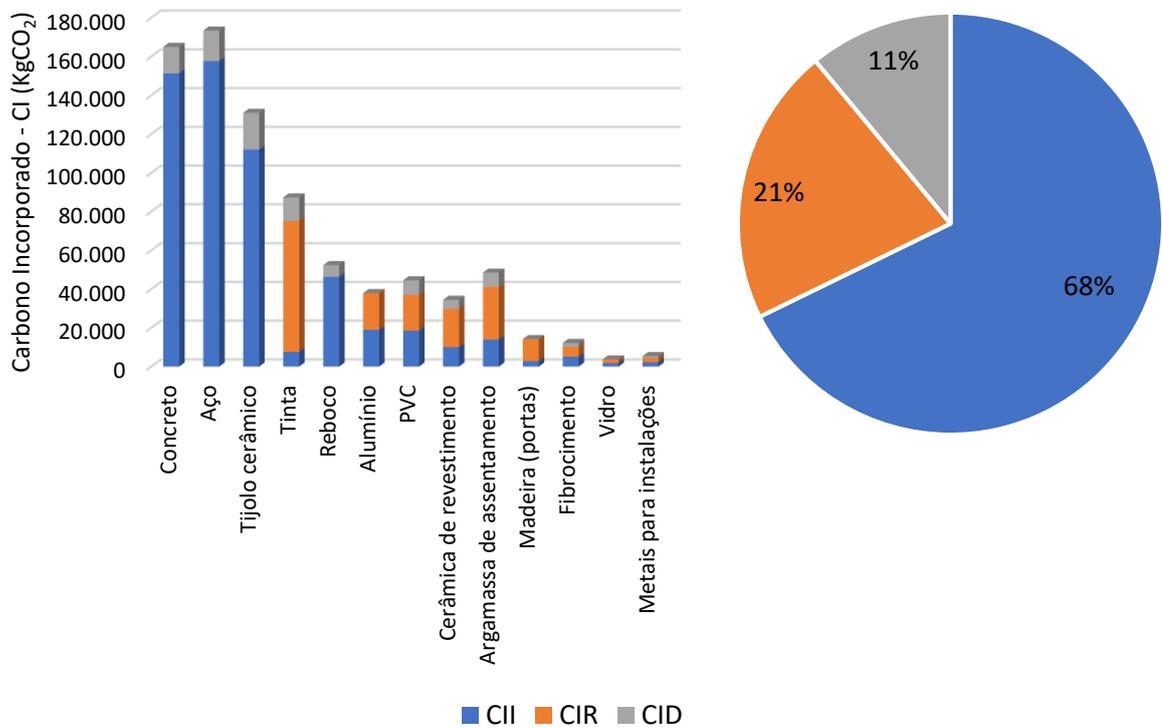
Nota: EII = Energia Incorporada Inicial; EIR = Energia Incorporada Recorrente; EID = Energia Incorporada Desperdiçada; CII = Carbono Incorporado Inicial; CIR = Carbono Incorporado Recorrente; CID = Carbono Incorporado Desperdiçado. Fonte: Elaborado pela autora

Gráfico 13 – EI (MJ) do Edifício 2



Nota: EII = Energia Incorporada Inicial; EIR = Energia Incorporada Recorrente; EID = Energia Incorporada Desperdiçada. Fonte: Elaborado pela autora

Gráfico 14 – CI (KgCO₂) do Edifício 2



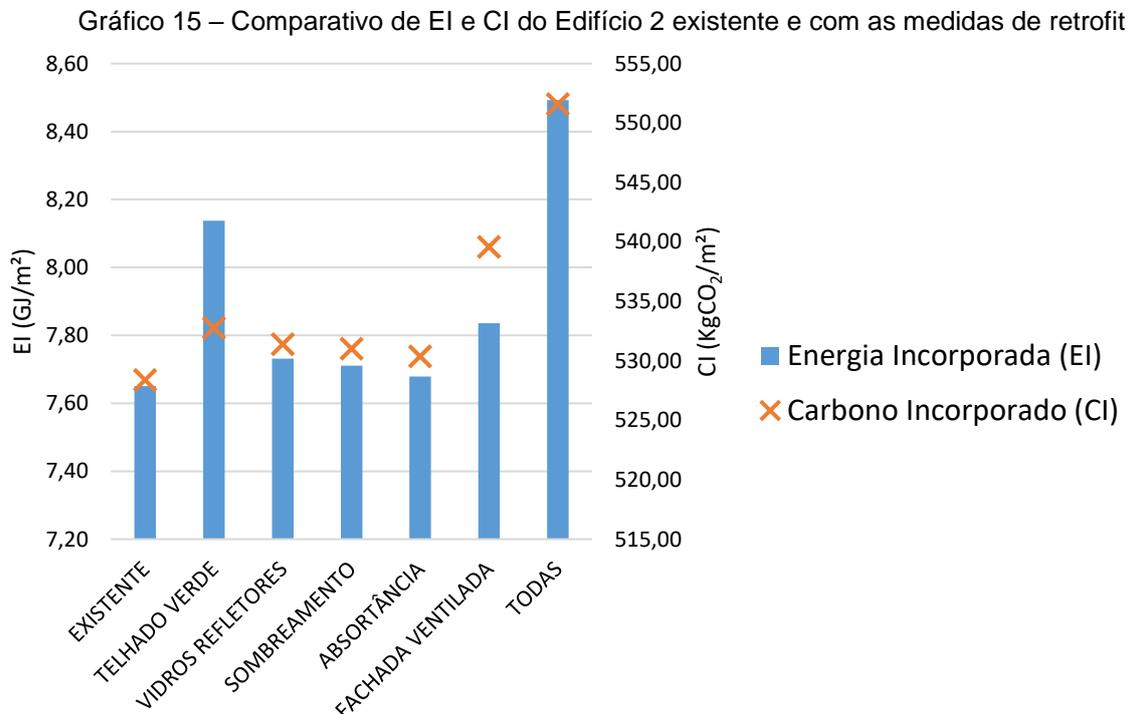
Nota: CII = Carbono Incorporado Inicial; CIR = Carbono Incorporado Recorrente; CID = Carbono Incorporado Desperdiçado. Fonte: Elaborado pela autora

4.2.2.2 Análises Paramétricas com medidas de retrofit

O Gráfico 15 apresenta os valores de Energia Incorporada (EI) e Carbono Incorporado (CI) do Edifício 2 existente e após a adoção das medidas de retrofit. Todas as medidas proporcionaram um acréscimo na EI e CI, especialmente o telhado verde e a fachada ventilada.

Após a adoção do telhado verde, o total de EI passou de 7,7 GJ/m² do edifício existente para 8,1 GJ/m². O edifício 2, assim como o edifício 1, é horizontal, ou seja, possui o comprimento e/ou largura maiores do que a altura. Como todo o material do telhado verde se concentra na área de cobertura, o volume de material por m² de área útil é elevado. A instalação da fachada ventilada representou um acréscimo de 2,4% na EI do edifício existente.

A instalação de películas refletoras nos vidros, bem como o sombreamento das aberturas com brises de alumínio foram inexpressivos no aumento da EI do edifício existente, representando aproximadamente 1% de acréscimo.



Fonte: Elaborado pela autora

A redução da absorvância da fachada foi a medida menos expressiva em termos de EI, pois o volume de material necessário é baixo, representando um acréscimo de 0,4% na EI do edifício existente.

Após a aplicação de todas as medidas de retrofit, o edifício 2 apresentou valores de EI e CI iguais a 8,5 GJ/m² e 551,6 KgCO₂/m² respectivamente. Esses valores representam um acréscimo de 11% na EI e 4% no CI.

4.2.3 Energia Operacional (EO)

Os dados a seguir apresentam o consumo de Energia Operacional do edifício 2.

4.2.3.1 Edifício existente

A Tabela 18 apresenta os valores de consumo de energia na etapa de operação do edifício 2, separados por faixas de consumo e por categorias (equipamentos, aquecimento de água, iluminação, ar condicionado e cocção). O total de energia primária e de emissões de CO₂ resultantes desse consumo é de 14 GJ/m² e 421,6 KgCO₂/m² respectivamente.

De acordo com o Gráfico 16, os equipamentos são responsáveis por 37% da energia consumida; seguidos pela cocção, com 20%; pelo aquecimento de água, com 19%; pela iluminação, com 12%; e pelo ar condicionado, com 12%. O ar condicionado é pouco representativo, já que grande parte das UH do edifício 2 está dentro da faixa mínima de consumo (Tabela 4) e, portanto, não possui aparelho de ar condicionado. No entanto, em termos de emissões de CO₂, o gás natural utilizado na cocção dos alimentos é responsável por quase metade do total de emissões; seguido dos equipamentos, com 26%; dos aquecimentos de água, com 13%; da iluminação, com 9%; e do ar condicionado, com 8%.

Tabela 18 – EO e emissões de carbono do Edifício 2

	EO POR FAIXAS DE CONSUMO (MJ)			EO (MJ)	EMIÇÃO DE CO ₂ (KgCO ₂)
	MÍNIMO	MÉDIO	MÁXIMO		
EQUIPAMENTO	5.137.982,67	1.585.588,61	1.214.847,59	7.938.418,87	168.691,40
AQ. ÁGUA - CHUVEIRO	2.463.436,80	975.110,40	615.859,20	4.054.406,40	86.156,14
ILUMINAÇÃO	1.614.039,44	638.890,61	403.509,86	2.656.439,91	56.449,35
AR CONDICIONADO	-	1.330.123,16	1.180.299,72	2.510.422,88	53.346,49
COCÇÃO	2.663.248,90	1.054.202,69	665.812,22	4.383.263,81	281.405,54
TOTAL				21.542.951,86	646.048,91
TOTAL/m²				14.059,41	421,63

Fonte: Elaborado pela autora

Gráfico 16 – Participação das categorias de consumo de EO e emissões de CO₂ do Edifício 2

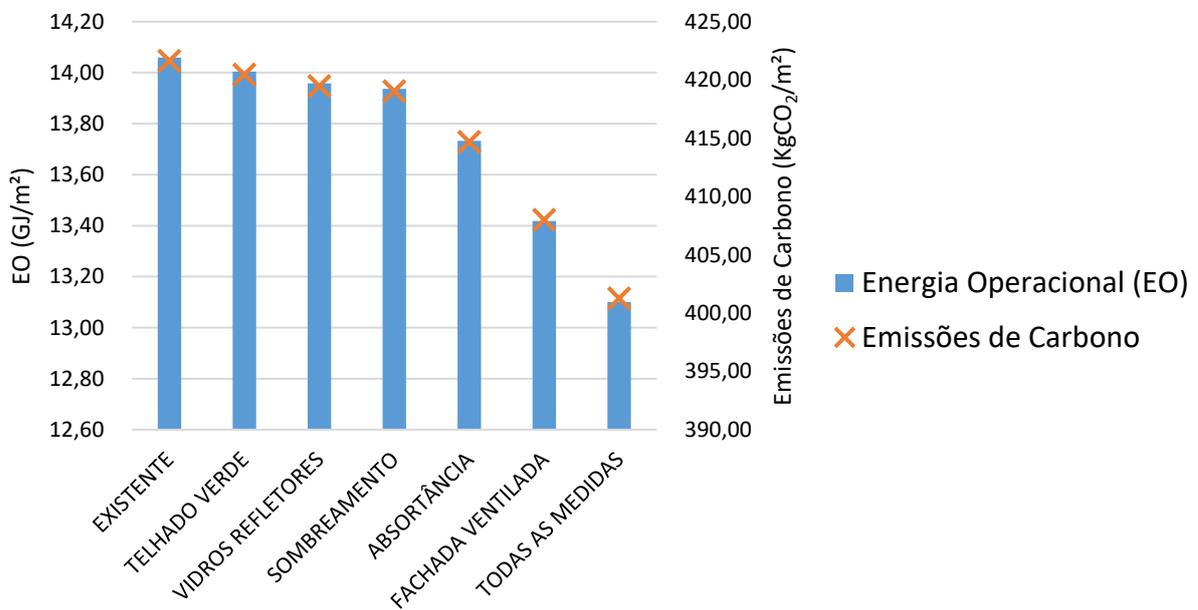


Fonte: Elaborado pela autora

4.2.3.2 Análises paramétricas com medidas de retrofit

O Gráfico 17 apresenta o comparativo de EO e emissões de CO₂ na etapa de operação. De maneira geral, todas as medidas proporcionaram redução no consumo.

Gráfico 17 – Comparativo de EO e emissões de CO₂ do edifício 2 existente e com as medidas de retrofit



Fonte: Elaborado pela autora

As medidas menos expressivas foram o telhado verde, os vidros refletores e o sombreamento das aberturas. Todas essas medidas reduziram o consumo de energia em menos de 1% no ciclo de vida da edificação.

A fachada ventilada foi a medida mais eficiente, reduzindo a EO para 13,4 GJ/m². Após a aplicação de todas as medidas, a EO reduziu de 14 GJ/m² do edifício existente para 13,1 GJ/m² com todas as medidas de retrofit.

4.2.4 Energia no ciclo de vida

Os dados a seguir apresentam o consumo de no ciclo de vida do edifício 2.

4.2.4.1 Edifício existente

A Tabela 19 apresenta os valores do consumo de energia e emissões de carbono no ciclo de vida do edifício 2 existente, resultando um total de 21,7 GJ/m² e 950 KgCO₂/m² respectivamente. O índice de emissões de carbono por unidade de energia consumida foi de 43,8 KgCO₂/GJ.

De acordo com o Gráfico 18, a energia operacional contribui com 65% do total de energia no ciclo de vida. Quanto às emissões de carbono, a energia necessária para operação da edificação gera 44% do total de CO₂ no ciclo de vida.

Tabela 19 – Total de energia e emissões de carbono no ciclo de vida do Edifício 2

	ENERGIA		CARBONO	
	MJ	GJ/m ²	KgCO ₂	KgCO ₂ /m ²
INCORPORADA	11.722.493,57	7,65	809.646,32	528,39
OPERACIONAL	21.542.951,86	14,06	646.048,91	421,63
TOTAL	33.265.445,43	21,71	1.455.695,23	950,02

Fonte: Elaborado pela autora

Gráfico 18 – Participação da energia e emissões de CO₂ no ciclo de vida do Edifício 2



Fonte: Elaborado pela autora

4.2.4.2 Análises paramétricas com medidas de retrofit

A Tabela 20 apresenta os resultados da energia no ciclo de vida comparando o edifício existente e com as medidas de retrofit. Para todas as medidas, houve acréscimo na EI e redução da EO. O telhado verde foi a única medida que não reduziu o consumo energético no ciclo de vida, aumentando de 21,7 GJ/m² do edifício existente para 22,1 GJ/m² com o telhado verde.

Apesar de as demais medidas reduzirem o consumo energético no ciclo de vida, algumas apresentaram um período de amortização muito extenso, como o caso dos vidros refletores e sombreamento das aberturas. Após a aplicação de todas as medidas, a energia no ciclo de vida reduziu em apenas 0,5%, com um período de amortização de 44 anos. A redução da absorvância e a fachada ventilada foram as medidas que mais contribuíram na redução do consumo energético no ciclo de vida, apresentando um período de amortização de 4 e 15 anos respectivamente.

Tabela 20 – Comparativo da Energia no ciclo de vida do Edifício 2 existente e com as medidas de retrofit

	EDIFÍCIO EXISTENTE (GJ/m ²)	TELHADO VERDE	VIDROS REFLETORES	SOMBREAMENTO	ABSORVÂNCIA	FACHADA VENTILADA	TODAS AS MEDIDAS
ENERGIA INCORPORADA (EI)	7,65	▲ 6,4%	▲ 1,1%	▲ 0,8%	▲ 0,4%	▲ 2,4%	▲ 11,0%
ENERGIA OPERACIONAL (EO)	14,06	▼ -0,4%	▼ -0,7%	▼ -0,9%	▼ -2,3%	▼ -4,6%	▼ -6,8%
ENERGIA NO CICLO DE VIDA	21,71	▲ 2,0%	▼ -0,1%	▼ -0,3%	▼ -1,4%	▼ -2,1%	▼ -0,5%
PERÍODO DE AMORTIZAÇÃO (ANOS)	–	–	39,88	24,74	4,39	14,48	43,94

Fonte: Elaborado pela autora

4.3 EDIFÍCIO 3 – 09 PAVIMENTOS COM VARANDA PEQUENA

Apresentaremos, a seguir, os dados referentes ao edifício 3, como desempenho da envoltória e energias.

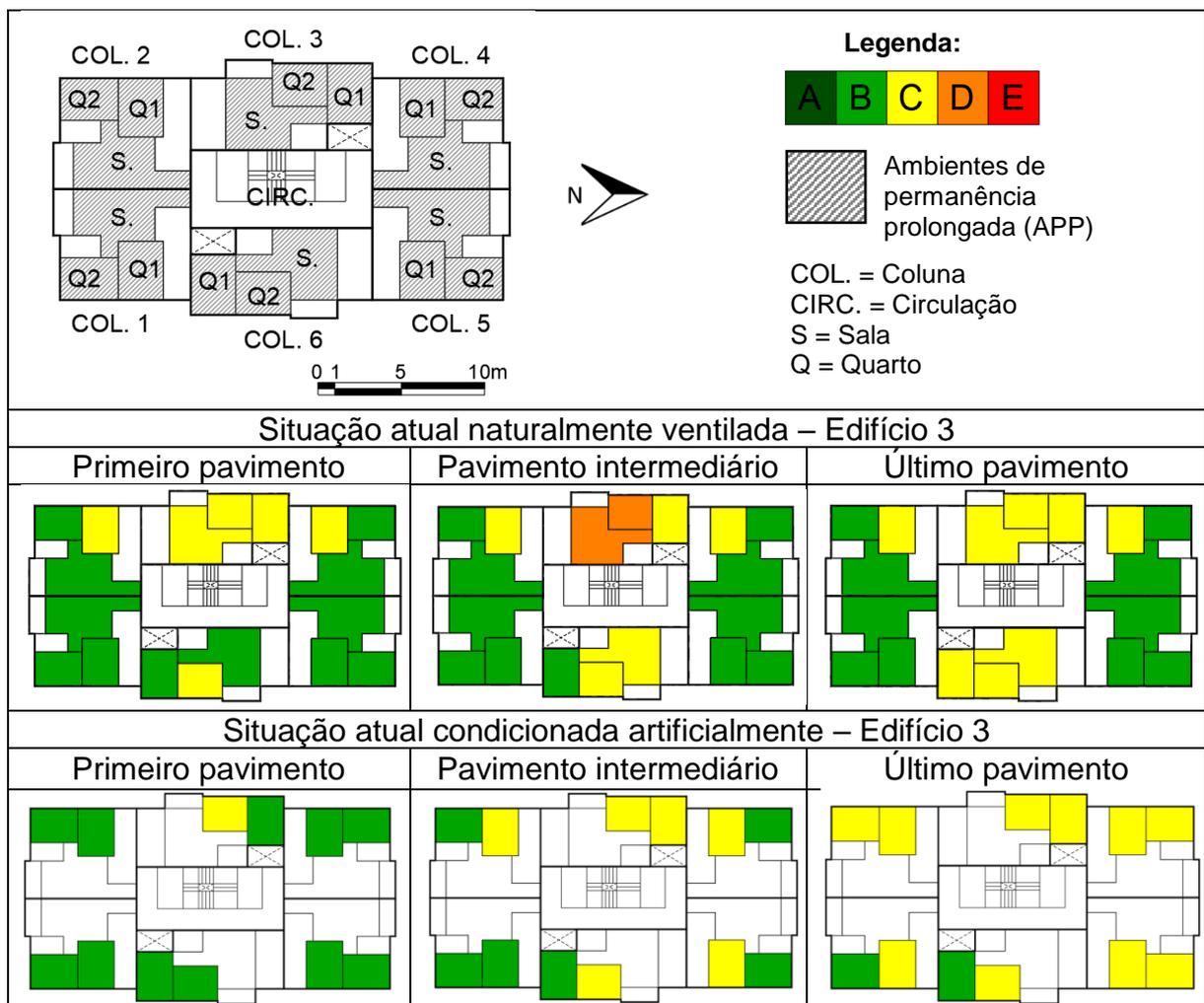
4.3.1 Desempenho da envoltória segundo o PBE Edifica

Em relação ao desempenho da envoltória, consideramos os padrões estabelecidos pelo PBE Edifica, conforme dados a ser apresentados.

4.3.1.1 Edifício existente

A Figura 20 apresenta o resultado do desempenho da envoltória segundo os padrões estabelecidos pelo PBE Edifica. Os ambientes de permanência prolongada (APP) voltados para o sentido norte e sul, onde estão as colunas 1, 2, 4 e 5, são os que apresentam melhor desempenho e estão, em sua maioria, no nível B de desempenho. No entanto, grande parte dos APP voltados para o leste e oeste, onde estão as colunas 3 e 6 apresentaram nível C. Apesar de alguns ambientes do pavimento intermediário terem alcançado nível D na situação naturalmente ventilada, de modo geral o último pavimento apresenta o pior desempenho, devido às trocas térmicas pela cobertura.

Figura 20 - Desempenho da envoltória segundo o PBE Edifica do Edifício 3 nas situações naturalmente ventilada e condicionada artificialmente



Fonte: Elaborado pela autora

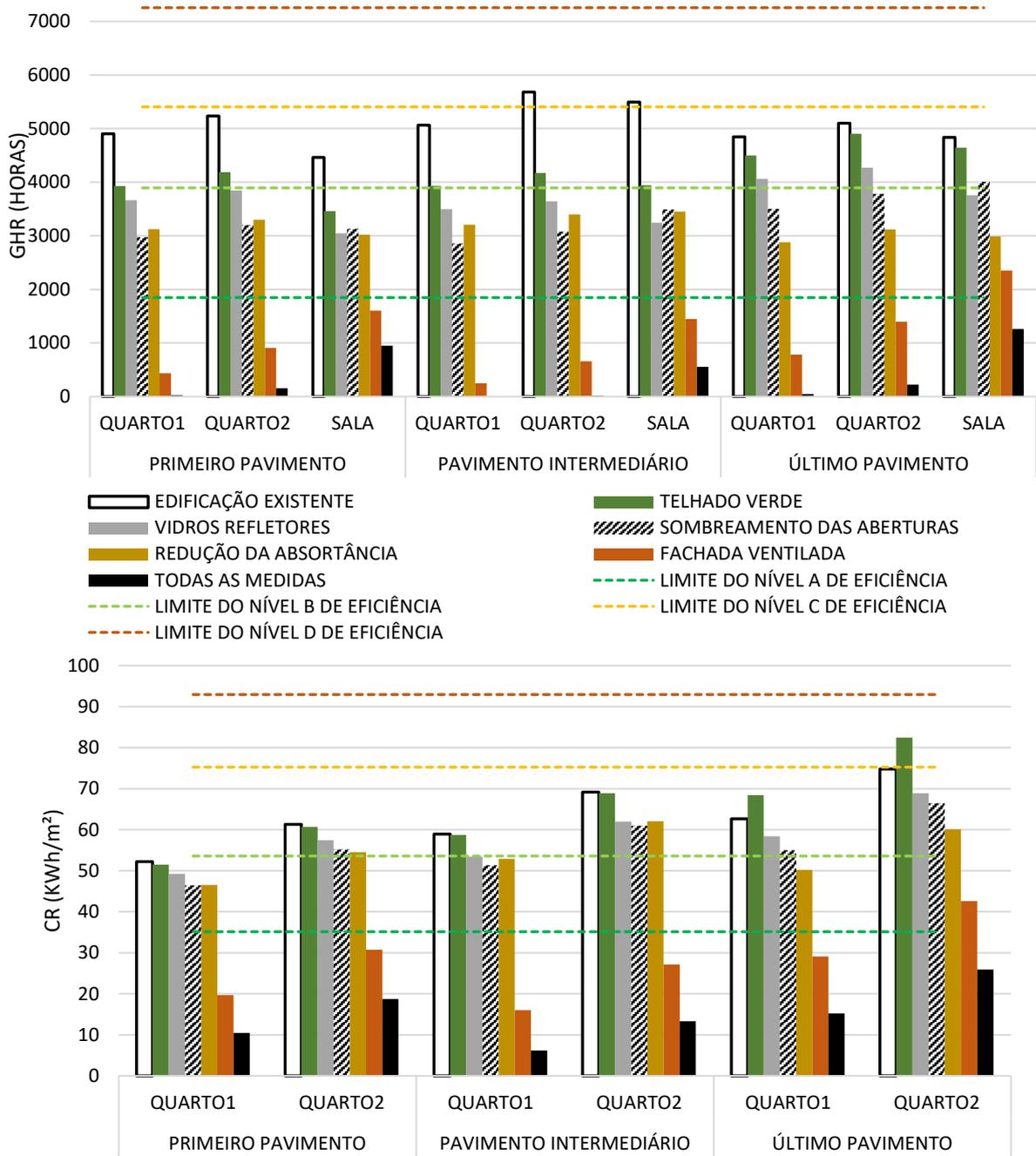
4.3.1.2 Análises paramétricas com medidas de retrofit

O Gráfico 19 apresenta os resultados do GHR e do CR da coluna 3, que obteve o pior desempenho na situação naturalmente ventilada. Quanto à situação naturalmente ventilada, todas as medidas conseguiram reduzir o GHR dos ambientes analisados, especialmente a fachada ventilada. As medidas voltadas para proteção solar das aberturas, como os vidros refletivos e o sombreamento, também obtiveram bom desempenho, juntamente com a redução da absorvância da envoltória. O telhado verde, apesar de ser a medida que menos impactou nos resultados, foi suficiente para aumentar o desempenho dos ambientes que estavam nível D, elevando-os ao nível C.

Quanto à situação do edifício, que é condicionado artificialmente, a medida mais eficaz foi a fachada ventilada. A adoção de vidros refletivos, instalação de brises e a redução da absorvância tiveram desempenhos similares. O telhado verde foi a medida que menos impactou o CR no primeiro pavimento e no pavimento intermediário. No entanto, no último pavimento, essa medida provocou aumento do CR nos ambientes analisados.

Após a adoção de todas as medidas de retrofit, todas as zonas obtiveram nível A de desempenho, tanto para a situação naturalmente ventilada quanto para a condicionada artificialmente.

Gráfico 19 – Comparativo de GHR e CR da coluna 3 do Edifício 3 existente e com as medidas de retrofit



Fonte: Elaborado pela autora

4.3.2 Energia Incorporada (EI)

Em relação à Energia Incorporada (EI) do edifício 3, foram consideradas as quantidades necessárias, conforme dados a ser apresentados.

