

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ENERGIA**

***RETROFIT* ENERGÉTICO DE UM EDIFÍCIO EDUCACIONAL BRASILEIRO  
PARA TRANSFORMÁ-LO EM UM EDIFÍCIO ENERGIA ZERO**

**Arquiteta e Urbanista CLÁUDIA MARIA ALLIPRANDINI**

Itajubá, Outubro de 2018

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ENERGIA**

**Arquiteta e Urbanista Cláudia Maria Alliprandini**

***RETROFIT* ENERGÉTICO DE UM EDIFÍCIO EDUCACIONAL BRASILEIRO**  
**PARA TRANSFORMÁ-LO EM UM EDIFÍCIO ENERGIA ZERO**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Energia como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Mestre em Ciências em Engenharia de Energia.

**Área de Concentração:** Energia, Sociedade e Meio Ambiente (ESMA)

**Orientadora:** Prof.<sup>a</sup> Dra. Regina Mambeli Barros  
**Coorientadora:** Prof.<sup>a</sup> Dra. Daniele Ornaghi Sant'Anna

Itajubá, Outubro de 2018

## **DEDICATÓRIA**

“À minha filha Roberta que habita as entranhas da minha alma e certamente nasceu para mim!”

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço à minha orientadora, a Prof<sup>a</sup>. Dra. Regina Mambeli Barros, que há anos me incentivava a fazer um mestrado e me apoiou no momento que tomei a decisão de ingressar no programa, disponibilizando a me orientar.

À minha coorientadora Prof<sup>a</sup>. Dra. Daniele Ornaghi Sant'Anna, que com sua visão de arquiteta pôde compartilhar comigo seus conhecimentos na área de conforto térmico.

Ao Prof. Dr. Arnaldo Martin Martinez Reyes que colaborou no meu aprendizado sobre a Energia.

Agradeço ao Prof. Dr. Geraldo Lúcio Tiago Filho, que me despertou para o universo da Termodinâmica.

Ao meu marido Fernando que me apoiou com seu companheirismo, para que eu pudesse me dedicar a este mestrado.

Aos amigos Aline da Silva e Maurish Melian Moreno, companheiros de trabalho no dia a dia e que tanto me ajudaram e me ensinaram com questões importantes relacionadas a esta dissertação.

À equipe de trabalho do meu escritório de arquitetura que esteve sempre dedicada e confiante neste período que dediquei ao mestrado.

À minha filha Roberta, pelos momentos em que estive ausente no seu dia a dia, mas que compreendeu todo meu esforço e dedicação, pedindo-me apenas notas boas nos trabalhos e provas de cada disciplina que cursei no mestrado: *“Vai mãe !!!”*

## EPÍGRAFE

*“Quando mais envelhecemos, mais precisamos de ter que fazer. Mais vale morrer do que arrastarmos na ociosidade uma velhice insípida: trabalhar é viver”.*

*(Voltaire)*

## RESUMO

Nos últimos anos, a indústria da construção tem se concentrado de forma abrangente no desempenho energético dos edifícios e na obtenção de maior conforto para seus ocupantes. A pesquisa aqui apresentada é sobre o *retrofit* energético de um edifício educacional existente, na busca por eficiência energética, sustentabilidade e zerar o seu balanço anual de energia em relação ao desempenho e operação. Neste trabalho foi desenvolvida uma análise energética para delinear o potencial de transformação do edifício em um Edifício Energia Zero (EEZ). Primeiramente foi feito um diagnóstico da situação real do edifício, suas características, seu consumo de energia e aplicou-se o RTQ-C para avaliar o desempenho térmico da envoltória que foi classificado como nível “C”. A carga térmica também foi avaliada para compreender o comportamento térmico do edifício, assim como a ventilação natural para compreender o fluxo do ar dentro do mesmo. Os resultados obtidos orientaram quais soluções passivas e materiais poderiam ser aplicados no *retrofit* da envoltória, a fim de proporcionar o menor consumo de energia e, conseqüentemente, maior conforto interno para seus ocupantes. A aplicação de protetores solares na envoltória possibilitou uma redução de mais de 50 % da carga térmica em alguns ambientes e ajudou o edifício a atingir o nível “B” de eficiência energética. A criação de ventilação natural cruzada melhorou consideravelmente o fluxo de ar em alguns ambientes, chegando a 20 vezes maior que o fluxo original. A redução nas aberturas translúcidas ajudaram a reduzir ainda mais a carga térmica na ordem de 60 % em alguns ambientes e influenciou na classificação final do edifício que passou para o nível “A” de eficiência energética. A estratégia ativa de eficiência energética, as trocas das lâmpadas, resultou em uma redução de 8,78 % no consumo anual de eletricidade do edifício. Dentro do conceito EEZ, é necessário obter energia elétrica para consumo através de fontes renováveis, e em função disso, adotou-se a tecnologia fotovoltaica com um sistema conectado à rede, em uma proposta de aplicação dos painéis fotovoltaicos policristalino ao edifício (BAPV). Avaliou-se o potencial energético do local e projetou-se um sistema de geração capaz de suprir as necessidades energéticas do edifício durante o período de 25 anos. O estudo também avaliou a viabilidade econômica de todas as intervenções e do sistema de geração e obteve um resultado positivo para as ações ativas analisadas separadamente, porém, as ações passivas não foram viáveis. As necessidades de energia elétrica do edifício foram reduzidas a zero, caracterizando-o assim como um EEZ Energia Local.

**Palavras-chave:** *Retrofit*, Eficiência Energética, Conforto Térmico, Edifícios Energia Zero (EEZ), BAPV.

## ABSTRACT

In recent years, the construction industry has been concentrating comprehensively in the energy performance of the buildings and in obtaining greater comfort for its occupants. The research presented here is about the energy retrofit of an existing educational building, in the search for energy efficiency, sustainability and render its annual energy balance null. In this work, an energy analysis was developed to delineate the potential of transformation of the building into a Zero Energy Building (ZEB). First, a diagnosis was made of the real situation of the building, its characteristics, its energy consumption and the RTQ-C was applied to evaluate the thermal performance of the envelopment that was classified as level "C". The thermal load was also evaluated to understand the thermal behavior of the building, as well as the natural ventilation to understand the flow of air into the building. The results obtained guided which passive and material solutions could be applied to the retrofit of the envelopment, in order to provide the lowest energy use and, consequently, greater internal comfort for its occupants. The application of solar protectors in the allowed a reduction of more than 50% of the thermal load in some environments and helped the building to achieve the "B" level of energy efficiency. The creation of natural cross ventilation improved airflow in some environments considerably, reaching to 20 times greater than the original flow. The reduction in translucent openings helped further reduce the thermal load in the order of 60% in some environments and influenced the final classification of the building that passed to the level "A" of energy efficiency. The active strategy of energy efficiency, the lamp changes, resulted in a reduction of 8.78% in the annual electricity consumption of the building. Within the ZEB concept, it is necessary to obtain electricity for consumption through renewable sources, and because of this it was adopted photovoltaic technology with a system connected to the grid, in a proposal of application of polycrystalline photovoltaic panels to the building (BAPV). The energy potential of the site was evaluated and was designed a system of generation capable to supply the energy needs of the building during the period of 25 years. The study also evaluated the economic viability of all interventions and the generation system and obtained a positive result for the active shares analyzed separately, however, passive actions were not feasible. The building's electricity needs were reduced to zero, characterizing it as a ZEB local energy.

**Keywords:** Retrofit, Energy Efficiency, Thermal Comfort, Zero Energy Buildings (ZEB), BAPV.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Relação entre humanos, clima e meio ambiente na perspectiva bioclimática. ....	32
Figura 2.2: Campos inter-relacionados do Equilíbrio Bioclimático.....	32
Figura 2.3: A carta bioclimática de Olgyay.....	33
Figura 2.4: Carta bioclimática de Givoni. ....	35
Figura 2.5: Ventilação por ação dos ventos. a) cruzada. b) unilateral.....	38
Figura 2.6: Corte esquemático do sistema de ventilação do Centro de Reabilitação do Hospital Sarah Lago Norte em Brasília. ....	38
Figura 2.7: Parlamento alemão localizado em Berlim - Projeto de Norman Foster.....	39
Figura 2.8: Palácio do Planalto.....	41
Figura 2.9: Edifício da empresa COUROQUÍMICA em Franca/SP. Projeto arquitetônico da autora. ....	42
Figura 2.10: Protetores horizontais fixos.....	42
Figura 2.11: Edifício CCST do INPE em São José dos Campos/SP. Projeto arquitetônico da autora. ....	43
Figura 2.12: Dispositivos de sombreamento: Persianas (a) e Brise-soleil (b).....	44
Figura 2.13: Diferentes tipos de sombreamento solar: (a) Modelo de referência. (b) Modelo com sombreamento fixo. (c) Modelo com sombreamento dinâmico e completamente retrátil. ....	45
Figura 2.14: Tríade <i>Vitruviana</i> . ....	48
Figura 2.15: Casa do Muxarabiê, onde se encontra a Biblioteca Antônio Torres na cidade de Diamantina, MG. ....	49
Figura 2.16: Palácio Capanema.....	51
Figura 2.17: Croquis de Lelé do corte esquemático do Hospital Sarah Rio de Janeiro. ....	51
Figura 2.18: Croquis de Lelé do corte do Hospital Sarah Fortaleza- CE.....	52
Figura 2.19: Uso da energia no Brasil em 2016. ....	53
Figura 2.20: Composição setorial do consumo de eletricidade. ....	54
Figura 2.21: Consumo de eletricidade pelos setores entre 2006 e 2015. ....	55
Figura 2.22: Principais marcos regulatórios brasileiros, a partir de 2001, na área de eficiência energética.....	59
Figura 2.23: Centro SEBRAE de Sustentabilidade em Cuiabá/MT.....	76
Figura 2.24: Mapa de irradiação solar do Brasil. ....	80

Figura 2.25: Principais agentes responsáveis pela degradações do módulo fotovoltaico. ....	81
Figura 2.26: Solar XXI, em Portugal, exemplo de BIPV em um EEZ.....	85
Figura 2.27: A nova casa de ópera em Oslo. As células solares estão integradas na fachada de vidro triangular virada a sul.....	87
Figura 3.1: Mapa metodológico. ....	94
Figura 3.2: Bloco M3 do IRN – UNIFEI. ....	95
Figura 3.3: Campus José Rodrigues Seabra - Localização do edifício Bloco M3 - IRN.....	96
Figura 3.4: Fluxograma esquemático do cálculo da carga térmica. ....	98
Figura 3.5: Ventilação cruzada devida ação dos ventos, com duas aberturas por fachada ....	101
Figura 3.6: Ventilação unilateral devida à ação dos ventos, com uma única abertura.....	102
Figura 3.7: Fluxograma esquemático da aplicação de tecnologia fotovoltaica ao edifício otimizado. ....	104
Figura 4.1: Planta baixa representativa do pavimento térreo. ....	110
Figura 4.2: Planta baixa representativa do pavimento superior. ....	111
Figura 4.3: Fachada principal - NE. ....	113
Figura 4.4: Fachada posterior - SO.....	113
Figura 4.5: a) Fachada principal - NO. b) Fachada principal - SE.....	113
Figura 4.6: Distribuição do consumo final de energia por tipo de equipamento.....	116
Figura 4.7: Consumo estimado de energia por mês, durante o ano de 2017.....	117
Figura 4.8: Carga térmica interna por fonte de calor.....	119
Figura 4.9: Análise da carga térmica externa e interna atual do edifício. ....	121
Figura 4.10: Identificação dos elementos da envoltória.....	122
Figura 4.11: Orientação o edifício segundo o RTQ-C.....	125
Figura 4.12: Carta bioclimática de Itajubá (MG). ....	126
Figura 4.13: Avaliação com os pré-requisitos para a envoltória utilizando o Web Prescritivo. ....	127
Figura 4.14: Variação da transmitância térmica e da absortância em função das características das paredes: a) parede existente. b) parede retrofitada.....	132
Figura 4.15: Variação da transmitância térmica e da absortância em função das características da cobertura: a) cobertura existente. b) cobertura com aplicação de isolante térmico.....	132
Figura 4.16: Carga térmica externa para cada ambiente após a aplicação das estratégias passivas.....	133
Figura 4.17: Porcentagem de redução da carga térmica externa de cada ambiente após a aplicação das estratégias passivas. ....	134

Figura 4.18: Resultado do nível de eficiência energética da envoltória do edifício após aplicação das estratégias passivas. ....	135
Figura 4.19: Resultado do nível de eficiência energética da envoltória do edifício após redução nas dimensões das aberturas. ....	135
Figura 4.20: Carga térmica externa para as diferentes configurações do edifício.....	136
Figura 4.21: Fluxo de ar do edifício atual e otimizado.....	138
Figura 4.22: Carga térmica interna por ambiente do edifício atual e após a troca das lâmpadas. ....	140
Figura 4.23: Proposta arquitetônica para implantação da tecnologia fotovoltaica no edifício otimizado. ....	143
Figura 0.1: Composição da parede (medidas em mm). a) atual. b) parede proposta. ....	161
Figura 0.2: Diagrama esquemático do tijolo presente no edifício estudado.....	162
Figura 0.3: Representação gráfica de $A_a$ e $A_b$ . ....	163
Figura 0.4: Representação gráfica de $R_a$ , e $R_b$ . a) para a parede atual. b) para a parede proposta. ....	164

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Critérios considerados para o cálculo da ventilação natural.....	100
Tabela 4.1: Áreas dos ambientes do edifício em estudo.....	111
Tabela 4.2: Áreas dos fechamentos opacos (paredes).....	112
Tabela 4.3: Área das aberturas por ambiente. ....	114
Tabela 4.4: Descrição das cargas dos equipamentos elétrico-eletrônicos.....	115
Tabela 4.5: Descrição das cargas do ar condicionado.....	115
Tabela 4.6: Descrição das cargas de iluminação.....	115
Tabela 4.7: Consumo estimado de energia por mês, durante o ano de 2017.....	116
Tabela 4.8: Carga térmica externa por tipo de superfície.....	117
Tabela 4.9: Carga térmica interna por fonte de calor.....	118
Tabela 4.10: Carga térmica total para cada ambiente e a carga térmica total do edifício. ....	120
Tabela 4.11: Dados gerais para cálculo do RTQ-C.....	122
Tabela 4.12: Limites de intervalos dos níveis de eficiência.....	126
Tabela 4.13: Indicador de consumo da envoltória ( $IC_{env}$ ).....	127
Tabela 4.14: Fluxo de ar dos ambientes do edifício estudado que apresentam ventilação cruzada para os ângulos de incidência de $0^\circ$ e $45^\circ$ .....	128
Tabela 4.15: Fluxo de ar dos ambientes do edifício estudado com abertura unilateral.....	129
Tabela 4.16: Fluxo de ar do edifício atual e após modificações nas aberturas.....	137
Tabela 4.17: Comparativo entre as lâmpadas fluorescentes e as lâmpadas tipo LED utilizadas no edifício.....	139
Tabela 4.18: Carga térmica interna geral do edifício com a troca das lâmpadas.....	140
Tabela 4.19: Redução de energia elétrica no edifício otimizado.....	141
Tabela 4.20: Parâmetros do painel fotovoltaico.....	142
Tabela 4.21: Análise financeira da troca das lâmpadas.....	144
Tabela 4.22: Análise financeira do sistema fotovoltaico.....	144
Tabela 4.23: Análise financeira das ações passivas e o sistema fotovoltaico.....	145
Tabela 0.1: Planilha orçamentária da obra – ações passivas.....	167
Tabela 0.2: Planilha orçamentária da troca das lâmpadas.....	168
Tabela 0.3: Planilha orçamentária do sistema fotovoltaico.....	168
Tabela 0.4: Análise financeira do sistema fotovoltaico.....	169
Tabela 0.5: Análise financeira do sistema fotovoltaico + ações passivas.....	170
Tabela 0.6: Análise financeira da troca das lâmpadas.....	171

## **LISTA DE QUADROS**

Quadro 2.1: Principais mudanças da Resolução ANEEL 687 de 15 de novembro de 2015....	58
Quadro 2.2: Hierarquia das opções de fontes de energia renovável para uso de EEZ. ....	70

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACV	Análise do ciclo de vida
Aenv	Área da envoltória
AHS	Ângulo horizontal de sombreamento
ANC	Área de piso dos ambientes não condicionados de permanência prolongada
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANTAC	Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído
Apcob	Área de projeção da cobertura
Ape	Área de projeção
AQUA	Alta Qualidade Ambiental
ASHRAE	<i>American Society of Heating, Refrigerating and Air</i>
Atot	Área total de piso
AVAC	Aquecimento, ventilação e ar condicionado
AVS	Ângulo vertical de sombreamento
BAPV	<i>Building Adapted Photovoltaics</i> (Sistemas fotovoltaicos aplicados às edificações)
BIPV	<i>Building Integrated Photovoltaics</i> (Sistemas fotovoltaicos integrados às edificações)
BRE	<i>Building Research Establishment</i>
BREEAM	<i>Building Research Establishment Environmental Assessment Method</i>
CGIEE	Comitê Gestor de Indicadores e Níveis de Eficiência Energética
DOE	Departamento de Energia
EEZ	Edifício Energia Zero
ENCE	Etiqueta Nacional de Conservação de Energia
Env.	Envoltória
EPBD	Energy Performance of Buildings Directive
FA	Fator de altura
FF	Fator de forma
FNDE	Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação
FS	Fator solar

FSC	<i>Forest Stewardship Council</i>
FV	Fotovoltaico(a)
GBC	<i>Green Building Council</i>
GD	Geração distribuída
GEE	Gases do Efeito Estufa
GWp	Gigawatt-pico
HQE	<i>Haute Qualité Environnementale</i>
IC	Indicador de consumo
ICenv	Indicador de Consumo da Envoltória
IC <sub>máx</sub>	Indicador de Consumo Máximo
IC <sub>máx</sub> D	Indicador de consumo máximo do nível de eficiência D
IC <sub>mín</sub>	Indicador de Consumo Mínimo
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
IRN	Instituto de Recursos Naturais
kW	Kilowatt
kWp	Kilowatt-pico
LABEEE	Laboratório de Eficiência Energética em Edificações
LEED	<i>Leadership in Energy and Environmental Design</i>
MME	Ministérios de Minas e Energia
MW	Megawatt
M & V	Mensuração e Verificação
NE	Nordeste
NO	Noroeste
PAFo	Percentual de Abertura na Fachada Oeste
PAFt	Percentual de Abertura na Fachada total
Pcc	Potência do sistema em corrente contínua
PME	Programa de Mobilização Energética
PNE	Plano Nacional de Energia
PNEf	Plano Nacional de Eficiência Energética
PROCEL	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica

PV	Abreviação para a palavra ‘fotovoltaica’, que em inglês é ‘ <i>photovoltaic</i> ’
RAC-C	Regulamento de Avaliação da Conformidade do Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos
REC	Certificados de Energia Renovável
RTQ-C	Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos
RTQ-R	Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais
SE	Sudeste
SELIC	Sistema Especial de Liquidação e Custódia
SFA	Sistemas Fotovoltaicos Autônomos
SFCR	Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede
SO	Sudoeste
TBF	Taxa Básica Financeira
TIR	Taxa Interna de Retorno
TJLP	Taxa de Juros de Longo Prazo
TMA	Taxa Mínima de Atratividade
TBF	Taxa Básica Financeira
TIR	Taxa Interna de Retorno
U	Transmitância térmica
UNIFEI	Universidade Federal de Itajubá
$U_{par}$	Transmitância térmica da parede
UV	Ultravioleta
VPL	Valor Presente Líquido
ZEB	<i>Zero Energy Buildings</i>
ZB	Zona Bioclimática
Wp	Watt-pico

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>20</b>
1.1	JUSTIFICATIVA.....	24
1.2	OBJETIVOS.....	25
1.2.1	<i>Objetivo Geral.....</i>	<i>25</i>
1.2.2	<i>Objetivos Específicos.....</i>	<i>25</i>
1.3	ESTRUTURA .....	25
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>28</b>
2.1	ENERGIA.....	28
2.2	CALOR.....	28
2.3	CONFORTO TÉRMICO .....	29
2.3.1	<i>Clima .....</i>	<i>30</i>
2.3.2	<i>Estratégias bioclimáticas .....</i>	<i>31</i>
2.3.2.1	Métodos de avaliação bioclimáticos.....	32
2.3.2.2	Princípios bioclimáticos no projeto e redução do consumo de energia.....	36
2.3.3	<i>Ventilação natural.....</i>	<i>37</i>
2.3.4	<i>Resfriamento evaporativo.....</i>	<i>40</i>
2.3.5	<i>Elementos arquitetônicos que influenciam no conforto térmico.....</i>	<i>41</i>
2.3.6	<i>Inercia térmica .....</i>	<i>45</i>
2.4	ARQUITETURA SUSTENTÁVEL.....	46
2.5	ARQUITETURA BIOCLIMÁTICA .....	48
2.5.1	<i>Arquitetura Bioclimática no Brasil .....</i>	<i>49</i>
2.6	CONSUMO DE ELETRICIDADE NO BRASIL .....	53
2.7	POLÍTICAS, PROGRAMAS E REGULAMENTAÇÃO.....	55
2.8	EFICIÊNCIA ENERGÉTICA .....	59
2.8.1	<i>Eficiência energética no mundo – metodologias para avaliação ambiental .....</i>	<i>60</i>
2.8.2	<i>Etiquetagem de eficiência energética de edificações conforme o regulamento técnico da qualidade do nível de eficiência energética de edifícios comerciais, de serviços e públicos (RTQ-C) .....</i>	<i>62</i>
2.9	EDIFÍCIO ENERGIA ZERO (EEZ).....	64
2.9.1	<i>Definições.....</i>	<i>64</i>
2.9.2	<i>Políticas na área de edifícios de energia zero .....</i>	<i>71</i>

2.9.3	<i>Consumo próprio de energia em Edifícios de Energia Zero</i> .....	73
2.9.4	<i>Pesquisas e edifício de energia zero no Brasil</i> .....	73
2.9.5	<i>Projetos piloto</i> .....	75
2.9.6	<i>Tipologias e estratégias para alcançar a meta EEZ</i> .....	78
2.10	TECNOLOGIA FOTOVOLTAICA .....	79
2.10.1	<i>Sistemas fotovoltaicos</i> .....	80
2.10.2	<i>Eficiência no módulo fotovoltaico</i> .....	81
2.10.3	<i>Sistemas fotovoltaicos aplicados e integrados à edificação</i> .....	83
2.11	RETROFIT .....	87
2.11.1	<i>Retrofit definição</i> .....	87
2.11.2	<i>Retrofit e critérios de desempenho rumo ao EEZ</i> .....	89
2.11.3	<i>Projeto</i> .....	90
2.11.4	<i>Retrofit energético</i> .....	91
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	<b>94</b>
3.1	CARACTERIZAÇÃO DO EDIFÍCIO ESCOLHIDO .....	95
3.2	DIAGNÓSTICO DA SITUAÇÃO DO EDIFÍCIO ATUAL.....	96
3.2.1	<i>Estimativa do consumo atual de energia elétrica do edifício</i> .....	96
3.2.2	<i>Carga térmica</i> .....	97
3.2.3	<i>Classificação do nível de eficiência energética para a envoltória do edifício atual</i> 98	
3.2.4	<i>Cálculo da ventilação natural</i> .....	99
3.3	APLICAÇÃO DE ESTRATÉGIAS PASSIVAS PARA REDUÇÃO DA CARGA TÉRMICA E MELHORIA DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA .....	102
3.4	APLICAÇÃO DE ESTRATÉGIAS ATIVAS PARA REDUÇÃO E GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA DO EDIFÍCIO OTIMIZADO.....	102
3.5	PROPOSTA DE APLICAÇÃO DE TECNOLOGIA FOTOVOLTAICA AO EDIFÍCIO OTIMIZADO..	103
3.5.1	<i>Avaliação do potencial energético do local</i> .....	104
3.5.2	<i>Levantamento das áreas disponíveis</i> .....	104
3.5.3	<i>Fluxo de energia no tempo</i> .....	105
3.5.4	<i>Dimensionamento do sistema de geração</i> .....	105
3.5.5	<i>Levantamento da área dos painéis</i> .....	105
3.5.6	<i>Simulação do sistema de geração</i> .....	107
3.5.7	<i>Proposta arquitetônica</i> .....	107

3.6	VIABILIDADE ECONÔMICA.....	107
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>110</b>
4.1	CARACTERIZAÇÃO DO EDIFÍCIO ESCOLHIDO .....	110
4.1.1	<i>Características da envoltória .....</i>	<i>112</i>
4.1.2	<i>Iluminação natural .....</i>	<i>113</i>
4.1.3	<i>Ventilação natural .....</i>	<i>114</i>
4.2	DIAGNÓSTICO DA SITUAÇÃO ATUAL DO EDIFÍCIO.....	115
4.2.1	<i>Estimativa do consumo de energia elétrica atual do edifício .....</i>	<i>115</i>
4.2.2	<i>Carga térmica.....</i>	<i>117</i>
4.2.2.1	<i>Carga térmica externa.....</i>	<i>117</i>
4.2.2.2	<i>Carga térmica interna .....</i>	<i>118</i>
4.2.2.3	<i>Carga térmica total .....</i>	<i>119</i>
4.2.3	<i>Classificação do nível de eficiência energética para a envoltória do edifício atual adotando o RTQ-C .....</i>	<i>121</i>
4.2.4	<i>Ventilação natural .....</i>	<i>128</i>
4.2.5	<i>Conclusões parciais.....</i>	<i>129</i>
4.3	APLICAÇÃO DE ESTRATÉGIAS PASSIVAS PARA REDUÇÃO DA CARGA TÉRMICA E MELHORIA DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA .....	130
4.3.1	<i>Aplicação das estratégias de condicionamento térmico para Zona Bioclimática 2</i> <i>131</i>	
4.3.1.1	<i>Aberturas para ventilação e sombreamento das aberturas.....</i>	<i>131</i>
4.3.1.2	<i>Tipos de vedações externas .....</i>	<i>131</i>
4.3.2	<i>Carga térmica externa do edifício otimizado .....</i>	<i>132</i>
4.3.3	<i>Classificação do nível de eficiência energética para a envoltória após aplicação de estratégias passivas adotando o RTQ-C.....</i>	<i>134</i>
4.3.4	<i>Carga térmica externa com aberturas modificadas .....</i>	<i>136</i>
4.3.5	<i>Ventilação natural .....</i>	<i>136</i>
4.3.6	<i>Conclusões Parciais .....</i>	<i>138</i>
4.4	APLICAÇÃO DE ESTRATÉGIA ATIVA PARA REDUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA DO EDIFÍCIO OTIMIZADO .....	139
4.4.1	<i>Trocas das lâmpadas das luminárias .....</i>	<i>139</i>
4.4.1.1	<i>Carga térmica interna .....</i>	<i>139</i>
4.4.1.2	<i>Estimativa do novo consumo anual de energia elétrica do edifício. ....</i>	<i>141</i>

4.5	PROPOSTA DE APLICAÇÃO DE TECNOLOGIA FOTOVOLTAICA AO EDIFÍCIO OTIMIZADO..	141
4.5.1	<i>Levantamento da área disponível.....</i>	<i>141</i>
4.5.2	<i>Fluxo de energia no tempo.....</i>	<i>142</i>
4.5.3	<i>Dimensionamento do Sistema de Geração.....</i>	<i>142</i>
4.5.4	<i>Levantamento da área dos painéis e determinação do sistema de geração .....</i>	<i>142</i>
4.5.5	<i>Proposta arquitetônica.....</i>	<i>143</i>
4.5.6	<i>Conclusões parciais.....</i>	<i>143</i>
4.6	VIABILIDADE ECONÔMICA.....	144
4.6.1	<i>Conclusões parciais.....</i>	<i>145</i>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES FINAIS.....</b>	<b>146</b>
<b>6</b>	<b>TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>148</b>
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>149</b>
	<b>ANEXO A – Cálculo da transmitância térmica da parede e da cobertura segundo a ABNT NBR 15.220.....</b>	<b>161</b>
	<b>ANEXO B – Planilhas Orçamentárias e Análise Financeira.....</b>	<b>167</b>

# 1 INTRODUÇÃO

Com a possibilidade cada vez maior de esgotamento dos recursos naturais mais utilizados para gerar energia elétrica, reduzir o consumo de energia é uma ação fundamental para mitigar o consumo de energia, principalmente nas edificações. Diante desta real possibilidade associada com a população crescendo e migrando para os centros urbanos, a situação vem se agravando e despertando ainda mais a necessidade de preservar o meio ambiente, estimulando o surgimento de um pensamento arquitetônico direcionado à adaptação das edificações às questões ambientais.

No contexto dos desafios atuais e futuros do setor energético mundial é fundamental o setor de edificações buscar um alto desempenho para seus edifícios a fim de minimizar cada vez mais as necessidades de energia primária.

Diante disso, os Edifícios Energia Zero (EEZ) se apresentam como uma boa solução para reduzir o consumo de energia nos edifícios, com suas diferentes tipologias arquitetônicas e características de uso, pois dentro do conceito de EEZ todos adotam o uso de fontes renováveis como geração de eletricidade e o máximo de eficiência energética.

Nos projetos de novos edifícios as medidas de eficiência energética, conforto térmico, ações passivas, sistema de geração de energia local já podem ser incorporadas ao projeto, porém em um edifício existente, as condicionantes não favorecem a um resultado satisfatório com seu estado atual, havendo a necessidade de adaptá-lo e melhorar suas características técnicas e arquitetônicas para alcançar estes objetivos. E com isso as possibilidades de integração de sistemas solares na reabilitação de edifícios podem responder com alguma parcela ou total às necessidades energéticas e na qualidade ambiental do ambiente construído.

A qualidade ambiental está diretamente ligada à eficiência energética e aos conceitos de conforto, isso significa que a conservação de energia exige a redução do uso dos recursos e dos desperdícios energéticos, além da melhoria das condições de conforto térmico e luminoso (AMORIM, 2003).

As formas de arquitetura do final do século XX e início do século XXI, começaram a incorporar tecnologias direcionadas à preservação do meio ambiente, como o uso da energia solar, células fotovoltaicas, reaproveitamento das águas pluviais, resíduos sólidos, dentre outros, resultando em projetos caracterizados como arquitetura sustentável, *green building*<sup>1</sup>,

---

<sup>1</sup> *Green Building* (Edifícios verdes): refere aos princípios do desenvolvimento sustentável aplicados a todo o ciclo de vida de uma construção.

*eco-tech*<sup>2</sup>, *eco-building*<sup>3</sup>, Edifícios Energia Zero e arquitetura bioclimática<sup>4</sup> (DI TRAPANO; BASTOS, 2005).

Estas diferentes tecnologias e formas de construir intensificaram a construção civil que, além de ser uma das cadeias produtivas mais importantes nos aspectos sociais, econômicos e ambientais, é considerada uma das atividades mais críticas em relação aos impactos ambientais (HERMAWAN et al., 2017) como também uma das principais fontes de emissão de poluição ocasionada pelo alto consumo de energia no ciclo de vida dos edifícios (TABORIANSKI; SIMONI; PRADO, 2008).

Além dos crescentes investimentos em novas tecnologias, é cada vez maior a aplicação de células fotovoltaicas em edifícios. Devido à disponibilidade considerável de radiação solar que o Brasil oferece, a aplicação desta tecnologia fotovoltaica (FV) é altamente favorável (RÜTHER, 2004). Estes sistemas solares podem ser aplicados no edifício em sua envoltória, substituindo ou complementando outras proteções solares. Atualmente, pode-se encontrar no mercado uma variedade de módulos fotovoltaicos com diferentes tecnologias, possibilitando o uso não só para geração de energia, mas também como elementos arquitetônicos.

A indústria da construção civil vem focando largamente no desempenho energético dos seus edifícios, não somente para a redução do consumo de energia, como também para a melhoria do nível de conforto humano. Este setor está enfrentando desafios significativos em relação ao consumo, questões de energia, mudanças climáticas e pobreza energética. No entanto o aumento dos custos de energia alavancou o mercado de renováveis estimulando o desenvolvimento dessas tecnologias, como os painéis solares que possibilitam uma expansão dos limites rumo a novas possibilidades no ambiente construído. Surgem assim edifícios novos mais sustentáveis e modernizações em edifícios já existentes visando alcançar a neutralidade energética, ou uma situação de EEZ (BARTHELMES et al., 2015).

Esta combinação de diferentes estratégias possibilita que os edifícios consigam economizar e também gerar energia, podendo atingir um balanço energético zero (GARDE et al., 2014). A maneira mais rápida e econômica de atingir esse objetivo é através de uma combinação da redução da demanda de energia em edifícios com maior eficiência energética e a adoção de tecnologias renováveis (BARTHELMES et al., 2015).

---

<sup>2</sup> *Eco-tech*: União de tecnologia e sustentabilidade.

<sup>3</sup> *Eco-building*: Edifícios sustentáveis.

<sup>4</sup> Arquitetura bioclimática: é um conceito que visa a harmonização das construções com o meio ambiente de forma a otimizar a utilização dos recursos naturais disponíveis (como o luz solar e o vento), possibilitando conforto ao homem em harmonia com a natureza.

A arquitetura vem buscando cada vez mais inovações nos projetos e nas especificações de materiais, como os elementos industrializados que proporcionam maior agilidade durante a execução e menor desperdício de produtos e mão de obra. Isso pode ser observado principalmente nos elementos de vedação externa que atendam aos critérios mínimos de desempenho estabelecidos na Norma de Desempenho ABNT NBR 15.575-5/2013 e na ABNT NBR 15.220-3/2003, que diz respeito ao Desempenho Térmico de Edificações.

Considerando que os edifícios são sistemas térmicos abertos, com seus materiais empregados na envolvente, e que estão inseridos em diferentes regiões com seus respectivos fatores climáticos, é factível calcular o balanço energético considerando os valores para as perdas e ganhos de energia e, diante disso, avaliar qual o nível de conforto necessário para que o edifício seja energeticamente eficiente e sustentável.

Grande parte da energia produzida no planeta é destinada ao aquecimento, iluminação e refrigeração dos edifícios e das indústrias. Parte desse consumo está diretamente relacionado a questões arquitetônicas e ao uso e ocupação dos espaços (GONÇALVES; DUARTE, 2006). Reduzir este consumo pode ser alcançado através da adoção de estratégias passivas nos projetos e da integração do edifício ao ambiente, potencializando assim a conservação de energia (FOSSATI; LAMBERTS, 2008).

Pode-se considerar como alternativas para a redução do consumo e conseqüentemente a eficiência energética e o equilíbrio térmico do edifício, um desenho bioclimático capaz de potencializar essa eficiência. O estudo e análise de vários fatores são fundamentais para a implementação de sistemas arquitetônicos bioclimáticos, através de soluções construtivas passivas e de tecnologias de geração de energia através de fontes renováveis. Estes desenhos criam uma versatilidade de envelopamento<sup>5</sup> no edifício, atuando eficientemente como moderador do clima e desempenhando um papel catalisador no balanço energético do edifício, impactando no consumo energético.

Segundo Chidiac et al. (2011) nas edificações existentes a redução no consumo de energia pode ser obtido com projetos de *retrofit*<sup>6</sup>, principalmente em suas fachadas, com o objetivo de torná-las mais eficientes em termos de energia, evitar a demolição, aumentar a vida útil da edificação, melhorar o conforto térmico e minimizar as manutenções.

---

<sup>5</sup> Envelopamento: termo utilizado no Brasil para cobrir um elemento arquitetônico ou fachada com outro material sem que necessite demolir a existente.

<sup>6</sup> O termo *retrofit* tem sido amplamente empregado com o sentido de renovação, de atualização mas mantendo as características intrínsecas do bem retrofitado. No mundo da construção, da Arquitetura e do Urbanismo, a arte de retrofitar está aliada ao conceito de preservação da memória e da história, mas com o renascimento do bem arquitetônico.

Para alcançar todas estas questões e objetivos nas edificações, são necessárias estratégias de eficiência energética que adotem os conceitos da arquitetura bioclimática, atendam a demanda com recursos renováveis e, principalmente, usem os recursos não renováveis de forma racional. Estas estratégias devem contemplar um conjunto de soluções projetuais que garantam as condições de bem-estar do usuário, abordando uma relação harmoniosa com o meio externo.

Em toda a história da humanidade, a arquitetura foi praticada seguindo as questões ambientais pelos arquitetos de cada período, que compreendiam a importância dos vínculos com o meio ambiente como uma condição de sobrevivência. O que se pode encontrar na arquitetura vernacular, onde o homem construía naturalmente seu abrigo, harmoniosamente moldado com o lugar e com o Sol. Nela o homem demonstra a preocupação de incorporar os fatores ambientais ao projeto de sua edificação com o aproveitamento de fontes de energia renováveis, como o Sol (ROMERO, 2001).

A distância do projeto arquitetônico das condicionantes ambientais é um vestígio da postura adotada por alguns projetistas que passaram a conceber a arquitetura desvinculando-a das características do lugar acreditando que os equipamentos modernos, desenvolvidos após a revolução industrial do século XIX, supririam as necessidades de conforto ambiental no interior dos seus edifícios. Ressalta-se também que a energia elétrica favorecia o uso destes equipamentos, aliando-se o conceito moderno dos edifícios característicos do novo *estilo internacional* ao desconhecimento da amplitude dos impactos gerados ao meio ambiente.

Um dos grandes desafios atuais da arquitetura está no papel que ela desempenha no desenvolvimento e operação de futuros sistemas de distribuição e transmissão de energia; as redes inteligentes (*smart grid*<sup>7</sup>), como a auto geração de eletricidade, *on grid*<sup>8</sup> ou *off grid*<sup>9</sup>, e sua capacidade de armazenamento, flexibilidade para suprir a demanda e o comércio de energia em tempo real. Porém, mudar o perfil dos edifícios de consumidores passivos para protagonistas ativos, exige um estreitamento das relações com os setores energéticos. Reduzir as emissões de CO<sub>2</sub> é uma preocupação comum entre os setores energéticos e os edifícios, o que favorece uma cooperação intersetorial para a redução de emissões de carbono, incluindo a implantação de sistemas energéticos inteligentes (BULUT et al., 2015).

---

<sup>7</sup> *Smart grid*: Redes inteligentes. Refere-se a um sistema de energia elétrica que utiliza a tecnologia da informação para fazer com que o sistema seja mais eficiente (econômica e energeticamente), confiável e sustentável.

<sup>8</sup> *On grid*: sistemas conectados à rede de distribuição de energia.

<sup>9</sup> *Off grid*: Sistemas autônomos, independentes da rede de distribuição de energia elétrica, que se sustentam através de baterias.

As questões ambientais afetam a arquitetura em todos os níveis. Os edifícios consomem metade da energia utilizada no mundo desenvolvido, enquanto outro quarto é usado nos transportes. Os arquitetos não podem resolver todos os problemas ecológicos do mundo, mas podemos projetar edifícios para consumirem uma fração de níveis mais baixos de energia e podem influenciar os padrões de transporte através do planejamento urbano. A localização e a função de um edifício, a sua flexibilidade e longevidade, a sua orientação, a sua forma e estrutura; os seus sistemas de aquecimento e ventilação, e os materiais utilizados, todos têm impacto sobre a quantidade de energia usada para o construir, utilizar e manter, e nas viagens de e para ele (FOSTER, 2003).

## 1.1 Justificativa

Partindo-se de que a quantidade de edifícios existentes no país é considerável, e que em alguns destes edifícios, nem sempre a concepção arquitetônica contemplou medidas projetuais que considerassem o conforto térmico, lumínico e as considerações climáticas do local, como também no período em que foram edificados não havia uma preocupação com o consumo de energia e com a eficiência energética, tem-se então que a somatória destes fatores acarreta um aumento no consumo de energia elétrica.

Todos estes fatores não são impedimentos para que os edifícios existentes possam ser mais eficientes, confortáveis termicamente e até mesmo auto suficientes em energia elétrica. Basta que busquem estratégias para reduzir o consumo de energia elétrica e adotem fontes renováveis para geração de energia como a solar fotovoltaica.

Como os níveis de radiação solar no Brasil são elevados, acaba sendo relativamente mais fácil para a tipologia arquitetônica educacional atingir níveis de energia zero ou quase zero, pois favorece a integração fotovoltaica em sua envoltória.

A necessidade dos edifícios serem mais eficientes, confortáveis e sustentáveis nos dias atuais é o que direciona este trabalho, que é transformar um edifício existente em um edifício energeticamente eficiente e até mesmo em um EEZ, apoiando-se na integração das estratégias projetuais bioclimáticas que busquem o conforto térmico, a eficiência energética e o uso adequado das tecnologias fotovoltaicas. Essas medidas adotadas na concepção do projeto de *retrofit* da envoltória são importantes contribuições para a qualidade ambiental do espaço construído, aumentando a sobrevida dos edifícios usados com mais sustentabilidade.

Além disso, o fato do edifício estudo de caso pertencer ao Instituto de Recursos Naturais da UNIFEI, este trabalho contribui para uma complementação no aprendizado dos alunos desta instituição e para futuras estudos na área, pois ainda são poucas as pesquisas

desenvolvidas sobre edifício energia zero no Brasil até o momento como também poucos EEZs em operação.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo Geral**

Avaliar o potencial de transformação do edifício Bloco M3 do Instituto de Recursos Naturais da UNIFEI – Campus Rodrigues Seabra – Itajubá/MG, em um Edifício Energia Zero local, definir estratégias adequadas de redução de consumo de energia e as possibilidades de gerar energia elétrica mediante tecnologia fotovoltaica e analisar a viabilidade econômica dessas ações.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

- Determinar os consumos energéticos do edifício atual.
- Executar ações para melhorar o nível de eficiência energética e conforto térmico com propostas arquitetônicas passivas na envoltória do edifício, como forma de auxiliar na garantia da qualidade do ambiente interno.
- Executar ações para diminuir o consumo de energia mediante ações ativas de eficiência energética.
- Gerar energia elétrica através da tecnologia fotovoltaica considerando a viabilidade e tecnologia adequada para a sua implantação na envoltória do edifício, para que o mesmo possa atingir em seu balanço energético um nível próximo de zero.
- Determinar a viabilidade econômica dos sistemas arquitetônicos e tecnológicos adotados no *retrofit*.

## **1.3 Estrutura**

Esta dissertação foi elaborada com a seguinte estrutura:

### *Capítulo 1 – Introdução*

Apresenta o assunto, o enquadramento do tema, as justificativas que motivaram a escolha do tema e sua importância no contexto atual e os objetivos a serem alcançados.

### *Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica*

Este capítulo aborda brevemente assuntos que estão relacionados diretamente com o tema da dissertação, como a base conceitual que é: energia, calor e transferência de calor. Como o clima está associado ao consumo de energia, os desafios energéticos que se impõem aos edifícios para uma arquitetura mais sustentável. Além disso é feita uma abordagem sobre a arquitetura bioclimática, sobre a Norma de Desempenho NBR 15.220 – 3 a qual define as estratégias passivas para aplicar às edificações, a eficiência energética. Aborda o conceito de edifícios de energia zero, diferentes definições que são utilizadas e as perspectivas dos Edifícios Energia Zero no Brasil. É apresentada a matriz energética brasileira e como as edificações se posicionam como consumidores de energia e emissores de gases efeito estufa (GEE) e como são os usos de energia em edifícios públicos na fase de uso e operação. Este capítulo também aborda a energia solar fotovoltaica. Traz a caracterização dos sistemas solares fotovoltaicos, a situação nacional do setor, aspectos tecnológicos, a implementação na arquitetura como as diferentes formas de integração no edifício.

### *Capítulo 3 – Metodologia*

Descreve os métodos que foram utilizados para o desenvolvimento da dissertação partindo-se da caracterização do edifício estudo de caso, diagnóstico e soluções até tornar-se um EEZ.

### *Capítulo 4 – Resultados e discussão*

Neste capítulo consiste a aplicação da metodologia no edifício estudo de caso, Bloco M3 – UNIFEI, demonstrando os resultados obtidos e discutidos.

## *Capítulo 5 – Conclusões*

Aqui é apresentado o fechamento do estudo com as conclusões e contribuição que a dissertação oferece tanto no meio acadêmico quanto na prática do dia a dia no exercício da arquitetura, bem como as principais considerações sobre o tema e implementações da tecnologia fotovoltaica no pensamento arquitetônico para atingir o EEZ.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Energia

Energia é o substrato essencial do universo do qual todas as interações, transformações e processos dependem. Do significado original da palavra grega, “força em ação”, tem-se em oposição *dýnamis*, “força” (em potência, potencialidade), sugerindo a sua ligação com a ideia de movimento, cinética, em contraposição a ideia de estático, potencial (RESNICK; HALLIDAY, 1965).

Somente no século XIX a palavra energia passou a ser utilizada na física. É um conceito abstrato e extremamente importante, sendo utilizado em todas as áreas.

A energia está presente em grande quantidade em todo o universo, porém, como um conceito abstrato, ela é esquiva, não aumenta, nem diminui, mas passa por várias transformações (conversão de energia), não é criada nem destruída (princípio da conservação de energia).

Sobre a energia, o professor Arnaldo<sup>10</sup> diz:

No campo da arquitetura ela poderia muito mais ser definida como sinergia, pelo fato de haver uma cooperação de várias formas de energia trabalhando e se transformando juntas em sintonia com a edificação, em busca da eficiência.

### 2.2 Calor

Calor é uma forma de energia associada ao movimento atômico e molecular da matéria que nos processos de transmissão, troca ou transformação, obedecem ao princípio da conservação da energia. De acordo com Resnick e Halliday (1965 apud BERALDO, 2006) calor é o que se transmite entre um sistema e o meio ambiente, como efeito apenas da diferença de temperatura. Ou seja, calor é a energia transferida de um corpo a outro devido a diferença de temperatura entre eles.

---

<sup>10</sup> Conversa informal com o Prof. Dr. Arnaldo Martin Martinez Reyes.

## 2.3 Conforto Térmico

Conforto térmico diz respeito a uma condição mental que se manifesta através de uma satisfação com o ambiente (ASHRAE, 2009).

O conforto térmico é uma premissa básica para que os ambientes demonstrem um nível satisfatório para a ocupação humana, não influenciando apenas na sensação de conforto, mas também na produtividade humana e na saúde. Para indicar o estado de conforto é essencial avaliar alguns elementos como o clima, o vestuário e outros de caráter subjetivo, como a forma, volume, a cor e o metabolismo do corpo. A combinação destes parâmetros com sensações térmicas agradáveis é chamada de zona de conforto (LAMBERTS et al., 2016). As zonas de conforto térmico com seus parâmetros e índices colaboram na definição das cartas bioclimáticas a serem adotadas, as quais oferecem informações sobre o comportamento climático do entorno, um prognóstico de estratégias indicadas para a melhoria do comportamento climático através do desempenho esperado na edificação (ABNT, 2005). Um edifício, quando projetado considerando as características do clima no qual está inserido, torna-se termicamente confortável e energeticamente eficiente.

A sensação de desconforto pelo frio ou pelo calor é resultado do balanço térmico instável, ou seja, da diferença entre o calor que o corpo produz e o calor que é perdido para o ambiente (LAMBERTS et al., 2016).

Atualmente o assunto conforto ambiental traduz-se em uma visão composta por um conjunto de condições e situações que resultam em desafios na atuação dos projetistas que devem equilibrar os diferentes critérios e indicadores de conforto na procura de uma solução mais adequada para o projeto arquitetônico. As diferentes estratégias possíveis para serem adotadas em projetos arquitetônicos novos, como também em edifícios já prontos, podem ajudar a proporcionar conforto térmico ao ambiente construído de acordo com as condições do clima no qual este está situado (KOWALTOVSKI et al., 2006).

Os parâmetros de projeto mais importantes que afetam o conforto térmico dos edifícios e a conservação de energia nas construções são: a localização e orientação do edifício, a distância entre os edifícios e a forma, as propriedades térmicas e físicas da envoltória do edifício, sendo ela o parâmetro mais importante, devido ao seu papel em separar o ambiente exterior do interior (YILMAZ, 2007). Os projetos complementares também colaboram para uma redução do consumo de energia, como o projeto de climatização e o de iluminação artificial, podendo ser definidos os sistemas ideais para cada tipo de ambiente. Devido a isso, os profissionais envolvidos no projeto devem trabalhar em conjunto com os

arquitetos para que os parâmetros de projeto possam ser ajustados com o objetivo de redução do consumo de energia para o futuro edifício (PÉREZ-LOMBARD et al., 2009).

Em edifícios novos o potencial de economia de energia está relacionado às etapas de projeto, partindo da concepção, programação arquitetônica, anteprojeto, sistema construtivo a ser adotado e considerando também o pós-ocupacional e manutenção (GONÇALVES; DUARTE, 2006). Porém em um edifício já construído é possível atingir estas economias de energia por meio da renovação dos sistemas que utilizam energia elétrica e de atitudes arquitetônicas em sua envoltória. Diferente de um edifício novo, onde podem ser adotadas estratégias de projeto, em um edifício finalizado existem condicionantes que influenciam no desempenho energético, como orientação e forma do edifício e os materiais da envoltória. Isso implica que é necessário reconhecer que para melhorar o desempenho energético em um edifício existente as limitações são bem maiores (LEE; YIK, 2004).

### **2.3.1 Clima**

Estudar o clima local antes de conceber um projeto é a premissa básica para desenvolver uma arquitetura sustentável. As informações obtidas servem como base para a montagem do programa de necessidades do edifício, possibilitando que o mesmo contemple a eficiência energética e as necessidades de conforto do usuário em função dos dados obtidos com a análise climática do local (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014).

O projeto arquitetônico deve começar pela análise do clima local onde a edificação será inserida (OLGYAY, 1963). Givoni (1992) afirma que o clima do interior de um edifício e suas condições de conforto dependem das condições climáticas do entorno, porém, a própria edificação altera as condições climáticas da atmosfera envolvente.

O conforto e o desempenho energético de um edifício são afetados diretamente pelo clima, e para Givoni (1992 apud ROMERO, 2001), cada região tem o seu clima determinado pelo padrão das mudanças de vários elementos e suas combinações, salientando que os principais elementos climáticos a serem considerados no projeto de edifícios e para o conforto térmico são a radiação solar, comprimento de onda da radiação, temperatura do ar, umidade, ventos e precipitações.

As variáveis climáticas de uma região que mais influenciam no desempenho térmico dos ambientes construídos são: a oscilação diária e anual da temperatura e umidade relativa, a quantidade de radiação solar incidente, o grau de nebulosidade do céu, a predominância de época e o sentido dos ventos e índices pluviométricos (FROTA; SCHIFFER, 2001).

