

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS

Faculdade de Arquitetura e Urbanismo

Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo



Dissertação

Análise de viabilidade de um edifício comercial atingir o balanço energético nulo, a partir de diferentes níveis de eficiência energética, no extremo sul do Brasil

Ludimila Mallmann Schmalfuss

Pelotas, 2021

Ludimila Mallmann Schmalfluss

Análise de viabilidade de um edifício comercial atingir o balanço energético nulo, a partir de diferentes níveis de eficiência energética, no extremo sul do Brasil

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Arquitetura e Urbanismo.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Isabel Tourinho Salamoni

Coorientador: Prof. Dr. Eduardo Grala da Cunha

Pelotas, 2021

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas
Catalogação na Publicação

S347a Schmalfluss, Ludimila Mallmann

Análise de viabilidade de um edifício comercial atingir o balanço energético nulo, a partir de diferentes níveis de eficiência energética, no extremo sul do Brasil / Ludimila Mallmann Schmalfluss ; Isabel Tourinho Salamoni, orientadora ; Eduardo Grala da Cunha, coorientador. — Pelotas, 2021.

142 f. : il.

Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Pelotas, 2021.

1. Eficiência energética. 2. Balanço energético nulo. 3. Bipv. 4. Simulação computacional. 5. Viabilidade econômica. I. Salamoni, Isabel Tourinho, orient. II. Cunha, Eduardo Grala da, coorient. III. Título.

CDD : 720

Ludimila Mallmann Schmalfluss

Análise de viabilidade de um edifício comercial atingir o balanço energético nulo, a partir de diferentes níveis de eficiência energética, no extremo sul do Brasil

Dissertação aprovada, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Arquitetura e Urbanismo, Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Pelotas.

Data da defesa: 25 de março de 2021.

Banca examinadora:

Profa. Dra. Isabel Tourinho Salamoni (orientadora)
Doutora em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Dr. Eduardo Grala da Cunha (coorientador)
Doutor em Arquitetura pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Dr. Antônio César Silveira Baptista da Silva
Doutor em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Santa Catarina

Profa. Dra. Celina Maria Britto Correa
Doutora em Arquitetura pela Universidade Politécnica de Madrid

Profa. Dra. Ísis Portolan dos Santos
Doutora em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Santa Catarina

Agradecimentos

Agradeço, primeiramente, a Deus, pelo dom da vida e pela força que me concedeu ao longo dessa trajetória.

Aos meus pais, Laise e Rui, por sempre priorizarem meus estudos e apoiarem em todas as decisões. À minha irmã, Mirela, por ser amiga e companheira de toda a vida.

Ao Cristian, meu marido e maior companheiro, pelo amor, carinho, apoio e incentivo em todos os momentos. És parte fundamental desta conquista, sempre lembrando do meu potencial e sendo tão paciente, meu ponto de equilíbrio, por sempre ter a frase “calma, um dia de cada vez”, para conseguir alcançar meus objetivos e sonhos, que, na verdade, são nossos.

A toda minha família e amigos, pelo carinho, incentivo e compreensão.

A minha orientadora Isabel, pelos conhecimentos transmitidos, por acreditar no meu trabalho e por toda a força e dedicação. Agradeço também ao meu coorientador, Eduardo, por confiar na minha capacidade, oferecer todo o apoio e empenho.

A minha colega, amiga e incentivadora, Roseana, pela amizade sincera, trocas de conhecimento e pelo apoio de fundamental importância para que eu chegasse até aqui.

Aos colegas do Grupo de Estudos em Simulação de Eficiência Energética em Edificações (GES3E), pelas trocas de conhecimento, auxílio e colaboração.

Aos professores e colegas do PROGRAU que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho.

Aos membros da banca, pelas importantes contribuições para o aprimoramento da pesquisa.

Resumo

SCHMALFUSS, Ludimila Mallmann. **Análise de viabilidade de um edifício comercial atingir o balanço energético nulo, a partir de diferentes níveis de eficiência energética, no extremo sul do Brasil.** Orientadora: Isabel Tourinho Salamoni. 2021. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2021.

Apesar de diversificada, a matriz energética brasileira possui como principal fonte a hidráulica. Embora seja uma fonte renovável de energia, possui impactos socioambientais, alto custo de transmissão e, por se localizar longe dos centros urbanos, apresenta fragilidade. Considerando que o país possui extensa área territorial com diversificação climática, há potencial para exploração de outras FRE de geração distribuída, entre as quais destaca-se a energia solar, pelas tecnologias fotovoltaicas (FV). Por serem de fácil integração aos edifícios, estes responsáveis por elevado consumo energético, tal combinação é relevante para o futuro sustentável. Nesse contexto, a integração de tecnologias FV em edifícios comerciais mostra-se adequada, já que a predominância da ocupação e o maior consumo de energia ocorrem durante o dia, junto da produção de energia pelos módulos FV. Assim, o objetivo deste trabalho consiste em analisar a viabilidade econômica de um edifício horizontal de escritórios, no extremo sul do Brasil, atingir o balanço energético nulo a partir de diferentes níveis de eficiência energética. A metodologia contou com a simulação computacional, através do *software EnergyPlus*, e o cálculo de geração de energia FV, com o auxílio do programa Radiasol. Na análise de viabilidade econômica, foram utilizados os métodos de cálculo do Valor Presente Líquido e da Taxa Interna de Retorno, avaliando-se o investimento necessário para cada implantação de sistemas fotovoltaicos (SFV) propostos e os custos evitados com a economia de energia gerada. Os resultados indicaram que o objeto de estudo possui uma classificação “A” em eficiência energética, segundo a INI-C, possibilitando, assim, a identificação dos casos de referência iguais a B, C e D. Os casos A, B e C atingiram o balanço nulo através das tecnologias FV aplicadas na cobertura e em partes opacas das fachadas, enquanto o caso D não conseguiu compensar seu consumo anual através dos SFV, uma vez que não houve área suficiente para aplicação de módulos FV. Os resultados apontaram que quanto maior o nível de eficiência, mais rápido foi alcançado o balanço nulo e o retorno do investimento inicial da implantação dos SFV, observando-se uma variação de até 58,94% sobre o valor mínimo a ser investido. Pelo método TIR, verificou-se que mesmo em cenários menos favoráveis para investimento em SFV, foi obtido valor de 20,22% ao final do período de 25 anos (vida útil dos módulos), valor consideravelmente superior quando comparado à maior taxa de atratividade definida neste estudo (13,20%/ano), percentual de rentabilidade para investimentos bancários de baixo risco. Quanto ao método VPL, o tempo de retorno do investimento para o caso de maior eficiência energética foi de cinco anos e cinco meses, enquanto o de menor eficiência levou até 10 anos e oito meses, correspondente ao aumento de 96,92% entre os extremos. Assim, este estudo demonstrou a importância da relação da eficiência energética com a geração própria de energia para a obtenção de edificações com balanço nulo de energia.

Palavras-chave: Eficiência energética. Balanço energético nulo. BIPV. Simulação computacional. Viabilidade econômica.

Abstract

SCHMALFUSS, Ludimila Mallmann. **Analysis of Feasibility of a commercial building achieving zero energy balance, through different levels of energy efficiency, in the extreme south of Brazil.** Advisor: Isabel Tourinho Salamoni. 2021. Dissertation (Master Program in Architecture and Urbanism) – Faculty of Architecture and Urbanism, Federal University of Pelotas, Pelotas, 2021.

The Brazilian energy matrix, despite being diversified, has hydraulics as its main source. Although this is a renewable energy source (RES), it has great socioenvironmental impacts, high transmission costs and is fragile since it is centralized and far from urban centers. Considering that the country has a large territorial area with climatic diversification, there is potential for exploring other RES of distributed generation. From these, solar energy through photovoltaic technologies (PV) stands out. Because they are easy to integrate with buildings and considering that these are responsible for a high energy consumption, such a combination is a relevant factor for a sustainable future. In this context, the integration of PV technologies in commercial buildings has been shown to be adequate, as the predominance of occupation and the highest energy consumption occur during the day, simultaneously with the energy production by the PV modules. Hence, the objective of this work is to analyze the economic viability of a horizontal office building, in the extreme south of Brazil, to achieve zero energy balance through different levels of energy efficiency. For this purpose, the adopted methodology used computational simulation, through the EnergyPlus software, and the calculation of PV energy generation, with the help of the Radasol program. In the analysis of economic feasibility, the Net Present Value (NPV) and Internal Rate of Return (IRR) calculation methods were used, thus evaluating the investment required for each proposed photovoltaic system (PVS) deployment and the avoided costs with economy of generated energy. Results indicated that the object of study is classified A in energy efficiency, according to INI-C, thus enabling the identification of reference cases B, C and D. Cases A, B and C reached the zero energy balance, through PV technologies applied to the roof and the opaque parts of façades, and case D was not able to compensate its annual consumption through the PVS, as there was not enough area for the application of PV modules. Results also revealed that the higher the level of efficiency, the faster the zero energy balance and the return on the initial investment of the PVS implementation were achieved, observing a variation of up to 58.94% over the minimum amount to be invested. It was also verified, through the IRR method, that even in less favorable scenarios for investment with PVS, a value of 20.22% was obtained at the end of the 25-year period (useful life of the PV modules), a value considerably higher when compared to the highest rate of attractiveness defined in this study (13.20%/year), percentage of profitability for low-risk banking investments. As for the PVS method, the payback period for the case of greater energy efficiency was 5 years and 5 months, while the case of lower efficiency took up to 10 years and 8 months, corresponding to an increase of 96.92% between the extremes. This study demonstrated the importance of the relationship between energy efficiency and self-energy generation to obtain buildings with a zero energy balance.

Keywords: Energy efficiency. Zero energy balance. BIPV. Computer simulation. Economic viability.

Lista de Figuras

Figura 1 -	Matriz energética brasileira e outros países (dados do ano de 2019).....	25
Figura 2 -	Zoneamento bioclimático Brasileiro.....	26
Figura 3 -	Principais Políticas e Programas de incentivo à eficiência energética no Brasil.	29
Figura 4 -	Exemplo da nova proposta de ENCE para avaliação pelo método de simulação.	44
Figura 5 -	Evolução da geração de energia solar FV no mundo.	53
Figura 6 -	Mapa de irradiação global horizontal da Alemanha.....	54
Figura 7 -	Mapa de irradiação global horizontal da China.....	54
Figura 8 -	Mapa de irradiação global horizontal do Japão.	54
Figura 9 -	Mapa de irradiação global horizontal dos Estados Unidos.	54
Figura 10 -	Mapa de irradiação global horizontal da Itália.	55
Figura 11 -	Mapa de irradiação global horizontal do Brasil.	55
Figura 12 -	Participação no mercado mundial em tecnologia FV.....	59
Figura 13 -	Diagrama das principais tecnologias de células FV.	60
Figura 14 -	Esquema dos componentes de um módulo FV com células de silício cristalino (c-Si).....	60
Figura 15 -	Opções de instalações FV em edificações.	62
Figura 16 -	Exemplos de aplicação de FV.	63
Figura 17 -	Infográfico das etapas de pesquisa.	69
Figura 18 -	Planta de cobertura com orientação solar.	72
Figura 19 -	(a) e (b) Imagens fachadas nordeste e sudoeste.	72
Figura 20 -	Planta baixa pavimento térreo.	73
Figura 21 -	Planta baixa segundo pavimento.....	73
Figura 22 -	Planta baixa terceiro pavimento.	74
Figura 23 -	a) e b) Modelo tridimensional do caso base – SketchUp e Plugin Euclid.	75
Figura 24 -	Zonas Térmicas do Modelo de Simulação – Térreo.....	75
Figura 25 -	Zonas Térmicas do Modelo de Simulação – 2º pavimento.....	76
Figura 26 -	Zonas Térmicas do Modelo de Simulação – 3º pavimento.....	76

Figura 27 -	Configuração das paredes (a) Pavimento térreo (b) Segundo pavimento e (c) Terceiro pavimento.	78
Figura 28 -	Quadro de configurações das paredes do modelo caso base.	79
Figura 29 -	a) e b) Modelo tridimensional do caso de referência – SketchUp e Plugin Euclid.	85
Figura 30 -	Área de cobertura disponível para aplicação de SFV.	92
Figura 31 -	Áreas disponíveis para aplicação de SFV – PAF igual a 50%.	92
Figura 32 -	Módulo JKM410M-6RL3 – 410W do Jinko Solar	94
Figura 33 -	Gráfico comparativo do consumo de energia do caso real e caso referência.	99
Figura 34 -	Irradiância média diária nos planos da cobertura e fachadas.	105
Figura 35 -	Estudo de sombras dos módulos FV no Solstício de inverno.	132
Figura 36 -	Estudo de sombras dos módulos FV no Equinócio de primavera.	132
Figura 37 -	Estudo de sombras dos módulos FV no Solstício de verão.	132
Figura 38 -	Estudo de sombras dos módulos FV no Equinócio de outono.	132
Figura 39 -	Irradiação média do plano ideal e real.	133

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Grupos Climáticos das capitais estaduais e maiores cidades de cada estado da federação.....	27
Tabela 2 - Fatores de conversão de energia elétrica e térmica em energia primária.	41
Tabela 3 - Elementos construtivos e suas respectivas características do modelo de referência.....	42
Tabela 4 - Intervalos relativos a cada uma das classes de eficiência energética.....	43
Tabela 5 - Principais termos lançados em torno de edifícios com energia zero.	46
Tabela 6 - Principais características dos sistemas elétricos de edifícios convencionais e ZEBs.....	48
Tabela 7 - Estudos de caso de edifícios de energia zero em climas temperados.	49
Tabela 8 - Hierarquia das opções de fontes de energia renovável para uso de edificação de balanço energético nulo.	51
Tabela 9 - Geração de energia solar FV em GWh de alguns Países.....	53
Tabela 10 - Resumo de quantidade de irradiação global.	55
Tabela 11 - Exemplos de edifícios comerciais com BIPV.....	63
Tabela 12 - Resumo das características físicas do modelo.	76
Tabela 13 - Parâmetros construtivos do modelo caso base.....	79
Tabela 14 - Parâmetros óticos do vidro reflexivo cinza utilizado nas janelas do caso base.....	80
Tabela 15 - Características das cargas internas do caso base.....	81
Tabela 16 - Configuração da temperatura de aquecimento e resfriamento do caso base.....	82
Tabela 17 - Configuração das evaporadoras do caso base.	82
Tabela 18 - Configuração das unidades condensadoras do caso base.	83
Tabela 19 - Capacidade do sistema de ar condicionado calculado pelo EnergyPlus do caso base.....	83
Tabela 20 - Características do sistema de ar condicionado do caso base.....	83

Tabela 21 - Valores de referência para edificações de escritório na condição referência (Classe D).	84
Tabela 22 - Características das cargas internas do modelo de referência.....	86
Tabela 23 - Capacidade do sistema de ar condicionado calculado pelo EnergyPlus do modelo de referência.	87
Tabela 24 - Valores de referência adotados na condição real (Caso Base) e na condição de referência (Classe D).	87
Tabela 25 - Edificações de escritórios: coeficiente de redução do consumo de energia primária da classe D para a classe A (PRCEP _{D-A}) com base no fator de forma (FF) para o grupo climático 5.	90
Tabela 26 - Intervalos relativos a cada uma das classes de eficiência energética.....	90
Tabela 27 - Dimensões e parâmetros elétricos do módulo FV.....	94
Tabela 28 - Tarifas de energia elétrica com impostos.....	96
Tabela 29 - Consumo do caso base em kWh/m ² .ano	97
Tabela 30 - Consumo do caso referência em kWh/m ² .ano	98
Tabela 31 - Comparação dos consumos energéticos do edifício real e de referência em kWh/ano.	101
Tabela 32 - Consumo total de energia elétrica do edifício real e de referência (kWh/ano).....	101
Tabela 33 - Consumo de energia primária do edifício real e de referência (kWh/ano).....	102
Tabela 34 - Intervalos relativos a cada uma das classes de eficiência energética do objeto de estudo.	102
Tabela 35 - Valores de consumo de energia elétrica para cada classe de eficiência energética.....	103
Tabela 36 - Áreas disponíveis para aplicação de SFV.....	106
Tabela 37 - Dimensionamentos dos SFV para os casos em estudo.	106
Tabela 38 - Custo do SFV para cada caso.....	107
Tabela 39 - Dimensionamento SFV 01 – CASO A (107,83kWp).....	133
Tabela 40 - Dimensionamento SFV 02 – CASO B (146,37kWp).....	135
Tabela 41 - Dimensionamento SFV 03 – CASO C (171,38kWp).	137
Tabela 42 - Dimensionamento SFV 04 – CASO D.....	140

Lista de abreviaturas e siglas

3D	Três dimensões.
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas.
ACM	Alumínio Composto Modificado.
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica.
A-Si	Silício Amorfo.
BAPV	<i>Building Applied Fotovoltaicas</i> (sistema fotovoltaico aplicado à edificação).
BIPV	<i>Building Integra-te Fotovoltaicas</i> (sistema fotovoltaico integrado à edificação).
CB3E	Centro Brasileiro de Eficiência Energética.
CBCS	Conselho Brasileiro de Construção Sustentável.
Cadete	Telúrio de Cádmiio.
CEP	Consumo de Energia Primária.
CIGS	Disseleneto de Cobre, Índio e Gálio.
CIS	Disseleneto de Cobre e Índio.
CO2	Dióxido de Carbono.
COFINS	Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social.
CONPET	Programa Nacional da Racionalização do Uso de Derivados do Petróleo e do Gás Natural.
COP	Coeficiente de Performance.
Cost-ZEB	<i>Net Zero Energy Costs</i> (Edifício com consumo energético de custos líquidos de energia zero).
CSH	<i>Code for Sustainable Homes</i> (Código para casas sustentáveis).
c-Si	Silício Cristalino.
DCI	Densidade de Carga Interna.
DOE	<i>Department of Energy</i> (Departamento de Energia dos Estados Unidos).
DPE	Densidade de Potência de Equipamentos.
DPI	Densidade de Potência de Iluminação.

Emissions-ZEB	<i>Net Zero Energy Emissions</i> (Edifício com consumo energético de emissões líquidas de energia zero).
ENCE	Etiqueta Nacional de Conservação de Energia.
EODM	<i>Equivalent One-diode Model</i> .
EPBD	<i>Energy Performance of Buildings Directive</i> (Diretiva de Desempenho Energético de Edifícios).
EPS	Poliestireno.
EU	União Europeia.
FRE	Fontes Renováveis de Energia.
FV	Fotovoltaico.
GaAs	Arseneto de Gálio.
GCL5	Grupo Climático 5.
GD	Geração Distribuída.
HIT	<i>Heterojunction with Intrinsic Thin Layer</i> .
INI-C	Instrução Normativa do Inmetro.
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia.
IRT	Índice de Reajuste Tarifário.
MCE	Medidas de Conservação de Energia.
m-Si	Silício Monocristalino.
nZEB	<i>Nearly Zero Energy Buildings</i> (edifício com consumo energético quase nulo).
NZEB	<i>Net Zero Energy Buildings</i> (Edifícios com consumo energético líquido nulo).
PAF	Percentual de Abertura de Fachada.
Payback	Período de Retorno.
PBE	Programa Brasileiro de Etiquetagem.
PEE	Programa de Eficiência Energética.
PEN	Política Energética Nacional.
PIS	Programa de Integração Social.
PME	Programa de Mobilização Energética.
PNEf	Plano Nacional de Eficiência Energética.