4.3.2.1 Edifício existente

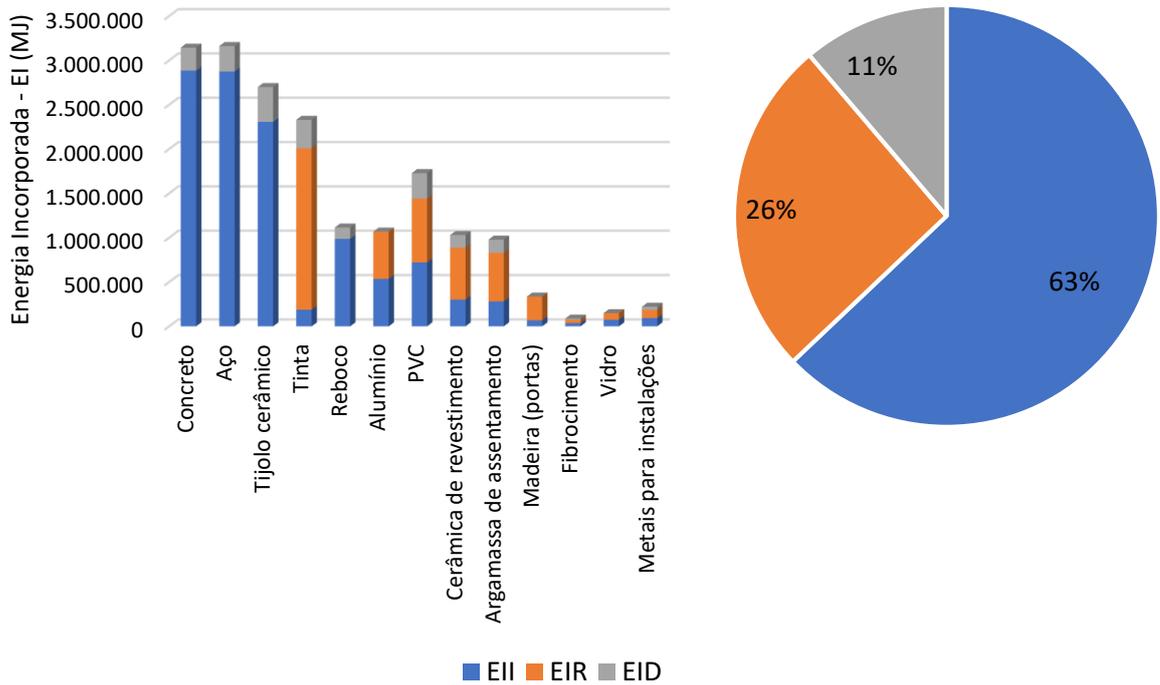
A Tabela 21 apresenta os resultados de EI e CI do Edifício 3, considerando as quantidades necessárias para produção dos materiais, manutenção e desperdício. O total de energia e carbono incorporados por m² de área útil é de 6,6 GJ e 453,2 KgCO₂ respectivamente. O Gráfico 20 apresenta a EII, EIR e EID dos materiais construtivos que compõem o edifício 3. 50% do total de EI concentra-se no concreto, aço e tijolo cerâmico, que contribuem com 55% do total de CI. A energia incorporada recorrente (EIR), necessária à manutenção e reposição dos materiais, representa 26%, e o desperdício, 11% do total de EI. O Gráfico 21 apresenta o CII, CIR e CID dos materiais construtivos que compõem o edifício 3. Nota-se que o gráfico segue a mesma tendência do consumo de energia.

Tabela 21 – Energia Incorporada (MJ) e Carbono Incorporado (KgCO₂) do Edifício 3

MATERIAL	ENERGIA INCORPORADA (MJ)				CARBONO INCORPORADO - CI (KgCO ₂)			
	EII	EIR	EID	TOTAL	CII	CIR	CID	TOTAL
Concreto	2.883.652,42	-	259.528,72	3.143.181,14	212.233,93	-	19.101,05	231.334,99
Aço	2.873.622,33	-	287.362,23	3.160.984,56	221.030,41	-	22.103,04	243.133,45
Tijolo cerâmico	2.306.283,00	-	392.068,11	2.698.351,11	180.662,68	-	30.712,66	211.375,33
Tinta	187.192,04	1.821.069,58	321.321,86	2.329.583,48	12.934,77	125.833,95	22.202,99	160.971,71
Reboco	986.605,20	-	128.258,68	1.114.863,88	72.074,47	-	9.369,68	81.444,15
Alumínio	534.114,00	534.114,00	-	1.068.228,00	23.263,87	23.263,87	-	46.527,74
PVC	719.927,20	719.927,20	287.970,88	1.727.825,28	37.832,17	37.832,17	15.132,87	90.797,22
Cerâmica de revestimento	300.717,86	586.399,82	141.938,83	1.029.056,51	15.551,62	30.325,67	7.340,37	53.217,66
Argamassa de assentamento	280.826,75	547.612,17	149.119,01	977.557,93	21.514,70	41.953,66	11.424,31	74.892,67
Madeira (portas)	67.177,50	268.710,00	-	335.887,50	4.656,14	18.624,56	-	23.280,70
Fibrocimento	36.708,00	36.708,00	13.949,04	87.365,04	2.600,10	2.600,10	988,04	6.188,24
Vidro	74.000,00	74.000,00	-	148.000,00	3.567,54	3.567,54	-	7.135,08
Metais para instalações	92.555,29	92.555,29	35.876,20	220.986,78	4.786,08	4.786,08	1.690,72	11.262,88
TOTAL	11.343.381,59	4.681.096,06	2.017.393,55	18.041.871,20	812.708,49	288.787,60	140.065,73	1.241.561,81
TOTAL / m²	4.140,12	1.708,51	736,31	6.584,94	296,62	105,40	51,12	453,15

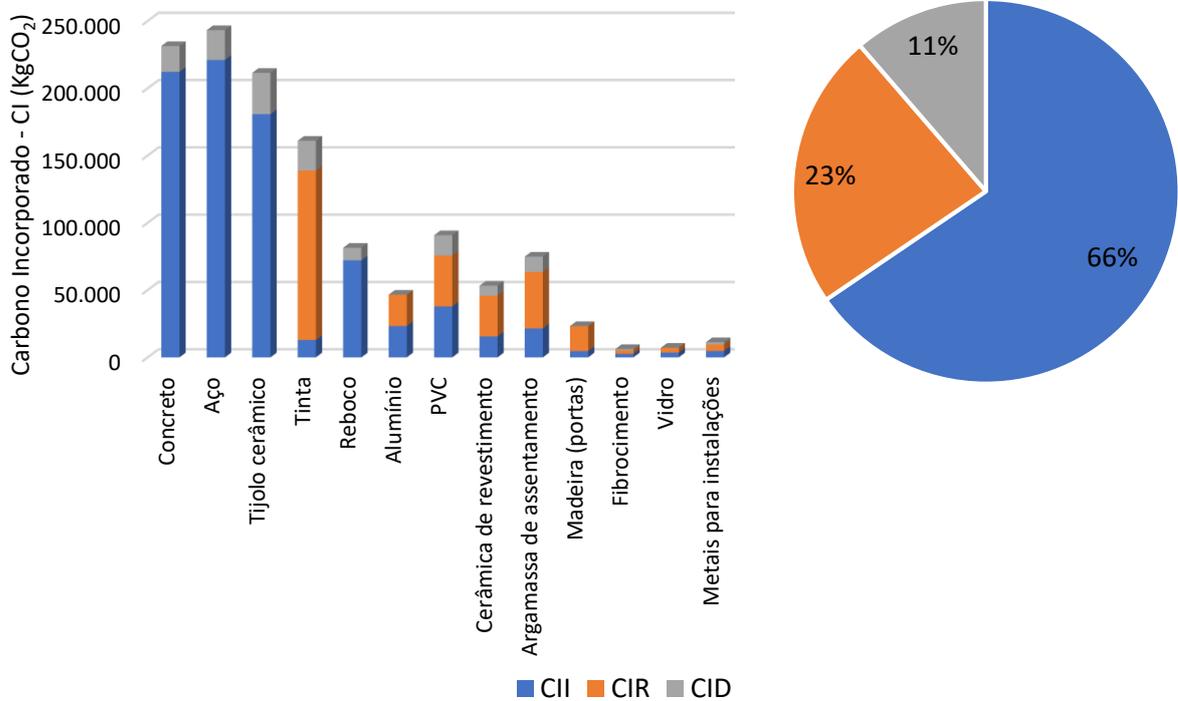
Nota: EII = Energia Incorporada Inicial; EIR = Energia Incorporada Recorrente; EID = Energia Incorporada Desperdiçada; CII = Carbono Incorporado Inicial; CIR = Carbono Incorporado Recorrente; CID = Carbono Incorporado Desperdiçado. Fonte: Elaborado pela autora

Gráfico 20 – EI (MJ) do Edifício 3



Nota: EII = Energia Incorporada Inicial; EIR = Energia Incorporada Recorrente; EID = Energia Incorporada Desperdiçada. Fonte: Elaborado pela autora

Gráfico 21 – CI (KgCO₂) do Edifício 3

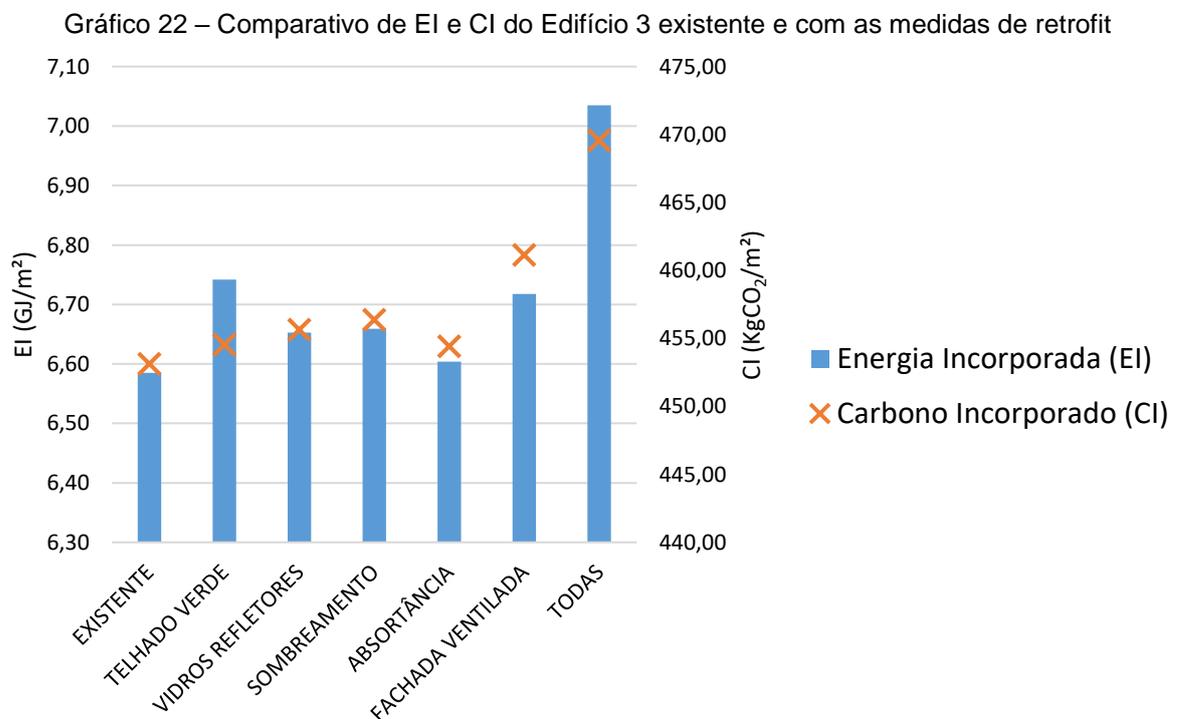


Nota: CII = Carbono Incorporado Inicial; CIR = Carbono Incorporado Recorrente; CID = Carbono Incorporado Desperdiçado. Fonte: Elaborado pela autora

4.3.2.2 Análises paramétricas

O Gráfico 22 apresenta os valores de Energia Incorporada (EI) e Carbono Incorporado (CI) do Edifício 3 existente e após a adoção das medidas de retrofit. Todas as medidas proporcionaram um acréscimo na EI e CI. As medidas que proporcionaram maior aumento na EI foram o telhado verde e a fachada ventilada. A primeira aumentou a EI em 2,4%, e a segunda em 2%. As medidas de proteção solar das aberturas, como os vidros refletores e o sombreamento com brises induziram a um aumento de apenas 1%.

A redução da absorvância da fachada foi a medida menos expressiva em termos de EI, pois o volume de material necessário é baixo, representando um acréscimo de 0,3% na EI do edifício existente. Após a aplicação de todas as medidas de retrofit, o edifício 3 apresentou valores de EI e CI iguais a 7,0 GJ/m² e 469,6 KgCO₂/m² respectivamente. Esses valores representam um acréscimo de 7% na EI e 4% no CI.



Fonte: Elaborado pela autora

4.3.3 Energia Operacional (EO)

Os dados a seguir apresentam o consumo de Energia Operacional do edifício 3.

4.3.3.1 Edifício existente

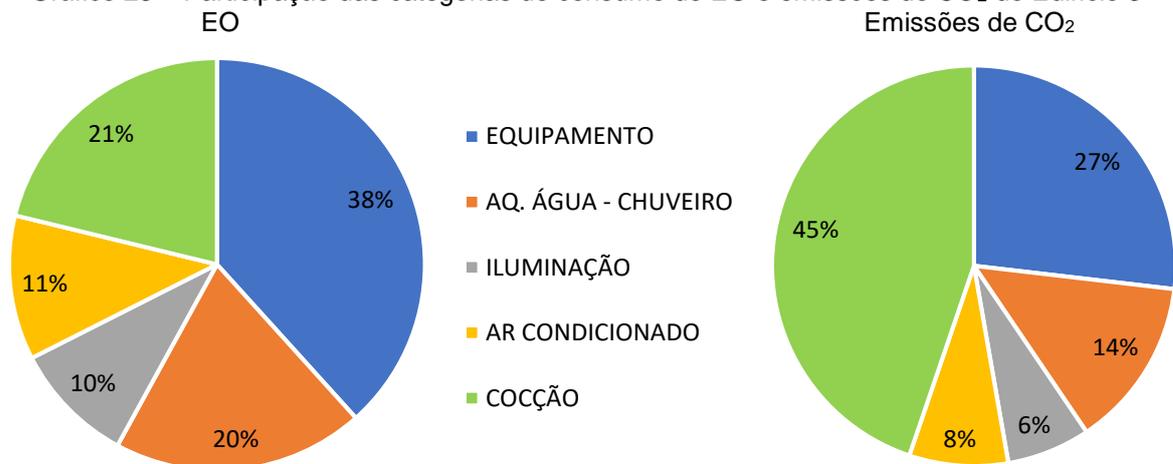
A Tabela 22 apresenta os valores de consumo de energia na etapa de operação do edifício 3, separados por faixas de consumo e por categorias (equipamentos, aquecimento de água, iluminação, ar condicionado e cocção). O total de energia primária e emissões de CO₂ resultantes desse consumo é de 17 GJ/m² e 515,7 KgCO₂/m² respectivamente.

Tabela 22 – EO e emissões de carbono do Edifício 3

	EO POR FAIXAS DE CONSUMO (MJ)			EO (MJ)	EMIÇÃO DE CO ₂ (KgCO ₂)
	MÍNIMO	MÉDIO	MÁXIMO		
EQUIPAMENTO	11.560.461,00	3.567.574,37	2.733.407,08	17.861.442,45	379.555,65
AQ. ÁGUA - CHUVEIRO	5.542.732,80	2.193.998,40	1.385.683,20	9.122.414,40	193.851,31
ILUMINAÇÃO	2.702.881,61	1.069.890,64	675.720,40	4.448.492,65	94.530,47
AR CONDICIONADO	-	2.759.561,55	2.509.800,10	5.269.361,64	111.973,93
COCCÃO	5.992.310,02	2.371.956,05	1.498.077,50	9.862.343,57	633.162,46
TOTAL				46.564.054,72	1.413.073,82
TOTAL/m²				16.994,99	515,74

Fonte: Elaborado pela autora

Gráfico 23 – Participação das categorias de consumo de EO e emissões de CO₂ do Edifício 3



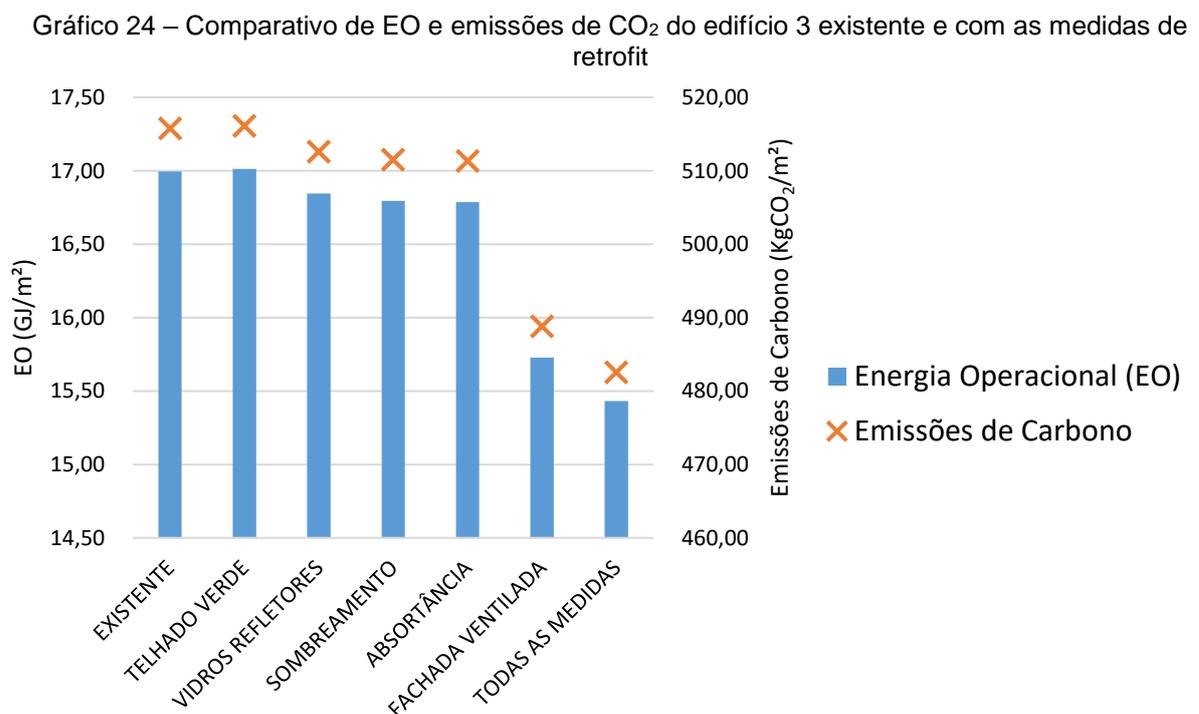
Fonte: Elaborado pela autora

De acordo com o Gráfico 23, os equipamentos são responsáveis por 38% da energia consumida; seguidos pela cocção, com 21%; pelo aquecimento de água, com

20%; pela iluminação, com 10%; e pelo ar condicionado, com 11%. Assim como no edifício 2, o ar condicionado é pouco representativo, já que grande parte das UH do edifício 3 está dentro da faixa mínima de consumo (ver Tabela 4) e, portanto, não possui aparelho de ar condicionado. Em termos de emissões de CO₂, o gás natural utilizado na cocção dos alimentos é responsável por 45% do total de emissões; seguido dos equipamentos, com 27%; dos aquecimentos de água, com 14%; do ar condicionado, com 8%; e da iluminação, com 6%.

4.3.3.2 Análises paramétricas com medidas de retrofit

O Gráfico 24 apresenta o comparativo de EO e emissões de CO₂ na etapa de operação. De maneira geral, todas as medidas proporcionaram redução no consumo, exceto o telhado verde, que aumentou a EO em 0,1%. As medidas menos expressivas foram os vidros refletores e o sombreamento das aberturas e a redução da absorvância. A fachada ventilada foi a medida mais eficiente, reduzindo a EO para 15,7 GJ/m². Após a aplicação de todas as medidas, a EO reduziu de 17 GJ/m² do edifício existente para 15,4 GJ/m² com todas as medidas de retrofit, uma redução de 9%.



Fonte: Elaborado pela autora

4.3.4 Energia no ciclo de vida

Os dados a seguir apresentam o consumo de no ciclo de vida do edifício 3.

4.3.4.1 Edifício Existente

A Tabela 23 apresenta os valores do consumo de energia e emissões de carbono no ciclo de vida do edifício 3 existente, resultando um total de 23,6 GJ/m² e 969 KgCO₂/m² respectivamente. O índice de emissões de carbono por unidade de energia consumida foi de 41,1 KgCO₂/GJ.

De acordo com o Gráfico 25, a energia operacional contribui com 72% do total de energia e 53% das emissões de carbono no ciclo de vida.

Tabela 23 – Total de energia e emissões de carbono no ciclo de vida do Edifício 3

	ENERGIA		CARBONO	
	MJ	GJ/m ²	KgCO ₂	KgCO ₂ /m ²
INCORPORADA	18.041.871,20	6,58	1.241.561,81	453,15
OPERACIONAL	46.564.054,72	16,99	1.413.073,82	515,74
TOTAL	64.605.925,92	23,58	2.654.635,63	968,89

Fonte: Elaborado pela autora

Gráfico 25 – Participação da energia e emissões de CO₂ no ciclo de vida do Edifício 3



Fonte: Elaborado pela autora

4.3.4.2 Análises paramétricas com medidas de retrofit

A Tabela 24 apresenta os resultados da energia no ciclo de vida comparando o edifício existente com as medidas de retrofit. Para todas as medidas, houve

acréscimo na EI. No caso da EO, todas as medidas reduziram o consumo energético, exceto o telhado verde, que apresentou acréscimo de 0,1% da energia operacional.

Apesar de as demais medidas reduzirem o consumo energético no ciclo de vida, algumas apresentaram um período de amortização muito extenso, como o caso dos vidros refletores e sombreamento das aberturas, que foi de 23 anos e 19 anos respectivamente. A redução da absorvância e a fachada ventilada foram as medidas que mais contribuíram na redução do consumo energético no ciclo de vida, apresentando um período de amortização de aproximadamente 5 anos. Após a aplicação de todas as medidas, a energia no ciclo de vida reduziu em 4,7%, com um período de amortização de 14 anos.

Tabela 24 – Comparativo da Energia no ciclo de vida do Edifício 3 existente e com as medidas de retrofit

	EDIFÍCIO EXISTENTE (GJ/m ²)	TELHADO VERDE	VIDROS REFLETORES	SOMBREAMENTO	ABSORVÂNCIA	FACHADA VENTILADA	TODAS AS MEDIDAS
ENERGIA INCORPORADA (EI)	6,58	▲ 2,4%	▲ 1,0%	▲ 1,1%	▲ 0,3%	▲ 2,0%	▲ 6,8%
ENERGIA OPERACIONAL (EO)	16,99	▲ 0,1%	▼ -0,9%	▼ -1,2%	▼ -1,2%	▼ -7,5%	▼ -9,2%
ENERGIA NO CICLO DE VIDA	23,58	▲ 0,7%	▼ -0,3%	▼ -0,5%	▼ -0,8%	▼ -4,8%	▼ -4,7%
PERÍODO DE AMORTIZAÇÃO (ANOS)	–	–	22,61	18,50	4,49	5,23	14,38

Fonte: Elaborado pela autora

4.4 EDIFÍCIO 4 – 09 PAVIMENTOS COM VARANDA GRANDE

Apresentaremos, a seguir, os dados referentes ao edifício 4, como desempenho da envoltória e energias.

4.4.1 Desempenho da envoltória segundo o PBE Edifica

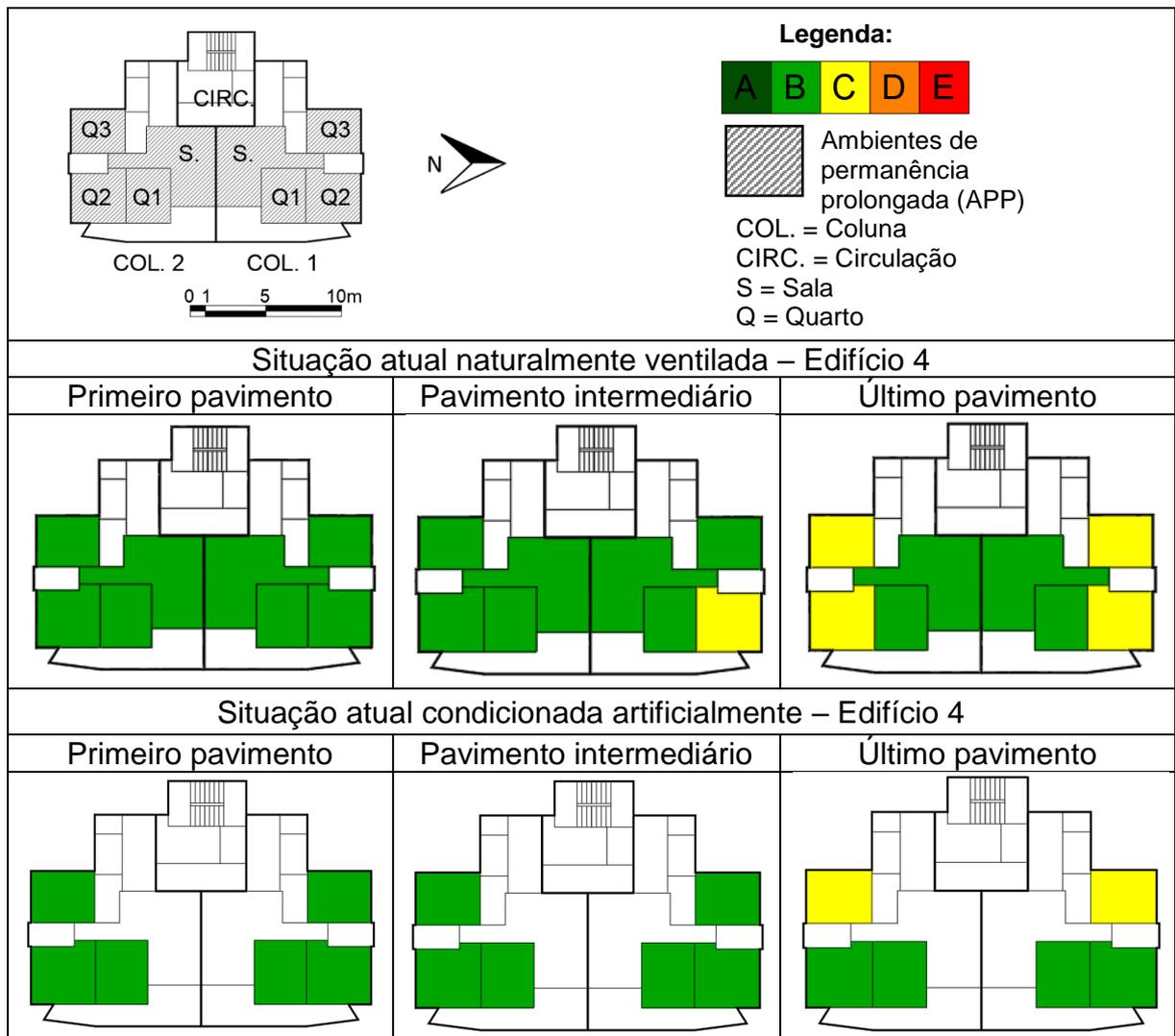
Em relação ao desempenho da envoltória, consideramos os padrões estabelecidos pelo PBE Edifica, conforme dados a ser apresentados.