Frota e Schiffer (2001) desenvolveram um importante estudo sobre conforto térmico, bastante referenciado em trabalhos científicos sobre esse tema. Elas evidenciam a importância de moldar a arquitetura ao clima do local, reforçando assim que ao construir edifícios e espaços deve-se proporcionar conforto térmico para o homem.

Assim, para o entendimento da arquitetura bioclimática apropriada para uma cidade, é necessário o estudo do clima e suas especificidades que influenciarão no projeto arquitetônico.

### **2.3.2 Estratégias bioclimáticas**

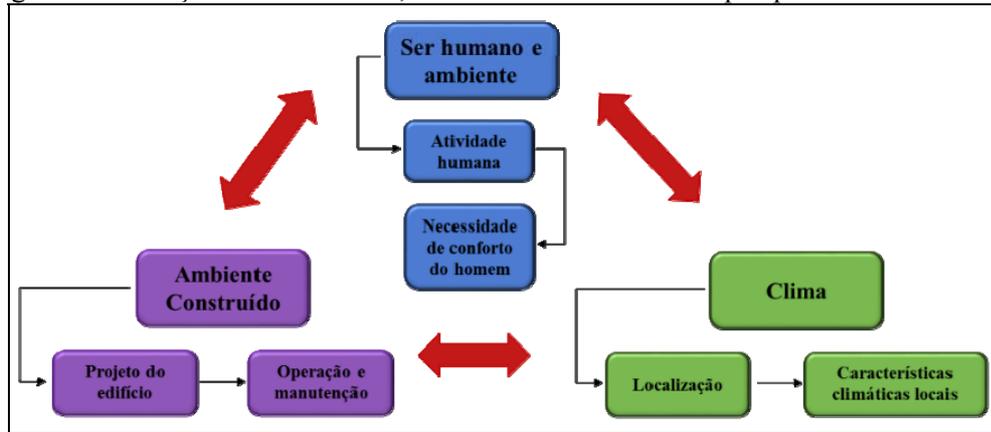
É na arquitetura bioclimática que se analisa como o ambiente construído exerce um fator controlador das variáveis do meio através de sua envoltória (paredes externas, fachadas e coberturas), do entorno (vegetação, água, sombreamentos, terra) e da utilização dos fatores climáticos para um bom aproveitamento da luz solar e do vento (ROMERO, 2001).

Os princípios bioclimáticos adotados em uma arquitetura moldada em harmonia com o meio ambiente podem ser adotados nos edifícios partindo-se da concepção do projeto como estratégia de composição e como forma de caracterização do meio onde ele está inserido. Identificar o comportamento do clima local, a geometria solar e as condições necessárias de conforto é a condicionante fundamental para tomar como ponto de partida a implantação de qualquer edifício no meio urbano, tornando-o condizente ao tema e ao clima. As condições de conforto podem ser trabalhadas durante a criação dos espaços da edificação, na escolha dos elementos do envoltório, nos materiais que serão utilizados, na forma adotada, na orientação solar e na relação com o entorno (OLGYAY, 1963).

A aplicação de princípios bioclimáticos é um fator considerável na redução do consumo de energia e emissões de CO<sub>2</sub> na indústria da construção civil. Ela imprime um papel importante na eficiência energética em função das condições ambientais, características construtivas e energia solar passiva. Os sistemas passivos podem colaborar para a conservação de energia, com resultados econômicos, em média de 50 % no aquecimento dos ambientes (TZIKOPOULOS; KARATZA; PARAVANTIS, 2005).

A Figura 2.1 exemplifica a relação entre os humanos, clima e meio ambiente na perspectiva bioclimática.

Figura 2.1: Relação entre humanos, clima e meio ambiente na perspectiva bioclimática.



Fonte: Adaptado de (ZR; MOCHTAR, 2013).

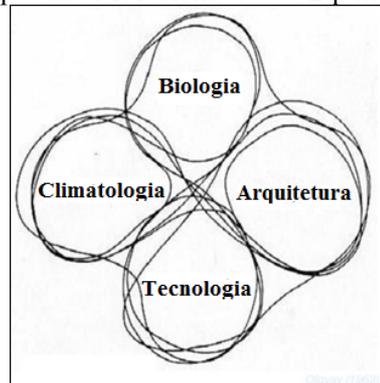
### 2.3.2.1 Métodos de avaliação bioclimáticos

As cartas bioclimáticas são representações gráficas da relação entre clima e conforto térmico. Estes métodos passaram a ser desenvolvidos buscando relacionar, de forma visual, variáveis como:

- Condições climáticas,
- Padrões fisiológicos de conforto térmico,
- Estratégias de projeto.

De acordo com Olgyay (1963) existem considerações inter-relacionadas que podem moldar o equilíbrio entre clima e ambiente construído ao longo do processo de projeto. Ele desenvolveu um Método Bioclimático para o projeto usando uma sequência e intercâmbio das seguintes variáveis: clima, biologia, tecnologia e arquitetura (Figura 2.2).

Figura 2.2: Campos inter-relacionados do Equilíbrio Bioclimático.



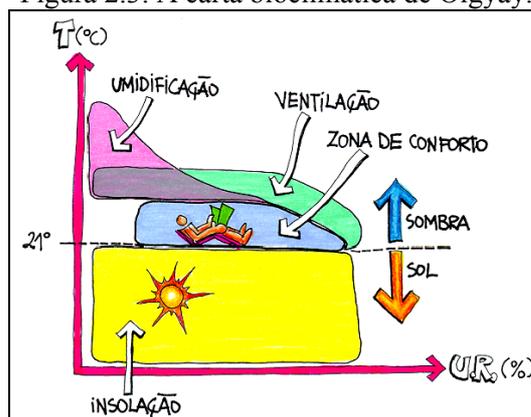
Fonte: (OLGYAY, 1963).

Zr e Mochtar (2013) defendem que a concepção arquitetônica equilibrada climaticamente consiste em quatro etapas subsequentes e inter-relacionadas:

1. Climatologia: estudos dos dados climáticos locais – que envolve o conhecimento de seus elementos constituintes (temperatura, umidade relativa, radiação e ventos);
2. Biologia: avaliação biológica baseada nas sensações humanas buscando as condições de conforto térmico em qualquer época do ano;
3. Tecnologia: as soluções técnicas adotadas após os passos anteriores e que incluem: a escolha do lugar, a orientação, os cálculos de sombreamento, as formas da edificação, os movimentos do ar e o equilíbrio interno da temperatura;
4. Arquitetura: o projeto de arquitetura resultante – que deverá ser o produto da importância dos diferentes elementos envolvidos.

Os irmãos Olgyay, em 1963, delineararam a relação entre clima e projeto arquitetônico. Eles desenvolveram a primeira representação gráfica onde comprovam a conexão entre clima e conforto humano: a carta bioclimática, relacionando a temperatura de bulbo seco <sup>11</sup> com a umidade relativa do ar e as variáveis interdependentes citadas acima (clima, biologia, tecnologia e arquitetura). Com base nesta relação, propuseram zonas de conforto sugerindo medidas corretivas que permitem atingir o conforto desejado (Figura 2.3).

Figura 2.3: A carta bioclimática de Olgyay.



Fonte: (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014).

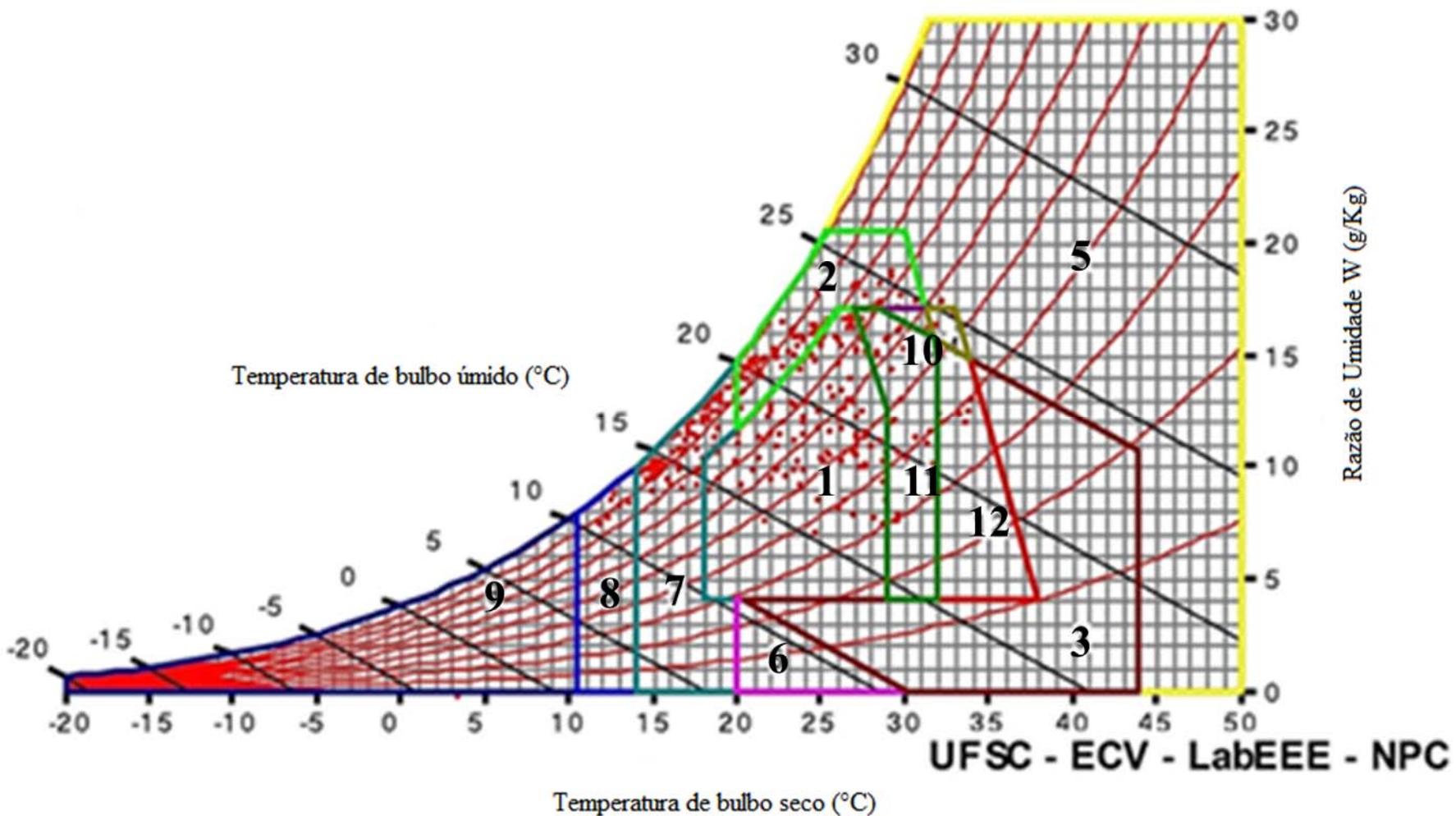
<sup>11</sup> Temperatura de bulbo seco (TBS): temperatura do ar medida com um termômetro comum. Temperatura de bulbo úmido (TBU): temperatura do ar medida com um termômetro comum, cujo bulbo de vidro foi coberto com uma gaze úmida (resfriamente evaporativo). A diferença entre a TBS e a TBU fornece a Umidade Relativa, através da Carta Psicrométrica.

Baseando-se na Carta Bioclimática de Olgyay, Givoni desenvolveu o seu Diagrama Bioclimático para os edifícios em formato psicrométrico<sup>12</sup> e procurou avaliar as condições internas de conforto térmico, buscando ser mais fixo ao clima externo (MANZANO-AGUGLIARO et al., 2015). É possível observar na carta bioclimática de Givoni, a zona de conforto, indicada pelo número 1, no centro do gráfico da Figura 2.4.

---

<sup>12</sup> Psicrometria: o ramo da física relacionado com a medição das condições do ar atmosférico, principalmente com respeito à mistura ar seco – vapor d'água.

Figura 2.4: Carta bioclimática de Givoni.



Temperatura de bulbo seco (°C)

Fonte: (LAMBERTS et al., 2016).

Givoni apresenta as seguintes estratégias bioclimáticas passivas para corrigir as condições de conforto térmico:

- 1 - Zona de Conforto;
- 2 - Zona de Ventilação;
- 3 - Zona de Resfriamento Evaporativo;
- 4 - Zona de Massa Térmica de Resfriamento;
- 6 - Zona de Umidificação;
- 7 - Zona de Massa Térmica para Aquecimento;
- 8 - Zona de Aquecimento Solar Passivo.

E duas estratégias artificiais:

- 5 - Zona de ar condicionado;
- 9 - Zona de aquecimento artificial.

Baseado nessas definições, é possível afirmar que a arquitetura que aproveita de forma mais adequada as condições climáticas, os recursos naturais e energéticos, é capaz de oferecer maior conforto ao ser humano.

### **2.3.2.2 Princípios bioclimáticos no projeto e redução do consumo de energia**

Na concepção de projetos, em todos os ambientes, sejam eles externos ou internos, deve-se ter como premissa a adoção dos princípios bioclimáticos. O arquiteto deve utilizar a própria criação arquitetônica como a ponte entre o meio e o homem (ROMERO, 2001).

Projetar uma arquitetura bioclimática (ou sustentável) é uma maneira alternativa de construir edifícios. As condições climáticas devem ser levadas em consideração e uma série de tecnologias solares passivas devem ser adotadas para otimizar a eficiência energética.

As tecnologias solares passivas se referem a técnicas de aquecimento ou resfriamento que protejam ou absorvam a energia do Sol e não possuem componentes móveis. As estruturas bioclimáticas são construídas de tal modo que, durante os meses de inverno, a exposição a temperaturas frias é minimizado e os ganhos solares maximizados, já durante o verão as estruturas bioclimáticas são sombreadas do Sol e várias técnicas de resfriamento são empregadas, frequentemente com a auxílio de fontes de energia renováveis (TZIKOPOULOS;

KARATZA; PARAVANTIS, 2005).

Para reduzir a carga de energia consumida, não apenas na construção, mas também na operação de um edifício, é necessário entender a forma de pensamento bioclimático, compreendendo a relação entre o clima e os seres humanos, aliando-os ao conforto do ambiente construído e natural que os rodeiam, e procurando parâmetros de projeto que alcancem uma boa solução para a sua implantação, imprimindo um design sustentável ao edifício. Este processo não é o resultado de tentativas e erros subjetivos, mas um procedimento organizado na tomada de decisões no projeto. Estas estratégias baseadas no clima local, no ajuste da volumetria<sup>13</sup> do edifício e na escolha de materiais para o envelope da fachada são maneiras de projetar de forma energeticamente sustentável, obtendo condições confortáveis para os ocupantes realizarem suas atividades dentro do edifício usando o mínimo de energia e até mesmo chegando atingindo a autossuficiência (TZIKOPOULOS; KARATZA; PARAVANTIS, 2005).

### **2.3.3 Ventilação natural**

A ventilação natural propicia a renovação do ar do ambiente, tendo relevância para a higiene e para o conforto térmico no verão em regiões de clima temperado e clima quente úmido. A ventilação natural é o deslocamento do ar através do edifício e suas aberturas, sendo que umas funcionam como entradas e outras como saídas (FROTA; SCHIFFER, 2001). Dessa forma, as aberturas para a ventilação deverão ser dimensionadas e posicionadas de maneira a propiciar um fluxo de ar adequado ao recinto.

Segundo Bittencourt e Cândido, 2008, a ventilação é apontada como a estratégia bioclimática mais eficiente para a obtenção de conforto térmico nos espaços urbanos e arquitetônicos para este clima.

A análise de diagnósticos climáticos permite afirmar que a ventilação natural é uma boa estratégia para grande parte das cidades brasileiras. Esse recurso tem capacidade de retirar muito da carga térmica absorvida e/ou gerada dentro de um ambiente. Para sua aplicação, é necessário que o projeto tenha fluidez nos espaços permitindo que os ventos circulem por diferenças de pressão ou efeito chaminé.

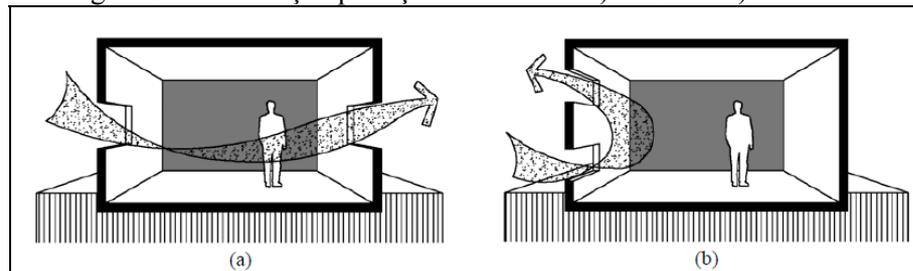
A ventilação natural de edifícios acontece por meio de dois mecanismos:

---

<sup>13</sup> Volumetria: volume configurativo característico dos edifícios de uma zona urbana. Dimensões arquitetônicas de um determinado tipo de edifício. Conjunto de dimensões de uma construção urbana.

1) Ventilação por ação dos ventos: produzida pela força dos ventos promovendo movimentação do ar através do ambiente, ou seja, a ventilação natural cruzada, onde as aberturas em uma edificação são posicionadas em paredes opostas ou adjacentes, permitindo assim o fluxo de ar entrar e sair do ambiente. Este sistema de ventilação provoca a renovação e trocas de ar dentro do edifício, colaborando para uma redução da temperatura interna, como pode ser observado na Figura 2.5.

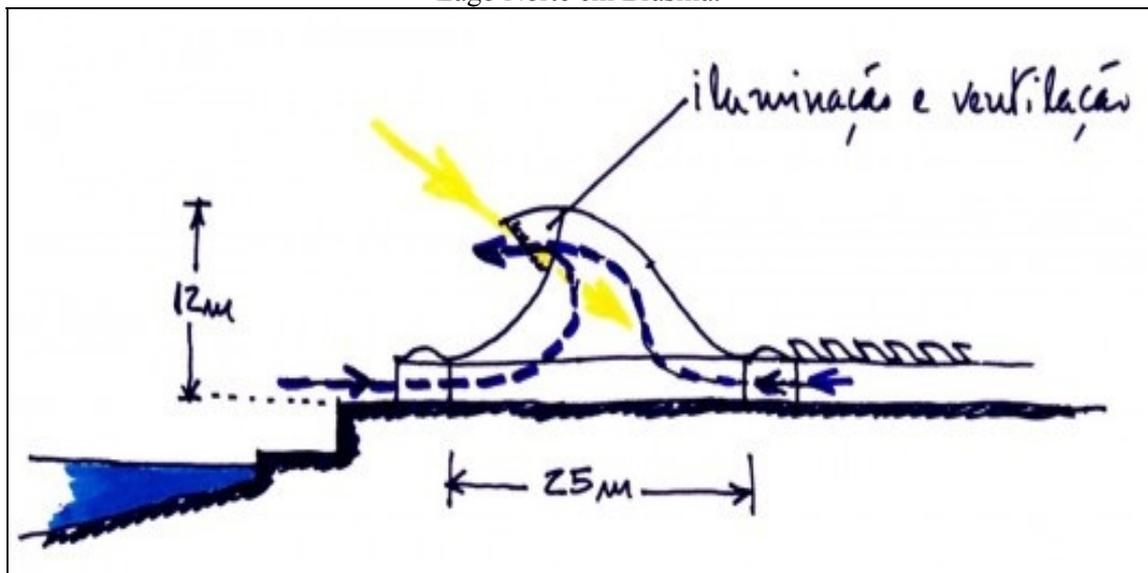
Figura 2.5: Ventilação por ação dos ventos. a) cruzada. b) unilateral



Fonte: (SOUZA; AMPARO; GOMES, 2011).

2) Ventilação natural induzida (*shed* e efeito chaminé): é provocada pela diferença de densidade do ar interno e externo. Neste sistema de ventilação as aberturas são posicionadas de forma que a massa de ar quente seja empurrada para cima. Um exemplo do mecanismo de *shed* está presente no projeto arquitetônico do Centro de Reabilitação do Hospital Sarah Lago Norte, em Brasília, do arquiteto João Filgueiras Lima (Lelé), como mostra a Figura 2.6.

Figura 2.6: Corte esquemático do sistema de ventilação do Centro de Reabilitação do Hospital Sarah Lago Norte em Brasília.



Fonte: (LIMA, 2013).

O parlamento alemão (Figura 2.7) é um edifício de valor histórico e arquitetônico do sec. XIX, sua forma é um exemplo da aplicação do conceito de sustentabilidade. Sua cúpula é o principal elemento de intervenção para auxiliar a ventilação natural pelo efeito chaminé. O ar entra pela fachada principal e se distribui pelo interior do edifício, exercendo pressão sob o ar quente forçando o a subir.

Figura 2.7: Parlamento alemão localizado em Berlim - Projeto de Norman Foster.



Fonte: (CINEX, 2014).

No trabalho de Moreno (2016) foi realizada uma melhoria da ventilação natural interior de um prédio público educacional através do aumento da área das janelas. O autor adotou a metodologia de cálculo da ventilação pela norma britânica BS 5925:1991 (BSI, 1991). Em geral o aumento da área das janelas na fachada foi de 13 %, o que provocou uma maior entrada de ar dentro dos espaços. O incremento da entrada ou circulação de ar foi de 32,9 % para os espaços que já possuíam ventilação cruzada pela disposição das janelas como é o caso das salas de aulas e laboratórios. Nos outros espaços, criou-se circulação de ar (inexistente antes da modificação) como é o caso das salas dos professores e as salas de pesquisa. Para isto foram inseridas 97 novas janelas o que aumentou a ventilação no interior destes espaços em uma média de 92 %.

O estudo de Rodrigues (2008) analisou estratégias de ventilação natural para proporcionar um maior conforto térmico em um modelo experimental de edifício vertical multifamiliares . O autor adotou o modelo *AirflowNetwork* do *EnergyPlus* para a simulação do clima da cidade de Campo Grande/MS. Ele analisou os coeficientes de descargas, coeficientes de pressão do vento coeficiente e expoente de fluxo de ar pelas frestas e rugosidade do entorno. Estudou também os fundamentos dos métodos de cálculo de taxas de ventilação e infiltração de ar na edificação. De acordo com a análise paramétrica efetuada no trabalho, verificou-se que o coeficiente de descarga foi o parâmetro que mais influenciou no desempenho térmico e os coeficientes e expoentes de fluxo de ar pelas frestas e os diferentes

métodos de obtenção de coeficientes de pressão de vento apresentaram a menor influência nos resultados de desempenho térmico. Também avaliou o nível de eficiência energética do edifício estudado.

O trabalho de Nascimento, Barros e Batista (2016) avaliou a ventilação natural através do estudo do fluxo dos ventos entre as edificações e sua consequente incidência dentro dos apartamentos. Foram consideradas duas situações: a atual implantação das edificações e uma nova proposta de implantação com edifícios reposicionados de acordo com a incidência do vento sudeste. Foram realizadas quatro simulações com o equipamento “*mesa d’água*”<sup>14</sup> e feito o cálculo da ventilação por efeito do vento, ventilação unilateral, estimando o número de renovações do ar no ambiente mais ventilado da situação existente. A análise mostrou que mesmo sem alterar o projeto da planta tipo do edifício, a melhoria do arranjo da implantação dos prédios pode garantir maior conforto térmico aos usuários dos apartamentos. Os autores adotaram como metodologia de cálculo da ventilação natural por efeito do vento (ventilação unilateral), baseado no método empírico da norma britânica BS 5925:1991 (BSI, 1991).

Vale ressaltar que no Brasil existem alguns Regulamentos, Normas de Desempenho e Códigos Municipais que oferecem recomendações para uso desta estratégia nas edificações. Porém, esses códigos fazem referência apenas à área de abertura relacionados com a área de piso do ambiente onde se localizam.

A escolha da estratégia bioclimática ventilação natural é apenas uma das condicionantes arquitetônicas a ser analisada na concepção de um edifício, baseado no conhecimento real do potencial de ventilação natural do local para que seja usada também para contribuir com a redução do consumo de energia nas edificações.

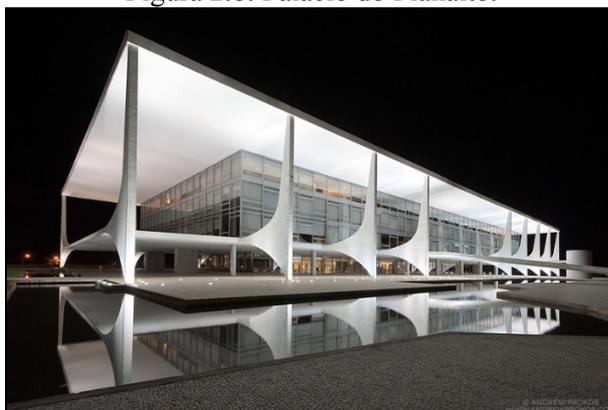
### **2.3.4 Resfriamento evaporativo**

Pela disposição de espelhos d’água ou lagos, posicionados na direção das correntes de ar predominantes do local, permite que ao passar sobre a água o ar carregue alguma porcentagem de umidade, oferecendo assim um frescor nos ambientes. É também outro mecanismo de condicionamento passivo para zonas bioclimáticas áridas. Um exemplo de resfriamento evaporativo é muito encontrado nas obras de Oscar Niemeyer em Brasília está apresentado na Figura 2.8.

---

<sup>14</sup> Equipamento utilizado para ensaio qualitativo da ventilação natural em modelos 2D, esse ensaio possibilita a observação de diversos fenômenos de ventilação natural relacionado a sua interação com o ambiente construído.

Figura 2.8: Palácio do Planalto.



Fonte: (JORDANA, 2013).

### 2.3.5 Elementos arquitetônicos que influenciam no conforto térmico

Os elementos de proteção solar, chamados de “brise-soleil” ou quebra-sol, são importantes dispositivos para controle de insolação. Conforme Amorim (2003) em geral os protetores solares oferecem melhor desempenho térmico quando apresentam cores claras, pois absorvem menor quantidade de radiação solar, refletindo boa parte da radiação incidente. Além disso, quando colocados afastados das vedações, como paredes e janelas, transmitem menos calor às mesmas por condução, ao mesmo tempo em que são facilitadas as trocas de calor por convecção entre os protetores e o ar. A seguir são apresentados alguns tipos de protetores.

1) Protetores verticais fixos: de forma geral são mais eficientes em fachadas onde a maior parte da luminosidade não incide de forma perpendicular (fachadas norte, sul, noroeste, sudeste, nordeste e sudoeste), especialmente nas horas próximas à aurora e ao alvorecer. Nas fachadas leste e oeste, onde grande parte da incidência ocorre de forma perpendicular, os protetores verticais (Figura 2.9) teriam pouca ou nenhuma eficiência.

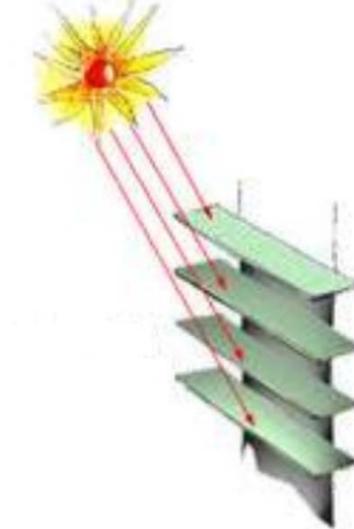
Figura 2.9: Edifício da empresa COUROQUÍMICA em Franca/SP. Projeto arquitetônico da autora.



Fonte: (COUROQUÍMICA, [s.d.]).

2) Protetores horizontais fixos: são placas cujos eixos horizontais estão paralelos à fachada a ser protegida e também ao plano horizontal. Os protetores horizontais (Figura 2.10) são mais eficientes nas horas do dia em que o Sol está mais alto e menos eficiente nas horas próximas ao nascer e pôr do sol.

Figura 2.10: Protetores horizontais fixos.



Fonte: Adaptado de (MENEZES, 2012).

O estudo de Moreno (2016) visou a diminuição de consumo energético do prédio do Instituto de Ciências Exatas (ICE) localizado no campus da Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), mediante um projeto de reforma construtiva usando soluções passivas de eficiência energética. Uma das propostas do projeto foi a colocação de brise-soleil, horizontais fixos, para bloquear a incidência direta dos raios do sol nas janelas, o que resultou em uma

diminuição de 30% da carga térmica dentro do prédio, colaborando para uma redução do consumo de energia. O projeto considerou insolação durante todo o ano nas fachadas usando a carta solar de Itajubá elaborada no próprio trabalho.

3) Protetores móveis: são mais eficientes uma vez que podem ser ajustados em função da variação dos raios solares, conforme Figura 2.11.

Figura 2.11: Edifício CCST do INPE em São José dos Campos/SP. Projeto arquitetônico da autora.

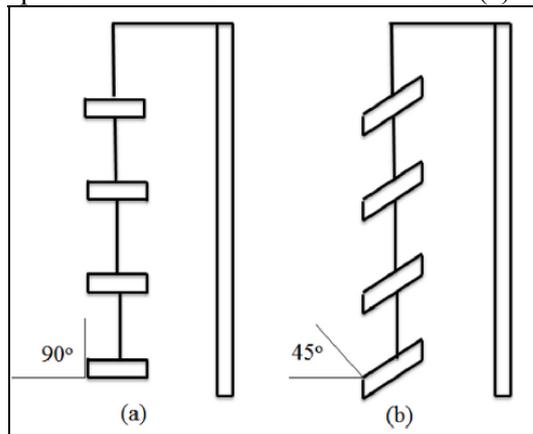


Fonte: (INPE, [s.d.] ).

Carvalho (2009) destaca o uso de proteções solares externas às fachadas para bloquear a radiação direta antes de sua passagem pelo vidro das aberturas. Também aborda o uso de vegetação para sombreamento de fachadas, sobretudo onde ocorre maior incidência de radiação solar (fachadas leste e oeste), isso colabora no comportamento térmico do edifício, a inércia térmica.

O estudo de Touma e Ouahrani (2017) investigou o efeito do sombreamento com brise-soleil e persianas de controle da iluminação durante o dia para espaços de escritório localizados em Doha, no Catar, com um clima tipicamente quente. Estes elementos foram aplicados em fachadas envidraçadas resultando em economias de energia anuais consideráveis. Após a validação experimental dos modelos de simulação, verificou-se que a adição de brise-soleil inclinado  $45^\circ$  em relação às linhas verticais (Figura 2.12b) gerou uma economia de energia de 7,7 %, quando aplicados nos escritórios orientados para o sul e de 18,6 % quando os escritórios estavam orientados para o norte. Considerando as persianas inclinadas  $90^\circ$  em relação à vertical, essas economias foram de 9,1 % para o sul e 20,6 % para o norte (Figura 2.12a).

Figura 2.12: Dispositivos de sombreamento: Persianas (a) e Brise-soleil (b).

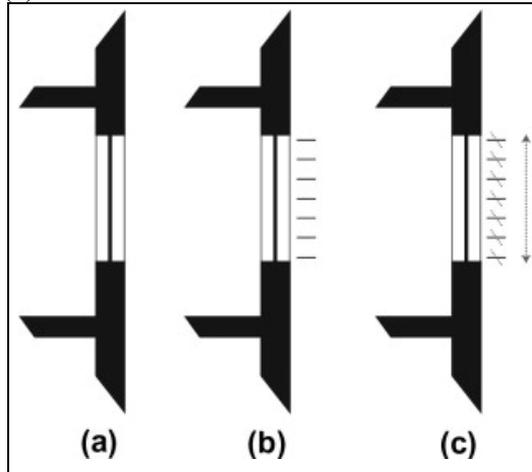


Fonte: ( TOUMA; OUAHRANI, 2017).

Estas estratégias de controle permitem que os ocupantes se beneficiem de um ambiente iluminado, mantendo os requisitos para o espaço interno em termos de conforto visual e iluminação diurna natural. Esses controles produziram 26,1 % de economia de energia sem qualquer violação do limite de brilho confortável.

Nielsen, Svendsen e Jensen (2011) investigaram os sistemas de sombreamento solar em edifícios de escritórios em um clima frio. Usaram três tipos de fachadas: sem sombreamento solar, com sombreamento solar fixo e com sombreamento solar dinâmico (Figura 2.13). Também utilizaram diferentes orientações e alturas das janelas. O desempenho foi avaliado com base na demanda total de energia do edifício, sua demanda de energia por aquecimento, resfriamento e iluminação, além de seus fatores de luz do dia. Os resultados de simulação que compararam as três alternativas de fachada mostram potencial de redução de energia significativa. Além disso, o uso de sombreamento solar dinâmico melhorou drasticamente a quantidade de luz do dia disponível em relação ao sombreamento solar fixo, o que enfatiza a necessidade de simulações dinâmicas e integradas no início do processo de projeto para facilitar decisões de design informadas sobre a fachada.

Figura 2.13: Diferentes tipos de sombreamento solar: (a) Modelo de referência. (b) Modelo com sombreamento fixo. (c) Modelo com sombreamento dinâmico e completamente retrátil.



Fonte: (NIELSEN; SVENDSEN; JENSEN, 2011).

O design da fachada é, e deve ser, considerado uma questão central na concepção de edifícios que buscam a eficiência energética e buscam atingir níveis zero de consumo de energia. É por isso que os protetores solares são utilizados para se adaptar aos impactos internos e externos, e para lidar com uma redução no consumo de energia e um aumento no conforto dos ocupantes. A adoção destes elementos no estudo de caso deste trabalho vai ser importante como um mecanismo para melhorar o conforto térmico do edifício e ajudá-lo a atingir EEZ.

### 2.3.6 Inércia térmica

À inércia térmica está associada a dois fenômenos de grande significado para o comportamento térmico do edifício: amortecimento e atraso da onda de calor devido ao aquecimento ou ao resfriamento dos materiais.

A inércia térmica depende das características térmicas da envoltória e dos componentes construtivos internos. Quando, por exemplo, a temperatura exterior, inicialmente igual à temperatura interior, se eleva, certo fluxo de calor penetra na parede. Porém, esse fluxo não atravessa a parede imediatamente, pois antes a aquece internamente (FROTA, SCHIFFER, 2001).

A inércia térmica permite que uma parede armazene calor durante o dia e emita durante a noite. Portanto, os efeitos da inércia térmica são mais adequados ao clima quente e seco, no qual a amplitude térmica é elevada.

Na construção civil a inércia térmica é a capacidade de um edifício ir contra as variações de temperatura no seu interior. É a capacidade de reduzir a transferência de calor devido a capacidade de acumular calor nos materiais adotados no envelopamento do edifício.

A capacidade térmica é uma das propriedades calculadas que são utilizadas como condicionantes para avaliar o desempenho conforme a norma ABNT NBR 15.575/2013.

## **2.4 Arquitetura sustentável**

Segundo Foster (2015): “como arquiteto, você projeta para o presente com uma consciência do passado para um futuro que é essencialmente desconhecido. A agenda verde é provavelmente a agenda e a questão mais importante do dia”.

Os edifícios são potenciais consumidores de recursos naturais e energia, resultando em impactos ambientais significativos. O setor de edificações possui grande potencial para mitigar as emissões de gases de efeito estufa e na arquitetura e urbanismo é onde se encontra a maior contribuição para se chegar a esse desenvolvimento sustentável. Isso não é feito apenas na definição da estrutura física dos projetos, mas também na promoção e divulgação de um pensamento ecológico e social e na pesquisa de tecnologias mais sustentáveis de construção.

Para Corbella e Yannas (2009) este conceito está fundamentado no desenvolvimento de um sistema construtivo que objetiva preservar o meio ambiente e potencializar o uso dos recursos naturais com o objetivo de garantir qualidade de vida para as gerações atuais e futuras sem renunciar às novas tecnologias construtivas.

Já no entendimento de Adam (2001) o projeto arquitetônico e a construção em si podem ser formados por uma combinação de estratégias adotadas como forma de reduzir o impacto ambiental, almejando como benefício o menor consumo de energia, a proteção dos ecossistemas e o conforto para os usuários do edifício.

Várias conferências, como a no Rio de Janeiro em 1992, e a Rio+10 em Johannesburgo em 2002, foram realizadas com o objetivo de determinar mecanismos e metas para a sustentabilidade, enfrentando o grande desafio mundial de melhorar o nível da qualidade de vida da população mais carente, além de reduzir a pegada de carbono e os impactos ambientais causados pelas aglomerações urbanas na terra.

Os termos sustentáveis, bioclimático, ecológico fazem parte de terminologias comuns no meio da arquitetura e urbanismo, entretanto, não significa que o uso destes termos está sendo feito com completa compreensão do seu verdadeiro significado. Parecem semelhantes, porém o termo sustentável apresenta uma visão mais abrangente, aliando ecologia à uma

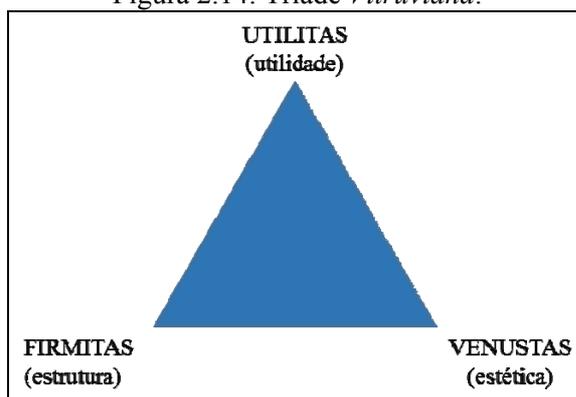
integração sociocultural com razões econômicas, não se restringindo apenas a potencializar a eficiência energética e o desempenho térmico, mas principalmente promover a concepção e operação de um edifício ou espaço público, de forma saudável, embasado na eficiência de recursos e com um design ecologicamente sustentável. Foi na década de 80 e início dos anos 90 que o urbanismo e a arquitetura adotaram em suas agendas as questões de sustentabilidade. Porém, no período anterior e após a segunda guerra mundial, com a adoção do *International Style*<sup>15</sup> e com o discurso de que a tecnologia proporcionava ferramentas para o total controle das condições térmicas dos ambientes internos, surgiram, em repetições pelo mundo todo, as *caixas de vidro* e em consequência disso, o consumo exagerado de energia.

Diante disso, a arquitetura bioclimática retomou a sua relevância dentro do conceito de sustentabilidade no projeto de arquitetura, isso devido à relação entre o conforto ambiental e o consumo de energia, especialmente no que diz respeito ao consumo de energia para climatização e iluminação artificial dos ambientes (GONÇALVES; DUARTE, 2006).

Com base neste pensamento, arquitetura sustentável é reconhecer o conjunto de condicionantes no processo de criação de um projeto e na construção do mesmo, é integrar as preocupações ambientais, a eficiência energética com as atividades humanas no ambiente construído. Isso constitui o pilar da tríade *vitruviana* (*utilitas*, *firmitas* e *venustas*), mostrada na Figura 2.14. *Utilitas* está relacionada à funcionalidade da arquitetura e engloba os conceitos de conforto térmico, visual e acústico dos usuários do ambiente construído, sendo o ponto de partida para a eficiência energética. *Firmitas* relaciona-se à estrutura, à integridade da arquitetura, a busca racional de soluções estruturais e a economia de um edifício, auxiliando na redução do consumo de energia, favorecendo o aumento da sua eficiência energética na etapa construtiva. *Venustas* está relacionada à estética contemplada na arquitetura aplicada em seus elementos, equipamentos e funções ligadas à eficiência energética (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014).

---

<sup>15</sup> *International Style*: é o nome dado a um estilo arquitetônico que se desenvolveu nos anos 1920 e 1930, sendo fortemente relacionado ao modernismo e a arquitetura moderna.

Figura 2.14: Tríade *Vitruviana*.

Fonte: Próprio autor.

## 2.5 Arquitetura bioclimática

O termo arquitetura bioclimática, ou sustentável, refere-se a uma alternativa de construir edifícios para as condições climáticas locais levando principalmente em consideração as técnicas solares passivas que absorvem a energia do Sol. As tecnologias solares passivas (bioclimáticas) devem ser usadas para favorecer a eficiência energética do edifício. A arquitetura bioclimática, ou solar passiva, apoia-se no conceito da integração dos edifícios com o meio ambiente, fundamentada nas condições climáticas e na relação com os seres vivos que o habita. Esta é a maneira mais simples e ao mesmo tempo mais eficaz de se exercer a arquitetura, uma vez que suas raízes estão nos tempos antigos, onde imperava uma relação direta e espontânea entre os ambientes construídos e naturais (TZIKOPOULOS; KARATZA; PARAVANTIS, 2005).

O conceito bioclimático é o projetar com respeito pelo meio ambiente e pela vida. No entanto, as estratégias bioclimáticas não dispensam a utilização de sistemas ativos, em razão do grau de conforto exigido ser cada vez maior e das condições climáticas virem se apresentando cada vez mais variáveis e imprevisíveis. Com isso, as medidas passivas adotadas de forma única nos edifícios, principalmente nos mais antigos, não são capazes de suprir totalmente as exigências de conforto interno. Entretanto, os sistemas ativos adotados devem ter como recurso energético as energias renováveis, que é o caso dos painéis fotovoltaicos integrados à edificação, assim como os equipamentos de refrigeração, que precisam ser eficientes em termos energéticos. Ainda assim, as estratégias bioclimáticas devem ser sempre a primeira ação e solução a serem adotadas nos projetos para que a necessidade dos sistemas ativos de energia seja mínima.

Alguns arquitetos modernistas como Le Corbusier, Alvar Aalto, Frank Loyd Wright, Louis Kahn, e outros, expressaram preocupações com os assuntos ambientais e aliaram seus ideais modernistas (volumetria e materiais) com o bioclimatismo. Le Corbusier foi um dos arquitetos que repensou a necessidade de um sistema passivo na arquitetura, adequando-a aos condicionantes climáticos do local, propondo o elemento “*brise-soleil*”. Assim, aos poucos, foi renascendo a preocupação de integrar a arquitetura com o clima local, priorizando o conforto ambiental do ser humano e revendo a sua atuação no planeta (CORBELLA; YANNAS, 2009).

### 2.5.1 Arquitetura Bioclimática no Brasil

No Brasil, desde o período colonial, devido ao clima quente e ao elevado nível de insolação, existia uma preocupação com questões relacionadas ao conforto térmico. Eram usados elementos de proteção solar como as varandas, gelosias e muxarabis<sup>16</sup>, que é um dos elementos mais peculiares da arquitetura colonial brasileira, resultado de uma forte influência da arquitetura árabe (Figura 2.15). Durante o século XIX, o uso de tais soluções incorporadas à arquitetura tradicional, com o objetivo de minimizar o calor, foram substituídas pelos estilos advindos dos materiais de construção importados que chegavam ao país, tais como ferro e vidro (CRUZ, 1999).

Figura 2.15: Casa do Muxarabiê, onde se encontra a Biblioteca Antônio Torres na cidade de Diamantina, MG.



Fonte: (DIAMANTINA MG, 2017).

---

<sup>16</sup> Muxarabi significa local fresco e é usado como elementos de proteção solar, como também as gelosias e as varandas

No início do século XX, devido às questões sanitárias, desencadearam-se vários estudos sobre ventilação e iluminação. Era apenas de conhecimento que o Sol agia como um agente microbicida, porém, percebeu-se que em regiões com temperaturas elevadas a incidência excessiva dos raios solares causava desconforto. Diante destas circunstâncias, é fato que o clima foi um fator físico que interferiu na arquitetura brasileira, colocando a arquitetura no combate ao calor e ao excesso de luminosidade provenientes da radiação solar dos trópicos (SILVA, 2009).

A arquitetura modernista brasileira no período de 1930 a 1960 contém características bioclimáticas. Os arquitetos desse período adotavam em seus projetos os cobogós e quebra-sóis em vários de seus edifícios. Lúcio Costa foi um dos que utilizou desses recursos na prática, e no ensino ressaltava a importância de compreender as condições do clima e da geometria solar ao conceber um projeto. Porém, o uso dos elementos como quebra-sóis, claraboias e aberturas para a ventilação natural estavam mais vinculadas à influência de Le Corbusier e às intensões estéticas do que ao conforto ambiental, como constatado em alguns estudos sobre o desempenho ambiental (RUSSO, 2004).

A influência de Le Corbusier deu início a um processo criativo chamado arquitetura moderna brasileira, que reinterpreta elementos da arquitetura colonial na corrente estética racionalista. A identidade nacional da arquitetura foi consolidada a partir da união dos mandamentos da arquitetura moderna com os elementos das construções tradicionais, favorecendo a ventilação e sombreamento de acordo com o clima e a orientação solar do local.

Esses conceitos podem ser vistos no edifício da antiga sede do Ministério da Educação e Saúde Pública, o Palácio Capanema, projetado por Lúcio Costa e sua equipe, composta por Carlos Leão, Affonso Eduardo Reidy, Ernani Vasconcellos, Jorge Moreira e Oscar Niemayer, em 1937 (Figura 2.16). Eles tiveram como referência os estudos feitos por Le Corbusier, quando esteve no Brasil em 1936, a convite do Ministro Gustavo Capanema. Este edifício foi construído no período entre 1937 e 1945.

Figura 2.16: Palácio Capanema.

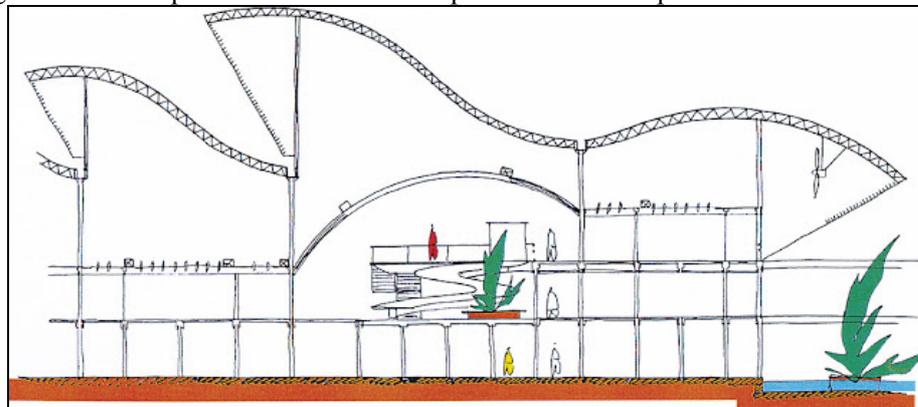


Fonte: (IPHAN, 2016).

O conceito arquitetônico abordou soluções bioclimáticas adotadas pela equipe de Lúcio Costa, como o sistema de ventilação cruzada natural, possibilitando que a brisa da baía de Guanabara entrasse no edifício e circulasse nos espaços internos, forçando a saída do ar quente pela fachada noroeste.

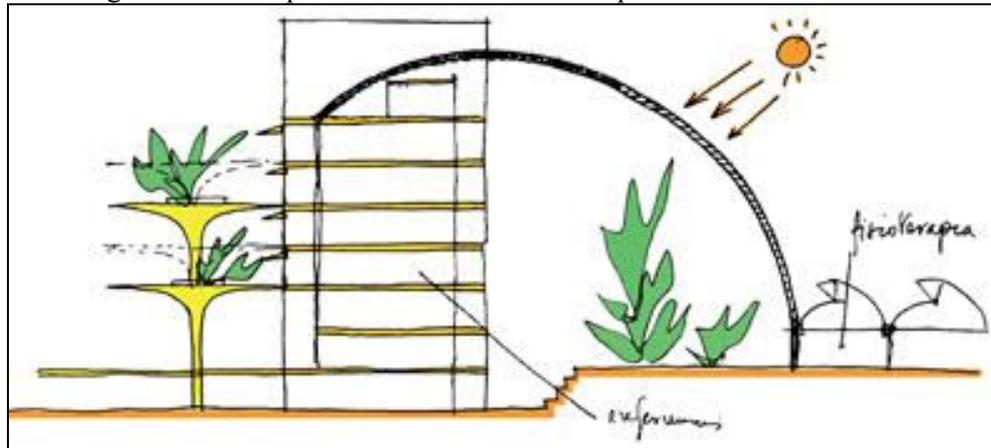
Outro exemplo brilhante na arquitetura brasileira é o trabalho de João Filgueiras Lima, Lelé, que em seu trabalho pioneiro adotou soluções com fortes características de integração com as necessidades climáticas locais para alcançar condições de conforto e qualidade ambiental (Figuras 2.17 e 2.18). Foram contemplados em seus projetos: a luz do dia, os ventos dominantes, aberturas zenitais, corredores de ventilação com resfriamento e evaporação como sistema de refrigeração (MACIEL; FORD; LAMBERTS, 2007).

Figura 2.17: Croquis de Lelé do corte esquemático do Hospital Sarah Rio de Janeiro.



Fonte: (LEONIDIO, 2014).

Figura 2.18: Croquis de Lelé do corte do Hospital Sarah Fortaleza- CE.



Fonte: (GUIMARÃES, 2014).

Os projetos demonstram a preocupação do arquiteto João Filgueiras Lima, com a questão da humanização dos espaços e o conforto ambiental dos edifícios, aproveitando-se das condições naturais dos locais onde estão inseridos.

A arquitetura hospitalar projetada por Lelé abrange todos os princípios do bioclimatismo. Seus ambientes são adaptados ao clima local e com pouco consumo energético, adotando proteções contra a radiação solar, aproveitamento das brisas, inércia térmica dos materiais, espaços umidificados e tira partido ao máximo da luz natural através do uso de elementos arquitetônicos.

No decorrer das últimas décadas, o bioclimatismo vem sendo retomado na arquitetura, principalmente em virtude da inclusão da eficiência energética no compromisso mundial.

Diversos países têm conseguido aumentar a eficiência energética melhorando os padrões construtivos, introduzindo novas tecnologias e a concepção bioclimática na arquitetura, dispendo como base de projeto o clima local. Essa abordagem bioclimática é o melhor caminho para a redução do consumo de energia pelos edifícios, uma vez que, baseando-se nas condições climáticas da localização é possível uma redução significativa das necessidades de climatização (OROSA; OLIVEIRA, 2009).

A missão da arquitetura é sempre intermediar a relação do homem com seu ambiente interno e externo. A arquitetura bioclimática interage energeticamente com o clima e suas origens para alcançar os melhores níveis de eficiência energética e bem-estar de seus ocupantes.