Procel	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica do Brasil.
PROCEL EDIFICA	Programa Nacional de Eficiência Energética em Edificações.
p-Si	Silício Policristalino.
RTQ-C	Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicos.
RTQ-R	Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais.
SAPM	<i>Sandia Photovoltaic Array Performance Model</i> ,
SEB	Setor Elétrico Brasileiro.
SELIC	Sistema Especial de Liquidação e Custódia.
SFV	Sistema Fotovoltaico.
Site-ZEB	<i>Net Zero Site Energy</i> (Edifícios com consumo energético líquido nulo, contabilizadas no local).
Source-ZEB	<i>Net Zero Source Energy</i> (Edifícios com consumo energético líquido nulo, contabilizadas na fonte).
TIR	Taxa Interna de Retorno.
TMA	Taxa Mínima de Atratividade.
USA	Estados Unidos da América.
VPL	Valor Presente Líquido.
VRF	<i>Variable Refrigerant Flow</i> (Fluxo de Gás Refrigerante Variável).
ZEB	<i>Zero Energy Buildings</i> (Edifícios de Energia Zero).

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
1.1 Apresentação do tema	17
1.2 Problema de Pesquisa	19
1.3 Justificativa.....	20
1.4 Objetivos	21
1.4.1 Objetivo geral	21
1.4.2 Objetivos específicos.....	21
1.5 Estrutura do trabalho	21
2 REVISÃO DA LITERATURA	23
2.1 Contextualização	23
2.2 Panorama energético	24
2.2.1 Mundial.....	24
2.2.2 Cenário Brasileiro	24
2.3 Arquitetura Bioclimática no Brasil	26
2.4 A arquitetura de edifícios de escritórios.....	28
2.5 Políticas, Programas e Regulamentações Energéticas.....	29
2.6 Eficiência energética na arquitetura	34
2.6.1 Simulação computacional para análise de eficiência energética de edificações.....	36
2.6.2 Software de Avaliação.....	38
2.6.3 Método de Avaliação de Edificações Comerciais - Instrução Normativa do Inmetro para Classificação de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas (INI-C)	40
2.7 Edificações com balanço energético nulo	44
2.7.1 Conceitos ZEBs.....	45
2.7.2 Estratégias para o alcance do balanço energético nulo	47
2.8 A energia solar FV.....	52
2.9 Tecnologias FV e a arquitetura	56
2.9.1 Tecnologia FV em edifícios	59
2.9.2 Aplicação de BAPV e BIPV	62

2.10 Análise da viabilidade econômica de edifícios NZEB	64
3 MÉTODO	68
3.1 Estrutura geral da pesquisa.....	68
3.2 Etapas da pesquisa	70
3.2.1 Etapa 1 - Revisão bibliográfica	70
3.2.2 Etapa 02: Definição do objeto de estudo.....	71
3.2.3 Etapa 3 – Caracterização, modelagem e configuração computacional do objeto de estudo	74
3.2.4 Etapa 4 – Aplicação da Instrução Normativa para a Classe de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas (INI-C) no caso base	83
3.2.5 Etapa 5 – Definição dos Modelos de Referência.....	91
3.2.6 Etapa 6 – Obtenção do balanço energético nulo nos casos em estudo	91
3.2.7 Etapa 7 – Análise e viabilidade econômica	94
4 ANÁLISE DOS RESULTADOS	97
4.1 Análise do consumo e do desempenho termoenergético do Caso Base	97
4.2 Classificação energética do Caso Base: aplicação da Instrução Normativa para a Classe de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas (INI-C).....	98
4.3 Definição dos modelos de referência	103
4.4 Obtenção do balanço energético nulo nos casos em estudo	103
4.5 Análise e viabilidade econômica	107
5 CONCLUSÃO	111
5.1 Limitações do trabalho	113
5.2 Sugestões para trabalhos futuros.....	113
6 REFERÊNCIAS	115
APÊNDICE A	128
a.1. Parâmetros adotados para os cálculos de viabilidade econômica	128
APÊNDICE B	130
b.1. Classificação energética do Caso Base: aplicação da INI-C.....	130
APÊNDICE C	132
c.1. Casos de balanço energético nulo - Estudo de sombras para SFV.	132
APÊNDICE D	133

d.1. Dimensionamentos SFV: situação real e ideal	133
d.2. Dimensionamentos SFV 01 – CASO A	133
d.2. Dimensionamentos SFV 02 – CASO B	135
d.3. Dimensionamentos SFV 03 – CASO C 137.....	136
d.4. Dimensionamentos SFV 04 – CASO D 140.....	138

1 INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação do tema

A preocupação com a eficiência energética ganhou força após a crise do petróleo, em meados de 1973. Tal fato desencadeou a necessidade de redução do consumo energético das edificações, tema este que tem recebido relevante atenção nos últimos anos.

No contexto mundial, as Diretivas Europeias 2010/31/EU e 2018/844/EU tratam sobre o desempenho energético de edifícios e introduzem políticas para a difusão do conceito *Zero Energy Buildings* (ZEB). Essas estabelecem exigências para que os estados membros apliquem soluções mais eficientes na construção de novas edificações em suas legislações nacionais (PARLAMENTO EUROPEU e CONSELHO DA UNIÃO EUROPEIA, 2010; 2018).

No Brasil, a eficiência energética passou a ser discutida com maior ênfase após a crise de energia elétrica ocorrida em 2001, quando o sistema elétrico brasileiro sofreu restrições de transmissão em algumas regiões do país devido ao crescente consumo e a falta de investimentos em capacidade de geração. Esse fato caracterizou o principal marco regulatório da conservação de energia por meio da promulgação da Lei da Eficiência Energética, ação que reforçou o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica do Brasil (Procel) quando lançou seu plano para eficiência energética de edifícios, em 2003 (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2011).

Segundo dados da Agência Internacional de Energia (2020), os setores de construção civil e edifícios são responsáveis por 36% do consumo final global de energia e por quase 40% do total de emissões diretas e indiretas de dióxido de carbono (CO₂). Já na perspectiva brasileira, cerca de 42,3% da energia elétrica do país é consumida pelo setor de edificações, sendo 16,9% pelos edifícios comerciais (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2019). Portanto, pode-se considerar que os edifícios estão entre as peças-chave para um futuro sustentável.

Segundo Didoné (2014), por ter questões estéticas priorizadas no projeto, um grande número de edifícios comerciais acaba por não utilizar recursos naturais disponíveis da melhor forma possível.

Tal realidade traz à tona a discussão sobre os impactos ambientalmente negativos quanto à demanda energética, tendo em vista que, quanto maior o consumo energético, maior será a produção de energia para atender tal necessidade e,

possivelmente, maiores serão os níveis de emissão de CO₂ e/ou os impactos socioambientais.

Em 2009, a fim de promover a redução do consumo de energia elétrica nesse tipo de edificação no Brasil, foi publicado o Regulamento Técnico da Qualidade para o nível de eficiência energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos (RTQ-C) (INMETRO, 2013). Entretanto, surgiram questionamentos a respeito do regulamento e novos estudos foram desenvolvidos visando a melhoria do método de avaliação.

Teve origem, então, a proposta do novo método de avaliação de eficiência energética de edificações comerciais, conhecida como Instrução Normativa do Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas (INI-C), que definiu uma nova metodologia para a classificação do nível de eficiência energética de edifícios comerciais.

Deste modo, a busca constante por projetos mais eficientes energeticamente, associada ao conforto ambiental, com aplicação de normas e regulamentos de eficiência energética, evidencia a carência de estudos que demonstrem qual construção é mais adequada a determinado contexto climático, preconizando também a eficiência energética de equipamentos e sistemas.

Nesse contexto, a disseminação de edifícios de balanço energético nulo, estes capazes de contribuir para a redução do seu consumo energético e de obter, ao final do período de um ano, o balanço de energia igual a zero por meio de fontes renováveis de energia (FRE), tem se mostrado uma importante estratégia para o alcance de benefícios sociais, econômicos e ambientais à sociedade.

Entre as formas possíveis de se obter edificações com balanço nulo de energia, destaca-se o uso da tecnologia fotovoltaica (FV), que vem crescendo exponencialmente quando comparada a outras FRE, devido às diversas possibilidades de aplicação e de integração com a envoltória da edificação. Tal tecnologia pode ser aplicada tanto em áreas de cobertura quanto em áreas opacas de fachadas, em elementos de proteção solar, janelas e/ou vidros. Outro fator se deve à grande disponibilidade de radiação solar no Brasil.

A implantação da tecnologia FV em edifícios comerciais tem se mostrado adequada, tendo em vista que o período de ocupação e, conseqüentemente, o maior consumo de energia ocorrem durante o dia, período em que os módulos FV produzem

eletricidade. Em períodos de excesso de geração de energia pelo Sistema Fotovoltaico (SFV), essa pode ser transferida à rede elétrica local.

Em consonância com o presente trabalho, Dinoné (2014) concluiu em seu estudo que as edificações comerciais brasileiras com mais de quatro pavimentos, dependendo da região em que se localizam, apresentam maior dificuldade de alcançar o balanço energético nulo, indicando que edifícios mais horizontalizados apresentam maior facilidade para o alcance deste.

A partir do exposto, esta pesquisa tem como foco analisar a viabilidade econômica de um edifício comercial horizontal, localizado no grupo climático 05, de acordo com a INI-C, atingir o balanço energético nulo, a partir de diferentes níveis de eficiência energética.

1.2 Problema de Pesquisa

O Brasil não apresenta regulamentos que definam metas para o alcance de edifícios com balanço energético nulo. Porém, a literatura, em geral, define edifício de energia zero aquele capaz de suprir seu consumo anual de energia por meio de uma FRE. Inclusive, ficam estabelecidas como metas europeias o *Nearly Zero Energy Buildings* (nZEB), que permite um balanço positivo dos gastos energéticos, o que difere das metas *Net Zero Energy Buildings* (NZEB), que objetivam atingir o consumo líquido igual a zero.

Ainda, no que diz respeito à energia consumida, à geração renovável de energia e à geração própria, existe uma ampla gama de conceitos, o que dificulta a compreensão do conceito e a forma de alcançar o *status* NZEB.

Dutra, Salamoni e Cunha (2019) estudaram uma edificação brasileira que não considerou estratégias de eficiência energética em seu projeto. Os autores concluíram que mesmo uma edificação que não apresentou alternativas para minimizar o seu consumo de energia foi capaz de alcançar as metas NZEB somente pela inserção de geração própria de energia.

Diante disso, quando o foco se concentra somente em suprir a demanda energética, observa-se a facilidade de se alcançar o NZEB por meio da geração FRE, o que não garante a preservação de recursos naturais. Esse fato aponta a necessidade de priorizar que o edifício seja projetado com elevado desempenho

energético e, conseqüentemente, supra suas necessidades energéticas por intermédio de FRE integradas à edificação.

Sendo assim, este trabalho busca compreender e avaliar qual o nível de eficiência energética mínimo a ser alcançado, de modo a se obter a viabilidade econômica de um edifício comercial horizontal de balanço energético nulo, localizado no grupo climático 05, de acordo com a INI-C.

1.3 Justificativa

O aumento da população mundial representa uma maior demanda de edificações e, conseqüentemente, do consumo energético, deixando nítida a necessidade de alternativas que visem fontes renováveis de energia a fim de minimizar os impactos ao meio ambiente (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014). Pereira *et al.* (2017) ainda estimam um aumento na demanda de eletricidade na ordem de 200% no Brasil até o ano 2050. Portanto, os edifícios apresentam potencial de redução do consumo de energia por meio da eficiência energética e da geração de energia FRE.

Na conjuntura climática brasileira, devido às diversas zonas climáticas, cada região exige soluções construtivas específicas. O desconhecimento sobre essas especificidades vem sendo responsável pela construção de edifícios com baixo desempenho térmico e, por conseqüência, elevado consumo de energia, pois a adoção de soluções idênticas ou semelhantes para todo o país provoca consumo desnecessário de energia elétrica (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014).

Além disso, é importante que sejam pesquisadas alternativas que auxiliem a redução do impacto energético causado pelas edificações, de maneira mais sustentável, integrada ao edifício e próxima do ponto de consumo. Conjunto a isso, com a grande disponibilidade de radiação solar no território nacional, a energia solar aponta para uma alternativa de potencial significativo a ser explorado por meio das tecnologias FV, que podem ser facilmente integradas aos edifícios – *Building Integrated Photovoltaics* (BIPV).

Nesse sentido, com este trabalho pretende-se contribuir com a comunidade acadêmica e com os profissionais das áreas de arquitetura e engenharia, de modo a servir como base de conhecimento para o desenvolvimento de projetos de edifícios comerciais mais eficientes levando em consideração a eficiência energética e o uso

adequado das tecnologias FV na compreensão e na avaliação da viabilidade econômica de um edifício comercial de diferentes níveis de eficiência para o alcance do balanço energético nulo.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo geral

O principal objetivo do trabalho consistiu em analisar a viabilidade econômica de um edifício atingir o balanço energético nulo a partir de diferentes níveis de eficiência energética.

1.4.2 Objetivos específicos

A fim de se alcançar o objetivo geral desta pesquisa, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- a) avaliar o desempenho termoenergético de um edifício comercial horizontal;
- b) identificar a classificação energética do edifício comercial horizontal, de forma acordada com a INI-C;
- c) verificar se um edifício comercial com diferentes classes de eficiência energética consegue alcançar o balanço energético nulo por meio da geração de energia FV;
- d) identificar a viabilidade econômica e o tempo de retorno dos casos de balanço energético nulo.

1.5 Estrutura do trabalho

O trabalho foi delineado em cinco capítulos. No primeiro, “Introdução”, apresenta-se uma breve introdução sobre o tema principal, a justificativa, os objetivos geral e específicos e a estrutura do trabalho.

No segundo, “Revisão da Literatura”, apresenta-se a revisão de literatura, abordando temas referentes ao desempenho dos edifícios de escritórios, ao consumo de energia e às legislações de desempenho no contexto brasileiro, às edificações de balanço energético nulo e às políticas para a sua implementação na União Europeia, aplicação de tecnologias FV como fonte renovável de energia, SFV integrados à edificação – *Building Integrated Photovoltaics* (BIPV), simulação computacional e viabilidade econômica de um SFV.

No terceiro, “Método”, versa-se sobre as setes etapas da metodologia aplicada ao estudo. No quarto, “Análise dos Resultados”, são apresentados e discutidos os resultados. Por fim, no quinto e último, “Conclusão”, apresenta-se as considerações finais e delimitações encontradas no trabalho.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Contextualização

A alteração climática é um tema que vem sendo discutido cotidianamente como uma das maiores ameaças ambiental, social e econômica do planeta, e pode ser considerada uma emergência global. O aumento da temperatura da terra implica em drásticas alterações climáticas caso não se apliquem medidas necessárias que visem sua redução.

Em 1997, foi criado o Protocolo de Quioto, que constituiu um tratado à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança Climáticas, e determinou metas de redução de emissões para os países desenvolvidos e aos que, à época, apresentavam economia em transição para o capitalismo, vistos como os responsáveis históricos pela mudança climática. O Protocolo entrou em vigor no dia 16 de fevereiro de 2005, após as ratificações de, no mínimo, 55% do total dos países-membros da Convenção (MMA, 2019).

Na 21ª Conferência das Partes (COP21) da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre as Alterações Climáticas e a 11.ª sessão da Conferência das Partes enquanto Reunião das Partes no Protocolo de Quioto, em Paris, realizado nos dias 30 de novembro de 2015 a 12 de dezembro de 2015, foi definido um novo acordo com o foco principal de reforçar a resposta global à ameaça da mudança do clima e de fortalecer a capacidade dos países para lidar com os impactos resultantes dessas mudanças (MMA, 2019, p. 1).

Esse novo Acordo foi aprovado por 195 países e entrou em vigor no dia 4 de novembro de 2016, com os objetivos de limitar o aumento do aquecimento global a no máximo 2°C e de dedicar todo empenho possível para que, em média, este aumento não ultrapassasse 1,5°C, além de fortalecer a capacidade dos países de responder ao desafio, em um contexto de desenvolvimento sustentável.

Segundo dados da Agência Internacional de Energia (2020), impulsionadas pela maior demanda energética em 2018, as emissões globais de CO₂ relacionadas à energia aumentaram 1,7%, atingindo uma alta histórica de 33,1 bilhão de toneladas (Gt) de CO₂, maior taxa de crescimento desde 2013, e 70% superior ao aumento médio desde 2010. Tal aumento é resultado de uma economia global robusta e das condições climáticas de algumas partes do mundo, que levam ao aumento da demanda de energia por aquecimento e resfriamento.

No entanto, as políticas de redução das emissões globais de gases de efeito estufa em vigor atualmente demonstram que ainda não são suficientes para manter o aumento da temperatura abaixo de 2°C. Portanto, a descarbonização do sistema energético é de importância crítica e exige a transformação de sistemas e mercados.

Deste modo, é essencial a expansão de políticas de oferta de eletricidade de maneira mais sustentável, com menor impacto ambiental e social possível, para que se promova a redução de emissão dos referidos gases e do aumento da temperatura global.

2.2 Panorama energético

2.2.1 Mundial

Os sistemas de energia utilizados em todo o mundo vêm sofrendo significativas modificações ao longo da história e, com elas, surgem discussões a respeito da necessidade de substituição da matriz energética. Esta baseia-se, em grande parte, em combustíveis fósseis, como petróleo, carvão mineral e gás natural, ou seja, fontes de energia não renováveis.

As fontes de energia primária mais exploradas mundialmente são os combustíveis fósseis, como o carvão mineral e o gás, seguidos da hidroeletricidade e das fontes nucleares.

Nesse contexto, a preocupação com a questão ambiental é prioritária, contudo, é imprescindível a utilização de um conjunto diversificado de tecnologias de geração de baixas emissões de CO₂, ou seja, o uso de energia renovável para conter a poluição e as mudanças climáticas. Deste modo, a geração descentralizada apresenta-se como uma opção favorável na integração com as edificações, já que, como mencionado na introdução deste trabalho, os edifícios são responsáveis por uma considerável parcela do consumo total de energia elétrica.

2.2.2 Cenário Brasileiro

Em um contexto bastante distinto da estrutura mundial, o Brasil apresenta parcela significativa de hidroeletricidade em sua estrutura de matriz energética, a qual corresponde a 63,52% do suprimento energético do país (Figura 1).

Os gráficos da Figura 1 também ilustram a matriz energética brasileira em comparação a outros países, como Alemanha, Espanha, Itália, China e Estados

Unidos. Assim, é possível observar que o Brasil se destaca pela alta participação de fontes renováveis de energia.