4.4.1.1 Edifício existente

A Figura 21 apresenta o resultado do desempenho da envoltória segundo os padrões estabelecidos pelo PBE Edifica. Grande parte dos ambientes de permanência

prolongada (APP) enquadra-se no nível B de desempenho. Os ambientes com melhor desempenho são os da coluna 2 do primeiro pavimento, pois estão voltados para o sentido sul e leste. De forma análoga, os ambientes com pior desempenho estão voltados para o sentido norte e leste, localizados na coluna 1, mais especificamente no último pavimento.

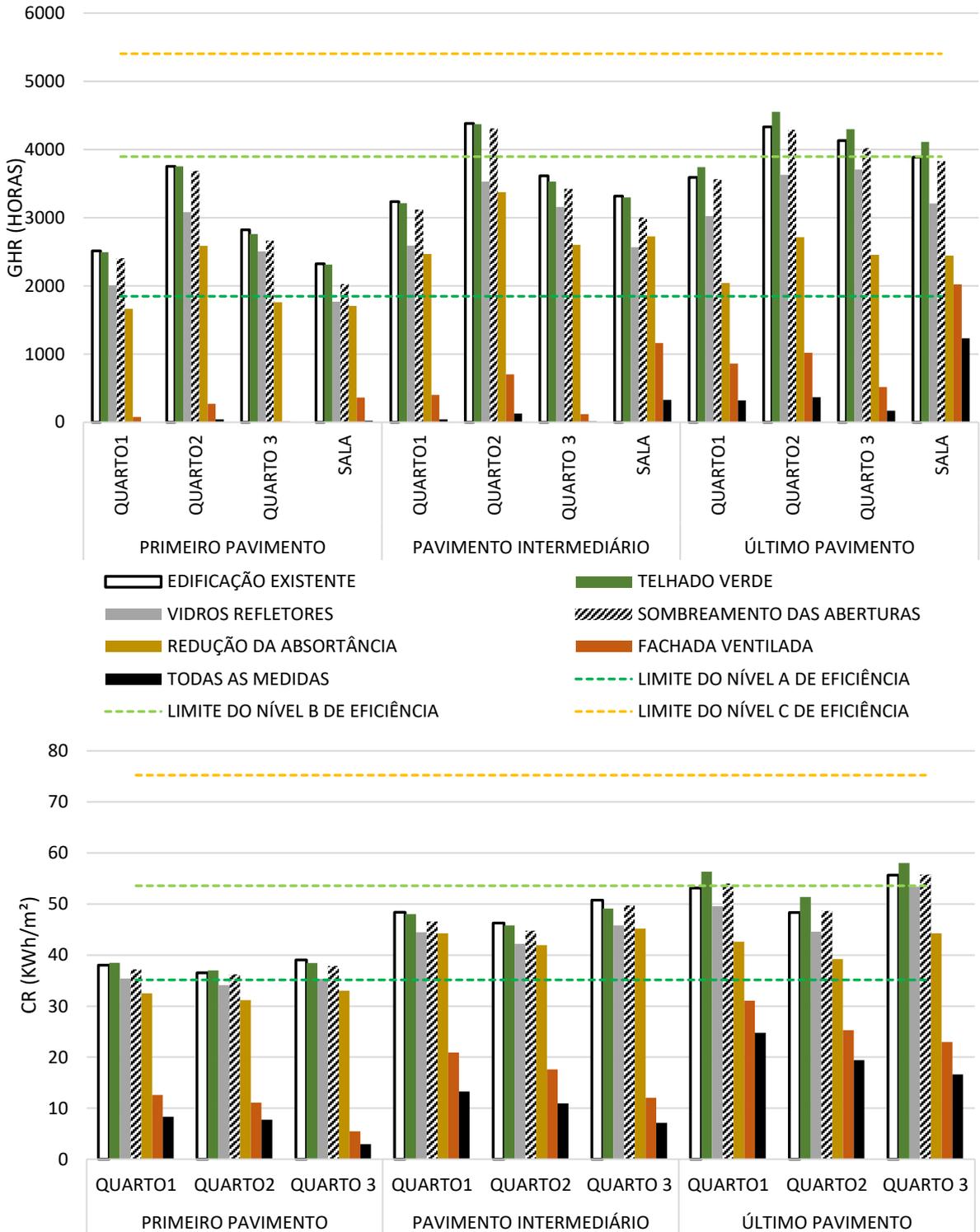
Figura 21 - Desempenho da envoltória segundo o PBE Edifica do Edifício 4 nas situações naturalmente ventilada e condicionada artificialmente



Fonte: Elaborado pela autora

4.4.1.2 Análises paramétricas com medidas de retrofit

Gráfico 26 – Comparativo de GHR e CR da coluna 1 do Edifício 4 existente e com as medidas de retrofit



Fonte: Elaborado pela autora

O Gráfico 26 apresenta os resultados do GHR e do CR da coluna 1, que obteve o pior desempenho na situação naturalmente ventilada. Tanto na situação naturalmente ventilada quanto na artificialmente condicionada, o telhado verde e o sombreamento das aberturas foram as medidas que menos surtiram efeito no desempenho dos ambientes analisados. Além disso, telhado verde aumentou a quantidade de GHR e CR nos APP do último pavimento. Devido à extensa varanda que compõe a edificação, a instalação de brises não foi necessária em grande parte das aberturas, o que reduziu a sua influência no desempenho do edifício.

Por conter aberturas com grandes áreas, a adoção de película refletora se mostrou uma medida eficaz na melhoria do desempenho, assim como a redução da absorvância da envoltória. Entretanto, a medida mais eficiente na redução do GHR e CR foi a fachada ventilada.

Após a adoção de todas as medidas de retrofit, todas as zonas obtiveram nível A de desempenho, tanto para a situação naturalmente ventilada quanto para a condicionada artificialmente.

4.4.2 Energia Incorporada (EI)

Em relação à Energia Incorporada (EI) do edifício 4, foram consideradas as quantidades necessárias, conforme dados a ser apresentados.

4.4.2.1 Edifício existente

A Tabela 25 apresenta os resultados de EI e CI do Edifício 4, considerando as quantidades necessárias para produção dos materiais, manutenção e desperdício. O total de energia e carbono incorporados por m² de área útil é de 8,7 GJ e 598 KgCO₂ respectivamente.

O Gráfico 27 apresenta a EII, EIR e EID dos materiais construtivos que compõem o edifício 4. Concreto, aço e tijolo correspondem a 55% do total de EI. A energia incorporada inicial (EII) participa de 67% do total de EI, a energia incorporada recorrente (EIR), necessária à manutenção e reposição dos materiais, representa 23%, e o desperdício, 10% do total de EI.

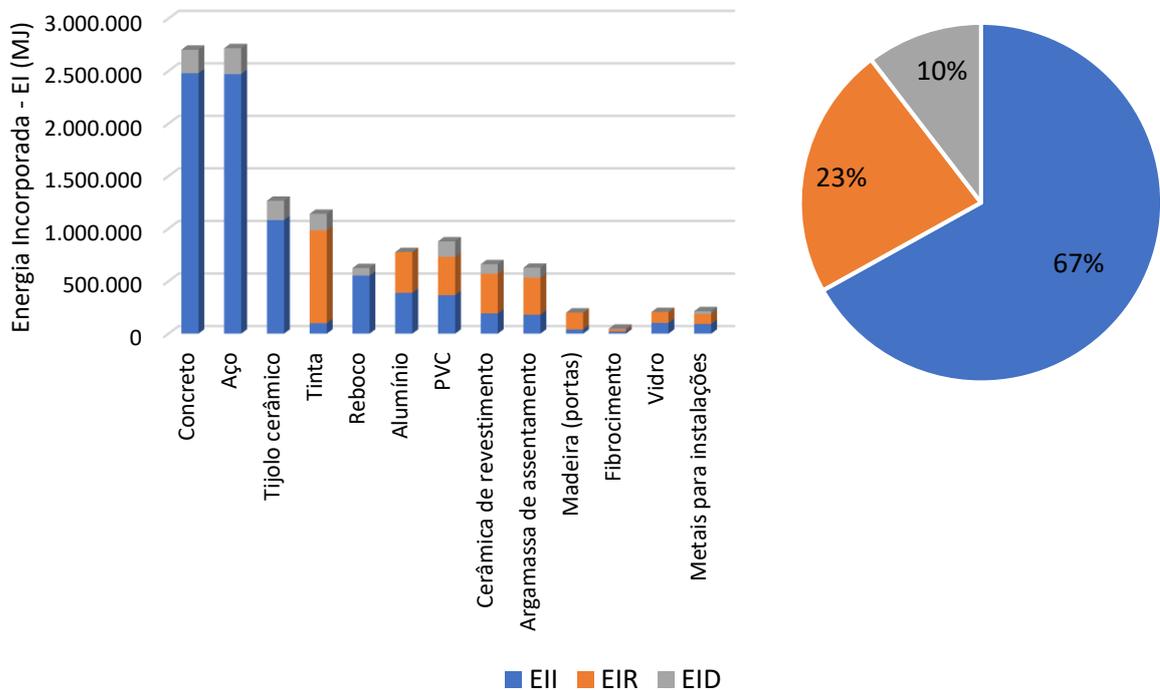
O Gráfico 28 apresenta o CII, CIR e CID dos materiais construtivos que compõem o edifício 4. Nota-se que o gráfico segue a mesma tendência do consumo de energia.

Tabela 25 – Energia Incorporada (MJ) e Carbono Incorporado (KgCO₂) do Edifício 4

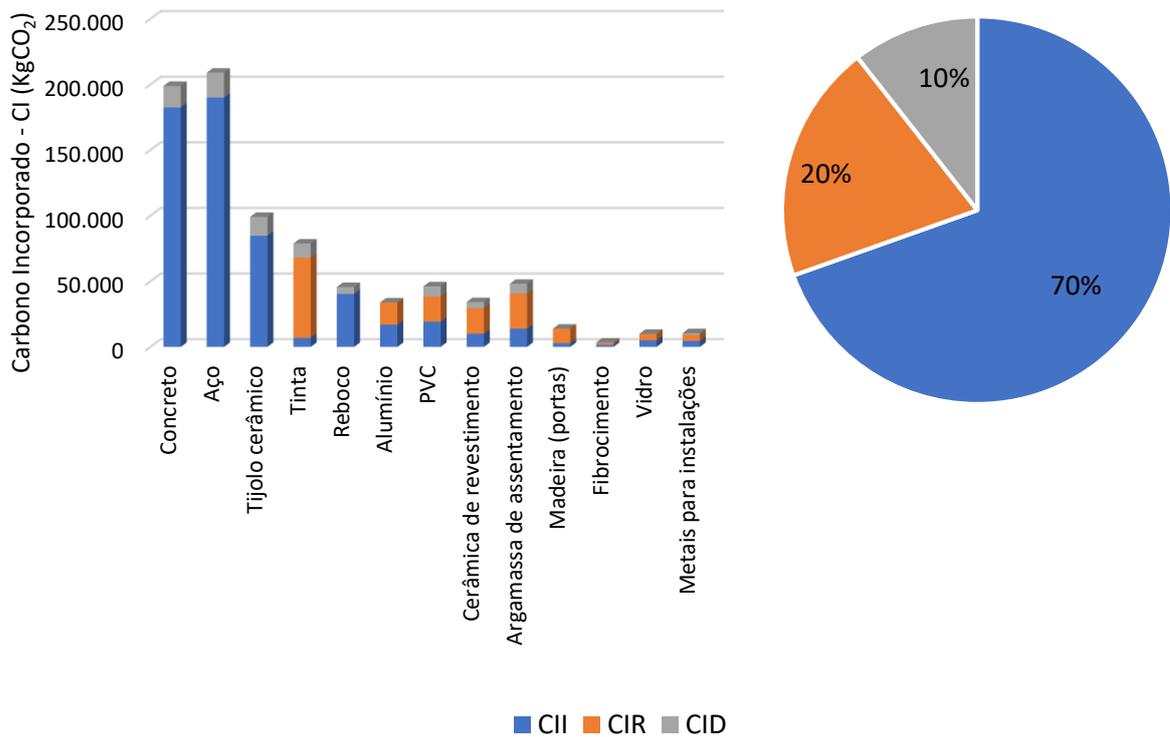
MATERIAL	ENERGIA INCORPORADA - EI (MJ)				CARBONO INCORPORADO - CI (KgCO ₂)			
	EII	EIR	EID	TOTAL	CII	CIR	CID	TOTAL
Concreto	2.478.991,08	-	223.109,20	2.702.100,27	182.451,26	-	16.420,61	198.871,88
Aço	2.470.368,50	-	247.036,85	2.717.405,35	190.013,33	-	19.001,33	209.014,67
Tijolo cerâmico	1.081.178,00	-	183.800,26	1.264.978,26	84.694,08	-	14.397,99	99.092,07
Tinta	99.507,46	883.763,35	157.323,33	1.140.594,14	6.875,86	61.067,10	10.870,87	78.813,83
Reboco	552.543,60	-	71.830,67	624.374,27	40.364,97	-	5.247,45	45.612,41
Alumínio	388.627,47	388.627,47	-	777.254,94	16.927,06	16.927,06	-	33.854,12
PVC	365.836,80	365.836,80	146.334,72	878.008,32	19.224,72	19.224,72	7.689,89	46.139,34
Cerâmica de revestimento	193.134,51	376.612,29	91.159,49	660.906,29	9.987,95	19.476,50	4.714,31	34.178,77
Argamassa de assentamento	180.359,55	351.701,12	95.770,92	627.831,59	13.817,71	26.944,53	7.337,20	48.099,43
Madeira (portas)	40.145,63	160.582,50	-	200.728,13	2.782,53	11.130,13	-	13.912,67
Fibrocimento	19.950,00	19.950,00	7.581,00	47.481,00	1.413,10	1.413,10	536,98	3.363,17
Vidro	103.137,50	103.137,50	-	206.275,00	4.972,26	4.972,26	-	9.944,52
Metais para instalações	93.106,43	93.106,43	27.445,75	213.658,61	4.580,90	4.580,90	1.288,93	10.450,74
TOTAL	8.066.886,52	2.743.317,47	1.251.392,19	12.061.596,18	578.105,74	165.736,30	87.505,57	831.347,61
TOTAL / m²	5.800,30	1.972,52	899,78	8.672,60	415,67	119,17	62,92	597,76

Nota: EII = Energia Incorporada Inicial; EIR = Energia Incorporada Recorrente; EID = Energia Incorporada Desperdiçada; CII = Carbono Incorporado Inicial; CIR = Carbono Incorporado Recorrente; CID = Carbono Incorporado Desperdiçado. Fonte: Elaborado pela autora

Gráfico 27 – EI (MJ) do Edifício 4



Nota: EII = Energia Incorporada Inicial; EIR = Energia Incorporada Recorrente; EID = Energia Incorporada Desperdiçada. Fonte: Elaborado pela autora

Gráfico 28 – CI (KgCO₂) do Edifício 4

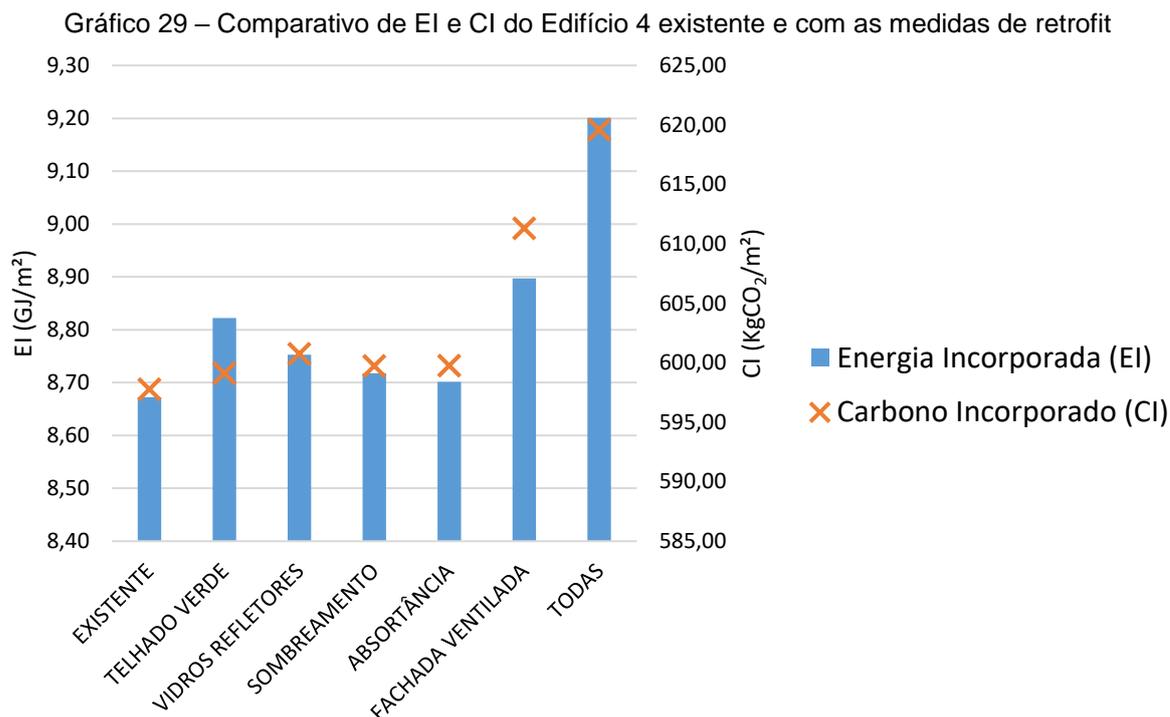
Nota: CII = Carbono Incorporado Inicial; CIR = Carbono Incorporado Recorrente; CID = Carbono Incorporado Desperdiçado. Fonte: Elaborado pela autora

4.4.2.2 Análises paramétricas com medidas de retrofit

O Gráfico 29 apresenta os valores de Energia Incorporada (EI) e Carbono Incorporado (CI) do Edifício 4 existente e após a adoção das medidas de retrofit. Todas as medidas proporcionaram um acréscimo na EI e CI.

As medidas que proporcionaram maior aumento na EI foram o telhado verde e a fachada ventilada. A primeira aumentou a EI em 1,7%, e a segunda em 2,6%. As medidas de proteção solar das aberturas, como os vidros refletores e o sombreamento com brises, bem como a redução da absorvância da envoltória, induziram a um aumento inferior a 1%.

Após a aplicação de todas as medidas de retrofit, o edifício 4 apresentou valores de EI e CI iguais a 9,2 GJ/m² e 619,6 KgCO₂/m² respectivamente. Esses valores representam um acréscimo de 6% na EI e 4% no CI.



Fonte: Elaborado pela autora

4.4.3 Energia Operacional (EO)

Os dados a seguir apresentam o consumo de Energia Operacional do edifício 4.

4.4.3.1 Edifício existente

A Tabela 26 apresenta os valores de consumo de energia na etapa de operação do edifício 4, separados por faixas de consumo e por categorias (equipamentos, aquecimento de água, iluminação, ar condicionado e cocção). O total de energia primária e emissões de CO₂ resultantes desse consumo é de 15 GJ/m² e 434 KgCO₂/m² respectivamente.

De acordo com o Gráfico 30, os equipamentos são responsáveis por 33% da energia consumida, seguida pela cocção e ar condicionado com 19%, aquecimento de água com 17% e iluminação 12%. Diferentemente dos edifícios anteriores, o ar condicionado no edifício 4 tem maior representatividade no consumo energético operacional, já que mais da metade das unidades habitacionais possuem pelo menos um aparelho de ar condicionado (ver Tabela 4 p. 81). Em termos de emissões de CO₂, o gás natural utilizado na cocção dos alimentos é responsável por 41% do total de

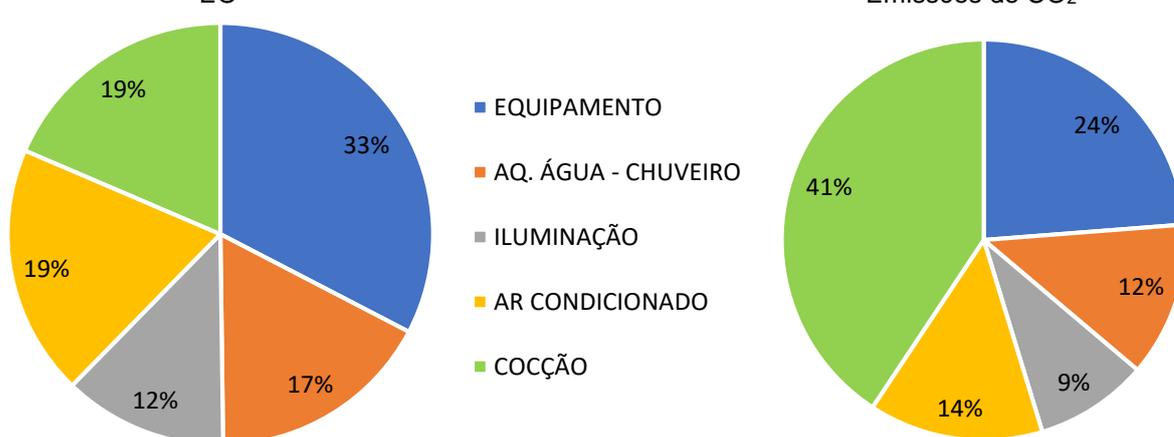
emissões, seguido dos equipamentos com 24%, ar condicionado 14%, aquecimentos de água 12% e iluminação 9%.

Tabela 26 – EO e emissões de carbono do Edifício 4

	EO POR FAIXAS DE CONSUMO (MJ)			EO (MJ)	EMIÇÃO DE CO ₂ (KgCO ₂)
	MÍNIMO	MÉDIO	MÁXIMO		
EQUIPAMENTO	2.568.991,33	1.752.492,67	2.429.695,18	6.751.179,19	143.462,56
AQ. ÁGUA - CHUVEIRO	1.231.718,40	1.077.753,60	1.231.718,40	3.541.190,40	75.250,30
ILUMINAÇÃO	897.806,59	785.580,77	897.806,59	2.581.193,95	54.850,37
AR CONDICIONADO	-	1.527.299,72	2.442.291,89	3.969.591,60	84.353,82
COCCÃO	1.331.624,45	1.165.171,39	1.331.624,45	3.828.420,29	245.784,58
TOTAL				20.671.575,43	603.701,63
TOTAL/m²				14.863,40	434,08

Fonte: Elaborado pela autora

Gráfico 30 – Participação das categorias de consumo de EO e emissões de CO₂ do Edifício 4

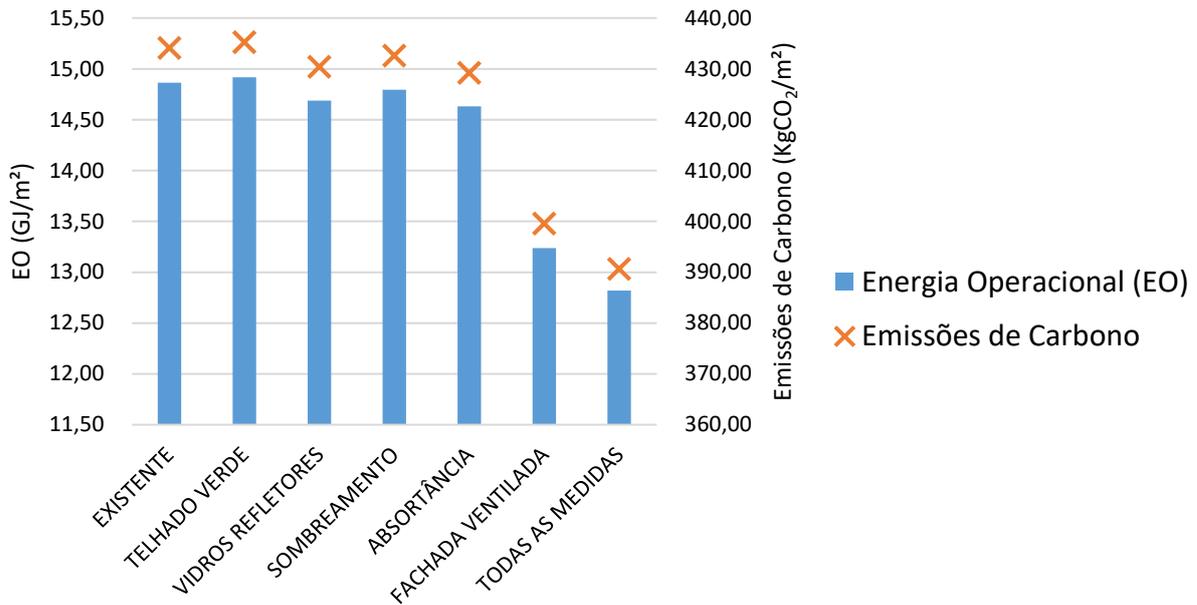


Fonte: Elaborado pela autora

4.4.3.2 Análises paramétricas com medidas de retrofit

O Gráfico 31 apresenta o comparativo de EO e emissões de CO₂ na etapa de operação. De maneira geral, todas as medidas proporcionaram redução no consumo, exceto o telhado verde, que aumentou a EO em 0,4%.

As medidas menos expressivas foram os vidros refletivos e o sombreamento das aberturas e a redução da absorvância. A fachada ventilada foi a medida mais eficiente, reduzindo a EO para 13,2 GJ/m². Após a aplicação de todas as medidas, a EO reduziu de 15 GJ/m² do edifício existente para 12,8 GJ/m² com todas as medidas de retrofit, uma redução de 14%.

Gráfico 31 – Comparativo de EO e emissões de CO₂ do edifício 4 existente e com as medidas de retrofit

Fonte: Elaborado pela autora

4.4.4 Energia no ciclo de vida

Os dados a seguir apresentam o consumo de no ciclo de vida do edifício 4.

4.4.4.1 Edifício existente

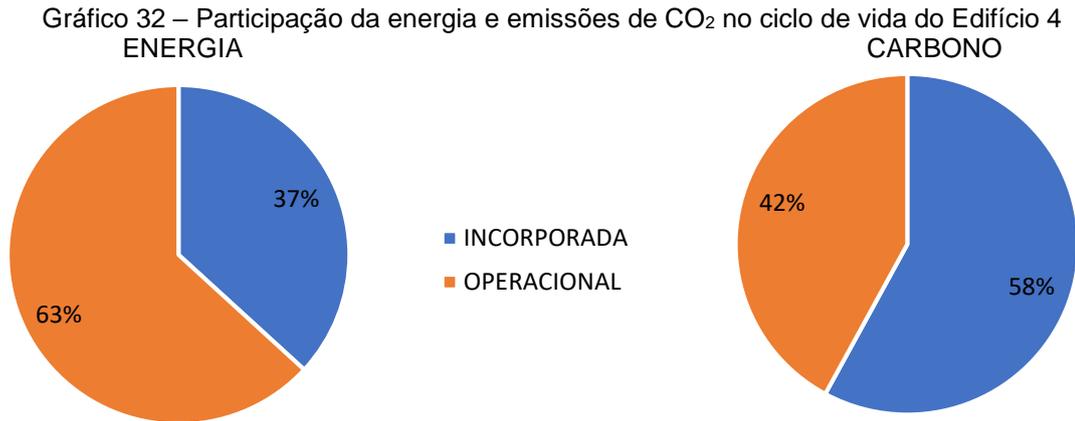
A Tabela 27 apresenta os valores do consumo de energia e emissões de carbono no ciclo de vida do edifício 4 existente, resultando um total de 23,5 GJ/m² e 1032 KgCO₂/m², respectivamente. O índice de emissões de carbono por unidade de energia consumida foi de 43,8 KgCO₂/GJ.