## 2.6 Consumo de eletricidade no Brasil

A arquitetura vem buscando cada vez mais inovações nos projetos e nas especificações de materiais. Vem se buscando elementos industrializados que proporcionam maior agilidade de execução e menor desperdício de produtos e mão de obra, principalmente nos elementos de vedação externa que atendam aos critérios mínimos de desempenhos estabelecidos na NBR-15.575.

As edificações são grandes consumidoras de energia em todo seu ciclo de vida que vai da produção dos materiais, execução, uso, manutenção, *retrofit* e demolição. A energia gasta na fase operacional é a que tem a maior representatividade no consumo de energia de uma edificação durante seu ciclo de vida (SARTORI; HESTNES, 2007).

Os setores que mais consumiram energia foram o industrial (33 %) e o de transporte (32 %) (Figura 2.19). O setor residencial teve um consumo mais elevado que o de serviços. Vale ressaltar que no setor industrial está o setor da construção civil.

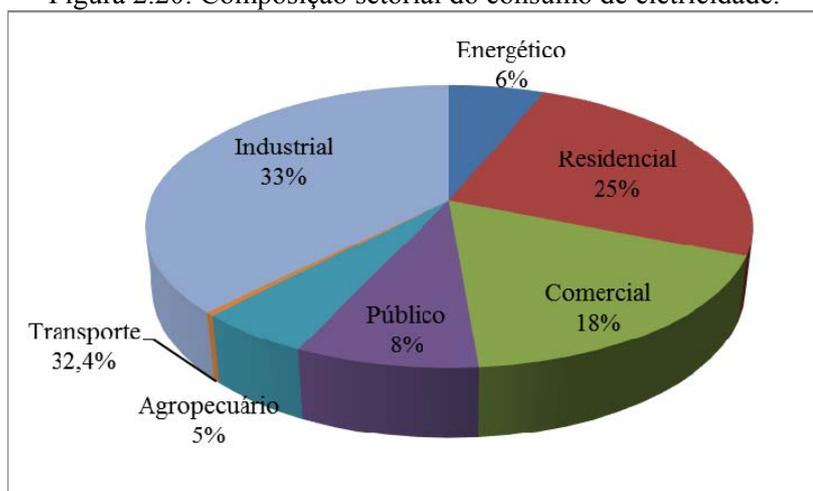
Figura 2.19: Uso da energia no Brasil em 2016.



Fonte: Adaptado de (EPE, 2017).

Os edifícios comerciais, residenciais e públicos têm um impacto significativo no consumo de energia e representam um terço do consumo total final na maioria dos países estudados pelo *International Energy Agency* (IEA, 2013). No Brasil, conforme EPE (2017), os edifícios comerciais foram responsáveis por 18 % do consumo de energia elétrica (Figura 2.20).

Figura 2.20: Composição setorial do consumo de eletricidade.



Fonte: Adaptado de (EPE, 2017).

Observa-se na Figura 2.20 que a indústria é o maior consumidor, porém, considerando os setores de edificações (público, comercial e residencial) em conjunto, o consumo chega a mais de 50 %, classificando assim, estes setores como os maiores consumidores de eletricidade.

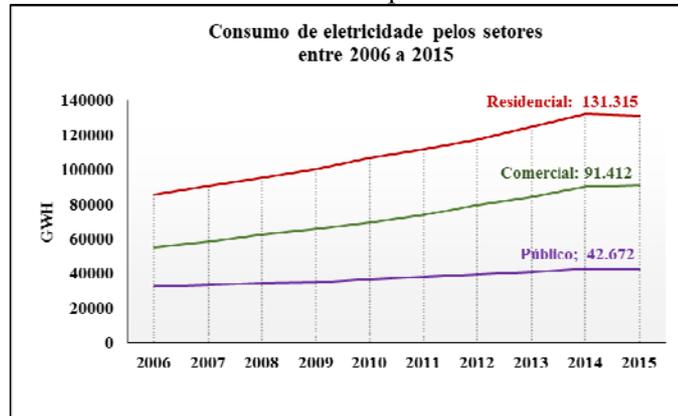
Esta grande participação das edificações, especificamente as comerciais e públicas, no consumo de eletricidade do país, impacta o consumo total e a curva de carga de uso no decorrer do dia, especialmente nos meses de verão, alterando o pico para o período da tarde devido ao uso do ar condicionado (ELETROBRÁS/PROCEL, 2017).

Estima-se que cerca de 40 % da energia produzida no mundo é consumida dentro dos edifícios (PÉREZ-LOMBARD; ORTIZ; POUT, 2008). Não apenas na operação e manutenção dos edifícios, mas também nos sistemas artificiais que possibilitam conforto ambiental interno para os usuários tais como a climatização, iluminação e aquecimento de água (CARLO, 2008). Porém, o potencial de conservação no setor é de 30 % para edificações existentes adotando estratégias de *retrofit*, com a possibilidade de aumento deste valor em projetos de novos edifícios que adotem tecnologias energeticamente eficientes e sustentáveis (MIKAI, 2018).

Diante destas razões e considerando que o consumo de energia para o setor comercial, residencial e público demonstra crescente nos últimos anos (Figura 2.21) (EPE, 2017), confronta-se com a responsabilidade de buscar novas soluções para evitar uma grande crise energética, econômica e de impacto socioambiental causado pela implantação de grandes usinas hidrelétricas, caracterizando áreas inundadas com impactos na fauna e flora locais e

nas comunidades deslocadas, e pelas emissões de gases do efeito estufa e outros poluentes que ocorrem durante a operação de usinas termelétricas movidas a combustíveis fósseis.

Figura 2.21: Consumo de eletricidade pelos setores entre 2006 e 2015.



Fonte: Adaptado de (EPE, 2017).

Para melhorar esta situação e reduzir a demanda de energia (principalmente de fontes finitas), é necessário que as instituições públicas e privadas adotem medidas direcionadas para a diminuição do consumo de eletricidade. É necessária a adoção de projetos arquitetônicos e espaços públicos com mais eficiência energética, adotando ações que estimulem o uso de energia sem prejudicar o conforto e a qualidade de vida dentro dos edifícios.

## 2.7 Políticas, programas e regulamentação

Vários países enfrentam ultimamente dificuldades para abastecer a população e suprir o crescimento econômico com energia (JANNUZZI, 2005). O poder público de vários países, incluindo o Brasil, vem cada vez mais buscando mecanismo legais e incentivadores à conservação de energia que promovam o uso racional de energia pelos diversos setores.

Nos Estados Unidos, as primeiras normas de eficiência energética surgiram na década de 1970, provocada pela crise do petróleo (DIXON et al., 2010).

Na União Europeia seus instrumentos legais também iniciaram na mesma época, fixando metas de redução da demanda de energia e de emissão de poluentes, a serem atingidas pelos países membros (FOUQUET, 2013).

Em meados de 1980 o impacto da queima de combustíveis fósseis no clima global foi pauta de discussões em todo mundo que resultou em 1997 no acordo internacional, onde os países signatários definiram as metas para reduzir as emissões de CO<sub>2</sub>, o Protocolo de Kyoto (HADDAD, 2004). Para serem alcançados os objetivos propostos no protocolo foi necessário

criar mecanismos que estimulassem a eficiência energética em todas as cadeias energéticas. Estas frequentes crises energéticas e os acordos transportaram a eficiência energética uma condicionante para atender a demanda por energia de uma forma economicamente sustentável (MME, 2009).

As crescentes preocupações com o meio ambiente e questões relativas ao desperdício de energia promoveu vários programas. O Brasil avança na eficiência energética com a aprovação da Lei nº 10.295 de 17 de outubro de 2001, conhecida como a Lei de Eficiência Energética, que dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia (BRASIL, 2001a). Foi regulamentada pelo Decreto nº 4.059 de 19 de dezembro de 2001, o qual determina que os níveis máximos de consumo de energia ou mínimos de máquinas e aparelhos consumidores de energia fabricados e comercializados no Brasil, assim como as edificações construídas, estejam ajustados com base em indicadores técnicos e regulamentação específica. O Decreto criou o Grupo Técnico para Eficientização de Energia nas Edificações - GT Edificações e o Comitê Gestor de Indicadores e Níveis de Eficiência Energética – CGIEE (BRASIL, 2001b).

A respeito das edificações, conforme Fossati e Lamberts (2010), o decreto estabeleceu que devem ser propostos:

1. Adoção de procedimentos para avaliação da eficiência energética das edificações;
2. Indicadores técnicos referenciais do consumo de energia das edificações para certificação de sua conformidade em relação à eficiência energética;
3. Requisitos técnicos para que os projetos de edificação a serem construídos no país atendam aos indicadores mencionados no item anterior.

Em 2009, o Brasil toma uma grande atitude rumo à eficiência energética de seus edifícios com a Portaria nº 163 do Inmetro (BRASIL, 2009a), que diz respeito ao Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos (RTQ-C) que possui como objetivo estabelecer condições para a etiquetagem do nível de eficiência energética das edificações e especifica os requisitos técnicos e os métodos para a classificação dos edifícios comerciais, de serviços e públicos. Em seguida, em 2010, foi publicado o Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (RTQ-R).

A Resolução ANEEL nº 482/2012 foi o marco regulatório para a implementação de sistemas fotovoltaicos na geração distribuída no Brasil. Ela determina o sistema de

compensação de energia elétrica no Brasil. As unidades consumidoras a partir de fonte hidráulica, solar, eólica, biomassa ou cogeração qualificada<sup>17</sup>, com micro ou mini geração distribuída (GD)<sup>18</sup> tornam-se produtores de energia elétrica para a concessionária local e começa a compensar parte de sua energia consumida. A energia excedente gera créditos de energia para que possam ser utilizados nos meses subsequentes pelos consumidores/geradores distribuídos (ANEEL, 2012).

No artigo 2º da Resolução ANEEL nº 482 definiu a micro e mini geração distribuída a partir de centrais geradoras que utilizem fontes com base em energia hidráulica, solar, eólica, biomassa ou cogeração qualificada e que tenham a potência limitada pela seguinte faixa de valores (ANEEL, 2012):

- Micro geração distribuída: potência instalada menor ou igual a 100 kW;
- Mini geração distribuída: potência instalada superior a 100 kW e menor ou igual a 1MW.

A compensação é realizada a partir da energia ativa injetada pelo micro ou mini gerador, a qual gera créditos de energia equivalentes para serem consumidos em um período de até 36 meses. O crédito gerado pode ser utilizado por outra unidade consumidora, desde que esta esteja relacionada ao mesmo CPF (Cadastro de Pessoa Física) ou CNPJ (Cadastro de Pessoa Jurídica) da unidade consumidora responsável pela geração dos créditos.

De acordo com o Sistema de Compensação proposto pela resolução em questão, deverá ser cobrado, no mínimo, o custo de disponibilidade para consumidores de atendidos em baixa tensão 127 ou 220 volts ou a demanda contratada para consumidores atendidos em tensão superior a 2,3 kV (ANEEL, 2012).

Em novembro de 2015 a Resolução ANEEL nº 482/2012 passou por uma revisão, na qual foi lançada a Resolução ANEEL nº 687/2015 com algumas mudanças significativas conforme demonstrado no Quadro 2.1.

---

<sup>17</sup> Atributo concedido a cogeneradores que atendem os requisitos definidos na Resolução Normativa n.235 de 14/11/2006, segundo aspectos de racionalidade energética, para fins de participação nas políticas de incentivo a cogeração.

<sup>18</sup> Geração distribuída (GD) é a produção de energia de forma descentralizada no próprio local ou próximo de onde essa energia é utilizada.

Quadro 2.1: Principais mudanças da Resolução ANEEL 687 de 15 de novembro de 2015.

<b>Tópicos abordados</b>	<b>Resolução n° 482/2012</b>	<b>Resolução n° 687/2015</b>
Potência micro e mini geração	Micro geração: até 100 kW. Mini geração: 1000 kW a 1 MW.	Micro geração: até 75 kW. Mini geração: de 75 kW a 5 MW.
Utilização dos créditos da geração	Até 36 meses	Até 60 meses
Prazo para compensação de energia	Até 82 dias	Até 34 dias
Geração em condomínios	Não possui	Moradores do mesmo condomínio podem obter geração de forma compartilhada.
Consórcios e cooperativa	Não possui	Consumidores com CNPJ ou CPF diferentes se juntam para montar uma usina em uma área e dividem as cotas da geração.

Fonte: (ANEEL, 2015).

O lançamento de planos nacionais foi importante medida para apoiar o planejamento e execução de medidas de conservação de energia como complementação à criação de programas e leis. Os planos mais relevantes que abordam sobre o assunto são:

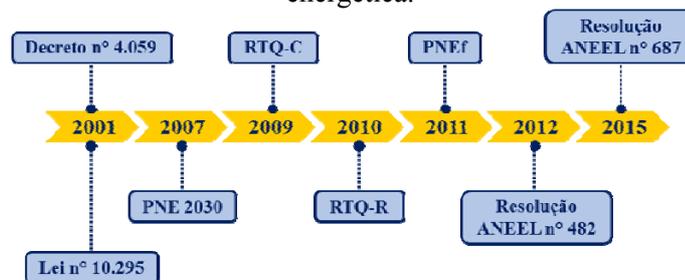
- Plano Nacional de Energia 2030 – PNE 2030 (MME/EPE, 2007): Apresenta o potencial de aplicação de medidas de eficiência energética no Brasil, para diferentes cenários macroeconômicos formulados com base em estimativas de crescimento econômico nacional e internacional nos próximos anos. Demonstra que, em geral, o potencial de aplicação de medidas de eficiência energética depende do cenário econômico, quanto maior o crescimento econômico, maior a possibilidade de se conservar a energia empregada.
- Plano Nacional de Eficiência Energética - PNEf (MME, 2011): Descreve diversas ações que podem ser desenvolvidas para aumentar a conservação de energia nos setores industrial, transportes, edificações, iluminação pública, saneamento, educação, entre outros.

Conforme o Plano Nacional de Eficiência Energética, é fundamental investir em capacitação técnica de profissionais da construção civil na área da eficiência energética, como a incorporação de conceitos de eficiência energética no planejamento urbano e códigos de obras municipais brasileiros. Além disso, aborda a importância da certificação de eficiência energética de edifícios ser obrigatória (BRASIL, 2014).

O PNEf ressalta a necessidade de trabalhar o assunto eficiência energética nos diferentes níveis de ensino da educação. Apresenta planos para promover ações integradas entre escolas e comunidades para combater o desperdício de energia, da forma que os conhecimentos compartilhados dentro das salas de aula sejam repassados à população. O PNEf ressalta também a necessidade de expandir os conhecimentos sobre conservação de energia na formação profissional de engenheiros e arquitetos, assim como fortalecer os laboratórios de certificação e centros de pesquisa em eficiência energética no país (MME, 2011).

A Figura 2.22 apresenta uma linha do tempo dos principais marcos regulatórios na área de eficiência energética no Brasil.

Figura 2.22: Principais marcos regulatórios brasileiros, a partir de 2001, na área de eficiência energética.



Fonte: Adaptado de (ALTOÉ et al., 2017).

## 2.8 Eficiência energética

Quanto a Eficiência Energética, foi no ambiente industrial que o conceito se originou, tendo como foco a redução dos custos de produção. Assim, Patterson (1996) formulou a eficiência energética como:

$$\text{Eficiência energética} = \frac{\text{Quantidade de trabalho gerado}}{\text{Energia consumida pelo processo}} \quad \text{Equação (2.1)}$$

Entende-se então que a eficiência energética é um conjunto de ações que possibilita otimizar a relação entre a quantidade de energia consumida, os serviços e os produtos finais alcançados. A eficiência energética aumenta à proporção que o consumo de energia para a produção do serviço ou produto diminui. Isso implica que um edifício possui alta eficiência energética quando proporciona condições ambientais de conforto para seus usuários consumindo o mínimo de energia. O conceito básico da eficiência energética é a redução da demanda de energia, ou seja, a energia mais barata é a que não é consumida (LAMBERTS;

DUTRA; PEREIRA, 2014).

Nesta visão, o trabalho passa a ser o nível de conforto para os usuários, o qual é obtido pelas variáveis de uso do ambiente, como a quantidade de iluminação necessária, a temperatura interna na faixa de conforto, a qualidade do ar interno, conforto térmico, acústica e remoção de efluentes. Com isso, pode-se formular (PATTERSON, 1996):

$$\text{Eficiência Energética} = \frac{\text{Conforto proporcionado pela edificação}}{\text{Energia consumida pela edificação}} \quad \text{Equação (2.2)}$$

Interpretando a fórmula da eficiência energética, tem-se que o seu objetivo é minimizar as necessidades energéticas de uma edificação, mantendo o nível de conforto dos usuários visando à mitigação do aquecimento global, reduzindo as emissões de gases de efeito estufa (GEE) relacionados à utilização de combustíveis fósseis para a produção de eletricidade.

É essa visão que a arquitetura, urbanismo e a construção civil devem ter como principal objetivo para alcançar a real sustentabilidade.

### **2.8.1 Eficiência energética no mundo – metodologias para avaliação ambiental**

Várias metodologias que avaliam as condições ambientais de edifícios estão sendo desenvolvidas e aplicadas no mundo todo. A eficiência energética é considerada um dos fatores mais significativos para a certificação de edifícios sustentáveis, visto que o uso contínuo de energia é provavelmente o maior impacto ambiental específico de um edifício, e por isso o projeto energeticamente eficiente deve ser prioridade número um (AMORIM, 2003).

Foi na década de 1980, no Reino Unido, que surgiu a primeira metodologia de avaliação ambiental denominada BREEAM (*Building Research Establishment Environmental Assessment Method*), voltada para variadas tipologias de edifícios. É um sistema padrão nivelador para ponderação pertinente ao teste de desempenho de um sistema. Desenvolvido por pesquisadores do BRE (*Building Research Establishment*) e do setor privado, em parceria com o setor industrial, buscando a especificação e medição de desempenho dos edifícios, o BREEAM disponibiliza orientações de como reduzir os efeitos negativos das edificações tanto no ambiente onde estão inseridas quanto no resto do planeta, alinhados ao objetivo de proporcionar um ambiente interno mais saudável e confortável (OLIVEIRA, 2009).

O LEED (*Leadership in Energy and Environmental Design*), metodologia criada nos Estados Unidos consiste em um sistema inspirado no BREEAM, mas com o objetivo próprio de ser um sistema de classificação de desempenho consensual e orientado pelo mercado, visando acelerar o desenvolvimento e a implementação de práticas de projeto e construção ambientalmente responsáveis e agregar valor aos edifícios certificados, e o AQUA (Alta Qualidade Ambiental), metodologia criada na França, nascida no sistema HQE (*Haute Qualité Environnementale*) são algumas das metodologias que estão sendo utilizadas no Brasil.

A certificação LEED, de acordo com Oliveira (2009), é aceita internacionalmente como modelo para a concepção, construção e operação dos edifícios. Aborda a sustentabilidade fundamentada através da avaliação do desempenho nos seguintes campos da saúde humana e ambiental:

1. Desenvolvimento local sustentável;
2. Economia de água;
3. Eficiência energética;
4. Seleção de materiais.

O método vem sendo bastante adotado no Brasil e possui questões que vão além da eficiência energética, no entanto ainda necessita de alguns ajustes. A GBC BRASIL (*Green Building Council Brasil*) tem se dedicado em inserir créditos regionais, entretanto, estes não seriam inicialmente diferenciados para cada região do país, exceto o crédito de materiais regionais.

O AQUA é composto por duas partes: o sistema de gestão do empreendimento, que pode ser considerado universal e é válido para o Brasil, e a qualidade ambiental do edifício, que é adequada às construções e às legislações francesas (FOSSATI; LAMBERTS, 2008). As categorias de avaliação do AQUA são:

1. Eco-construção: aborda as relações do edifício com o seu entorno; escolha integrada de produtos, sistemas e processos construtivos; canteiro de obras com um baixo impacto ambiental;
2. Gestão: gestão da energia, da água, dos resíduos de uso e operação e manutenção;
3. Conforto: conforto acústico, visual e olfativo;
4. Saúde: qualidade sanitária dos ambientes, do ar e da água.

Nota-se que em todas as metodologias acima citadas, a influência da eficiência energética durante a utilização do edifício é extremamente relevante, pois o uso constante de energia é o maior impacto ambiental que um edifício oferece. Diante disso, pode-se afirmar a importância de um projeto energeticamente eficiente e o fortalecimento do Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica.

### **2.8.2 Etiquetagem de eficiência energética de edificações conforme o regulamento técnico da qualidade do nível de eficiência energética de edifícios comerciais, de serviços e públicos (RTQ-C)**

O Plano Nacional de Eficiência Energética 2010-2030 prevê diversas ações no âmbito da etiquetagem de edificações, como a capacitação, divulgação e disseminação e também o estímulo da inserção do conceito de eficiência energética em edificações públicas novas e existentes.

Apesar de ainda ser voluntário em edificações novas e existentes, passará a ter caráter obrigatório para novas edificações em prazo ainda não definido.

A etiquetagem de edificações no Brasil é um avanço para a construção civil e um grande desafio para os profissionais da área, estimula a concepção de projetos mais eficientes e proporciona benefícios para os ambientes construídos, sejam eles edificadas ou urbanizados.

Além dos benefícios para o ambiente construído, pode-se citar a criação de oportunidade para os profissionais da construção civil e para os usuários, uma vez que a etiquetagem requer edificações eficientes com as exigências do regulamento.

O RTQ-C possui duas possibilidades para avaliação das edificações: pelo método prescritivo (o adotado para esta pesquisa) e por simulação computacional do desempenho termoenergético. Pode-se avaliar também somente algumas partes dos edifícios (um pavimento ou conjunto de salas, por exemplo) quanto ao sistema de iluminação e condicionamento de ar, recebendo assim uma classificação parcial do nível de eficiência referente a cada um desses itens (FOSSATI; LAMBERTS, 2010).

Em função da necessidade de estabelecer regras justas e para o conhecimento público, em relação à etiquetagem dos edifícios com a concessão da ENCE (Etiqueta Nacional de Conservação de Energia), o Inmetro baixou a Portaria Inmetro nº 185, de 22 de junho de 2009 (BRASIL, 2009b) que instituiu o Regulamento de Avaliação da Conformidade do Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos (RAC-C), determinando os mecanismos de avaliação de conformidade aplicáveis, que são a etiquetagem

e a inspeção. O RTQ-C, o RAC-C e um manual para aplicação desses dois regulamentos (BRASIL, 2009b) foram desenvolvidos pelo Laboratório de Eficiência Energética de Edificações (LABEEE) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), por meio de um convênio firmado entre essa universidade e as Centrais Elétricas Brasileiras S.A. – Eletrobrás (FOSSATI; LAMBERTS, 2010).

Atualmente, o RTQ-C vem sendo aplicado em diversas edificações e em diferentes regiões do Brasil. Alguns pontos cruciais estão sendo avaliados para revisões futuras do documento. Porém, a exemplo de outros países, os critérios devem ser constantemente atualizados e revisados com o objetivo de torná-los mais rígidos e consolidar o padrão de eficiência dos edifícios. A partir do momento que o RTQ-C e a etiquetagem começarem a ser praticados simultaneamente em diversas regiões do país, será possível identificar e avaliar o padrão dos edifícios eficientes no Brasil de acordo com a Zona Bioclimática onde cada um deles está inserido (FOSSATI; LAMBERTS, 2010).

O RTQ-C aplica-se para qualquer tipologia de edificação comercial, serviço ou pública, abordando separadamente os edifícios com área total útil menor que 500 m<sup>2</sup> e maiores que 500 m<sup>2</sup>. São considerados os edifícios:

1. De uso misto (residencial e comercial);
2. Residencial e de serviços;
3. Uso residencial e público.

Sendo que, no último caso, as parcelas não residenciais com área total útil mínima de 500 m<sup>2</sup> são avaliadas separadamente.

Aplica-se o RTQ-C em projetos de novos edifícios como também em edificações existentes. A etiquetagem de eficiência energética de edificações precisa atender aos critérios referentes ao desempenho da envoltória, à eficiência e à potência instalada (soma das potências nominais de equipamentos elétricos de mesma espécie instalados na unidade consumidora e em condições de entrar em funcionamento) do sistema de iluminação e à eficiência do sistema de condicionamento do ar que estão inclusos no RTQ-C (ELETROBRÁS/PROCEL, 2013).

Para determinar o nível de eficiência energética, podem ser adotados dois métodos, o prescritivo e de simulação. A aplicação do método prescritivo (adotado nesta pesquisa) pode ser realizada em qualquer cidade do país, tomando como ponto de partida a demarcação da zona bioclimática do país que esteja inserida (CARLO; LAMBERTS, 2010).

De acordo com Carlo e Lamberts (2010a), o RTQ-C foi determinado como um conjunto de regras gerais para identificar a eficiência do edifício e aplica-se a diferentes tipologias construídas no país. O método, porém, não contempla todas as possíveis soluções que possam existir em uma edificação, com isso, nesses casos, só é possível a utilização do método por simulação, para o qual é necessário um programa específico de simulação termo energética definido pela regulamentação, como também um arquivo climático da cidade composto de dados como: temperatura e umidade do ar, direção e velocidade do vento e radiação solar.

Tanto o método prescritivo quanto o de simulação necessitam cumprir os requisitos referentes ao desempenho da envoltória, à eficiência e potência instalada do sistema de iluminação e à eficiência de condicionamento do ar, separadamente, no entanto a classificação da envoltória é obrigatória, independente se a avaliação será para classificação referente ao sistema de iluminação ou de condicionamento do ar (BRASIL, 2010).

## **2.9 Edifício energia Zero (EEZ)**

### **2.9.1 Definições**

Com a busca por edifícios cada vez mais eficientes, com baixos consumos de energia e integrados à rede elétrica, surgiram os Edifícios de Energia Zero (ou *Net Zero Energy Buildings* no inglês, abreviados para ZEB). São edifícios com baixas necessidades energéticas, alcançadas através de ações de eficiência energética, e a energia necessária é obtida por energias renováveis instaladas no local. Ou seja, um EEZ é aquele edifício que através de sistemas de geração renovável própria, produz a energia suficiente para suprir o seu consumo anual e que os custos de energia equivalem a zero (TORCELLINI et al., 2006).

Esta definição parece simples, porém as divergências limitam um consenso, que está relacionado com a definição de geração própria (PACHECO; GHISI; LAMBERTS, 2013), geração renovável de energia, consumo próprio de energia, medição da energia e qual o período do balanço energético a considerar (MARSZAL et al., 2011). Isso significa que um edifício deverá ter um desempenho energético muito elevado e que suas necessidades de energia serão quase nulas, ou baixas, devendo ser supridas por renováveis (DIDONÉ; WAGNER; PEREIRA, 2014).

Os EEZs surgiram como uma alternativa para suprir a crescente demanda no consumo de energia dos edifícios comerciais nos Estados Unidos, minimizar os impactos causados pela

geração dessa energia (TORCELLINI et al., 2006), como uma solução real para a mitigar as emissões de GEE e para o consumo de energia do setor de edificações (MARSZAL et al., 2011). Também não existe uma definição precisa do que é um Edifício de Energia Quase Zero (*Nearly Zero Energy Building* – NZEB), em suma, essa definição é a de um edifício com altíssima performance, onde uma parte considerável desta pouca ou “quase zero” energia deve ser atendida por geração de energia por fontes renováveis locais (ECEEE, 2011).

A definição de EEZ está gerando vários debates devido as diversas interpretações de diferentes autores (MITSIDI PROJETOS, 2017). Devido a isso, vários estudos buscam a melhor definição de “edifícios de energia zero”.

Torcellini et al. (2006) atentam para o fato de existirem diferentes definições de EEZ, algumas vezes incompatíveis. Apresentam no estudo, classificações de energia que são utilizadas nas definições de EEZ, que são: energia local, energia primária, custo de energia, e emissões de energia. Estas diferenças são significativas pelo fato de um mesmo edifício poder ser ou não considerado EEZ dependendo da definição de energia utilizada (PACHECO; GHISI; LAMBERTS, 2013).

No estudo de Pacheco, Ghisi e Lamberts (2013), considerou-se como um EEZ aquele capaz de gerar energia suficiente para suprir seu consumo energético anual, sendo a energia gerada através de um sistema próprio de geração renovável. Porém, os autores mapearam no estudo as nuances da definição do conceito de EEZ, concluindo, através de vários artigos, que existe uma divergência nesta definição e entendimento por diferentes autores. Segundo Sartori et al. (2012) as definições dependem das políticas energéticas de cada país e suas condições específicas.

Pacheco, Ghisi e Lamberts (2013) afirmam que as divergências sobre a definição de EEZ advêm das diferentes definições de energia, especificamente ao modo de como a energia do balanço deve ser contabilizada.

Hernandez e Kenny (2010) adotam uma definição que considera todo o ciclo de vida na análise detalhada dos diferentes aspectos ambientais dos materiais, incluindo a energia incorporada no balanço geral. Além disso, abordam a questão da “energia líquida”, que é utilizada para descrever o equilíbrio entre a energia utilizada pelo edifício, seus ocupantes e sistemas e a energia produzida por seus sistemas de energia renovável.

Sartori, Napolitano e Voss (2012) destacaram a importância crescente e a relevância da ACV à medida que construções avançam para edifícios de “baixa energia”.

Pacheco, Ghisi e Lamberts (2013) identificam quatro definições internacionais do conceito “energia zero”, que é também sugerido por Torcellini et al (2006) como:

- Edifício Zero Energia Local: possui produção anual de energia igual ao consumo anual de energia, verificado no medidor de consumo elétrico do próprio edifício;
- Edifício Zero Energia Primária: são aqueles que a produção anual de energia é igual ao consumo anual de energia primária. Toda a energia utilizada no processo de produção e transmissão da energia até chegar ao edifício é contabilizada, assim como a natureza da fonte de energia;
- Edifícios de Custo Zero de Energia: são aqueles que a produção anual de energia local é, em custo, igual ao seu consumo anual. Consideram a diferença entre o total consumido e os incentivos governamentais em forma de crédito;
- Edifícios de Emissões Zero (ou zero carbono): são os que a produção de energia renovável é igual ao seu consumo de energia de fontes não-renováveis.

As diferentes definições podem implicar em diferenças consideráveis em relação a geração própria de energia. De acordo com a definição de energia utilizada, uma mesma edificação pode ser ou não considerada um EEZ. As definições de EEZ mais usadas na literatura, são as definições local e primária.

O conceito de Energia Local Zero (*Net Zero Site Energy*) baseia-se na contabilização do balanço entre a energia consumida da rede e a produzida no local. É feita através da leitura no medidor de energia. Como toda a produção de energia deve ser realizada no local e com o uso de fontes renováveis de energia, essa definição implica em medidas mais exigentes de eficiência energética (PACHECO, 2013). Torcellini et al. (2006) ressalta que uma das vantagens dessa definição está relacionada aos espaços a serem utilizados para instalação dos sistemas renováveis de energia que já estão alocados para o uso do EEZ, não sendo necessário apropriar-se de áreas externas à sua implantação para gerar energia. No entanto, para Marszal (2011), é ignorado a eficiência geral do sistema, a contabilização dos custos energéticos da geração e transmissão desta energia no balanço final.

O estudo de Oliveira (2017) avaliou o potencial da edificação do Núcleo Interdisciplinar de Planejamento Energético (NIPE) em se tornar um EEZ adotando o conceito de Energia Zero Local. Analisou o potencial de redução do consumo de energia elétrica da rede das cargas existentes na edificação. Adotou um sistema fotovoltaico levando em consideração os aspectos arquitetônicos da construção na seleção e instalação dos equipamentos. Os dados obtidos a partir da curva de carga medida no transformador que alimenta o edifício, demonstrou que o consumo médio mensal do edifício foi de 11.045 MJ

mês (3.068 kWh/mês). A energia gerada pelo sistema fotovoltaico com os painéis mais eficientes, de silício monocristalino, geraram cerca de 12.283MJ/mês (3.412 kWh/mês), concluindo assim que nas condições que foram analisadas existe potencial da edificação do NIPE se tornar um EEZ energia local.

Já a definição de Energia Primária Zero (*Net Zero Source Energy*), diferente da Energia Local Zero, contabiliza os custos de geração e transmissão de energia. Ela distingue os sistemas de geração de eletricidade por fonte e considera que nem toda energia tem o mesmo valor (PACHECO; GHISI; LAMBERTS, 2013). Essa definição é considerada por muitos autores como a mais adequada a ser aplicada, pois visa à redução das perdas que um sistema de geração de energia sofre.

Micono e Zanzottera (2015) usaram a modelagem dinâmica como auxiliar no planejamento de estratégias para alcançar ao mesmo tempo um EEZ ou um quase EEZ, desde a fase inicial de projeto até o gerenciamento da construção. O projeto analisado é a sede de uma indústria italiana. A fachada é completamente envidraçada para permitir a entrada de luz natural nos escritórios e conta com proteção solar para sombreamento. Durante o estudo preliminar de arquitetura definiram-se metas de eficiência energética e um padrão alto de qualidade interna para garantir as melhores condições de conforto para os usuários. O edifício foi realizado para atender tanto um EEZ ou um quase EEZ, por isso durante o ano o edifício produz a mesma quantidade de energia consumida, além disso, mensalmente, a diferença entre a energia consumida e a energia produzida são inferiores ao limite acordado de 8,0 kWh/m<sup>3</sup>y (energia fonte). Os resultados da modelagem de energia dinâmica mostraram que o edifício pode produzir anualmente a mesma quantidade de energia consumida (a comparação foi realizada em termos de energia primária).

Na definição de Custo Zero de Energia (*Net Zero Energy Costs*) o balanço entre os custos com a importação da energia da rede e a receita com a exportação da energia à rede é nulo. Isso significa que um edifício não precisa repor a energia consumida, caso haja consumo, será necessário apenas que cubra o custo da energia que foi utilizada da rede. Como o custo de da energia é variável conforme a fonte que utiliza, e como o custo da energia renovável ainda é alto frente à energia convencional (no caso Brasil, das hidrelétricas) o governo possui incentivos específicos para essa geração renovável. O governo garante a compra de energia através de uma tarifa subsidiada com valor superior a de mercado (LIMA, 2012).

O conceito de Energia de Custo Zero, a curto prazo e do ponto de vista comercial dos proprietários é considerada limitada. É comercial do ponto de vista que não garante a

reposição da energia importada da rede, garante apenas um custo zero para o consumo energético do edifício, e de curto prazo, pois a matriz energética vem se tornando cada vez mais renovável e com isso a tarifa diferenciada vai reduzindo. É uma definição provisória pois é extremamente influenciada pelas variações políticas governamentais (TORCELLINI et al., 2006)

O estudo de Barthelmes et al. (2015) analisou vários cenários para a envoltória de uma residência típica da região de Piedmont, na Itália, de acordo com Diretiva Europeia 2010/31/EU. A combinação de soluções energéticas de alto desempenho foi combinada com o design tradicional de uma residência rural. A residência tem sua demanda de energia abastecida através da auto geração de eletricidade a partir de um sistema fotovoltaico. Os espaços interiores foram otimizados e as perdas de energia foram diminuídas através da envoltória. Intuitivamente usou o *know-how* em princípios de arquitetura bioclimática que guiou o projeto arquitetônico e o planejamento da construção. Abordou a questão da vegetação como proteção acústica e controle solar e considerou na análise a zona bioclimática que a residência se encontra, adotando as estratégias recomendadas para obter condições de conforto interno tanto no inverno quanto no verão com baixo consumo de energia. O estudo usou a metodologia para EEZ de análise “custo-ótimo” que analisa as performances energéticas e econômicas de diferentes configurações de design e identifica o chamado nível ótimo de custo, que representa o nível de desempenho energético que leva ao menor custo durante o ciclo de vida econômico do edifício. Os resultados da avaliação energética do estudo mostram que, para atingir o objetivo EEZ (com um consumo primário de energia inferior a 10 kWh/m<sup>3</sup>y) é necessário escolher um envelope de construção fortemente isolado. A avaliação de energia foi realizada por meio do software de simulação de energia dinâmica *EnergyPlus*. Concluiu-se que projetar e construir um EEZ é tecnicamente viável, porém se for considerado apenas o custo do investimento, não, mas revela-se rentável tendo em conta os custos incorridos durante todo o ciclo de vida do edifício.

O conceito dos edifícios de Energia de Emissão Zero (*Net Zero Energy Emissions*) compensam as emissões dos gases que contribuem para o efeito estufa. A energia é gerada por meio de fontes renováveis que emitem pouco GEE compensando as emissões desses gases gerados de fontes fósseis para gerar energia (PACHECO; GHISI; LAMBERTS, 2013)

As quatro definições de EEZs apresentadas e propostas por Torcellini et al (2006), consideram apenas o balanço zero de energia na operação do edifício, não levam em consideração a energia incorporada nos materiais utilizados na construção do mesmo.

Um outro conceito baseado no trabalho de Hernandez e Kenny (2010), é o Energia Zero no Ciclo de Vida, (*Life Cycle Zero Energy Buildings – EEZ/CV*), este conceito defende que seja considerado o consumo de energia no ciclo de vida do edifício, incluindo também a energia incorporada na construção do edifício, e não apenas a energia consumida durante sua operação.

Edifícios de Energia Zero e Transporte é outra definição que transcende àqueles que estão associados aos edifícios. Goldstein et al. (2010) sugerem que o EEZ deve considerar o consumo de energia no transporte de seus usuários, que seja computado no balanço energético e segundo Teixeira et al. (2013) essa energia é maior que a energia de operação do edifício. Como exemplo, A casa Equinócio (*Equinox House*) é uma casa super-isolada e super-selada alimentada 100 % por um sistema solar fotovoltaico fornecendo a média anual de 10.000 kWh para fornecer toda a energia da casa e ainda energia suficiente para alimentar um veículo elétrico de 6000 a 9000 milhas por ano (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, [s.d.]

Os edifícios então fornecem o elo que permitirá que eletricidade e o setor dos transportes se unam, através da tecnologia veículo para rede (*Vehicle-to-Grid - V2G*) (LUND; KEMPTON, 2008).

Pacheco, Ghisi e Lamberts (2013) afirmam que independente da definição de EEZ escolhida, alguns fatores são fundamentais para atingir o objetivo. Estes fatores estão relacionados com as características da forma e uso da edificação, como por exemplo, um edifício com um grande número de pavimentos tem uma área de projeção inferior a sua área útil, restringindo assim o número de painéis fotovoltaicos na cobertura. Consideram como condições desejáveis e essenciais para implantação de EEZ a rede inteligente (*smart grid*) e a eficiência energética, assim como a energia renovável disponível por toda a vida útil do edifício.

Torcellini et al. (2006) e Marszal et al. (2011) ressaltam a importância conceitual da eficiência energética para os edifícios de energia zero, atribuindo-lhe uma importância fundamental. Consideram que qualquer edifício pode se tornar um EEZ, por mais ineficiente que seja, desde de que disponha de um sistema renovável de geração com capacidade suficiente. Torcellini et al. (2006) mencionam que tal procedimento não deve ser aceito. Medidas de eficiência energética são mais econômicas e sustentáveis. Defendem a questão que os projetos devam ser concebidos primeiramente para a extrema eficiência energética, para que, somente após esgotar todas as medidas para alcançá-la é que se deve dimensionar a capacidade do sistema renovável. A eficiência energética é o grau zero da hierarquia de fonte renováveis, o início para qualquer edifício EEZ (PACHECO; GHISI; LAMBERTS, 2013).

Torcellini et al. (2006), em relação a esta disponibilidade de geração de energia para EEZ, sugerem uma hierarquia entre as fontes renováveis para fornecimento de energia, conforme apresenta o Quadro 2.2.

Quadro 2.2: Hierarquia das opções de fontes de energia renovável para uso de EEZ.

	Número	Estratégias	Exemplos
	0	Reduzir consumo de energia através de tecnologias de baixo consumo de energia.	Iluminação natural, sistemas de condicionamento de ar, equipamento e iluminação de alta eficiência, ventilação natural, resfriamento evaporativo.
Opções locais de fornecimento de energia	1	Uso de fontes renováveis de energia disponíveis dentro da implantação do edifício.	Sistema fotovoltaico, aquecimento solar de água e sistema eólico localizados no edifício.
	2	Uso de fontes renováveis de energia disponíveis dentro do terreno.	Sistema fotovoltaico, aquecimento solar de água. Geração hidrelétrica de baixo impacto e sistema eólico localizados no terreno, mas fora do edifício.
Opções externas de fornecimento de energia	3	Uso de fontes renováveis de energia disponíveis fora do terreno para gerar energia no terreno.	Biomassa, lenha, etanol ou biodiesel podem ser importados de fora do terreno ou subprodutos do terreno que podem ser processados <i>in loco</i> para gerar eletricidade e calor.
	4	Compra de energia renovável fora do terreno.	Compra de energia gerada por sistemas eólicos, fotovoltaicos, créditos de carbono ou outras opções “verdes” para compra de energia.

Fonte: (TORCELLINI et al., 2006 apud PACHECO; GHISI; LAMBERTS, 2013).

Torcellini et al. (2006) adotam a terminologia “*Off-Site ZEB*” para denominar os EEZs que utilizam as estratégias (3 e 4), para diferenciar dos “*On-site ZEB*” que adotam as estratégias no (1 e 2).

Neste trabalho, ao se utilizar o termo EEZ, estará se referindo aos edifícios que utilizam estratégias (0, 1 e 2) somente. Das opções 1 e 2, a energia fotovoltaica e eólica são as que estão mais disponíveis para uma gama maior de edifícios.

Analisando os quatro conceitos sugeridos por Torcellini et al. (2006), conclui-se que o de Energia Zero Local é o mais fácil de adotar, já que basta contabilizar a energia consumida e gerada na edificação. Faz com que haja um incentivo ao uso de equipamentos mais modernos e eficientes do ponto de vista energético, mesmo não contabilizando os custos de

geração e transmissão de energia na rede de distribuição. Esse conceito foi utilizado neste trabalho para análise da edificação do IRN.

### **2.9.2 Políticas na área de edifícios de energia zero**

De acordo com IPCC (2006 apud MITSIDI PROJETOS, 2017), em aproximadamente um terço dos EEZ distribuídos ao redor do mundo, comparado com edifícios convencionais, o consumo de energia teve uma redução de 60 %.

O conceito de edifícios energia zero e de zero carbono tem sido atualmente tema de políticas energéticas em todo o mundo como uma estratégia para a redução da emissões de GEE (MITSIDI PROJETOS, 2017).

Os edifícios de balanço energético nulo (EEZ) na Europa têm recebido uma atenção cada vez maior a partir da publicação da nova Diretiva 2011/31/EU de Desempenho Energético em Edificações (EPDB – *Energy Performance of Buildings Directive*), determinando que a partir de 2020 os edifícios novos terão de ser EEZ ou edifícios com necessidade quase nulas de energia. Os edifícios do Estado serão os primeiros a se adequarem, dois anos antes, a partir deste ano, 2018. Torna-se obrigatório todos os edifícios novos construídos a partir de 2020 possuírem mais desempenho energético, buscando a exploração de fontes renováveis de energia disponíveis localmente numa base economicamente equilibrada e sem prejuízo para o conforto dos ocupantes e caracterizados com um balanço energético “quase nulo” (EPDB, 2010).

O Reino Unido, com sua política de zero carbono para edifícios, exige que todas as casas construídas a partir de 2016 diminuam todas as suas emissões de carbono locais (MITSIDI PROJETOS, 2017).

Nos Estados Unidos, o Departamento de Energia (DOE) estabeleceu a meta para alcançar residências energia zero até 2020 e os edifícios comerciais até 2025 (PACHECO, 2013).

Várias organizações e governos no mundo estão no processo de discutir e publicar definições localmente apropriadas para edifícios *net-zero*. Entre estes estão os *Green Building Councils* – GBCs) em diversos países (MITSIDI PROJETOS, 2017), tendo como objetivo estudar os atuais EEZ e os edifícios com baixo consumo energético.

Para um melhor entendimento dos EEZs, vários países da Europa, EUA, Canadá e Nova Zelândia estão participando de um projeto chamado "Rumo aos Edifícios Solares Energia Zero" (*Towards Net Zero Energy Solar Buildings*), para desenvolver um consenso de

definições, ferramentas, soluções inovadoras e produção industrial (DIDONÉ; WAGNER; PEREIRA, 2014). Isso representa uma verdadeira mudança de passo em relação à forma atual de projetar e construir (BARTHELMES et al., 2015).

No Brasil não existe nenhuma regulamentação nem critérios definidos para certificação EEZ, mas, no entanto, existem alguns projetos de edifícios e projetos pilotos que buscam comprovar que será possível gerar energia no local em quantidade igual ou até maior que a necessária para consumo.

Em agosto de 2017, na 8ª *Green Building Brasil Conferência Internacional e Expo*, em São Paulo, foi lançada a certificação *GBC Zero Energy*. A primeira versão da certificação possui 13 requisitos que compreendem ações para maximizar a eficiência energética, a geração de energia renovável (*on-site ou off-site*) e a compra de Certificados de Energia Renovável (REC), são eles (MOUSSALEM, 2017):

Requisito 01: Tempo de Operação

Requisito 02: Taxa de Ocupação Mínima

Requisito 03: Metragem Mínima das Áreas Construídas

Requisito 04: Tipologia

Requisito 05: Atendimento às Legislações Municipais, Estaduais e Federais

Requisito 06: Edifícios *Off-Grid*

Requisito 07: Eficiência Energética Mínima para Geração *On-Site*

Requisito 08: Eficiência Energética Mínima para Geração *Off-Site*

Requisito 09: Geração de Energia Renovável *On-Site*

Requisito 10: Geração de Energia Renovável *Off-Site*

Requisito 11: Compra de Créditos de Energia Renovável

Requisito 12: Uso de Energia não Renovável

Requisito 13: Balanço Energético Anual do Empreendimento

A GBC Brasil integra o programa global "*Advancing Net Zero*", lançado pelo *World Green Building Council* e tem como objetivos:

- Contribuir para o cumprimento das metas do acordo da COP21 (Paris)<sup>19</sup> e de zerar as emissões de carbono na atmosfera oriundas do setor da construção civil até 2050;

---

<sup>19</sup> Todas as novas edificações e grandes reformas se tornem *Net Zero* a partir de 2030, e 100% dos edifícios se tornem *Net Zero* até 2050.

- Acelerar a transformação do mercado nacional de eficiência energética e a geração de fontes de energia renováveis;
- Gerar novos empregos;
- Desenvolver novas tecnologias;
- Reconhecer a iniciativa dos empreendedores;
- Promover ambientes mais saudáveis, capazes de propiciar a melhoria do bem-estar dos ocupantes.

A certificação GBC Brasil Zero Energy se aplica para: residências, condomínios residenciais, prédios comerciais, lajes corporativas, centro de distribuição, data center (GBC - BRASIL, 2017a).

### **2.9.3 Consumo próprio de energia em Edifícios de Energia Zero**

A definição de consumo próprio é outro ponto de divergência entre as diferentes definições e conceitos de EEZ. Como um edifício possui uma variedade de usos finais de energia, vários autores possuem entendimentos distintos sobre o que considerar no balanço. A maioria das definições de EEZs, segundo (TORCELLINI et al., 2006) não especifica quais são os usos finais de energia que devem ser considerados no balanço, porém, no mesmo artigo, são mencionados vários usos finais a serem objeto de medidas de eficiência energética (ver linha 0 do Quadro 2.2). Dentro desses usos além do consumo energético em climatização, estão incluídos, o consumo energético de equipamentos como eletrodomésticos, também citado em Pogharian et al. (2008), Goldstein et al. (2010) e Newell e Newell (2010), assim como todos os equipamentos conectados nas tomadas e de iluminação artificial, o consumo de água quente doméstica. O consumo energético destes equipamentos deve ser repostado por uma quantidade de energia gerada equivalente pelo sistema renovável (PACHECO, 2013).

### **2.9.4 Pesquisas e edifício de energia zero no Brasil**

São ainda poucas as pesquisas desenvolvidas sobre edifício energia zero no Brasil até o momento como também poucos EEZs em operação.

O estudo de Pacheco e Lamberts (2008) faz uma pesquisa bibliográfica da literatura internacional sobre EEZs, apresenta as políticas internacionais para promoção de EEZ, as

tecnologias usadas naquele momento, em especial para diferentes climas, ressaltando o desafio para os climas mais quentes e os custos dos EEZs.

O estudo de Lima (2012) apresenta o caso do projeto de um EEZ do Laboratório de Ensino da FEC – Unicamp, propondo uma metodologia para projeto de sistema de geração de energia elétrica em EEZs. Avaliou por simulação computacional a viabilidade da contribuição da geração fotovoltaica para um edifício tornar-se um EEZ energia local. Chegou ao resultado que o sistema fotovoltaico adotado no estudo atenderia a demanda por energia.

Outro estudo de Pacheco e Lamberts (2013) aborda a viabilidade técnica e econômica da conversão de uma casa unifamiliar média brasileira com energia média de consumo em EEZ em duas cidades, Belo Horizonte e Florianópolis, avaliando diferentes cenários. O estudo aborda a questão do conforto térmico em relação as mudança climática e questões culturais e as questões legais brasileiras para a geração fotovoltaica.

Pacheco, Ghisi e Lamberts (2013) elaboraram um trabalho de revisão bibliográfica sobre EEZ que apresenta propostas para conseguir edifícios energia zero no Brasil (trabalho do Núcleo de Inovação do convênio da UFSC e Eletrobrás). Concluíram que o sucesso para EEZ depende da transição da matriz energética e que está diretamente ligada a eficácia de políticas governamentais, sendo ele (EEZ) um instrumento primordial de política energética.

Didoné, Wagner e Pereira (2014) avaliaram o potencial de transformação de um edifício de escritórios brasileiro em um edifício energia zero (EEZ) em diferentes climas. O estudo baseou-se em simulações computacionais e em um modelo que se dividiu em três etapas. Sendo que primeiramente avaliou-se a situação protótipo, o edifício referência representativo da tipologia dos edifícios de escritórios no Brasil. Na segunda etapa avaliou-se o edifício otimizado para baixo consumo de energia, aplicou-se o RTQ-C e estratégias passivas. Comparou o comportamento dos dois através do balanço térmico e energético do edifício. A terceira fase foi a aplicação da tecnologia fotovoltaica na edificação, para transformá-lo em um edifício energia zero. Os resultados mostraram que é possível atingir edifício energia zero. No entanto não se considerou a energia embutida, as emissões de CO<sub>2</sub> e o ciclo de vida. O protótipo foi simulado com uma orientação que favorecesse o objetivo, favorecendo assim os resultados. O estudo ainda demonstrou que o foco principal foram as estratégias de redução do consumo de energia que possibilitou uma redução de 50% do consumo e que a aplicação do RTQ-C mostrou-se uma ótima ferramenta de avaliação.