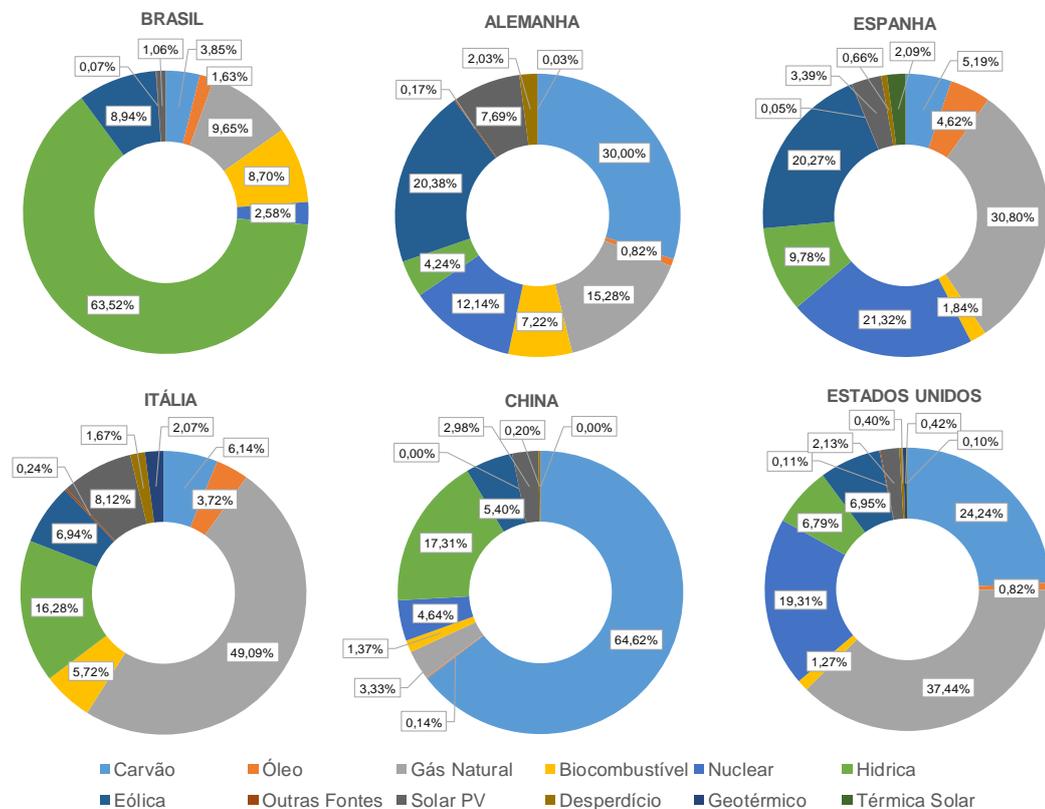


Figura 1 - Matriz energética brasileira e outros países (dados do ano de 2019).
Fonte: Adaptado de INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2021.

No entanto, apesar de serem consideradas fontes de energia limpa, as usinas hidrelétricas causam grandes impactos sociais e ambientais em sua construção, pois necessitam de uma ampla área de alagamento e do remanejamento de comunidades ribeirinhas.

Ainda, por serem fontes de energia centralizadas, demandam grande investimento em linhas de transmissão e de distribuição devido a distância entre o local de geração de energia até os centros urbanos. Outro aspecto relevante é que esse tipo de estrutura torna seus usuários vulneráveis a *blackouts* elétricos, o que exige ainda mais a fragilidade do sistema quando exposto a períodos de estiagem, com baixas capacidades nominais de geração nas usinas hidrelétricas, além da ocorrência de perdas no percurso até o consumidor final, gerando também, consequentemente, o aumento nos custos da produção de energia.

Segundo Salamoli (2009), a reestruturação do setor energético torna-se essencial, com o objetivo de diversificar a matriz energética nacional por meio da

utilização da geração distribuída (GD), com destaque para as FRE, no que tange à complementação, e não à substituição das fontes convencionais.

Neste contexto, a busca pelo uso equilibrado dos diferentes recursos e soluções técnicas disponíveis também é necessária, de modo a melhorar a segurança, a confiabilidade e a sustentabilidade no fornecimento de eletricidade no país, mantendo ou reduzindo os níveis de emissões de gases de efeito estufa.

2.3 Arquitetura Bioclimática no Brasil

A abordagem do assunto bioclimatologia aplicada à arquitetura a nível nacional ocorre quando Silva (1994) propõe um zoneamento bioclimático para fins de edificações. Neste o autor representa as características gerais da edificação diante da realidade climática onde será implantada.

2.3.1.1 Grupos Climáticos Brasileiros segundo a Instrução Normativa do Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas (INI-C)

Em 2005 surgiu a NBR 15220-3 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005b), que definiu o zoneamento bioclimático brasileiro, subdividindo o país em oito Zonas Bioclimáticas (ZB), conforme indica a Figura 2.

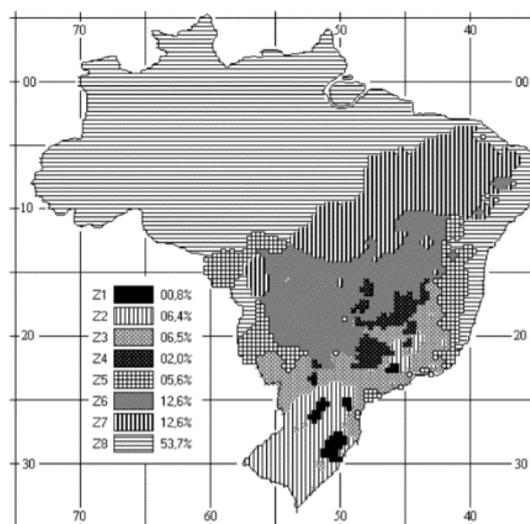


Figura 2 - Zoneamento bioclimático brasileiro.
Fonte: ABNT, 2005.

Essa norma define o zoneamento de acordo com três parâmetros principais, que são as médias mensais das temperaturas máximas, das temperaturas mínimas e da umidade relativa do ar. Os oito zoneamentos são definidos em escala de

intensidade da zona mais fria para mais quente, a partir da ZB 01 a ZB 08, respectivamente.

Entretanto, em 2017 foi elaborado o relatório com as atualizações do Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (RTQ-R) e do Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicos (RTQ-C). Essa atualização apresenta a classificação de novos grupos climáticos para regiões do Brasil segundo Roriz (2012), que será utilizada no presente trabalho.

A nova proposta baliza-se na utilização de quatro parâmetros para classificação dos climas, sendo a média anual da temperatura do ar, a diferença entre a maior e menor temperatura média mensal, a média anual da amplitude térmica e a diferença entre a maior e a menor amplitude térmica mensal.

Desse modo, a proposta de um novo zoneamento divide o país em 24 grupos climáticos (Tabela 1), onde o Grupo 1 apresenta a zona climática mais fria e o Grupo 24 a mais quente (BAVARESCO *et al.*, 2017). A cidade de Pelotas encontra-se no grupo climático 05, zona de maior amplitude térmica e foco deste trabalho.

Tabela 1 - Grupos Climáticos das capitais estaduais e maiores cidades de cada estado da federação.

Grupo Climático	Quantidade de municípios	Principais Municípios
1 - A	133	Araucária (PR), Cascavel (PR), Guarulhos (SP), Juiz de Fora (MG), Mauá (SP), Pinhais (PR), Santo André (SP), São Bernardo do Campo (SP), São Paulo (SP)
1 - B	28	Florianópolis (SC), Fazenda Vilanova (RS), Imbituba (SC), Magé (RJ), Santa Leopoldina (ES)
2	172	Barueri (SP), Campos do Jordão (SP), Curitiba (PR), Ouro Preto (MG), São Carlos (SP)
3	194	Pato Branco (PR), Petrópolis (RJ), Ponta Grossa (PR), São José dos Campos (SP)
4	159	Poços de Caldas (MG), Toledo (PR)
5	198	Caxias do Sul (RS), Gravataí (RS), Novo Hamburgo (RS), Pelotas (RS) , São Francisco do Sul (SC), São Leopoldo (RS), Xaxim (SC)
6	145	Balneário Camboriú (SC), Bento Gonçalves (RS), Chuí (RS), Criciúma (SC), Farroupilha (RS), Porto Alegre (RS)
7	298	Canoas (RS), Chapecó (SC), Joaçaba (SC), Lajeado (RS), Vacaria (RS)
8	82	Santa Maria (RS)
9	296	Cabo Frio (RJ), Governador Valadares (RJ), Ilhéus (BA), Joinville (SC), Linhares (ES), Niterói (RJ), Porto Seguro (BA), Vila Velha (ES)
10	331	Belo Horizonte (MG), Brasília (DF), Campina Grande (PB), Campo Grande (MS), Caruaru (PE), Ribeirão das Neves (MG), Rio Verde (GO), Uberlândia (MG), Vitória da Conquista (BA)
11	363	Aparecida de Goiânia (GO), Ji-Paraná (RO), Parnamirim (RN), Santa Cruz (PE), Santana do Ipanema (AL)
12	314	Anápolis (GO), Goiânia (GO), Jataí (GO), Sete Lagoas (MG)
13	357	Angra dos Reis (RJ), Blumenau (SC), Campos dos Goytacazes (RJ), Duque de Caxias (RJ), Eldorado (MS), Itajaí (SC), Macaé (RJ), Nova Iguaçu (RJ), Paranaguá (PR), Rio de Janeiro (RJ), Vitória (ES)
14	197	Belford Roxo (RJ), Dourados (MS), Maringá (PR), Ourinhos (SP), Paraty (RJ), Ponta Porã (MS), São João do Meriti (RJ), Sorocaba (SP), Três Lagoas (MS), Volta Redonda (RJ)

15	251	Campinas (SP), Foz do Iguazu (PR), Londrina (PR)
16	242	Divinópolis (MG)
17	251	Alto Alegre (RR), Ananindeua (PA), Barcarena (PA), Belém (PA), Boa Vista (RR), Fortaleza (CE), Iracema (RR), Laranjal do Jari (AP), Recife (PE), Santa Rita (PB), São Luís (MA)
18	190	Camaçari (BA), Feijó (AC), Macapá (AP), Manaus (AM), Natal (RN), Porto Velho (RO), Santana (AP)
19	310	Cruzeiro do Sul (AC), Macaíba (RN), Sena Madureira (AC)
20	278	Barras (PI), Cacoal (RO), Imperatriz (MA), Palmas (TO), Rio Branco (AC), Sinop (MT), Sobral (CE), Teresina (PI)
21	183	Aracaju (SE), João Pessoa (PB), Maceió (AL), Monte Alegre (RN), Olinda (PE), Paulistana (PI), Salvador (BA)
22	171	Feira de Santana (BA), Juazeiro do Norte (CE), Mossoró (RN), Parintins (AM), Parnaíba (PI), Patos (PB), Petrolina (PE), Santa Cruz (RN), São Gonçalo (RJ)
23	239	Campo Alegre (AL), Jabotão dos Guararapes (PE), Maragogi (AL), Nossa Senhora do Socorro (SE), Picos (PI)
24	183	Cuiabá (MT), Paranaíba (MS), Rondonópolis (MT), Várzea Grande (MT)

Fonte: Adaptado de Bavaresco *et al.* (2017, grifo nosso).

2.4 A arquitetura de edifícios de escritórios

Ao se observar a história, compreende-se como a cultura e avanços tecnológicos de cada época contribuíram para a evolução e para as transformações espaciais dos ambientes administrativos.

Segundo Vasconcelos (2019), nos séculos XV e XVI, os espaços administrativos eram associados à troca de mercadorias. Os produtos eram colocados em exposição no pavimento térreo, ao mesmo tempo em que os andares superiores eram reservados às negociações. Entre 1560 e 1574, em Florença, foi construído o primeiro edifício de uso administrativo no mundo.

De acordo com Saval (2015), no fim do século XIX, com o aparecimento de inúmeras indústrias concorrentes, produziu-se cada vez mais trabalho administrativo, o que gerou a necessidade de maior organização dos espaços. No arranjo físico desses ambientes, houve várias modificações, influenciadas basicamente pelo conceito administrativo adotado a cada época.

Para Vasconcelos (2019), o *layout* de escritórios dessa fase baseava-se nos conceitos de Frederick Taylor, o qual buscava a eficiência produtiva no ambiente laboral. Apresentava uma organização espacial semelhante à planta industrial, com segregações onde eram estabelecidas diferenças hierárquicas de forma a incentivar a competição interna. Funcionários de escalões inferiores situavam-se em salões de grande área e com alto pé-direito, enquanto a periferia destas áreas e os andares superiores destinavam-se aos ocupantes dos cargos mais altos da empresa, sendo separados apenas por divisórias de vidros ou janelas.

No século XX, em Chicago, surgiu uma nova e arrojada maneira de se fazer arquitetura, a partir da introdução do aço nas estruturas das edificações, material este que permitiu a liberdade de andares mais altos, plantas livres e a remoção os pilares das fachadas, possibilitando, assim, o envidraçamento das mesmas. Este foi um grande marco que privilegiou todos os funcionários, independentemente de seus cargos, uma vez que os *layouts* tornaram-se mais flexíveis, claraboias foram implantadas sobre os locais ocupados por trabalhadores, além da inclusão da climatização artificial dos ambientes (VASCONCELOS, 2019).

Por fim, chegou-se à proposta do escritório em Planta Livre (*Open Plan*) e, paralelamente a este sistema, surgiu, na Europa, em 1958, o escritório panorâmico (*Office Landscape*) (SANTOS, 2018). Tal solução inovou por apresentar excelente versatilidade, tanto individual quanto em grupo de estações de trabalho, e reduziu a intolerância das diferenças hierárquicas, afrontando a concepção de Taylor. Na década de 1960, as divisórias tiveram suas alturas reduzidas, de modo a promover ainda mais integração entre os ambientes.

O arranjo físico em planta livre foi, então, rapidamente difundido entre as corporações administrativas, e seus conceitos permanecem até os dias atuais.

2.5 Políticas, Programas e Regulamentações Energéticas

Na Figura 3 são elencados, em ordem cronológica, os principais marcos regulatórios na área de eficiência energética no Brasil.

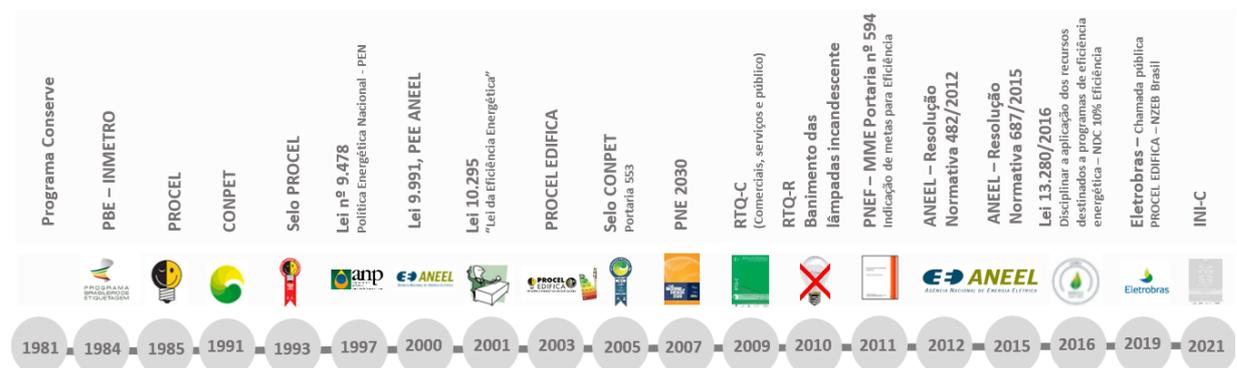


Figura 3 - Principais Políticas e Programas de incentivo à eficiência energética no Brasil.

Fonte: Adaptado de EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2018.

A primeira atitude para o incentivo do uso de medidas de eficiência energética em nível nacional proposta pelo poder público ocorreu em 1981, através do Programa Conserve. Entre os objetivos deste, encontrava-se a promoção da conservação de

energia na indústria e o desenvolvimento de produtos eficientes. No ano subsequente, foi difundido o Programa de Mobilização Energética (PME), que promovia ações dirigidas à incentivar o uso de medidas de conservação de energia e, principalmente, substituir derivados de petróleo por fontes renováveis de energia (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2011).

Segundo Nota Técnica da Empresa de Pesquisa Energética (EPE) (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2018), a partir de 1984, através do lançamento do Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE), uma série de iniciativas surgiu no país com foco na eficiência energética.

Em 1985, através da Portaria Interministerial nº 1.877, foi estabelecido o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (Procel), programa do governo federal, coordenado pelo Ministério de Minas e Energia (MME) e executado pela Eletrobrás, que teve como intuito promover o uso eficiente da energia elétrica e combater seu desperdício (BRASIL, 1985). Este foi responsável pela economia de energia total de 151,6 bilhões de quilowatt-hora (kWh) no período de 1986 a 2018. Somente no ano de 2018, foi responsável pela economia de energia de 23 bilhões de kWh, o equivalente ao consumo anual de 12,12 milhões de residências (PROCEL *et al.*, 2019).

No ano de 1991, foi criado o Programa Nacional da Racionalização do Uso de Derivados do Petróleo e do Gás Natural (CONPET), por meio de decreto presidencial de 18 de julho de 1991. Assim como o Procel, o CONPET foi criado com a finalidade de estimular a racionalização do consumo dos derivados do petróleo e do gás natural; reduzir a emissão de gases poluentes na atmosfera; promover a pesquisa e o desenvolvimento tecnológico; e fornecer apoio técnico para o aumento da eficiência energética no uso final da energia (BRASIL, 1991).

Dois anos depois, instituído por Decreto Presidencial, em 8 de dezembro de 1993, foi implantado o Selo Procel de Economia de Energia, ou simplesmente Selo Procel, que teve como objetivo implantar uma ferramenta simples e eficaz que permitisse ao consumidor conhecer, entre os equipamentos e eletrodomésticos à disposição no mercado, os mais e menos eficientes pelo do seu consumo de energia (BRASIL, 1993).

Em 1997, foi lançada a Política Energética Nacional (PEN), criada pelo Conselho Nacional de Política Energética e pela Agência Nacional de Petróleo,

através da Lei nº 9.478 (BRASIL, 1997). Visando criar soluções para a crise no setor de energia, foram instituídos princípios sobre o aproveitamento racional das fontes de energia.

No ano de 2000, surge o Programa de Eficiência Energética (PEE), que incidiu na transformação do mercado de eletricidade através do estímulo ao desenvolvimento de novas tecnologias e da criação de hábitos racionais de consumo de eletricidade (ANEEL, 2008). O PEE é um mecanismo obrigatório para as distribuidoras de energia elétrica, que se encontram sob a jurisdição da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), autarquia vinculada ao MME, reguladora do Setor Elétrico Brasileiro (SEB).

Em busca de alternativas para a crise no setor de energia, foi promulgada a Lei nº 10.295, da Eficiência Energética, de 17 de outubro de 2001, para regular a produção de máquinas mais eficientes e econômicas, visando a redução de desperdícios. Nasceu, então, o principal marco legal na área de eficiência energética do país. Assim, foi lançada a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia (BRASIL, 2001a).

No mesmo ano, foi publicado o Decreto nº 4.059/2001, o qual regulamentou a Lei nº 10.295/2001 ao estabelecer níveis máximos de consumo de energia e mínimos de eficiência energética, sob a coordenação do MME (BRASIL, 2001b).

Dois anos mais tarde, por meio da Eletrobras e do PROCEL (PBE Edifica, 2003), foi instituído o Programa Nacional de Eficiência Energética em Edificações (PROCEL EDIFICA). Este teve como objetivo promover e incentivar a conservação e o uso eficiente dos recursos naturais (água, luz, ventilação etc.) nas edificações, reduzindo os desperdícios e os impactos sobre o meio ambiente (PROCEL, 2020).

Em 2003, ocorreu a formação de um Grupo Técnico denominado de GT-Edificações, com os objetivos de regulamentar e elaborar procedimentos para avaliação da eficiência energética das edificações construídas no Brasil, visando o uso racional da energia elétrica. A partir de análises críticas do estado da arte internacional, este GT decidiu pela etiquetagem de edificações como sua primeira ação. Nesse contexto, as inspeções de projeto e de edificações construídas foram definidas inicialmente como os mecanismos de avaliação voluntária da conformidade para classificação do nível de eficiência energética de edificações (PROCEL, 2020).