De acordo com o Gráfico 32, a energia operacional contribui com 63% do total de energia e 42% das de emissões de carbono no ciclo de vida.

Tabela 27 – Total de energia e emissões de carbono no ciclo de vida do Edifício 4

	ENERGIA		CARBONO	
	MJ	GJ/m ²	KgCO ₂	KgCO ₂ /m ²
INCORPORADA	12.061.596,18	8,67	831.347,61	597,76
OPERACIONAL	20.671.575,43	14,86	603.701,63	434,08
TOTAL	32.733.171,61	23,54	1.435.049,24	1031,84

Fonte: Elaborado pela autora



Fonte: Elaborado pela autora

4.4.4.2 Análises paramétricas com medidas de retrofit

A Tabela 28 apresenta os resultados da energia no ciclo de vida comparando o edifício existente e com as medidas de retrofit. Para todas as medidas, houve acréscimo na EI. No caso da EO, todas as medidas reduziram o consumo energético, exceto o telhado verde, que apresentou acréscimo de 0,4% da energia operacional, o que resultou um aumento de aproximadamente 1% no ciclo de vida da edificação.

Apesar de as demais medidas reduzirem o consumo energético no ciclo de vida, algumas apresentaram um período de amortização muito extenso, como o caso dos vidros refletores e sombreamento das aberturas, que foi de 23 anos e 33 anos respectivamente. A redução da absorvância e a fachada ventilada foram as medidas que mais contribuíram na redução do consumo energético no ciclo de vida, apresentando um período de amortização entre 6 e 7 anos. Após a aplicação de todas as medidas, a energia no ciclo de vida reduziu em 6,4%, com um período de amortização de 13 anos.

Tabela 28 – Comparativo da Energia no ciclo de vida do Edifício 4 existente e com as medidas de retrofit

	EDIFÍCIO EXISTENTE (GJ/m ²)	TELHADO VERDE	VIDROS REFLETORES	SOMBREAMENTO	ABSORVÂNCIA	FACHADA VENTILADA	TODAS AS MEDIDAS
ENERGIA INCORPORADA (EI)	8,67	▲ 1,7%	▲ 0,9%	▲ 0,5%	▲ 0,3%	▲ 2,6%	▲ 6,1%
ENERGIA OPERACIONAL (EO)	14,86	▲ 0,4%	▼ -1,2%	▼ -0,5%	▼ -1,6%	▼ -10,9%	▼ -13,8%
ENERGIA NO CICLO DE VIDA	23,54	▲ 0,9%	▼ -0,4%	▼ -0,1%	▼ -0,9%	▼ -6,0%	▼ -6,4%
PERÍODO DE AMORTIZAÇÃO (ANOS)	–	–	22,94	32,51	6,28	6,91	12,93

Fonte: Elaborado pela autora

4.5 EDIFÍCIO 5 – 17 PAVIMENTOS COM VARANDA + 1 COBERTURA DUPLEX

Apresenta-se, a seguir, os dados referentes ao edifício 5, como desempenho da envoltória e energias.

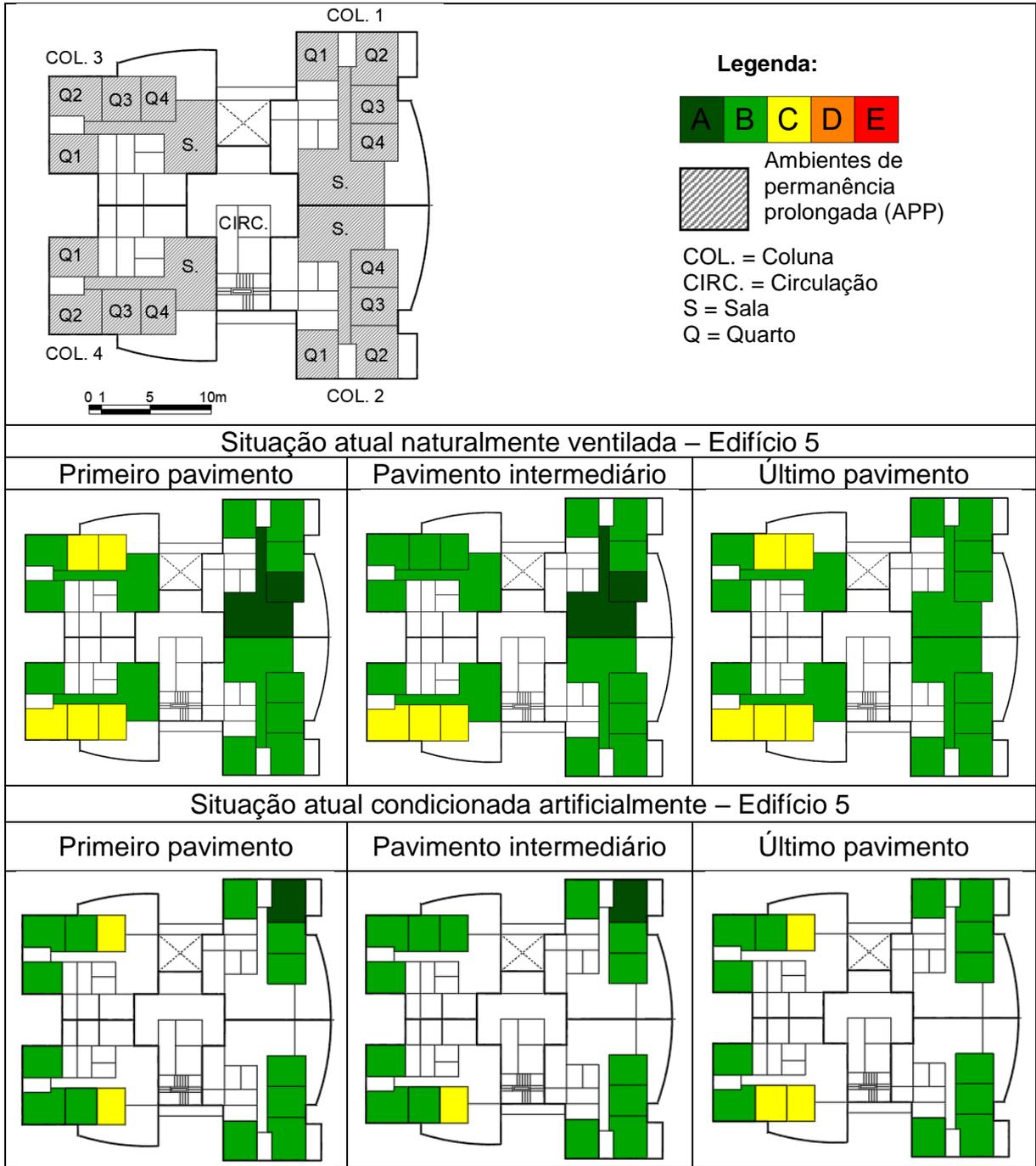
4.5.1 Desempenho da envoltória segundo o PBE Edifica

Em relação ao desempenho da envoltória, consideramos os padrões estabelecidos pelo PBE Edifica, conforme dados a ser apresentados.

4.5.1.1 Edifício existente

A Figura 22 apresenta o resultado do desempenho da envoltória segundo os padrões estabelecidos pelo PBE Edifica. Grande parte dos ambientes de permanência prolongada (APP) enquadram-se no nível B de desempenho. Os ambientes com melhor desempenho são os da coluna 1 do primeiro pavimento, pois estão voltados para o sentido sul e leste. Alguns ambientes atingiram nível A de desempenho nas duas situações simuladas. Na coluna 4, cujos ambientes estão voltados para o sentido norte e oeste, a maioria dos ambientes enquadram-se no nível C de desempenho. De maneira geral, os ambientes da cobertura apresentam níveis de desempenho inferiores aos demais pavimentos simulados.

Figura 22 - Desempenho da envoltória segundo o PBE Edifica do Edifício 5 nas situações naturalmente ventilada e condicionada artificialmente

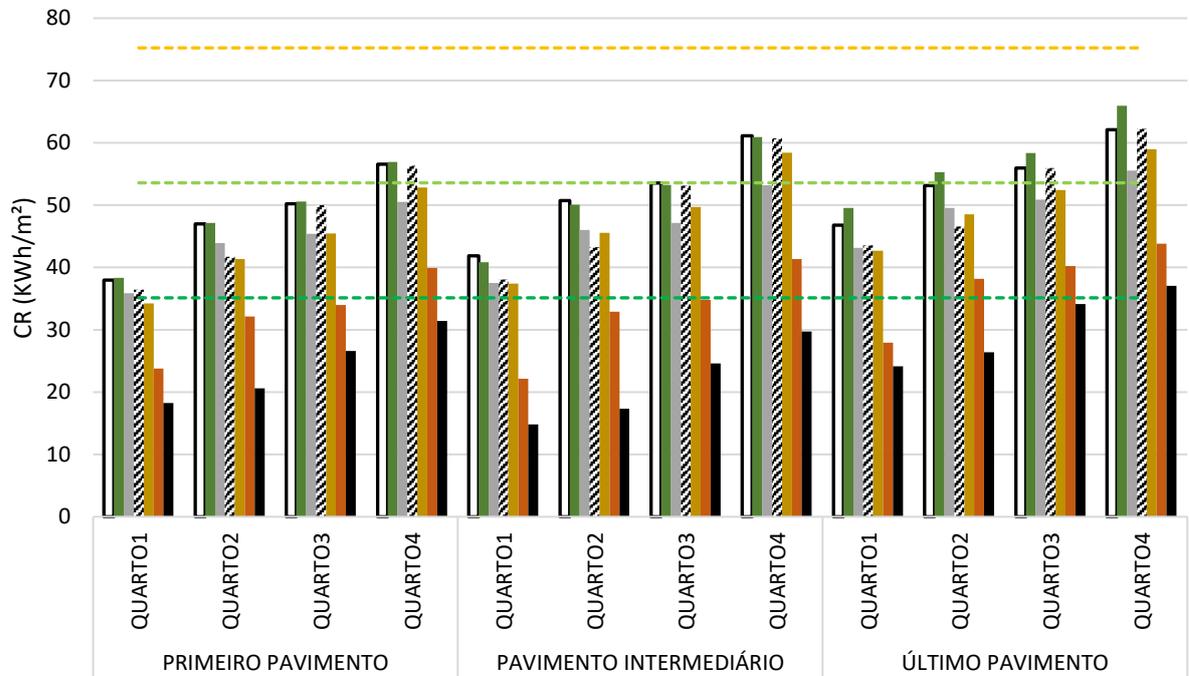
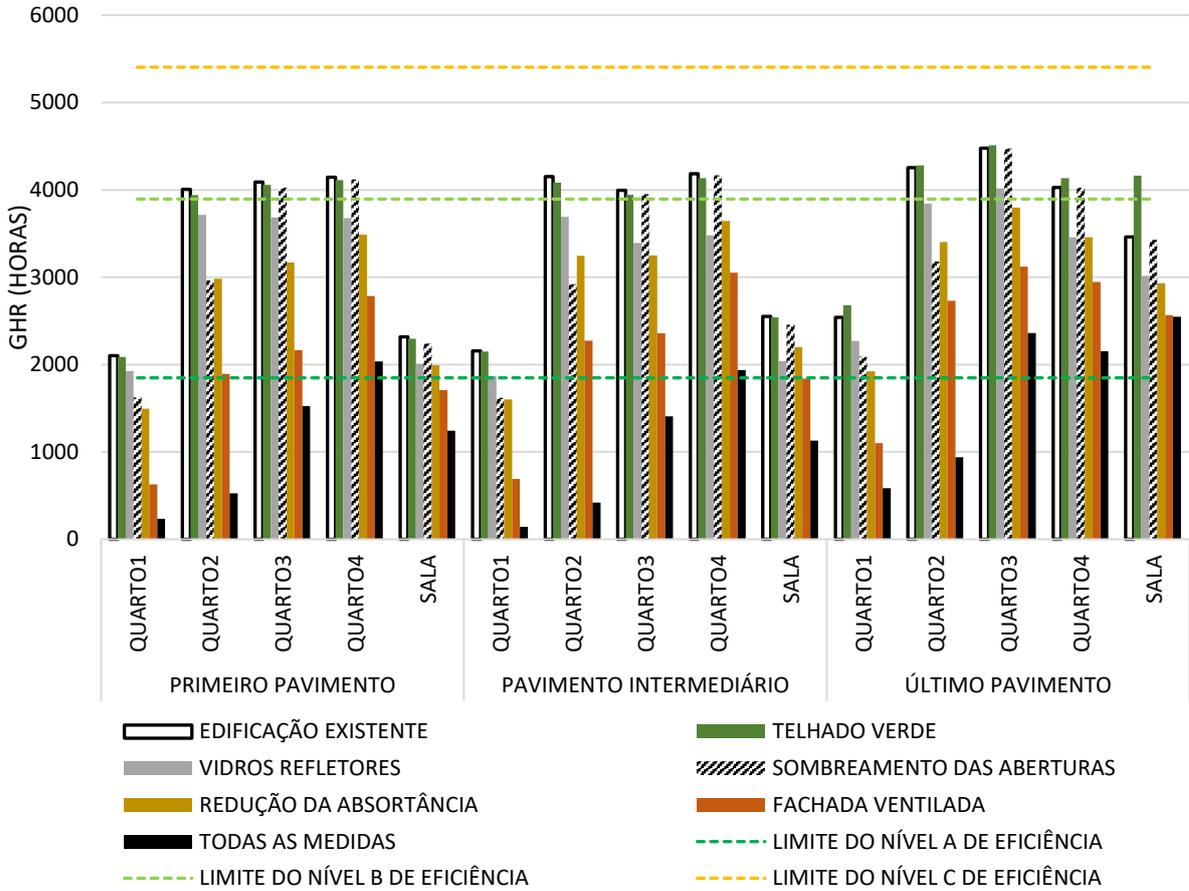


Fonte: Elaborado pela autora

4.5.1.2 Análises paramétricas com medidas de retrofit

O Gráfico 33 apresenta os resultados do GHR e do CR da coluna 4, que obteve o pior desempenho na situação naturalmente ventilada.

Gráfico 33 – Comparativo de GHR e CR da coluna 4 do Edifício 5 existente e com as medidas de retrofit



Fonte: Elaborado pela autora

Tanto na situação naturalmente ventilada quanto na artificialmente condicionada, o telhado verde e o sombreamento das aberturas foram as medidas que menos surtiram efeito no desempenho dos ambientes analisados. Além disso, o telhado verde aumentou a quantidade de GHR e CR nos APP do último pavimento. Devido à extensa varanda que compõe a edificação, a instalação de brises não foi necessária em grande parte das aberturas, o que reduziu a sua influência no desempenho do edifício.

Por conter aberturas com grandes áreas, a adoção de película refletora se mostrou uma medida eficaz na melhoria do desempenho, assim como a redução da absorvância da envoltória. Entretanto, a medida mais eficiente na redução do GHR e do CR foi a fachada ventilada. Após a adoção de todas as medidas de retrofit, todas as zonas obtiveram nível A de desempenho para a situação artificialmente ventilada. Para a situação em que o edifício é naturalmente ventilado, a maioria das zonas atingiu nível A. A exceção foi para o quarto 4 em todos os andares e os ambientes do último pavimento, que atingiram nível B de desempenho.

4.5.2 Energia Incorporada (EI)

Em relação à Energia Incorporada (EI) do edifício 5, foram consideradas as quantidades necessárias, conforme dados a ser apresentados.

4.5.2.1 Edifício existente

A Tabela 29 apresenta os resultados de EI e CI do Edifício 5, considerando as quantidades necessárias para produção dos materiais, manutenção e desperdício. O total de energia e carbono incorporado por m² de área útil é de 9,0 GJ e 605,2 KgCO₂, respectivamente.

O Gráfico 34 apresenta a EII, EIR e EID dos materiais construtivos que compõem o edifício 5. Concreto, aço e tijolo correspondem a 49% do total de EI. A energia incorporada inicial (EII) participa de 63% do total de EI, a energia incorporada recorrente (EIR), necessária à manutenção e à reposição dos materiais, representa 27%; e o desperdício, 10% do total de EI. Destaca-se no gráfico a quantidade

significativa de energia necessária para o material alumínio, utilizada principalmente nas esquadrias e venezianas.

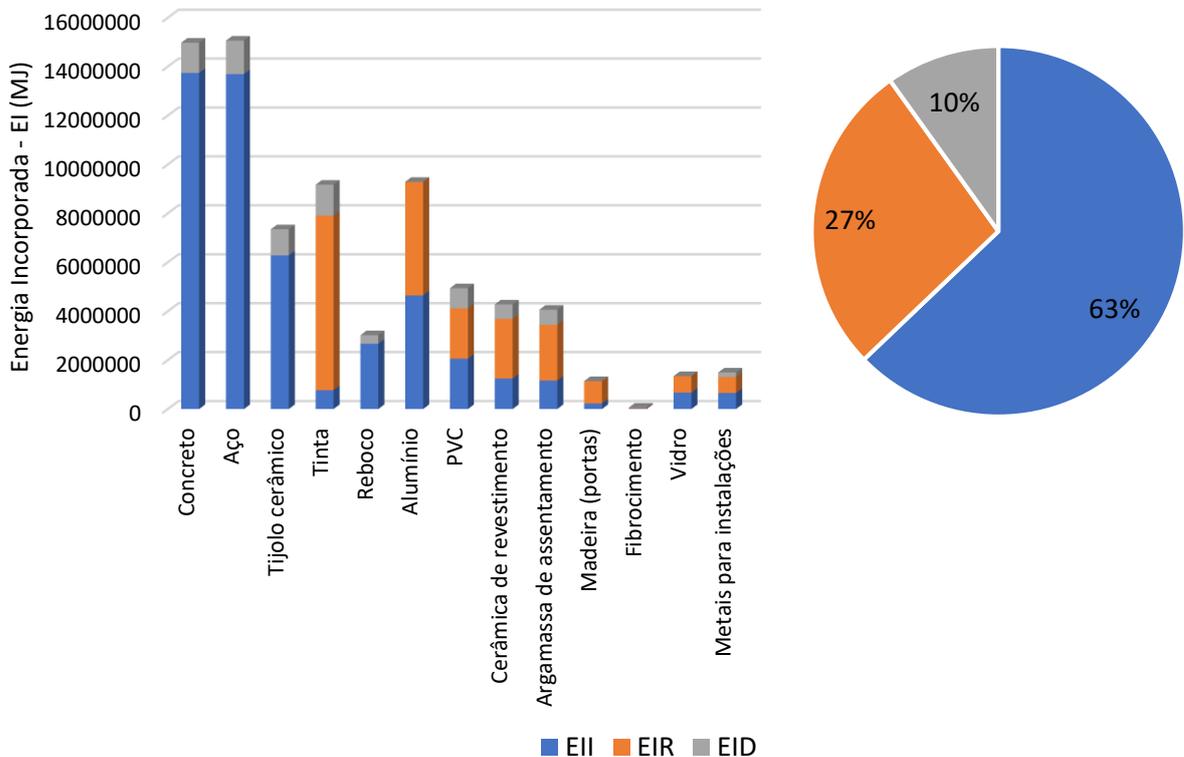
O Gráfico 35 apresenta o CII, CIR e CID dos materiais construtivos que compõem o edifício 5. Nota-se que o gráfico segue a mesma tendência do consumo de energia.

Tabela 29 – Energia Incorporada (MJ) e Carbono Incorporado (KgCO₂) do Edifício 5

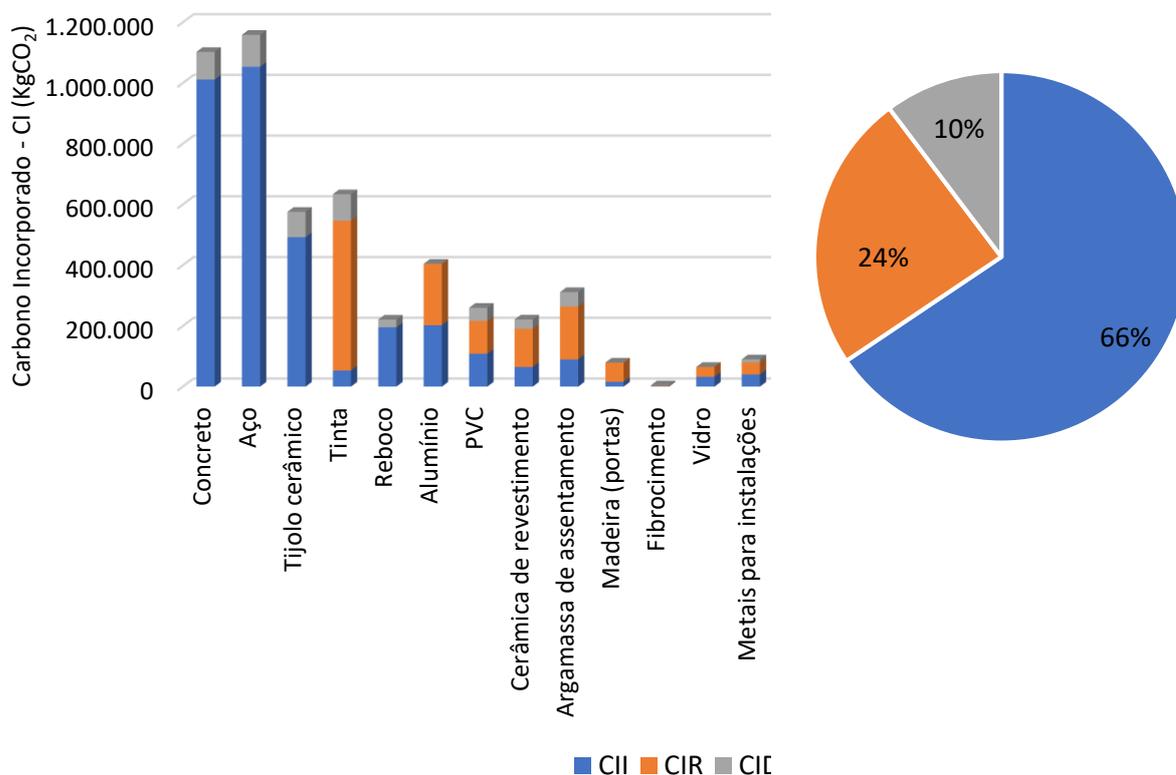
MATERIAL	ENERGIA INCORPORADA (MJ)				CARBONO INCORPORADO - CI (KgCO ₂)			
	EII	EIR	EID	TOTAL	CII	CIR	CID	TOTAL
Concreto	13.741.247,00	-	1.236.712,23	14.977.959,23	1.011.342,04	-	91.020,78	1.102.362,82
Aço	13.693.451,35	-	1.369.345,14	15.062.796,49	1.053.259,20	-	105.325,92	1.158.585,12
Tijolo cerâmico	6.280.941,80	-	1.067.760,11	7.348.701,91	492.017,58	-	83.642,99	575.660,56
Tinta	768.649,03	7.138.827,85	1.265.196,30	9.172.673,17	53.112,82	493.285,32	87.423,70	633.821,84
Reboco	2.672.342,40	-	347.404,51	3.019.746,91	195.222,63	-	25.378,94	220.601,57
Alumínio	4.643.730,00	4.643.730,00	-	9.287.460,00	202.262,30	202.262,30	-	404.524,61
PVC	2.058.894,90	2.058.894,90	823.557,96	4.941.347,75	108.194,93	108.194,93	43.277,97	259.667,82
Cerâmica de revestimento	1.249.550,27	2.436.623,03	589.787,73	4.275.961,03	64.620,49	126.009,96	30.500,87	221.131,32
Argamassa de assentamento	1.166.898,26	2.275.451,61	619.622,98	4.061.972,85	89.398,41	174.326,90	47.470,56	311.195,86
Madeira (portas)	228.198,75	912.795,00	-	1.140.993,75	15.816,68	63.266,73	-	79.083,42
Fibrocimento	25.422,00	25.422,00	9.660,36	60.504,36	1.800,69	1.800,69	684,26	4.285,64
Vidro	673.400,00	673.400,00	-	1.346.800,00	32.464,61	32.464,61	-	64.929,23
Metais para instalações	657.165,80	657.165,80	181.232,90	1.495.564,51	39.847,44	39.847,44	10.073,03	89.767,91
TOTAL	47.859.891,56	20.822.310,19	7.510.280,21	76.192.481,96	3.359.359,82	1.241.458,88	524.799,02	5.125.617,73
TOTAL / m²	5.650,71	2.458,44	886,72	8.995,87	396,63	146,58	61,96	605,17

Nota: EII = Energia Incorporada Inicial; EIR = Energia Incorporada Recorrente; EID = Energia Incorporada Desperdiçada; CII = Carbono Incorporado Inicial; CIR = Carbono Incorporado Recorrente; CID = Carbono Incorporado Desperdiçado. Fonte: Elaborado pela autora

Gráfico 34 – EI (MJ) do Edifício 5



Nota: EII = Energia Incorporada Inicial; EIR = Energia Incorporada Recorrente; EID = Energia Incorporada Desperdiçada. Fonte: Elaborado pela autora

Gráfico 35 – CI (KgCO₂) do Edifício 5

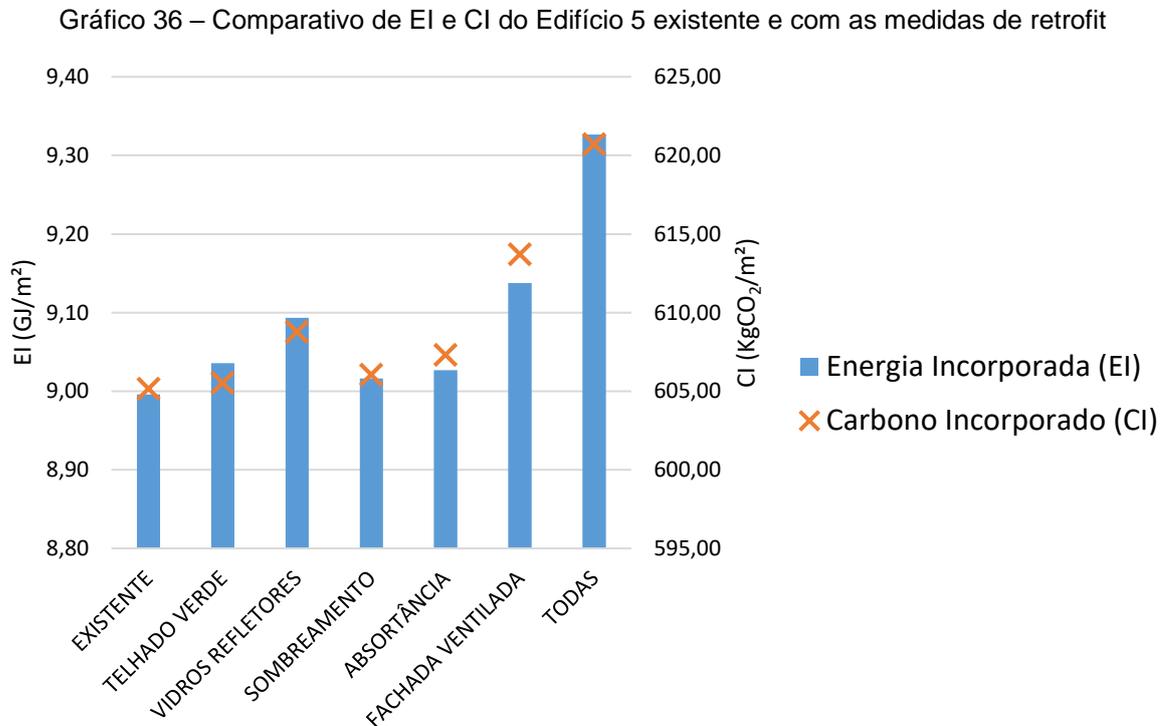
Nota: CII = Carbono Incorporado Inicial; CIR = Carbono Incorporado Recorrente; CID = Carbono Incorporado Desperdiçado. Fonte: Elaborado pela autora

4.5.2.2 Análises paramétricas com medidas de retrofit

O Gráfico 36 apresenta os valores de Energia Incorporada (EI) e Carbono Incorporado (CI) do Edifício 5 existente e após a adoção das medidas de retrofit. Todas as medidas proporcionaram um acréscimo na EI e CI. As medidas que proporcionaram maior aumento na EI foram a instalação de películas refletoras nos vidros e a fachada ventilada. A primeira aumentou a EI em 1,1%, e a segunda em 1,6%.