Outro estudo que abordou EEZ foi o de Domingos et al. (2014), onde foi estabelecida um classificação climática para o desenvolvimento de conceitos de EEZ. O trabalho abordou

questões sobre a temperatura do ar, umidade relativa do ar e a irradiância solar global que são as variáveis ou indicadores climáticos de maior relevância para estes conceitos construtivos.

Oliveira (2017) avaliou como a utilização de um sistema fotovoltaico integrado ao envelope de uma edificação existente (NIPE – Núcleo Interdisciplinar de Planejamento Energético – Unicamp) e conectado à rede elétrica, pode contribuir significativamente para reduzir o consumo de eletricidade e verificou o potencial de transformação de uma edificação em um EEZ. Foi analisado o potencial de redução do consumo de energia elétrica da edificação e as melhores formas de adaptação de um sistema fotovoltaico conectado à rede na edificação.

A Mitsidi Projetos (2017) elaborou um relatório onde fornece dados sobre o consumo de energia e as emissões de GEE referentes ao setor de edificações no Brasil. Aborda o conceito de edifícios de zero energia e de zero carbono como estratégias para redução de GEE, identifica exemplos de projetos energia zero no Brasil, coloca as considerações da energia embutida e demonstra o potencial técnico para EEZs no Brasil.

### **2.9.5 Projetos piloto**

O GBC Brasil, lançou oficialmente, no dia 9 de agosto 2017, a Certificação Zero Energy Building para as edificações que comprovarem que o consumo de energia local e sua operação anual seja zerado por uma combinação de alta eficiência energética e da geração de energia por fontes renováveis. Os quesitos para a certificação estão nas ações para maximizar a eficiência energética, a geração de energia renovável no local ou remoto (*on-site* ou *off-site*) e a compra de Certificados de Energia Renovável (REC), que comprovam a natureza da energia que a edificação utiliza (GBC - BRASIL, 2017b).

Já existem até o momento 11 projetos pilotos registrados no GBC Brasil Zero Energy, porém apenas o Centro SEBRAE de Sustentabilidade e a GEO Energética já possuem a certificação até o presente momento.

O Centro SEBRAE de Sustentabilidade em Cuiabá/MT (Figura 2.23) adotou em projetos uma combinação de estratégias de alta eficiência energética e geração de energia renovável para ser considerado um EEZ energia local (*on-site*). Foi o primeiro edifício no Brasil a receber a certificação. Seu consumo anual de energia primária está estimado em 30504 kWh/ano e seu potencial de geração de energia por fonte renovável de 32.000 kWh/ano (GBC - BRASIL, 2017c).

Figura 2.23: Centro SEBRAE de Sustentabilidade em Cuiabá/MT.



Fonte: (GBC - BRASIL, 2017c).

A implantação de duas micro usinas, uma de 75 kWp e outra de 45 kWp (com o total de 480 placas fotovoltaicas) conectadas à rede foram instaladas para suprir 100 % da demanda de energia do prédio e estão em funcionamento desde maio de 2016, que fazem parte de um projeto de implantação de unidades demonstrativas de Eficiência Energética e Energias Renováveis do SEBRAE/MT que tem por objetivo promover a disseminação das práticas em gestão de energia e oferecer programas de capacitação.

Além das micro usinas, o edifício do Centro SEBRAE de Sustentabilidade implementou várias práticas sustentáveis (captação da água da chuva, eficiência energética, energia solar, reaproveitamento de materiais, coleta seletiva e reciclagem, biodiversidade) que possibilitou a obtenção das certificações Procel Edifica nível A em 2013 e *BREEAM In-Use* nível excelente em 2016. Esta certificação é uma contribuição da instituição para o atendimento do Brasil aos objetivos da Agenda 2030 rumo ao desenvolvimento sustentável (SEBRAE, 2017).

O edifício do Centro SEBRAE de Sustentabilidade foi premiado no *Breeam Awards* 2018. O projeto, assinado pelo arquiteto José Afonso Portocarrero, foi desenvolvido com base nos princípios da arquitetura sustentável e faz um resgate das culturas indígenas brasileiras (BRITO, 2018).

O Projeto Geoenergética Tamboara, no Paraná atende aos critérios de elegibilidade de EEZ. Entrou em operação em janeiro de 2012. Seu consumo anual de energia primária estimada é de 2.113.000 kWh/ano e o potencial de geração *on-site* de 2.113.000 kWh/ano (GBC - BRASIL, 2012). Tem capacidade para processar até 300 toneladas de resíduos sólidos e 1.000m<sup>3</sup> de vinhaça/dia. A partir da reciclagem desse material, a empresa produz biogás, energia elétrica, biometano, adubos orgânicos e vapor (REVISTA FATOR BRASIL, 2014).

A sede do Centro de Inovação em Construção Sustentável – CICS, da Universidade de São Paulo, é um *Living Lab*<sup>20</sup>, um edifício concebido para demonstrar e testar soluções avançadas durante o uso do edifício. A agenda ambiental do projeto inclui soluções de água, energia (incluindo geração descentralizada de energia na direção de edifício zero local), condicionamento ambiental, iluminação, sistema construtivos, uso de novos materiais. O projeto arquitetônico foi concebido pelo escritório Aflalo & Gasperini sob a responsabilidade do arquiteto Roberto Aflalo e desenvolvimento da Vivá Arquitetura (CICS LIVING LAB, [s.d.]).

A nova sede da RAC Engenharia, em Curitiba/PR, possui, para gerar energia, painéis fotovoltaicos com 19,8 kW de potência e 26.509 kWh de capacidade de geração anual, o suficiente para cobrir toda energia consumida no edifício. O edifício corporativo é autossuficiente em água e energia. O seu desempenho sustentável rendeu à obra a certificação LEED Platinum. O projeto arquitetônico do prédio é de Gonzalo Serra (VAZ, 2017).

O edifício RB12, no Rio de Janeiro, é um projeto que adotou o conceito EEZ, apesar de não possuir a certificação GBC Brasil Zero Energy. Foi feito um projeto de *retrofit* verde<sup>21</sup> com painéis fotovoltaicos e previsto células de hidrogênio. Foi projetado pelo escritório de arquitetura Triptyque (franco-brasileiro), alinhado ao conceito da revitalização urbano Porto Maravilha<sup>22</sup>, contemplando uma fachada bioclimática e dinâmica com vidro duplo que reduz a temperatura e permitem a entrada de luz natural nos ambientes internos, além de um sistema de reuso da água, ventilação natural e paisagismo suspenso (ARCHDAILY BRASIL, 2016).

Outro exemplo é a Creche municipal Hassis em Florianópolis/SC. Construída com recursos do Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação (FNDE) e do salário-educação, a creche, erguida em um terreno de 12.000 m<sup>2</sup>, gera eletricidade própria por meio de energia fotovoltaica, aquece água potável por energia solar, faz aproveitamento da água de chuva e tem madeira certificada pelo *Forest Stewardship Council* (FSC) proveniente de manejo florestal, pátio coberto, refeitório com varanda, banheiros e outros espaços com acessibilidade (GBC - BRASIL, 2017a).

---

<sup>20</sup> Um laboratório vivo (em inglês *living lab*) é um conceito de pesquisa. Um laboratório vivo é um ecossistema de inovação aberta, que muitas vezes opera em um contexto territorial (por ex.: cidade ou região), que integra concorrentemente processos de pesquisa dentro de uma parceria público-privado : (CICS LIVING LAB, [s.d.]).

<sup>21</sup> O retrofit verde é uma das tendências mundiais da construção sustentável. O conceito que introduz sustentabilidade na adaptação e melhoria de prédios antigos.

<sup>22</sup> Projeto de revitalização do porto do Rio de Janeiro.

### 2.9.6 Tipologias e estratégias para alcançar a meta EEZ

Griffith et al. (2007) avaliaram o potencial técnico para atingir este objetivo com a tecnologia disponível na época e projetada em diferentes cenários para possíveis melhorias tecnológicas para 2025. Os resultados mostraram que o objetivo do EEZ é tecnicamente viável para partes significativas do setor comercial. E para que o alcance, segundo Lima (2012) depende de quatro fatores:

1. O número de pavimentos da edificação: edifícios com até dois pavimentos são mais fáceis de se tornarem EEZs, em função da equivalência entre área útil e área disponível para geração local.
2. As cargas dos equipamentos e os processos que influenciam no consumo.
3. As atividades que são realizadas na edificação, que também influenciam no consumo de energia.
4. A localização que influencia tanto no consumo devido ao maior ou menor uso de sistemas de aquecimento ou refrigeração.

Os tipos de edifícios comerciais com os maiores potenciais de se tornarem EEZs são armazéns não refrigerados, escolas e lojas de varejo. Segundo Griffith et al. (2007) é possível transformar vários setores das edificações em produtores líquidos<sup>23</sup> através de medidas de eficiência energética e instalação de sistemas fotovoltaicos nos edifícios.

De acordo com Mitsidi Projetos (2017) é relativamente fácil para tipologias como escolas e habitações unifamiliares atingir níveis de quase-zero graças ao seu consumo de energia relativamente baixo e aos elevados níveis de radiação solar no país. Ainda segundo a Mitsidi Projetos (2017) os edifícios maiores e aqueles que são totalmente climatizados, como os edifícios de escritórios corporativos, serão incapazes de cumprir os níveis de quase-zero com geração local, mesmo nos cenários mais otimistas.

A conexão do edifício à rede é fundamental em um EEZ, pelo fato das fontes renováveis serem intermitentes na geração de energia. Com isso, dispensa um sistema de armazenamento, elegendo assim a rede de distribuição como fonte de energia armazenada.

A criação de um EEZ começa pela arquitetura, abordando a bioclimática, a eficiência energética, o conforto térmico, a busca por materiais sustentáveis e a implantação das fontes renováveis. Mas somente isso não basta, é fundamental que haja uma promoção

---

<sup>23</sup> Energia líquida: é a quantidade de energia produzida descontando-se as perdas.

governamental para a obrigatoriedade de EEZ e a participação e conscientização do usuário. Sendo uma resposta ao aquecimento global, os EEZ se mostram fundamentais para que uma transição entre matrizes energéticas seja bem sucedida (PACHECO; GHISI; LAMBERTS, 2013).

## 2.10 Tecnologia fotovoltaica

A energia solar está disponível diariamente sem custo nenhum para ser aproveitada, entre muitas outras coisas, na geração de energia. Cada dia incide sobre a superfície da terra mais energia proveniente do Sol do que a demanda energética mundial durante um ano (RÜTHER, 2004).

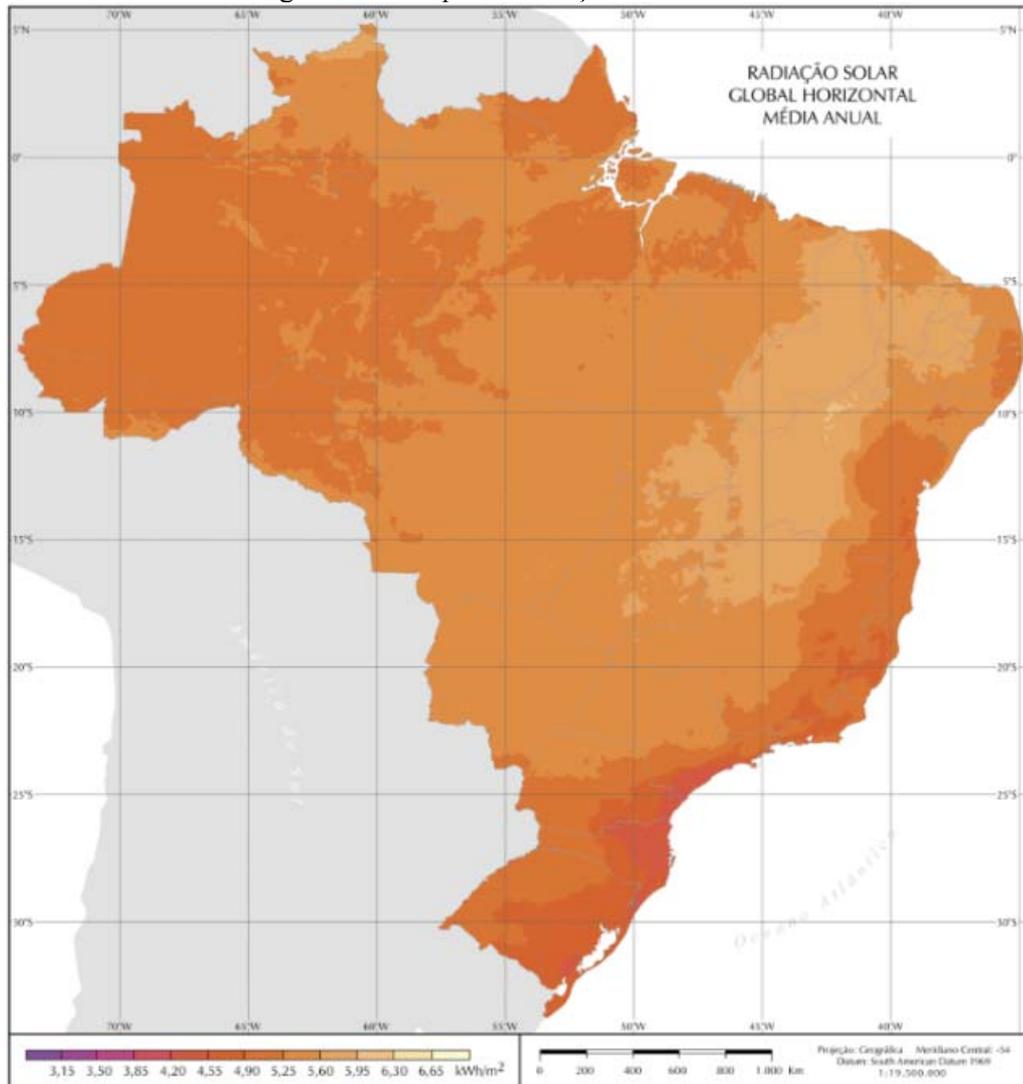
No caso do Brasil, por se tratar de um país tropical com alta disponibilidade de irradiação solar, a geração de energia elétrica por meio do efeito fotovoltaico tem um grande potencial. Além de ser uma fonte renovável e praticamente inesgotável, a radiação solar, não é poluente, é silenciosa e não causa efeitos negativos sobre o meio ambiente.

O Brasil está bem avançado no desenvolvimento das fontes renováveis de energia devido à sua dimensão continental, recursos naturais abundantes e clima favorável, com uma área de 8,5 milhões de km<sup>2</sup>. Esta estrutura é privilegiada quando comparada a outros países (RÜTHER; SALAMONI, 2011). Essa característica coloca o país em vantagem em relação aos países desenvolvidos, principalmente no que tange à utilização da energia solar fotovoltaica (PEREIRA et al., 2006).

A disponibilidade do recurso solar brasileiro é bem significativa e anualmente ela ultrapassa os 1900 kWh/m<sup>2</sup>, isso significa que em cada metro quadrado de superfície, pode-se gerar diariamente 5 kWh de energia solar. No entanto, ainda é pequena a utilização da conversão direta da luz solar em eletricidade com o uso de sistemas fotovoltaicos (RÜTHER; SALAMONI, 2011).

Várias cidades brasileiras estão localizadas em regiões com radiação solar favorável, como mostra a Figura 2.24. E os centros urbanos apresentam as maiores densidades de construções que favorecem a implantação de sistemas de geração de energia solar (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014).

Figura 2.24: Mapa de irradiação solar do Brasil.



Fonte: (PEREIRA et al., 2006).

### 2.10.1 Sistemas fotovoltaicos

Os sistemas fotovoltaicos realizam a conversão da radiação solar em energia elétrica. Esses sistemas podem ser autônomos ou conectados à rede elétrica.

Os Sistemas Fotovoltaicos Autônomos (SFA) necessitam quase sempre de um meio de acumulação da energia gerada, normalmente um banco de baterias, para suprir a demanda em períodos quando a geração solar é insuficiente ou à noite. Podem ser utilizados como uma alternativa energética adequada para o fornecimento de energia elétrica em localidades isoladas e distantes da rede elétrica convencional (RÜTHER, 2004).

Os Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica (SFCR) são uma tecnologia usada na geração pontual e difundida de eletricidade, em tensão de distribuição, capazes de produzir eletricidade no local de consumo, sem a emissão de poluentes. A aplicação dessa

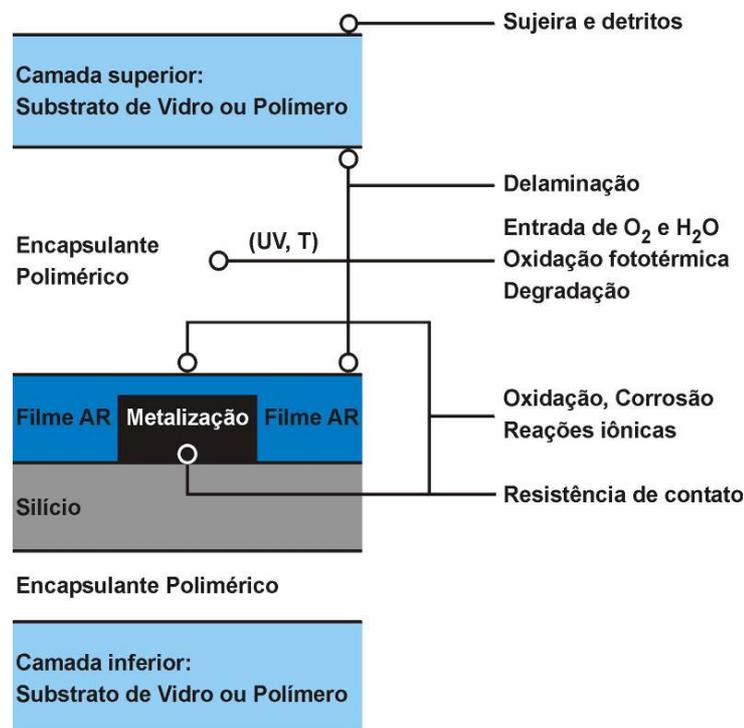
tecnologia é particularmente interessante para o Brasil, onde há um enorme potencial de energia solar a ser aproveitado (ZILLES et al., 2012).

### 2.10.2 Eficiência no módulo fotovoltaico

A eficiência energética de um sistema fotovoltaico depende das condições ambientais e climáticas, tais como temperatura, intensidade da irradiação solar, umidade, penetração da água e intensidade de ultravioleta (UV). Outros fatores diretos são o ângulo de inclinação e o tipo de módulos solares, falhas no mecanismo e degradação afetam o desempenho ao longo dos anos (MAKRIDES et al., 2012).

Como apresentado na Figura 2.25 a degradação pode ocorrer por intempéris, impurezas, acúmulo de sujeira e detritos no vidro, degradação fototérmica, oxidação e degradação do encapsulante, inter-difusão dos íons e reações na interface polimérica que causam reações de delaminação. Grande parte desses problemas ocorrem devido a elevadas concentrações iônicas decorrentes do aprisionamento de vapores e gases assim como a utilização inadequada de produtos durante o processo de fabricação do módulo fotovoltaico (ASSUNÇÃO, 2014).

Figura 2.25: Principais agentes responsáveis pela degradações do módulo fotovoltaico.



Fonte: (PERN, 1994 apud SANTOS JÚNIOR, 2008).

Os módulos fotovoltaicos de silício cristalino geralmente possuem uma garantia de rendimento mínimo de 25 anos e de defeitos de fabricação de 3 a 5 anos de garantia. A degradação da potência de módulos fotovoltaicos de silício cristalino instalados em campo é entre 0,5 % e 1,0 % ao ano segundo Pinho e Galdino (2014).

Como a tecnologia de silício cristalino é a mais antiga, acaba que é também a mais estudada. Existem vários estudos com mais de 20 anos de duração (ASSUNÇÃO, 2014).

O estudo de Quintana et al. (2000 apud JORDAN; KURTZ, 2013) investigou a tecnologia usada pela *Spectrolab Inc.* para fabricação de módulos fotovoltaicos que forneceram vinte anos de serviço confiável no *Natural Bridges National Monument*, no sudeste de Utah. A pesquisa de campo, testes de desempenho do sistema e uma série de testes de módulo e materiais confirmaram a durabilidade dos módulos na matriz. Todos os módulos utilizados eram de silício monocristalino. Segundo os autores, para os módulos não expostos, a taxa de degradação individual foi de cerca de 0,5 % ao ano. Os autores também observaram que, embora as taxas de degradação do módulo fossem baixas, outros fatores resultaram em uma degradação no nível da matriz de 2,5 % ao ano.

Reis et al. (2002 apud JORDAN; KURTZ, 2013) investigaram 192 módulos de silício monocristalino em Arcata, EUA, ao longo de 11 anos de exposição e encontraram, em média, uma baixa taxa de degradação de 0,4 % por ano.

Sakamoto e Oshiro (2003) inspecionaram mais de 2000 módulos, dos quais 150 foram estudados em maior detalhe e taxa de degradação média foi inferior a 0,5 % por ano.

Já segundo Osterwald et al. (2002) a perda de desempenho dos módulos fotovoltaicos mono e policristalino é aproximadamente 0,7 % por ano, mas este valor pode variar dependendo das condições ambientais em que o módulo se encontra.

O estudo de Jordan e Kurtz (2013) montado a partir da literatura, mostrou uma taxa de degradação média de 0,5 a 0,8 % para células de silício cristalino. Para as de filme fino a degradação ficou na média de 1 % ao ano.

Segundo Assunção (2014) alguns fabricantes garantem uma degradação de rendimento anual linear de 0,7 – 0,8 % ao ano durante 25 anos.

Essa perda é inevitável e contribui para a redução gradual do desempenho ao longo dos anos e deve ser considerada no cálculo do sistema de geração de energia para um EEZ.

### 2.10.3 Sistemas fotovoltaicos aplicados e integrados à edificação

Os sistemas fotovoltaicos aplicados as edificações (BAPV – *Building Applied Photovoltaic*, em inglês) comumente se referem a situações em que os painéis fotovoltaicos são aplicados sobre a envoltória de um edifício, seja em fachadas ou mais frequentemente em telhados. São aplicados a edifícios existentes ou recém-construídos, não fornecem nenhuma função arquitetônica no prédio e são considerados um complemento. Eles geram eletricidade sem agregar valor estético ao edifício existente. (BARKASZI; DUNLOP, 2001; PENG; HUANG; WU, 2011). Os BAPVs representam a grande maioria das instalações fotovoltaicas existentes nos edifícios (PENG; HUANG; WU, 2011).

Na utilização arquitetônica do tipo BAPV os módulos fotovoltaicos são instalados sobre partes da edificação como telhados, paredes e marquises e, normalmente sem as mesmas características como orientação, inclinação e aparência. Também são utilizados em *retrofits*, como investimento para redução de custos com eletricidade ou atuando como sombreamento de áreas envidraçadas (TORRES, 2015).

Sistemas fotovoltaicos integrados ao edifícios (BIPV – *Building Integrated Photovoltaics*) consistem na integração de módulos fotovoltaicos na envoltória do edifício, como o telhado ou a fachada. Ao servir simultaneamente como material envolvente do edifício e gerador de energia, os sistemas BIPV podem proporcionar economia de materiais e custos de eletricidade, reduzir o uso de combustíveis fósseis e a emissão de gases e adicionar interesse arquitetônico ao edifício (STRONG, 2016).

Os BIPV são considerados parte funcional da estrutura do edifício, ou são arquitetonicamente integrado ao design do edifício. Esta categoria inclui projetos que substituem os materiais de cobertura convencionais. Esses tipos de produtos podem ser indistinguíveis de suas contrapartes não fotovoltaicas. Esteticamente, isso pode ser atraente se houver o desejo de manter a continuidade arquitetônica e não atrair a atenção para a matriz. Os módulos BIPV também podem ser elementos arquitetônicos que aprimoram a aparência do prédio e criam efeitos visuais muito desejáveis. Esses tipos de matrizes incluem tamanhos e formas de módulos personalizados com espaços opacos ou transparentes entre as células e podem ser usados para fachadas, toldos, janelas e claraboias (BARKASZI; DUNLOP, 2001).

Com a redução do preço dos módulos fotovoltaicos, tem sido mais frequente o uso de sistemas conectados à rede, quer em grandes usinas fotovoltaicas, quer em residências ou edifícios comerciais. Seu uso em edifícios tem trazido um desafio, que é o de tornar a instalação de sistemas fotovoltaicos algo com alguma beleza estética e de elemento

construtivo (telhado, brise, claraboia, por exemplo), integrados à estrutura dos edifícios, uma vez que os painéis necessitam cobrir uma grande área para suprir energia suficiente para uma residência (PINHO; GALDINO, 2014).

Um dos benefícios dos sistemas BIPV vinculados à rede é que, com uma política de serviços cooperativos, o sistema de armazenamento é essencialmente livre. Tanto o proprietário do edifício quanto o utilitário se beneficiam com o BIPV vinculado à rede. A produção de eletricidade solar no local é tipicamente maior no momento ou perto do horário de pico de um prédio e da concessionária. A contribuição solar reduz os custos de energia para o proprietário do edifício, enquanto a eletricidade solar exportada ajuda a suportar a rede elétrica durante o período de maior demanda (STRONG, 2016).

Para as áreas urbanas e também para os campus universitários, o sistema fotovoltaico integrado e interligado à rede apresenta uma fonte ideal de energia. Aproveitam-se os espaços já existentes e sem uso, como os telhados e fachadas que, em um processo de *retrofit* para os edifícios existentes e uma concepção arquitetônica sustentável para os novos, passam a ser unidades de geração distribuída com o mínimo de impacto ambiental (RÜTHER; SALAMONI, 2011).

Existem duas tecnologias básicas de módulos fotovoltaicos comerciais disponíveis no mercado hoje: as células solares feitas de silício cristalino (monocristalino ou policristalino), que fornecem cerca de 107 a 129 Watts por m<sup>2</sup> de área do painel fotovoltaico, a pleno sol, e as células de película fina que proporcionam atualmente cerca de 43 a 53 Watts por m<sup>2</sup> de área do painel fotovoltaico, a pleno sol (STRONG, 2016). O primeiro domina confortavelmente o mercado, ao passo que o segundo é usado onde o sombreamento por chaminés, árvores ou edifícios vizinhos reduziria a eficiência de uma instalação clássica de silício cristalino em uma grande extensão (HEINSTEIN; BALLIF; PERRET-AEBI, 2013).

Até agora, os telhados são considerados o campo ideal para aplicações de BIPV, uma vez que os telhados inclinados de um determinado ângulo proporcionam a melhor captação de energia. Aqui os módulos fotovoltaicos simplesmente substituem as telhas (HEINSTEIN; BALLIF; PERRET-AEBI, 2013).

O segundo grande campo de aplicação do BIPV é o das fachadas onde os painéis solares de todas as tecnologias podem ser integrados como um sistema de revestimento convencional (HEINSTEIN; BALLIF; PERRET-AEBI, 2013). O uso atual visa o desenvolvimento de aplicações mais avançadas, como fachadas modulares adaptativas de painéis fotovoltaicos e formas inteligentes de equilibrar a iluminação natural e o sombreamento.

Definir as propriedades térmicas e visuais dinâmicas "ideais" do envelope do edifício é outra questão importante. Ao combinar o isolamento fotovoltaico e o isolamento térmico, surgem aplicações versáteis que podem produzir uma representação ideal do modo como o BIPV tem de interagir com as práticas tradicionais de construção (HEINSTEIN; BALLIF; PERRET-AEBI, 2013).

Segundo Rüter e Salomoni (2011), os sistemas FV podem ser instalados em edificações já existentes, independente de apresentarem áreas, inclinações e orientações convenientes à aplicação. Todas as áreas que tiverem uma irradiação solar incidindo em sua superfície serão capazes de gerar energia FV.

Um exemplo de BIPV em um EEZ é o Solar XXI, em Portugal (Figura 2.26). A integração de sistemas de energia renovável no projeto Solar XXI foi um dos principais objetivos do projeto. O edifício integra na sua fachada e nas proximidades (estacionamento) 3 sistemas fotovoltaicos que fornecem toda a demanda de energia do edifício com uma potência total instalada de cerca de 30 kW, e um coletor solar térmico usado para finalidade de aquecimento. O sistema de energia renovável é composto das tecnologias FV na fachada por painéis de silício multicristalino, nos estacionamentos por painéis de silício amorfo e de filme fino. O Solar XXI integra conjuntos e estratégias de soluções eficientes, desde os recursos que reduzem as demandas de energia do edifício, até integração das energias renováveis. O edifício de uma perspectiva EEZ, é um edifício energeticamente eficiente que otimiza a orientação geográfica e a iluminação natural com a integração de soluções térmicas solares passivas e ativas, que uma boa combinação de medidas de eficiência energética e soluções inovadoras com sistemas renováveis é capaz de atingir o desempenho sem esforços significativos (AELENEI; GONÇALVES, 2014).

Figura 2.26: Solar XXI, em Portugal, exemplo de BIPV em um EEZ.



Fonte: (RODRIGUES et al., 2015).

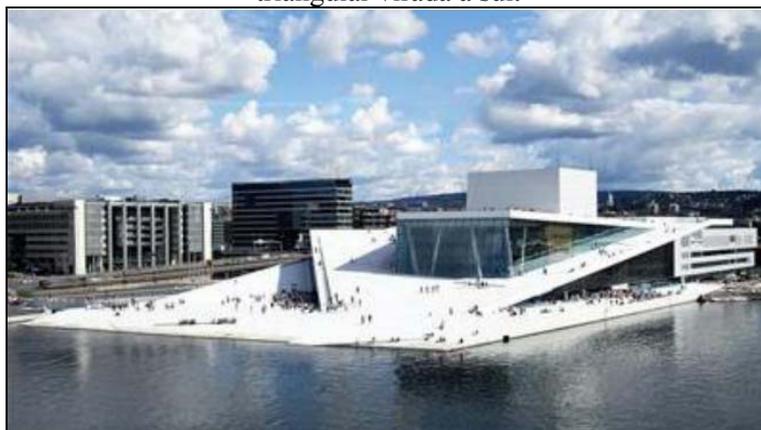
O estudo de Ascione et al. (2017), do Palazzo Gravina, em Napolis na Itália, é um exemplo de aplicação BAPV em um *retrofit* energético, de baixo custo, para um edifício atingir o EEZ. Os autores propuseram avaliar a eficiência energética e as potenciais medidas possíveis a serem aplicadas ao edifício, para torna-lo um EEZ, assim como para melhoria do desempenho térmico e energético e para a redução de seu impacto sobre o balanço energético global. O estudo foca também na aplicação de tecnologia fotovoltaica com instalação de painéis fotovoltaicos em sua cobertura como fornecimento de energia limpa e renovável para o apoio a energia de demanda do edifício, levando em consideração também as características arquitetônicas. O projeto do sistema fotovoltaico é proposto seguindo a inclinação do telhado, que permitiu instalar 3 regiões de conjuntos fotovoltaicos de silício cristalino. O poder de pico instalável é de 61 kW. Os lados favoráveis do telhado inclinado são os do sudoeste. A conversão global de energia fotovoltaica é de 84.528 kWh, enquanto a demanda anual de eletricidade do edifício é 239.993 kWh (após a remodelação).

Zomer et al. (2013) em seu estudo compararam duas tecnologias fotovoltaicas disponíveis comercialmente (tecnologia de película fina de silício amorfo e a tecnologia de bolacha de silício policristalino) em duas configurações diferentes de sistemas fotovoltaicos, a saber, BAPV e BIPV. Os sistemas fotovoltaicos em estudo foram implementados na envoltória de dois aeroportos brasileiros: o aeroporto Santos Dumont no Rio de Janeiro e o aeroporto internacional de Florianópolis. Na abordagem BAPV, foram propostas orientações do módulo fotovoltaico otimizado e inclinação para o fornecimento máximo de energia anual, enquanto na abordagem BIPV, os módulos fotovoltaicos foram acomodados, respeitando a arquitetura existente e planejada desses aeroportos, mas não substituindo os materiais existentes. Para ambos os aeroportos, a abordagem BIPV, com módulos colocados sobre o telhado respeitando a inclinação e orientação original, mostraram melhores valores de potência de pico (100% maior) e densidade de geração de energia (87 %) do que o BAPV. Por outro lado, os sistemas BAPV, idealmente inclinados e orientados mostraram um rendimento de energia anual final de 7 % maior, uma vez que eles podem receber mais irradiação solar.

Um exemplo de BIPV considerável é a Ópera de Oslo (Figura 2.27), que tem 300 m<sup>2</sup> de módulos fotovoltaicos instalados em uma fachada de vidro virada a sul de 450 m<sup>2</sup>. É uma das maiores fachadas de vidro do mundo com células solares integrados, de acordo com Fornbybar (2010 apud SKAALAND et al., 2011). Apenas 50 % da superfície do módulo está ativa, área de coleta de luz. Os módulos são feitos de células de silício monocristalino de alta qualidade com eficiência de célula de 16%. A potência geradora do sistema da Ópera de Oslo é de 35 kW em condições padrão. Espera-se que o sistema forneça aproximadamente 20.000

kWh por ano, que é a demanda anual média para uma família norueguesa. O sistema é conectado à rede, o que significa que o excesso de energia será entregue a rede elétrica. As células solares também funcionam como telas de para-sol, evitando o superaquecimento em dias ensolarados de verão (SKAALAND et al., 2011).

Figura 2.27: A nova casa de ópera em Oslo. As células solares estão integradas na fachada de vidro triangular virada a sul.



Fonte: (FORNYBAR, 2010 apud SKAALAND et al., 2011).

## 2.11 *Retrofit*

### 2.11.1 *Retrofit* definição

Sabe-se que os edifícios são os maiores consumidores de energia do setor de edificações do mundo, respondendo por 40 % do consumo total de energia sendo que 60 % deste consumo são das nações desenvolvidas, assim como também uma fonte igualmente importante de emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) são imputáveis aos edifícios existentes (LIANG et al., 2017). Diante disso, a adaptação de edifícios traz a possibilidade de reduzir o uso de energia e as emissões de gases de efeito estufa (RABANI; MADESSA; NORD, 2017).

O termo *retrofit* tem sido usado para descrever uma ampla variedade de melhorias para um edifício ou um grupo de edifícios existentes visando conservação de energia. O termo *retrofit* é usual entre os profissionais e pesquisadores da área de eficiência energética e arquitetura. Diferentes níveis de *retrofit* podem ser definidos dependendo do tipo de intervenção e economia a serem obtidos. Um *retrofit* pode envolver a instalação de fontes de energia renováveis, bem como a substituição ou atualização de todos os elementos de construção para reduzir o consumo de energia para níveis zero. A reforma da fachada de um edifício (ou seja, paredes e janelas) pode proporcionar uma economia de energia diferente em

comparação com o *retrofit* dos sistemas de aquecimento, ventilação e ar condicionado, iluminação, etc. O desempenho energético de um edifício pode ser melhorado pela implementação de uma única medida, como um novo sistema de aquecimento ou isolamento do telhado. Tais intervenções são referidas como “pequenos *retrofits*” ou “pequena reforma” e normalmente, pode-se esperar uma economia de energia de até 30 % (D’AGOSTINO; CUNIBERTI; MASCHIO, 2017).

Antes de ser utilizado na construção civil e outras indústrias, o termo *retrofit* foi utilizado primeiramente na indústria aeronáutica, referindo-se à adaptação de novos equipamentos nas aeronaves existentes.

Visando proporcionar a revitalização de edifícios, preservando aspectos originais, de acordo com as necessidades e parâmetros atuais, o *retrofit* foi desenvolvido e passou a ser aplicado em construções que precisam de adequação. O conceito desta técnica compreende a revitalização de edifícios, preservando aspectos originais, para adaptá-los às exigências e padrões atuais (GBC - BRASIL, 2018).

O *retrofit* é baseado na atualização de tecnologias, adequação as normas vigentes e novos usos para tornar os espaços funcionais para os atuais usuários, modernização estética e arquitetônica e aplicação de soluções técnicas para facilitar a manutenção. Em resumo, a utilização desta técnica resulta na renovação completa da edificação (GBC - BRASIL, 2018).

Segundo Beccali et al. (2013) a eficácia de um *retrofit* em um edifício depende de informações específicas, tais como: localização geográfica, o tipo de construção, idade, horário de ocupação, operação, manutenção, fontes de energia, estrutura do edifício, etc.

Nos últimos anos, observa-se o aumento do número de edificações que passaram e que estão passando pelo processo de *retrofit*. Esta prática surgiu na Europa e nos Estados Unidos no final da década de 90 devido à necessidade de adaptar a grande quantidade de edificações antigas locais que, devido à importância histórica, cultural e arquitetônica, não poderiam ser demolidas. O processo de *retrofit* tem como objetivo a valorização e o aumento da vida útil destas edificações, incorporando a elas os avanços tecnológicos e a utilização de materiais e processos de última geração (MORAES; QUELHAS, 2012).

### 2.11.2 *Retrofit* e critérios de desempenho rumo ao EEZ

A Norma de Desempenho Brasileira – ABNT NBR 15.575 define *retrofit* como remodelação ou atualização do edifício ou de sistemas, através da incorporação de novas tecnologias e conceitos, os quais, normalmente, visam a valorização do imóvel, mudança de uso, aumento da vida útil e melhoria da eficiência operacional e energética (OLIVEIRA; THOMAZ; MELHADO, 2008).

A redução de energia por meio de melhorias na eficiência energética através de *retrofits* em edifícios existentes para alcançar um nível de construção de energia quase nula impacta nas questões ambientais, econômicas, trazendo benefícios sociais e de saúde. Contudo, a seleção de estratégias específicas de *retrofit* é complexa e requer um planejamento cuidadoso.

Já existem várias técnicas de edifícios que executaram um *retrofit* para um nível quase zero de energia. Os *retrofits* de eficiência energética dos edifícios em direção ao nível EEZ ou quase nulas de energia, são definidos como ações que permitem o desempenho energético e ambiental do edifício a um padrão mais elevado do que o planejado inicialmente (RABANI; MADESSA; NORD, 2017).

Rabani, Madessa e Nord (2017) colocam que as possíveis estratégias e ações de *retrofit* que possibilitam melhorar os resultados podem ser agrupados em três principais estratégias incluindo as intervenções mais usuais e inovadoras no que diz respeito ao design de edifícios, estrutura e sistema e serviços de construção como soluções apropriadas para atingir um nível de EEZ. Estas estratégias são:

1. Ações relacionadas aos aspectos de projeto e envelope com melhoria no isolamento, redução de vazamento de ar, melhoria de portas e janelas, controle e exploração de energia solar ganho e luz do dia, etc.;
2. Ações de sistemas e instalações, incluindo a instalação de equipamentos de sistemas AVAC, melhoria de sistemas de iluminação elétrica, melhoria de aparelhos domésticos, instalação de energia renovável, etc.
3. Ações associadas à construção de serviços e ferramentas de gerenciamento, incluindo monitoramento e controle do edifício durante a operação, utilização de serviços de medição, controles de relógio, sensores, etc. Isso resulta em um edifício energeticamente eficiente, com baixa emissão de GEE, com conforto para seus usuários e econômico.

Serafin (2010) também considera que o processo de *retrofit* em edificações existentes é complexo, e existe a necessidade de se avaliar o desempenho dos diversos sistemas e dos equipamentos existentes.

Os principais critérios de eficiência e desempenho sustentável nas medidas de reabilitação em todas as áreas para alcançar um EEZ segundo Rabani, Madessa e Nord (2017) inclui:

1. Diminuição do uso de energia,
2. Impacto limitado na emissão global de gases de efeito estufa,
3. Melhoria da qualidade ambiental interna
4. Atualização de funcionalidade e qualidade arquitetônica.

São esses critérios que também direcionam as avaliações do ambiente construído e das ações de retrofit no projeto arquitetônico.

### **2.11.3 Projeto**

Diferentes medidas de *retrofit* integradas no projeto do edifício estão sendo pesquisadas em todo o mundo indicando a importância de reformas em edifícios existentes buscando economia de energia e valor arquitetônico. Apesar do fato de que o projeto do edifício possa ser afetado de forma menos significativa durante uma adaptação do mesmo, seu papel essencial na melhoria da qualidade arquitetônica e, mais importante, na economia de energia através de *retrofitting* não pode ser ignorado (RABANI; MADESSA; NORD, 2017).

Além das influências arquitetônicas, a qualidade do envelope do edifício tem um enorme impacto sobre seu desempenho energético. A qualidade térmica (isolamento com alta resistência térmica e baixa ou nenhuma ponte térmica), a hermeticidade e as perdas de ventilação definem a demanda líquida de energia do edifício (ARDENTE et al., 2011).

Neste contexto, as fachadas aparecem com destaque no processo de *retrofit* de um edifício. A fachada atua como um filtro entre as condições internas e externas, controlando a entrada de ar, calor, frio, ruídos e odores. É necessário um projeto bem especificado para que se possa atingir um bom desempenho energético (ANDREIS; BESEN; WESTPHAL, 2014).

As fachadas são elementos que contribuem significativamente para o desempenho de uma edificação, desempenhando um papel fundamental para a qualidade de iluminação natural, conforto térmico e consumo de energia. Com o tempo vão se desgastando devido à

ação dos agentes externos e também pela vida útil dos materiais e elementos nela aplicados, requerendo assim, diferentes ações de manutenção periódica durante o seu ciclo de vida. Diante disso, ações de *retrofit* são necessárias para manter e melhorar o seu desempenho.

O estudo de Taborianski e Prado (2012) avaliou as emissões de CO<sub>2</sub> relacionadas ao consumo de energia na fase operacional para diferentes sistemas de fachada de uma edificação comercial. Eles concluíram que a fachada de pior desempenho térmico foi a que apresentou as maiores emissões.

Outro estudo sobre fachadas foi feito por Maciel (2013) que analisou as fachadas de porcelanato, placas pétreas e alumínio composto (ACM). Seus resultados mostraram que a fachada com maior transmitância térmica (U) foi a de pior desempenho térmico, com maior consumo de energia na fase operacional do edifício.

De acordo com Ma et al. (2012) o problema para aperfeiçoar um *retrofit* é determinar as tecnologias mais rentáveis para alcançar o desempenho energético mais satisfatório, atendendo assim os níveis de conforto térmico aceitáveis diante de um conjunto de restrições e operações que deve ser cuidadosamente considerado no projeto.

Kim (2011) analisou o desempenho ambiental de um sistema de fachadas de uma edificação comercial em cortina de vidro na fase de operação, com e sem proteção solar. Na opção com proteção das fachadas houve uma melhoria do desempenho térmico, porém notou-se uma diminuição na qualidade da iluminação natural, o que, conseqüentemente, aumentou o consumo de energia elétrica.

Todos os estudos acima citados buscam a melhoria no conforto térmico, diminuição das emissões de CO<sub>2</sub>, valorização arquitetônica e o principal objetivo que é a redução do consumo de energia elétrica.

#### **2.11.4 *Retrofit* energético**

*Retrofit* energético emergiu como uma estratégia primária para reduzir o uso de energia e emissões de carbono (LIANG et al., 2017).

Um *retrofit* de energia pode ser físico ou uma mudança operacional no edifício em seus equipamentos consumidores de energia, ou como também no comportamento de seus ocupantes para reduzir a quantidade de energia convertendo assim o edifício em uma instalação de menor consumo energético (CHIDIAC et al., 2011; JAFARI; VALENTIN, 2017).

*Retrofit* energético de um edifício não só pode melhorar a eficiência energética, mas também pode oferecer benefícios sustentáveis, como a redução dos custos de manutenção, reduzir as emissões atmosféricas, criar oportunidades de emprego, melhorar a saúde e o conforto térmico (MA et al., 2012).

Várias medidas de *retrofit* que melhoram o desempenho do edifício em termos de eficiência energética podem ser classificadas em diferentes categorias básicas como medidas de controle, medidas de redução de carga, envelopamento e medidas de aplicação de tecnologias de energias renováveis (JAFARI; VALENTIN, 2018), sendo estes três últimos itens o que serão abordados no estudo de caso desta pesquisa.

Além das medidas acima, a questão dos fatores humanos e as mudanças de padrões de consumo de energia são considerados como outra categoria de *retrofit* de energia (JAFARI; VALENTIN, 2018) os quais não serão considerados nesta pesquisa.

Baseado nos estudos acima referidos, define-se que esta pesquisa é um *retrofit* energético que adota medidas de redução de carga pela aplicação de elementos arquitetônicos e tecnologia fotovoltaica na envoltória para atingir um EEZ.

Ma et al. (2012) afirmam que embora existam ampla gama de tecnologias de *retrofit* disponíveis e métodos para identificar o *retrofit* mais econômico, as medidas para projetos continuam a ser um grande desafio técnico. As questões que envolvem uma decisão de *retrofit* depende de uma avaliação das atividades que podem compor um *retrofit* na abordagem do desempenho, quantificação dos benefícios energéticos, análise econômica, avaliação de risco e mensuração e verificação (M & V) das economias de energia, portanto todas essenciais para o sucesso de um edifício. Demonstram também na pesquisa como conduzir eficazmente um *retrofit* do edifício para promover conservação de energia e sustentabilidade.

Salem et al. (2018) estudaram soluções de projeto energeticamente eficientes para propor como um edifício residencial existente no Reino Unido possa ser adaptado para atingir o padrão de um EEZ. Os autores utilizaram simulação térmica dinâmica, com auxílio do software *Thermal Analysis Simulation* (TAS) para as análises. Eles estabeleceram uma plataforma de métodos para encontrar uma solução de projeto adequada, tendo em consideração a influência das condições climáticas atuais e futuras no desempenho dos referidos edifícios. A adaptação do edifício teve foco na incorporação de energias renováveis no local e na melhoria da estrutura do edifício. O trabalho restringiu o estudo ao *retrofit* do edifício e a análise de seu desempenho sob vários climas, portanto, os custos não foram considerados no projeto. As adaptações propostas pelos autores possibilitaram ao edifício ser considerado um EEZ. Os resultados da simulação também mostraram que com as adaptações

houve redução no consumo anual de energia do edifício de 122,64 kWh/m<sup>2</sup> (90,24 %) e redução anual das emissões de carbono e emissões evitadas, que foram de 84,59 % e de 816,47kg/CO<sub>2</sub>, respectivamente.

No trabalho de Gagliano et al. (2017) são apresentadas medidas de eficiência energética adotadas para um edifício residencial localizado na área do Mediterrâneo, para alcançar os padrões de EEZ. Além disso os autores calcularam o custo extra necessário do *retrofit* de energia de um edifício existente (cenário 1) e no caso construir diretamente um edifício com o objetivo de atingir o status EEZ (cenário 2). Os dois cenários foram comparados sob o ponto de vista financeiro. Os resultados mostraram que o cenário 2, edifício novo, alcançou o melhor desempenho, apesar dos incentivos do governo que apoiam significativamente o *retrofit* de energia e renovação.

Sun et al. (2018) investigaram o primeiro edifício de energia zero (ZEB) no sudeste da Ásia, que foi adaptado de um edifício existente e incorporou diversas soluções ativas e passivas. Usaram painéis solares para geração de energia elétrica. Concluíram que as medidas de retrofit mais eficientes em termos energéticos foram iluminação eficiente e sistema de ar condicionado de alto desempenho para manter o conforto térmico dos ambientes e que as estratégias passivas não eram atrativas economicamente; foi necessário um período de retorno mais longo com payback de 40 anos. No entanto, no estudo aqui presente, as estratégias passivas foram suficientes para melhorar o conforto térmico do edifício, não havendo a necessidade de implementar um sistema de ar condicionado, foram atrativas economicamente com um período de retorno bem menor.

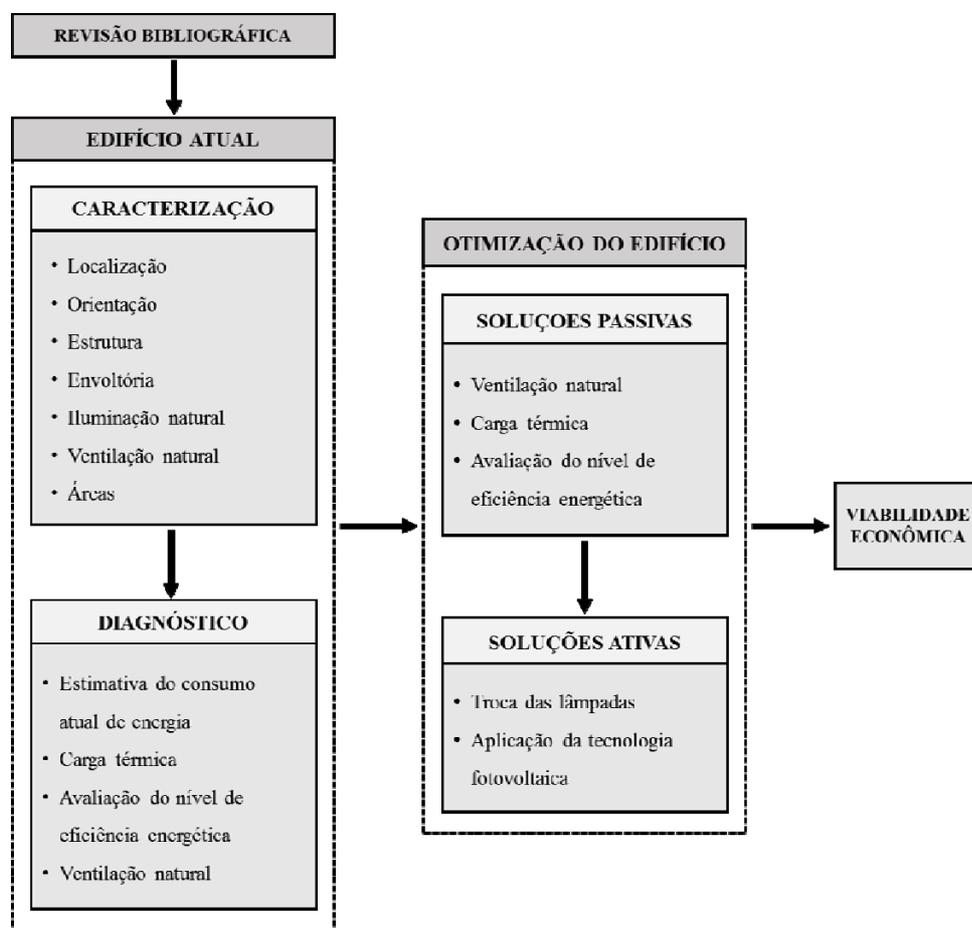
### 3 METODOLOGIA

O processo metodológico foi baseado na combinação de estratégias aplicadas ao edifício escolhido como estudo de caso, objetivando a redução no consumo de energia e a utilização de tecnologia fotovoltaica para geração de energia afim de tornar o edifício em um Edifício Energia Zero.