Em seguida, no ano de 2005, foi criado o Selo CONPET de Eficiência Energética, que visa destacar, para o consumidor, modelos que atingem os graus

máximos de eficiência energética na Etiqueta Nacional de Conservação de Energia do Programa Brasileiro de Etiquetagem do INMETRO. Ele é concedido anualmente aos equipamentos mais eficientes movidos por derivados de petróleo e gás natural, como fogões e fornos a gás, veículos leves e aquecedores de água a gás (INMETRO, 2005).

O Plano Nacional de Energia 2030 (PNE 2030) foi apresentado em 2007, com intuito de apontar o potencial de aplicação de medidas de eficiência energética no Brasil para diferentes cenários macroeconômicos. Esses cenários foram formulados com base em estimativas de crescimento econômico nacional e internacional nos anos posteriores (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2007).

O processo de etiquetagem de edificações no Brasil passou a existir em 2009, através do RTQ-C (INMETRO, 2013). Esse regulamento define uma metodologia para classificar o nível de eficiência energética dos edifícios comerciais, de serviços e públicos. No ano seguinte, em 2010, o mesmo passou por uma revisão e então foi publicada uma metodologia distinta para classificação dos edifícios residenciais, o RTQ-R. Ambos os Regulamentos classificam as edificações em uma escala que varia de “A” (maior eficiência) até “E” (menor eficiência).

Ainda em 2010, ocorreu a publicação da Portaria Interministerial Número 1.007 (BRASIL, 2010), que determinou os índices mínimos de eficiência luminosa e estabeleceu prazos para a retirada gradual das lâmpadas incandescentes do mercado nacional (BRASIL, 2010). As mesmas deixaram de ser produzidas em 30 de junho de 2016.

No ano de 2011, foi implantado o Plano Nacional de Eficiência Energética (PNEf), o qual apontou diversas sugestões que podem ser desenvolvidas para aumentar a conservação de energia nos setores industrial, de transportes, de edificações, de iluminação pública, de saneamento, de educação, entre outros. Além disso, abordou a importância da obrigatoriedade da certificação de eficiência energética de edifícios (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2011).

Surge, em abril de 2012, por meio da Resolução Normativa 482 da ANEEL (ANEEL, 2012), a micro e minigeração distribuídas de energia elétrica, ou seja, uma nova possibilidade para os consumidores gerarem sua própria energia a partir de FRE, podendo conectar seus sistemas à rede elétrica e se beneficiar do sistema de compensação de energia, conhecido como *net metering*. Quando a geração de

energia for maior que o consumo, o saldo positivo de energia poderá ser aproveitado para abater o consumo de outro posto tarifário ou na fatura do mês subsequente. Os créditos de energia gerados continuam válidos por 36 meses. Este foi um marco significativo na complementação das fontes convencionais, uma vez que trata de uma forma de expandir a oferta de eletricidade de maneira mais sustentável.

Algumas questões desta Normativa foram alteradas e conceitos ampliados através da Resolução Normativa 687/2015 (BRASIL, 2015), a partir da qual a microgeração passou a ser considerada como uma central geradora de até 75 kilowatts (kW), enquanto a minigeração distribuída diria respeito às centrais geradoras com potência instalada acima de 75kW até no máximo 5 megawatt (MW).

Após a revisão do Programa de Eficiência Energética por meio da Lei 9.991/2000 (BRASIL, 2000), foram realizadas algumas alterações e, então, foi promulgada a Lei 13.280/2016 (BRASIL, 2016), que teve como finalidade disciplinar a aplicação dos recursos destinados a programas de eficiência energética (POMPERMAYER, 2016). Dentre as medidas propostas, dois fatos relevantes se destacam: a alteração da alíquota do recolhimento de recursos para o PROCEL, que passou de 0,05% para 0,10% sobre a receita operacional líquida das distribuidoras de energia elétrica; e a alteração da obrigatoriedade de investimento para consumidores com tarifa social. A primeira medida fomenta o desenvolvimento de projetos na área de eficiência energética. A segunda, a partir da alteração no investimento para consumidores com tarifa social, pode impactar negativamente os investimentos em projetos e iniciativas no setor elétrico.

Um avanço significativo no que diz respeito a edificações NZEB, a nível nacional, foi que, em 2019, a Eletrobras lançou chamada pública PROCEL Edifica – NZEB Brasil para a seleção de projetos de edificações NZEB, com alta eficiência energética e geração distribuída associada, de fonte renovável, para alcançar um balanço anual energético próximo à zero (ELETROBRAS, 2019).

Em 2021, foi publicado o novo método de avaliação de edificações comerciais, denominado INI-C (Instrução Normativa do Inmetro) e desenvolvido pelo Centro Brasileiro de Eficiência Energética (CB3E). Tal proposta surgiu após constatações de limitações do RTQ-C.

Apesar dos avanços ocorridos em relação ao desenvolvimento de regulamentos de eficiência energética e no que diz respeito a edificações de balanço

energético nulo, o Brasil ainda se encontra aquém de muitos países desenvolvidos, necessitando de estudos de políticas públicas e incentivos ao uso de medidas de eficiência energética, especialmente no que diz respeito às edificações.

2.6 Eficiência energética na arquitetura

A concepção de uma edificação energeticamente eficiente está vinculada à redução do consumo de energia elétrica, priorizando o conforto térmico, lumínico e acústico dos usuários. Deste modo, esse conceito vai ao encontro de uma edificação com maior nível de conforto e menor consumo de energia possível.

O interesse por edificações confortáveis e energeticamente eficientes começa a surgir no Brasil entre as décadas de 1970 e 1980, quando arquitetos, físicos e engenheiros, especialmente pesquisadores ligados a universidades públicas, começaram a apresentar projetos de edificações com tecnologias passivas, aproveitando a orientação solar, massa térmica para aquecimento e resfriamento e ventilação natural (VETTORAZZI, 2019, p. 112).

No âmbito da arquitetura, a busca por eficiência energética nas edificações para se alcançar a redução de energia tem se tornado crescente nos últimos anos. Segundo Lamberts *et. al.* (2014) a eficiência energética pode ser vista como um atributo da edificação, que representa seu potencial em proporcionar conforto térmico, visual e acústico aos usuários, com baixo consumo de energia. Logo, um edifício é energeticamente mais eficiente do que outro quando proporciona, com menor consumo de energia, as mesmas condições ambientais ao usuário.

Um projeto energeticamente eficiente deve integrar a arquitetura bioclimática com eficiência de equipamentos e sistemas. Para Wang *et al.* (2012) o desempenho energético do edifício relaciona-se aos seguintes fatores: clima, envoltória da edificação, serviços de construção, sistemas de energia, operação predial e manutenção da edificação, atividades e comportamento dos usuários, bem como qualidade do ambiente interno.

Para Meusel (2016), uma das maneiras de se alcançar edifícios mais eficientes ocorre pela inserção de conceitos de eficiência energética durante as etapas iniciais do processo de projeto. As decisões em fase inicial do projeto estão diretamente relacionadas ao consumo energético das edificações, pois, segundo Marcondes (2010), 22% do consumo total de uma edificação está associado à definição do

envelope e 6% à geometria. Portanto, torna-se importante o cuidado e a análise na definição de tais parâmetros.

Isto se justifica com a conclusão do estudo de Huang e Niu (2015) de que cerca de 80% dos estudos assinalam que a otimização do envelope construtivo está relacionada à redução do consumo energético da edificação.

Entretanto, o desempenho energético também está diretamente ligado ao comportamento do perfil de consumo de energia da edificação e de seus sistemas (iluminação, climatização e equipamentos) durante um período de tempo (dias, meses ou anos) (GONÇALVES e BODE, 2015). Essa percepção vai ao encontro dos dados apresentados pelo CBCS (2014), que indicam que cerca de 50% do consumo de energia nesses edifícios são provenientes do sistema de ar condicionado.

No que diz respeito às edificações comerciais, devido à maior densidade de usuários, equipamentos e iluminação, que tende a sobreaquecer os ambientes (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014), o consumo de energia está diretamente relacionado à quantidade de calor gerado no interior do edifício.

Em razão do aumento dos níveis de conforto térmico e de uso de equipamentos, a projeção do consumo energético em edifícios comerciais tende continuar aumentando a longo prazo. Portanto, manter um ambiente interno confortável com consumo mínimo de energia apresenta-se como uma tarefa desafiadora que atrai a atenção de especialistas em todo o mundo.

Nesse contexto, a análise do consumo de energia de uma edificação deve ser considerada tão importante quanto qualquer outro processo, no projeto ou na construção. Alternativas para redução do consumo são fundamentais para se atingir o equilíbrio energético em edifícios, cabendo aos arquitetos e demais projetistas a concepção de projetos mais eficientes, que primem pelo conforto do usuário e pelo uso racional de energia.

Desse modo, para que projetos com alto desempenho termoenergético sejam concebidos, deve-se considerar a utilização de estratégias arquitetônicas, eficiência dos equipamentos e sistemas de iluminação simultaneamente para, então, se obter menor consumo energético sem que as condições mínimas de conforto sejam comprometidas.

Em busca dessa arquitetura eficiente, faz-se necessária a aplicação de estratégias passivas e ativas para o alcance de melhor nível de conforto térmico e,

consequentemente, de maior desempenho energético. As estratégias passivas não utilizam energia elétrica para obter conforto e são alcançadas através da ventilação e iluminação natural, resfriamento evaporativo, etc. Logo, as estratégias ativas utilizam energia elétrica para a obtenção de conforto térmico, em conjunto com o uso de equipamentos de ar-condicionado, iluminação artificial, boilers, aquecedores diversos, etc. (LAMBERTS, DUTRA e PEREIRA, 2014; OCHOA e CAPELUTO, 2015).

Nesse cenário, a simulação computacional pode ser utilizada como uma importante ferramenta capaz de auxiliar o projetista no projeto de uma edificação e na obtenção de soluções mais eficientes energeticamente.

Ainda, existem diversos instrumentos e diretrizes a serem seguidas que balizam a busca por edificações eficientes. Dentre eles, no que diz respeito a edificações de escritórios, destaca-se o RTQ-C, ou ainda mais recente, a INI-C.

2.6.1 Simulação computacional para análise de eficiência energética de edificações

A simulação computacional é uma importante ferramenta utilizada para se analisar os dados de desempenho térmico e energético da edificação projetada e, consequentemente, adotar alterações necessárias na proposta arquitetônica, de forma a obter resultados mais eficientes, realizando alterações e novas simulações quantas vezes forem necessárias (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014).

Por meio da simulação computacional, diversos estudos nacionais e internacionais que analisam o desempenho termoenergético em edifícios de escritórios vêm sendo desenvolvidos e tornando-se balizadores à tomada de decisões por parte dos projetistas, no que diz respeito à obtenção de edifícios energeticamente mais eficientes.

Com base em simulações, Huang e Niu (2015) estudaram otimizações do envelope de edifícios de escritórios e concluíram que cerca de 80% dos estudos ligam-se à redução do consumo energético da edificação. Entre os principais parâmetros analisados, destaca-se a transmitância térmica, a absorvância, o percentual de abertura de fachada (PAF), o tipo de vidro, a espessura do material de isolamento, o formato do envelope construtivo e a utilização de dispositivos de proteção solar.

Brugnera *et al.* (2019) utilizaram o método de simulação computacional para caracterizar o desempenho energético de edificações de uso de escritórios de planta livre, em três regiões bioclimáticas brasileiras, com objetivo de analisar os impactos

da variação de parâmetros no consumo de energia do ar condicionado. Os resultados demonstraram que os aspectos mais relevantes a serem considerados no aumento do consumo energético da edificação foram o PAF, o tipo de vidro e a utilização de dispositivos de proteção solar.

Andreis, Besen e Westphal (2014) estudaram o desempenho energético de edifícios de escritórios de planta livre, em formato retangular, com 20 pavimentos tipo, com condicionamento de ar, localizados em sete cidades do Brasil: Curitiba-RS, Recife-PE, São Paulo-SP, Brasília-DF, Porto Alegre-RS, Salvador-BA e Rio de Janeiro-RJ. Os resultados obtidos identificaram que em todas as condições bioclimáticas analisadas, as fachadas completamente revestidas de vidro acarretam no aumento considerável do consumo energético. Verificou-se que em climas quentes, como Recife-PE, Salvador-BA e Rio de Janeiro-RJ, o uso de vidros duplos de controle solar apresentou maior eficiência. Em Curitiba-PR, São Paulo-SP e Brasília-DF, o vidro laminado de controle solar obteve desempenho semelhante ou melhor do que vidro duplo.

Friess, Rakhshan e Davis (2017) pesquisaram o desempenho energético de edifícios de escritórios nas cidades de Dubai (Emirados Árabes Unidos), Málaga (Espanha) e El Dorado – Arkansas (EUA). No estudo foi analisada a demanda de energia para resfriamento e aquecimento em função das propriedades do envelope construtivo. Entre as constatações, destacou-se que, conforme o aumento do isolamento das paredes e a redução do PAF, maior foi a redução no consumo energético.

Nesse sentido, percebe-se que a simulação computacional se destaca nos mais diversos estudos sobre eficiência energética, indicando um futuro ainda mais promissor, onde será possível auxiliar as decisões a serem tomadas durante a fase de projeto de uma edificação.

Ainda, um ponto importante a se ressaltar é o fato de existirem estudos de vários climas do mundo e do Brasil, porém, é essencial frisar que não foram encontrados estudos específicos sobre edifícios de escritórios localizados no grupo climático (GCL) 05.

2.6.2 Software de Avaliação

Na década de 70, foram desenvolvidas as primeiras ferramentas de simulações computacionais de edificações. A partir dos anos 90, nos Estados Unidos da América, foram elaboradas ferramentas utilizadas até os dias de hoje, entre elas o BLAST e o DOE-2, os quais já tiveram seus principais recursos adotados pelo *EnergyPlus* (MENDES *et al.*, 2005).

O software *EnergyPlus* se destaca entre os diversos programas de simulação computacional de edificações, por ser um dos programas mais confiáveis e utilizados no mundo como ferramenta para alcançar a eficiência energética em edifícios novos ou previamente construídos, pois opera de acordo com as normas ASHRAE 90.1 (1999) e ASHRAE 140 (2004), exigência contida na INI-C.

O *EnergyPlus* é um programa que foi desenvolvido pelo *Lawrence Berkeley National Laboratory* em sociedade com outros laboratórios para o Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE). Seu principal objetivo é estimar trocas térmicas, níveis de iluminação e consumo energético de edifícios a partir da modelagem física do edifício e de seus sistemas de ventilação, iluminação, aquecimento e resfriamento (PEREIRA e GHISI, 2008).

O software supracitado possui um *plug-in*, chamado *Euclid*, para ser utilizado no programa *SketchUp* do *Google* e possibilitar que o usuário crie e edite a geometria da edificação, de modo a facilitar a inserção de modelos para simulação através deste software de modelagem 3D. Além deste *plug-in* com o *SketchUp*, existem outros programas que fazem a interface com o *EnergyPlus* para otimizar a utilização do usuário com diferentes objetivos.

Além das análises termoenergéticas, o programa em questão oferece diferentes opções de configurações para estimar a produção de energia pelos módulos FV, sendo elas: *Simple*, *Equivalent One-Diode* e *Sandia*. A escolha determinará os modelos matemáticos utilizados para determinar a produção de energia (US DEPARTMENT OF ENERGY, 2019b).

Como dado de entrada, o método *Simple* necessita apenas de um valor fixo para eficiência do módulo, não sendo necessário detalhar matrizes de módulos específicos. Já o método *Equivalent One-Diode Model* (EODM), também conhecido como modelo TRNSYS de quatro ou cinco parâmetros, descreve as características de performance dos módulos FV a serem modelados, portanto, necessita da corrente e

da tensão destes, obtendo como resultado o desempenho operacional de um painel fotovoltaico dado pela insolação e temperatura operacional da célula.

O terceiro método é o *Sandia Photovoltaic Array Performance Model (SAPM)*, elaborado pelo *Sandia National Laboratory*, que utiliza equações de coeficientes baseados em medições reais e em ensaios experimentais. O mesmo apresenta uma configuração mais complexa, uma vez que solicita diversos dados de entrada referentes ao desempenho de marcas e modelos específicos do módulo FV em estudo (US DEPARTMENT OF ENERGY, 2019b). A escolha do método determinará os modelos matemáticos utilizados para determinar a produção de energia (ENERGYPLUS: *Input/Output Reference*, 2019), o que permite tomar decisões de projeto mais próximas à realidade.

Outra ferramenta disponível que possibilita a estimativa da produção de energia elétrica através da conversão FV é o *software Radasol* (LABSOL UFRGS, 2019), que, a partir dos dados do Atlas Brasileiro de Energia Solar (PEREIRA *et al.*, 2017), – que considera a disponibilidade do recurso solar através do arquivo climático local – estima a intensidade da radiação solar direta e difusa em superfícies inclinadas. Desse modo, com os valores acumulados da radiação incidente, utilizando fatores de eficiência na conversão, o referido programa estima a quantidade de energia elétrica produzida em determinado tempo, com a inclinação e o desvio azimutal específicos para a região climática analisada.

Em seu estudo, Bender (2018) analisou o desempenho energético de uma fachada solar FV, de um edifício comercial, e fez uma comparação entre os métodos de geração de energia pelos módulos FV, baseados na simulação computacional através do *EnergyPlus*, e o método de cálculo, através do auxílio do *Radasol*.

Em todas as comparações, o método de cálculo com o *Radasol* apresentou gerações de energia mais altas do que as verificadas através das simulações com o *EnergyPlus*. Nas situações onde foram inseridos apenas módulos opacos, ocorreu uma diferença considerável, de 29,95%. Já nos modelos em que foram aplicados vidros FV, o desvio foi de 23,89%. A autora destaca que essas diferenças podem estar relacionadas aos diferentes bancos de dados utilizados pelos *softwares*. No entanto, cabe ressaltar que o estudo em questão utilizou o método *Simple* de produção de energia pelos módulos FV.

Peng *et al.* (2015) realizaram um experimento ao ar livre, em Hong Kong, no qual mediram o desempenho de geração de energia através dos módulos FV aplicados em fachadas, e compararam os resultados com simulações no *EnergyPlus* através do método *Sandia*. A energia gerada no período de um ano foi estimada em 2,47% maior do que os valores comparados com os medidos no local.

Saber *et al.* (2014) avaliaram o desempenho de diferentes tipos de células solares em um edifício NZEB no clima tropical de Singapura, pesquisa na qual os resultados das simulações foram comparados com os dados de temperatura e de geração coletados. O modelo de células policristalinas foi simulado no método *Simple* e mostrou o maior desvio de percentual, variando entre 37% a 69% acima dos valores de potência medidos. Para o método SAPM também foi observada uma variação grande, de 37% a 59%.

Concluiu-se que o método EODM foi o que mais se aproximou das medições, com desvios de 21% a 53%. O método *Simple* não estima temperatura das células FV (SABER *et al.*, 2014), no entanto, para o método SAPM, os desvios de temperatura se encontraram na faixa de 3,4% a 7,2%, e para o método EODM, os mesmos situaram-se na faixa de 0,9% a 5,5% a menos em comparação com as medições. Portanto, o modelo de EODM pode capturar resultados mais precisos em contraste com os métodos *Simple* e SAPM.

Dessa forma, um modelo simulado é a representação de uma realidade mais ampla, e os *softwares* apresentam limitações que devem ser conhecidas para a modelagem, como é o caso da simulação térmica de sistemas de tecnologia solar FV integrados à edificação (BIPV) por meio do *EnergyPlus* (PENG; YANG, 2016).

Portanto, para a realização deste trabalho, optou-se pelo o cálculo direto da geração FV com o auxílio do programa *Radiasol* e o banco de dados do Atlas Brasileiro de Energia Solar.