As medidas que menos agregaram energia ao edifício foram o telhado verde, o sombreamento das aberturas e a absorvência. Isso se deve ao volume reduzido de material necessário à implementação dessas medidas. Com relação ao telhado verde, por ser um edifício com muitos pavimentos, o volume de material por m² de área útil é reduzido. Quanto ao sombreamento das aberturas, grande parte delas é sombreada pelas varandas, o que torna a instalação dos brises desnecessária.

Após a aplicação de todas as medidas de retrofit, o edifício 5 apresentou valores de EI e CI iguais a 9,3 GJ/m² e 620,7 KgCO₂/m², respectivamente. Esses valores representam um acréscimo de 4% na EI e 3% no CI.



Fonte: Elaborado pela autora

4.5.3 Energia Operacional (EO)

Os dados a seguir apresentam o consumo de Energia Operacional do edifício 5.

4.5.3.1 Edifício existente

A Tabela 30 apresenta os valores de consumo de energia na etapa de operação do edifício 5, separados por faixas de consumo e por categorias (equipamentos, aquecimento de água, iluminação, ar condicionado e cocção). O total de energia primária e emissões de CO₂ resultantes desse consumo é de 10,7 GJ/m² e 333,3 KgCO₂/m² respectivamente.

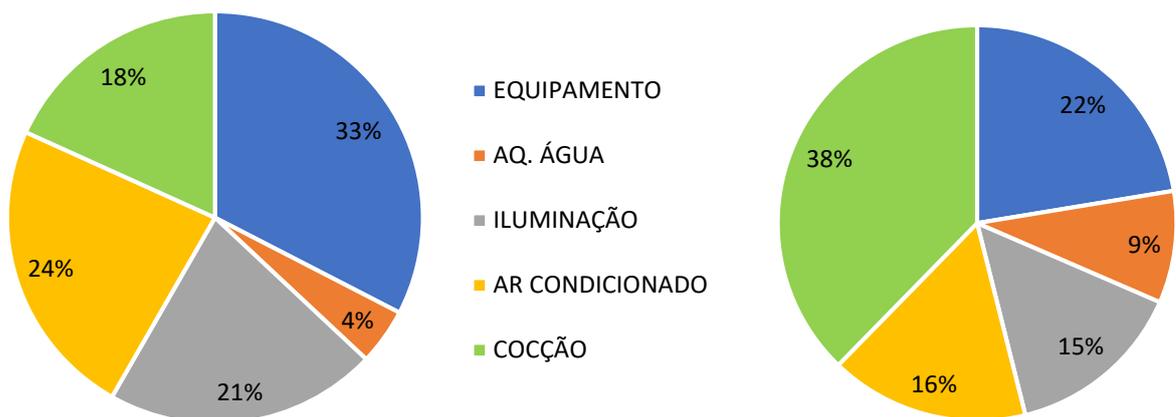
De acordo com o Gráfico 37, os equipamentos são responsáveis por 33% da energia consumida; seguidos pelo ar condicionado, com 24%; pela iluminação, com

21%; pela cocção, com 18%; e pelo aquecimento de água, com 4%. Em processos similar ao do edifício 4, o ar condicionado possui maior representatividade no consumo energético operacional, já que mais da metade das unidades habitacionais possuem pelo menos um aparelho de ar condicionado (ver Tabela 4). Diferentemente dos demais edifícios, a energia necessária ao aquecimento da água é a menos representativa no total da EO. Isso se deve à utilização de aquecedor de água a gás do tipo instantâneo. Quanto às emissões de CO₂, o gás natural utilizado na cocção dos alimentos é responsável por 38% do total de emissões; seguido dos equipamentos, com 22%; do ar condicionado, com 16%; da iluminação, com 15%; e dos aquecimentos de água, com 9%.

Tabela 30 – EO e emissões de carbono do Edifício 5

	EO POR FAIXAS DE CONSUMO (MJ)			EO (MJ)	EMIÇÃO DE CO ₂ (KgCO ₂)
	MÍNIMO	MÉDIO	MÁXIMO		
EQUIPAMENTO	8.777.387,06	4.756.765,82	16.197.967,87	29.732.120,76	631.807,57
AQ. ÁGUA	1.104.697,44	767.899,44	2.155.507,20	4.028.104,08	258.604,28
ILUMINAÇÃO	5.304.339,24	3.687.162,64	10.349.930,22	19.341.432,09	411.005,43
AR CONDICIONADO	-	4.355.780,68	17.107.490,93	21.463.271,62	456.094,52
COCÇÃO	4.549.716,86	3.162.608,06	8.877.496,32	16.589.821,25	1.065.066,52
TOTAL				91.154.749,79	2.822.578,33
TOTAL/m²				10.762,43	333,26

Fonte: Elaborado pela autora

Gráfico 37 – Participação das categorias de consumo de EO e emissões de CO₂ do Edifício 5

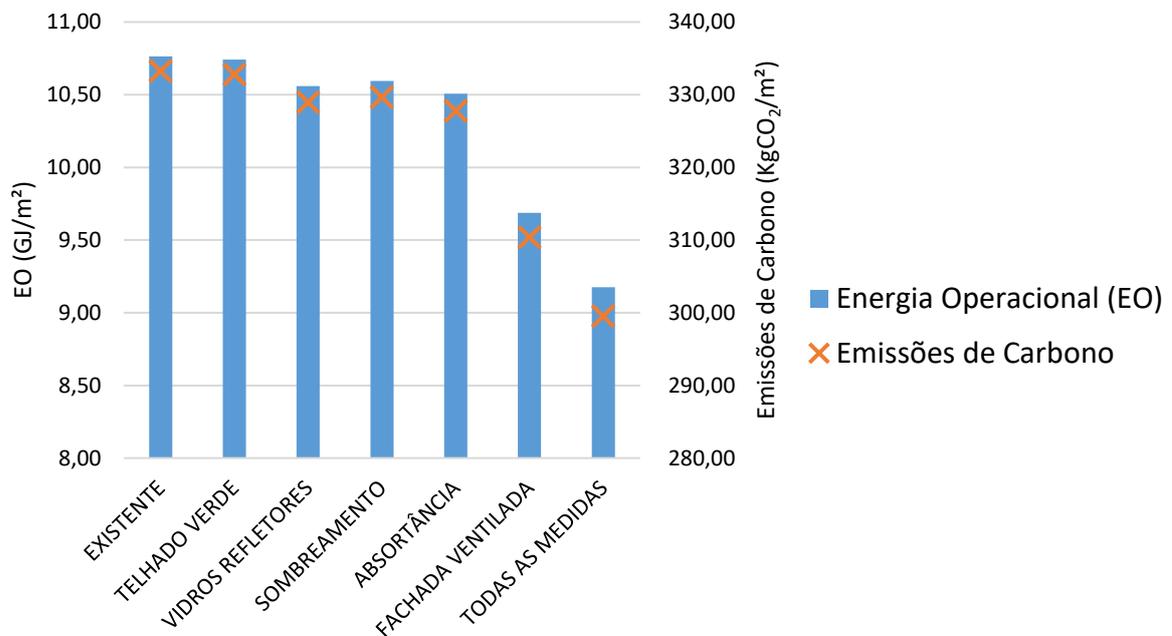
Fonte: Elaborado pela autora

4.5.3.2 Análises paramétricas com medidas de retrofit

O Gráfico 38 apresenta o comparativo de EO e emissões de CO₂ na etapa de operação. De maneira geral, todas as medidas proporcionaram redução no consumo de EO. As medidas menos expressivas foram o telhado verde, os vidros refletores e o sombreamento das aberturas.

A fachada ventilada foi a medida mais eficiente, reduzindo a EO para 9,7 GJ/m². Após a aplicação de todas as medidas, a EO reduziu de 11 GJ/m² do edifício existente para 9 GJ/m² com todas as medidas de retrofit, uma redução de 15%.

Gráfico 38 – Comparativo de EO e emissões de CO₂ do edifício 5 existente e com as medidas de retrofit



Fonte: Elaborado pela autora

4.5.4 Energia no ciclo de vida

Os dados a seguir apresentam o consumo de no ciclo de vida do edifício 5.

4.5.4.1 Edifício existente

A Tabela 31 apresenta os valores do consumo de energia e emissões de carbono no ciclo de vida do edifício 5 existente, resultando um total de 20 GJ/m² e 938

KgCO₂/m² respectivamente. O índice de emissões de carbono por unidade de energia consumida foi de 47,5 KgCO₂/GJ.

De acordo com o Gráfico 39, a energia operacional contribui com 54% do total de energia e 36% das de emissões de carbono no ciclo de vida.

Tabela 31 – Total de energia e emissões de carbono no ciclo de vida do Edifício 5

	ENERGIA		CARBONO	
	MJ	GJ/m ²	KgCO ₂	KgCO ₂ /m ²
INCORPORADA	76.192.481,96	9,00	5.125.617,73	605,17
OPERACIONAL	91.154.749,79	10,76	2.822.578,33	333,26
TOTAL	167.347.231,75	19,76	7.948.196,06	938,42

Fonte: Elaborado pela autora

Gráfico 39 – Participação da energia e emissões de CO₂ no ciclo de vida do Edifício 5



Fonte: Elaborado pela autora

4.5.4.2 Análises paramétricas com medidas de retrofit

A Tabela 32 apresenta os resultados da energia no ciclo de vida comparando o edifício existente e com as medidas de retrofit. Para todas as medidas, houve acréscimo na EI e redução da EO. O telhado verde foi a única medida que não reduziu o consumo energético no ciclo de vida.

Apesar de as demais medidas reduzirem o consumo energético no ciclo de vida, a instalação de películas refletoras nos vidros apresentou um período de amortização muito extenso, equivalente a 24 anos. A redução da absorvância e a fachada ventilada foram as medidas que mais contribuíram na redução do consumo energético no ciclo de vida, apresentando um período de amortização entre 6 e 7 anos.

Após a aplicação de todas as medidas, a energia no ciclo de vida reduziu em 6,4%, com um período de amortização de 10 anos.

Tabela 32 – Comparativo da Energia no ciclo de vida do Edifício 5 existente e com as medidas de retrofit

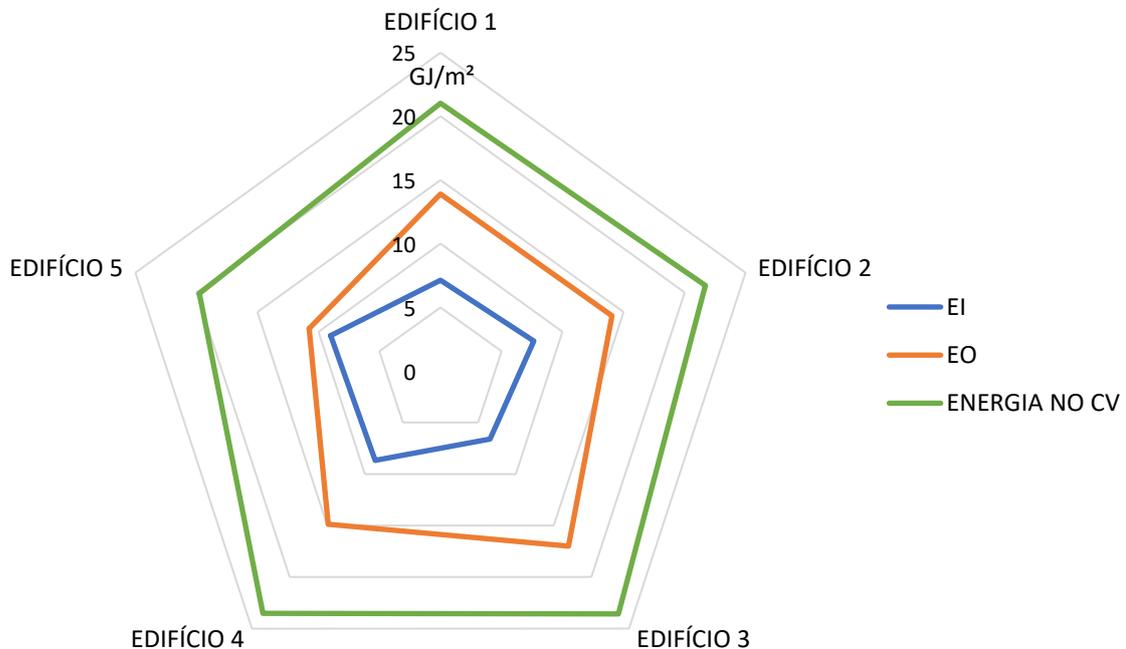
	EDIFÍCIO EXISTENTE (GJ/m ²)	TELHADO VERDE	VIDROS REFLETORES	SOMBREAMENTO	ABSORTÂNCIA	FACHADA VENTILADA	TODAS AS MEDIDAS
ENERGIA INCORPORADA (EI)	9,00	▲ 0,4%	▲ 1,1%	▲ 0,2%	▲ 0,3%	▲ 1,6%	▲ 3,7%
ENERGIA OPERACIONAL (EO)	10,76	▼ -0,2%	▼ -1,9%	▼ -1,6%	▼ -2,4%	▼ -10,0%	▼ -14,7%
ENERGIA NO CICLO DE VIDA	19,76	▲ 0,1%	▼ -0,5%	▼ -0,7%	▼ -1,1%	▼ -4,7%	▼ -6,4%
PERÍODO DE AMORTIZAÇÃO (ANOS)	–	–	24,05	6,11	6,05	6,60	10,42

Fonte: Elaborado pela autora

4.6 COMPARATIVO DE TODAS AS EDIFICAÇÕES

O Gráfico 40 apresenta o comparativo dos valores de EI, EO e energia no ciclo de vida dos edifícios existentes.

Gráfico 40 – Comparativo da EI, EO e Energia no ciclo de vida dos edifícios existentes



Fonte: Elaborado pela autora

Quanto aos edifícios existentes, nota-se que os edifícios 4 e 5 apresentam os maiores valores de energia incorporada. Por serem construções mais novas, ambos os edifícios apresentam um volume elevado de materiais com alto valor unitários de energia incorporada, como vidro e alumínio. Esses edifícios também possuem um volume maior de materiais para instalações, como tubos de PVC e materiais para instalação de aparelhos de ar condicionado do tipo split.

Para todos os edifícios, a estrutura, composta basicamente por aço e concreto, foi a que obteve maior representatividade no total de EI e CI. Ou seja, uma forma eficaz de reduzir os impactos ambientais provenientes do consumo energético dos edifícios, é buscar alternativas de estruturas mais leves, que demandem menos recursos. Os materiais que mais obtiveram variação no total de EI foram o tijolo cerâmico, materiais para instalação e o alumínio. O tijolo cerâmico variou de acordo com a área das unidades habitacionais. Nesse caso, quanto menor a área das UH, maior foi a representatividade do tijolo no total de EI. A média dos valores de EI e CI dos edifícios existentes analisados foi de 7,8 GJ/m² e 535,3 Kg de CO₂/m², respectivamente.

Quanto à energia operacional dos edifícios existentes, o edifício 3 foi o que apresentou o maior consumo por m² de área útil. Entre todos os edifícios analisados, o edifício 3 é o que apresenta unidades habitacionais com a menor área útil, e que, portanto, comporta mais unidades habitacionais (UH) e pessoas por m². Como grande parte do consumo de EO foi baseado na quantidade de UH e pessoas, o Edifício 3 apresentou valores elevados de EO/m². A mesma lógica se aplica ao Edifício 5, que, por ser composto por UH com elevada área útil, apresentou os menores valores de consumo de energia operacional por m².

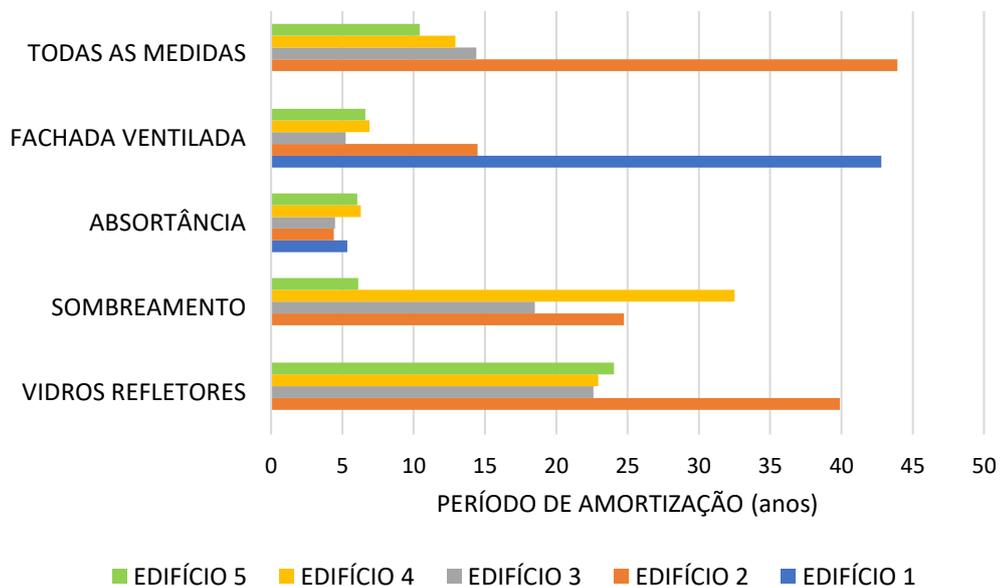
Quanto às categorias de consumo, o equipamento foi o que liderou a demanda de energia operacional em todos os edifícios, representando entre 33% e 41% do total. Quanto às emissões de CO₂ durante o uso/operação, todos os edifícios apresentaram a cocção como principal categoria, representando entre 38% e 46% do total. Isso se deve à utilização do gás como fonte energética, cujo índice de produção de CO₂ por unidade de energia é maior do que a eletricidade (ver Tabela 7). A iluminação e o ar condicionado variaram de acordo com a área útil das unidades habitacionais, ou seja, quanto maior a UH, maior a demanda energética dessas categorias de consumo. A

média dos valores de EO e emissões de CO₂ dos edifícios existentes analisados foi de 14,1 GJ/m² e 426,1 Kg de CO₂/m² respectivamente.

No que diz respeito à energia no ciclo de vida, o valor por m² mais elevado foi do edifício 3, e o mais baixo foi do edifício 5. Essa diferença se deu principalmente pelo valor da energia operacional, que seguiu a mesma tendência. A média dos valores de consumo energético e emissões de carbono no ciclo de vida dos edifícios existentes analisados foi de 21,9 GJ/m² e 961,4 KgCO₂/m², respectivamente. Acerca das emissões de carbono por unidade de energia consumida, a quantidade média equivale a 44 Kg CO₂/GJ. O edifício 5 apresentou o maior valor, devido à utilização de gás para aquecimento de água.

De acordo com o Gráfico 41, as medidas de retrofit foram analisadas a partir do período de amortização, ou seja, o tempo de operação necessário para compensar o acréscimo de energia incorporada pelo retrofit.

Gráfico 41 – Período de amortização das medidas de retrofit de todos os edifícios analisados



Nota: O telhado verde não apresentou período de amortização para nenhum edifício. O edifício 1 apresentou período de amortização apenas para a fachada ventilada e redução da absortância.

Fonte: Elaborado pela autora.

O telhado verde não apresentou período de amortização, já que em todos os edifícios essa proposta aumentou a energia no ciclo de vida. Esse aumento chegou a 2% nos edifícios 1 e 2, e menor que 1% nos demais edifícios. A adoção de películas refletoras nos vidros apresentou um aumento da energia no ciclo de vida para o edifício 1. Para os demais edifícios, o período de amortização foi muito extenso, de 40

anos para o edifício 2 e entre 20 e 25 anos para os demais edifícios. De modo geral, observou-se que essa medida não é viável para edifícios horizontalizados.

Ao sombrear as aberturas, o período de amortização se mostrou razoável apenas para o edifício 5, que quase não necessitou de brises, já que grande parte das aberturas já era sombreada pelas varandas. O edifício 4, mesmo necessitando de menos brises devido à sua varanda grande, apresentou um período de amortização maior do que o edifício 3, que possui varanda pequena. Ambos são representativos da mesma tipologia, diferenciando apenas no tamanho das varandas. Observa-se, portanto, que não houve relação direta entre o tamanho das varandas e o período de amortização da medida relacionada o sombreamento das aberturas. O que ocorre é que, quando há varandas, minimiza-se a necessidade de instalação de brises.

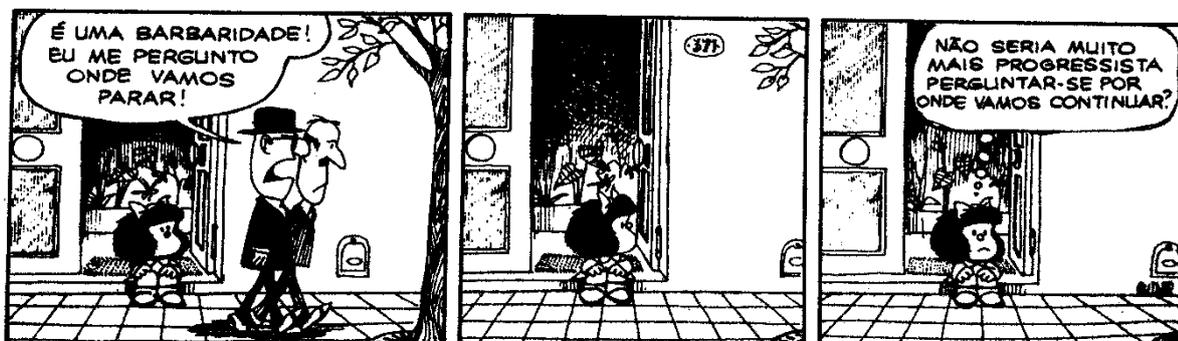
Em relação à redução da absorvância, houve um equilíbrio maior do período de amortização entre as edificações, com um tempo de retorno entre 4 e 6 anos. Uma das razões é o baixo valor de energia incorporada que essa medida agrega, e a sua eficácia na melhoria do desempenho. Dessa forma, a pintura da envoltória com cores claras é uma medida viável para todas as tipologias de edifícios residenciais simuladas neste estudo.

No caso da instalação da fachada ventilada, tal solução se mostrou inviável para o edifício 1, com período de amortização superior a 40 anos. No entanto, para o edifício 2, o período de amortização foi inferior a 15 anos, e para os edifícios 3, 4 e 5 ficou entre 5 e 7 anos. A fachada ventilada, apesar de agregar um valor elevado de EI, foi uma das medidas que mais impactou na melhoria do desempenho da edificação. Entretanto, para o Edifício 1, a redução da EO foi quase equivalente à energia que foi incorporada pela instalação da fachada ventilada. Um dos motivos é que o edifício 1 tem um consumo baixo de ar condicionado e, como o efeito do retrofit infere apenas no consumo dessa categoria, o edifício 1 foi o que menos se beneficiou com essa medida.

Ao aplicar todas as medidas, os edifícios tiveram comportamento similar à fachada ventilada. Tal situação não se mostrou eficaz na redução da energia no ciclo de vida para o edifício 1. No edifício 2, houve redução, porém, com um período de amortização muito extenso. Nos demais edifícios, o tempo de operação necessário para compensar o acréscimo de energia incorporada de todas as medidas de retrofit foi inferior a 15 anos.

Seção 5

Conclusões e recomendações finais



5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES FINAIS

A pesquisa apresentou os resultados da ACVE e do desempenho da envoltória de 5 edifícios existentes típicos do Bairro Jardim Camburi, em Vitória (ES). O objetivo principal foi avaliar a influência de medidas de retrofit em edifícios existentes típicos de um bairro, tanto no desempenho da envoltória segundo o PBE Edifica quanto no ciclo de vida energético das edificações, visando à sustentabilidade ambiental.

5.1 CONCLUSÕES DE CARÁTER GERAL

O método por simulação se mostrou eficaz no cálculo do desempenho da envoltória, sobretudo nas análises paramétricas. No que diz respeito à ferramenta utilizada, observou-se a escassez de suporte técnico acessível, já que grande parte das questões referentes ao *EnergyPlus* foram resolvidas por meio de fóruns de discussão na internet ou via e-mail enviado à pesquisadores da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Nota-se a necessidade de um suporte técnico mais voltado para as análises de desempenho, além de um maior esforço em expandir a utilização dessa ferramenta para os profissionais da indústria da construção civil, já que tanto a NBR 15575 (ABNT, 2013a) quanto o RTQ-R (BRASIL, 2012) recomendam a utilização de ferramentas computacionais similares ao *EnergyPlus* para realização das simulações.

A etiquetagem das edificações é um importante mecanismo de controle da qualidade construtiva, por expor de forma clara e precisa para os usuários o desempenho dos ambientes e do edifício como um todo. A etiquetagem, em conjunto com a ACVE, possibilita a análise sistêmica do edifício, auxiliando no desenvolvimento de estratégias ambientais focadas na gestão energética.

Espera-se que os resultados das análises contribuam na elaboração de diretrizes construtivas mais eficientes do ponto de vista ambiental, alinhadas à promoção do conforto dos usuários. Espera-se ainda que os resultados contribuam na conscientização da indústria da construção civil na escolha dos materiais construtivos mais duráveis que necessitem de menos manutenções ao longo do seu

ciclo de vida, bem como dos impactos relacionados ao desperdício de materiais no canteiro de obra.

5.2 CONCLUSÕES RELATIVAS AO DESEMPENHO DAS EDIFICAÇÕES SEGUNDO O PBE EDIFICA

Em relação ao desempenho da envoltória dos edifícios existentes, nota-se a importância da localização dos mesmos em relação ao sol. Edifícios cujo maior eixo encontra-se no sentido norte-sul, como no caso dos edifícios 2 e 3, apresentam maior incidência solar nas fachadas de maior área, e portanto, apresentaram desempenho inferior quando comparados com os demais edifícios.

Quanto à relação entre os pavimentos, de maneira geral, o desempenho da envoltória nas duas situações simuladas diminui à medida que se elevam os pavimentos. Isso significa que o primeiro pavimento tem um desempenho melhor que o pavimento intermediário, que por sua vez, tem um desempenho da envoltória melhor que o pavimento superior.