O primeiro passo no estudo foi fazer a caracterização do edifício e um diagnóstico da situação atual. Em seguida uma combinação de estratégias passivas (bioclimáticas) e estratégias ativas foram aplicadas ao edifício com o objetivo de melhorar a eficiência energética e reduzir o consumo de energia elétrica. Após a otimização do edifício, painéis fotovoltaicos foram aplicados na cobertura para geração de energia a fim de tornar o edifício um Edifício Energia Zero.

Os procedimentos metodológicos estão sintetizados no mapa metodológico apresentado na Figura 3.1.

Figura 3.1: Mapa metodológico.



Fonte: Próprio autor.

### 3.1 Caracterização do edifício escolhido

O edifício escolhido para estudo de caso nesta pesquisa trata-se de um Bloco Educacional (Bloco M3) do Instituto de Recursos Naturais (IRN) (Figura 3.2), localizado no Campus José Rodrigues Seabra da Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), Minas Gerais, Brasil (Figura 3.3). Para a caracterização do edifício estudo de caso foram levantados dados *in loco* sobre a sua localização, orientação, estrutura, envoltória, cobertura e sobre as condições de iluminação e ventilação natural.

Figura 3.2: Bloco M3 do IRN – UNIFEI.



Fonte: Próprio autor.

Figura 3.3: Campus José Rodrigues Seabra - Localização do edifício Bloco M3 - IRN.



Fonte: MAPS, 2017.

## 3.2 Diagnóstico da situação do edifício atual

O diagnóstico contemplou uma estimativa do consumo de energia elétrica do edifício em estudo e foram realizados os cálculos da carga térmica, da ventilação natural e a avaliação do nível de eficiência energética do edifício nas condições atuais.

### 3.2.1 Estimativa do consumo atual de energia elétrica do edifício

Na avaliação de um projeto para transformar um edifício em EEZ primeiramente é necessário obter o consumo de energia elétrica do mesmo. Como o edifício escolhido não possui uma medição individual, o levantamento deste consumo partiu-se primeiramente do calendário fornecido pela instituição do ano de 2017, onde pode-se verificar os dias letivos, férias, feriados e finais de semana. Também foi fornecido o número de usuários e o horário de ocupação de cada um deles em seus respectivos ambientes. A identificação das cargas foi

elaborada a partir de um levantamento “in loco” dos principais elementos consumidores de energia elétrica de cada ambiente, Assim, considerando a potência, quantidade de cada elemento consumidor de energia elétrica e o tempo de trabalho de cada um, foi estimado o consumo de energia elétrica por dia de cada ambiente, obtendo o consumo mensal e posteriormente o consumo anual do edifício, conforme demonstra Equação 3.1:

$$C_a = P_e * t \quad \text{Equação (3.1)}$$

Onde  $C_a$  é o consumo anual (kWh),  $P_e$  é a potência do elemento consumidor (kW) e  $t$  é o tempo de trabalho (horas).

### 3.2.2 Carga térmica

A carga térmica é a quantidade de calor sensível e latente, que deve ser removida de um ambiente com a finalidade de proporcionar aos ocupantes condições de conforto térmico.

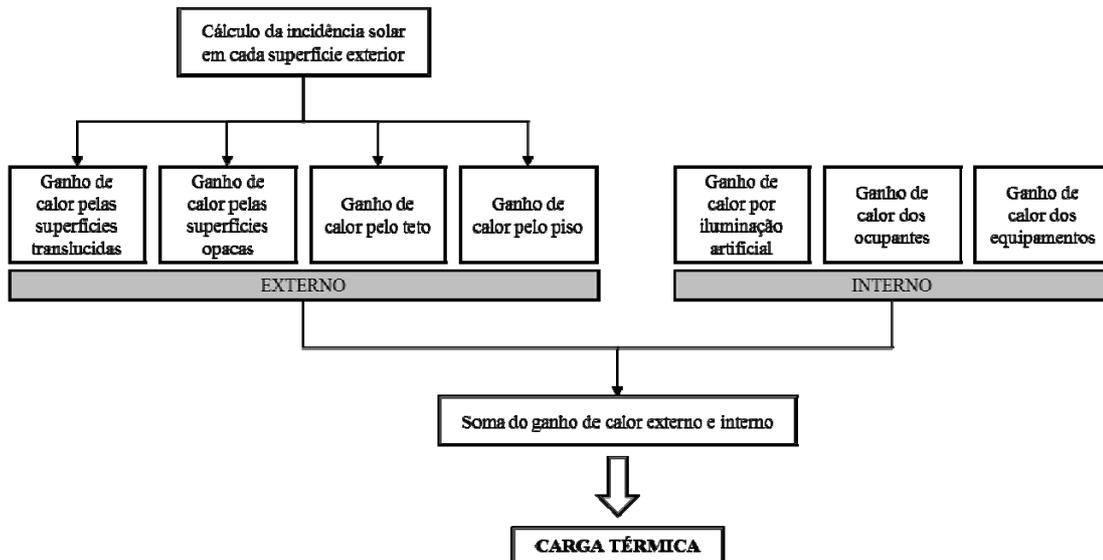
A metodologia para o cálculo da carga térmica do edifício estudo de caso foi organizado de forma hierárquica segundo Venturini (2013). Foram contabilizados para o cálculo da carga térmica ganhos de calor oriundos das seguintes fontes de calor: o número de ocupantes, aparelhos elétricos, iluminação artificial, as aberturas e os materiais da envoltória (superfícies translúcidas, opacas, piso e teto) com suas respectivas transmitâncias térmicas. Os três primeiros variam em função da utilização do ambiente, enquanto os outros variam em função das condições externas (VENTURINI, 2013). As infiltrações não foram consideradas neste cálculo.

Os coeficientes para calcular a porcentagem de energia que é transformada em calor de cada equipamento e da iluminação artificial foram obtidos pela ASHRAE (2009).

Adotou-se o dia 17 de outubro de 2015 e o horário das 14h50min. Este dia foi o mais quente durante o período letivo. Estes dados foram obtidos pela estação meteorológica da UNIFEI.

O fluxograma esquemático do cálculo da carga térmica realizado nesse trabalho está apresentado na Figura 3.4.

Figura 3.4: Fluxograma esquemático do cálculo da carga térmica.



Fonte: Adaptado de (VENTURINI, 2013).

### 3.2.3 Classificação do nível de eficiência energética para a envoltória do edifício atual

A partir de dados quantitativos informados no projeto arquitetônico do Bloco M3 (plantas baixas, corte, fachadas) a classificação do nível de eficiência energética da envoltória do edifício foi realizada utilizando o Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos (RTQ-C) (ELETROBRÁS/PROCEL, 2013). Este regulamento foi desenvolvido pelo Laboratório de Eficiência Energética de Edificações (LABEEE) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

A avaliação do RTQ-C foi feita pelo método prescritivo no *software* virtual *WebPrescritivo* (LABEEE, 2018). Por meio da Equação 3.2 (ELETROBRÁS/PROCEL, 2013) o *software* fornece um nível de classificação, numa escala de desempenho que varia de A a E, sendo A o nível máximo.

$$IC_{env} = -14,14FA - 113,94FF + 50,82PAFt + 4,86FS - 0,32AVS + 0,26ARS - \frac{9E,7E}{FF} (0,51 \cdot PAFt + ARS) \quad | \quad 277,98 \quad \text{Equação (3.2)}$$

Onde:  $IC_{env}$  é o indicador de consumo (adimensional);  $FA$  ( $A_{pob}/A_{tot}$ ) é o fator altura;  $FF$  ( $A_{env}/V_{tot}$ ) é o fator de forma;  $FS$  é o fator solar das superfícies translúcidas;  $PAFt$  é o percentual de abertura na fachada total (adimensional, para uso na equação);  $AVS$  é o

ângulo vertical de sombreamento, com 0 e 45° (graus);  $AHS$  é o ângulo horizontal de sombreamento, com 0 e 45° (graus);  $Apcob$  é a área de projeção da cobertura ( $m^2$ );  $Atot$  é a área total de piso ( $m^2$ );  $Aenv$  é a área da envoltória ( $m^2$ );  $Vtot$  é o volume total da edificação ( $m^3$ ) e  $Ape$  é a área de projeção do edifício ( $m^2$ ).

Foi adotado o valor de 0,8 para o  $FS$  de acordo com dados do fabricante do material das superfícies translúcidas (vidro plano).

Como o edifício em estudo não possui nenhum tipo de proteção horizontal, considera-se o  $AVS = 0$ .

O cálculo de  $AHS$  foi realizado através de uma média simples dos ângulos das proteções solares na lateral de cada janela do prédio com o valor de  $AHS = 4,6^\circ$ .

### 3.2.4 Cálculo da ventilação natural

A verificação do desempenho da ventilação natural está associada à forma do edifício, ao microclima onde está inserido, a dimensão, o tipo, o número e a posição das aberturas nas edificações, seu entorno construído, bem como a velocidade do vento e diferenças de temperatura.

Neste trabalho adotou-se a metodologia empírica Britânica BS 5925:1991 (BSI, 1991) para o cálculo da ventilação natural.

A taxa de ventilação ( $Q$ ) devido à ação do vento foi calculada em função da velocidade de referência do vento, dos coeficientes de pressão nas fachadas de entrada ( $Cp1$ ) e de saída ( $Cp2$ ), das áreas das aberturas de entrada ( $A1$ ) e saída ( $A2$ ), e do coeficiente de perda de carga nas aberturas. O dimensionamento das aberturas neste método precisam ser previamente definidas, o que se aplica no caso de estudo por já termos as dimensões reais das mesmas.

O procedimento de cálculo foi efetuado para cada ambiente do edifício, tanto para o diagnóstico da situação atual como após as intervenções (passivas) projetadas para o edifício. Os critérios adotados para este cálculo estão descritos na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Critérios considerados para o cálculo da ventilação natural.

Características das aberturas	Processos considerados	Fatores de redução e correção
Áreas de entrada e saída iguais ou diferentes	- Ação do vento; - Ação da diferença de temperatura (efeito chaminé)	- Diferenças de Coeficiente de Pressão nas aberturas; - Coeficiente de Perda de Diferença de altura entre as aberturas.

Fonte: Próprio autor.

Este procedimento de cálculo da ventilação natural foi efetuado para cada ambiente do edifício objeto de estudo, tanto para o diagnóstico da situação existente como após as intervenções projetadas para o edifício.

### 2.3.1 Cálculo da velocidade do vento

Para se calcular o fluxo de ar é necessário conhecer a velocidade do vento, a qual depende das características do local. Obteve-se esse valor conforme a Equação 3.3 (BSI, 1991):

$$\frac{u}{u_m} = k * Z^\alpha \rightarrow u = k * Z^\alpha * u_m \quad \text{Equação (3.3)}$$

Onde:  $u$  é a velocidade do vento externo (m/s),  $u_m$  é a velocidade média do vento no local (m/s),  $K$  e  $\alpha$  são constantes que dependem das características do terreno e  $Z$  é a altura (m).

A velocidade média do vento no local ( $u_m$ ) foi obtida através dos dados da estação meteorológica da UNIFEI no período de 2013 a 2016 e equivale a 0,42m/s. A altura do edifício ( $Z$ ) é de 5,2 metros. Os valores das constantes  $\alpha$  e  $K$  para ambiente urbano são 0,25 e 0,35 respectivamente (BSI, 1991).

### 2.3.2 Cálculo da ventilação

O cálculo da ventilação natural considerou o processo apenas da ação do vento e foi efetuado para os ambientes com e sem ventilação cruzada. Assumindo que o vento incide em duas situações: perpendicular ( $0^\circ$ ) e  $45^\circ$  graus às aberturas.

O fluxo de ar dentro dos ambientes com ventilação cruzada foi calculado pela Equação 3.4 (BSI, 1991):

$$Q_w = C_d * A_w * u_r * (\Delta C_p)^{\frac{1}{2}} \quad \text{Equação (3.4)}$$

Onde:  $Q_w$  é o fluxo de ar pela ação dos ventos ( $\text{m}^3/\text{s}$ ),  $C_d$  é o coeficiente de descarga referente à perda de carga por ação dos ventos,  $A_w$  é a área equivalente das aberturas ( $\text{m}^2$ ),  $u_r$  é a velocidade do vento externo e  $\Delta C_p$  é a variação dos coeficientes de pressão das aberturas de entrada.

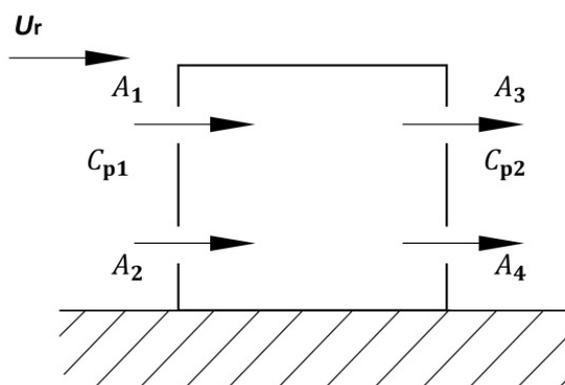
Para o coeficiente de descarga foi atribuído o valor de 0,61 (BSI, 1991).

O valor de  $A_w$  se calcula através da Equação 3.5. É o fator que introduz as áreas das janelas no cálculo de  $Q_w$  dentro do espaço.

$$\frac{1}{(A_w)^2} = \frac{1}{(A_1 + A_2)^2} + \frac{1}{(A_3 + A_4)^2} \quad \text{Equação (3.5)}$$

Os valores de  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$  e  $A_4$  correspondem as áreas das janelas segundo a posição, como apresentado na Figura 3.5.

Figura 3.5: Ventilação cruzada devida ação dos ventos, com duas aberturas por fachada



Fonte: (BSI, 1991).

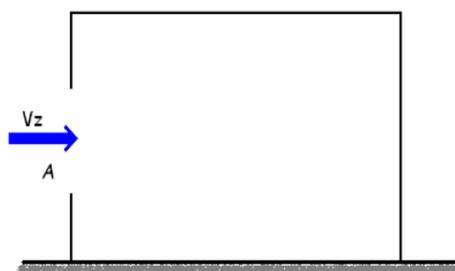
O fluxo de ar dentro dos ambientes que possuem aberturas unilaterais, só em uma parede, foi calculado pela Equação 3.6 (BSI, 1991):

$$Q_w = 0,025 * A * u_r \quad \text{Equação (3.6)}$$

Onde:  $Q_w$  é o fluxo de ar pela ação dos ventos ( $\text{m}^3/\text{s}$ ),  $u_r$  é a velocidade do vento externo e  $A$  é a área da abertura efetiva ( $\text{m}^2$ ).

A Figura 3.6 apresenta a ventilação unilateral devida à ação dos ventos, com uma única abertura.

Figura 3.6: Ventilação unilateral devida à ação dos ventos, com uma única abertura.



Fonte: (BSI, 1991).

### 3.3 Aplicação de estratégias passivas para redução da carga térmica e melhoria da eficiência energética

As estratégias passivas sugeridas neste estudo tem como principal função redução da carga térmica, melhoria do conforto térmico interno e melhoria da eficiência energética do edifício.

Primeiramente foi feita a caracterização climática de Itajubá – MG, que definiu conforme a ABNT - NBR 15.220 – 3, que Itajubá se encontra na Zona Bioclimática 2. Foi então elaborado o projeto das estratégias recomendadas ao edifício que são: aberturas para ventilação e sombreamento das aberturas e tipos de vedações externas.

Após a aplicação das estratégias passivas, foi novamente calculada a carga térmica externa do edifício, a eficiência energética e a ventilação natural, todos seguindo as mesmas metodologias efetuadas no diagnóstico.

### 3.4 Aplicação de estratégias ativas para redução e geração de energia elétrica do edifício otimizado

A capacidade de redução do consumo de energia elétrica no sistema de iluminação é uma medida técnica eficiente e que produz um resultado imediato. Neste estudo as lâmpadas

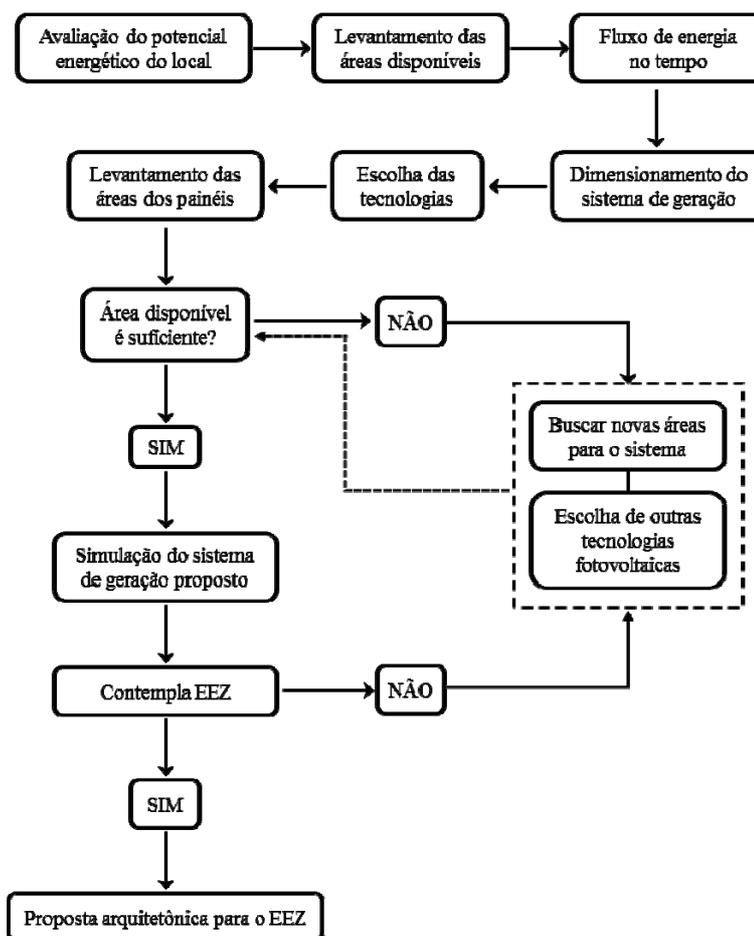
fluorescentes das luminárias foram todas substituídas por lâmpadas tipo LED. Após a substituição das lâmpadas realizou-se uma nova estimativa do consumo de energia elétrica do edifício. A quantidade foi calculada para manter o mesmo nível de iluminação nos ambientes. Como a substituição das lâmpadas altera a carga térmica interna do edifício, foi necessário realizar um novo cálculo desta carga térmica.

Tanto a estimativa do consumo de energia elétrica quanto o cálculo da carga térmica seguiram a mesma metodologia utilizada no diagnóstico.

### **3.5 Proposta de aplicação de tecnologia fotovoltaica ao edifício otimizado**

O sistema de geração de energia é essencial em um EEZ, pois deve ser o mais eficiente possível e possuir uma demanda gerada por fontes renováveis segundo Torcellini et al. (2006). A metodologia proposta para o dimensionamento do sistema de geração de energia parte do princípio da adoção do conceito de Energia Zero Local e segue o fluxograma conforme a Figura 3.7.

Figura 3.7: Fluxograma esquemático da aplicação de tecnologia fotovoltaica ao edifício otimizado.



Fonte: Próprio autor.

### 3.5.1 Avaliação do potencial energético do local

O potencial energético mais disponível em Itajubá, MG, (latitude de 22°24'45,1") é o solar. Como o potencial solar, atende a hierarquia sugerida por Torcellini (2006) para EEZ, foi o recurso renovável escolhido para este trabalho.

Adotou-se neste trabalho a inclinação igual a latitude local, pois segundo Rüter (2004) a implantação dos painéis na mesma inclinação da latitude, é melhor para a captação da irradiação solar. De acordo com o Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito (CRESESB, 2018), o valor médio da irradiação solar em Itajubá, MG, é de 1.857,85 kWh/m<sup>2</sup>/ano (5,09 kWh/m<sup>2</sup>/dia) no plano inclinado igual a latitude.

### 3.5.2 Levantamento das áreas disponíveis

A área disponível no local para instalação do sistema de geração distribuída

considerou a tipologia arquitetônica do edifício, buscou as áreas não sombreadas com maior incidência solar e que favoreciam a aplicação dos módulos fotovoltaicos.

### 3.5.3 Fluxo de energia no tempo

Um sistema de geração de energia para um EEZ, deve ser projetado para garantir, no último ano de vida útil, energia suficiente para atender o consumo de energia do edifício. Para este cálculo adotou-se a Equação 3.7 conforme Lima (2012):

$$G_t = G_0(1 - d)^t \quad \text{Equação (3.7)}$$

Onde  $G_t$  é a geração de energia no ano  $t$  (valor futuro),  $G_0$  é a geração de energia no ano 0 (valor presente),  $t$  é o intervalo de tempo para qual o sistema será projetado e  $d$  é a taxa de degradação anual linear dos módulos.

### 3.5.4 Dimensionamento do sistema de geração

Para dimensionar um sistema de geração que possibilite atender à demanda do edifício, adotou-se a metodologia adaptada de Rüther e Braun (2009) onde os sistemas fotovoltaicos podem ser dimensionados de acordo com a Equação 3.8:

$$P_{FV} = \left[ \frac{\left( \frac{C}{I_{rr}} \right) / F \right] * \frac{1000 \text{ W}}{\text{m}^2} \quad \text{Equação (3.8)}$$

Onde  $P_{FV}$  é a potência nominal do sistema (W),  $C$  é o consumo da edificação (kWh/ano),  $I_{rr}$  é a radiação local (kWh/m<sup>2</sup>/dia) e  $F$  é o fator de performance do sistema. Neste trabalho foi adotado o valor de 0,8 para o coeficiente  $F$ , conforme Lima (2012).

### 3.5.5 Levantamento da área dos painéis

A área dos painéis é calculada em função do tipo de painel escolhido e da influência da temperatura na potência máxima dos mesmos.

Primeiramente foi calculada a temperatura no painel de acordo com a Equação 3.9

(BATTIONI et al., 2016):

$$T_p = T_a + \frac{I_{rr}}{I_{rr(NOCT)}} * (T_{NOCT} - T_a(NOCT)) \quad \text{Equação (3.9)}$$

Onde  $T_p$  é a temperatura do painel (°C),  $T_a$  é a temperatura ambiente média (°C),  $I_{rr}$  é a irradiação solar média (W/m<sup>2</sup>),  $T_{NOCT}$  é a temperatura nominal de operação do painel, fornecida pelo fabricante,  $I_{rr(NOCT)}$  é a irradiação solar padrão de teste e  $T_a(NOCT)$  é a temperatura padrão de teste.

Para Itajubá a temperatura ambiente média é de 20,9°C e a irradiação solar média é de 424,2 W/m<sup>2</sup> (CRESESB, 2018).

Em qualquer cálculo de geração de energia fotovoltaica, deve-se levar em consideração a temperatura dos módulos na condição NOCT ( $T_a(NOCT)$ ) que corresponde a 20°C. A irradiação na mesma condição ( $I_{rr(NOCT)}$ ) é de 800 W/m<sup>2</sup>.

Com o valor de  $T_p$  obtido com a Equação 3.9 foi feita a correção da potência máxima do painel conforme Equação 3.10 (BATTIONI et al., 2016):

$$P_{corr} = P_{m\acute{a}x.} * \left[ 1 + \frac{\gamma}{100} * (T_p - 25) \right] \quad \text{Equação (3.10)}$$

Onde  $P_{corr}$  é a potência corrigida (W),  $T_p$  é a temperatura do painel,  $P_{m\acute{a}x.}$  é a potência máxima (W) e  $\gamma$  é coeficiente de temperatura da potência (%/°C), sendo os dois últimos fornecidos pelo fabricante do painel.

Com os resultados encontrados foi calculada a área necessária para este sistema de acordo com a Equação 3.11, conforme Lima (2012):

$$A = P_{FV}/1000 * \eta \quad \text{Equação (3.11)}$$

Onde:  $P_{FV}$  é a potência nominal do sistema (W) e  $\eta$  é a eficiência do módulo, e 1000 é referente à radiação solar nas Condições Padrões de Teste.

### 3.5.6 Simulação do sistema de geração

Após a escolha e definições das tecnologias, com os cálculos da quantidade de painéis foi feita a verificação se a área disponível é suficiente para implantação dos painéis e assim calculou-se a nova geração do sistema com a estimativa de produção de energia através da Equação 3.12 (RÜTHER; BRAUN, 2009):

$$G = P_{PV} * I_{rr} * F \quad \text{Equação (3.12)}$$

Onde  $G$  é a energia gerada pelo sistema;  $P_{PV}$  é a potência nominal do sistema;  $I_{rr}$  = irradiação solar local no plano em que os módulos serão instalados e  $F$  é o fator de performance do sistema.

A Equação 3.12 é a Equação 3.8 ajustada para a geração de energia. Esta geração resultante estará bem próxima do consumo de energia resultante da Equação 3.8.

### 3.5.7 Proposta arquitetônica

A partir dos resultados obtidos foi proposta uma solução arquitetônica que buscou expor a tecnologia fotovoltaica e ao mesmo tempo integra-la ao edifício como elemento de composição, imprimindo assim uma unidade ao conjunto edificado sem grandes interferências construtivas.

## 3.6 Viabilidade Econômica

A análise de viabilidade econômica em um projeto de *retrofit* energético para um EEZ é de suma importância, pois é um fator que vai influenciar muito as decisões de projeto e execução do *retrofit*.

Primeiramente foi elaborado uma planilha de custos de materiais e mão de obra dos serviços que foram executados no edifício. Foi adotado como base para levantar os valores de cada serviço e material a composição de custos do Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI, 2018) de abril 2018, sem encargos sociais. Estes custos irão compor o custo total para o *retrofit* do edifício otimizado para se tornar um EEZ.

Foi verificado que a UNIFEI tem seu fornecimento de energia dentro das diretrizes de contratação de potência (kW) e energia (demanda e consumo), com modalidade tarifária THS

(tarifa horo-sazonal) verde A4, com valor de R\$0,40749809 para horário fora de ponta período seco de acordo com a fatura de energia gerada pela CEMIG do consumo da UNIFEI no período de 01/09/2018 a 01/10/2018.

De acordo com a Resolução Normativa nº 687/2015 da ANEEL (2015) foi necessário computar no balanço a taxa de disponibilidade.

O custo do sistema fotovoltaico foi baseado em um orçamento de empresa especializada do setor. Na análise de viabilidade econômica deste trabalho foram adotados os parâmetros Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR) e Taxa Mínima de Atratividade (TMA).

O VPL de uma proposta de investimento é a soma algébrica, na data zero, dos saldos dos fluxos de caixa descontados a Taxa Mínima de Atratividade, conforme mostra a Equação 3.13 (SANTOS; SOUZA; DALFIOR, 2016):

$$VPL = -CF_0 + \sum \frac{CF_i}{(1+i)^n} \quad \text{Equação (3.13)}$$

Onde  $FC_i$  é o Fluxo de Caixa esperado para o período  $i$ ,  $r$  é a taxa de desconto (TMA);  $i = 0, 1, 2, 3, \dots, n$  (períodos).

Segundo Santos, Souza e Dalfior (2016), para que o projeto seja viável, o VPL deverá ter o valor positivo, ou seja,  $VPL > 0$ .

A Taxa Interna de Retorno (TIR) é a taxa que iguala o retorno ao investimento. Ela consiste na taxa de desconto que faz com que o VPL de um investimento seja igual à 0 (SANCHES et al., 2007). É calculada com a Equação 3.14 (MACEDO et al., 2017):

$$\sum_{t=1}^n \left[ \frac{FC_t}{(1+TIR)^t} \right] - I_0 = 0 \quad \text{Equação (3.14)}$$

A TIR deve ser maior que a TMA para que um empreendimento seja considerado atrativo (SANCHES et al., 2007). Neste trabalho a TMA foi considerada com o valor da Selic, de 6,4 % ao ano, que é o valor da meta do Banco Central para o período de 22/03/2018 a 16/05/2018 (BCB, 2018).

O tempo considerado foi de 25 anos para as intervenções passivas (alterações

construtivas), troca de lâmpadas e do sistema fotovoltaico, o que equivale também a garantia dos fabricantes para o fornecimento de produção de energia do sistema fotovoltaico. Porém para os inversores foi considerado o tempo de garantia de 10 anos. Adotou-se a degradação média de 0,5 % ao ano na produção de energia e uma taxa de manutenção anual de 0,5 % sobre o valor do capital inicial do sistema fotovoltaico. Assumiu-se no cálculo que o excedente gerado possui o mesmo valor da energia elétrica comprada da rede em baixa tensão o que caracteriza o sistema de compensação de energia.

No custo final foi utilizada a taxa de disponibilidade de 100 kWh/mês de acordo com a Resolução Normativa nº 687/2015 da ANEEL.

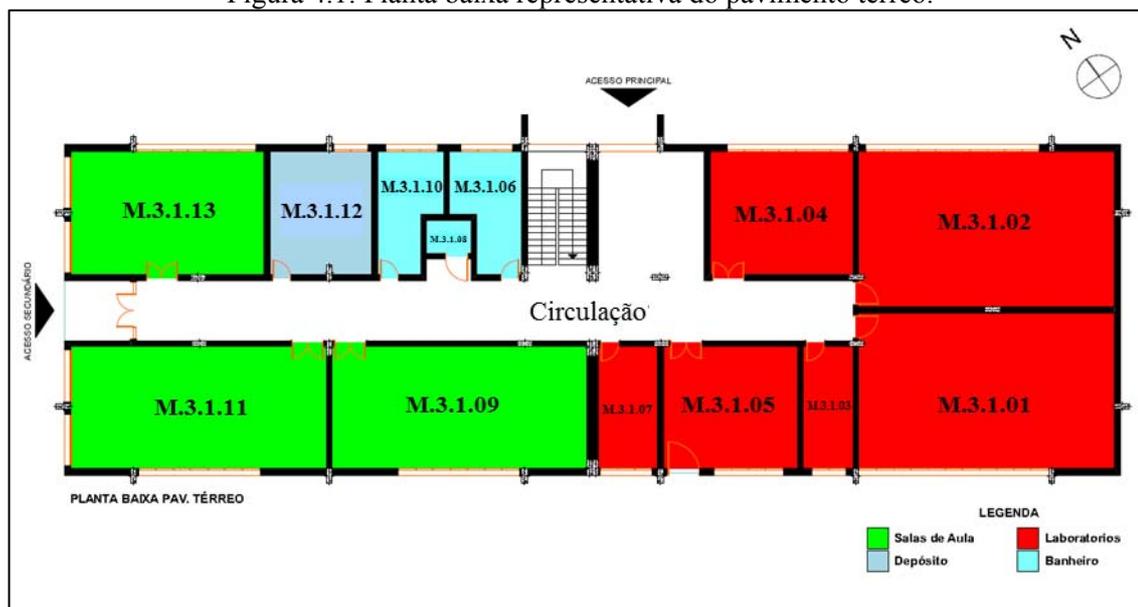
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Caracterização do edifício escolhido

O edifício estudo de caso é uma edificação de dois pavimentos, com a forma de um retângulo, com área total construída de 1.492 m<sup>2</sup> e uma área de projeção de 746 m<sup>2</sup>. Os espaços internos são destinados às salas de professores, sala de reuniões, diretoria, alguns laboratórios e salas de aula.

O pavimento térreo do edifício, conforme demonstra a Figura 4.1, possui dois acessos, o principal, que se dá pela fachada NE, e o secundário, pela fachada NO. É neste pavimento onde se concentram os laboratórios e as salas de aula.

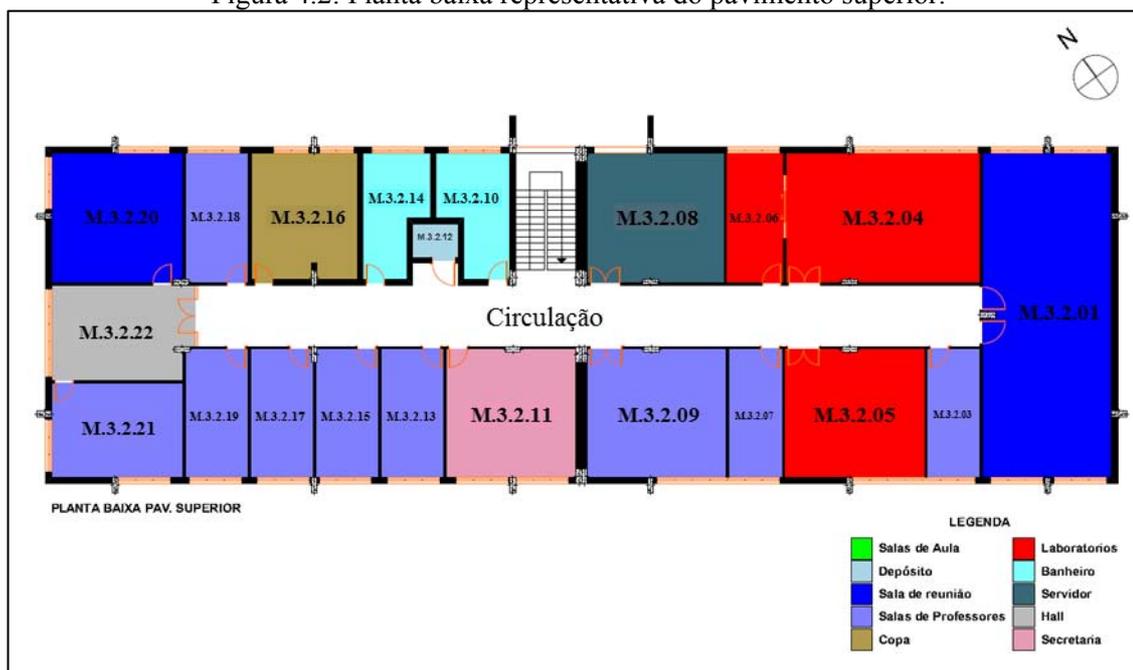
Figura 4.1: Planta baixa representativa do pavimento térreo.



Fonte: Próprio autor.

O pavimento superior (Figura 4.2) concentra as salas de professores, salas administrativas e alguns laboratórios, sendo que a maior ocupação em metro quadrado são as salas de professores. No entanto, até o momento, o edifício não contempla em sua totalidade a acessibilidade, conforme a ABNT (2004).

Figura 4.2: Planta baixa representativa do pavimento superior.



Fonte: Próprio autor.

Os laboratórios possuem a maior porcentagem de ocupação do pavimento, como também de toda edificação, seguidos das salas de aula, como demonstrado na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Áreas dos ambientes do edifício em estudo.

Ambiente	Área por ambiente do Pav. Térreo (m <sup>2</sup> )	Área (%)	Área por ambiente do Pav. Superior (m <sup>2</sup> )	Área (%)
Sala de Aula	185,74	13,9	-	-
Banheiro	33,93	2,5	30,48	2,3
Circulação	140,18	10,5	118,36	8,8
Laboratório	273,28	20,4	104,2	7,8
Sala de professor	-	-	174,05	13,0
Secretaria	-	-	34,41	2,6
Servidor	-	-	36,54	2,7
Copa	-	-	27,53	2,1
Hall	-	-	27,32	2,0
Sala de reunião	-	-	121,18	9,1
Almoxarifado ou Depósito	27,15	2,0	3,33	0,2

Fonte: Próprio autor.

### 4.1.1 Características da envoltória

Os pilares, as vigas de concreto e a platibanda de alvenaria da fachada foram rebocadas e pintadas com pintura acrílica cor concreto.

As paredes foram feitas com alvenaria de tijolos (blocos cerâmicos) 8 furos “tipo baiano”, nas dimensões de 9x19x19cm, ajuste corrente (um-tijolo), assentadas com traço 1:2:9, cimento CP II 32, cal hidratada e areia natural de rio, revestidas externamente com revestimento cerâmico de 5x20cm e internamente rebocadas e pintadas. A área total de paredes da envoltória (Tabela 4.2), que são os fechamentos opacos, corresponde a 911,10 m<sup>2</sup> no total.

A transmitância térmica da parede ( $U_{par}$ ) na condição atual tem valor de  $U=1,8$  W/(m<sup>2</sup>·K). Este valor foi obtido seguindo a metodologia da norma ABNT NBR 15.220 – 2 (ABNT, 2003). O valor obtido para a transmitância térmica da parede se encaixa na classificação Nível B, de acordo com as diferentes classificações especificadas pela RTQ-C. Os cálculos da transmitância térmica da parede estão apresentados no Anexo A.

Tabela 4.2: Áreas dos fechamentos opacos (paredes).

Fachada	Área em m <sup>2</sup>
Fachada NE	349,1
Fachada NO	84,1
Fachada SE	125,7
Fachada SO	352,2
<b>TOTAL</b>	<b>911,1</b>

Fonte: Próprio autor.

As aberturas receberam caixilharia em alumínio anodizado natural, com vidros temperados transparentes de 6mm. O fator solar tem valor de  $FS=0,83$  (ASHRAE, 2009).

Pele de vidro é um tipo de fachada-cortina em que o vidro é colado, usualmente com silicone estrutural, nos perfis dos quadros de alumínio, ficando essa estrutura oculta, na face externa. O vidro usado na pele de vidro é de 6 mm temperado, cor fumê. Este material foi usado na porta principal do edifício. Adotou-se o mesmo fator solar dos caixilhos de alumínio.

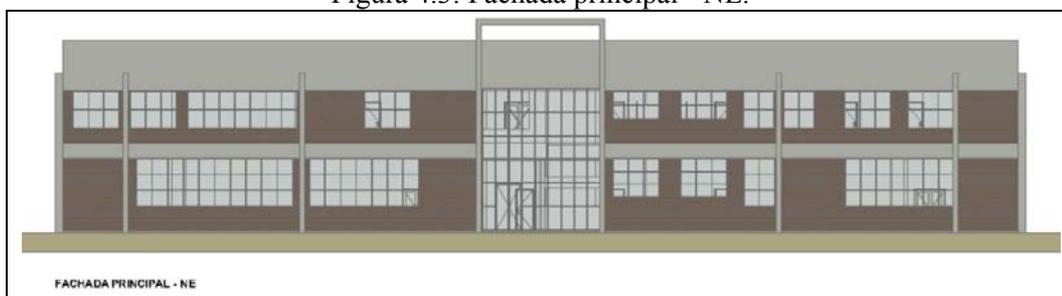
A cobertura possui uma estrutura metálica para sustentação das telhas de chapa metálica sobre uma laje de concreto nervurada. Existem alguns domus para iluminação zenital

em vidro transparente 6mm. O valor da transmitância térmica da cobertura ( $U_{cob}$ ) é de 1,47  $W/(m^2 \cdot K)$ . Os cálculos da transmitância térmica da cobertura estão apresentados no Anexo A.

#### 4.1.2 Iluminação natural

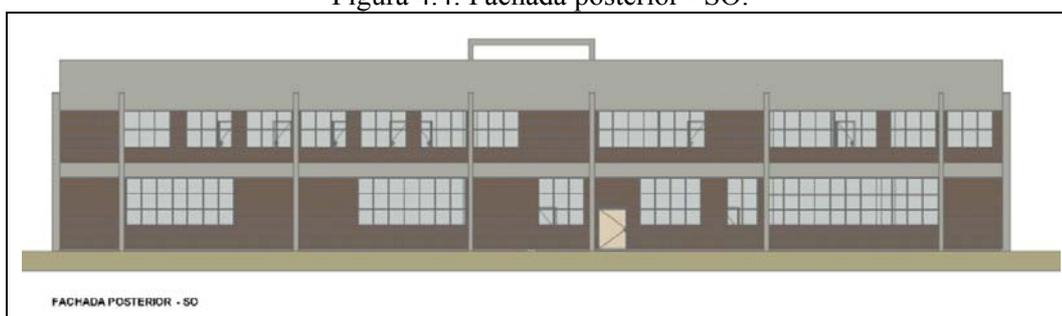
O edifício possui nas fachadas NE, NO e SO várias aberturas (janelas e portas), conforme demonstram as Figuras 4.3, 4.4 e 4.5a, as quais permitem iluminação natural a todos os ambientes internos, porém, não possuem proteção solar em suas aberturas, favorecendo a entrada de uma grande quantidade de calor através destes fechamentos translúcidos. A fachada SE (Figura 4.5b) não possui nenhuma abertura translúcida.

Figura 4.3: Fachada principal - NE.



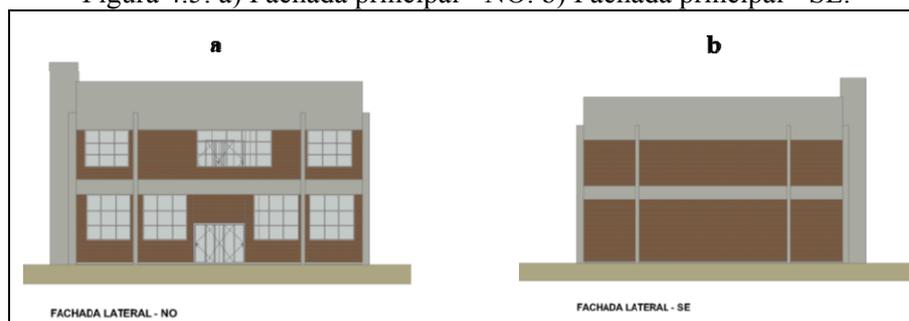
Fonte: Próprio autor.

Figura 4.4: Fachada posterior - SO.



Fonte: Próprio autor.

Figura 4.5: a) Fachada principal - NO. b) Fachada principal - SE.



Fonte: Próprio autor.

Os fechamentos translúcidos (janelas) possuem uma área total de 308,7 m<sup>2</sup>, conforme demonstrado na Tabela 4.3.

A circulação do pavimento inferior tem sua iluminação favorecida pelo hall de entrada principal e pelo acesso secundário. Já a circulação do pavimento superior possui domus na laje de cobertura, colaborando assim para a iluminação natural em toda sua extensão.

Tabela 4.3: Área das aberturas por ambiente.

<b>Ambiente</b>	<b>Área (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Área (%)</b>
Sala de Aula	66,0	21,8
Banheiro	16,8	5,5
Circulação	19,3	6,4
Laboratório	95,3	31,5
Sala de professor	43,7	14,4
Secretaria	9,6	3,2
Servidor	4,8	1,6
Copa	6,4	2,1
Hall	8,0	2,6
Sala de reunião	28,8	9,5
Almoxarifado ou Depósito	4,0	1,3
<b>TOTAL</b>	<b>303,8</b>	<b>100</b>

Fonte: Próprio autor.

### 4.1.3 Ventilação natural

Todos os ambientes contam com aberturas nas paredes que fazem divisa com o exterior, possibilitando uma ventilação natural. Os ambientes que possuem mais de uma face de parede com aberturas são as salas M3.1.13 e M3.1.11 no pavimento térreo (Figura 4.3) e as salas, M3.2.21 e M3.2.20 do pavimento superior. Porém a única que possui uma ventilação cruzada é a M3.2.01, as demais aberturas estão voltadas para o sentido NO (Figura 4.4), com uma insolação forte e sem proteção solar.

## 4.2 Diagnóstico da situação atual do edifício

### 4.2.1 Estimativa do consumo de energia elétrica atual do edifício

As cargas principais consumidoras de energia elétrica no edifício são as dos equipamentos elétrico-eletrônicos (computadores, impressoras, projetores, ventiladores, bebedouro de água, cafeteira, geladeira, micro-ondas e iluminação). As Tabelas 4.4, 4.5 e 4.6 apresentam a quantidade, a potência (W) e a carga total (kW) dos equipamentos elétrico-eletrônicos, ar condicionado e da iluminação, respectivamente.

Tabela 4.4: Descrição das cargas dos equipamentos elétrico-eletrônicos.

Equipamentos	Quantidade	Potência (W)	Carga Total (kW)
Computadores	54	163	8,775
Ventilador	24	170	4,08
Projetor	5	284	1,42
Cafeteira	1	1000	1
Geladeira	1	975	1
Microndas	1	850	0,85
Bebedouro	4	155	0,62
Impressoras	4	80	0,32
<b>TOTAL</b>			<b>18,065</b>

Fonte: Próprio autor.

Tabela 4.5: Descrição das cargas do ar condicionado.

Tipo	Quantidade	Potência (W)	Carga Total (kW)
Split	6	3516,08	<b>21,108</b>

Fonte: Próprio autor.

Tabela 4.6: Descrição das cargas de iluminação.

Tipo	Quantidade	Potência (W)	Carga Total (kW)
Fluorescente tubular de 40W	318	40	<b>12,72</b>

Fonte: Próprio autor.

A distribuição do consumo final de energia (em %) por tipo de equipamento está apresentada na Figura 4.6.

Figura 4.6: Distribuição do consumo final de energia por tipo de equipamento.



Fonte: Próprio autor.

Posteriormente o consumo de energia foi modelado diariamente de acordo com o horário de uso e o calendário da UNIFEI do respectivo ambiente durante o ano de 2017. Com isso determinou-se o consumo mensal e anual do edifício.

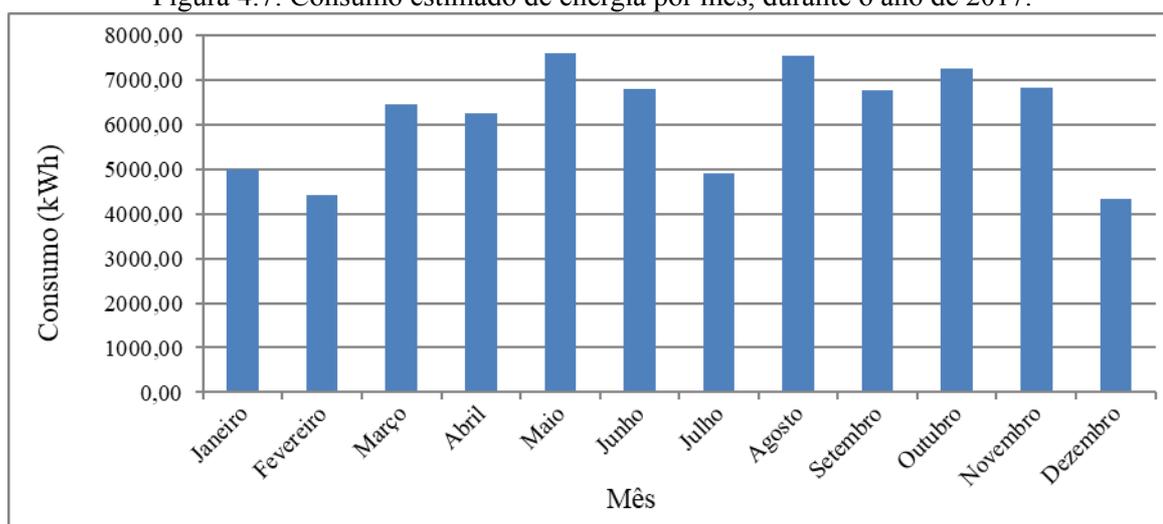
O consumo estimado de energia anual foi de 74.120 kWh como pode ser observado na Tabela 4.7 e na Figura 4.7.

Tabela 4.7: Consumo estimado de energia por mês, durante o ano de 2017.

Mês	Consumo (kWh)
Janeiro	4999,88
Fevereiro	4421,12
Março	6444,56
Abril	6254,72
Maio	7598,03
Junho	6784,68
Julho	4912,35
Agosto	7535,90
Setembro	6758,91
Outubro	7260,29
Novembro	6831,16
Dezembro	4318,08
<b>TOTAL</b>	<b>74120</b>

Fonte: Próprio autor.

Figura 4.7: Consumo estimado de energia por mês, durante o ano de 2017.



Fonte: Próprio autor.

## 4.2.2 Carga térmica

Para realizar as intervenções arquitetônicas e tecnológicas na edificação, o cálculo da carga térmica é fundamental para fornecer um diagnóstico dos elementos que influenciam no conforto térmico do edifício.

### 4.2.2.1 Carga térmica externa

A carga térmica externa total e por tipo de superfície está apresentada na Tabela 4.8. Observa-se que o ganho de calor pelas superfícies translúcidas é o que mais influencia na carga térmica externa.

Tabela 4.8: Carga térmica externa por tipo de superfície.

Tipo de superfície	Carga térmica externa (kW)
Ganho de calor pelas superfícies translúcidas	46,53
Ganho de calor pelas superfícies opacas	25,56
Ganho de calor pelo teto	21,36
Ganho de calor pelo piso	4,23
<b>TOTAL</b>	<b>97,68</b>

Fonte: Próprio autor.

Não foram considerados os efeitos da acumulação de calor (radiação → aquecimento → convecção). Esta consideração implica, segundo Venturini (2013), em admitir que toda a

radiação térmica que atravessa as superfícies translúcidas, inclusive a iluminação, é instantaneamente transformada em carga térmica. Não considerou a infiltração de ar pelas frestas.

Os valores dos coeficientes globais de transferência de calor foram obtidos conforme a ABNT NBR 15.220.

#### 4.2.2.2 Carga térmica interna

A carga térmica interna foi obtida pela somatória dos ganhos de calor da iluminação artificial, ganho de calor dos equipamentos e do ganho de calor dos ocupantes o que resultou em uma carga térmica interna de 62,01 kW demonstrado na Tabela 4.9.

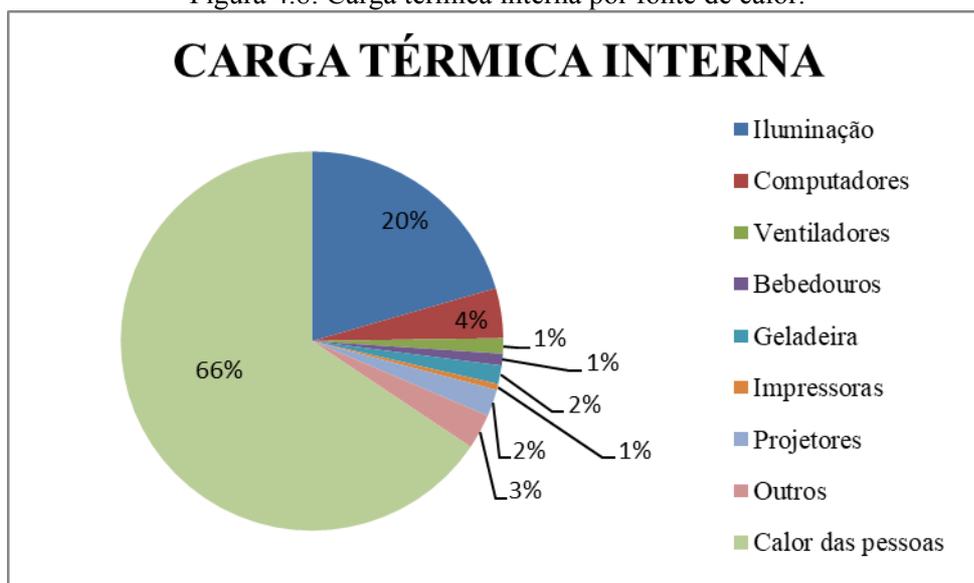
Tabela 4.9: Carga térmica interna por fonte de calor.