2.6.3 Método de Avaliação de Edificações Comerciais - Instrução Normativa do Inmetro para Classificação de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas (INI-C)

O método RTQ-C classifica o desempenho energético utilizando um indicador de consumo que permite a identificação da classificação de um edifício. Esta é expressa por uma letra, em uma escala que varia de “A” (maior eficiência) até “E”

(menor eficiência), porém, não indica uma ideia de grandeza relacionada ao consumo real da edificação, limitando a quantificação de economia gerada por medidas de eficiência energética.

Portanto, o novo método da INI-C baseia-se no consumo de energia primária e compara a edificação considerando suas características reais com uma mesma edificação, chamada de referência, de características que equivalem a classe D de eficiência energética. Por possuir a opção de utilizar o consumo de energia primária como indicador de eficiência, permite a avaliação das energias elétrica e térmica, provenientes de diversas fontes.

Esse método avalia as edificações a partir da envoltória, do sistema de condicionamento de ar, da iluminação e, por fim, do aquecimento de água. A proposta indica o consumo estimado dos equipamentos que serão utilizados na edificação, o uso racional de água, a geração local de energia renovável e as emissões de CO₂.

A avaliação pode ocorrer tanto pelo método simplificado quanto pelo de simulação. A concessão da etiquetagem pode acontecer em dois momentos, com avaliação parcial ou por simulação. Esta última será utilizada neste trabalho.

Quando escolhido o método simplificado, serão utilizadas equações e tabelas que apresentam valores limites para a envoltória, a iluminação e o condicionamento de ar, e de acordo com o nível de eficiência energética de cada item.

Por outro lado, recomenda-se a avaliação por meio da simulação quando a edificação apresenta sistemas e formas mais complexas, possui ambientes de elevada produção de carga interna ou solução fora dos padrões. Tal método também é indicado para avaliar a eficiência energética da parcela naturalmente ventilada de um edifício comercial. Esse utiliza ferramentas de simulação computacional, como o *software EnergyPlus*, por intermédio de modelagem e configuração de todos os parâmetros da edificação.

O método de simulação apresenta o valor do consumo final de energia como dado de saída, sendo necessário aplicar fatores de conversão de energia elétrica para primária, conforme a fonte de energia apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 - Fatores de conversão de energia elétrica e térmica em energia primária.

Fontes de energia	Fator de conversão	
Energia elétrica	fcE	1,6
Energia térmica – Gás Natural (GN)	fcT	1,1
Energia térmica – Gás Liquefeito de Petróleo (GLP)	fcT	1,1

Fonte: INMETRO, 2021.

Para o método de simulação, é necessário elaborar um modelo que represente a edificação real e outro a edificação de referência, com classe “D” no consumo de energia primária.

Para o método de simulação, a INI-C exige que seja utilizado programa computacional de simulação termo energética avaliado pela ASHRAE *Standard* 140, modelado em 8.760 horas por ano, com variações horárias de ocupação, potência de iluminação e equipamentos, sistemas de ar condicionado de ar e ventilação natural definidos e, ainda, que seja capaz de produzir horários de uso final de energia (INMETRO, 2021).

O modelo real é configurado conforme o projeto dos sistemas, sendo alguns campos preenchidos com valores padrões estabelecidos, o que depende da tipologia da edificação comercial avaliada. Essas tipologias são apresentadas em oito grupos com funções semelhantes: escritórios, educacionais (de ensino fundamental, médio e superior), hospedagem (pequenas, médias e grades), hospitalares (clínicas e hospitais), varejo (lojas, *shopping centers*), mercados, alimentação (restaurantes e praças de alimentação) e tipologias que não se enquadram nessas descrições.

Para a modelagem e a simulação da condição de referência (classe “D”), são definidos os elementos construtivos e suas respectivas características, conforme a Tabela 3.

Tabela 3 - Elementos construtivos e suas respectivas características do modelo de referência.

	e (cm)	Λ (W/mK)	ρ (kg/m ³)	c (kJ/kgK)	Rt (m ² K/W)	Ut (W/m ² K)	Ct (kJ/m ² K)
Parede externa							
Argamassa externa	2,50	1,15	2000	1,00	0,02		
Bloco cerâmico	1,34	0,90	1600	0,92	0,02		
Câmara de ar	6,32	0,36	-	-	0,18	2,39	150
Bloco cerâmico	1,34	0,90	1600	0,92	0,02		
Argamassa interna	2,50	1,15	2000	1,00	0,02		
Cobertura							
Telha de fibrocimento	0,80	0,95	1900	0,84	0,084		
Câmara de ar (>5 cm)	25,00	1,19	-	-	0,21	2,06	233
Laje de concreto (10cm)	10,00	1,75	2200	1,00	0,0571		

* e – espessura (cm)

* λ – condutividade térmica (W/mK)

* ρ – peso específico aparente (kg/m³)

* c – calor específico (kJ/kgK)

* Rt – resistência térmica total (m²K/W)

* Ut – transmitância térmica total (W/m²K)

* CTt – capacidade térmica total (kJ/m²K)

Fonte: INMETRO, 2021.

De acordo com o método de simulação da INI-C, o processo para a classificação energética da edificação é definido através de seis passos. O primeiro consiste na determinação da tipologia a ser avaliada; o segundo determina o consumo de energia primária por meio da multiplicação do valor de conversão da energia elétrica dos modelos reais e de referência, a partir dos dados de saída da simulação; o terceiro momento determina o fator de forma da edificação, o qual é obtido através da razão entre a área do envelope e o volume total da edificação; no quarto passo, é determinado o coeficiente de redução do consumo de energia primária da edificação em sua condição real para a condição de referência, sendo que tal coeficiente depende do fator de forma (FF) e do GCL nos quais a edificação se encontra; no quinto passo, é calculado o coeficiente de intervalos entre as classes de eficiência energética; e no sexto e último passo é realizado o preenchimento da Tabela 4, referente ao intervalo de cada uma das classes de eficiência energética, o que possibilita a análise e a comparação com o nível de desempenho energético da edificação real com base nos consumos de energia primária do modelo de referência.

Tabela 4 - Intervalos relativos a cada uma das classes de eficiência energética.

Classe de eficiência	A	B	C	D	E
Limite superior	-	$> CEP_{REF}^1 - 3i$	$> CEP_{REF} - 2i$	$> CEP_{REF} - i$	$> CEP_{REF}$
Limite inferior	$< CEP_{REF} - 3i$	$\leq CEP_{REF} - 2i$	$\leq CEP_{REF} - i$	$\leq CEP_{REF}$	-

Fonte: INMETRO, 2021.

No que diz respeito à Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE), emitida pelo INMETRO, o nível de eficiência da edificação é informado por meio dos organismos de inspeção em eficiência energética, conforme o exemplo apresentado na Figura 4.

¹ Consumo de Energia Primária (CEP).

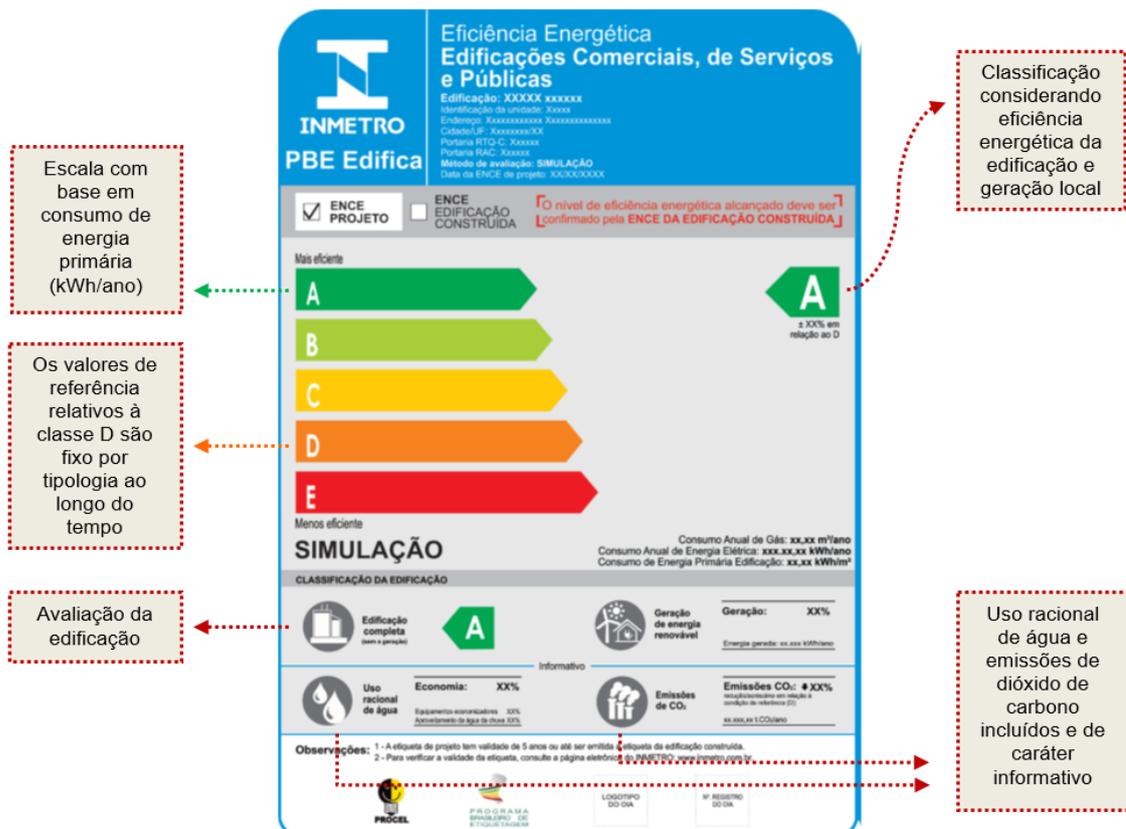


Figura 4 - Exemplo da nova proposta de ENCE para avaliação pelo método de simulação.
Fonte: INMETRO, 2021.

2.7 Edificações com balanço energético nulo

Visando a necessidade de redução do consumo de energia, no contexto mundial começam a surgir políticas a respeito de implementação de edifícios com balanço energético próximo a zero.

No que tange às políticas para promoção de edificações de energia zero, o principal marco sobre o assunto foi o lançamento da Diretiva 2010/31/EU - *Energy Performance of Buildings Directive* (EPBD) (PARLAMENTO EUROPEU e CONSELHO DA UNIÃO EUROPEIA, 2010). A partir dessa, os países europeus começaram a adotar definições ZEB's (*Zero Energy Buildings*) e a desenvolver suas políticas nacionais para a implementação do conceito, sendo que cada país define suas metodologias conforme suas condições nacionais, regionais ou locais.

No contexto brasileiro, não há definição de balanço energético nulo na legislação, sequer um plano de metas para atingir o conceito ZEB. Portanto, as regulamentações internacionais de eficiência energética estão em níveis bem mais avançados do que o brasileiro, tornando cada vez mais necessária a discussão sobre o assunto para a reformulação das normativas vigentes.

2.7.1 Conceitos ZEBs

A primeira concepção de ZEB surge nos anos 70, quando Esbensen e Korsgaard (1977, p. 195) descreveram um estudo experimental da Casa Energética Zero, construída pela Universidade Técnica da Dinamarca.

No entanto, foi em 2007, quando houve uma discussão mais abrangente do conceito ZEB, o momento em que foi chamada a atenção internacional em decorrência do aumento com a preocupação relativa às mudanças climáticas e os recursos hídricos (MARSZAL *et al.*, 2011).

O Reino Unido foi o primeiro país a fornecer a definição original de Casa de Zero Carbono, no final de 2006 (PANAGIOTIDOU; FULLER, 2013). O *Code for Sustainable Homes* (CSH) introduziu um sistema de classificação de sustentabilidade de seis etapas para construções, no qual uma residência no nível seis do código é uma “Casa de Carbono Zero”. De acordo com a definição, essa edificação possui emissões líquidas zero de CO₂ de todo o uso de energia, incluindo aquecimento, iluminação, água quente e outras fontes de energia (DCLG, 2006).

Ao mesmo tempo, Torcellini *et al.* (2006) discutem sobre a definição de energia zero em edifícios nos EUA, conceituando que:

Um edifício de energia zero líquida (ZEB) é um edifício residencial ou comercial com necessidades de energia bastante reduzidas por meio de ganhos de eficiência, de modo que o equilíbrio de necessidades de energia possa ser fornecido com tecnologias renováveis (TORCELLINI, 2006, p. 01).

Torcellini *et al.* (2006) apresenta quatro definições de ZEB:

a) *Net Zero Site Energy (Site-ZEB)*: produz a quantidade de energia necessária em um ano, contabilizada no local do consumo;

b) *Net Zero Source Energy (Source-ZEB)*: produz toda energia que consome em um ano, quando contabilizada na fonte. Energia de fonte refere-se à energia primária usada para gerar e fornecer a energia para o local;

c) *Net Zero Energy Costs (Cost-ZEB)*: Custos líquidos zero de energia. Em um custo ZEB, a quantia em dinheiro que a concessionária paga ao proprietário do edifício pela energia que o edifício exporta para a rede é pelo menos igual à quantia que o proprietário paga à concessionária pelos serviços e energia usada ao longo do ano;

d) *Net Zero Energy Emissions (Emissions-ZEB)*: Emissões líquidas de energia zero. Um edifício com emissões líquidas zero produz, pelo menos, tanta energia renovável livre de emissões quanto usa de fontes de energia produtoras de emissões.

Segundo D'Agostino e Mazzarella (2019), as principais definições relacionadas aos balanço energético nulo são relatadas na União Europeia e nos EUA e são identificadas como *EU NZEBs* e *US DOE ZEB*, respectivamente.

O conceito de *EU NZEBs* é definido como um edifício com um desempenho energético muito alto. A quantidade quase nula ou muito baixa de energia necessária deve ser, em grande medida, proveniente de fontes renováveis produzidas no local ou próximo. Ainda, ressalta-se que a EPBD declara que os Estados-Membros devem detalhar as definições do NZEB, refletindo condições nacionais, regionais ou locais, e incluindo um indicador numérico de energia primária uso expresso em quilowatt-hora por metro quadrado (kWh/m²) por ano (D'AGOSTINO; MAZZARELLA, 2019).

Os autores citados ainda apresentam o conceito de *US DOE ZEB*. Um ZEB é um edifício com eficiência energética em que, com base na fonte de energia, aquela fornecida anualmente real é menor ou igual à renovável exportada no local.

Conforme Tabela 5, pode-se observar outras definições a partir de diferentes termos e categorias encontrados na literatura.

Tabela 5 - Principais termos lançados em torno de edifícios com energia zero.

SIGLA	DESCRIÇÃO	CARACTERÍSTICAS	REFERÊNCIA
<i>nZEB</i>	<i>Nearly Zero Energy Building</i>	Edifício de alto desempenho energético, com uma quantidade muito baixa de energia necessária, coberta com uma extensão muito significativa pela energia de fontes renováveis no local ou próximas.	I
<i>NZEB</i>	<i>Net Zero Energy Building</i>	Edifício neutro de energia anual que fornece tanta energia para a rede quanto utiliza.	II
<i>PV-ZEB</i>	<i>Photovoltaic Zero Energy Building</i>	Edifício com baixa demanda de energia elétrica e com sistema fotovoltaico (PV).	III
<i>Wind-ZEB</i>	<i>Wind Zero Energy Building</i>	Edifício com baixa energia elétrica que exige uma turbina eólica no local.	III
<i>PV-Solar thermal-heat pump ZEB</i>	<i>Photovoltaic Solar thermal heat pump Zero Energy Building</i>	Edifício com demanda de calor e eletricidade, um sistema fotovoltaico combinado com coletores solares térmicos, bombas de calor e armazenamento de calor.	III
<i>Wind-Solar thermal-heat pump ZEB</i>	<i>Wind Solar thermal heat pump Zero Energy Building</i>	Edifício com baixa demanda de calor e eletricidade e uma turbina eólica em combinação com coletor solar térmico, bomba de calor e armazenamento de calor.	III
<i>ZEB</i>	<i>Zero Energy Building</i>	Energia consumida igual a zero por um edifício em sua operação diária.	IV
<i>ZEB</i>	<i>Zero Emission Building</i>	Zero emissão de carbono liberado no meio ambiente.	IV
<i>NZSoEB</i>	<i>Net Zero Source Energy Building</i>	Edifício que produz em seu local a quantidade de energia que consome em um ano, quando contabilizado na fonte.	IV

NZSiEB	<i>Net Zero Source Energy Building</i>	Um edifício que produz, em sua localização, tanta energia quanto gasta em um ano, quando contabilizado no edifício.	IV
NZEC	<i>Net Zero Energy Cost Building</i>	A quantidade de dinheiro que o proprietário paga pela energia consumida é equilibrada pelo dinheiro que esse recebe pela energia entregue à rede durante um ano.	IV
nNZEB	<i>Nearly Net Energy Building</i>	Edifício com custo nacional e uso ideal de energia primária maior do que zero.	V
<i>Autonomous ZEB</i>	<i>Autonomous Zero Energy Building</i>	Edifício independente, que fornece suas próprias necessidades de energia.	VI
+ZEB	<i>Energy Plus Building</i>	Um edifício que produz mais energia a partir de fontes renováveis do que importa, ao longo de um ano.	VI
I	(PARLAMENTO EUROPEU e CONSELHO DA UNIÃO EUROPEIA, 2010)		
II	(PANAGIOTIDOU e FULLER, 2013)		
III	(ZACÁ <i>et al.</i> , 2015)		
IV	(LUND, MARSZAL e HEISELBERGB, 2011)		
V	(VOSS, SARTORI e LOLLINI, 2012)		
VI	(LAUSTSEN e INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2008)		

Fonte: Adaptado de D'AGOSTINO e MAZZARELLA, 2019.

Em face ao exposto, torna-se complexa uma definição específica para edifícios ZEB's, tendo em vista os seus mais variados conceitos. Por outro lado, em todas as abordagens do tema, fica clara a busca por metas de melhorias de desempenho das edificações, ou seja, um edifício deve ser projetado com objetivo de encontrar o melhor balanço entre desempenho energético e geração de energia, em conjunto com a baixa emissão de CO₂ e a geração de energia renovável no local.

2.7.2 Estratégias para o alcance do balanço energético nulo

Segundo Voss e Musall (2012), para um edifício ser um NZEB, devem ser considerados quatro elementos durante o projeto da edificação, sendo eles: consumo energético para os usos finais (incluem equipamentos, iluminação e condicionamento de ar), estratégias passivas (arquitetura), eficiência energética e produção de energia elétrica (no local). Ainda, discutem as fontes de energia renováveis e a forma dos edifícios (relação entre área exposta e volume total) para serem considerados NZEB. Destacam também que os edifícios com maior área exposta de envoltória em relação ao volume total possuem um potencial maior para a produção de energia solar FV e são passíveis de alcançar a meta do balanço energético nulo.

Além disso, o consumo energético também está relacionado à forma do edifício. Didoné (2014) trabalhou o tema NZEB em edifícios de escritórios parametrizando as variáveis de altura, largura e comprimento considerando a produção de energia por meio de módulos FV semitransparentes localizados nas janelas e módulos solares FV opacos na cobertura. As simulações térmicas e de produção de energia foram

realizadas no *software EnergyPlus* e as simulações de luz natural, no *Daysim*. O balanço entre consumo e produção de energia elétrica foi considerado e os resultados da pesquisa demonstraram uma relação ideal de largura, comprimento e altura otimizada para os edifícios de escritórios nas cidades de Florianópolis-SC e Fortaleza-CE.