No caso da inclusão das medidas de retrofit, as mais eficazes referem-se àquelas que modificam as superfícies verticais opacas da envoltória, como a redução da absorvância e a instalação de fachada ventilada. A última foi ainda mais impactante, especialmente nos edifícios que já tinham um valor de absorvância baixo. Para os edifícios 1 e 2, que têm como característica a horizontalidade, a redução da absorvância da cobertura nos ambientes do último pavimento se mostrou ainda mais eficaz do que a fachada ventilada.

O telhado verde foi a medida de retrofit mais controversa entre os edifícios analisados. Para os edifícios 1 e 2 no último pavimento, essa medida se mostrou mais eficiente do que aquelas voltadas à proteção solar das aberturas, por exemplo. No entanto, para os edifícios 3, 4 e 5, houve acréscimo de GHR e CR, ou seja, reduziu o desempenho do último pavimento quando comparado aos edifícios existentes.

As medidas relacionadas à proteção solar das aberturas, como o sombreamento por brises e a instalação de películas refletoras nos vidros, no geral, apesar de melhorarem o desempenho da envoltória, apresentaram pouca influência na quantidade de GHR e no CR.

Após a implementação de todas as medidas de retrofit, todos os ambientes dos edifícios analisados apresentaram nível A de desempenho da envoltória, exceto alguns ambientes do último pavimento do edifício 5, que alcançaram nível B para a situação em que o edifício é naturalmente ventilado.

5.3 CONCLUSÕES RELATIVAS À ENERGIA INCORPORADA (EI)

Em relação à EI dos edifícios existentes, a média de todos os edifícios analisados é igual a 7,8 GJ/m². Tal consumo energético necessário para produção, manutenção e desperdício dos materiais construtivos emite uma média de 535,3 KgCO₂/m². Quanto ao valor de EI/m², os edifícios analisados possuem valores elevados quando comparados com referências internacionais. De acordo com Dixit et al. (2009), a média de EI corresponde a 5,5 GJ/m², com desvio padrão de 1,56 GJ/m². Entretanto, com relação a pesquisas no Brasil, Paulsen e Sposto (2012) alcançaram um valor igual a 7,6 GJ/m² de uma residência unifamiliar típica do Programa Minha Casa Minha Vida (PMCMV). Tavares (2006) observou valores na mesma ordem de grandeza, atingindo uma média de 7,0 GJ/m².

A Energia Incorporada Inicial (EII) representa em torno de 64% do total de EI, enquanto que a Energia Incorporada Recorrente (EIR) representa 25% e a Energia Incorporada Desperdiçada (EID), 11%. Em todos os edifícios, os materiais mais representativos foram concreto, aço e tijolo cerâmico, representando aproximadamente 53% do total de EI e 57% do total de CI.

No que concerne às medidas de retrofit, todas apresentaram um aumento na EI dos edifícios existentes. A medida de retrofit que mais impactou no aumento da EI dos edifícios existentes foi o telhado verde. Apesar de ser uma medida específica para a área de cobertura, a manta impermeabilizante necessária à sua instalação possui valor elevado de EI/kg, além de necessitar de muitas manutenções ao longo do seu ciclo de vida. Para os edifícios 1 e 2, que são horizontalizados, a representatividade dessa medida no total de EI foi ainda maior, já que a razão entre a área de cobertura e a área útil total é superior aos demais edifícios. Em contrapartida, para o edifício 5, que possui muitos pavimentos, essa medida não foi representativa no total de EI.

A fachada ventilada também proporcionou significativo aumento da EI. No entanto, apesar de demandar grande volume de material para sua instalação, possui

VUP igual ao do edifício, ou seja, não necessita de grandes manutenções ou reposição de materiais ao longo da sua vida útil. As perdas também são reduzidas, já que o material é pré-moldado.

As medidas que menos impactaram no total de EI das edificações foram a película refletora nos vidros, os brises de alumínio para sombreamento das aberturas e a redução da absorvância. O edifício 5, por conter quantidades significativas de aberturas, apresentou valor mais expressivo ao ser aplicada a película protetora dos vidros. Os edifícios 4 e 5, por possuírem varandas grandes, dispensaram o uso de brises de alumínio em diversas aberturas.

5.4 CONCLUSÕES RELATIVAS À ENERGIA OPERACIONAL (EO)

No caso da energia operacional, o consumo médio de todos os edifícios analisados é de 14 GJ/m². Tal consumo energético necessário para uso dos equipamentos, iluminação, aquecimento de água, condicionamento de ar e cocção dos alimentos, emite uma média de 426 KgCO₂/m². Os edifícios analisados consomem valores de energia inferiores aos observados em estudos internacionais. Cuéllar-Franca e Azapagic (2012) verificaram valores que vão de 34 GJ/m² a 50 GJ/m² em edificações residenciais típicas da Inglaterra. Isso se deve ao fato de as edificações brasileiras não utilizarem sistemas de calefação, e o ar condicionado ainda ser um equipamento pouco comum nas residências (ELETROBRAS, 2007). Quanto aos estudos brasileiros, Tavares (2006) verificou valores de 11 GJ/m² para uma residência unifamiliar de baixa renda e 7,3 GJ/m² para um edifício multifamiliar de média renda. Observa-se a necessidade de pesquisas mais recentes a respeito dos hábitos de consumo da população brasileira, a fim de promover mais embasamento às metodologias de cálculo de consumo de EO no ciclo de vida.

No que diz respeito às categorias de consumo de EO, os equipamentos foram os que lideraram em todos os edifícios. O edifício 5 saiu do padrão de consumo de EO dos demais edifícios, pois utiliza equipamento de passagem a gás para aquecer a água, além de possuir uma porcentagem grande de UH que utilizam com mais frequência o ar condicionado. O aquecedor de passagem a gás se mostrou mais eficiente do ponto de vista energético, apesar de emitir mais CO₂ na queima do gás combustível. Observou-se a necessidade de mais pesquisas para analisar até que

ponto o sistema de aquecimento a gás é realmente eficiente, não apenas do ponto de vista energético mas também do das emissões de gases do efeito estufa ao longo de sua vida útil.

Quanto às análises paramétricas, as medidas que menos provocaram redução do consumo de EO no ciclo de vida foram o telhado verde, o sombreamento das aberturas com brises de alumínio e a instalação de películas refletoras nos vidros. Entre as edificações, o telhado verde aumentou o consumo de EO nos edifícios 3 e 4, e quase não produziu efeito no edifício 5. Verifica-se a necessidade de verificar o comportamento do telhado verde nas demais zonas bioclimáticas.

As medidas relacionadas às superfícies opacas dos edifícios, como a mudança da absorvância e a fachada ventilada, foram as que proporcionaram maior redução da EO no ciclo de vida. Nos edifícios existentes que já possuem cores mais claras, como os edifícios 4 e 5, a redução da absorvância não foi tão expressiva quanto os edifícios de cores mais escuras. A fachada ventilada foi a mais eficaz na redução da EO em todas os edifícios estudados.

Observa-se que a eficácia das propostas de retrofit são mais evidentes nos edifícios em que é maior a utilização de condicionadores de ar, como nos edifícios 4 e 5, já que a redução do consumo energético provocado pelas medidas de retrofit recai apenas sobre o consumo de energia do ar condicionado.

5.5 CONCLUSÕES RELATIVAS À ENERGIA NO CICLO DE VIDA

Em relação à energia consumida no ciclo de vida, a média de todos os edifícios analisados é de 22 GJ/m², que corresponde a uma emissão média de 961,3 KgCO₂/m². Do total de energia no ciclo de vida, a maior parte é representada pela EO. Porém, quanto ao total de emissões de carbono, grande parte das emissões são resultantes do consumo de EI.

Quanto à aplicação das medidas de retrofit, o telhado verde se mostrou ineficaz para todos os edifícios na redução do consumo de energia no ciclo de vida, especialmente nos edifícios mais horizontais, como os edifícios 1 e 2. Nota-se que se fazem necessárias pesquisas que elaborem ACV do telhado verde no contexto das edificações e até mesmo das cidades, considerando outras categorias de impacto como aquelas relacionadas à qualidade do ar e redução da ilha de calor, por exemplo.

A fachada ventilada foi a medida que mais reduziu o consumo de energia no ciclo de vida de todas as edificações, exceto para o edifício 1, que apresentou um período de amortização muito extenso. A redução da absorvância e a fachada ventilada foram as medidas que tiveram período de amortização similar à média encontrada em trabalhos científicos internacionais, que é de 7,5 anos (VILCHES; GARCIA-MARTINEZ; SANCHEZ-MONTAÑES, 2017).

5.6 PROPOSTA PARA FUTURAS PESQUISAS

Sugere-se, para trabalhos futuros, avaliar os impactos de propostas de retrofit em edificações típicas comerciais e públicas, com relação ao desempenho da envoltória e no ciclo de vida energético; bem como propor medidas de retrofit que englobem equipamentos e sistemas mais eficientes, como sistemas automatizados de iluminação e inclusão de placas solares para aquecimento de água, por exemplo.

Além de observar o custo ambiental, analisar também a viabilidade das medidas de retrofit no âmbito financeiro, calculando-se o período de retorno dos investimentos após implementação; incluindo nas análises a energia necessária à construção, demolição e transporte entre as etapas do ciclo de vida, avaliando-se até o potencial de reciclagem dos materiais agregados aos edifícios pelo retrofit.

Deve-se ainda elaborar ACVE considerando as categorias de impactos dentro dos métodos de avaliação existentes (midpoint e endpoint). Para avaliar o impacto das medidas de retrofit, é necessário considerar na energia operacional não apenas o condicionamento de ar mas também a iluminação, quando tais medidas influenciem no controle lumínico interno.

Torna-se relevante elaborar pesquisas que identifiquem de forma mais precisa os hábitos de consumo da população brasileira, de forma a criar estratégias de retrofit que conduzam à redução do consumo energético na etapa de operação. Para tanto, deve-se comparar o desempenho da envoltória e ACVE de edifícios com padrões construtivos tradicionais confrontando-os com sistemas construtivos mais modernos; bem como comparar os resultados do desempenho da envoltória feito pelo método de simulação computacional com o método prescritivo proposto pelo PBE Edifica.

Em um mesmo edifício, podem-se identificar quais variáveis são mais relevantes na melhoria do desempenho da envoltória, bem como na redução dos

impactos ambientais, considerando todas as etapas do ciclo de vida. Ademais, devem-se desenvolver pesquisas que elevem o nível de integração entre a plataforma BIM e ACV de edificações. Por fim, é importante elaborar Avaliação do Ciclo de Vida, porém considerando o consumo de água durante todas as etapas construtivas, desde a extração do material até a demolição da edificação e possível reciclagem.

REFERÊNCIAS



REFERÊNCIAS

AGOPYAN, Vahan et al. **Alternativas para a redução do desperdício de materiais nos canteiros de obras: relatório final**. São Paulo: EPUSP/PCC, 1998. v. 5. Disponível em: <<http://perdas.pcc.usp.br/Volume3/index.htm>>. Acesso em: 6 dez. 2017.

AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. **ANSI/ASHRAE 55-2010**: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. Atlanta, 2010.

ANAND, Chirjiv Kaur; AMOR, Ben. Recent developments, future challenges and new research directions in LCA of buildings: A critical review. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, Elsevier BV, v. 67, p. 408-416, jan. 2017.

ARAÚJO, Aline; TAVARES, Sérgio. Building Life Cycle Assessment on pre-operation phase using BIM. **SBE Series**, p. 519-528, 2016.

ARCOWEB. **Películas para vidros laminados e de superfície**. Disponível em: <<https://www.arcoweb.com.br/finestra/tecnologia/peliculas-especiais-para-vidros-01-04-2004>>. Acesso em: 26 nov. 2017.

ASMI, Emira El et al. A standardized approach to BIM and energy simulation connection. **International Journal of Design Sciences And Technology**, Paris, França, v. 21, n. 1, p.59-82, 2015.

ASSEFA, Getachew; AMBLER, Chelsea. To demolish or not to demolish: Life cycle consideration of repurposing buildings. **Sustainable Cities And Society**, Elsevier BV, v. 28, p. 146-153, jan. 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220 – 1**: Desempenho térmico de edificações – Parte 1: Definições, símbolos e unidades. Rio de Janeiro, 2005a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220 – 2**: Desempenho térmico de edificações – Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro, 2005b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220 – 3**: Desempenho térmico de edificações – Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro, 2005c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575 – 1**: Edificações Habitacionais – Desempenho – Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2013a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575 – 4**: Edificações Habitacionais – Desempenho – Parte 4: Requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas. Rio de Janeiro, 2013b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14040**: Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Rio de Janeiro. 2009: Versão Corrigida:2014

AUTODESK. Revit *software* for BIM (*Building Information Modeling*). Disponível em:<<http://www.autodesk.com/products/revit-family/overview>>. Acesso em 7 jun. 2016b.

BARE, Jane C. et al. Midpoints versus endpoints: The sacrifices and benefits. *Int. J. Lca*, v. 5, n. 6, p.319-326, nov. 2000.

BARROS, Natália Nakamura; SILVA, Vanessa Gomes; RUSCHEL, Regina C.. Impactos da adoção de BIM no processo de avaliação de energia incorporada e emissões de GHGs no ciclo de vida de edificações. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 16., 2016, São Paulo. **Anais...** Porto Alegre: ANTAC, 2016. p. 1910-1920.

BASBAGILL, J. et al. Application of life-cycle assessment to early stage building design for reduced embodied environmental impacts. **Building And Environment**, Elsevier BV, v. 60, p. 81-92, fev. 2013.

BIG LADDER SOFTWARE. **Euclid**. Disponível em:<<http://bigladdersoftware.com/projects/euclid/>>. Acesso em: 3 maio 2017.

BIN, Guoshu; PARKER, Paul. Measuring buildings for sustainability: Comparing the initial and retrofit ecological footprint of a century home – The REEP House. **Applied Energy**, Elsevier BV, v. 93, p.24-32, maio 2012.

BRASIL. **Balanco Energético Nacional 2017**: Relatório Síntese - Ano base 2016. Disponível em:<<https://ben.epe.gov.br>>. Acesso em 15 fev. 2018

BRASIL. Lei 10.295, de 17 de outubro de 2001. Dispõe sobre a Política Nacional de conservação e Uso Racional de Energia e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, Seção 1, p. 1, 18 out. 2001.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Eletrobras/Procel** – Centro Brasileiro de Informação de Eficiência Energética – Procel Info. Disponível em: <<http://www.eletrobras.com>>. Acesso em: 20 out. 2015.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comercio Exterior. Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial - INMETRO. Portaria nº 18, 16 de janeiro de 2012. **Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de**

Eficiência Energética de Edificações Residenciais. Rio de Janeiro, 2012.
Disponível em: <<http://pbeedifica.com.br/etiquetagem/residencial/regulamentos>>.
Acesso em: 14 mar. 2017.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior Conselho Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (CONMETRO). **Resolução nº 04**, de 15 de dezembro de 2010. Dispõe sobre a Aprovação do Programa Brasileiro de Avaliação do Ciclo de Vida e dá outras providências. Brasil, 2010.

BRASIL. Secretaria de logística e tecnologia da informação. Instrução normativa nº2 de 04 de julho de 2014. Dispõe sobre regras para a aquisição ou locação de máquinas e aparelhos consumidores de energia pela Administração Pública Federal direta, autárquica e fundacional, e uso da Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE) nos projetos e respectivas edificações públicas federais novas ou que recebam retrofit. **Diário Oficial da União**, Brasília, Seção I, p. 10, 25 jun. 2014.

BU, Shanshan et al. Literature review of green retrofit design for comercial buildings with BIM implication. **Smart and Sustainable Built Environment**, v. 4, n. 2, p. 188-214, 2015.

BUENO, Cristiane; FABRICIO, Márcio Minto. Application of building information modelling (bim) to perform life cycle assessment of buildings. **Pós. Revista do Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo da Fauusp**, São Paulo, v. 23, n. 40, p.96-121, out. 2016.

BUYLE, Matthias; BRAET, Johan; AUDENAERT, Amaryllis. Life cycle assessment in the construction sector: A review. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, Elsevier BV, v. 26, p. 379-388, out. 2013.

CABEZA, Luisa F. et al. Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector: A review. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, Elsevier BV, v. 29, p. 394-416, jan. 2014.

CALDAS, Lucas Rosse et al. Diagnóstico da produção científica relacionada à aplicação do BIM à metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). In: IBERIAN LATIN-AMERICAN CONGRESS ON COMPUTATIONAL METHODS IN ENGINEERING, 36., 2015, Rio de Janeiro. **Proceedings...** Rio de Janeiro: ABMEC, 2015. p. 1 - 17.

CALDAS, Lucas; PEDROSO, Gilson; SPOSTO, Rosa Maria. Avaliação do Ciclo de Vida Energético (ACVE) de uma habitação. **Arquitextos**, São Paulo, ano 16, n. 191.06, Vitruvius, abr. 2016.
<<http://www.vitruvius.com.br/revistas/read/arquitextos/16.191/6012>>

CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO (CBIC). **Desempenho de edificações habitacionais**: guia orientativo para atendimento à norma ABNT NBR 15575:2013. Câmara Brasileira da Indústria da Construção. Fortaleza: Gadioli Cipolla Comunicação, 2013.

CARLO, Joyce Correna. **Processamento de arquivos climáticos para simulação do desempenho energético de edificações**. Relatório LabEEE-200504. Florianópolis, 2005. Disponível em: <<http://www.labee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos/inmet2016>>. Acesso em: 21 mar. 2017.

CARVALHO, Carolina et al. Avaliação de eficiência energética de um edifício educacional no município de Palhoça utilizando o Regulamento Técnico da Qualidade para edifícios comerciais, de serviço e públicos. In: Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído – ENTAC, 13., 2010, Canela. **Proceedings...** 2010.

CAVALCANTE, Marianne; FONSECA, Lucas; CALMON, João Luiz. Avaliação de energia e CO2 incorporados na fase pré-operacional de edificações utilizando a plataforma BIM. In: Encontro Latino-Americano e Europeu sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis. 2., 2017, São Leopoldo. **Anais...** São Leopoldo: Unisinos, 2017.

CHO, Yong K.; HAM, Youngjib; GOLPAVAR-FARD, Mani. 3D as-is building energy modeling and diagnostics: A review of the state-of-the-art. **Advanced Engineering Informatics**, Elsevier BV, v. 29, n. 2, p.184-195, abr. 2015.

COLTRO; Leda; GARCIA; Eloisa; QUEIROZ; Guilherme. Life cycle inventory for electric energy system in Brazil. **The international journal of Life Cycle Assessment**, v. 5, p. 290-296, sept. 2003.

CUÉLLAR-FRANCA, Rosa M.; AZAPAGIC, Adisa. Environmental impacts of the UK residential sector: Life cycle assessment of houses. **Building and Environment**, Elsevier BV, v. 54, p. 86-99, ago. 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.02.005>>. Acesso em: 7 jun. 2017.

D'ELL SANTO, Amabelli; ALVAREZ, Cristina E.; NICO-RODRIGUES, Edna. A. Conforto e desempenho térmico em contradição na NBR 15575. **Cadernos PROARQ 20**, n. 20, p. 116-136, 2013.

DERBIGUM. **Derbigum SP AP**: A membrana de impermeabilização anti-raiz. Disponível em: <www.derbigum.com>. Acesso em: 17 dez. 2017.

DIXIT, Manish Kumar et al. Identification of parameters for embodied energy measurement: A literature review. **Energy And Buildings**, Elsevier BV, v. 42, n. 8, p. 1238-1247, ago. 2010.

DODOO, Ambrose; GUSTAVSSON, Leif; SATHRE, Roger. Life cycle primary energy implication of retrofitting a wood-framed apartment building to passive house standard. **Resources, Conservation and Recycling**, Elsevier BV, v. 54, n. 12, p.1152-1160, out. 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2010.03.010>>. Acesso em: 3 maio 2017.

DOE – U. S. DEPARTMENT OF ENERGY. **Building Energy Software Tools Directory**. Disponível em: <<http://www.buildingenergysoftwaretools.com/software-listing>>. Acesso em: 3 mar. 2017.

DOE2. eQUEST. **The quick energy simulation tool**. Disponível em: <<http://www.doe2.com/equest/>>. Acesso em: 3 mar. 2017.

DORNELLES, Kelen Almeida. **Absortância solar de superfícies opacas: métodos de determinação e base de dados para tintas látex acrílica e PVA**. 2008. 160p. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.

EASTMAN, Chuck et al. **Manual de Bim**. Um Guia de Modelagem da Informação da Construção. Porto Alegre: Bookman, 2014.

ECOTELHADO. **Sistema Modular Alveolar Leve**. Disponível em: <<https://ecotelhado.com/produto/ecotelhado-telhado-verde/sistema-modular-alveolar-leve/>>. Acesso em: 25 jul. 2017.

ELEFTHERIADIS, Stathis; MUMOVIC, Dejan; GREENING, Paul. Life cycle energy efficiency in building structures: A review of current developments and future outlooks based on BIM capabilities. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, Elsevier BV, v. 67, p. 811-825, jan. 2017.

ELETROBRAS. **Pesquisa de posse de equipamentos e hábitos de uso, ano base 2005**: Relatório Brasil - Sumário Executivo. Rio de Janeiro: ELETROBRAS; PROCEL, 2007a.

ELETROBRAS. **Pesquisa de posse de equipamentos e hábitos de uso, ano base 2005**: Classe residencial – Relatório Sudeste. Rio de Janeiro: ELETROBRAS; PROCEL, 2007b.

FALUDI, Jeremy; LEPECH, Michael D.; LOISOS, George. Using life cycle assessment methods to guide architectural decision-making for sustainable prefabricated modular buildings. **Journal Of Green Building**, College Publishing, v. 7, n. 3, p. 151-170, jul. 2012.

FUNDAÇÃO VANZOLINI. **Certificação AQUA-HQE**. Disponível em: <<http://vanzolini.org.br/aqua/certificacao-aqua-hqe/>>. Acesso em: 7 mar. 2017.

GHATTAS, Randa et al. Life Cycle Assessment for Residential Buildings: A Literature Review and Gap Analysis. **MIT Concrete Sustainability Hub.**, out. 2016.

GIACOMIN, Regiane Faria. **Desempenho energético das tipologias construtivas representativas de um bairro.** 2017. 246f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2017.

GOMEZ; Dario R., WATTERSON; John D. **Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.** Chapter 2: Stationary Combustion. Washington: IPCC, 2006.

GRAPHISOFT. **Archicad.** Disponível em: <<http://www.graphisoft.com/br/archicad/>>. Acesso em: 14 dez. 2017.

GU, Ning; LONDON, Kerry; Understanding and facilitating BIM adoption in the AEC industry. **Automation in Construction**, v. 19, p. 988-999, 2010.

GULTEKIN, Pelin; ANUMBA, Chimay J.; LEICHT, Robert M. Case study of integrated decision-making for deep energy-efficient retrofits. **International Journal Of Energy Sector Management**, Emerald, v. 8, n. 4, p. 434-455, 28 out. 2014.

HAUSCHILD, Michael Z. et al. Identifying best existing practice for characterization modeling in life cycle impact assessment. **The International Journal Of Life Cycle Assessment**, Springer Nature, v. 18, n. 3, p. 683-697, 12 set. 2012.

HUEDO, Patricia; MULET, Elena; LÓPEZ-MESA, Belinda. A model for the sustainable selection of building envelope assemblies. **Environmental Impact Assessment Review**, Elsevier BV, v. 57, p. 63-77, fev. 2016.

ILTER, Deniz; ERGEN, Esin. BIM for building refurbishment and maintenance: current status and research directions. **Structural Survey**, Emerald, v. 33, n. 3, p. 228-256, 13 jul. 2015.

INEE – Instituto Nacional de Eficiência Energética. **A Eficiência Energética e o Novo Modelo do Setor Energético.** Disponível em: <http://www.inee.org.br/eficiencia_o_que_eh.asp?Cat=eficiencia>. Acesso em: 16 fev. 2017

INSTITUTO BRASILEIRO DE INFORMAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA (IBICT). Disponível em:<www.ibict.br>. Acesso em: 15 de março 2017.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). **Normas Climatológicas do Brasil 1961-1990.** Disponível em:<<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisClimatologicas>>. Acesso em: 15 mar. 2017.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 7730:2005** - Ergonomics of the thermal environment – Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the Predicted Mean Vote (PMV) and Percentage of Dissatisfied (PPD) indices and local thermal comfort criteria. 2005

JALAEI, Farzad; JRADE, Ahmad. An Automated BIM Model to Conceptually Design, Analyze, Simulate, and Assess Sustainable Building Projects. **Journal Of Construction Engineering**, Hindawi Publishing Corporation, v. 2014, p. 1-21, 2014.

JOHN, Vanderley M. Materiais de Construção e o Meio Ambiente. In: ED. ISAIA, G. C. **Materiais De Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. 1. ed. v. 1, cap. 4. São Paulo: IBRACON, 2007.

JRADE, Ahmad; ABDULLA, Raidan. Integrating Building Information Modeling and Life Cycle Assessment tools to design sustainable buildings. In: CIB W78 2012: 29TH INTERNATIONAL CONFERENCE, Beirute. **Proceedings...** 2012, p. 173-182.

KOMEKO. **Manual do usuário** - Linha digital - Modelo KO 31D/DI. Disponível em: <https://komeco.com.br/fmanager/komeco2017/manuais_produtos/arquivo19_1.pdf>. Acesso em: 24 jan. 2018.

KRYGIEL, Eddy; NIES, Bradley. **Green BIM: Successful Sustainable Design with Building Information Modeling**. Indiana: Wiley Publishing, 2008.

LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES – LABEE. **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: 2 ago. 2016.

LAMBERTS, Roberto et al. **Casa eficiente: Bioclimatologia e desempenho térmico**. Florianópolis: UFSC/LabEEE, 2010a. v. 1.

LAMBERTS, Roberto et al. **Casa eficiente: Simulação Computacional do Desempenho Termo-Energético**. Florianópolis: UFSC/LabEEE, 2010b. v.4.

LAMBERTS, Roberto; DUTRA, Luciano; PEREIRA, Fernando. **Eficiência energética na arquitetura**. 3. ed. Rio de Janeiro, Eletrobras; Procel, 2013.

LAWRENCE BERKELEY NATIONAL LABORATORY. **Input Output Reference: The Encyclopedic Reference to EnergyPlus Input and Output**. USA: US Department of Energy, 2016.

LUMIBRISE. **Brise 84F 45°/30° Shadow**. Disponível em: <www.lumibrise.com.br>. Acesso em: 7 jan. 2018.

MA, Zhenjun et al.; Existing building retrofits: Methodology and state-of-the-art. **Energy And Buildings**, v. 55, p. 889-890, dez. 2012.

MAILE, Tobias, FISCHER, Martin, BAZJANAC, Vladimir. **Building Energy Performance Simulation Tools - a Life-Cycle and Interoperable Perspective**. CIFE Working Paper nº WP107, Center for Integrated Facility Engineering at Stanford University, 2007.

MORAES, Virginia T. F.; QUELHAS, Osvaldo. L. G. A Metodologia do Processo do Retrofit e os Limites da Intervenção. In: CONGRESSO NACIONAL DE EXCELÊNCIA EM GESTÃO, 7., 2011, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: UFRJ, 2011.