<b>Fonte de calor</b>	<b>Carga térmica interna (kW)</b>
Calor das pessoas	40,66
Iluminação	12,72
Computadores	2,63
Outros	1,85
Projetores	1,42
Geladeira	0,97
Ventiladores	0,82
Bebedouros	0,62
Impressoras	0,32
<b>TOTAL</b>	<b>62,01</b>

Fonte: Próprio autor.

Observa-se que os maiores ganhos de calor são o calor das pessoas e a iluminação artificial, como mostrado na Figura 4.8.

Figura 4.8: Carga térmica interna por fonte de calor.



Fonte: Próprio autor.

#### 4.2.2.3 Carga térmica total

A carga térmica total de cada ambiente é soma entre a carga térmica externa e a carga térmica interna. A Tabela 4.10 apresenta a carga térmica externa, interna e total para cada ambiente do edifício na situação atual.

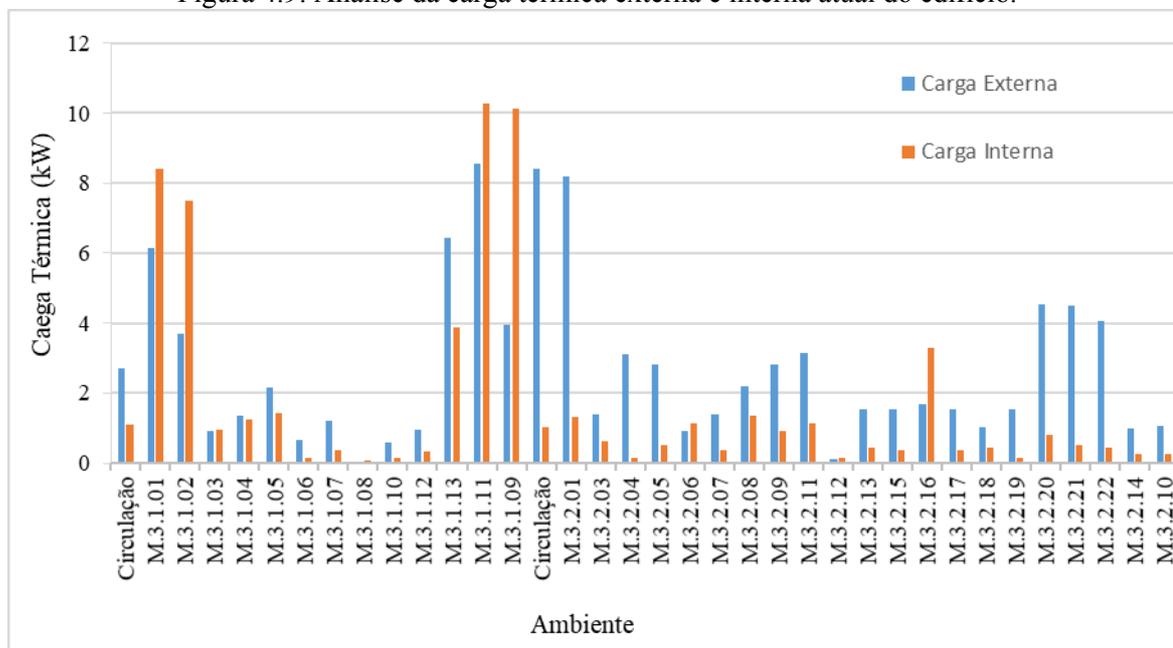
Tabela 4.10: Carga térmica total para cada ambiente e a carga térmica total do edifício.

Ambiente	Carga Externa (kW)	Carga Interna (kW)	Carga total (kW)
Circulação	2,71	1,11	3,83
M.3.1.01	6,13	8,42	14,55
M.3.1.02	3,70	7,51	11,21
M.3.1.03	0,91	0,96	1,87
M.3.1.04	1,35	1,23	2,58
M.3.1.05	2,14	1,43	3,57
M.3.1.06	0,66	0,16	0,82
M.3.1.07	1,22	0,36	1,58
M.3.1.08	0,02	0,08	0,10
M.3.1.10	0,60	0,16	0,76
M.3.1.12	0,95	0,32	1,27
M.3.1.13	6,43	3,89	10,32
M.3.1.11	8,54	10,28	18,82
M.3.1.09	3,93	10,13	14,06
Circulação	8,42	1,03	9,46
M.3.2.01	8,17	1,31	9,49
M.3.2.03	1,38	0,64	2,02
M.3.2.04	3,11	0,15	3,26
M.3.2.05	2,81	0,50	3,32
M.3.2.06	0,92	1,15	2,08
M.3.2.07	1,40	0,35	1,75
M.3.2.08	2,19	1,36	3,54
M.3.2.09	2,80	0,92	3,71
M.3.2.11	3,14	1,12	4,25
M.3.2.12	0,11	0,16	0,27
M.3.2.13	1,54	0,44	1,97
M.3.2.15	1,53	0,36	1,89
M.3.2.16	1,67	3,30	4,97
M.3.2.17	1,53	0,36	1,89
M.3.2.18	1,01	0,44	1,45
M.3.2.19	1,53	0,15	1,68
M.3.2.20	4,54	0,79	5,33
M.3.2.21	4,51	0,52	5,03
M.3.2.22	4,04	0,44	4,47
M.3.2.14	0,97	0,24	1,21
M.3.2.10	1,06	0,24	1,30
<b>TOTAL</b>	<b>97,68</b>	<b>62,01</b>	<b>159,69</b>

Fonte: Próprio autor.

A Figura 4.9 apresenta uma análise da carga térmica externa e interna do edifício atual.

Figura 4.9: Análise da carga térmica externa e interna atual do edifício.



Fonte: Próprio autor.

Ao comparar, por exemplo, a carga térmica dos corredores nos diferentes níveis, os valores do corredor do nível superior são maiores devido à existência de iluminação zenital, que possibilita a entrada direta da luz natural e junto com ela o calor. Nas salas de aula M3.1.09, M3.1.11 e nos laboratórios M3.1.01, M3.1.02, M3.1.03, a carga térmica interna é maior que a externa, evidenciando pouca ventilação natural, o que sugere um aumento na área das janelas, ou algum outro mecanismo de ventilação natural para melhorar e criar o efeito de ventilação cruzada. Em outros casos como os laboratórios M3.1.04, M3.2.03, M3.2.04, M3.2.05, M3.2.07, a carga térmica exterior é superior, o que sugere a necessidade de alguma proteção solar para bloquear o contato direto das superfícies externas com os raios do sol.

### 4.2.3 Classificação do nível de eficiência energética para a envoltória do edifício atual adotando o RTQ-C

Para o cálculo do RTQ- C (ELETROBRÁS/PROCEL, 2013) são necessários alguns dados do edifício que foram levantados a partir das plantas arquitetônicas digitais da edificação, conforme a Tabela 4.11 e conforme identificadas na Figura 4.10. Os pré-requisitos específicos da envoltória (transmitâncias térmicas, cores e absorvância de superfícies e

iluminação zenital) foram levados para considerar no cálculo pelo *WebPrescritivo* (LABEEEE, 2018). A avaliação limitou-se às variáveis construtivas que influenciam nos indicadores de consumo da envoltória.

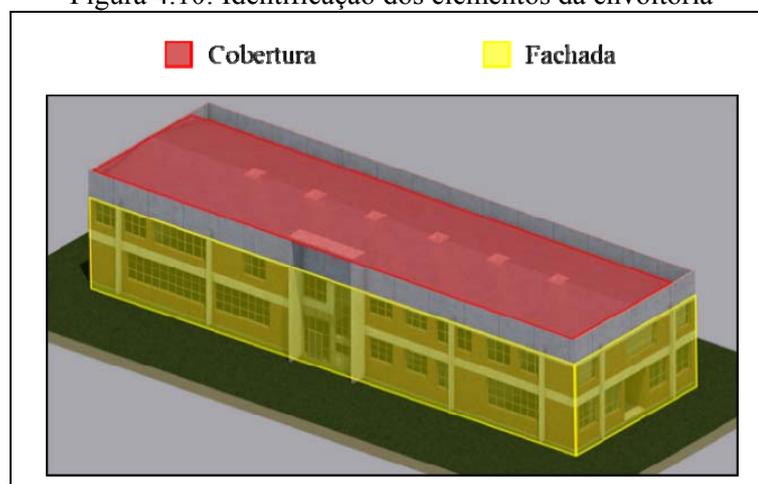
Para o cálculo do  $IC_{env}$  são necessários os dados numéricos obtidos através da caracterização do prédio.

Tabela 4.11: Dados gerais para cálculo do RTQ-C.

Dados	Valores
$A_{pcob}$ (Área de projeção da cobertura)	737,6 m <sup>2</sup>
Pé direito	8,1 m
$V_{tot}$ (Volume total da edificação)	5974,9 m <sup>3</sup>
Perímetro	127,5 m
Área da fachada	1032,8 m <sup>2</sup>
$A_{pe}$ (Área de projeção do edifício)	737,6 m <sup>2</sup>
$A_{tot}$ (Área total construída)	1475,3 m <sup>2</sup>
$A_{env}$ (Área da envoltória)	1770,4 m <sup>2</sup>

Fonte: Próprio autor.

Figura 4.10: Identificação dos elementos da envoltória



Fonte: Próprio autor.

- Cálculo do Fator Forma (FF)

Para área de projeção da cobertura maior que 500 m<sup>2</sup> ( $A_{pe} > 500$  m<sup>2</sup>) o valor mínimo de  $FF$  é igual a 0,30, valor resultante da Equação 4.1 usando os valores da Tabela 11.

$$FF = \frac{A_{env}}{V_{tot}} = \frac{1770,40}{5974,9} = 0,3 \quad \text{Equação (4.1)}$$

- Cálculo do Fator de Altura (FA)

Para o cálculo do *FA* utilizou-se a Equação 4.2 e os dados da Tabela 4.11. O valor de *FA* encontrado foi de 0,50.

$$FA = \frac{A_{prob}}{A_{tot}} = \frac{737,60}{1475,30} = 0,50 \quad \text{Equação (4.2)}$$

- Identificação do Fator Solar (FS)

Para o *FS* utilizou-se o Decreto Lei que aprova o Sistema de Certificação Energética dos Edifícios, assim como o Regulamento de Desempenho Energético em Edifícios de Habitação, Comércio e Serviços DL 118/2013 relativos ao desempenho energético em edificações. Assim, utilizou-se *FS* = 0,88 (ITECONS, 2013).

- Identificação do Ângulo Vertical de Sombreamento (AVS)

Como o edifício em estudo não possui nenhum tipo de proteção horizontal, considera-se o *AVS* = 0.

- Identificação do Ângulo Horizontal de Sombreamento (AHS)

Para o *AHS* foi considerado o elemento vertical das colunas que o edifício possui nas fachadas, as quais fornecem uma proteção solar nas aberturas adjacentes a elas. O cálculo foi realizado através de uma média simples dos ângulos das proteções solares nos lados de cada janela do prédio. Logo o *AHS* = 4,6°.

- Cálculo do Percentual de Abertura na Fachada Oeste (PAFo)

O Percentual de Abertura na Fachada Oeste foi é o resultado da razão entre a Área de Abertura da Fachada Oeste ( $A_{afO}$ ) pela Área da Fachada Oeste ( $A_{fo}$ ). Sendo a  $A_{afO}$  41,6 m<sup>2</sup> e  $A_{fo}$  125,7 m<sup>2</sup>, o valor encontrado para o PAFO, de acordo com a Equação 4.3, foi de 0,33.

$$PAFO = \frac{A_{afO}}{A_{fo}} = \frac{41,6}{125,7} = 0,33 \quad \text{Equação (4.3)}$$

- Cálculo do Percentual de Abertura na Fachada total (PAF<sub>t</sub>)

Para o cálculo de PAF<sub>t</sub>, utiliza-se a Equação 4.4 com os valores levantados na Tabela 4.11.

$$PAFt = \frac{A_{ab}}{A_{tf}} = \frac{303,8}{911,11} = 0,29 \quad \text{Equação (4.4)}$$

OBS.: Escolha entre PAF<sub>t</sub> e PAFO.

**PAF<sub>t</sub> = 29 %**

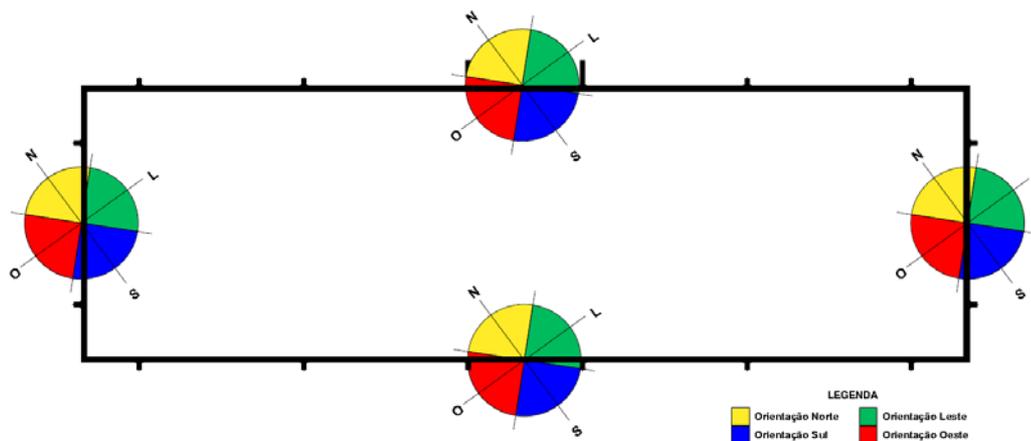
**PAFO = 33 %**

Se o PAFO for pelo menos 20 % maior que o PAF<sub>t</sub>, deve-se adotar o PAFO na equação. Neste caso **PAF<sub>t</sub> = 29 %**.

- Orientação solar

A orientação solar das fachadas do edifício foi obtida através dos projetos arquitetônicos e confirmadas pelo Google Earth. Para a definição da orientação das fachadas, tomou-se como referência o procedimento estabelecido no RTQ-C conforme se observa na Figura 4.11.

Figura 4.11: Orientação o edifício segundo o RTQ-C.



Fonte: próprio autor.

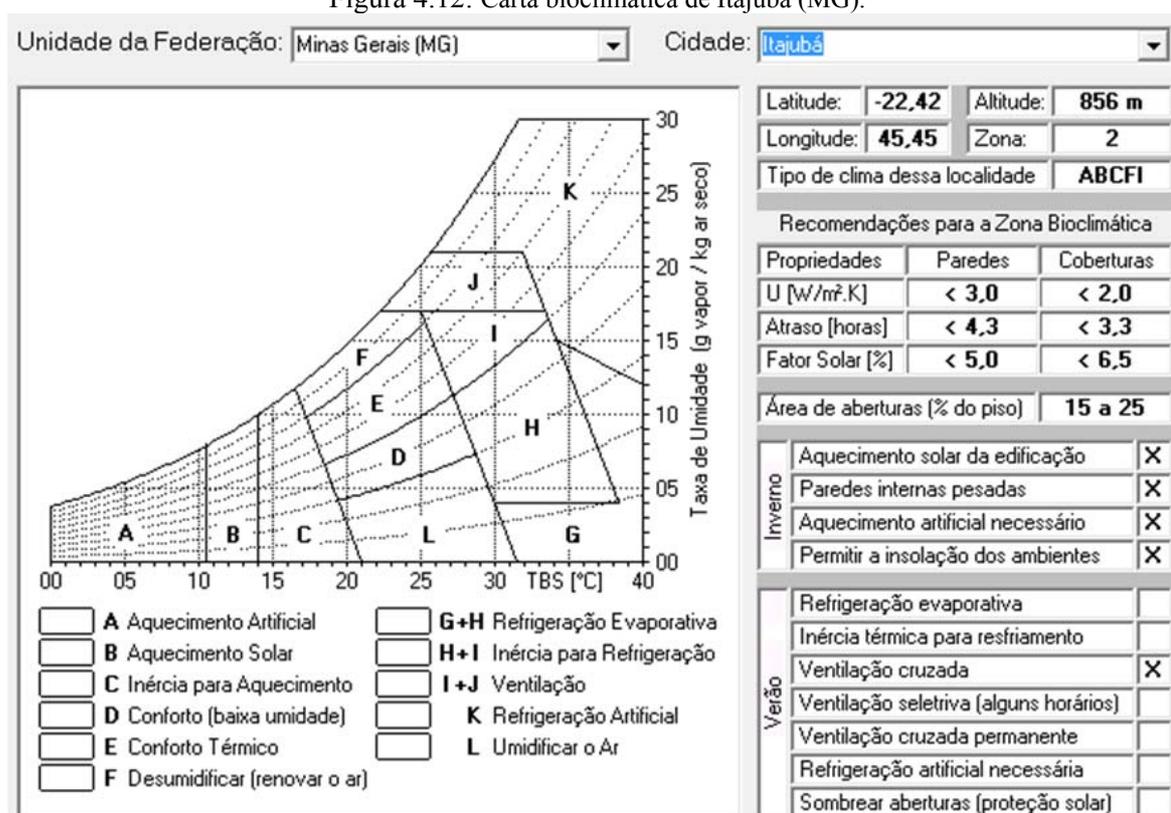
- Determinação da zona bioclimática da área de projeção e do fator de forma da edificação

A ABNT NBR 15.220 – 3 (ABNT, 2005) estabelece o zoneamento bioclimático brasileiro e indica quais equações deverão ser utilizadas para o cálculo da eficiência da envoltória. O RTQ-C apresenta duas equações por zona bioclimática, de acordo com a área do edifício: uma representando edifícios com área de projeção ( $A_{pe}$ ) menor ou igual a 500 m<sup>2</sup> e outra para edifícios com área de projeção ( $A_{pe}$ ) maior que 500 m<sup>2</sup>.

As equações para  $A_{pe} > 500$  m<sup>2</sup> são válidas para um fator de forma mínimo permitido ( $A_{env}/V_{tot}$ ). As equações para  $A_{pe} \leq 500$  m<sup>2</sup> são válidas para um fator de forma máximo permitido ( $A_{env}/V_{tot}$ ). Acima ou abaixo destes, usam-se os valores-limite.

Com a caracterização climática de Itajubá – MG realizada com dados climáticos fornecidos pela estação meteorológica da UNIFEI, aplicados ao programa ZBBR (Zoneamento Bioclimático do Brasil - Classificação bioclimática das sedes dos municípios brasileiros e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social) e conforme a ABNT NBR 15220 – 3, Itajubá se encontra na Zona Bioclimática 2, como apresentado na Figura 4.12.

Figura 4.12: Carta bioclimática de Itajubá (MG).



Fonte: (ZBBR, 2004).

- Determinação do indicador de consumo máximo e mínimo da envoltória

O indicador de consumo máximo  $IC_{\max}D$  é calculado com a mesma equação que calcula o indicador de consumo da envoltória, porém com os parâmetros de entrada fornecidos pelo RTQ-C de acordo com a Tabela 4.12 que indica o máximo que a edificação deve atingir para obter uma classificação. Para o  $IC_{\min}$  aplica-se também a mesma equação, porém com parâmetros de entrada, também fornecidos pelo RTQ-C, conforme Tabela 4.12, que indicam o mínimo de consumo para a volumetria.

Tabela 4.12: Limites de intervalos dos níveis de eficiência.

Eficiência	A	B	C	D	E
Lim. Mín.	-	129,9	136,6	143,3	150,0
Lim. Máx.	129,9	136,6	143,3	150,0	-

Fonte: próprio autor.

- Determinação do indicador de consumo da envoltória ( $IC_{env}$ )

O indicador de consumo da envoltória ( $IC_{env}$ ) é definido pelas equações que constam no RTQ-C. O edifício objeto deste estudo está localizado na zona bioclimática 2 (Itajubá), cuja equação para cálculo do  $IC_{env}$ , Equação 4.5, é a específica para área de projeção  $A_{pe} > 500 \text{ m}^2$ .

$$IC_{env} = -14,14FA - 113,94FF + 50,82PAFt + 4,86FS - 0,32AVS + 0,26AHS - 35,75FF - 0,54PAFt * AHS + 277,98$$

Equação (4.5)

O edifício caso de estudo, sem os pré-requisitos conforme Fossati e Lamberts (2010) adotaram em seu estudo, apresentou uma classificação **B** para a envoltória conforme mostra a Tabela 4.13.

Tabela 4.13: Indicador de consumo da envoltória ( $IC_{env}$ ).

Eficiência	A	B	C	D	E
$IC_{env}$	-	135,93	-	-	-
Classificação gráfica	A	B	C	D	E

Fonte: Próprio autor.

Porém, a avaliação com os pré-requisitos para a envoltória e usando o *WebPrescritivo* (LABEEE, 2018) resultou em uma classificação **C**, conforme Figura 4.13.

Figura 4.13: Avaliação com os pré-requisitos para a envoltória utilizando o Web Prescritivo.

The screenshot shows the 'Envoltória' (Envelope) evaluation interface. It includes sections for 'Localização' (Location), 'Pré-requisitos' (Pre-requisites), 'Dados Dimensionais da Edificação' (Dimensional Data of the Building), and 'Características das Aberturas' (Opening Characteristics). The 'Pré-requisitos' section is checked, and the 'Dados Dimensionais' section shows values for A\_TOT (1475.3 m²), A\_PCOB (737.6 m²), A\_PE (737.6 m²), V\_TOT (5974.9 m³), and A\_ENV (1770.4 m²). The 'Características das Aberturas' section shows values for FS (0.8), PAF\_T (29%), PAF\_O (33%), AVS (0°), and AHS (4.6°). At the bottom, there is a bar chart showing the efficiency classification as 'C' (yellow).

Fonte: Próprio autor.

Observa-se que é fundamental para a classificação do nível de eficiência da envoltória considerar os pré-requisitos, demonstrando assim a realidade da envoltória.

#### 4.2.4 Ventilação natural

A velocidade do vento externo calculada foi de 0,3 m/s. A Tabela 4.14 apresenta o resultado do fluxo de ar ( $Q_w$ ) no interior do edifício nos diferentes ambientes que apresentam ventilação cruzada para os ângulos de incidência de 0° e 45°.

Tabela 4.14: Fluxo de ar dos ambientes do edifício estudado que apresentam ventilação cruzada para os ângulos de incidência de 0° e 45°.

Ambientes	$Q_w$ (m <sup>3</sup> /s)	
	0°	45°
Circulação térreo	0,4	0,3
M.3.1.13	0,2	0,1
M.3.1.11	0,1	0,0
M.3.2.01	0,2	0,2
M.3.2.20	0,1	0,1
M.3.2.21	0,1	0,0

Fonte: Próprio autor.

Os resultados do fluxo de ar ( $Q_w$ ) dos ambientes com abertura unilateral estão apresentadas na Tabela 4.15.

Tabela 4.15: Fluxo de ar dos ambientes do edifício estudado com abertura unilateral.

<b>Espaços</b>	<b><math>Q_w</math> (m<sup>3</sup>/s) para 0° e 45°</b>
M.3.1.01	0,023
M.3.1.02	0,022
M.3.1.03	0,004
M.3.1.04	0,010
M.3.1.05	0,007
M.3.1.07	0,006
M.3.1.12	0,004
M.3.1.09	0,010
M.3.2.04	0,013
M.3.2.05	0,013
M.3.2.06	0,007
M.3.2.08	0,007
M.3.2.09	0,013
M.3.2.11	0,014
M.3.2.13	0,007
M.3.2.15	0,007
M.3.2.16	0,011
M.3.2.17	0,007
M.3.2.18	0,007
M.3.2.19	0,007
M.3.2.22	0,010

Fonte: Próprio autor.

Neste trabalho não foi analisado a influência da fonte interna de calor no cálculo da ventilação de cada ambiente. O cálculo foi elaborado para uma análise da situação que se encontra cada ambiente em relação a taxa de fluxo de ar, servindo como uma informação para avaliar quais ambientes necessitam de maior ventilação para melhorar o conforto térmico dos ocupantes e consequentemente determinar que ação pode ser tomada em relação à ventilação natural para melhorar a eficiência do edifício.

#### 4.2.5 Conclusões parciais

Foi realizado o levantamento do edifício estudado com ênfase nas áreas que o conformam, nos materiais da envoltória, nos equipamentos elétricos instalados no interior dos ambientes e no tipo e uso de cada espaço. Foram encontradas as seguintes questões:

**Pontos positivos:**

- Uso da iluminação zenital no corredor superior;
- Uso de proteção solar em algumas janelas causada pela saliência dos pilares na fachada;
- Pé-direito alto no primeiro pavimento;
- Existência de dois acessos opostos no corredor do primeiro pavimento que favorece a ventilação cruzada tornando o ambiente mais confortável termicamente.

**Pontos negativos:**

- A maioria dos ambientes não possui ventilação cruzada;
- A aplicação das cortinas bloqueou o uso da iluminação natural;
- A aplicação adotada para a iluminação zenital no corredor do segundo pavimento propicia o aumento da carga térmica;
- A orientação do prédio não favorece o conforto térmico em seu interior;
- Os materiais usados na envoltória não favorecem o conforto dentro do prédio.

Foi executado o cálculo da carga térmica a partir dos dados levantados do edifício no estado atual com o objetivo de avaliar o comportamento térmico em cada ambiente. A carga térmica foi usada como uma ferramenta eficiente para verificar o comportamento do edifício e detectar os ambientes que necessitam de alguma intervenção arquitetônica para melhorar o conforto interno e redução de consumo de eletricidade.

Aplicou-se o RTQ-C no método prescritivo para obter o nível de eficiência energética da envoltória do edifício. Este cálculo resultou no nível *C* de eficiência energética da envoltória (em razão dos materiais) no entanto para ser considerado um EEZ, deve-se atingir o nível *A*.

### **4.3 Aplicação de estratégias passivas para redução da carga térmica e melhoria da eficiência energética**

A seguir serão apresentados os resultados da aplicação de estratégias passivas utilizadas para a redução do consumo de energia do edifício em estudo.

### 4.3.1 Aplicação das estratégias de condicionamento térmico para Zona Bioclimática 2

Baseado na carta Bioclimática apresentada na Figura 4.12 e nas diretrizes da ABNT NBR 15.220 – 3 adotaram-se neste projeto estratégias de condicionamento térmico para Zona Bioclimática 2, que serão descritas a seguir.

#### 4.3.1.1 Aberturas para ventilação e sombreamento das aberturas

Para as aberturas optou-se por manter os vãos das aberturas externas existentes praticamente em todos os ambientes exceto nas salas M 3.1.01 e M 3.1.02 do pavimento térreo, onde foram acrescentadas novas aberturas. Em todas as aberturas foram colocados protetores solares horizontais fixos (brises) para sombreamento nas mesmas sem obstruir a entrada de sol durante o inverno. Os brises colocados nas aberturas são de alumínio anodizado cor natural, em forma de asa de avião de 25 cm e 3 cm de espessura. Implantados com um afastamento das janelas para que as mesmas possam promover uma abertura de 30°.

Para o verão adoção de ventilação cruzada nos ambientes os quais não possuem este tipo de ventilação. Optou-se por criar aberturas nas paredes adjacentes aos corredores internos para aproveitar o fluxo de ar dos mesmos, criando assim uma ventilação mais eficiente. Os resultados podem ser observados na Tabela 4.16. O cálculo da ventilação para o edifício otimizado segue a mesma metodologia utilizada no diagnóstico. Para o Inverno não foi adotado nenhum tipo de estratégia passiva, pois o período mais frio do ano em Itajubá coincide com as férias acadêmicas.

#### 4.3.1.2 Tipos de vedações externas

Nas paredes externas optou-se por aplicar um isolante térmico e sobrepor com uma cerâmica branca fixada em perfis de alumínio no conceito de “*fachada ventilada*”<sup>24</sup>, porém sem câmara de ar entre as camadas conforme ilustra a Figura 4.14.

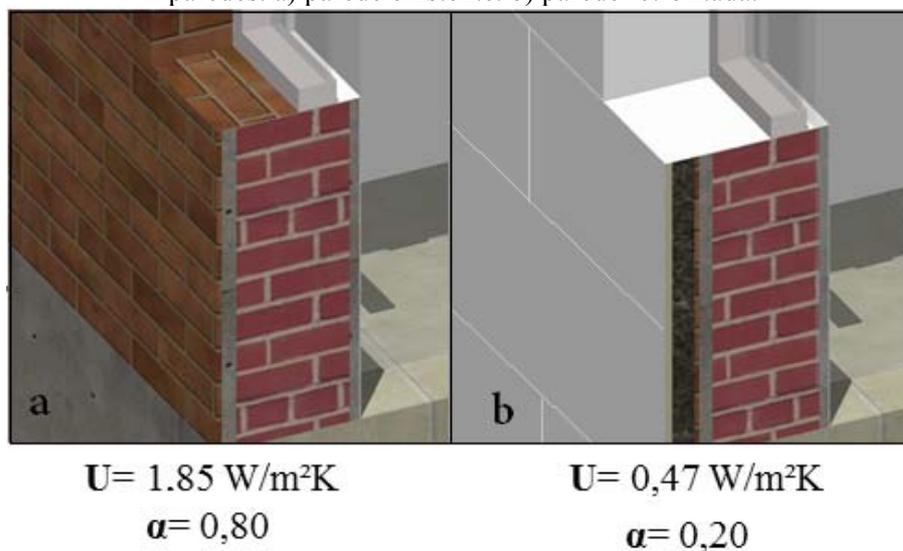
Considerou neste estudo uma parede dupla de tijolos furados, com argamassa, revestimento cerâmico existente, isolante térmico e placas de porcelanato de 600x1200 mm. A transmitância térmica do sistema de fachada ventilada (U em W/m<sup>2</sup> K) foi calculado

---

<sup>24</sup> Fachada ventilada é um termo que designa um sistema de proteção e revestimento exterior de edifícios. Nesta solução, os materiais de acabamento estão afastados da parede do edifício resultando numa câmara onde o ar se movimentava livremente

conforme os itens 4 a 7 da ABNT NBR 15.220 – 2. Resultando assim para a parede externa retrofitada uma transmitância térmica de  $U=0,47 \text{ W/m}^2\text{K}$  e absorptância cor branca  $\alpha=0,20$ .

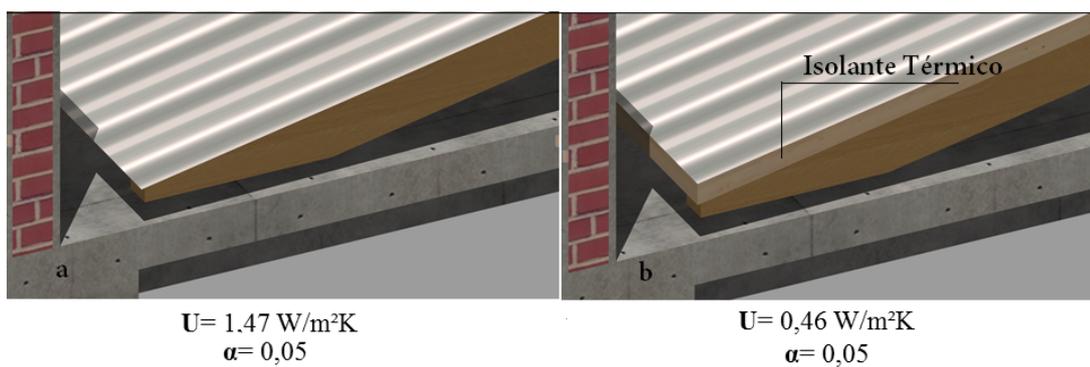
Figura 4.14: Variação da transmitância térmica e da absorptância em função das características das paredes: a) parede existente. b) parede retrofitada.



Fonte: Próprio autor.

Para a cobertura aplicou um isolamento térmico leve (poliestireno extrudado de 5 cm) sobre as telhas de zinco e manteve-se a câmara existente de ar de 10 cm, conforme demonstrado na Figura 4.15.

Figura 4.15: Variação da transmitância térmica e da absorptância em função das características da cobertura: a) cobertura existente. b) cobertura com aplicação de isolante térmico.



Fonte: Próprio autor.

### 4.3.2 Carga térmica externa do edifício otimizado

O resultado da carga térmica obtido no diagnóstico do edifício orientou quais ações seriam importantes para a redução da mesma.

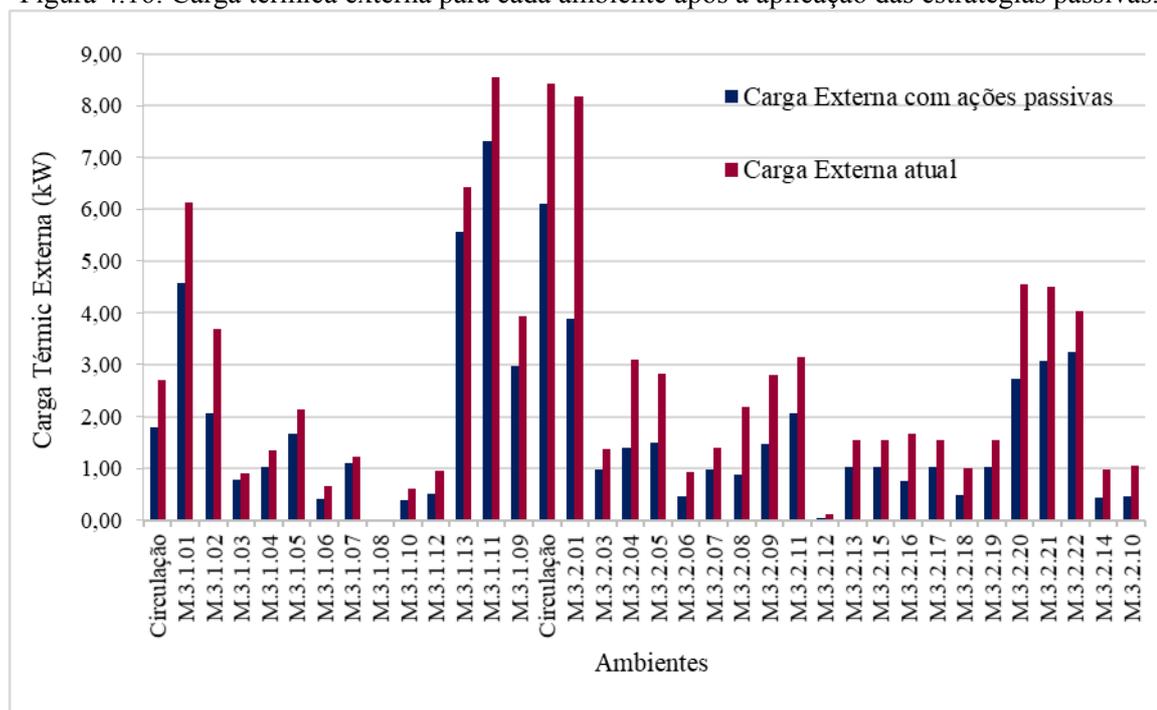
Nesta etapa foram consideradas as ações passivas (brises nas aberturas das janelas) e os materiais da envoltória, que foram alterados conforme o item 4.3.1. Os valores dos coeficientes globais de transferência de calor foram obtidos conforme a ABNT NBR 15.220.

Foi mantido a mesma data e horário: o dia 17 de outubro de 2015 e o horário das 14:50, e também foi considerado apenas as fachadas NO e SO que possuem insolação no horário de estudo. Seguiu-se a mesma metodologia de Venturini (2013).

As ações passivas adotadas possibilitaram uma redução considerável na carga térmica externa do edifício, que foi de 97,68 kW/h (edifício atual) para 65,28 kW/h (edifício otimizado), correspondendo a uma redução de 33 % na carga térmica do edifício.

O gráfico da Figura 4.16 apresenta uma comparação entre a carga térmica externa do edifício atual e após a aplicação das estratégias passivas (edifício otimizado).

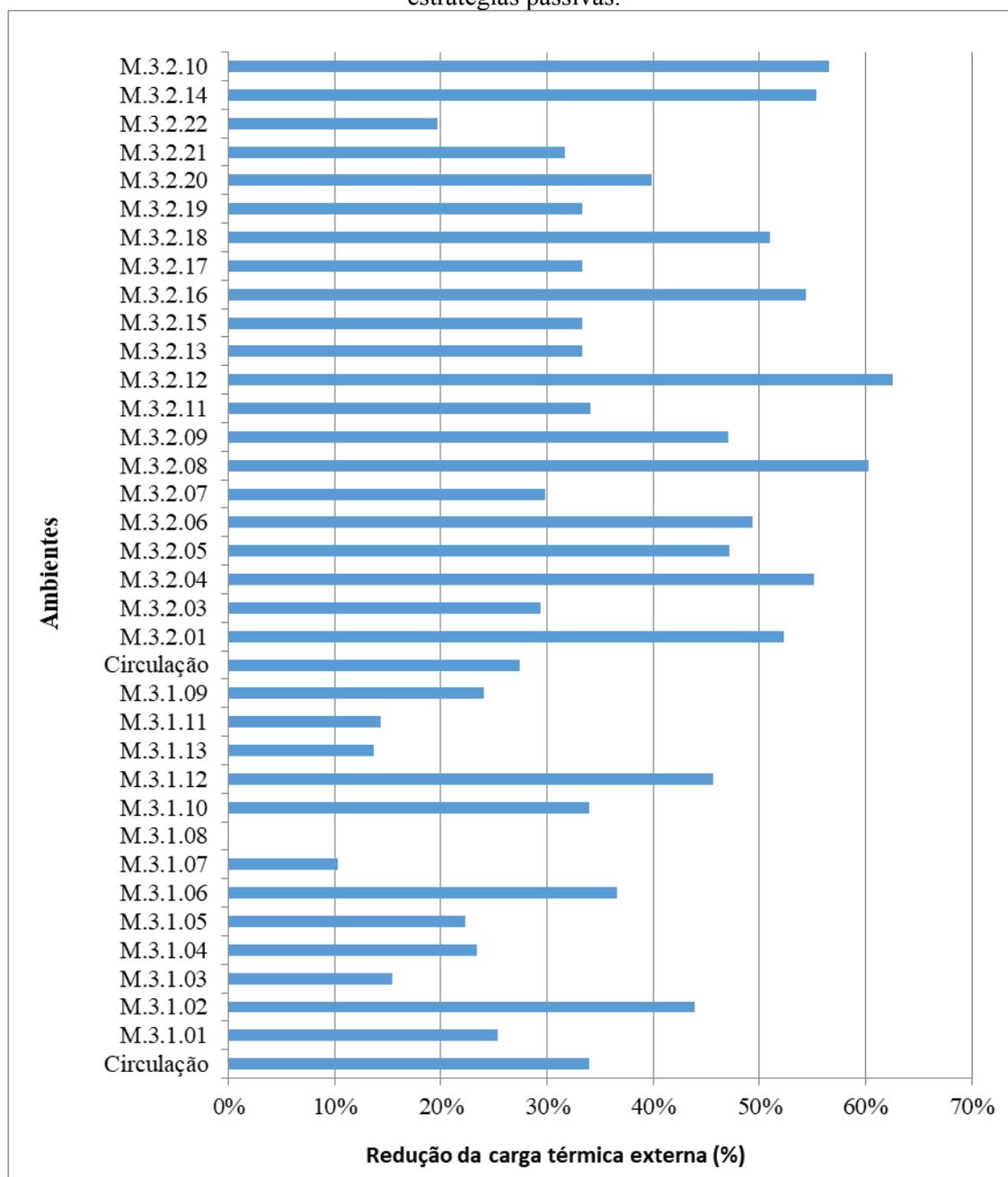
Figura 4.16: Carga térmica externa para cada ambiente após a aplicação das estratégias passivas.



Fonte: Próprio autor.

A seguir, na Figura 4.17, observa-se a porcentagem de redução da carga térmica externa de cada ambiente após a aplicação das estratégias passivas. Estes resultados demonstram que, no horário definido neste estudo, os brises e os elementos da envoltória influenciam diretamente na carga térmica externa em um edifício.

Figura 4.17: Porcentagem de redução da carga térmica externa de cada ambiente após a aplicação das estratégias passivas.



Fonte: Próprio autor.

### 4.3.3 Classificação do nível de eficiência energética para a envoltória após aplicação de estratégias passivas adotando o RTQ-C

Seguiu-se a mesma metodologia utilizada no diagnóstico para o cálculo da RTQ-C do edifício para a envoltória, mas com a aplicação dos brises nas aberturas e a adoção dos novos parâmetros para a cobertura ( $U = 0,46 \text{ W/m}^2\text{K}$  e absorvância cor branca,  $\alpha = 0,05$ ) e para as paredes ( $U = 0,47 \text{ W/m}^2\text{K}$  e absorvância cor branca  $\alpha = 0,20$ ). As aberturas foram mantidas nas

dimensões existentes e os brises colocados a um espaçamento de 13 cm entre eles.

O resultado do nível de eficiência da envoltória do edifício (calculados pelo *WebPrescritivo*) resultou no nível B de eficiência energética, como apresentado na Figura 4.18.

Figura 4.18: Resultado do nível de eficiência energética da envoltória do edifício após aplicação das estratégias passivas.

The screenshot shows the 'Envoltória' (Envelope) configuration window. It includes fields for location (Zona Bioclimática ZB 2, Cidade Itajubá MG), prerequisites (U<sub>COB-AC</sub>, U<sub>COB-ANC</sub>, U<sub>PAR</sub>, PAZ, α<sub>COB</sub>, CT<sub>PAR</sub>, α<sub>PAR</sub>, FS), dimensional data (A<sub>TOT</sub>, A<sub>PCOB</sub>, A<sub>PE</sub>, V<sub>TOT</sub>, A<sub>ENV</sub>), and opening characteristics (FS, PAF<sub>T</sub>, PAF<sub>O</sub>, AVS, AHS). The efficiency level is indicated by a green bar with the letter 'B'.

Pré-requisitos		Dados Dimensionais da Edificação		Características das Aberturas	
U <sub>COB-AC</sub>	0.46 W/(m <sup>2</sup> K)	A <sub>TOT</sub>	1475.3 m <sup>2</sup>	FS	0.8
U <sub>COB-ANC</sub>	0.46 W/(m <sup>2</sup> K)	A <sub>PCOB</sub>	737.6 m <sup>2</sup>	PAF <sub>T</sub>	29 %
U <sub>PAR</sub>	0.47 W/(m <sup>2</sup> K)	A <sub>PE</sub>	737.6 m <sup>2</sup>	PAF <sub>O</sub>	33 %
PAZ	0 %	V <sub>TOT</sub>	5944.9 m <sup>3</sup>	AVS	0 °
α <sub>COB</sub>	5 %	A <sub>ENV</sub>	1770.4 m <sup>2</sup>	AHS	4.6 °
CT <sub>PAR</sub>	0 kJ/(m <sup>2</sup> K)				
α <sub>PAR</sub>	20 %				
FS	0				

Fonte: Próprio autor.

No entanto, para um edifício ser considerado EEZ, deve ter o máximo de eficiência energética. Diante deste resultado encontrado acima, outras ações na envoltória do edifício foram tomadas para que fosse alcançado o nível de eficiência energética A.

A ação escolhida para melhorar o nível de eficiência no edifício foi reduzir as dimensões das aberturas nas partes fixas de modo que diminuísse a entrada de calor por essas superfícies translúcidas sem prejudicar a ventilação do pavimento inferior. O que possibilitou atingir o nível A de eficiência energética conforme demonstra Figura 4.19.

Figura 4.19: Resultado do nível de eficiência energética da envoltória do edifício após redução nas dimensões das aberturas.

The screenshot shows the 'Envoltória' (Envelope) configuration window with the same parameters as Figure 4.18, but with updated opening characteristics. The efficiency level is now indicated by a green bar with the letter 'A'.

Pré-requisitos		Dados Dimensionais da Edificação		Características das Aberturas	
U <sub>COB-AC</sub>	0.46 W/(m <sup>2</sup> K)	A <sub>TOT</sub>	1475.3 m <sup>2</sup>	FS	0.8
U <sub>COB-ANC</sub>	0.46 W/(m <sup>2</sup> K)	A <sub>PCOB</sub>	737.6 m <sup>2</sup>	PAF <sub>T</sub>	16 %
U <sub>PAR</sub>	0.47 W/(m <sup>2</sup> K)	A <sub>PE</sub>	737.6 m <sup>2</sup>	PAF <sub>O</sub>	17 %
PAZ	0 %	V <sub>TOT</sub>	5944.9 m <sup>3</sup>	AVS	0 °
α <sub>COB</sub>	5 %	A <sub>ENV</sub>	1770.4 m <sup>2</sup>	AHS	4.6 °
CT <sub>PAR</sub>	0 kJ/(m <sup>2</sup> K)				
α <sub>PAR</sub>	20 %				
FS	0				

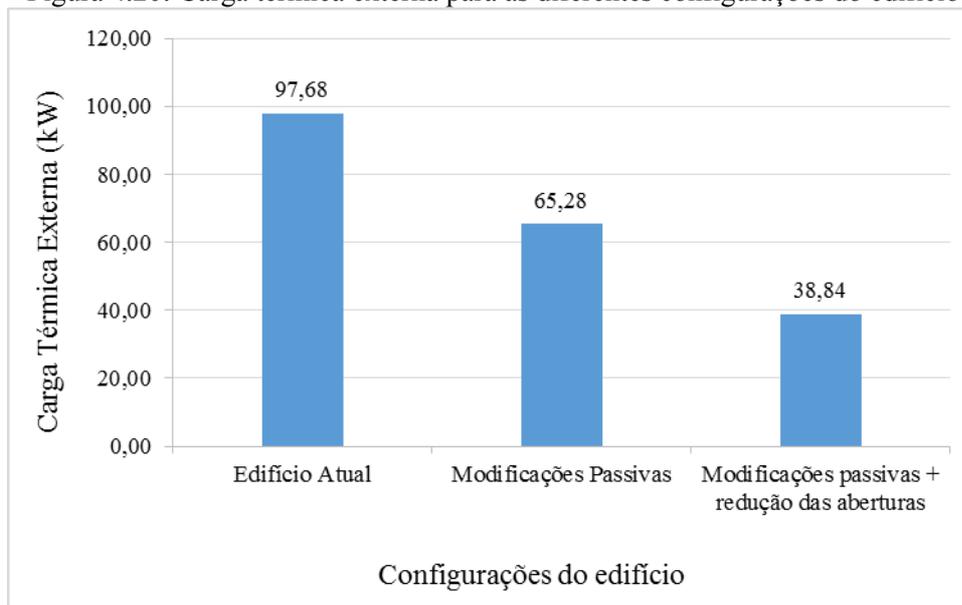
Fonte: Próprio autor.

As ações não somente alteraram o nível de eficiência e a carga térmica do edifício. A ventilação não foi afetada com a diminuição das janelas, pois a área de contribuição da abertura, é a mesma.

#### 4.3.4 Carga térmica externa com aberturas modificadas

Com a redução nas dimensões das aberturas do edifício, a carga térmica teve que ser novamente calculada e resultou em 38,84 kW. Os resultados do cálculo da carga térmica externa para as diferentes configurações do edifício é apresentada na Figura 4.20.

Figura 4.20: Carga térmica externa para as diferentes configurações do edifício



Fonte: Próprio autor.

#### 4.3.5 Ventilação natural

Com as ações passivas, com as janelas que foram acrescentadas e com a criação de uma ventilação cruzada nos ambientes de longa permanência obteve-se um fluxo de ar mais eficientes.

A concepção arquitetônica foi criar aberturas nas paredes opostas às fachadas que recebem ventilação. Estas aberturas ficaram voltadas para os corredores centrais, os quais já possuem uma ventilação cruzada na concepção atual do edifício. Porém, no corredor do pavimento superior foram aumentadas as aberturas zenitais existentes, mas não foram consideradas neste cálculo de ventilação.

Para o cálculo da ventilação natural após aplicação das estratégias passivas foi realizado seguindo a mesma metodologia adotada para o diagnóstico do edifício atual. Também foram considerados os mesmo parâmetros adotados no diagnóstico do edifício atual.

Porém nesta etapa, os cálculos foram efetuados para os ambientes onde criou-se uma ventilação cruzada. Os demais ambientes que já possuíam ventilação cruzada foram mantidos

os valores obtidos no diagnóstico do edifício atual. Também não foi considerado nesta fase a influência da fonte interna de calor no cálculo da ventilação de cada ambiente.

Os resultados apresentados na Tabela 4.16 e na Figura 4.21 mostraram um aumento no fluxo de ar nos ambientes com a criação de uma ventilação cruzada.

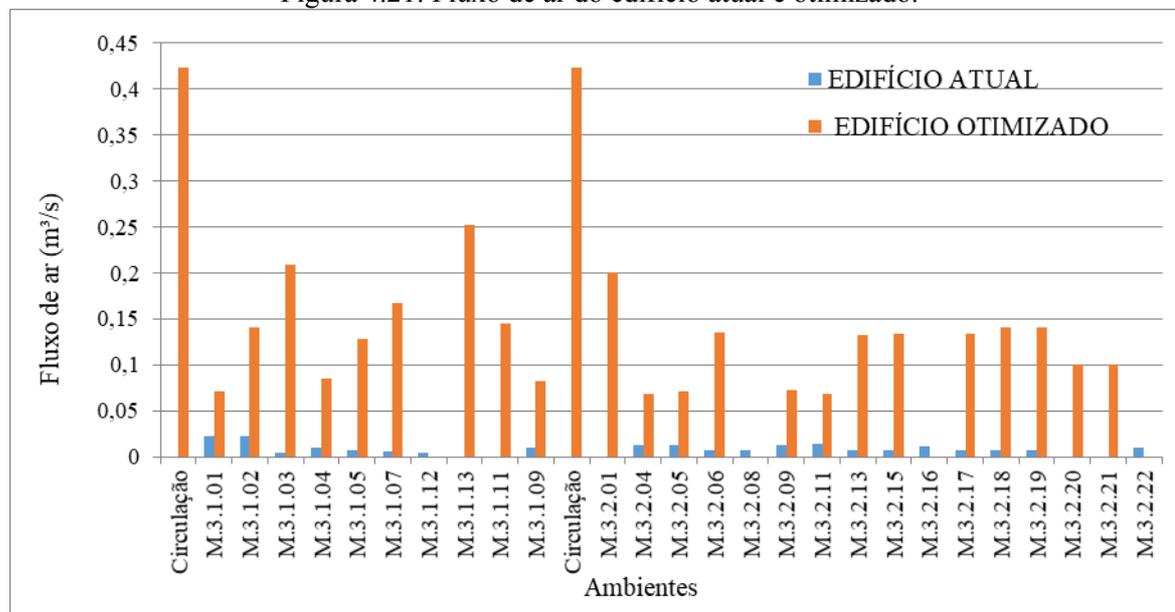
Tabela 4.16: Fluxo de ar do edifício atual e após modificações nas aberturas.