Em Florianópolis, a tipologia testada de até três pavimentos alcançou a meta do ZEB com a forma em planta próxima ao quadrado (razão entre o comprimento e largura próxima a um e com altura de 16,2m). Os edifícios de até seis pavimentos alcançaram o padrão *Nearly ZEB* com a razão (largura x comprimento) de 1/3 (25m x 8m) com a altura de 29,7 metros (m). A meta de ZEB dificilmente é alcançada em edifícios maiores do que quatro pavimentos com plantas mais largas (razão entre altura e comprimento próxima de um).

A autora concluiu que a maioria dos tipos de edifícios podem alcançar a meta ZEB com até três pavimentos em Florianópolis e com quatro em Fortaleza, porém, os edifícios de escritórios de até seis pavimentos são mais passíveis de se tornarem ZEB nos contextos climáticos de Fortaleza e Florianópolis. Nas edificações com mais de seis pavimentos, a meta do balanço energético nulo é mais difícil de ser alcançada.

Costa (2018) estudou edifício de escritório NZEB no contexto climático da cidade de Brasília-DF. Para tal, adotou um modelo representativo de quatro pavimentos e simulou os consumos finais de energia para ar condicionado, iluminação e equipamentos. Para isso, o estudo considerou as variáveis arquitetônicas de envoltória baseadas em estratégias que podem promover o balanço energético nulo. Ainda, foram realizadas simulações de produção de energia solar FV aplicadas ou integradas nas envoltórias dos edifícios. Foi obtida uma redução de 46% no consumo energético total do modelo de edifício convencional se comparado ao otimizado e, por fim, a meta de balanço energético nulo foi alcançada neste.

Quanto aos sistemas elétricos dos edifícios, o relatório da *International Energy Agency* (2015) apresenta, na Tabela 6, os principais sistemas de edifícios convencionais e dos edifícios *ZEBs*, quando otimizados energeticamente.

Tabela 6 - Principais características dos sistemas elétricos de edifícios convencionais e *ZEBs*.

Sistemas dos edifícios	Edifícios convencionais	Edifícios ZEBs
Envoltória do edifício	Passivo, não projetado como sistema de energia.	Otimizado para o desenho passivo e a integração de sistemas solares ativos, desenho de acordo com a radiação solar.
Ventilação, sistemas de aquecimento e resfriamento (HVAC)	Sistemas superdimensionados.	Controles otimizados e integração com sistemas passivos, considerando a eficiência energética dos sistemas de resfriamento e aquecimento.
Sistemas solares / geração de energia renovável	Nenhuma integração - uma reflexão tardia.	Totalmente integrado: luz natural, energia térmica solar, sistemas FV, solar híbrido, sistemas geotérmicos e biocombustíveis.
Sistemas de automação predial	Sistemas de automação predial não utilizados de maneira eficaz.	Controles do edifício para otimizar conforto e desempenho energético.
Projeto e operação dos usuários	Projeto dos sistemas e operação dos usuários são considerados de forma separada.	Projeto e operação de edifícios totalmente integrados, de maneira a criar maior conforto ambiental.

Fonte: Adaptado de INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2015.

A *International Energy Agency* (2014) publicou, em seu *Task 40 - Subtask C*, um relatório de estudos e soluções para edifícios ZEB, onde são descritos os dados relevantes do edifício, como o consumo energético, detalhes dos sistemas de produção de energia e uma breve análise do clima local. Na Tabela 7, são apresentados quatro estudos de caso de edifícios de escritório localizados em climas temperados, com as estratégias necessárias para redução do consumo energético.

Tabela 7 - Estudos de caso de edifícios de energia zero em climas temperados.

Edifício <i>Meridian Building</i>		
	Estratégias utilizadas:	
	Ganhos solares passivos (radiação solar); Ventilação noturna; Equipamentos eficientes. Geração de energia: Módulos FV na cobertura.	
Localização: Wellington, Nova Zelândia		
Clima: Temperado	Consumo energético e produção de energia:	
Principal estratégia recomendada: aquecimento (40% do ano) e resfriamento (60% do ano)	Consumo de energia elétrica (final) kWh/m ² ano.	Produção de energia kWh/m ² ano.
	98	98
Edifício <i>SOLAR XXI</i>		
	Estratégias utilizadas:	
	Aproveitamento da luz natural nos ambientes internos; integração da fachada com os módulos FV; utilização da ventilação natural; fachada ventilada; aberturas zenitais nos ambientes do segundo pavimento; sombreamento externo das aberturas; controles avançados do sistema de iluminação artificial.	
Localização: Lisboa, Portugal		
Clima: Temperado	Consumo energético e produção de energia:	

Principal estratégia recomendada: aquecimento (35% do ano) e resfriamento (65% do ano)	Consumo de energia elétrica (final) kWh/m ² ano 24	Produção de energia kWh/m ² ano 25
Edifício Green Office		
	Estratégias utilizadas:	
	Massa térmica para aquecimento; aproveitamento da luz natural; ventilação natural; dispositivos de controle solar (sombreamento externo); equipamentos eficientes; isolamento térmico da parede e da cobertura. Geração de energia: Módulos FV (fachada e cobertura).	
Localização: Paris, França		
Clima: Temperado	Consumo energético e produção de energia:	
Principal estratégia recomendada: aquecimento (50% do ano) e resfriamento (50% do ano)	Consumo de energia elétrica (final) kWh/m ² ano 38	Produção de energia kWh/m ² ano 20
Marché International Support Office		
	Estratégias utilizadas:	
	Aproveitamento da luz natural; módulos FV no telhado; utilização da ventilação natural; e varandas para sombreamento.	
Localização: Kemptthal, Suíça		
Clima: Temperado	Consumo energético e produção de energia:	
Principal estratégia recomendada: aquecimento (40% do ano) e resfriamento (60% do ano)	Consumo de energia elétrica (final) kWh/m ² ano 39	Produção de energia kWh/m ² ano 32

Fonte: Autora, dados de INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (2014).

Nos quatro estudos de caso, as estratégias utilizadas para redução do consumo energético variam conforme as estações do ano, porém, prevalecem as que conduzem para a economia de energia com o aquecimento artificial.

No que diz respeito ao consumo de energia elétrica dos edifícios, os mesmos variam de 24kWh/m²ano a 98kWh/m²ano. A escolha do tipo de fonte de energia renovável foi a solar FV em todos os estudos de caso.

No primeiro estudo, o consumo de energia do edifício é de 98kWh/m²ano e as tecnologias FV foram aplicadas somente na cobertura, com uma produção de energia de valor igual ao seu consumo. O segundo edifício estudado, possui um consumo energético igual a 24kWh/m²ano e gera 25kWh/m²ano de energia através da integração das tecnologias FV, aplicadas somente na fachada. No caso do terceiro estudo, há um consumo de 38kWh/m²ano de energia e produção 20kWh/m²ano, por meio das tecnologias FV aplicadas no telhado e também integradas na fachada. O

último caso, possui um consumo de energia elétrica igual a 39kWh/m²ano e produz 32kWh/m²ano de energia através do FV aplicado na cobertura.

Portanto, dos quatro estudos de caso apresentados, os dois primeiros conseguiram alcançar a meta de balanço energético nulo com as estratégias que foram aplicadas.

Existem vários conceitos de balanço energético, nos quais os autores demonstram diferentes métricas para o balanço energético de uma edificação ZEB. Os valores podem se basear em emissão de gás carbônico, relação entre consumo e produção de energia elétrica, custos de construção e manutenção, etc.

Neste trabalho, adota-se como balanço energético nulo a ideia de quando a produção de energia se iguala à demanda energética do edifício. A métrica utilizada corresponde à energia para os usos finais (o funcionamento dos sistemas de ar-condicionado, iluminação e equipamentos).

Quanto às fontes renováveis de energia a serem utilizadas para a obtenção de um edifício com balanço energético nulo, Torcellini *et al.* (2006) sugerem uma hierarquia entre as fontes. Na Tabela 8, são apresentadas as diferenças entre as fontes renováveis com exemplos.

Tabela 8 - Hierarquia das opções de fontes de energia renovável para uso de edificação de balanço energético nulo.

Opções	Estratégias	Exemplos
0	Reduzir consumo de energia através de tecnologias de baixo consumo desta.	Iluminação natural, sistemas de condicionamento de ar, equipamento e iluminação de alta eficiência, ventilação natural, resfriamento evaporativo.
Opções de suprimento de energia local		
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 de suprimento de energia externa		
3	Uso de fontes renováveis disponíveis fora do terreno para gerar energia no terreno.	Biomassa, lenha, etanol ou biodiesel, que 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: Adaptado de TORCELLINI *et al.*, 2006.

As estratégias 1 e 2 são denominadas de "On-site ZEB" e as 3 e 4 de "Off-Site ZEB" (TORCELLINI *et al.*, 2006).

Este trabalho refere-se aos edifícios que utilizam estratégias 0 e 1 somente. Para a obtenção do balanço energético nulo, será utilizada a opção 1, sendo a energia solar FV.

Neste contexto, destaca-se a necessidade de compreender e avaliar qual o nível de eficiência energética mínimo que uma edificação comercial precisa, buscando-se a viabilidade econômica para alcançar o balanço energético nulo.

2.8 A energia solar FV

Diariamente, incide sobre a superfície da terra mais energia vinda do sol do que a demanda total de todos os habitantes de nosso planeta durante um ano (RÜTHER, 2004).

A energia solar é a conversão da luz solar em formas de energia renováveis. As tecnologias mais instituídas são a energia solar FV, térmica e aquecimento e resfriamento solar.

A energia solar FV é uma opção tecnológica eficaz para a descarbonização do setor de energia e para o fornecimento sustentável de energia. Além disso, pode ser implantada de maneira modular quase em todos os lugares do planeta (JÄGER-WALDAU, 2019). A implantação de sistemas solares fotovoltaicos distribuídos em residências, edifícios comerciais e industriais vem crescendo exponencialmente.

Na Figura 5, observa-se que a capacidade de geração de energia solar FV vem crescendo significativamente, desde 2002, a nível mundial. Em 2016, foram gerados 329.538 giga-watt-hora (GWh) e, em 2018, cerca de 554.382 GWh, um aumento de 68,23%.

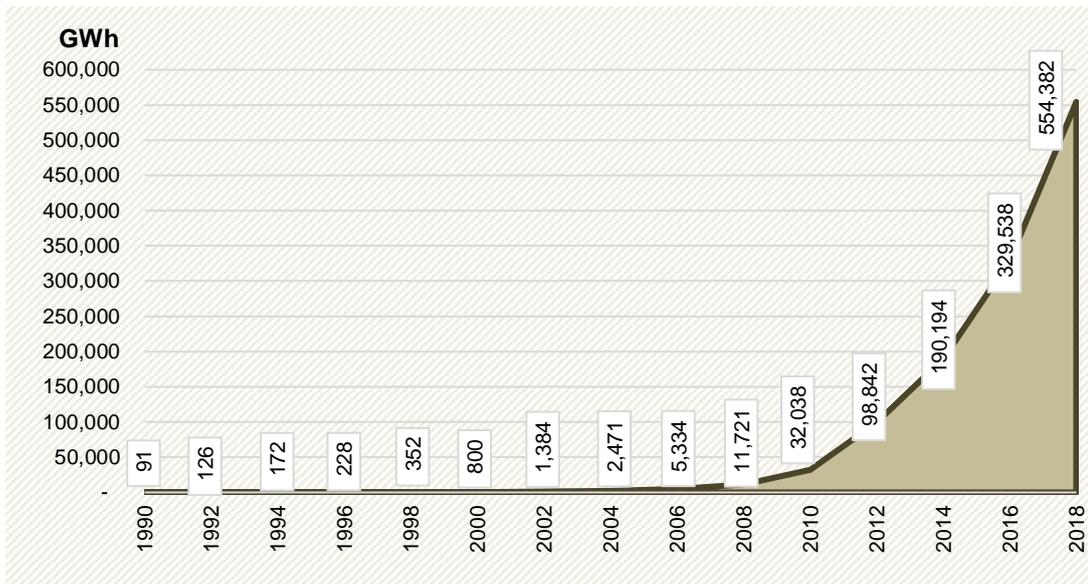


Figura 5 - Evolução da geração de energia solar FV no mundo.
Fonte: Adaptado de INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2021.

Conforme a Figura 5, na qual são apresentados os cinco países maiores geradores de energia solar no mundo e o Brasil, identifica-se que, em 2015, a China tornou-se o país que mais gera energia FV no mundo. Em 2019, gerou 197.900 GWh, ou seja, 35,7% da capacidade global, enquanto a Alemanha, uma das pioneiras, manteve-se de 2014 até 2017 com a mesma capacidade de geração FV, sem acréscimo expressivo, ocorrendo um aumento em 2018, com capacidade total de 45.784 GWh (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2021).

Tabela 9 - Geração de energia solar FV em GWh de alguns países.

País/Ano	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
China	699	2.604	6.350	15.452	29.196	44.783	75.315	131.296	197.900
Japão	3.543	4.839	6.613	12.879	22.952	34.803	45.761	55.069	62.668
Alemanha	11.729	19.599	26.380	31.010	36.056	38.726	38.098	39.401	45.784
EUA	3.063	5.322	9.186	14.858	23.076	32.091	46.633	67.393	81.244
Itália	1.906	10.796	18.862	21.589	22.306	22.942	22.104	24.378	22.654
Brasil				5	16	59	85	832	3.461

Fonte: Autora, com base nos dados de INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2021.

O Brasil não se situa entre os países líderes em energia solar FV, mas apresenta grande avanço na geração por essa fonte. No ano de 2017, observa-se um aumento significativo em relação aos anos anteriores, com geração de 832 GWh, já em 2018, atingiu 3.461 GWh, o que representa um acréscimo de aproximadamente 416% em relação ao ano anterior (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2021).

Quando analisado o potencial energético dos países que mais investem em energia solar FV em comparação com o Brasil, torna-se possível observar que a irradiação solar no território brasileiro é a maior e mais uniforme em sua distribuição

comparado aos líderes do mercado FV. Tais dados podem ser observados nas Figura 6 a 11, nas quais são apresentados os mapas de irradiação da Alemanha, China, Japão, Estados Unidos, Itália e Brasil, respectivamente.



Figura 6 - Mapa de irradiação global horizontal da Alemanha.
Fonte: SOLARGIS, 2021.

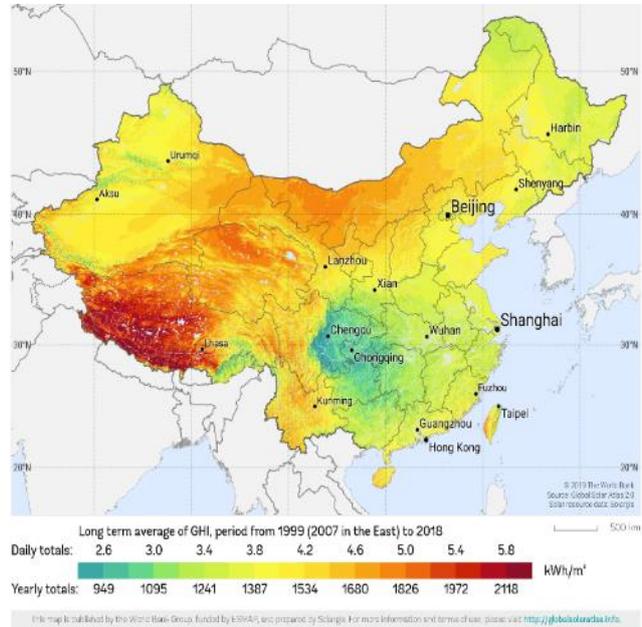


Figura 7 - Mapa de irradiação global horizontal da China.
Fonte: SOLARGIS, 2021.



Figura 8 - Mapa de irradiação global horizontal do Japão.
Fonte: SOLARGIS, 2021.

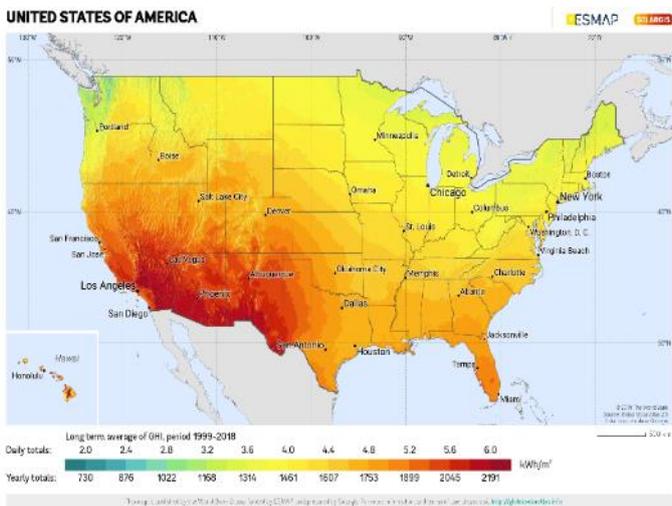


Figura 9 - Mapa de irradiação global horizontal dos Estados Unidos.
Fonte: SOLARGIS, 2021.



Figura 10 - Mapa de irradiação global horizontal da Itália.
Fonte: SOLARGIS, 2021.

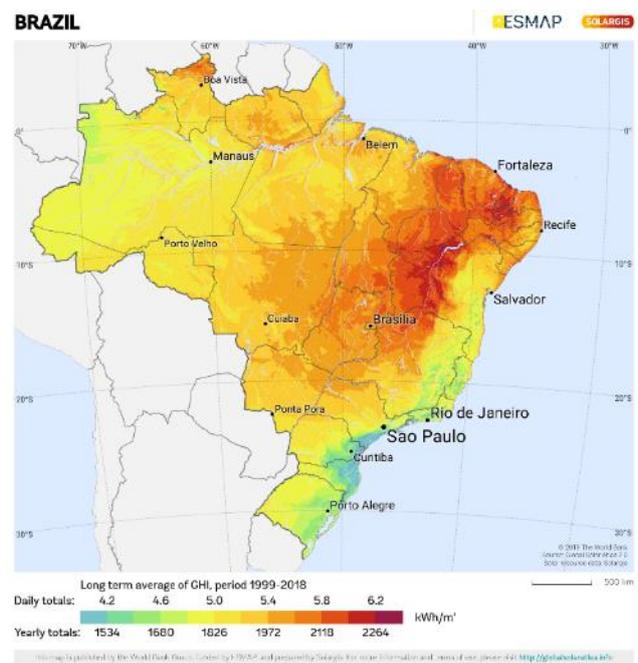


Figura 11 - Mapa de irradiação global horizontal do Brasil.
Fonte: SOLARGIS, 2021.

Ainda, a Tabela 10 apresenta um resumo das quantidades mínimas e máximas de irradiação horizontal dos países analisados.

Tabela 10 - Resumo de quantidade de irradiação global.

	kWh/m ² /ano mínimo	kWh/m ² /ano máximo
China	949	2118
Japão	1022	1607
Alemanha	949	1241
EUA	730	2191
Itália	1022	1899
Brasil	1534	2264

Fonte: Autora com base nos dados de SOLARGIS, 2021.

No Brasil, onde os valores de irradiação solar global incidente em qualquer região (1534-2264 kWh/m²/ano) são altos, a energia FV tem grande potencial, dada a vasta disponibilidade solar territorial se comparada a países menores territorialmente e com irradiação solar global incidente inferior. Como comparativos, tem-se a China (949-2118 kWh/m²/ano), o Japão (1022-1607 kWh/m²/ano), a Alemanha (949-1241 kWh/m²/ano), os Estados Unidos (730-2191 kWh/m²/ano) e a Itália (1022-1899 kWh/m²/ano), que apresentam capacidades instaladas superiores à brasileira.