MORENO, Ana Cecília Rodrigues; MORAIS, Ingrid Stephanie de; SOUZA, Roberta Vieira Gonçalves de. Thermal Performance of Social Housing– A Study Based on Brazilian Regulations. **Energy Procedia**, Elsevier BV, v. 111, p. 111-120, mar. 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.013>>. Acesso em: 15 jun. 2017.

NUDEL, Marcelo. **Deficiências nos critérios de desempenho térmico da NBR 15575 permitem a proliferação de “edifícios estufa”**. São Paulo: PINI, 2017. Disponível em: <<https://techne.pini.com.br/2017/02/deficiencias-nos-criterios-de-desempenho-termico-da-nbr-15575-permitem-a-proliferacao-de-edificios-estufa/>>. Acesso em: 15 jun. 2017.

OLIVEIRA, Raquel Diniz et al. Thermal Comfort for Users According to the Brazilian Housing Buildings Performance Standards. **Energy Procedia**, Elsevier BV, v. 78, p. 2923-2928, nov. 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.668>>. Acesso em: 15 jun. 2017.

ORDENES, Martín et al. **Metodologia utilizada na elaboração da biblioteca de materiais e componentes construtivos brasileiros para simulações no VisualDOE 3.1**. Relatório interno LabEEE. Florianópolis: UFSC, 2003.

ORTIZ-RODRÍGUEZ, Oscar; CASTELLS, Francesc; SONNEMANN, Guido. Life cycle assessment of two dwellings: One in Spain, a developed country, and one in Colombia, a country under development. **Science of The Total Environment**, v. 408, n. 12, p. 2435-2443, maio 2010.

PAULSEN, Jacob Silva; SPOSTO, Rosa Maria. A life cycle energy analysis of social housing in Brazil: Case study for the program “MY HOUSE MY LIFE”. **Energy And Buildings**, Elsevier BV, v. 57, p. 95-102, fev. 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.11.014>>. Acesso em: 15 jun. 2017.

PBE EDIFICA. **Simulação**. Disponível em: <<http://www.pbeedifica.com.br/etiquetagem/residencial/simulação>>. Acesso em: 10 abr. 2017.

PINI. **TCPO Tabelas de Composições de Preços para Orçamentos**. 13. ed. São Paulo: PINI, 2008.

PREFEITURA MUNICIPAL DE VITÓRIA (PMV). **Publicações**: Vitória Bairro a Bairro – Janeiro, 2013. Disponível em: <http://legado.vitoria.es.gov.br/regionais/geral/publicacoes/Vitoria_bairro_bairro/vitoria_bairro_bairro.asp>. Acesso em: 28 set. 2017.

PREFEITURA MUNICIPAL DE VITÓRIA (PMV). **Vitória em Mapas** – Fevereiro, 2012. Disponível em: <<http://legado.vitoria.es.gov.br/regionais/temas.asp>>. Acesso em: 28 set. 2017.

PROCELINFO. **Dicas de economia de energia**. Disponível em: <<http://www.procelinfo.com.br/main.asp?View=%7BE6BC2A5F-E787-48AF-B485-439862B17000%7D>>. Acesso em: 7 nov. 2017.

RAMESH, T.; PRAKASH, Ravi; SHUKLA, K.k. Life cycle energy analysis of buildings: An overview. **Energy And Buildings**, Elsevier BV, v. 42, n. 10, p. 1592-1600, out. 2010.

RASHID, Ahmad Faiz Abd; YUSOFF, Sumiani. A review of life cycle assessment method for building industry. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, Elsevier BV, v. 45, p. 244-248, maio 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.01.043>>. Acesso em: 7 nov. 2017.

RHOADS, John. **Low Carbon Retrofit Toolkit**: A roadmap to success. 2010. Disponível em: <<http://www.betterbuildingspartnership.co.uk/sites/default/files/media/attachment/bbp-low-carbon-retrofit-toolkit.pdf>>. Acesso em: 16 maio 2016.

RORIZ, Maurício. **Segunda proposta de revisão do zoneamento bioclimático brasileiro**. São Carlos, SP. Agosto de 2012. Disponível em: <<http://www.labeee.ufsc.br/sites/default/files/projetos/Zoneamento.pdf>>. Acesso em: 15 jun. 2018.

SANCHES, Débora; ALVIN, Angélica Benatti. Inventário da habitação social pública na área central de São Paulo (1990-2012). **Arquitextos**, São Paulo, Vitruvius, ano 16, n. 192.08, jun. 2016. Disponível em: <<http://www.vitruvius.com.br/revistas/read/arquitextos/16.192/6071>>. Acesso em: 27 jan. 2017.

SARTORI, Igor; HESTNES, Annegrete. Energy use in the life cycle of conventional and low-energy buildings: A review article. **Energy And Buildings**, Elsevier BV, v. 39, n. 3, p. 249-257, mar. 2007.

SHRESTHA, Som S.; BISWAS, Kaushik; DESJARLAIS, Andre O. A protocol for lifetime energy and environmental impact assessment of building insulation materials. **Environmental Impact Assessment Review**, Elsevier BV, v. 46, p. 25-31, abr. 2014.

SILVA, Arthur S.; GHISI, Enedir. Análise de sensibilidade global dos parâmetros termofísicos de uma edificação residencial de acordo com o método de simulação do RTQ-R. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 13, n. 4, p. 135-148, jul./set. 2013.

SILVA, Arthur S.; ALMEIDA, Laiane S. S.; GHISI, Enedir. Comparação da eficiência energética da envoltória de habitações de interesse social pelos métodos prescritivo e simulação do RTQ-R. In: ELACAC – ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 8., 2013, Brasília. **Anais...** Brasília, 2013.

SIMAPRO. **Enabling fact-based sustainability**. Disponível em: <<https://simapro.com/>>. Acesso em: 5 mar. 2017.

SOUST-VERDAGUER, Bernardette; LLATAS, Carmen; GARCÍA-MARTÍNEZ, Antonio. Critical review of bim-based LCA method to buildings. **Energy And Buildings**, Elsevier BV, v. 136, p. 110-120, fev. 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.12.009>>. Acesso em: 7 nov. 2017.

STEEL, Jim; DROGEMULLER, Robin; TOTH, Bianca. Model interoperability in building information modelling. **Softw Syst Model**, v. 11, n. 1, p. 99-109, 7 out. 2010.

TAVARES, Sérgio Fernando. **Metodologia de análise do Ciclo de Vida Energético de edificações residenciais brasileiras**. 2006. 225 f. Tese (Doutorado) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

THE AMERICAN INSTITUTE OF ARCHITECTS – AIA. **An Architect's Guide to Integrating Energy Modeling in the Design Process**. 2012. Disponível em: <<http://www.aia.org/practicing/AIAB094452>>. Acesso em: 10 nov. 2016.

THINKSTEP. **GaBi LCA Software**. Disponível em: <<http://www.gabi-software.com/international/index/>>. Acesso em: 7 mar. 2017.

TRELOAR, Graham John. **A Comprehensive Embodied Energy Analysis Framework**. 1998. 291 f. Tese (Doutorado) – Faculty of Science and Technology, Deakin University, 1998.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. **EnergyPlus Energy Simulation Software**. U. S. Department of Energy, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy. 2016. Disponível em: <<http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/>>. Acesso em: 5 jun. 2016.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. **EnergyPlus Energy Simulation Software**. U. S. Department of Energy, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy. 2016. Disponível em: <<http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/>>. Acesso em: 6 jun. 2016.

UNEP. **Life Cycle Assessment: What it is and How to do it**. Paris, 1996.

VECHI, Marcel; GHISI, EneDIR. **Avaliação do ciclo de vida de sistemas de aquecimento de água para aprimoramento do processo de etiquetagem do RTQ-R**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2015. (Relatório Interno 02/2015).

VERSAGE, Rogério S. **Equações prescritivas para o regulamento de etiquetagem de eficiência energética de edificações residenciais**. Relatório técnico: RT_Labeee-2011/03, Florianópolis, 2011.

VILCHES, Alberto; GARCIA-MARTINEZ, Antonio; SANCHEZ-MONTAÑES, Benito. Life cycle assessment (LCA) of building refurbishment: A literature review. **Energy And Buildings**, Elsevier BV, v. 135, p. 286-301, 4 jan. 2017.

VOLK, Rebekka; STENGEL, Julian; SCHULTMANN, Frank; Building Information Modeling (BIM) for existing buildings — Literature review and future needs. **Automation in Construction**, v. 38, p. 109-127, 2014.

WOO, Jeong-Han; MENASSA, Carol. Virtual Retrofit Model for aging commercial buildings in a smart grid environment. **Energy and Buildings**, v. 80, p. 424-435, 2014.

World Business Council for Sustainable Development (WBCSD). **Energy efficiency in buildings – Transforming the market**. Geneva, 2009. Disponível em: <<http://www.wbcSD.org/transformingthemarketeeb.aspx>>. Acesso em: 7 jun. 2016.

APÊNDICES

APÊNDICE A – MEMORIAIS DE QUANTITATIVO DE MATERIAIS

DADOS DA EDIFICAÇÃO PRÉDIO MODULAR FISCHER

FONTE: <http://www.casamodularfischer.com.br/projetos>

ÁREA ÚTIL UNIDADES HABITACIONAIS (SEM VARANDA,
SEM PAREDE E SEM CIRCULAÇÃO)

M² 675,84

UN

QTD. DE BANHEIROS

D 16,00

DADOS EDIFÍCIO 1

RAZÃO

ÁREA ÚTIL UNIDADES HABITACIONAIS (SEM VARANDA,
SEM PAREDE E SEM CIRCULAÇÃO)

1268,6

M² 4

1,88

UN

QTD. DE BANHEIROS

D 48,00

3,00

2,44

DADOS EDIFÍCIO 2

RAZÃO

ÁREA ÚTIL UNIDADES HABITACIONAIS (SEM VARANDA,
SEM PAREDE E SEM CIRCULAÇÃO)

1528,0

M² 8

2,26

UN

QTD. DE BANHEIROS

D 48,00

3,00

2,63

DADOS EDIFÍCIO 3

RAZÃO

ÁREA ÚTIL UNIDADES HABITACIONAIS (SEM VARANDA,
SEM PAREDE E SEM CIRCULAÇÃO)

2492,6

M² 4

3,69

UN

QTD. DE BANHEIROS

D 108,00

6,75

5,22

DADOS EDIFÍCIO 4

RAZÃO

ÁREA ÚTIL UNIDADES HABITACIONAIS (SEM VARANDA,
SEM PAREDE E SEM CIRCULAÇÃO)

1304,2

M² 8

1,93

UN

QTD. DE BANHEIROS

D 54,00

3,38

2,65

DADOS EDIFÍCIO 5

RAZÃO

ÁREA ÚTIL UNIDADES HABITACIONAIS (SEM VARANDA,
SEM PAREDE E SEM CIRCULAÇÃO)

8964,4

M² 2

13,26

UN

QTD. DE BANHEIROS

D 292,00

18,25

15,76

- Hidrossanitário e elétrico dos edifícios com chuveiro elétrico
(Edifícios 1 ao 4)

ESPECIFICAÇÃO	UNID	QTD.	PESO/ UNID		EDIFÍCIO 1				EDIFÍCIO 2				EDIFÍCIO 3				EDIFÍCIO 4			
			PVC	METAL	QTD. ESTIMA	PESO (KG)	PESO PVC (KG)	PESO METAL (KG)	QTD. ESTIMA	PESO PVC (KG)	PESO METAL (KG)	QTD. ESTIMA	PESO PVC (KG)	PESO METAL (KG)	QTD. ESTIMA	PESO PVC (KG)	PESO METAL (KG)			
MATERIAL ELÉTRICO					4204,25	365,60	3894,47	348,19	4409,96	394,38	8999,09	782,58	4572,96	397,67						
1,5 mm ²	m	2292,00	0,01	0,02	5589,20	29,34	88,03	6029,12	31,65	94,96	11962,19	62,80	188,40	31,92	95,75					
2,5 mm ²	m	3660,00	0,01	0,02	8925,15	69,17	207,51	9627,65	74,61	223,84	19101,93	148,04	444,12	75,24	225,71					
4,0 mm ²	m	330,00	0,01	0,03	804,73	9,25	27,76	868,07	9,98	29,95	1722,31	19,81	59,42	10,07	30,20					
6,0 mm ²	m	216,00	0,02	0,05	526,74	8,30	24,89	568,19	8,95	26,85	1127,33	17,76	53,27	9,02	27,07					
1/2"	m	1940,00	0,57		4730,82	2696,57	0,00	5103,18	2908,81	0,00	10125,07	5771,29	0,00	5145,72	2933,06	0,00				
3/4"	m	67,00	0,74		163,39	120,91	0,00	176,25	130,43	0,00	349,69	258,77	0,00	177,72	131,51	0,00				
1"	m	355,00	1,11		865,70	960,93	0,00	933,83	1036,55	0,00	1852,79	2056,60	0,00	941,62	1045,20	0,00				
1.1/4"	m	372,00			907,15	0,00	0,00	978,55	0,00	0,00	1941,51	0,00	0,00	986,71	0,00	0,00				
1.1/2"	m	20,00			48,78	0,00	0,00	52,62	0,00	0,00	104,39	0,00	0,00	53,05	0,00	0,00				
MATERIAL HIDRÁULICO					309,78	17,41	334,17	18,78	4075,79	375,60	8335,06	745,21	4236,01	378,73						
25 mm	m	378,00	0,19		921,78	175,14	0,00	994,34	188,92	0,00	1972,83	374,84	0,00	1002,62	190,50	0,00				
32 mm	m	8,00	0,30		19,51	5,85	0,00	21,05	6,32	0,00	41,76	12,53	0,00	21,22	6,37	0,00				
40 mm	m	46,00	0,43		112,18	48,42	0,00	121,01	52,24	0,00	240,08	103,63	0,00	122,02	52,67	0,00				
60 mm	m	12,00	0,89		29,27	26,15	0,00	31,57	28,20	0,00	62,63	55,95	0,00	31,83	28,43	0,00				
25 mm x 3/4"	und	102,00	0,02	0,03	248,74	4,97	7,46	268,32	5,37	8,05	533,00	10,66	15,99	270,55	5,41	8,12				
25 mm	und	168,00	0,02		409,68	8,19	0,00	441,93	8,84	0,00	877,00	17,54	0,00	445,61	8,91	0,00				
40 mm	und	10,00	0,07		24,39	1,71	0,00	26,31	1,84	0,00	53,00	3,71	0,00	26,53	1,86	0,00				
60 mm	und	14,00	0,20		34,14	6,83	0,00	36,83	7,37	0,00	74,00	14,80	0,00	37,14	7,43	0,00				
25 mm	und	68,00	0,03		165,83	4,97	0,00	178,88	5,37	0,00	355,00	10,65	0,00	180,37	5,41	0,00				
32 mm	und	4,00	0,06		9,76	0,59	0,00	10,53	0,63	0,00	21,00	1,26	0,00	10,61	0,64	0,00				
40 mm	und	4,00	0,10		9,76	0,98	0,00	10,53	1,05	0,00	21,00	2,10	0,00	10,61	1,06	0,00				
60 mm	und	1,00	0,27		2,44	0,66	0,00	2,64	0,71	0,00	6,00	1,62	0,00	2,66	0,72	0,00				
60 mm x 40 mm	und	4,00	0,28		9,76	2,73	0,00	10,53	2,95	0,00	21,00	5,88	0,00	10,61	2,97	0,00				
60 mm x 25 mm	und	8,00	0,19		19,51	3,71	0,00	21,05	4,00	0,00	42,00	7,98	0,00	21,22	4,03	0,00				
40 mm x 25 mm	und	8,00	0,08		19,51	1,56	0,00	21,05	1,68	0,00	42,00	3,36	0,00	21,22	1,70	0,00				
25 mm	und	32,00	0,11		78,04	8,58	0,00	84,18	9,26	0,00	168,00	18,48	0,00	84,88	9,34	0,00				
32 mm	und	4,00	0,14		9,76	1,37	0,00	10,53	1,47	0,00	21,00	2,94	0,00	10,61	1,49	0,00				
60 mm	und	2,00	0,54		4,88	2,64	0,00	5,27	2,85	0,00	11,00	5,94	0,00	5,31	2,87	0,00				
3/4"	und	16,00		0,16	39,02	0,00	6,24	42,09	0,00	6,73	84,00	0,00	13,44	42,44	0,00	6,79				
25 mm x 3/4"	und	76,00	0,02	0,02	185,34	3,71	3,71	199,92	4,00	4,00	397,00	7,94	7,94	201,59	4,03	4,03				
25 mm	und	12,00	0,02		29,27	0,59	0,00	31,57	0,63	0,00	63,00	1,26	0,00	31,83	0,64	0,00				
40 mm	und	3,00	0,06		7,32	0,44	0,00	7,90	0,47	0,00	16,00	0,96	0,00	7,96	0,48	0,00				

- Hidrossanitários para o edifício com sistema de passagem a gás (Edifício 5)

						EDIFÍCIO 5		
MATERIAL	ESPECIFICAÇÃO	UNID	QTD. PRÉDIO MODULAR	PESO/UNI D PVC	PESO/UNI D METAL	QTD. ESTIMADA	PESO PVC (KG)	PESO METAL (KG)
							25736,19	
MATERIAL ELÉTRICO							23417,57	2089,06
FIO DE COBRE	1,5 mm ²	m	2292,00	0,01	0,02	36115,18	189,60	568,81
	2,5 mm ²	m	3660,00	0,01	0,02	57670,84	446,95	1340,85
	4,0 mm ²	m	330,00	0,01	0,03	5199,83	59,80	179,39
ELETRODUTO PVC	1/2"	m	1732,00	0,57		27291,23	15556,00	
	3/4"	m	67,00	0,74		1055,73	781,24	
	1"	m	365,00	1,11		5751,33	6383,98	
	1 1/4"	m	382,00			6019,20	0,00	
MATERIAL HIDRÁULICO							2318,62	174,75
TUBO PVC SOLDÁVEL	25 mm	m	245,00	0,19		3860,48	733,49	
	32 mm	m	8,00	0,30		126,06	37,82	
	40 mm	m	46,00	0,43		724,83	312,88	
	60 mm	m	12,00	0,89		189,09	168,92	
Joelho 90° com redução	25 mm x 3/4"	und	95,00	0,02	0,03	1496,93	29,94	44,91
JOELHO 90°	25 mm	und	122,00	0,02		1922,37	38,45	
	40 mm	und	10,00	0,07		157,58	11,03	
	60 mm	und	14,00	0,20		220,60	44,12	
TE 90°	25 mm	und	51,00	0,03		803,61	24,11	
	32 mm	und	4,00	0,06		63,03	3,78	
	40 mm	und	4,00	0,10		63,03	6,30	
	60 mm	und	1,00	0,27		15,76	4,26	
TE 90° COM REDUÇÃO	60 mm x 40 mm	und	4,00	0,28		63,03	17,65	
	60 mm x 25 mm	und	8,00	0,19		126,06	23,95	
	40 mm x 25 mm	und	8,00	0,08		126,06	10,08	
REGISTRO DE GAVETA	25 mm	und	32,00	0,11		504,23	55,47	
	32 mm	und	4,00	0,14		63,03	8,82	
	60 mm	und	2,00	0,54		31,52	17,02	
REGISTRO DE PRESSÃO	3/4"	und	16,00		0,16	252,12	0,00	40,34
LUVA	25 mm x 3/4"	und	76,00	0,02	0,02	1197,54	23,95	23,95
JOELHO 45°	25 mm	und	12,00	0,02		189,09	3,78	
	40 mm	und	3,00	0,06		47,28	2,84	
								4792,43
TUBO AÇO GALVANIZAD	21 mm	m	16,00		1,00	252,12		252,12
	27 mm	m	224,00		1,23	3529,59		4341,40
COTOVELO DE FERRO GALV	3/4"	und	48,00		0,12	756,34		93,03
	1/2"	und	32,00		0,10	504,23		50,42
TE REDUÇÃO FERRO GALV	3/4" x 1/2"	und	16,00		0,11	252,12		27,73
BUCHA DE FERRO GALV.	3/4" x 1/2"	und	16,00		0,11	252,12		27,73

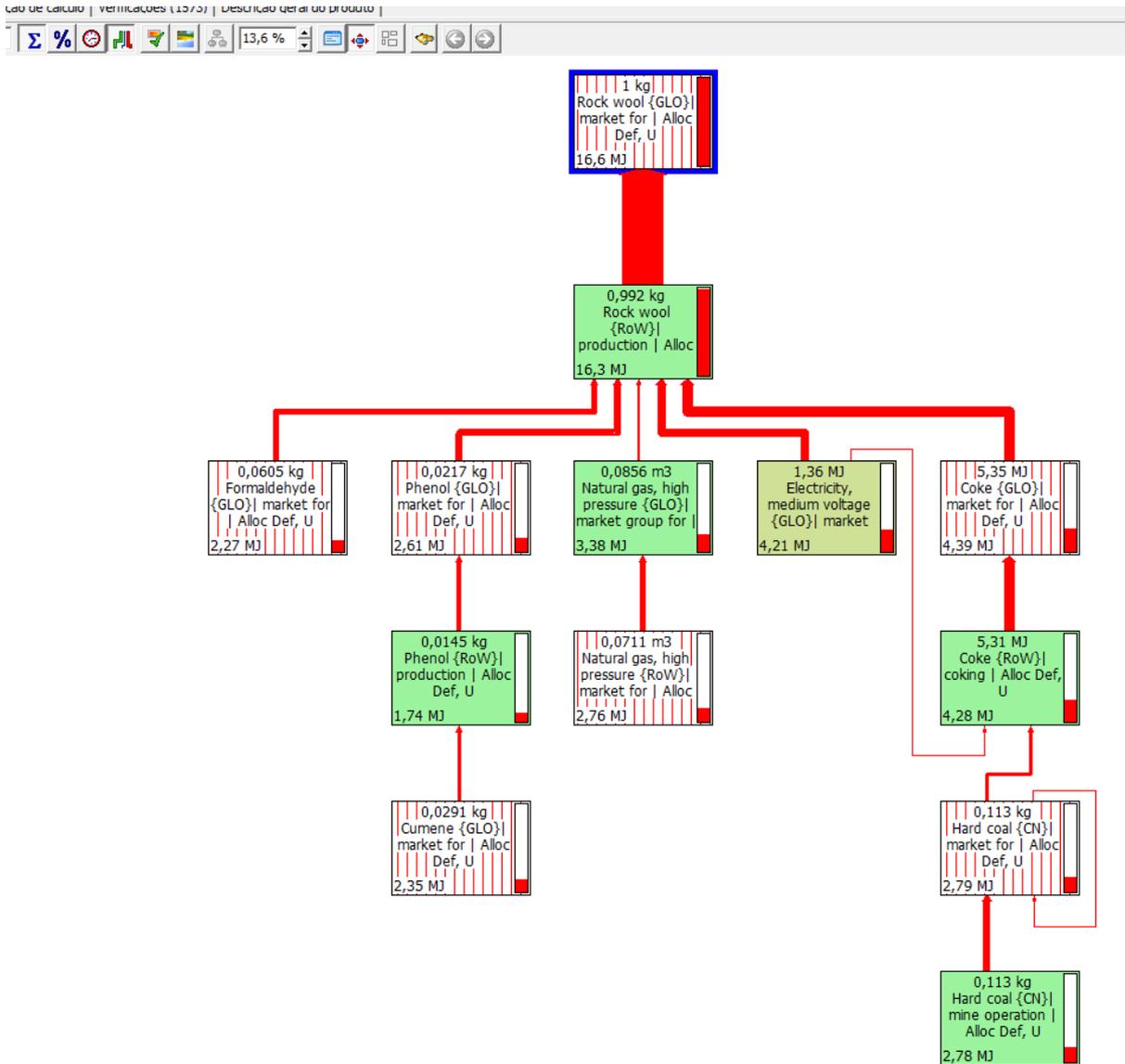
- Demais instalações

					EDIFÍCIO 1	EDIFÍCIO 2	EDIFÍCIO 3	EDIFÍCIO 4	EDIFÍCIO 5
	UND	QTD./PTO	PESO/UNID		QTD. DE PONTOS				
					TOTAL (KG)				
INSTALAÇÃO DE GÁS (FOGÃO)									
TUBO AÇO GALVANIZADO 3/4"	m	15,00	1,23		24,00	24,00	54,00	18,00	76,00
					442,80	442,80	996,30	332,10	1402,20
INSTALAÇÃO DE SPLIT									
TUBO DE COBRE SOLDÁVEL 22mm (3/4")	m	10,00	0,36					54,00	288,00
TUBO DE COBRE SOLDÁVEL 42mm (1 1/2")	m	10,00	0,92					54,00	288,00
								498,42	2658,24
								692,82	3695,04

APÊNDICE B – DADOS DE EI E CI EXTRAÍDOS DO ECOINVENT POR MEIO DO SIMAPRO

Lã mineral – rock wool {GLO}; market for

ENERGIA



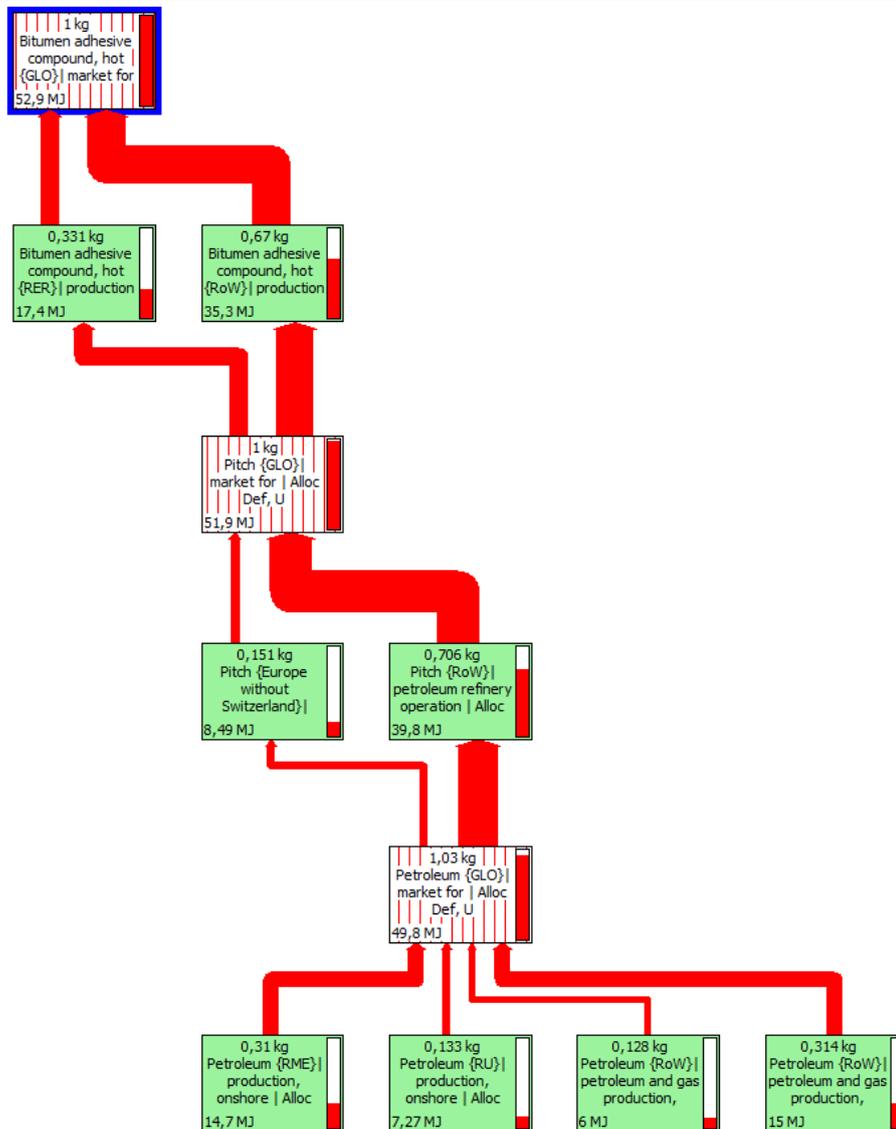
Sele	Categoria de impacto	Unidade	Rock wool {GLO} market for Alloc Def, U
	Total	MJ	16,6
<input checked="" type="checkbox"/>	Non renewable, fossil	MJ	14,9
<input checked="" type="checkbox"/>	Non-renewable, nuclear	MJ	0,903
<input checked="" type="checkbox"/>	Non-renewable, biomass	MJ	0,000431
<input checked="" type="checkbox"/>	Renewable, biomass	MJ	0,416
<input checked="" type="checkbox"/>	Renewable, wind, solar, geothe	MJ	0,0513
<input checked="" type="checkbox"/>	Renewable, water	MJ	0,347