Ambientes	Edifício atual				Edifício otimizado	
	Ventilação unilateral		Ventilação cruzada		Ventilação cruzada	
	Q(m <sup>3</sup> /s) - 0°	Q(m <sup>3</sup> /s) - 45°	Q(m <sup>3</sup> /s) - 0°	Q(m <sup>3</sup> /s) - 45°	Q(m <sup>3</sup> /s) - 0°	Q(m <sup>3</sup> /s) - 45°
Circulação	0	0	<b>0,42</b>	<b>0,25</b>	0,42	0,25
M.3.1.01	0,023	0,023	0	0	0,071	0,071
M.3.1.02	0,022	0,022	0	0	0,140	0,036
M.3.1.03	0,004	0,004	0	0	0,209	0,152
M.3.1.04	0,01	0,01	0	0	0,085	0,062
M.3.1.05	0,007	0,007	0	0	0,128	0,093
M.3.1.07	0,006	0,006	0	0	0,168	0,122
M.3.1.12	0,004	0,004	0	0	0,000	0,000
M.3.1.13	0	0	<b>0,2</b>	<b>0,3</b>	0,253	0,338
M.3.1.11	0	0	<b>0,1</b>	<b>0</b>	0,145	0,033
M.3.1.09	0,01	0,01	-	-	0,082	0,060
Circulação	0	0	<b>0,42</b>	<b>0,25</b>	0,42	0,25
M.3.2.01	0	0	<b>0,2</b>	<b>0,2</b>	0,20	0,20
M.3.2.04	0,013	0,013	0	0	0,068	0,049
M.3.2.05	0,013	0,013	0	0	0,072	0,052
M.3.2.06	0,007	0,007	0	0	0,136	0,099
M.3.2.08	0,007	0,007	0	0	0	0
M.3.2.09	0,013	0,013	0	0	0,072	0,052
M.3.2.11	0,014	0,014	0	0	0,068	0,049
M.3.2.13	0,007	0,007	0	0	0,133	0,096
M.3.2.15	0,007	0,007	0	0	0,133	0,097
M.3.2.16	0,011	0,011	0	0	0	0
M.3.2.17	0,007	0,007	0	0	0,134	0,097
M.3.2.18	0,007	0,007	0	0	0,141	0,102
M.3.2.19	0,007	0,007	0	0	0,141	0,102
M.3.2.20	0	0	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>	0,10	0,10
M.3.2.21	0	0	<b>0,1</b>	<b>0</b>	0,10	0,00
M.3.2.22	0,01	0,01	0	0	0,000	0

Fonte: Próprio autor.

Percebe-se um aumento no fluxo de ar nos ambientes com a criação de uma ventilação cruzada, é possível visualizar melhor esta diferença entre o edifício atual e o otimizado conforme demonstra o gráfico da Figura 4.21.

Figura 4.21: Fluxo de ar do edifício atual e otimizado.



Fonte: Próprio autor.

Como pode observar no gráfico acima, em todos os ambientes o fluxo de ar aumentou consideravelmente, alguns ambientes específicos como as salas M3.1.03, M3.1.07, M3.2.18. Isso porque não só os ambientes estavam com ventilação insuficiente, praticamente sem fluxo de ar, mas principalmente pela criação de um fluxo de ar efetivo e real.

#### 4.3.6 Conclusões Parciais

Todas as alterações passivas efetuadas interferiram nos resultados de cada elemento analisado neste trabalho.

A carga térmica teve redução significativa com a colocação dos brises, os quais impactaram no RTQ-C. As áreas de janelas influenciam na eficiência energética do edifício, alterando as dimensões (neste caso, a redução) acarretou na melhora do nível de eficiência, alterando a ventilação natural e a carga térmica.

As aberturas zenitais da circulação superior, que foram aumentadas, não foram consideradas no cálculo da ventilação natural, mas tiveram grande influência no RTQ-C, colaborando assim para melhoria do nível de eficiência energética do edifício.

Pode-se concluir que cada elemento analisado contribui para a melhoria do conforto interno do edifício o que impacta na sua eficiência energética.

## 4.4 Aplicação de estratégia ativa para redução de energia elétrica do edifício otimizado

### 4.4.1 Trocas das lâmpadas das luminárias

A capacidade de redução do consumo de energia elétrica no sistema de iluminação é uma medida técnica eficiente e que produz um resultado imediato.

Neste estudo as lâmpadas fluorescentes das luminárias foram todas substituídas por lâmpadas tipo LED. A quantidade foi calculada para manter o mesmo nível de iluminação nos ambientes. Esta substituição demonstra o potencial de redução de 17 % no consumo referente à iluminação como é demonstrado na Tabela 4.17.

Tabela 4.17: Comparativo entre as lâmpadas fluorescentes e as lâmpadas tipo LED utilizadas no edifício.

Dados	Fluorescente Tubular (Edifício atual)	LED Tubular Edifício otimizado
Potência (W)	40	20
Fluxo luminoso (lm)	2600	1600
Quantidade	318	517
Total (kW)	12,72	10,5
<b>Redução</b>	<b>17 %</b>	

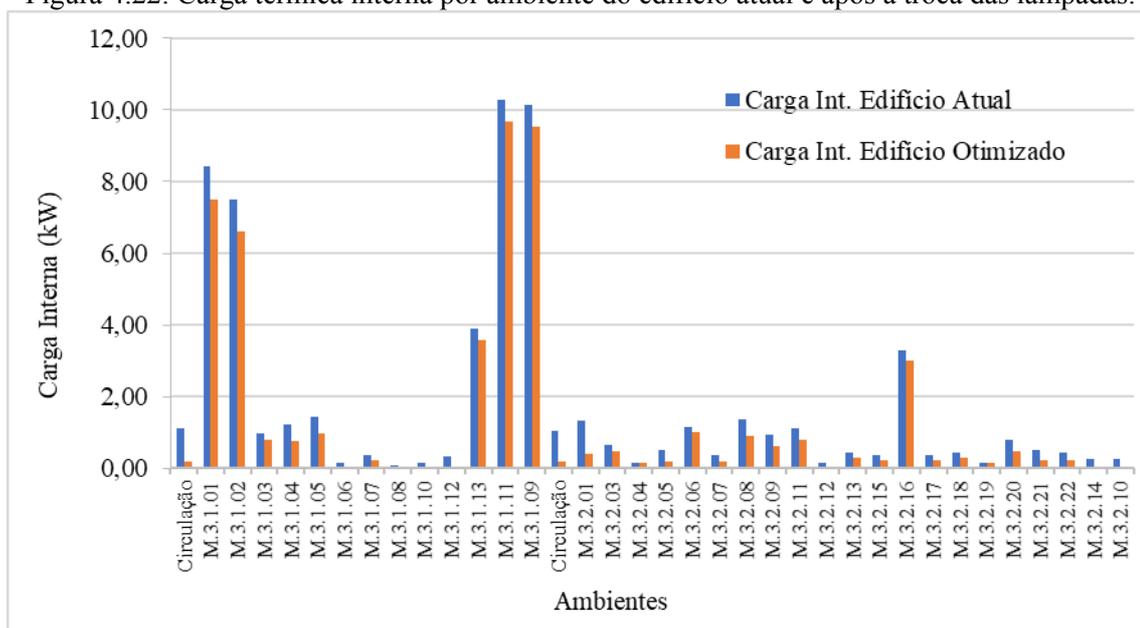
Fonte: próprio autor.

Esta medida vai impactar no consumo estimado de energia elétrica do edifício otimizado assim como na redução da carga térmica interna.

#### 4.4.1.1 Carga térmica interna

A substituição das lâmpadas resultou em uma diminuição na carga térmica interna do edifício estudado. Na Figura 4.22 observa-se o quanto cada ambiente teve de redução da carga térmica interna após a troca das lâmpadas.

Figura 4.22: Carga térmica interna por ambiente do edifício atual e após a troca das lâmpadas.



Fonte: próprio autor.

A redução foi pequena porque a maior fonte de calor na carga interna são as pessoas, e em sequência a iluminação, em função do tipo de ocupação dos espaços.

Os ambientes M3.1.01, M3.1.02 e M3.1.03 são laboratórios e tiveram uma redução de 11 %, 12 % e 16 % respectivamente, porém o número de usuários é maior que o M3.01.05 que também é um laboratório o qual obteve uma redução de 32 %.

Na sala M3.2.21 a redução chegou a 59 %, ela possui apenas um usuário, e maior contribuição de calor para um ambiente é o calor das pessoas.

De acordo com os cálculos de redução de cada ambiente, observa-se o potencial de redução na carga térmica interna geral do edifício com a troca das lâmpadas na Tabela 4.18.

Tabela 4.18: Carga térmica interna geral do edifício com a troca das lâmpadas.

Carga Térmica Interna (kW)		
Edifício Atual	Edifício Otimizado	% redução
Lâmpadas fluorescentes	Lâmpadas LED	
62,01	49,82	20 %

Fonte: próprio autor.

#### 4.4.1.2 Estimativa do novo consumo anual de energia elétrica do edifício.

Com as medidas de eficiência energética técnicas aqui sugeridas, o novo consumo de energia elétrica estimado é de 67.614,58 kWh. A Tabela 4.19 demonstra a estimativa de redução de energia elétrica no edifício otimizado. As medidas de eficiência energética aqui consideradas foram apenas das trocas das lâmpadas, o que já resultou em uma economia anual de 8,78 %.

Este consumo, foi utilizado como base para definição do sistema de geração fotovoltaica de geração de energia elétrica que será detalhado a seguir.

Tabela 4.19: Redução de energia elétrica no edifício otimizado

<b>Consumo (kWh/mês)</b>			
<b>Mês</b>	<b>Edifício Atual (Lâmpadas fluorescentes)</b>	<b>Edifício Otimizado (Trocas das lâmpadas)</b>	<b>% redução</b>
Janeiro	4999,88	4862,54	3 %
Fevereiro	4421,12	4216,76	5 %
Março	6444,56	5767,66	11 %
Abril	6254,72	5580,69	11 %
Maio	7598,03	6784,93	11 %
Junho	6784,68	6070,56	11 %
Julho	4912,35	4748,74	3 %
Agosto	7535,9	6738,44	11 %
Setembro	6758,91	6051,43	10 %
Outubro	7260,29	6484,05	11 %
Novembro	6831,16	6109,31	11 %
Dezembro	4318,08	4199,46	3 %
<b>TOTAL</b>	<b>74.120,67</b>	<b>67.614,58</b>	<b>8,78 %</b>

Fonte: Próprio autor.

## 4.5 Proposta de aplicação de tecnologia fotovoltaica ao edifício otimizado

### 4.5.1 Levantamento da área disponível

A área disponível para o sistema fotovoltaico, para efeito de simulação, que neste caso é a área da cobertura, corresponde a 746 m<sup>2</sup> a qual está livre de sombras e possui maior incidência solar.

### 4.5.2 Fluxo de energia no tempo

O sistema fotovoltaico de geração de energia elétrica foi projetado para o período de 25 anos, que equivale a garantia dos fabricantes para os painéis fotovoltaicos. O consumo estimado de energia elétrica do edifício é de 67.614,58 kWh. Este é o valor que deve gerar o sistema fotovoltaico no final de 25 anos. Assumindo a taxa de degradação anual linear dos módulos de 0,5 % ao ano conforme valores encontrados nos estudos de Quintana et al. (2000), Sakamoto e Oshiro (2003) e Jordan Kurtz (2013), a geração do sistema no primeiro ano de funcionamento (ano zero) deve ser de 76.641,38 kWh, correspondendo assim a 13,35 % maior que o consumo estimado.

### 4.5.3 Dimensionamento do Sistema de Geração

Sendo o valor médio da irradiação solar em Itajubá, MG, é de 1.857,85 kWh/m<sup>2</sup>/ano e levando em consideração as perdas de conversão de 0,85 %, de acordo com Almeida (2012), a irradiação solar utilizada para o dimensionamento do sistema de geração foi de 1.579,17 kWh/m<sup>2</sup>/ano. Resultando em uma potência nominal ( $P_{FV}$ ) de 60.666 kW.

### 4.5.4 Levantamento da área dos painéis e determinação do sistema de geração

Adotou-se como referência o painel MAXPOWER da Canadian Solar, de silício policristalino, cujas características estão apresentadas na Tabela 4.20.

Tabela 4.20: Parâmetros do painel fotovoltaico.

Parâmetro	Valor
$P_{m\acute{a}x}$ = Nominal Max. Power	350 W
$\eta$ = Eficiência do módulo	18 %
$\gamma$ = Coeficiente de temperatura da potência	-0,39 %/°C
$T_{NOCT}$ = Temperatura nominal de operação do painel	43°C

Fonte: (CANADIAN SOLAR INC., 2008).

O valor calculado da potência corrigida do painel ( $P_{corr}$ ) foi de 338,9 W. O número de painéis foi de 180, o que resulta em uma área de painéis de 324,48 m<sup>2</sup> (aproximadamente

50 % da área disponível no edifício). Diante disso a geração do sistema no primeiro ano de funcionamento (ano zero) passa a ser de 77.066,14 kWh/ano.

#### 4.5.5 Proposta arquitetônica

O objetivo da concepção arquitetônica neste edifício teve um propósito duplo, gerar energia e compor estruturalmente a edificação.

A estrutura sobreposta ao edifício possibilita uma interferência construtiva mínima, evitando assim demolições e retrabalhos no processo de *retrofit*. Buscando a unidade na edificação, a integração e a exposição da tecnologia definiu-se a criação da estrutura de suporte dos painéis onde srão previstos suportes para limpeza. Essa solução foi proposta de forma que não houvesse sombreamento dos painéis e que estivessem na orientação e inclinação recomendadas para proporcionar maior geração. O resultado desta integração pode ser visto na Figura 4.23.

Figura 4.23: Proposta arquitetônica para implantação da tecnologia fotovoltaica no edifício otimizado.



Fonte: Próprio autor.

#### 4.5.6 Conclusões parciais

O sistema proposto atende ao consumo de eletricidade do edifício.

Pelo fato da área disponível na cobertura para aplicação dos painéis ser bem maior do que a necessária, determinada pelos cálculos do sistema fotovoltaico, não foi necessário utilizar as fachadas como elementos para implantação do sistema.

A concepção arquitetônica favoreceu a aplicação dos painéis dentro dos padrões ideais de acordo com o local, assim como a tipologia da edificação para atingir um EEZ.

Do ponto de vista energético, considerando a redução do consumo de energia do edifício, comparando com a energia produzida pelo sistema fotovoltaico proposto, o arranjo permitiu que a edificação seja considerada EEZ.

A geração de energia ao longo da vida útil do sistema fotovoltaico atenderá o consumo de energia elétrica do edifício deste estudo, caracterizando-o assim como um Edifício Energia Zero Local.

## 4.6 Viabilidade Econômica

As Tabelas 4.21 e 4.22 apresentam a análise financeira da troca das lâmpadas e do sistema fotovoltaico, respectivamente. Nota-se que em ambas o VPL é positivo e tem-se uma TIR acima da taxa mínima de atratividade.

Tabela 4.21: Análise financeira da troca das lâmpadas.

<b>TROCA DAS LÂMPADAS</b>	
Taxa Mínima de Atratividade (TMA)	6,40%
Investimento	R\$ 18.420,26
VPL	R\$ 14.602,45
TIR	15,188 %
Pay-Back	6 anos e 10 meses

Fonte: próprio autor.

Tabela 4.22: Análise financeira do sistema fotovoltaico.

<b>SISTEMA FOTOVOLTAICO</b>	
Taxa Mínima de Atratividade (TMA)	6,40%
Investimento	R\$ 229.662,00
VPL	R\$ 165.548,64
TIR	14,20 %
Pay-Back	7 anos e 11 meses

Fonte: próprio autor.

Para a reposições de lâmpadas queimadas foi considerada uma taxa de 1% ao ano.

Para os componentes e serviços que foram executados no edifício não foram considerados reposições e manutenção.

O investimento das ações passivas de acordo com a planilha orçamentária apresentada no Anexo B foi de R\$387.199,18. A Tabela 4.23 apresenta a análise financeira considerando as ações passivas e o sistema fotovoltaico.

Tabela 4.23: Análise financeira das ações passivas e o sistema fotovoltaico.

<b>AÇÕES PASSIVAS + SISTEMA FOTOVOLTAICO</b>	
Taxa Mínima de Atratividade (TMA)	6,40%
Investimento	R\$ 616.861,18
VPL	<b>-R\$ 221.650,53</b>
TIR	1,90 %
Pay-Back	19 anos e 11 meses

Fonte: próprio autor.

Nota-se que na análise financeira das ações passivas junto com o sistema fotovoltaico o retrofit da edificação se apresenta inviável.

As planilhas orçamentárias e a análise financeira completa da troca das lâmpadas, do sistema fotovoltaico e das ações passivas estão apresentados no Anexo B.

#### **4.6.1 Conclusões parciais**

Observou-se que a viabilidade da mini geração depende de condições diversas como, por exemplo, investimento necessário, desempenho do sistema, nível de irradiação solar, energia gerada e, além disso, das condições vigentes nas tarifas de energia elétrica.

Assim, pode-se concluir que os resultados obtidos através da análise efetuada por este trabalho, demonstra a expectativa de aumento da atratividade da energia solar fotovoltaica no presente momento, para o perfil de consumo do edifício Bloco M3.

## 5 CONCLUSÕES FINAIS

Este trabalho apresentou um estudo sobre o retrofit energético de um edifício existente, na busca por eficiência energética, sustentabilidade e zerar o seu balanço anual de energia. Com os resultados obtidos as seguintes conclusões foram tiradas:

- As estratégias passivas, principalmente a ventilação natural, contribuíram para a melhoria do conforto térmico interno do edifício o que impacta na sua eficiência energética. As soluções arquitetônicas permitiram o edifício atingir o nível A de eficiência energética, segundo o RTQ-C.
- Foram trocadas as lâmpadas fluorescente por lâmpadas de LED (estratégia ativa) o que diminuiu o consumo de energia elétrica anual do edifício.
- Com a estrutura do edifício, a quantidade de irradiação solar local e a área disponível foi possível propor um sistema de geração de energia fotovoltaico que suprisse o consumo de energia elétrica do edifício ao longo da vida útil do sistema caracterizando-o assim como um Edifício Energia Zero Local.
- A análise financeira realizada apresentou um resultado positivo apenas considerando a troca das lâmpadas e o sistema fotovoltaico para geração de energia, no entanto, as ações passivas não apresentaram um resultado positivo economicamente.
- Os projetos de *retrofit* com soluções passivas aplicadas ao edifício afetam de forma crucial o alcance de Edifícios Energia Zero.
- As estratégias de passivas demonstraram ser de suma importância para melhorar o conforto humano e favorecer a sustentabilidade do edifício. Entretanto, as estratégias passivas devem ser cuidadosamente usados em retrofits de edifícios, considerando seu custo.
- As soluções ativas de iluminação demonstraram ser mais rentáveis economicamente para o projeto

O estudo não busca apenas argumentar qual é a estratégia mais rentável; e sim sugere que estratégias passivas devem ser usadas de forma integrada ao edifício para otimizar o desempenho energético.

Tendo em vista que existam poucos EEZs no Brasil, a revisão da literatura internacional demonstrou que existem desafios importantes a serem solucionados no que diz respeito as diferentes definições. Estas definições universais devem possibilitar o desenvolvimento de políticas públicas que apoiem os EEZs, já que no Brasil a energia elétrica vem majoritariamente de fontes renováveis, favorecendo assim os edifícios a alcançarem níveis de energia zero ou até próximos de zero.

O conceito EEZ pode ser aplicado para novos edifícios, bem como para construções existentes, a fim de promover um impacto real nas emissões de GEE, sustentabilidade e na liberdade dos consumidores frente aos aumentos das tarifas de eletricidade e no consumo de energia elétricas no setor de edificações. É fundamental para um EEZ que os seus ocupantes tenham uma utilização racional da energia, evitando assim desperdícios.

O estudo demonstra que as ações de *retrofit*, para se tornar um EEZ imprimem um caráter educativo, tecnológico e sustentável ao edifício Bloco M3 da UNIFEI.

## 6 TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para desenvolver trabalhos futuros, propõe-se uma análise do edifício dentro dos diferentes conceitos de EEZ.

Buscar outras medidas passivas e ativas para implementar ainda mais a eficiência do edifício.

Avaliar a iluminação natural após a implantação dos brises e o quanto isso impactaria em consumo de energia elétrica por uso maior de iluminação artificial no edifício.

Fazer um comparativo de quanto seria a economia de energia relacionada ao condicionamento de ar antes e depois das ações passivas caso o edifício aplicasse refrigeração em todos os seus ambientes.

Propor um estudo das possíveis políticas públicas para implementação de EEZ no Brasil e que apoiem significativamente o retrofit de energia e renovação.

Analisar as ações realizadas neste estudo com simulações da quantificação dos gastos e ganhos energéticos no programa *EnergyPlus* para uma comparação entre os resultados obtidos.

Este estudo poderá ser complementado com a implantação de um sistema de medição de consumo de energia elétrica exclusiva deste edifício, possibilitando assim maiores dados para avaliar o comportamento de consumo do edifício.

## 7 REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9050/200: Acessibilidade a edificações, mobiliário, espaços e equipamentos urbanos**, 2004.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15.220-3/2005: Desempenho térmico de edificações. Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social**. Rio de Janeiro, 2005.

ADAM, R. S. **Princípios do Ecoedifício: Interação entre Ecologia, Consciência e Edifício**. São Paulo: Aquariana, 2001.

AELENEI, L.; GONÇALVES, H. From solar building design to Net Zero Energy Buildings: Performance insights of an office building. **Energy Procedia**, v. 48, p. 1236–1243, 2014.

ALMEIDA, M. P. **Qualificação de Sistemas Fotovoltaicos Conectados À Rede**. 2012. 171p. Dissertação (Mestrado em Energia): Universidade de São Paulo, 2012.

ALTOÉ, L. et al. Políticas públicas de incentivo à eficiência energética. **Estudos Avançados**, v. 31, n. 89, p. 285–297, 2017.

AMORIM, C. N. D. **Iluminação natural, conforto ambiental e eficiência energética no projeto de arquitetura: estratégias projetuais e tecnológicas para climas tropicais**. Brasília/DF Projeto de Pesquisa (Edital CT-Energ/CNPq 01/2003), , 2003.

ANDREIS, C.; BESEN, P.; WESTPHAL, F. S. **Desempenho energético de Fachadas envidraçadas Em Climas Brasileiros**. XV Encontro Nacional do Ambiente Construído - ENTAC. Anais...Maceió- AL: 2014

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa 482, de 17 de abril de 2012, a qual estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras prov.** Brasília/DF: Diário Oficial da União, 2012.

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa 687, de 24 de novembro de 2015, a qual altera a Resolução Normativa 482, de 17 de abril de 2012**. Brasília/DF: Diário Oficial da União, 2015.

ARCHDAILY BRASIL. **RB12 / Triptyque**. Disponível em: <<https://www.archdaily.com.br/br/786429/rb12-triptyque>>. Acesso em: 12 abr. 2018.

ARDENTE, F. et al. Energy and environmental benefits in public buildings as a result of retrofit actions. **RENEWABLE & SUSTAINABLE ENERGY REVIEWS**, v. 15, n. 1, p. 460–470, 2011.

ASCIONE, F. et al. NZEB target for existing buildings: Case study of historical educational building in Mediterranean climate. **Energy Procedia**, v. 140, p. 194–206, 2017.

ASHRAE. **ASHRAE Handbook - Chapter 15: Fenestration**. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating And Air-Conditioning Engineers, 2009.

ASSUNÇÃO, H. D. **Degradação De Módulos Fotovoltaicos De Silício Cristalino**

**Instalados No Dee -Ufc.** 2014. 62p. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica): Universidade Federal do Ceará, 2014.

BARKASZI, S.; DUNLOP, J. **Discussion of strategies for mounting photovoltaic arrays on rooftops.** Proceedings of Solar Forum 2001 Solar Energy: The Power to Choose. **Anais...** Washington, DC: ASME, 2001

BARTHELMES, V. M. et al. Design and construction of an nZEB in Piedmont Region, North Italy. **Energy Procedia**, v. 78, p. 1925–1930, 2015.

BATTIONI, M. et al. Evaluacion de distintos metodos para estimar la temperatura de operacion de modulos fotovoltaicos y estimacion de las perdidas de energia por efecto de la temperatura. **Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente**, v. 20, p. 1–11, 2016.

BCB, B. C. DO B. **Histórico das taxas de juros.** Disponível em: <<https://www.bcb.gov.br/Pec/Copom/Port/taxaSelic.asp>>. Acesso em: 5 jun. 2018.

BECCALI, M. et al. Energy retrofit of a single-family house: Life cycle net energy saving and environmental benefits. **RENEWABLE & SUSTAINABLE ENERGY REVIEWS**, v. 27, p. 283–293, 2013.

BERALDO, J. C. **Eficiência energética em edifícios: avaliação de uma proposta de regulamento de desempenho térmico para a arquitetura do estado de São Paulo.** São Paulo: Universidade de São Paulo - USP, 2006.

BITTENCOURT, L. S.; CÂNDIDO, C. M. **Introdução à ventilação natural.** 3. ed. Maceió/AL: EDUFAL, 2008.

BRASIL. MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO INDÚSTRIA E COMÉRCIO EXTERIOR. INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL (INMETRO). **Portaria INMETRO nº 163, de 08 de junho de 2009. Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos (RTQ-C).** Brasília/DF, 2009a.

BRASIL. MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO INDÚSTRIA E COMÉRCIO EXTERIOR. INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL (INMETRO). **Portaria INMETRO nº 185, de 22 de junho de 2009. Regulamento de Avaliação da Conformidade do Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos (RAC-C).** Brasília/DF, 2009b.

BRASIL. MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO INDÚSTRIA E COMÉRCIO EXTERIOR. INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL (INMETRO). **Portaria INMETRO nº 372, de 17 de setembro de 2010. Requisitos técnicos da qualidade para o nível de eficiência energética de edifícios comerciais, de serviços e públicos.** Brasília/DF, 2010.

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.** Brasília/DF: Diário Oficial da União, 2001a.

BRASIL. **Decreto 4.059, de 19 de dezembro de 2001. Regulamenta a Lei n.10.295, de 17 de outubro de 2001, que dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia, e dá outras providências.** Brasília/DF: Diário Oficial da União, 2001b.

BRASIL. **Instrução Normativa n.2, de 4 de junho 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**. Brasília/DF: Diário Oficial da União, 2014.

BRITO, V. **Prédio brasileiro vence duas categorias do Breeam Awards 2018**. Disponível em:

<<http://sustentabilidade.sebrae.com.br/sites/Sustentabilidade/Acontece/Noticias/Premiação-mundial>>. Acesso em: 20 abr. 2018.

BSI, B. S. I.- **BS 5925:1991. Code of practice for Ventilation principles and designing for natural ventilation**, 1991.

BULUT, M. B. et al. Buildings in the future energy system - Perspectives of the Swedish energy and buildings sectors on current energy challenges. **Energy and Buildings**, v. 107, p. 254–263, 2015.

CANADIAN SOLAR INC. **PV Module Product Datasheet V5.562\_ENCANAIDIAN SOLAR INC.**, , 2008.

CARLO, J. C. **Desenvolvimento de Metodologia de Avaliação da Eficiência Energética do Envoltório de Edificações Não-residenciais**. 2008. 215p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil): Universidade Federal de Santa Catarina, 2008.

CARLO, J. C.; LAMBERTS, R. Parâmetros e métodos adotados no regulamento de etiquetagem da eficiência energética de edifícios – parte 2: método de simulação. **Ambiente Construído**, v. 10, n. 2, p. 27–40, 2010.

CARVALHO, M. T. M. **Metodologia para a avaliação da sustentabilidade de habitações de interesse social com foco no projeto**. [s.l.] Universidade de Brasília, 2009.

CHIDIAC, S. E. et al. A screening methodology for implementing cost effective energy retrofit measures in Canadian office buildings. **Energy and Buildings**, v. 43, p. 614–620, 2011.

CICS LIVING LAB. **Sede do Centro de Inovação em Construção Sustentável – CICS**. Disponível em: <<http://cics.prp.usp.br/cics-living-lab/>>. Acesso em: 12 abr. 2018.

CINEX. **Arquitetura sustentável no Parlamento Alemão**. Disponível em: <<http://www.grupocinex.com.br/blog/arquitetura-sustentavel-no-parlamento-alemao/>>. Acesso em: 20 abr. 2018.

CORBELLA; YANNAS. **Em Busca De Uma Arquitetura -Sustentável Para os Trópicos**. Rio de Janeiro: Editora Revan, 2009.

COUROQUÍMICA. **Prédio da empresa COUROQUÍMICA em Franca/SP**. Projeto arquitetônico da autora., [s.d.]. Disponível em: <<http://www.couroquimica.com.br/index.php/quem-somos/>>. Acesso em: 10 set. 2017

CRESESB. **Potencial Energético/ Potencial Solar - SunData v 3.0**. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata>>. Acesso em: 10 abr. 2018.

CRUZ, M. C. V. O porto do Rio de Janeiro no século XIX: Uma realidade de muitas faces. **Revista Tempo**, v. 4, n. 8, p. 123–141, 1999.

D’AGOSTINO, D.; CUNIBERTI, B.; MASCHIO, I. Criteria and structure of a harmonised

data collection for NZEBs retrofit buildings in Europe. **Energy Procedia**, v. 140, p. 170–181, 2017.

DI TRAPANO, P.; BASTOS, L. E. G. As Novas Formas do século XXI - Um Estudo Aplicado à Arquitetura Bioclimática. **Cadernos do PROARQ**, v. 9, n. 9, p. 195–209, dez. 2005.

DIAMANTINA MG. **Casa do Muxarabiê e Biblioteca Antônio Torres** Diamantina Histórica, , 2017. Disponível em: <<https://diamantinamg.com.br/casa-do-muxarabie-e-biblioteca-antonio-torres/#.WsZpPfnwbIU>>. Acesso em: 28 ago. 2017

DIDONÉ, E. L.; WAGNER, A.; PEREIRA, F. O. R. Estratégias para edifícios de escritórios energia zero no Brasil com ênfase em BIPV. **Ambiente Construído**, v. 14, n. 3, p. 27–42, 2014.

DIXON, R. K. et al. US energy conservation and efficiency policies: Challenges and opportunities. **Energy Policy**, v. 38, n. 11, p. 6398–6408, 2010.

DOMINGOS, L. et al. **Definição de uma classificação climática para o estudo de edificações com balanço anual zero de energia no Brasil**. XV Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente construído. **Anais...2014** Disponível em: <[http://www.infohab.org.br/entac2014/artigos/paper\\_143.pdf](http://www.infohab.org.br/entac2014/artigos/paper_143.pdf)>

ECEEE. **Steering through the maze #2. Nearly zero energy buildings: achieving the EU 2020 target**. European Council for Energy Efficient Economy, , 2011. Disponível em: <[https://www.ecee.org/static/media/uploads/site-2/policy-areas/Buildings/docs/copy\\_of\\_110208\\_steering2.pdf](https://www.ecee.org/static/media/uploads/site-2/policy-areas/Buildings/docs/copy_of_110208_steering2.pdf)>

ELETROBRÁS/PROCEL. **Manual para aplicação do RTQ-C, comercial, serviços e público. Versão 2. Portaria nº 372/3013**. Brasília/DF: Eletrobrás/Procel, 2013.

ELETROBRÁS/PROCEL. **Resultados PROCEL 2017 - Ano Base 2016**, 2017. Disponível em: <[http://www.procelinfo.com.br/resultadosprocel2017/docs/rel\\_procel2017\\_web.pdf](http://www.procelinfo.com.br/resultadosprocel2017/docs/rel_procel2017_web.pdf)>. Acesso em: 15 ago. 2017

EPDB. **Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast)**. Official Journal of the European Union, , 2010.

EPE. **Balanço Energético Nacional (BEN) 2017: Ano base 2016 - Relatório Síntese** Empresa de Pesquisa Energética - Rio de Janeiro: EPE, 2017. Disponível em: <[www.epe.gov.br](http://www.epe.gov.br)>

FORNYBAR. **Nova casa de ópera em Oslo**.

FOSSATI, M.; LAMBERTS, R. **Metodologia para avaliação da sustentabilidade de projetos de edifícios: o caso de escritórios em Florianópolis**. XII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído - ENATEC. **Anais...Fortaleza**: 2008

FOSSATI, M.; LAMBERTS, R. Eficiência energética da envoltória de edifícios de escritórios de Florianópolis: discussões sobre a aplicação do método prescritivo do RTQ-C. **Ambiente Construído**, v. 10, n. 2, p. 59–69, 2010.

FOSTER, N. **Architecture and Sustainability** Foster+Partners, , 2003. Disponível em: <<https://www.fosterandpartners.com/media/546486/essay13.pdf>>. Acesso em: 10 set. 2017

FOSTER, N. **TED Talk: Norman Foster fala sobre arquitetura verde e sustentabilidade** ArchDaily Brasil, , 2015. Disponível em: <<https://www.archdaily.com.br/br/777458/ted-talk-norman-foster-fala-sobre-arquitetura-verde-e-sustentabilidade>>. Acesso em: 20 set. 2017

FOUQUET, D. Policy instruments for renewable energy – From a European perspective. **Renewable Energy**, v. 49, p. 15–18, 2013.

FROTA, A. B.; SCHIFFER, S. R. **Manual de Conforto Térmico**. 5. ed. São Paulo: Studio Nobel, 2001.

GAGLIANO, A. et al. Energy efficient measure to upgrade a multistory residential in a nZEB. **AIMS Energy**, v. 5, n. 4, p. 601–624, 2017.

GARDE, F. et al. Design of net zero energy buildings: Feedback from international projects. **Energy Procedia**, v. 61, p. 995–998, 2014.

GBC - BRASIL. **Projeto Geoenergética Tamboara - Paraná**. Disponível em: <<http://www.gbcbrasil.org.br/sistema/projetoPiloto/GeoenergeticaTamboara.pdf>>. Acesso em: 10 abr. 2018.

GBC - BRASIL. **Compreenda o GBC Brasil Zero Energy**. Disponível em: <<http://www.gbcbrasil.org.br/zero-energy.php>>. Acesso em: 10 abr. 2018a.

GBC - BRASIL. **GBC Brasil lança oficialmente a Certificação Zero Energy Building e a segunda versão da Certificação GBC Brasil Casa e Condomínio**. Disponível em: <<http://www.gbcbrasil.org.br/detalhe-noticia.php?cod=258>>. Acesso em: 18 abr. 2018b.

GBC - BRASIL. **Projeto Sede Sebrae Mato Grosso - Cuiabá**. Disponível em: <<http://www.gbcbrasil.org.br/sistema/projetoPiloto/sedeSebraeCuiaba.pdf>>. Acesso em: 18 abr. 2018c.

GBC - BRASIL. **Retrofit é recurso para adaptar edifícios às exigências da arquitetura**. Disponível em: <<http://blog.gbcbrasil.org.br/?p=3327>>. Acesso em: 26 mar. 2018.

GIVONI, B. Comfort, climate analysis and building design guidelines. **Energy and Buildings**, v. 18, n. 1, p. 11–23, 1992.

GOLDSTEIN, D. B. et al. Zeroing in on Net-Zero Buildings: Can We Get There? How Will We Know When We Have Arrived? **2010 ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings**, p. 125–137, 2010.

GONÇALVES, J. C. S.; DUARTE, D. H. S. Arquitetura sustentável: uma integração entre ambiente, projeto e tecnologia em experiências de pesquisa, prática e ensino. **Ambiente Construído**, v. 6, n. 4, p. 51–81, 2006.

GRIFFITH, B. et al. **Assessment of the Technical Potential for Achieving Net Zero-Energy Buildings in the Commercial Sector** Technical Report NREL/TP-550-41957. [s.l: s.n.].

GUIMARÃES, A. G. L. Lelé e o star system high-tech: a obra de Lelé e as práticas sustentáveis na arquitetura contemporânea internacional. **Revista aU - Arquitetura e Urbanismo**, n. 244, p. 1–3, 2014.

HADDAD, J. **Eficiência e Conservação de Energia** Dossiê Energia Positiva para o Brasil -

Greenpeace, , 2004. Disponível em: <[http://www.greenpeace.com.br/energia/pdf/dossie\\_energia\\_2004.pdf](http://www.greenpeace.com.br/energia/pdf/dossie_energia_2004.pdf)>. Acesso em: 15 mar. 2018

HEINSTEIN, P.; BALLIF, C.; PERRET-AEBI, L. E. Building integrated photovoltaics (BIPV): Review, potentials, barriers and myths. **Green**, v. 3, n. 2, p. 125–156, 2013.

HERMAWAN et al. The Sustainable Infrastructure through the Construction Supply Chain Carbon Footprint Approach. **Procedia Engineering**, v. 171, p. 312–322, 2017.

HERNANDEZ, P.; KENNY, P. From net energy to zero energy buildings: Defining life cycle zero energy buildings (LC-ZEB). **Energy and Buildings**, v. 42, n. 6, p. 815–821, 2010.

IEA. **Transition to Sustainable Buildings - Strategies and opportunities to 2050**. 1. ed. [s.l.] International Energy Agency - IEA, 2013.

INPE. **Edifício CCST - Centro de Ciência do Sistema Terrestre**. São José dos Campos/SP. Projeto arquitetônico da autora., , [s.d.]. Disponível em: <<http://labren.ccst.inpe.br/local.html>>. Acesso em: 10 set. 2017

IPCC - INTERGOVERNAMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories - Volume 2 - Energy** (S. Eggleston et al., Eds.) Japão Institute for Global Environmental Strategies (IGES), , 2006.

IPHAN - INSTITUTO DO PATRIMÔNIO HISTÓRICO E ARTÍSTICO NACIONAL. **Restauração do Palácio Capanema valoriza ícone da arquitetura moderna** Portal IPHAN, , 2016. Disponível em: <<http://portal.iphan.gov.br/noticias/detalhes/3578/restauracao-do-palacio-capanema-valoriza-icone-da-arquitetura-moderna>>. Acesso em: 20 ago. 2017

ITECONS. **DL 118/2013 de agosto, Regulamento de desempenho energético dos edifícios de habitação (REH). Síntese da regulamentação aplicável (Decreto-Lei, Portaria e Despachos)**. Disponível em: <<http://www.itecons.uc.pt/>>. Acesso em: 12 abr. 2018.

JAFARI, A.; VALENTIN, V. An optimization framework for building energy retrofits decision-making. **Building and Environment**, v. 115, p. 118–129, 2017.

JAFARI, A.; VALENTIN, V. Selection of optimization objectives for decision-making in building energy retrofits. **Building and Environment**, v. 130, p. 94–103, 2018.

JANNUZZI, G. D. M. Power sector reforms in Brazil and its impacts on energy efficiency and research and development activities. **Energy Policy**, v. 33, n. 13, p. 1753–1762, 2005.

JORDAN, D. C.; KURTZ, S. R. Photovoltaic Degradation Rates—an Analytical Review. **PROGRESS IN PHOTOVOLTAICS: RESEARCH AND APPLICATIONS**, v. 21, n. 1, p. 12–29, 2013.

JORDANA, S. **Fotografias noturnas das obras de Oscar Niemeyer em Brasília são premiadas no International Photography Awards de 2013**. Disponível em: <<https://www.archdaily.com.br/br/01-144232/fotografias-noturnas-das-obras-de-oscar-niemeyer-em-brasilia-sao-premiadas-no-international-photography-awards-de-2013>>. Acesso em: 15 abr. 2018.

KIM, K.-H. A comparative life cycle assessment of a transparent composite façade system and a glass curtain wall system. **Energy and Buildings**, v. 43, p. 3436–3445, 2011.

KOWALTOVSKI, D. C. C. K. et al. Reflexão Sobre Metodologias de Projeto Arquitetônico. **Ambiente Construído**, v. 6, n. 2, p. 7–19, 2006.

LABEEE. **Projeto S3E/Webprescritivo**. Disponível em: <<http://www.labeee.ufsc.br/sites/default/files/webprescritivo/index.html>>.

LAMBERTS, R. et al. **Desempenho térmico de edificações** Florianópolis/ SCLaboratório de Eficiência Energética em Edificações - LabEEE, , 2016.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência Energética na Arquitetura**. 3. ed. Rio de Janeiro: ELETROBRAS/PROCEL, 2014.

LEE, W. L.; YIK, F. W. H. Regulatory and voluntary approaches for enhancing building energy efficiency. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 30, n. 5, p. 477–499, 2004.

LEONIDIO, O. **Eu vivo numa ilha. Entrevista com João Filgueiras Lima, Lelé**. Entrevista, São Paulo, ano 15, n. 058.01, Vitruvius, , 2014. Disponível em: <<http://www.vitruvius.com.br/revistas/read/entrevista/15.058/5170>>. Acesso em: 15 set. 2017

LIANG, J. et al. Do energy retrofits work? Evidence from commercial and residential buildings in Phoenix. **Journal of Environmental Economics and Management**, 2017.

LIMA, B. W. F. **Geração Distribuída Aplicada à Edificações: Edifícios de Energia Zero e o caso do Laboratório de Ensino da FEC-Unicamp**. 2012. 170p. Dissertação (Mestrado em Planejamento de Sistemas Energéticos): Universidade de Campinas, 2012.

LIMA, J. F. **Sarah Brasília Lago Norte. Centro Internacional de Neurociências**. Disponível em: <<http://www.vitruvius.com.br/revistas/read/projetos/13.153/4865>>. Acesso em: 10 set. 2017.

LUND, H.; KEMPTON, W. Integration of renewable energy into the transport and electricity sectors through V2G. **Energy Policy**, v. 36, n. 9, p. 3578–3587, 2008.

MA, Z. et al. Existing Building Retrofits : Methodology and State - of - the - Art. **Energy and Buildings**, v. 55, p. 889–902, 2012.

MACEDO, C. A. A. et al. Análise de viabilidade econômico-financeira de um projeto eólico com simulação Monte Carlo e avaliação de risco. **Gestão & Produção**, v. 24, n. 4, p. 731–744, 2017.

MACIEL, A. A.; FORD, B.; LAMBERTS, R. Main influences on the design philosophy and knowledge basis to bioclimatic integration into architectural design-The example of best practices. **Building and Environment**, v. 42, n. 10, p. 3762–3773, 2007.

MACIEL, A. C. F. **Energia Incorporada de Fachadas Ventiladas. Estudo de Caso para Edificação Habitacional em Brasília - DF**. 2013. 146p. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil): Universidade de Brasília, 2013.

MAKRIDES, G. et al. Temperature and thermal annealing effects on different photovoltaic technologies. **Renewable Energy**, v. 43, n. June 2010, p. 407–417, 2012.

MANZANO-AGUGLIARO, F. et al. Review of bioclimatic architecture strategies for achieving thermal comfort. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 49, p. 736–755, 2015.

MAPS, G. **Mapa**. Disponível em: <<https://www.google.com.br/maps/place/Universidade+Federal+de+Itajubá,+Campus+Prof.+José+Rodrigues+Seabra/@-22.408469,-45.4491264,687a,35y,180h,39.08t/data=!3m1!1e3!4m5!3m4!1s0x94cb7cadd1247d9b:0xf74fb46a1edf2072!8m2!3d-22.4122927!4d-45.4497871?hl=pt-BR>>. Acesso em: 13 jul. 2017.

MARSZAL, A. J. et al. Zero Energy Building - A review of definitions and calculation methodologies. **Energy and Buildings**, v. 43, n. 4, p. 971–979, 2011.

MENEZES, V. **arq&urbanismo - Verônica Menezes**, 2012. Disponível em: <<http://arquitetura-bioclimatica.blogspot.com.br/2012/05/tipos-de-brises.html>>. Acesso em: 10 set. 2017

MICONO, C.; ZANZOTTERA, G. Energy modeling for NZEBs: A case-study. **Energy Procedia**, v. 78, p. 2034–2039, 2015.

MIKAI, M. **Retrofit, oportunidade para a sustentabilidade**. Disponível em: <[https://www.aecweb.com.br/cont/m/rev/retrofit-oportunidade-para-a-sustentabilidade\\_2247\\_20\\_1](https://www.aecweb.com.br/cont/m/rev/retrofit-oportunidade-para-a-sustentabilidade_2247_20_1)>. Acesso em: 10 abr. 2018.

MITSIDI PROJETOS. **Edifícios de Baixo Carbono no Brasil- Aspectos e Subsídios para Programas Nacionais**São Paulo Instituto Clima e Sociedade (ICS), , 2017.

MME-MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Relatório das Atividades do Comitê Gestor dos Indicadores de Eficiência Energética (CGIEE): 2002-2008**. Brasília/DF: Comitê Gestor de Indicadores e Níveis de Eficiência Energética | CGIEE - Ministério de Minas e Energia, 2009. Disponível em: <[http://www.mme.gov.br/documents/10584/1139097/Relatorio\\_CGIEE\\_2002-2008.pdf/f97dd362-6e93-4230-b68d-7c073f7af7ab](http://www.mme.gov.br/documents/10584/1139097/Relatorio_CGIEE_2002-2008.pdf/f97dd362-6e93-4230-b68d-7c073f7af7ab)>.

MME-MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Plano Nacional de Eficiência Energética - Premissas e Diretrizes Básicas**. Brasília/DF: MME-Ministério de Minas e Energia, 2011.

MME/EPE. **Plano Nacional de Energia 2030**. Brasília/DF: MME - Ministério de Minas e Energia/EPE - Empresa de Pesquisa Energética, 2007.

MORAES, V. T. F.; QUELHAS, O. L. G. " **Retrofit** ": **Criação E Implantação De Estratégias Sustentáveis No Uso E Manutenção De Edificações**. XIV ENTAC - Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. **Anais...**Juiz de Fora: 2012

MORENO, M. M. **Avaliação do consumo energético e proposta de emodelação construtiva do prédio do ICE da Universidade Federal de Itajubá**. 2016. 163p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia): Universidade Federal de Itajubá, 2016.

MOUSSALEM, R. **Uma ferramenta que contribui para o desenvolvimento sustentável do país e da sua empresa**. Disponível em: <<http://www.gbcbrasil.org.br/detalhe-noticia.php?cod=259>>. Acesso em: 10 abr. 2018.

NASCIMENTO, T. C. C.; BARROS, P. C. F.; BATISTA, J. O. **Avaliação da ventilação natural em arranjos de implantação de edifícios em condomínio de Maceió/AL**. 7º Congresso Luso-Brasileiro para o Planejamento Urbano Regional, Integrado e Sustentável. **Anais...**Maceió- AL: 2016

NEWELL, T.; NEWELL, B. Modeling Zero Energy. **ASHRAE Journal**, v. 52, p. 65–68, 2010.

NIELSEN, M. V.; SVENDSEN, S.; JENSEN, L. B. Quantifying the potential of automated dynamic solar shading in office buildings through integrated simulations of energy and daylight. **Solar Energy**, v. 85, n. 5, p. 757–768, 2011.

OLGYAY, V. **Arquitectura y clima: manual de diseño bioclimático para arquitectos y urbanistas**. 1º ed. Barcelona: Gustavo Gili, 1963.

OLIVEIRA, P. H. B. S. DE. **Avaliação do Potencial de Transformação do NIPE em uma Edificação de Energia Zero**. 2017. 95p. Dissertação (Mestrado em Planejamento de Sistemas Energéticos): Universidade Federal de Campinas, 2017.

OLIVEIRA, L. A.; THOMAZ, É.; MELHADO, S. B. Retrofit de Fachadas: Tecnologias europeias. **Revista Técnica**, v. 136, 2008.

OLIVEIRA, L. P. D. E. **Estrutura metodológica para avaliação ambiental do projeto arquitetônico com base nos critérios prescritivos e de desempenho das certificações para edifícios: : estudo de caso edifício Gustavo Capanema e Eldorado Tower**. 2009. 347p. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo): Universidade de Brasília, 2009.

OROSA, J. A.; OLIVEIRA, A. C. Energy saving with passive climate control methods in Spanish office buildings. **Energy and Buildings**, v. 41, n. 8, p. 823–828, 2009.

OSTERWALD, C. R. et al. **Degradation analysis of weathered crystalline-silicon PV modules**. Photovoltaic Specialists Conference, 2002. Conference Record of the Twenty-Ninth IEEE. **Anais...New Orleans, Louisiana: IEEE, 2002**Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/1190869/>>

PACHECO, M.; LAMBERTS, R. Assessment of technical and economical viability for large-scale conversion of single family residential buildings into zero energy buildings in Brazil: Climatic and cultural considerations. **Energy Policy**, v. 63, p. 716–725, 2013.

PACHECO, M. T. G. **Ventilação natural e climatização artificial: crítica ao modelo superisolado para residência de energia zero em Belém e Curitiba**. 2013. 292p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil): Univesidade Federal de Santa Catarina, 2013.

PACHECO, M. T. G.; GHISI, E.; LAMBERTS, R. **Proposição de estratégias para obtenção de Edifícios de Energia Zero**. Florianópolis/SC. CB3e - Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações/UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina Dep. de Engenharia Civil, , 2013.

PACHECO, M. T. G.; LAMBERTS, R. **Edifícios de energia zero: definições, políticas, exemplos**. XII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído - ENATEC. **Anais...Fortaleza: 2008**

PATTERSON, M. G. What is energy efficiency? Concepts, indicators and methodological issues. **Energy Policy**, v. 24, n. 5, p. 377–390, 1996.

PENG, C.; HUANG, Y.; WU, Z. Building-integrated photovoltaics (BIPV) in architectural design in China. **Energy and Buildings**, v. 43, p. 3592–3598, 2011.

PEREIRA, E. B. et al. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**Rio de JaneiroINPE, , 2006.