Nesse contexto, o Brasil apresenta enorme potencial para a exploração da energia solar, tendo em vista que mesmo os locais com menor incidência de irradiação

solar (1534kWh/m²/ano) são superiores as máximas da Alemanha (1241kWh/m²/ano), por exemplo. Portanto, em sua melhor condição, este último país recebe um índice de radiação solar aproximadamente 19,1% menor do que o índice da região menos ensolarada do Brasil.

Portanto, os altos valores de incidência de irradiação solar no Brasil indicam o grande potencial de exploração das tecnologias FV para integrá-las às edificações, de forma a obter edifícios ZEB no país.

2.9 Tecnologias FV e a arquitetura

Entre as FRE disponíveis, a energia solar FV é a que mais apresenta possibilidades de integração com as edificações, tendo em vista seu avanço tecnológico e, principalmente, a facilidade de instalação e a grande capacidade de operação em edificações (DÁVI, 2013).

Os SFV são uma tecnologia que converte energia solar em elétrica diretamente, de forma silenciosa e sustentável. A possibilidade de instalar os módulos FV em edifícios é uma opção promissora, pois podem ser adicionados/anexados em superfícies existentes ou em espaços ociosos da edificação – *Building Applied Photovoltaics* (BAPV) ou de forma integrada ao edifício, podendo ter a função de substituir elementos construtivos convencionais da edificação – *Building Integrated Photovoltaics* (BIPV).

As instalações solares fotovoltaicas integradas a prédios comerciais de escritórios e interligadas à rede elétrica pública são um exemplo de aplicação ideal destes sistemas, onde picos de consumo e geração são muitas vezes coincidentes, aliviando assim o sistema de distribuição da concessionária elétrica. Isto acarreta não somente uma economia de energia, mas também o aumento da vida útil de transformadores e outros componentes do sistema de distribuição (RÜTHER, 2004, p. 16).

Rüther (2004) ainda destaca que os SFV interligados à rede elétrica podem ser integrados à arquitetura de qualquer edificação, sendo uma orientação solar favorável (superfície voltada tanto quanto o possível para o norte geográfico no hemisfério sul e para o sul geográfico no hemisfério norte e com um mínimo de obstrução por sombreamento) o único requisito fundamental.

Com o avanço das pesquisas nos últimos anos, vem sendo apontado que os SFV não são somente elementos geradores de eletricidade presos em algum lugar do

edifício, mas sim passam a ser elementos cada vez mais estéticos nas edificações (MERCALDO *et al.*, 2009).

Diversas pesquisas apontam o potencial de diferentes edifícios de escritórios com a integração de SFV. Na literatura, encontra-se, ainda, pesquisas sobre o processo de projeto de edifícios no que diz respeito à otimização do desempenho energético e à utilização de SFV para o uso de energia das edificações.

Rüther (2004) aponta que, por serem projetados e fabricados para que funcionem em ambiente externo, os módulos FV são apropriados à integração ao envoltório das edificações, podendo ter dupla função: gerar eletricidade e funcionar como elemento arquitetônico na cobertura, fachadas e janelas.

Kim *et al.*, (2010) estudaram métodos de otimização da operação de dispositivos de sombreamento integrando SFV para alcançar seus benefícios máximos em espaços internos e ocupantes. Foram examinados dispositivos de sombreamento por meio de protótipos que consistiam em várias persianas ajustáveis revestidas com células FV. Os autores concluíram que as venezianas inclinadas para baixo a partir da posição horizontal aumentam a produção de eletricidade e diminuem os níveis da luz do dia interior, o que considera-se benéfico para a produção de eletricidade e para níveis adequados de iluminação interna.

Sorgato, Schneider e Ruther (2018) avaliaram a viabilidade de empregar sistema BIPV de telureto de cádmio de filme fino (CdTe), através de análise técnica e econômica para o mesmo edifício de escritório, em seis cidades brasileiras (Florianópolis-SC, Curitiba-PR, São Paulo-SP, Rio de Janeiro-RJ, Brasília-DF e Belém-PA). Os resultados ilustraram que é viável atender ao consumo anual de energia líquida do edifício estudado com um sistema BIPV aplicado em telhados e integrado em fachadas.

Kapsis, Dermardiros e Athienitis, (2015) apresentaram o impacto potencial de janelas FV semitransparentes no desempenho da iluminação em fachadas de edifícios comerciais. As atividades de três configurações de fachada foram examinadas, integrando células espaçadas opacas, baseadas em silício (Si), e tecnologias transparentes de filmes finos. Os resultados das simulações sugerem que um módulo fotovoltaico semitransparente com eficiência visível e transmitância de 30%, integrado como a camada externa de vidro de uma janela com vidro duplo, fornece luz do dia em quantidade suficiente.

Além disso, uma configuração de fachada de três seções que integra as células FV espaçadas com base em Si, na seção superior, e o fotovoltaico de filme fino, na seção central da fachada, tem o potencial de maximizar a utilização da luz do dia e a vista para o exterior.

Por meio do auxílio do *software EnergyPlus*, Didoné e Wagner (2013) pesquisaram a instalação de janelas FV semitransparentes na realidade climática de duas cidades brasileiras: Fortaleza e Florianópolis. O estudo apresentou a avaliação do consumo de ar condicionado com uso de diferentes vidros: (i) vidro simples, com seis milímetros (mm) de espessura; (ii) vidro duplo; (iii) vidro insulado; (iv) vidro insulado fotovoltaico com película orgânica e (v) vidro insulado fotovoltaico de silício amorfo.

Outro estudo que disse respeito aos vidros fotovoltaicos, porém em instalações reais, foi o de Olivieri *et al.* (2014), no qual os autores testaram, principalmente, a diferença entre a transparência dos vidros na eficiência de geração de eletricidade e concluíram que esta não é, em si, um fator determinante para a geração de eletricidade, uma vez que os vidros com transparências de 10%, 20% e 30% apresentaram eficiências semelhantes. Cabe ainda ressaltar que foi testado apenas um painel de cada vidro, o que não é suficiente para garantir uma amostra com relevância estatística.

Didoné; Wagner; Pereira (2014) apresentaram um estudo de edifícios ZEB, localizados nas cidades de Florianópolis e Fortaleza. Foram aplicadas diversas tecnologias FV, em diferentes locais da envoltória, possibilitando, assim, uma avaliação de seu potencial quando aplicado em diferentes inclinações e orientações. Destacaram-se os vidros FV semitransparentes, uma vez que demonstraram ser uma ótima alternativa para a substituição de vidros convencionais em janelas.

Apesar dos módulos apresentarem uma eficiência de apenas 3%, conseguiram gerar 21% de energia em Florianópolis e 11% em Fortaleza. Os autores sugeriram, ainda, que em grandes centros urbanos, nos pavimentos inferiores das edificações, as janelas tenham vidros claros, já que, além de apresentar menor radiação disponível devido às interferências do entorno, deve-se aproveitar mais a luz natural existente, que é de menor índice em relação aos pavimentos superiores.

2.9.1 Tecnologia FV em edifícios

Um sistema fotovoltaico é composto basicamente por células FV que são associadas eletricamente e encapsuladas para formar o módulo FV. Um módulo pode ser construído por um conjunto de células FV associadas em série e/ou paralelo, e tal associação depende dos parâmetros elétricos (tensão, corrente e potência) mais adequados à aplicação a que o módulo se destina. Por sua vez, os módulos FV são combinados com um conjunto de componentes adicionais do sistema dependentes da aplicação, como por exemplo inversores, baterias, componentes e sistemas de montagem (PINHO; GALDINO, 2014).

De acordo com esses autores, diversas tecnologias de fabricação de células FV foram desenvolvidas nos últimos anos, porém, as fabricadas a partir de lâminas de silício cristalino (monocristalino ou policristalino) dominam o mercado mundial atualmente (PINHO; GALDINO, 2014).

Ogbomo *et al.*, (2017) pesquisaram a participação do mercado FV em edifícios, a nível mundial. Os seis materiais mais comuns são apresentados na Figura 12, sendo que o silício policristalino (p-Si) demonstra a sua maior participação, com valor de 54%.

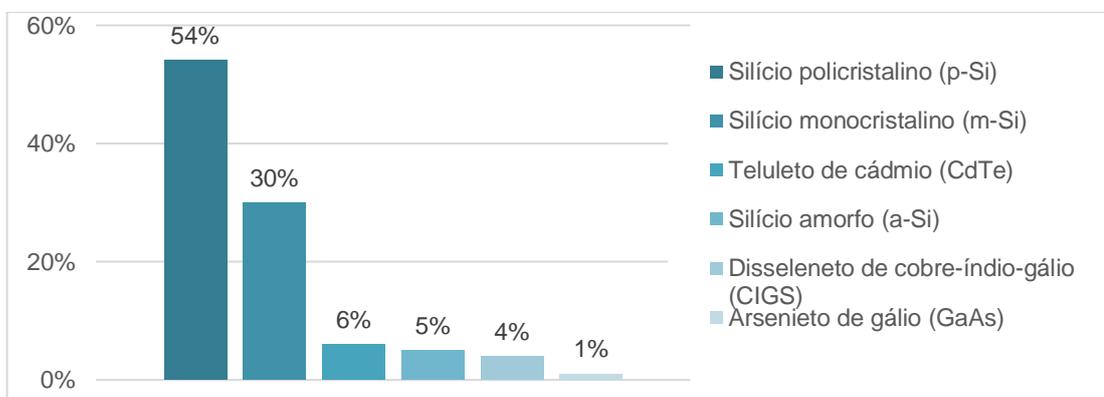


Figura 12 - Participação no mercado mundial em tecnologia FV.
Fonte: Adaptado de OGBOMO *et al.*, 2017.

Dentre os diversos semicondutores utilizados para a produção de células solares FV, destaca-se as tecnologias utilizadas em edifícios, apresentadas no diagrama da Figura 13. Todas essas tecnologias diferem em termos de material e de estrutura empregados e, conseqüentemente, influenciam a eficiência da conversão de energia.



Figura 13 - Diagrama das principais tecnologias de células FV.
Fonte: Adaptado de KUMAR e KUMAR, 2017.

a) Células FV de Silício cristalino (c-Si)

Esta tecnologia FV é mais tradicional e a única, entre as mencionadas acima, que faz uso de lâminas cristalinas (diâmetro ~10cm tipicamente) relativamente espessas (espessura 300-400 micrómetros), o que representa maior limitação em termos de redução de custos de produção. Todas as outras tecnologias baseiam-se em películas delgadas (filmes finos, com espessura da ordem de 1 μ m) de material ativo semiconductor, e é neste aspecto que reside o grande potencial de redução de custos que essas tecnologias detêm (RÜTHER, 2004).

Na Figura 14, pode-se observar um esquema dos componentes de um módulo FV com células de silício cristalino (c-Si).

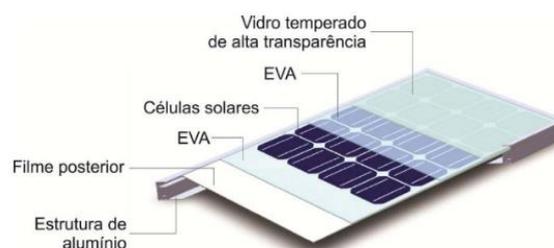


Figura 14 - Esquema dos componentes de um módulo FV com células de silício cristalino (c-Si).
Fonte: PINHO E GALDINO, 2014.

As células FV compostas por material semiconductor de silício cristalino (c-Si) subdividem-se em três tipos: Silício Monocristalino (m-Si); Silício Policristalino (p-Si); e Células de Arseneto de Gálio (GaAs).

b) *Células FV de Filmes Finos*

As células solares de película fina geralmente são categorizadas de acordo com o material FV usado, sendo as três principais tecnologias Silício Amorfo (a-Si), Telureto de Cádmio (CdTe) e Disseleneto de Cobre e Índio (CIS) ou Disseleneto de Cobre, Índio e Gálio (CIGS). O material mais comum é o a-Si.

Os módulos de filme fino podem ser subdivididos em três categorias principais, dependendo do substrato usado, em particular: vidro, metal ou material polimérico. Os módulos FV de película fina também existem em formas flexíveis e leves, além de opacos ou semitransparentes (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2012).

c) *Células FV Híbridas*

Essa tecnologia envolve a combinação de materiais semicondutores orgânicos e inorgânicos. Convencionalmente, as células solares são compostas por materiais inorgânicos (principalmente silício) que possuem alta eficiência de conversão, mas alto custo de produção. Por outro lado, aquelas feitas de materiais orgânicos possuem um baixo custo de produção (KUMAR; KUMAR, 2017).

Esses módulos podem ser subdivididos em duas categorias principais: heterojunção, no inglês *Heterojunction with Intrinsic Thin Layer* (HIT) e *Perovskite*.

d) *Células sensíveis ao corante*

Essa tecnologia utiliza um substrato nanoestruturado inorgânico (nanopartículas de dióxido de titânio), coberto com um corante molecular que utiliza um processo de fotossíntese artificial para gerar eletricidade (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2012).

Entre as principais vantagens dessas células estão o menor custo de produção, o processo simples de fabricação e as características estéticas especiais, como cores e transparência (KUMAR; KUMAR, 2017). Sua eficiência pode chegar a 11% (AKINYELE; RAYUDU; NAIR, 2015).

e) *Células Solares Orgânicas ou Poliméricas (OPV)*

As células solares orgânicas estão desenvolvendo novas tecnologias e ganhando popularidade como material alternativo de célula solar. Apresentam algumas propriedades adequadas, como flexibilidade mecânica, baixo custo de

material e produção, são descartáveis, leves e semitransparentes (KUMAR; KUMAR, 2017).

A tecnologia orgânica é subdividida em dois grupos: camada simples e múltiplas.

Tendo em vista o exposto, existem várias opções de tecnologias FV para a integração em edifícios. Suas propriedades variam de acordo com o material semicondutor empregado na célula e suas características são as mais variadas, podendo ser módulos rígidos ou flexíveis, translúcidos ou opacos e, ainda, coloridos.

Os diversos tipos de módulos apresentados indicam uma possível integração aos edifícios, com aplicação sobre elementos construtivos existentes ou até mesmo em sua substituição, fator que deve ser levado em consideração desde a fase inicial do projeto.

2.9.2 Aplicação de BAPV e BIPV

Os módulos fotovoltaicos podem ser utilizados para a geração de eletricidade em locais como telhados, fachadas ou como proteção solar, conforme a apresentação esquematizada na Figura 15.

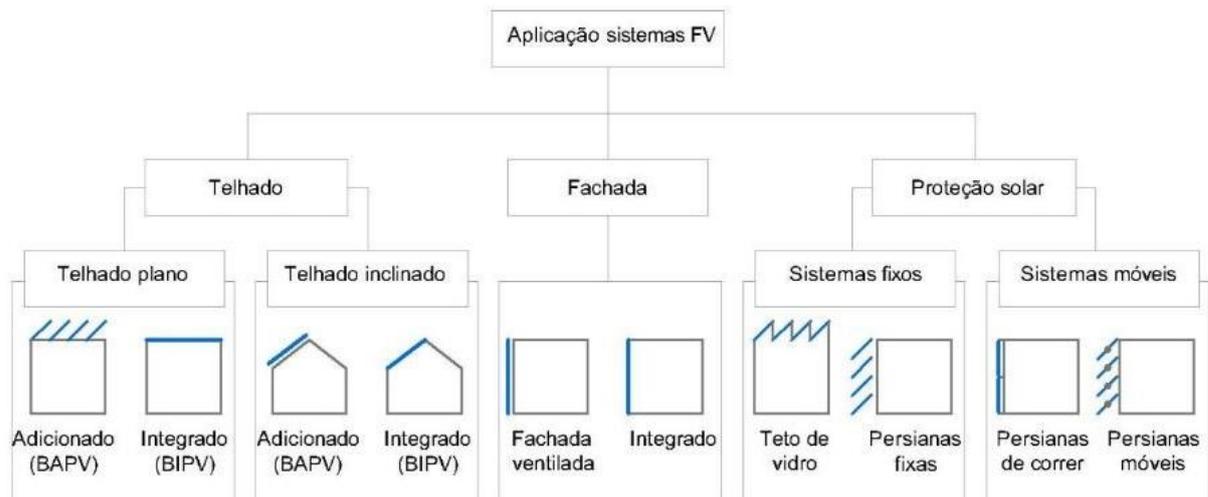


Figura 15 - Opções de instalações FV em edificações.

Fonte: Adaptado de WELLER *et al.*, 2010.

Do ponto de vista arquitetônico, as alternativas de integração de elementos FV às edificações apresentam excelente valor estético. Nesse sentido, os módulos podem oferecer a possibilidade de utilização não apenas para geração de energia,

mas também por razões estéticas, enquanto a geração de eletricidade torna-se apenas um benefício e/ou consequência.

Na Figura 16, observa-se alguns exemplos de aplicações de sistemas fotovoltaicos em edificações.



Figura 16 - Exemplos de aplicação de FV.

Fonte: Adaptado (NATURAL RESOURCES CANADA, 2019).

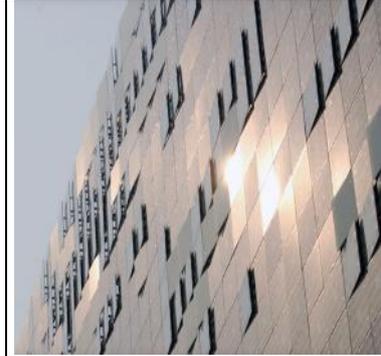
A Tabela 11 apresenta alguns exemplos de edifícios comerciais que demonstram a integração FV, nos quais pode-se observar que as fachadas de BIPV são áreas de aplicação altamente promissoras.

Tabela 11 - Exemplos de edifícios comerciais com BIPV.

a) Escritório Schüco	
<p>Localização: Padova, Itália</p> <p>Clima: Subtropical úmido</p> <p>Tamanho do edifício: 31.000 m²</p> <p>Tecnologia FV utilizada: Células de filmes finos semitransparentes.</p>	<p>Envolpe de construção com alta eficiência energética e aplicação de FV</p> <p>Fachada de pele dupla. Pele externa construída sobre trilhos com FV semitransparente integrado de película fina. Módulos personalizados de vários tamanhos, até 5,72m² (2,2mx2,6m) sem junta.</p> <p>Posição do sistema no edifício: Fachada sul</p> <p>Produção de energia / potência nominal: 50 a 55 Wp/m² com módulos semitransparente (20% de transparência).</p>
b) Mercado de San Antón	

Localização: Madrid, Espanha	O sistema inclui produtos personalizados, módulos de vidro fotovoltaico em a-Si com 20% de transparência na configuração de vidros duplos, com potência instalada de 6,5 kWp (168 m ²) e 7.700 kWh de produção anual de energia. Tamanho do módulo: 1x1m com número variável de células de 156x156mm. Tamanho do sistema: 2.292 módulos solares personalizados (2.292 m ²). Posição do sistema no edifício: Fachada leste.
Clima: Continental	
Tipo de instalação: Clarabóia	
Área de aplicação FV: 168 m ²	
Tecnologia FV utilizada: Células de a-Si	

c) Edifício GREENPIX



Localização: Beijing, China	O processo policristalino células FV é laminado dentro do vidro da parede cortina e colocado com uma densidade variável na pele do edifício inteiro. O padrão de densidade aumenta a qualidade de desempenho do edifício, permitindo a luz natural, quando exigida pelo interior.
Clima: Temperado continental	
Tipo de instalação: Parede cortina	
Área do edifício: 44.000 m ²	
Célula de p-Si	

d) Edifício comercial C.M.B



Localização: Roma, Itália	Uma fachada FV que se integra com um fachada de tijolo ventilado. Cores, texturas e transparências dos módulos fotovoltaicos de vidros feitos sob medida.
Clima: Continental	
Tipo de instalação: Envelope	
Área do edifício: 44.000 m ²	
Célula de p-Si	

Fonte: a), b) e d) dados de INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2012. c) dados de INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2018.