CARBONO

Sele	Categoria de impacto	Unidade	Rock wool {GLO} market for Alloc Def, U
<input checked="" type="checkbox"/>	NM VOC	kg	0,00255
<input checked="" type="checkbox"/>	Carbon dioxide, fossil	kg	1,22
<input checked="" type="checkbox"/>	Sulphur dioxide	kg	0,0068
<input checked="" type="checkbox"/>	Nitrogen oxides	kg	0,00262
<input checked="" type="checkbox"/>	Particulates, <2.5 um	kg	0,00124
<input checked="" type="checkbox"/>	Land occupation	m2a	0,0825
<input checked="" type="checkbox"/>	BOD	kg	0,00179
<input checked="" type="checkbox"/>	Cadmium	kg	1,1E-9

- **Manta betuminosa – Bitumen adhesive compound, hot {GLO}, market for**

ENERGIA



Sele	Categoria de impacto	Unidade	Bitumen adhesive compound, hot {GLO} market for Alloc Def, U
	Total	MJ	52,9
<input checked="" type="checkbox"/>	Non renewable, fossil	MJ	51
<input checked="" type="checkbox"/>	Non-renewable, nuclear	MJ	0,358
<input checked="" type="checkbox"/>	Non-renewable, biomass	MJ	0,00145
<input checked="" type="checkbox"/>	Renewable, biomass	MJ	1,43
<input checked="" type="checkbox"/>	Renewable, wind, solar, geothe	MJ	0,0183
<input checked="" type="checkbox"/>	Renewable, water	MJ	0,113

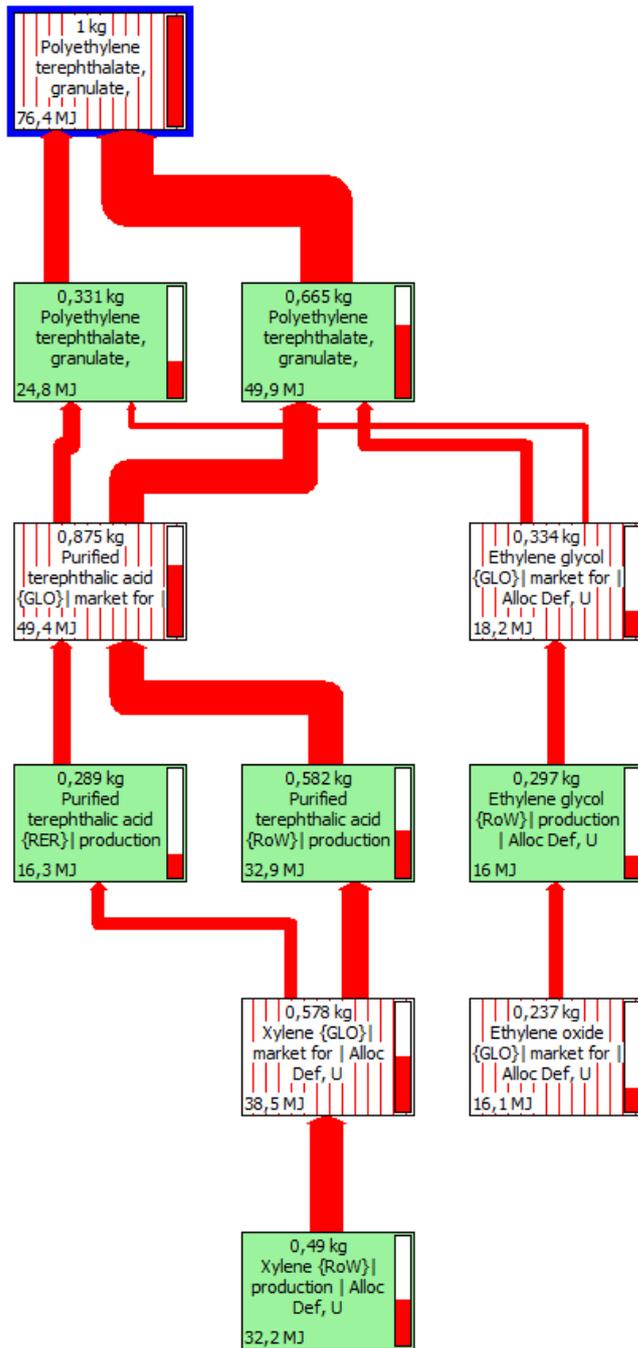
CARBONO

Sele	Categoria de impacto	Unidade	Bitumen adhesive compound, hot {GLO} market for Alloc Def, U
<input checked="" type="checkbox"/>	NM VOC	kg	0,00279
<input checked="" type="checkbox"/>	Carbon dioxide, fossil	kg	0,476
<input checked="" type="checkbox"/>	Sulphur dioxide	kg	0,0035
<input checked="" type="checkbox"/>	Nitrogen oxides	kg	0,00166
<input checked="" type="checkbox"/>	Particulates, <2.5 um	kg	0,000296
<input checked="" type="checkbox"/>	Land occupation	m2a	0,225
<input checked="" type="checkbox"/>	BOD	kg	0,0105
<input checked="" type="checkbox"/>	Cadmium	kg	1,09E-9

- **Membrana poliéster para vidro** - Junção de 2 processos: o primeiro é a fabricação do material (polyethylene terephthalate - PET). Depois tem a transformação desse material em filme.

ENERGIA (para produção do material)

Sele	Categoria de impacto	Unidade	Polyethylene terephthalate, granulate, amorphous {GLO} market for Alloc Def, U
	Total	MJ	76,4
<input checked="" type="checkbox"/>	Non renewable, fossil	MJ	69,7
<input checked="" type="checkbox"/>	Non-renewable, nuclear	MJ	4,43
<input checked="" type="checkbox"/>	Non-renewable, biomass	MJ	0,000883
<input checked="" type="checkbox"/>	Renewable, biomass	MJ	1,05
<input checked="" type="checkbox"/>	Renewable, wind, solar, geothe	MJ	0,186
<input checked="" type="checkbox"/>	Renewable, water	MJ	0,982



CARBONO (para produção do material)

Sele	Categoria de impacto	Unidade	Polyethylene terephthalate, granulate, amorphous {GLO} market for Alloc Def, U
<input checked="" type="checkbox"/>	NMVOOC	kg	0,00309
<input checked="" type="checkbox"/>	Carbon dioxide, fossil	kg	2,46
<input checked="" type="checkbox"/>	Sulphur dioxide	kg	0,00789
<input checked="" type="checkbox"/>	Nitrogen oxides	kg	0,00539
<input checked="" type="checkbox"/>	Particulates, <2.5 um	kg	0,00162
<input checked="" type="checkbox"/>	Land occupation	m2a	0,16
<input checked="" type="checkbox"/>	BOD	kg	0,00313
<input checked="" type="checkbox"/>	Cadmium	kg	2,92E-9

ENERGIA (para transformação do material em filme)

Sele	Categoria de impacto /	Unidade	Total	PET film (production only) E
	Total	MJ	110	110
<input checked="" type="checkbox"/>	Non renewable, fossil	MJ	100	100
<input checked="" type="checkbox"/>	Non-renewable, nuclear	MJ	8,78	8,78
<input checked="" type="checkbox"/>	Renewable, biomass	MJ	0,401	0,401
<input checked="" type="checkbox"/>	Renewable, wind, solar, geother	MJ	0,135	0,135
<input checked="" type="checkbox"/>	Renewable, water	MJ	0,525	0,525

1 kg PET film (production only) E	110 MJ
-----------------------------------------	--------

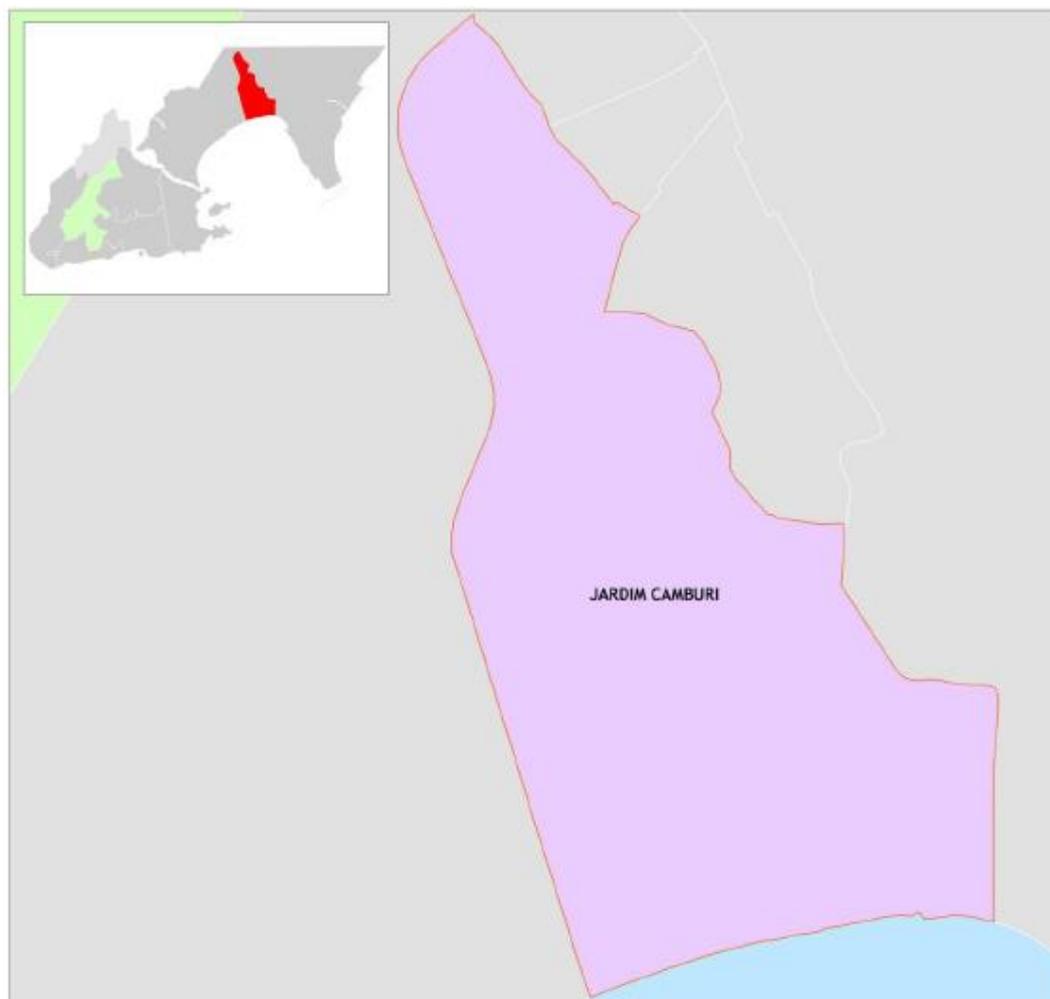
CARBONO (para transformação do material em filme)

Sele	Categoria de impacto /	Unidade	Total	PET film (production only) E
<input checked="" type="checkbox"/>	NM VOC	kg	0,00119	0,00119
<input checked="" type="checkbox"/>	Carbon dioxide, fossil	kg	4,43	4,43
<input checked="" type="checkbox"/>	Sulphur dioxide	kg	0,0148	0,0148
<input checked="" type="checkbox"/>	Nitrogen oxides	kg	0,0109	0,0109
<input checked="" type="checkbox"/>	BOD	kg	0,00103	0,00103

ANEXOS

ANEXO A – VITÓRIA BAIRRO A BAIRRO (PMV, 2013) – BAIRRO JARDIM CAMBURI

VIII. REGIONAL 8 – JARDIM CAMBURI



79 Jardim Camburi

79.1 Dados socioeconômicos

População

Tabela 1107 - Crescimento Populacional por Gênero no bairro Jardim Camburi - Vitória (ES) - 2000/2010

2000			2010			Variação %		
Total	Homens	Mulheres	Total	Homens	Mulheres	Total	Homens	Mulheres
23.882	11.065	12.817	39.157	18.230	20.927	63,96	64,75	63,28

Fonte: IBGE - Censo Demográfico 2000 e 2010

Elaboração: Gerência de Informações Municipais - SEGES/PMV

Tabela 1108 - População residente por sexo e grupo de idade no bairro Jardim Camburi - Vitória (ES) - 2010

Grupo de idade	Total	%	Homens	Mulheres	Proporção da população (%)	
					Homens	Mulheres
0 a 14 anos	6.243	15,94	3.189	3.054	51,08	48,92
15 a 24 anos	6.004	15,33	2.809	3.195	46,79	53,21
25 a 64 anos	24.564	62,73	11.311	13.253	46,05	53,95
Acima de 65 anos	2.346	5,99	921	1.425	39,26	60,74
Total	39.157	100,00	18.230	20.927	46,56	53,44

Fonte: IBGE - Censo Demográfico 2010 - Dados da Sinopse

Elaboração: Gerência de Informações Municipais - SEGES/PMV

Tabela 1109 - População residente, segundo cor ou raça, no bairro Jardim Camburi - Participação % - Vitória (ES) - 2010

Cor ou raça	Total	%
Branca	24.017	61,34
Preta	1.920	4,90
Amarela	231	0,59
Parda	12.912	32,97
Indígena	77	0,20
Sem declaração	-	-
Total	39.157	100,00

Fonte: IBGE - Censo Demográfico - Dados do Universo

Elaboração: Gerência de Informações Municipais - SEGES/PMV

Tabela 1110 - Pessoas de 5 anos ou mais de idade, segundo a cor ou raça e a condição de alfabetização, no bairro Jardim Camburi - Participação % - Vitória (ES) - 2010

Raça ou cor	Alfabetizadas %	Não alfabetizadas %
Branca	98,68	1,32
Preta	97,66	2,34
Amarela	99,56	0,44
Parda	98,32	1,68
Indígena	96,05	3,95
Total	98,51	1,49

Fonte: IBGE - Censo Demográfico - Dados do Universo

Elaboração: Gerência de Informações Municipais - SEGES/PMV

Domicílios

Tabela 1111 - Domicílios particulares permanentes e Moradores em domicílios particulares permanentes, segundo a espécie de unidade doméstica, no bairro Jardim Camburi - Vitória (ES) - 2010

	Total	Espécie de unidade doméstica			
		Unipessoal	Nuclear	Estendida	Composta
Domicílios	14.451	2.456	9.745	1.643	607
Moradores em Domicílios	39.077	2.456	28.620	6.063	1.938
Média de Moradores	2,70	1,00	2,94	3,69	3,19

Fonte: IBGE - Censo Demográfico - Dados do Universo

Elaboração: Gerência de Informações Municipais - SEGES/PMV

Tabela 1112 - Domicílios particulares permanentes e Moradores em domicílios particulares permanentes, segundo a forma de abastecimento de água, no bairro Jardim Camburi - Vitória (ES) - 2010

Forma de abastecimento de água	Domicílios particulares permanentes (Unidades)	Moradores em domicílios particulares permanentes (Pessoas)
Rede geral	14.199	38.315
Poço ou nascente na propriedade	245	745
Poço ou nascente fora da propriedade	7	17
Carro-pipa	-	-
Água da chuva armazenada em cisterna	-	-
Água da chuva armazenada de outra forma	-	-
Rios, açudes, lagos ou igarapés	-	-
Poço ou nascente na aldeia	-	-
Poço ou nascente fora da aldeia	-	-
Outra	-	-
Total	14.451	39.077

Fonte: IBGE - Censo Demográfico - Dados do Universo

Elaboração: Gerência de Informações Municipais - SEGES/PMV

Tabela 1113 - Domicílios particulares permanentes, segundo a existência de banheiro ou sanitário e esgotamento sanitário, no bairro Jardim Camburi - Vitória (ES) - 2010

Categorias	Quantitativo	%
<i>Tinham banheiro - de uso exclusivo do domicílio</i>	14.431	99,86
Tinham banheiro - de uso exclusivo do domicílio - rede geral de esgoto ou pluvial	14.322	
Tinham banheiro - de uso exclusivo do domicílio - fossa séptica	55	
Tinham banheiro - de uso exclusivo do domicílio - fossa rudimentar	43	
Tinham banheiro - de uso exclusivo do domicílio - vala	6	
Tinham banheiro - de uso exclusivo do domicílio - rio, lago ou mar	3	
Tinham banheiro - de uso exclusivo do domicílio - outro	2	
<i>Tinham sanitário</i>	18	0,12
Tinham sanitário - rede geral de esgoto ou pluvial	15	
Tinham sanitário - fossa séptica	-	
Tinham sanitário - fossa rudimentar	2	
Tinham sanitário - vala	1	
Tinham sanitário - rio, lago ou mar	-	
Tinham sanitário - outro	-	
<i>Não tinham banheiro nem sanitário</i>	2	0,01
Total	14.451	100,00

Fonte: IBGE - Censo Demográfico - Dados do Universo

Elaboração: Gerência de Informações Municipais - SEGES/PMV

Obs.: A categoria "Tinham sanitário" inclui banheiro de uso comum a mais de um domicílio.

Tabela 1114 - Domicílios particulares permanentes e Moradores em domicílios particulares permanentes, segundo destino do lixo, no bairro Jardim Camburi - Vitória (ES) - 2010

Destino do lixo		Domicílios particulares permanentes (Unidades)	Moradores em domicílios particulares permanentes (Pessoas)
Coletado	Total coletado	14.444	39.057
	Coletado por serviço de limpeza	12.543	34.343
	Coletado em caçamba de serviço de limpeza	1.901	4.714
	%	99,95	99,95
	Total não coletado	7	20
Não coletado	Queimado (na propriedade)	2	8
	Enterrado (na propriedade)	-	-
	Jogado em terreno baldio ou logradouro	3	9
	Jogado em rio, lago ou mar	-	-
	Outro destino	2	3
	%	0,05	0,05
Total		14.451	39.077

Fonte: IBGE - Censo Demográfico - Dados do Universo

Elaboração: Gerência de Informações Municipais - SEGES/PMV

Emprego e Renda

Tabela 1115 - Valor do rendimento nominal médio mensal dos domicílios particulares permanentes, no bairro Jardim Camburi - Vitória (ES) - 2010

Tipo de domicílio	Rendimento Médio (R\$)
Casa	6.145,02
Casa de vila ou em condomínio	7.561,37
Apartamento	5.365,79
Habitação em casa de cômodos, cortiço ou cabeça de porco	1.377,67
Oca ou maloca	-
Total	5.468,89

Fonte: IBGE - Censo Demográfico - Dados do Universo

Elaboração: Gerência de Informações Municipais - SEGES/PMV

Tabela 1116 - Domicílios particulares permanentes, segundo classes de rendimento nominal mensal domiciliar no bairro Jardim Camburi, Vitória (ES) - 2010

Classe de rendimento nominal mensal domiciliar	Domicílios	%
Até 1/2 salário mínimo	16	0,11
Mais de 1/2 a 1 salário mínimo	187	1,29
Mais de 1 a 2 salários mínimos	650	4,50
Mais de 2 a 5 salários mínimos	2.720	18,82
Mais de 5 a 10 salários mínimos	4.842	33,51
Mais de 10 a 20 salários mínimos	4.270	29,55
Mais de 20 salários mínimos	1.495	10,35
Sem rendimento	271	1,88
Sem declaração	-	-
Total de domicílios	14.451	100,00

Fonte: IBGE - Censo Demográfico - Dados do Universo

Elaboração: Gerência de Informações Municipais - SEGES/PMV

Obs: 1 - Não estão incluídos os bairros Carapina I, Hélio Ferraz, De Fátima e Parque Industrial.

2 - Salário mínimo utilizado: R\$ 510,00.

3 - A categoria Sem rendimento inclui os domicílios com rendimento mensal domiciliar somente em benefícios.

Tabela 1117 - Pessoas de 10 anos ou mais de idade, por cor ou raça, segundo as classes de rendimento nominal mensal no bairro Jardim Camburi, Vitória (ES) - 2010

Classe de rendimento	Branca	Preta	Amarela	Parda	Indígena
Até 1/4 de salário mínimo	16	3	-	27	1
Mais de 1/4 a 1/2 salário mínimo	72	7	2	50	1
Mais de 1/2 a 1 salário mínimo	1.058	156	11	776	6
Mais de 1 a 2 salários mínimos	2.213	291	31	1.516	14
Mais de 2 a 3 salários mínimos	1.904	167	27	1.186	9
Mais de 3 a 5 salários mínimos	3.384	288	26	1.741	7
Mais de 5 a 10 salários mínimos	4.733	343	44	2.156	14
Mais de 10 a 15 salários mínimos	1.277	93	14	514	1
Mais de 15 a 20 salários mínimos	673	46	7	291	-
Mais de 20 a 30 salários mínimos	310	12	2	118	3
Mais de 30 salários mínimos	128	8	-	50	-
Sem rendimento	5.496	401	58	3.246	18
Sem declaração	-	-	-	-	-
Total da população por cor ou raça	21.264	1.815	222	11.671	74
Participação %	60,67	5,18	0,63	33,30	0,21
Total da população do bairro	35.046				

Fonte: IBGE - Censo Demográfico - Dados do Universo

Elaboração: Gerência de Informações Municipais - SEGES/PMV

Obs: 1 - A categoria Sem rendimento inclui as pessoas que recebiam somente em benefícios.

2 - Salário mínimo utilizado: R\$ 510,00.

Atividades Econômicas

Tabela 1118 - Inscrições CNAE por atividade econômica - Jardim Camburi e Vitória (ES) - 2011

Setor de Atividade Econômica	Nº de Inscrições					
	Bairro: Jardim Camburi		Região 8		Vitória	
	Total	%	Total	%	Total	%
Comércio	4.494	38,39	4.494	38,39	56.066	36,90
Indústria	290	2,48	290	2,48	3.914	2,58
Serviços	6.914	59,06	6914	59,06	91.524	60,24
Extração Mineral	5	0,04	5	0,04	216	0,14
Agropecuária	3	0,03	3	0,03	179	0,12
Pesca/ Aquicultura	1	0,01	1	0,01	27	0,02
Total	11.707	100,00	11.707	100,00	151.926	100,00

Fonte: PMV/SEMFA/GCM/CCM - Coordenação de Cadastro Mobiliário. Período de 01/01/2011 a 16/12/2011.

Elaboração: Gerência de Informações Municipais - SEGES/PMV

79.2 Investimentos realizados – 2005-2012

Tabela 1119 - Obras/serviços concluídos, por origem no bairro Jardim Camburi - Vitória (ES) - 2005-2012

Origem	Obra/serviço
OP	Implantação de Circuito Cultural (Serviço)
	Construção de novo prédio para o CMEI Ana Maria Chaves de Colares
	Construção de área de lazer na Praça Nilze Mendes
	Macro drenagem em Jardim Camburi
Cidade	Reforma da EMEF Elzira Vivacqua dos Santos
	Reforma da Praça Miguel Arcanjo Fraga (Prç. da Bocha)
	Construção de redes de drenagem em Jardim Camburi
	Construção de deck para Módulo SOE na Orla de Camburi
	Pavimentação e drenagem da rua Projetada 10
	Pavimentação e drenagem nas ruas Oswaldo Bastos e Manuel Nunes
	Realinhamento de canteiro entre av. Dante Micheline e Norte Sul
	Recuperação do espigão norte da Praia de Camburi
	Iluminação da Av. Gelu Vervloet dos Santos (Norte-Sul)
	Melhoria da iluminação pública do bairro
Melhoria da iluminação pública do Parque Fazendinha	

Fonte: Gerência do Orçamento Participativo - SEGES/PMV
 Elaboração: Gerência de Informações Municipais - SEGES/PMV

Tabela 1120 - Obras/serviços em execução, por origem no bairro Jardim Camburi - Vitória (ES) - 2005-2012

Origem	Obra/serviço
Cidade	Construção de viaduto - Parceria Vale
	Obras de saneamento na Praia de Camburi (Lagoa Pau-Brasil)

Fonte: Gerência do Orçamento Participativo - SEGES/PMV
 Elaboração: Gerência de Informações Municipais - SEGES/PMV

79.3 Equipamentos por Área

Tabela 1121 - Quantidade de equipamentos públicos no Bairro Jardim Camburi, por área de atuação - Vitória (ES) - 2012

Área de atuação	Equipamentos
Saúde	Academia Popular da Pessoa Idosa - Jardim Camburi
	Academia Popular da Pessoa Idosa - Jardim Camburi - Praça Mario Elias da Silva
	Módulo SOE - Jardim Camburi
	Unidade de Saúde - Jardim Camburi (Raul Oliveira Nunes)
Trabalho e Renda	Telecentro - T J C
Assistência Social	Casa Lar II
	Centro de Convivência para a Terceira Idade de Jardim Camburi
	Núcleo Contra a Violência ao Idoso
Educação	CMEI Ana Maria Chaves Colares
	CMEI João Pedro de Aguiar
	EMEF Adevalni S. Ferreira de Azevedo
	EMEF Elzira Vivácqua dos Santos
	EMEF Maria Madalena de Oliveira Domingues
Esporte e Lazer	Campo de Bocha - Jardim Camburi
	Praça Nilze Mendes Rangel (Campo de Futebol Sintético, Escolhinhas de Esportes, Quadra Poliesportiva)
	Escolinhas de Esportes Jardim Camburi
	Quadra Poliesportiva - Jardim Camburi
Meio Ambiente	Parque Municipal da Fazendinha
Obras	Gerência Regional 8 - Jardim Camburi
Administração Pública	Viveiro Municipal Reverendo Jaime Wright
	Centro de Capacitação de Água
Serviços Urbanos	Estação Bota Fora Jardim Camburi
Segurança Urbana	Posto Avançado da Guarda
Total de equipamentos: 25	

Fonte: SEGES/GEO

Elaboração: Gerência de Informações Municipais - SEGES/PMV