PÉREZ-LOMBARD, L. et al. A review of benchmarking, rating and labelling concepts within the framework of building energy certification schemes. **Energy and Buildings**, v. 41, n. 3, p. 272–278, 2009.

PÉREZ-LOMBARD, L.; ORTIZ, J.; POUT, C. A review on buildings energy consumption information. **Energy and Buildings**, v. 40, n. 3, p. 394–398, 2008.

PERN, F. . **Factors that Affect the Eva Encapsulant Discoloration Rate Upon accelerated Exposure**. World Conference on Photovoltaic Energy Conversion. **Anais...Proceedings of the First World Conference on Photovoltaic Energy Conversion**, 1994

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: CEPEL - CRESESB, 2014.

POGHARIAN, S. et al. **Getting to a Net Zero Energy Lifestyle in Canada: The Alstonvale Net Zero Energy House**. In: 23rd European PV Solar Energy Conference. **Anais...2008**

QUINTANA, M. A. et al. **Diagnostic Analysis Of Silicon Photovoltaic Modules After 20-Year Field Exposure**. 28th IEEE Photovoltaic Specialists Conference. **Anais...Anchorage - Alaska: 2000**

RABANI, M.; MADESSA, H. B.; NORD, N. A state-of-art review of retrofit interventions in buildings towards nearly zero energy level. **Energy Procedia**, v. 134, p. 317–326, 2017.

REIS, A. M. et al. **Comparison of PV module performance before and after 11-years of field exposure**. 29th IEEE Photovoltaics Specialists Conference. **Anais...New Orleans, Louisiana: 2002**

RESNICK, R.; HALLIDAY, D. **Física Parte I**. [s.l.] Ao Livro Técnico S.A., 1965.

REVISTA FATOR BRASIL. **GEO Energética inicia ampliação da planta industrial de Tamboara**. Disponível em: <[http://www.revistafatorbrasil.com.br/ver\\_noticia.php?not=269822](http://www.revistafatorbrasil.com.br/ver_noticia.php?not=269822)>. Acesso em: 12 abr. 2018.

RODRIGUES, C. et al. **Solar XXI” building PV systems: performance during the first two years of operation**. Disponível em: <<http://energyprofessionalsymposium.com/?p=628>>. Acesso em: 28 mar. 2018.

RODRIGUES, L. S. **Ventilação natural induzida pela ação combinada do vento e da temperatura em edificações**. 2008. 90p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil): Universidade Federal de Ouro Preto, 2008.

ROMERO, M. A. B. **A arquitetura bioclimática do espaço público**. Brasília: Editora UnB, 2001.

RUSSO, F. **Climatic responsive design in Brazilian Modern Architecture**. Dissertação: Universidade de Cambridge, 2004.

RÜTHER, R. **Edifícios solares fotovoltaicos: O potencial da geração solar fotovoltaica interligada a edificações urbanas e interligada à rede elétrica pública no Brasil**. 1. ed. Florianópolis: Editora UFSC, 2004.

RÜTHER, R.; BRAUN, P. Energetic Contribution Potential of Building-Integrated Photovoltaics on Airports in Warm Climates. **Solar Energy**, v. 83, p. 1923–1931, 2009.

RÜTHER, R.; SALAMONI, I. O potencial dos setores urbanos brasileiros para a geração de energia solar fotovoltaica de forma integrada às edificações. **Fórum Patrimônio**, v. 4, n. 1, p. 84–94, 2011.

SAKAMOTO, S.; OSHIRO, T. **Field test results on the stability of crystalline silicon photovoltaic modules manufactured in the 1990s**. 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion. **Anais...Osaka, Japan: IEEE, 2003**

SALEM, R. et al. Retrofit of a UK residential property to achieve nearly zero energy building standard. **Advances in Environmental Research**, v. 7, n. 1, 2018.

SANCHES, A. L. et al. **Análise de Sensibilidade na Avaliação de Investimentos por “ DOE ” Simulado**. SEGeT – Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia. **Anais...2007**

SANTOS, F. A.; SOUZA, C. A. DE; DALFIOR, V. A. O. **ENERGIA SOLAR : um estudo sobre a viabilidade econômica de instalação do sistema fotovoltaico em uma residência em**. XIII Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia – SEGeT. **Anais...Resende/RJ: 2016**

SANTOS JÚNIOR, S. L. D. R. **Análise de materiais e técnicas de encapsulamento de módulos fotovoltaicos**2008. 102p. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia de Materiais), 2008.

SARTORI, I.; HESTNES, A. G. Energy use in the life cycle of conventional and low-energy buildings: A review article. **Energy and Buildings**, v. 39, n. 3, p. 249–257, 2007.

SARTORI, I.; NAPOLITANO, A.; VOSS, K. Net zero energy buildings: A consistent definition framework. **Energy and Buildings**, v. 48, p. 220–232, 2012.

SEBRAE. **Técnicas Construtivas**. Disponível em: <<http://sustentabilidade.sebrae.com.br/sites/Sustentabilidade/Institucional/O-Predio/Técnicas-construtivas>>. Acesso em: 20 abr. 2018.

SERAFIN, R. M. **Avaliação da redução do consumo de energia elétrica em função do retrofit no edifício sede da Eletrosul**. 2010. 139p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil): Universidade Federal de Santa Catarina, 2010.

SILVA, H. S. DA. O conforto na arquitetura moderna brasileira. **RISCO - Revista de Pesquisa em Arquitetura e Urbanismo**, n. 10, p. 91–95, 2009.

SINAPI. **Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil**. Disponível em: <<http://www.caixa.gov.br/poder-publico/apoio-poder-publico/sinapi/Paginas/default.aspx>>. Acesso em: 5 jun. 2018.

SKAALAND, Å. et al. **Potential and Challenges for Building Integrated Photo- voltaics in the Agder Region**Prosjekt/FoU-report nr. 6/2011. Agderforskning., , 2011.

SOUZA, H. A. DE; AMPARO, L. R.; GOMES, A. P. Influência da inércia térmica do solo e da ventilação natural no desempenho térmico: um estudo de caso de um projeto residencial em light steel framing. **Ambiente Construído**, v. 11, n. 4, p. 113–128, 2011.

STRONG, S. **Building Integrated Photovoltaics (BIPV)**. Disponível em: <<https://www.wbdg.org/resources/building-integrated-photovoltaics-bipv>. Acesso em 20/03/2018.>. Acesso em: 20 mar. 2018.

SUN, X.; GOU, Z.; LAU, S. S. Y. Cost-effectiveness of active and passive design strategies for existing building retrofits in tropical climate: Case study of a zero energy building. **Journal of Cleaner Production**, v. 183, p. 35–45, 2018.

TABORIANSKI, V. M.; PRADO, R. T. A. Methodology of CO<sub>2</sub> emission evaluation in the life cycle of office building façades. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 33, n. 1, p. 41–47, 2012.

TABORIANSKI, V. M.; SIMONI, R. A.; PRADO, R. T. A. **Elaboração de inventário de consumo de energia no ciclo de vida dos materiais utilizados em fachadas de edifícios no Brasil**. XII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído - ENATEC. **Anais...**Fortaleza/CE: 2008

TEIXEIRA, M. et al. Bibliografia selecionada sobre edifícios de energia zero. p. 10, 2013.

TORCELLINI, P. et al. **Zero Energy Buildings: A Critical Look at the Definition**. Califórnia: Golden, CO : National Renewable Energy Laboratory, 2006.

TORRES, R. G. **Desenvolvimento de metodologia para avaliação do potencial de utilização de sistemas de energia solar fotovoltaica em meios urbanos**. 2015. 163p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica): Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2015.

TOUMA, A. AL; OUAHRANI, D. Shading and day-lighting controls energy savings in offices with fully-Glazed façades in hot climates. **Energy and Buildings**, v. 151, p. 263–274, 2017.

TZIKOPOULOS, A. F.; KARATZA, M. C.; PARAVANTIS, J. A. Modeling energy efficiency of bioclimatic buildings. **Energy and Buildings**, v. 37, n. 5, p. 529–544, 2005.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. **Building Catalog: Case Studies of High Performance Buildings - Equinox House**. Disponível em: <<https://buildingdata.energy.gov/project/equinox-house>>. Acesso em: 10 abr. 2018.

VAZ, G. **Nova sede da RAC Engenharia em Curitiba possui autossuficiência em água e energia**. Disponível em: <<http://techne.pini.com.br/2017/11/nova-sede-da-rac-engenharia-em-curitiba-possui-autossuficiencia-em-agua-e-energia/>>. Acesso em: 12 abr. 2018.

VENTURINI, O. J. **Condicionamento de ar e conforto térmico**Itajubá, 2013.

YILMAZ, Z. Evaluation of energy efficient design strategies for different climatic zones: Comparison of thermal performance of buildings in temperate-humid and hot-dry climate. **Energy and Buildings**, v. 39, n. 3, p. 306–316, 2007.

ZBBR. **Software ZBBR - Zoneamento Bioclimático do Brasil**LabEEE - Universidade Federal de São Carlos, , 2004.

ZILLES, R. et al. **Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica**. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

ZOMER, C. D. et al. Performance compromises of building-integrated and building-applied photovoltaics (BIPV and BAPV) in Brazilian airports. **Energy and Buildings**, v. 66, p. 607–615, 2013.

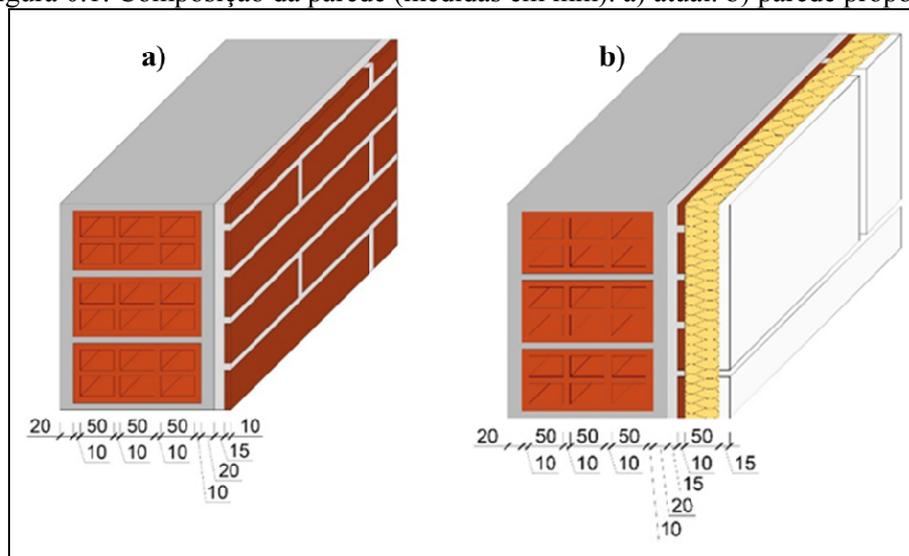
ZR, D. L.; MOCHTAR, S. Application of Bioclimatic Parameter as Sustainability Approach on Multi-story Building Design in Tropical Area. **Procedia Environmental Sciences**, v. 17, p. 822–830, 2013.

## ANEXO A – Cálculo da transmitância térmica da parede e da cobertura segundo a ABNT NBR 15.220

### A) Transmitância térmica das paredes externas

A Figura 0.1a apresenta a composição das paredes externas do prédio onde, do lado exterior (direita) tem um recobrimento cerâmico de 1 cm, uma capa de argamassa de 1,5 cm e depois 2 cm de reboco até chegar ao tijolo de 19 cm de largura. Do lado interno (esquerda), tem só uma capa de reboco de 2 cm. Em alguns casos a parede chega a ter 35 cm, mas foi tomado como valor padrão 25,5 cm de largura em geral. A Figura 0.1b apresenta a parede existente com os componentes definidos para convertê-la em parede ventilada com o objetivo de diminuir a carga térmica. Foi acrescentada a espessura da parede com 5cm de poliestireno extrudado e 1,5 cm de peças cerâmicas de recobrimento.

Figura 0.1: Composição da parede (medidas em mm). a) atual. b) parede proposta.



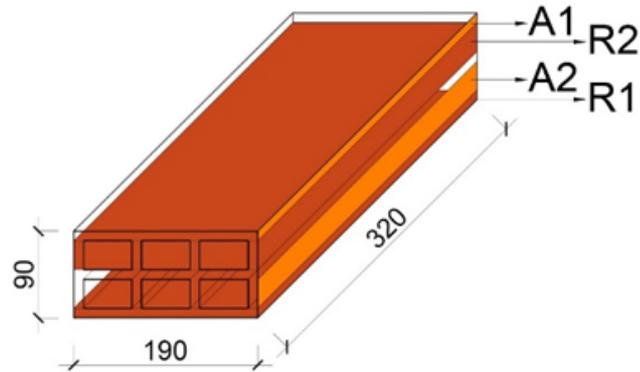
Fonte: Próprio autor.

#### • Método de cálculo

Se a parede tem diferentes componentes como é o caso tratado neste trabalho, é calculada a resistência térmica para cada um destes por separado.

O primeiro passo é calcular a resistência térmica do tijolo. A Figura 0.2 apresenta um diagrama esquemático do tijolo presente no edifício estudado, mostrando as variáveis utilizadas no cálculo da resistência térmica.

Figura 0.2: Diagrama esquemático do tijolo presente no edifício estudado.



Fonte: Próprio autor.

Onde  $R_1$  é a resistência térmica do material analisado que neste caso é cerâmica ( $\text{m}^2\text{K/W}$ );  $R_2$  é a resistência térmica da cerâmica mais a câmara de ar presente nos furos do tijolo ( $\text{m}^2\text{K/W}$ ) e  $A_1$  e  $A_2$  representam a área ( $\text{m}^2$ ) onde vai ser calculada a resistência térmica.

Primeiro foi calculada a resistência térmica do material analisado ( $R_1$ ), que neste caso é cerâmica, de acordo com a Equação 0.1:

$$R_1 = \frac{e_{ceramica}}{\lambda_{ceramica}} \quad \text{Equação (0.1)}$$

Em seguida foi calculada a resistência térmica da cerâmica mais a câmara de ar presente nos furos do tijolo ( $R_2$ ), conforme Equação 0.2:

$$R_2 = \frac{e_{ceramica}}{\lambda_{ceramica}} + R_{ar} + \frac{e_{ceramica}}{\lambda_{ceramica}} + R_{ar} + \frac{e_{ceramica}}{\lambda_{ceramica}} + R_{ar} + \frac{e_{ceramica}}{\lambda_{ceramica}} \quad \text{Equação (0.2)}$$

Onde  $R_{ar}$  é um valor dependente da largura da câmara de ar e a direção do fluxo de calor, localizado na Tabela B.1 da NBR 15220 – 2;  $e$  é a espessura da camada ( $\text{m}^2$ ) e  $\lambda$  é a condutividade térmica do material ( $\text{W/m}\cdot\text{K}$ ); localizado na tabela B.1 da NBR 15220 – 2.

Em seguida, com a Equação 0.3 foi definido o valor da resistência térmica do tijolo ( $R_{tijolo}$ ):

$$R_{\text{tijolo}} = \frac{3 \cdot A_1 + 2 \cdot A_2}{\frac{3 \cdot A_1}{R_1} + \frac{2 \cdot A_2}{R_2}} \quad \text{Equação (0.3)}$$

Onde os números 2 e 3 indicam a quantidade de vezes que o material está presente como componente do tijolo. Logo é calculado o total da resistência térmica com a Equação 0.4 e o inverso desse valor, segundo a Equação 0.5, é a transmitância térmica  $U$  ( $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ).

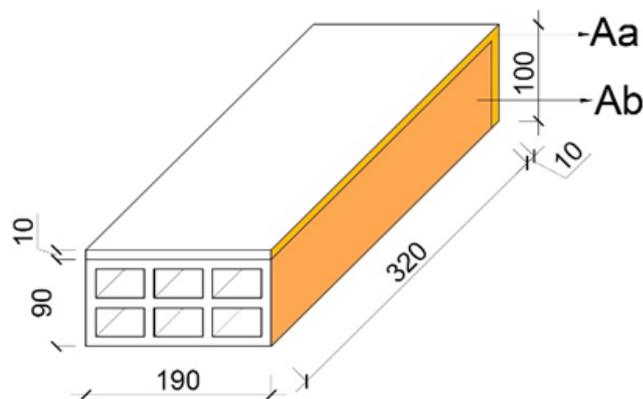
$$R_T = R_{si} + R_{\text{tijolo}} + R_{se} \quad \text{Equação (0.4)}$$

$$U = \frac{1}{R_T} \quad \text{Equação (0.5)}$$

Onde  $R_T$  é a resistência total do tijolo ( $\text{m}^2\text{K}/\text{W}$ );  $R_{si}$  e  $R_{se}$  são as resistências superficiais externa e interna, obtidas da Tabela A.1 da norma NBR 15220-2.

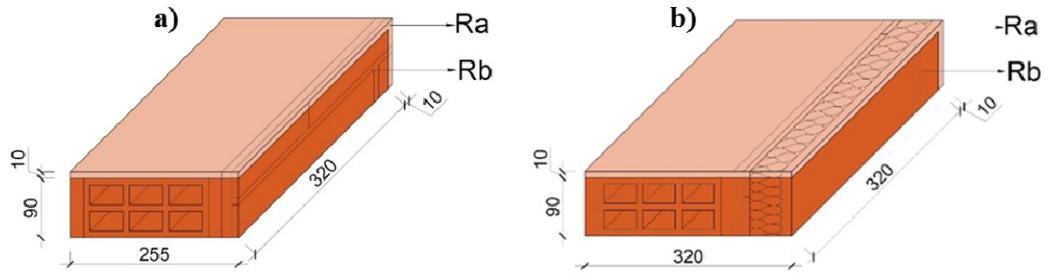
Continuando o cálculo são utilizadas as mesmas Equações 0.1, 0.2, 0.3 e 0.4 tendo em consideração todos os componentes da parede como está apresentado nas Figuras 0.3 e 0.4 e nas Equações de 0.6 a 0.10.

Figura 0.3: Representação gráfica de  $A_a$  e  $A_b$ .



Fonte: Próprio autor.

Figura 0.4: Representação gráfica de  $R_a$ , e  $R_b$ . a) para a parede atual. b) para a parede proposta.



Fonte: Próprio autor.

$$R_a = \frac{e_{reboco}}{\lambda_{reboco}} + \frac{e_{argamassa}}{\lambda_{argamassa}} + \frac{e_{reboco}}{\lambda_{reboco}} + \frac{e_{argamassa}}{\lambda_{argamassa}} + \frac{e_{ceramica}}{\lambda_{ceramica}} \quad \text{Equação (0.6)}$$

$$R_{b\text{ atual}} = \frac{e_{reboco}}{\lambda_{reboco}} + R_{tijolo} + \frac{e_{reboco}}{\lambda_{reboco}} + \frac{e_{argamassa}}{\lambda_{argamassa}} + \frac{e_{ceramica}}{\lambda_{ceramica}} \quad \text{Equação (0.7)}$$

$$R_{b\text{ mod.}} = \frac{e_{reboco}}{\lambda_{reboco}} + R_{tijolo} + \frac{e_{reboco}}{\lambda_{reboco}} + \frac{e_{argamassa}}{\lambda_{argamassa}} + \frac{e_{ceramica}}{\lambda_{ceramica}} + \frac{e_{isolante}}{\lambda_{isolante}} + \frac{e_{ceramica}}{\lambda_{ceramica}} \quad \text{Equação (0.8)}$$

$$R_{parede} = \frac{3 \cdot A_a + 2 \cdot A_b}{\frac{3 \cdot A_a}{R_a} + \frac{3 \cdot A_b}{R_b}} \quad \text{Equação (0.9)}$$

$$R_T = R_{st} + R_{parede} + R_{se} \quad \text{Equação (0.10)}$$

O cálculo da transmitância térmica da parede na condição atual deu como resultado 1,8 W/m<sup>2</sup>K. Este valor é comparado com as diferentes classificações especificadas pela RTQ-C coincidindo com a classificação Nível B, onde a transmitância térmica das paredes não pode ultrapassar os 2 W/m<sup>2</sup>K segundo a faixa estabelecida pela RTQ-C, para a zona bioclimática 2 definida pela NBR 15.220-3 onde está localizado o prédio. Já a modificação com a adição do isolante térmico, neste caso poliestireno extrudado, e a peça cerâmica de

recobrimento da parede ventilada, o resultado da transmitância térmica foi de 0,467 W/m<sup>2</sup>K obtendo a classificação de Nível A.

- **Cores e absorvância de superfícies para paredes**

As paredes do prédio estão revestidas de peças cerâmicas que devido a classificação do RTQ-C pertence ao nível B, pois não está dentro do limite de  $\alpha \leq 0,50$ . Ao colocar a parede ventilada com recobrimento cerâmico da cor branca a absorvância muda para 0,20 conseguindo atingir o Nível A.

### **B) Transmitância térmica do teto**

Para o cálculo da transmitância térmica da cobertura, foi medida a área desta sem contar a área da calha.

O primeiro passo na metodologia é a avaliação da ventilação na câmara de ar que se encontra entre a laje e o teto de zinco. Foi assumida uma altura de 10cm para abertura de ventilação de ambos lados. Foi obtido como resultado câmara de ar muito ventilada, segundo a localizado na Tabela 1 da NBR 15220-2:

$$\frac{S}{A} > 30 \rightarrow \text{Muito Ventilada}$$

Onde  $S$  é a área de entrada da câmara de ar ventilada de ambos lados da cobertura (cm<sup>2</sup>) e  $A$  é a área da cobertura (m<sup>2</sup>).

Depois disso é calculada a resistência térmica (Equação 0.11) considerando os diferentes componentes da cobertura: telhas de zinco de 0,0008 m, uma câmara de ar de 0,835 m e uma laje de 0,12 m de espessura.

$$R_t = \frac{e_{\text{zinco}}}{\lambda_{\text{zinco}}} + R_{\text{ar}} + \frac{e_{\text{concreto}}}{\lambda_{\text{concreto}}} \quad \text{Equação (0.11)}$$

Onde  $R_T$  é a resistência térmica do teto (m<sup>2</sup>K/W);  $R_{\text{ar}}$  é o valor dependente da largura da câmara de ar e a direção do fluxo de calor (m<sup>2</sup>K/W), localizado na tabela B.1 da NBR

15220 – 2;  $e$  é a espessura da camada do material analisado (m) e  $\lambda$  é a condutividade térmica do material (W/m·K) localizado na Tabela B.1 da NBR 15220 – 2.

Depois de calculada as resistências térmicas de todos os componentes estas são somadas para achar o valor total e o inverso deste é a transmitância térmica como foi feito nas Equações 0.4 e 0.5 utilizadas anteriormente.

O valor obtido da transmitância térmica da cobertura (teto) na condição atual foi de  $U= 1,47 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Após realizada a proposta de modificação da cobertura com a substituição da telha de zinco comum por telha sanduiche, foi refeito o cálculo usando o valor de  $R_{tsanduich} = 1,25 \text{ (m}^2\text{K/W)}$  segundo catalogo dos fornecedores. Substituindo este valor na Equação 0.11 tem-se:

$$R_T = R_{tsanduich} + R_{ar} + \frac{e_{concreto}}{\lambda_{concreto}}$$

Recalculando  $R_T$  o valor final obtido foi de  $U= 0,46 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

## ANEXO B – Planilhas Orçamentárias e Análise Financeira

Tabela 0.1: Planilha orçamentária da obra – ações passivas.

ITEM	REF. SINAPI	DESCRIÇÃO	QUANTIDADE	UNIDADE	PREÇO	TOTAL
<b>UNIFEI</b>						
<b>OBRA: RETROFIT BLOCO M3 PARA EEZ</b>						
<b>REFERENCIA: SINAP ABRIL 2018 E SETOP-SUL MG ABRIL2018</b>						
(Desonerada)						
<b>1 Serviços Preliminares</b>						
1.1	74209/001	PLACA DE OBRA EM CHAPA DE ACO GALVANIZADO	2,00	m²	313,55	627,10
<b>2 FUNDAÇÕES (estacas, blocos e baldrame)</b>						
2.1	96522	ESCAVACAO MANUAL DE VALAS EM TERRA COMPACTA, PROF. DE 0 M < H <= 1 M	13,14	m³	91,81	1.206,38
2.2	89206	ESTACA PRE-MOLDADA CONCRETO ARMADO 20 T, INCLUSIVE CRAVACAO/EMENDAS.	131,28	m	56,00	7.351,68
2.3	92718	CONCRETO USINADO BOMBEADO FCK=25MPA, INCLUSIVE LANÇAMENTO E ADENSAMENTO	3,94	m³	398,70	1.570,88
2.4	96543	ARMAÇAO ACO CA-50, DIAM. 6,3 (1/4) À 12,5MM(1/2) - FORNECIMENTO/ CORTE(PERDA DE 10%) / DOBRA / COLOCAÇÃO.	71,08	Kg	10,22	726,44
2.5	96543	ARMAÇAO DE ACO CA-60 DIAM. 3,4 A 6,0MM.- FORNECIMENTO / CORTE (C/PERDA DE 10%) / DOBRA / COLOCAÇÃO.	118,28	KG	10,22	1.208,82
2.6	96529	FORMA TABUA PARA CONCRETO EM FUNDACAO C/ REAPROVEITAMENTO 5X	38,94	m²	108,80	4.236,67
2.7	5968	IMPERMEABILIZACAO DE SUPERFICIE COM ARMAGASSA DE CIMENTO E AREIA (GROSSA), TRACO 1:3, COM ADITIVO IMPERMEABILIZANTE, E=2,5CM.	28,80	m²	30,65	882,72
2.9	53527	REATERRO COMPACTADO DE VALA MANUAL	11,52	m³	0,83	9,56
<b>4 Estruturas de concreto</b>						
4.1	96259	FORMA MADEIRA COMP RESINADA 12MM P/ESTRUTURA REAPROV 8 VEZES - CORTE/MONTAGEM/ESCORAMENTO/DESFORMA	121,52	m²	122,39	14.872,83
4.2	92718	CONCRETO ESTRUTURAL FCK=25MPA, VIRADO EM BÊTONEIRA, NA OBRA, SEM LANÇAMENTO	7,30	m³	398,70	2.911,04
4.4	96543	ARMAÇAO DE ACO CA-60 DIAM. 3,4 A 6,0MM.- FORNECIMENTO / CORTE (C/PERDA DE 10%) / DOBRA / COLOCAÇÃO.	317,38	kg	10,22	3.243,62
4.5	96543	ARMAÇAO ACO CA-50, DIAM. 6,3 (1/4) À 12,5MM(1/2) - FORNECIMENTO/ CORTE(PERDA DE 10%) / DOBRA / COLOCAÇÃO.	666,01	kg	10,22	6.806,62
<b>5 Demolições e retiradas</b>						
5.1	97622	DEMOLIÇÃO DE ALVENARIA PARA ABERTURA DAS JANELAS	22,10	m³	32,52	718,69
5.2	97628	DEMOLIÇÃO DE LAJE PARA ABERTURAS ZENITIAS	14,00	m³	160,70	2.249,80
5.3	97645	REMOÇÃO DE CAIXILHOS DE ALUMINIO	153,50	m³	15,86	2.434,51
	97647	REMOÇÃO DE TELHAS GALVANIZADAS	692,10	m²	2,12	1.467,25
<b>6 Alvenaria e divisões</b>						
6.1	72131	ALVENARIA EM TIJOLO CERAMICO FURADO 10X20X20CM, 1 VEZ, ASSENTADO EM ARGAMASSA TRACO 1:5 (CIMENTO E AREIA), E=1CM	22,10	m²	97,07	2.145,25
<b>7 Esquadrias e Brises</b>						
7.1		BRISAS DE ALUMINIO	194,86	m²		
7.2	94575	CAIXILHOS DE ALUMINIO ANODIZADO	131,40	uni.	451,90	59.379,66
<b>8 Revestimentos</b>						
8.1		FACHADA VENTILADA	699,00	m²	255,70	178.734,30
<b>9 Cobertura</b>						
9.1	SETOP-SUL MG ABRIL2018	TELHA TERMO ACÚSTICA	105,21	m²	103,00	10.836,63
<b>10 Pintura</b>						
10.1	88482	FUNDO SELADOR ACRILICO AMBIENTES INTERNOS/EXTERNOS, UMA DEMA0	279,38	m²	2,62	731,98
11.2	88488	PINTURA LATEX ACRILICA AMBIENTES INTERNOS/EXTERNOS, DUAS DEMA0S	279,38	m²	10,45	2.919,52
<b>12 Serviços Finais</b>						
12.1	9537	LIMPEZA FINAL DA OBRA	746,00	m²	1,68	1.253,28
					<b>CUSTO TOTAL</b>	<b>308.525,24</b>
					<b>BDI25,5%</b>	<b>78.673,94</b>
					<b>VALOR TOTAL COM BDI</b>	<b>387.199,18</b>

Fonte: Próprio autor.

Tabela 0.2: Planilha orçamentária da troca das lâmpadas.

UNIFEI						
OBRA: RETROFIT BLOCO M3 PARA EEZ						
REFERENCIA: SINAP ABRIL 2018 E SETOP-SUL MG ABRIL2018						
(Desonerada)						
ITEM	REF. SINAPI	DESCRIÇÃO	QUANTIDADE	UNIDADE	PREÇO UNITÁRIO	TOTAL
1		<b>Demolições e retiradas</b>				
1.1	97665	REMOÇÃO DE LÂMPADAS FLUORESCENTES	159,00	u	0,75	119,25
2		<b>Instalações elétricas</b>				
2.1	93043	LÂMPADAS LED	525	u	27,73	14.558,25
					<b>CUSTO TOTAL</b>	<b>14.677,50</b>
					<b>BDI25,5%</b>	<b>3.742,76</b>
					<b>VALOR TOTAL COM BDI</b>	<b>18.420,26</b>

Fonte: Próprio autor.

Tabela 0.3: Planilha orçamentária do sistema fotovoltaico.

DESCRIÇÃO	QUANTIDADE	VALOR TOTAL
MÓDULOS CANADIAN 350Wp	180	R\$ 139.862,00
INVERSOR SMA 30Wp	2	R\$ 38.170,00
SMART LOGGER 1000	1	R\$ 2.180,00
ESTRUTURA	1	R\$ 20.500,00
CABO SOLAR	300 metros	R\$ 1.300,00
CONECTORES MC4	20	R\$ 300,00
DPS	4	R\$ 250,00
DISJUNTOR	2	R\$ 100,00
AUTO TRAFÓ 60KVA - 380/220	1	R\$ 10.200,00
MATERIAL ELÉTRICO	1	R\$ 3.500,00
MÃO DE OBRA	1	R\$ 13.300,00
<b>VALOR TOTAL =</b>		<b>R\$ 229.662,00</b>

Fonte: Próprio autor.

Custos fornecidos pela empresa **MB ELÉTRICA SOLUÇÕES ENERGÉTICAS:**[www.mbeletrica.com.br](http://www.mbeletrica.com.br)

Dr. Jesus Ribeiro Pires, nº 255, sala 02, Fatima 1

Pouso Alegre-MG – CEP 3755-000

Tel.: (35) 3425-7000 / Cel.: (35) 99931-9890

Tabela 0.4: Análise financeira do sistema fotovoltaico.

Dados de entrada			Geração		Receitas		Despesas			Fluxo de Caixa			
			Ano	Geração	Tarifa	Valor da geração	Consumo	venda excedente	investimento	taxa de disponibilidade	manut.	FC anual	FC Acumulado
Irradiação	1579,17	kWh/m².ano	0	77.066,14	R\$ 0,40750	R\$ 30.826,46	R\$ 27.045,83	R\$ 3.780,63	-R\$ 229.662,00	-R\$ 489,00	R\$ -	-R\$ 199.324,54	-R\$ 199.324,54
Consumo do edifício	67614,58	kWh/ano	1	76.680,81	R\$ 0,4075	R\$ 31.179,30	R\$ 27.552,81	R\$ 3.626,49		-R\$ 489,00	-R\$ 2.296,62	R\$ 28.393,69	-R\$ 170.930,86
Tarifa	R\$ 0,4074981	/kWh	2	76.297,41	R\$ 0,4075	R\$ 31.025,94	R\$ 27.552,81	R\$ 3.473,13		-R\$ 489,00	-R\$ 2.296,62	R\$ 28.240,32	-R\$ 142.690,53
Taxa de Inflação anual		ao ano	3	75.915,92	R\$ 0,4075	R\$ 30.873,35	R\$ 27.552,81	R\$ 3.320,54		-R\$ 489,00	-R\$ 2.296,62	R\$ 28.087,73	-R\$ 114.602,80
Potência 180 paineis	60,67	kWp	4	75.536,34	R\$ 0,4075	R\$ 30.721,52	R\$ 27.552,81	R\$ 3.168,71		-R\$ 489,00	-R\$ 2.296,62	R\$ 27.935,90	-R\$ 86.666,90
Performance Ratio	85%		5	75.158,66	R\$ 0,4075	R\$ 30.570,44	R\$ 27.552,81	R\$ 3.017,63		-R\$ 489,00	-R\$ 2.296,62	R\$ 27.784,83	-R\$ 58.882,08
Energia	76.646,72	kWh/ano	6	74.782,86	R\$ 0,4075	R\$ 30.420,13	R\$ 27.552,81	R\$ 2.867,32		-R\$ 489,00	-R\$ 2.296,62	R\$ 27.634,51	-R\$ 31.247,57
	0,005		7	74.408,95	R\$ 0,4075	R\$ 30.270,56	R\$ 27.552,81	R\$ 2.717,75		-R\$ 489,00	-R\$ 2.296,62	R\$ 27.484,94	-R\$ 3.762,63
Degradação	0,5%	ao ano	8	74.036,90	R\$ 0,4075	R\$ 30.121,74	R\$ 27.552,81	R\$ 2.568,93		-R\$ 489,00	-R\$ 2.296,62	R\$ 27.336,12	R\$ 23.573,50
Ações Passivas			9	73.666,72	R\$ 0,4075	R\$ 29.973,67	R\$ 27.552,81	R\$ 2.420,86		-R\$ 489,00	-R\$ 2.296,62	R\$ 27.188,05	R\$ 50.761,55
Troca de lâmpadas			10	73.298,39	R\$ 0,4075	R\$ 29.826,33	R\$ 27.552,81	R\$ 2.273,52	R\$ 38.170,00	-R\$ 489,00	-R\$ 2.296,62	R\$ 65.210,72	R\$ 115.972,26
Manutenção	1,0%	ao ano	11	72.931,89	R\$ 0,4075	R\$ 29.679,74	R\$ 27.552,81	R\$ 2.126,93		-R\$ 489,00	-R\$ 2.296,62	R\$ 26.894,12	R\$ 142.866,38
Sistema fotovoltaico	R\$ 229.662,00		12	72.567,24	R\$ 0,4075	R\$ 29.533,87	R\$ 27.552,81	R\$ 1.981,06		-R\$ 489,00	-R\$ 2.296,62	R\$ 26.748,26	R\$ 169.614,64
Investimentoinicial	R\$ 229.662,00		13	72.204,40	R\$ 0,4075	R\$ 29.388,74	R\$ 27.552,81	R\$ 1.835,93		-R\$ 489,00	-R\$ 2.296,62	R\$ 26.603,12	R\$ 196.217,76
Juros (TMA)	6,4%	ao ano	14	71.843,38	R\$ 0,4075	R\$ 29.244,33	R\$ 27.552,81	R\$ 1.691,52		-R\$ 489,00	-R\$ 2.296,62	R\$ 26.458,71	R\$ 222.676,48
			15	71.484,16	R\$ 0,4075	R\$ 29.100,64	R\$ 27.552,81	R\$ 1.547,83		-R\$ 489,00	-R\$ 2.296,62	R\$ 26.315,03	R\$ 248.991,50
			16	71.126,74	R\$ 0,4075	R\$ 28.957,68	R\$ 27.552,81	R\$ 1.404,87		-R\$ 489,00	-R\$ 2.296,62	R\$ 26.172,06	R\$ 275.163,56
			17	70.771,11	R\$ 0,4075	R\$ 28.815,42	R\$ 27.552,81	R\$ 1.262,61		-R\$ 489,00	-R\$ 2.296,62	R\$ 26.029,80	R\$ 301.193,37
Anos	VPL	TIR	18	70.417,25	R\$ 0,4075	R\$ 28.673,88	R\$ 27.552,81	R\$ 1.121,07		-R\$ 489,00	-R\$ 2.296,62	R\$ 25.888,26	R\$ 327.081,63
25	R\$ 165.548,64	14,200%	19	70.065,16	R\$ 0,4075	R\$ 28.533,05	R\$ 27.552,81	R\$ 980,24		-R\$ 489,00	-R\$ 2.296,62	R\$ 25.747,43	R\$ 352.829,06
20	R\$ 116.729,22	13,686%	20	69.714,84	R\$ 0,4075	R\$ 28.392,92	R\$ 27.552,81	R\$ 840,11	R\$ 38.170,00	-R\$ 489,00	-R\$ 2.296,62	R\$ 63.777,30	R\$ 416.606,35
15	R\$ 81.564,81	12,113%	21	69.366,26	R\$ 0,4075	R\$ 28.253,49	R\$ 27.552,81	R\$ 700,68		-R\$ 489,00	-R\$ 2.296,62	R\$ 25.467,87	R\$ 442.074,22
10	R\$ 21.911,31	8,505%	22	69.019,43	R\$ 0,4075	R\$ 28.114,75	R\$ 27.552,81	R\$ 561,94		-R\$ 489,00	-R\$ 2.296,62	R\$ 25.329,14	R\$ 467.403,36
5	-R\$ 82.203,49	-10,674%	23	68.674,34	R\$ 0,4075	R\$ 27.976,71	R\$ 27.552,81	R\$ 423,90		-R\$ 489,00	-R\$ 2.296,62	R\$ 25.191,10	R\$ 492.594,45
Payback	7 anos e 11 mês(es)		24	68.330,96	R\$ 0,4075	R\$ 27.839,37	R\$ 27.552,81	R\$ 286,56		-R\$ 489,00	-R\$ 2.296,62	R\$ 25.053,75	R\$ 517.648,20
			25	67.989,31	R\$ 0,4075	R\$ 27.702,70	R\$ 27.552,81	R\$ 149,89		-R\$ 489,00	-R\$ 2.296,62	R\$ 24.917,09	R\$ 542.565,29

Fonte: Próprio autor.

Tabela 0.5: Análise financeira do sistema fotovoltaico + ações passivas.

Dados de entrada			Geração			Receitas		Despesas			Fluxo de Caixa		
			Ano	Geração	Tarifa	Valor da geração	Consumo	venda excedente	investimento	taxa de disponibilidade	manut.	FC anual	FC Acumulado
Irradiação	1579,17	kWh/m <sup>2</sup> .ano	0	77.066,14	R\$ 0,40750	R\$ 30.826,46	R\$ 27.045,83	R\$ 3.780,63	-R\$ 616.861,18	-R\$ 489,00	R\$ -	-R\$ 586.523,72	-R\$ 586.523,72
Consumo do edifício	67614,58	kWh/ano	1	76.680,81	R\$ 0,4075	R\$ 31.179,30	R\$ 27.552,81	R\$ 3.626,49		-R\$ 489,00	-R\$ 2.296,62	R\$ 28.393,69	-R\$ 558.130,03
Tarifa	R\$ 0,4074981	/kWh	2	76.297,41	R\$ 0,4075	R\$ 31.025,94	R\$ 27.552,81	R\$ 3.473,13		-R\$ 489,00	-R\$ 2.296,62	R\$ 28.240,32	-R\$ 529.889,71
Taxa de Inflação anual		ao ano	3	75.915,92	R\$ 0,4075	R\$ 30.873,35	R\$ 27.552,81	R\$ 3.320,54		-R\$ 489,00	-R\$ 2.296,62	R\$ 28.087,73	-R\$ 501.801,98
Potência 180 paineis	60,67	kWp	4	75.536,34	R\$ 0,4075	R\$ 30.721,52	R\$ 27.552,81	R\$ 3.168,71		-R\$ 489,00	-R\$ 2.296,62	R\$ 27.935,90	-R\$ 473.866,08
Performance Ratio	85%		5	75.158,66	R\$ 0,4075	R\$ 30.570,44	R\$ 27.552,81	R\$ 3.017,63		-R\$ 489,00	-R\$ 2.296,62	R\$ 27.784,83	-R\$ 446.081,26
Energia	76.646,72	kWh/ano	6	74.782,86	R\$ 0,4075	R\$ 30.420,13	R\$ 27.552,81	R\$ 2.867,32		-R\$ 489,00	-R\$ 2.296,62	R\$ 27.634,51	-R\$ 418.446,75
	0,005		7	74.408,95	R\$ 0,4075	R\$ 30.270,56	R\$ 27.552,81	R\$ 2.717,75		-R\$ 489,00	-R\$ 2.296,62	R\$ 27.484,94	-R\$ 390.961,80
Degradação	0,5%	ao ano	8	74.036,90	R\$ 0,4075	R\$ 30.121,74	R\$ 27.552,81	R\$ 2.568,93		-R\$ 489,00	-R\$ 2.296,62	R\$ 27.336,12	-R\$ 363.625,68
Ações Passivas	R\$ 387.199,18		9	73.666,72	R\$ 0,4075	R\$ 29.973,67	R\$ 27.552,81	R\$ 2.420,86		-R\$ 489,00	-R\$ 2.296,62	R\$ 27.188,05	-R\$ 336.437,63
Troca de lâmpadas			10	73.298,39	R\$ 0,4075	R\$ 29.826,33	R\$ 27.552,81	R\$ 2.273,52	R\$ 38.170,00	-R\$ 489,00	-R\$ 2.296,62	R\$ 65.210,72	-R\$ 271.226,91
Manutenção	1,0%	ao ano	11	72.931,89	R\$ 0,4075	R\$ 29.679,74	R\$ 27.552,81	R\$ 2.126,93		-R\$ 489,00	-R\$ 2.296,62	R\$ 26.894,12	-R\$ 244.332,79
Sistema fotovoltaico	R\$ 229.662,00		12	72.567,24	R\$ 0,4075	R\$ 29.533,87	R\$ 27.552,81	R\$ 1.981,06		-R\$ 489,00	-R\$ 2.296,62	R\$ 26.748,26	-R\$ 217.584,54
			13	72.204,40	R\$ 0,4075	R\$ 29.388,74	R\$ 27.552,81	R\$ 1.835,93		-R\$ 489,00	-R\$ 2.296,62	R\$ 26.603,12	-R\$ 190.981,41
Investimento inicial	R\$ 616.861,18		14	71.843,38	R\$ 0,4075	R\$ 29.244,33	R\$ 27.552,81	R\$ 1.691,52		-R\$ 489,00	-R\$ 2.296,62	R\$ 26.458,71	-R\$ 164.522,70
			15	71.484,16	R\$ 0,4075	R\$ 29.100,64	R\$ 27.552,81	R\$ 1.547,83		-R\$ 489,00	-R\$ 2.296,62	R\$ 26.315,03	-R\$ 138.207,67
Juros (TMA)	6,4%	ao ano	16	71.126,74	R\$ 0,4075	R\$ 28.957,68	R\$ 27.552,81	R\$ 1.404,87		-R\$ 489,00	-R\$ 2.296,62	R\$ 26.172,06	-R\$ 112.035,62
			17	70.771,11	R\$ 0,4075	R\$ 28.815,42	R\$ 27.552,81	R\$ 1.262,61		-R\$ 489,00	-R\$ 2.296,62	R\$ 26.029,80	-R\$ 86.005,81
Anos	VPL	TIR	18	70.417,25	R\$ 0,4075	R\$ 28.673,88	R\$ 27.552,81	R\$ 1.121,07		-R\$ 489,00	-R\$ 2.296,62	R\$ 25.888,26	-R\$ 60.117,55
25	-R\$ 221.650,53	1,900%	19	70.065,16	R\$ 0,4075	R\$ 28.533,05	R\$ 27.552,81	R\$ 980,24		-R\$ 489,00	-R\$ 2.296,62	R\$ 25.747,43	-R\$ 34.370,12
20	-R\$ 270.469,96	0,453%	20	69.714,84	R\$ 0,4075	R\$ 28.392,92	R\$ 27.552,81	R\$ 840,11	R\$ 38.170,00	-R\$ 489,00	-R\$ 2.296,62	R\$ 63.777,30	R\$ 29.407,18
15	-R\$ 305.634,37	-3,165%	21	69.366,26	R\$ 0,4075	R\$ 28.253,49	R\$ 27.552,81	R\$ 700,68		-R\$ 489,00	-R\$ 2.296,62	R\$ 25.467,87	R\$ 54.875,04
10	-R\$ 365.287,87	-9,175%	22	69.019,43	R\$ 0,4075	R\$ 28.114,75	R\$ 27.552,81	R\$ 561,94		-R\$ 489,00	-R\$ 2.296,62	R\$ 25.329,14	R\$ 80.204,18
5	-R\$ 469.402,67	-34,357%	23	68.674,34	R\$ 0,4075	R\$ 27.976,71	R\$ 27.552,81	R\$ 423,90		-R\$ 489,00	-R\$ 2.296,62	R\$ 25.191,10	R\$ 105.395,28
			24	68.330,96	R\$ 0,4075	R\$ 27.839,37	R\$ 27.552,81	R\$ 286,56		-R\$ 489,00	-R\$ 2.296,62	R\$ 25.053,75	R\$ 130.449,02
Payback	19 anos e 11 mês(es)		25	67.989,31	R\$ 0,4075	R\$ 27.702,70	R\$ 27.552,81	R\$ 149,89		-R\$ 489,00	-R\$ 2.296,62	R\$ 24.917,09	R\$ 155.366,11

Fonte: Próprio autor.

Tabela 0.6: Análise financeira da troca das lâmpadas.

Dados de entrada			Geração			Despesas			Fluxo de Caixa	
			Ano	Geração	Tarifa	investimento	manut.	RECEITA	FC anual	FC Acumulado
			0	6.505,42	R\$ 0,40750	-R\$ 18.420,26	R\$ -	R\$ 2.650,95	-R\$ 15.769,32	-R\$ 15.769,32
Tarifa	R\$ 0,40749809	/kWh	1	6.505,42	R\$ 0,4075		-R\$ 184,20	R\$ 2.650,95	R\$ 2.466,74	-R\$ 13.302,57
Reajuste da tarifa de energia (inflação)		ao ano	2	6.505,42	R\$ 0,4075		-R\$ 184,00	R\$ 2.650,95	R\$ 2.466,95	-R\$ 10.835,63
			3	6.505,42	R\$ 0,4075		-R\$ 184,00	R\$ 2.650,95	R\$ 2.466,95	-R\$ 8.368,68
			4	6.505,42	R\$ 0,4075		-R\$ 184,00	R\$ 2.650,95	R\$ 2.466,95	-R\$ 5.901,73
			5	6.505,42	R\$ 0,4075		-R\$ 184,00	R\$ 2.650,95	R\$ 2.466,95	-R\$ 3.434,79
Energia POUPADA	6.505,42	kWh/ano	6	6.505,42	R\$ 0,4075		-R\$ 184,00	R\$ 2.650,95	R\$ 2.466,95	-R\$ 967,84
			7	6.505,42	R\$ 0,4075		-R\$ 184,00	R\$ 2.650,95	R\$ 2.466,95	R\$ 1.499,10
			8	6.505,42	R\$ 0,4075		-R\$ 184,00	R\$ 2.650,95	R\$ 2.466,95	R\$ 3.966,05
			9	6.505,42	R\$ 0,4075		-R\$ 184,00	R\$ 2.650,95	R\$ 2.466,95	R\$ 6.433,00
Troca de lâmpadas	R\$ 18.420,26		10	6.505,42	R\$ 0,4075		-R\$ 184,00	R\$ 2.650,95	R\$ 2.466,95	R\$ 8.899,94
Manutenção	1,0%	ao ano	11	6.505,42	R\$ 0,4075		-R\$ 184,00	R\$ 2.650,95	R\$ 2.466,95	R\$ 11.366,89
			12	6.505,42	R\$ 0,4075		-R\$ 184,00	R\$ 2.650,95	R\$ 2.466,95	R\$ 13.833,84
			13	6.505,42	R\$ 0,4075		-R\$ 184,00	R\$ 2.650,95	R\$ 2.466,95	R\$ 16.300,78
Investimento total	R\$ 18.420,26		14	6.505,42	R\$ 0,4075		-R\$ 184,00	R\$ 2.650,95	R\$ 2.466,95	R\$ 18.767,73
			15	6.505,42	R\$ 0,4075		-R\$ 184,00	R\$ 2.650,95	R\$ 2.466,95	R\$ 21.234,67
Juros (TMA)	6,4%	ao ano	16	6.505,42	R\$ 0,4075		-R\$ 184,00	R\$ 2.650,95	R\$ 2.466,95	R\$ 23.701,62
			17	6.505,42	R\$ 0,4075		-R\$ 184,00	R\$ 2.650,95	R\$ 2.466,95	R\$ 26.168,57
Anos	VPL	TIR	18	6.505,42	R\$ 0,4075		-R\$ 184,00	R\$ 2.650,95	R\$ 2.466,95	R\$ 28.635,51
25	R\$ 14.602,45	15,188%	19	6.505,42	R\$ 0,4075		-R\$ 184,00	R\$ 2.650,95	R\$ 2.466,95	R\$ 31.102,46
20	R\$ 10.916,42	14,623%	20	6.505,42	R\$ 0,4075		-R\$ 184,00	R\$ 2.650,95	R\$ 2.466,95	R\$ 33.569,41
15	R\$ 7.576,12	13,212%	21	6.505,42	R\$ 0,4075		-R\$ 184,00	R\$ 2.650,95	R\$ 2.466,95	R\$ 36.036,35
10	R\$ 2.048,24	9,090%	22	6.505,42	R\$ 0,4075		-R\$ 184,00	R\$ 2.650,95	R\$ 2.466,95	R\$ 38.503,30
5	-R\$ 5.489,94	-7,667%	23	6.505,42	R\$ 0,4075		-R\$ 184,00	R\$ 2.650,95	R\$ 2.466,95	R\$ 40.970,24
			24	6.505,42	R\$ 0,4075		-R\$ 184,00	R\$ 2.650,95	R\$ 2.466,95	R\$ 43.437,19
Payback	6 anos e 10 mês(es)		25	6.505,42	R\$ 0,4075		-R\$ 184,00	R\$ 2.650,95	R\$ 2.466,95	R\$ 45.904,14

Fonte: Próprio autor.