2.10 Análise da viabilidade econômica de edifícios NZEB

A análise de viabilidade econômica de um projeto pode ser avaliada utilizando-se critérios e métricas que considerem a geração de valor financeiro (MARCHIONI; MAGNI, 2018).

Em especial quando relacionada aos custos de um SFV integrados às edificações de balanço energético nulo, a avaliação econômica é essencial para

obtenção de dados consistentes sobre os custos, consumos e ganhos da aplicação do SFV. Outro fator relevante a ser avaliado é o período em que o investimento inicial é recuperado através da economia de energia.

Após entrevistarem 392 diretores financeiros, na ótica dos principais métodos de avaliação de investimentos, Graham e Harvey (2001) concluíram que o valor presente líquido (VPL), a taxa interna de retorno (TIR) e o *payback* (período de retorno) são os mais utilizados pelos mesmos. No mesmo sentido, Biezma e San Cristóbal (2006) concordam que são esses os critérios mais utilizados para avaliar investimentos, sobretudo em eficiência energética.

Segundo Meglioni e Valim (2009), o VPL é a diferença entre o valor descontado do fluxo de caixa para a data do investimento inicial e o valor de investimento inicial de um projeto, calculado conforme Equação 1.

$$VPL_{(i)} = \sum_{j=0}^n \frac{FC_j}{(1+i)^j} - I_0 \quad (1)$$

Onde,

VPL(i) é o Valor Presente Líquido descontado a uma taxa i;

FC_j é um fluxo genérico que pode ser positivo (ingresso) ou negativo (desembolso);

n é o número total de períodos;

i é a taxa de desconto (atratividade)

j é o período genérico percorrendo todo o fluxo de caixa;

I₀ investimento inicial.

O projeto torna-se viável economicamente quando o VPL>0, pois o valor presente das entradas de caixa são superiores ao investimento inicial corrigido, por uma taxa mínima de atratividade. Já para a alternativa que apresentar VPL<0, atesta-se a inviabilidade do projeto, pois o investimento não configura-se como economicamente viável.

De acordo com Motta e Calôba (2020), a TIR é um índice que mede a rentabilidade dos investimentos por unidade de tempo, determinada conforme a Equação 2.

$$\sum_{i=1}^n \frac{FC_i}{(1 + TIR)^i} - \text{Investimento inicial} = 0 \quad (2)$$

Onde,

FC é o fluxo de caixa

i é o período de cada investimento
 n é o período final do investimento.

Em tese, o projeto é considerado viável economicamente quando a TIR for superior a uma Taxa Mínima de Atratividade (TMA) esperada pelo investidor em um determinado período. Neste trabalho, a TIR foi utilizada para calcular a taxa máxima de atratividade que o projeto oferece para o período analisado.

Por Aragón, Pamplona e Medina (2013), o *payback* é considerado o mais eficiente método para investimentos em eficiência energética, uma vez que as decisões baseadas em períodos curtos de recuperação pressupõem menos incerteza. É definido como o tempo necessário para o investimento recuperar seu desembolso de caixa original (HARUS, 2009).

Gonçalves (2017) estudou sugestões de possíveis medidas de conservação de energia (MCE) em *retrofit* para um edifício de escritórios na zona bioclimática 02, onde relacionou o nível de eficiência energética e sua análise econômica e verificou a relação custo-benefício das possíveis MCE. Para a análise financeira, foi utilizado o *payback* descontado, que prevê o prazo máximo de retorno do capital de investimento considerando os juros, portanto, o valor do capital reajustado ao longo do tempo. Os resultados do estudo mostraram que as medidas mais vantajosas foram o uso de isolante térmico na cobertura, a instalação de sistema de dimerização e a implantação de painéis FV na cobertura do edifício.

Outra análise de viabilidade econômica relacionada ao desempenho energético foi o estudo de Bender (2018), que avaliou fachadas solares FV em um edifício comercial, localizado na zona bioclimática 02, e comparou com outros tipos de revestimentos usuais na construção civil. Os resultados apontaram que a aplicação de tecnologia FV é viável e os melhores cenários foram aqueles em que houve substituição das partes transparentes (vidro simples) por vidros FV, com um tempo de retorno do investimento entre cinco e seis anos. Da mesma maneira, podendo substituir apenas o revestimento opaco de alumínio composto modificado (ACM), apresentando um tempo de retorno entre oito e 10 anos.

Já na substituição de um sistema inteiro com ACM e vidro simples, apresentou um tempo de retorno entre cinco e nove anos. A autora concluiu que o caso de aplicação de FV na fachada, tanto na parte opaca quanto na aplicação nos vidros, foi a de maior contribuição de geração de energia através dos sistemas FV implantados,

com 56,66% do consumo total do edifício, geração que não foi maior devido à posição dos módulos (90°).

No mesmo sentido, Sorgato, Schneider e Rütther (2018) estudaram uma edificação comercial de quatro pavimentos, localizada em Florianópolis. Foi analisada a viabilidade técnica e econômica de três tipologias arquitetônicas com diferentes materiais de revestimento nas fachadas e aplicação FV: a) FV na cobertura e todas as fachadas opacas revestidas com ACM; b) FV na cobertura e todas as fachadas opacas revestidas com vidro laminado; e c) FV na cobertura e nas fachadas opacas (norte, leste e oeste). O estudo apresentou como resultado que, para que a substituição de materiais convencionais de revestimento se torne viável economicamente em relação a um SFV aplicado na cobertura, é necessário que o sistema FV da fachada atenda mais do que 50% dessa demanda.

No estudo de Santos (2018), foi avaliada a viabilidade técnica e financeira do uso de vidros FV nas fachadas de edifícios de escritórios corporativos da cidade de São Paulo. Os resultados indicaram que existe potencial de redução de 15% no consumo energético anual, pelo uso das tecnologias FV, e redução do consumo do sistema de condicionamento de ar, em função da redução da carga térmica do edifício. E, ainda, que a implantação dos sistemas é viável financeiramente, pois quando associada a um vidro reflexivo, apresentou um tempo de retorno simples de 2,9 anos.

Yang e Zou (2016) realizaram uma revisão bibliográfica de 123 artigos que relacionavam custo-benefício do BIPV em 10 países e/ou regiões conhecidos por serem os países que mais aplicam esse modelo, dentre os quais se encontram Austrália, China, França, Alemanha, países da Cooperação do Golfo, Itália, Japão, Malásia, Reino Unido e EUA. Como conclusão, constataram que, embora o BIPV tenha altos custos iniciais em vários países, os benefícios são relevantes para o cliente, o usuário final e a sociedade. Foi detectada, ainda, a falta de dados detalhados de custos de BIPV, sobretudo os métodos de análise custo-benefício, o que resulta em riscos e barreiras para suas aplicações.

Esses fatos auxiliaram a delimitação deste trabalho, evidenciando a necessidade de facilitar o entendimento da relação da eficiência energética e a viabilidade econômica para obtenção de edifícios de escritórios de balanço energético nulo, com a geração de energia a partir de SFV, tema explorado nesta pesquisa.

3 MÉTODO

Para atingir os objetivos estabelecidos, a metodologia adotada contou com a simulação computacional, através do *software EnergyPlus*, e com o cálculo de geração de energia FV por meio dos dados do programa Radiasol. Para a análise de viabilidade econômica, foram utilizados os métodos de cálculo do VPL e da TIR, que possibilitaram avaliar o investimento necessário para cada implantação de SFV proposto e os custos evitados com economia de energia gerada.

Para as simulações, foi necessária a escolha de um local definido, assim, optou-se pela cidade de Pelotas-RS, que se encontra no GCL-05, de acordo com a INI-C, situando-se a sede da Universidade Federal de Pelotas (UFPel), onde a pesquisa foi realizada. A escolha ocorreu em função das características climáticas, por apresentar um clima temperado, com verão e inverno bem definidos, e amplitude térmica muito elevada ao longo do ano. Além disso, é uma cidade localizada no extremo sul do país, com baixos níveis de radiação solar, porém com uma alta latitude (-31,46°), sendo uma região favorável para inserção de módulos FV em fachadas (inclinação 90°).

A seguir, é apresentado o delineamento do processo de pesquisa. Por fim, de forma detalhada, estão discriminadas as etapas e as técnicas envolvidas nos procedimentos aplicados.

3.1 Estrutura geral da pesquisa

O delineamento do trabalho aconteceu por meio de um processo de sete etapas, conforme a Figura 17.

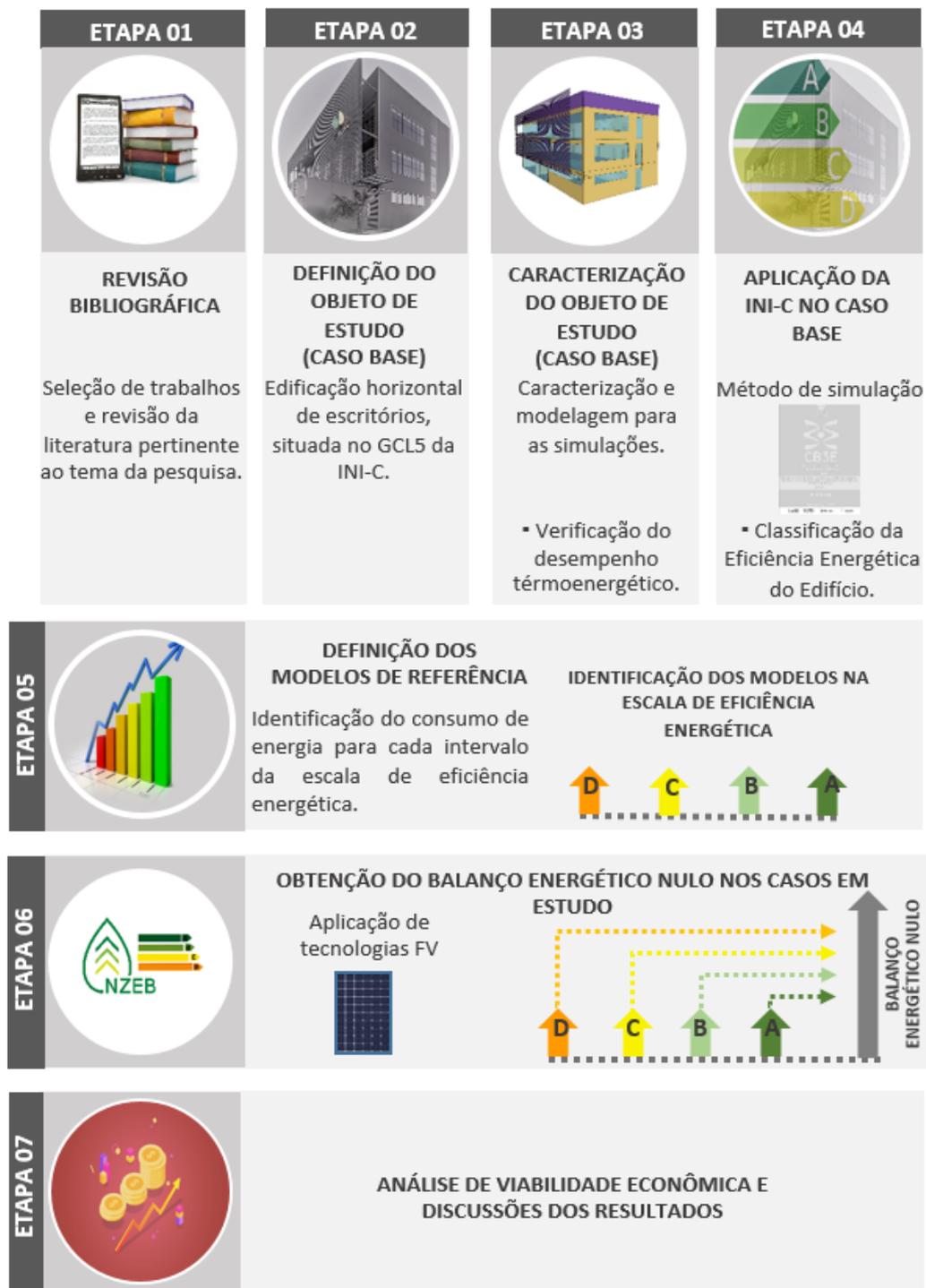


Figura 17 - Infográfico das etapas de pesquisa.
Fonte: Autora.

A Etapa 1 consistiu na Revisão Bibliográfica, momento em que foram selecionados trabalhos sobre a temática, em base de dados relevantes da área. Procurou-se conhecer os conceitos básicos em relação ao tema, as principais normas, metodologias e os principais *softwares* utilizados para simulação energética.

A Etapa 2 compreendeu a definição do objeto de estudo, ou seja, a edificação horizontal de escritórios situada na GCL-05, conforme a INI-C. Esse foi caracterizado como “caso base” e utilizado como modelo comparativo para aos casos de referência. Nesta etapa, foram realizados levantamentos documentais, análise dos projetos arquitetônico, elétrico e de ar condicionado da edificação escolhida como caso base.

A Etapa 3 consistiu na caracterização e modelagem do objeto de estudo através do *Sketchup*, para a simulação computacional por meio do *software Energy Plus 8.7.0*. Baseada em dados reais da edificação, foi então realizada a configuração e, posteriormente, a simulação, tornando possível a obtenção de um diagnóstico do desempenho térmonenergético do edifício.

Na Etapa 4, foi realizada a análise e aplicação da INI-C, através do método de simulação. Nesse método, a edificação foi avaliada sob duas condições: condição real, com as características da edificação, conforme realizado na Etapa 3, e a criação de um novo modelo na condição de referência, com as características listadas na referida Instrução. Nessa fase, a identificação da classificação da eficiência energética foi dividida em três etapas principais: envoltória, sistema de condicionamento de ar e sistema de iluminação.

A Etapa 5 consistiu na definição dos modelos de referência, a partir do caso base e do modelo de condição de referência (classe “D” em eficiência energética). Foram definidos outros casos de diferentes classes de eficiência energética, variando de “A” até “D”, conforme a INI-C.

No que se refere à etapa 6, verificou-se a possibilidade de alcançar o balanço energético nulo, através da aplicação de sistemas FV em todos os casos analisados.

Na Etapa 7, foi realizada uma análise de viabilidade econômica baseada nos dados de consumo energético do edifício, nos cálculos de geração de energia dos módulos FV e na pesquisa de preço dos SFV.

Por fim, foram apresentadas as conclusões, limitações do trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

3.2 Etapas da pesquisa

3.2.1 Etapa 1 - Revisão bibliográfica

Para o desenvolvimento desta etapa, foram realizadas seleções de trabalhos através de pesquisa em bancos de dados relevantes da área. A busca foi realizada

com base em publicações dos últimos anos e contemplou os seguintes temas: desempenho dos edifícios de escritórios; consumo de energia e as legislações de desempenho no contexto brasileiro; as edificações de energia zero e as políticas para a sua implementação na União Europeia; aplicação de tecnologias FV como fonte renovável de energia; sistemas FV integrados à edificação BIPV; otimizações através da simulação computacional; e viabilidade econômica. Entre os trabalhos selecionados, foram encontradas teses, artigos científicos, normas técnicas, manuais e outros.

Através das referências, conheceu-se os conceitos básicos em relação ao tema, as principais normas, metodologias e os principais *softwares* de simulação energética.

3.2.2 *Etapa 02: Definição do objeto de estudo*

Este item consistiu em apresentar a edificação adotada como objeto de análise. Trata-se de uma edificação horizontal de escritórios, de três pavimentos, localizada na cidade de Pelotas-RS e situada na GCL-05, de acordo com a INI-C.

A escolha da edificação ocorreu em função de ser um edifício comercial, horizontalizado de planta livre, com uma unidade consumidora e sem influência de interferências de construções lindeiras, visto que não há edificações em seu entorno imediato.

Conforme observa-se na Figura 18, sua fachada principal encontra-se orientada a -41° no sentido noroeste.

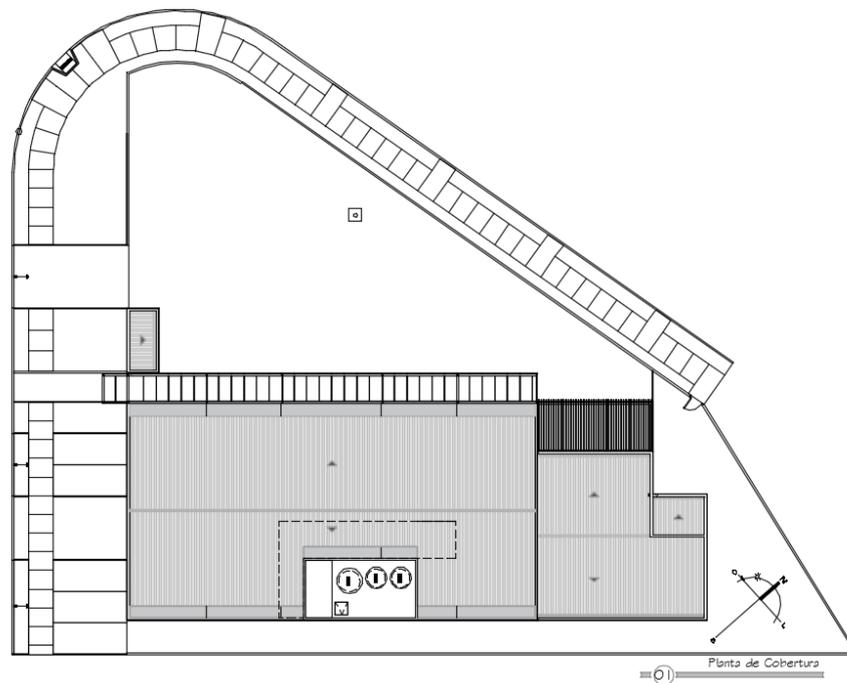


Figura 18 - Planta de cobertura com orientação solar.
Fonte: Projeto Arquitetônico.

Como características construtivas, observadas na Figura 19, o prédio apresenta o caráter modular, com sistemas construtivos de estrutura metálica, lajes pré-moldadas, vedações e compartimentação em *steel frame*, *brise* metálico, revestimentos e vedações metálicas. As fachadas são revestidas por painéis de alumínio, sendo, no pavimento térreo, por revestimento alumínio composto modificado (ACM) e nos superiores (segundo e terceiro), por painéis de alumínio do tipo *Miniwave*, de linhas onduladas e perfuradas.

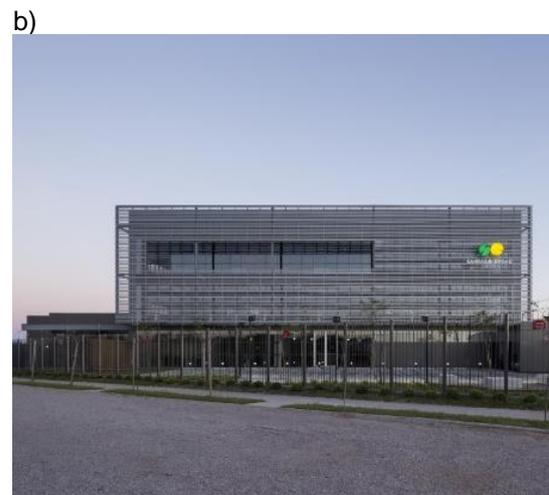
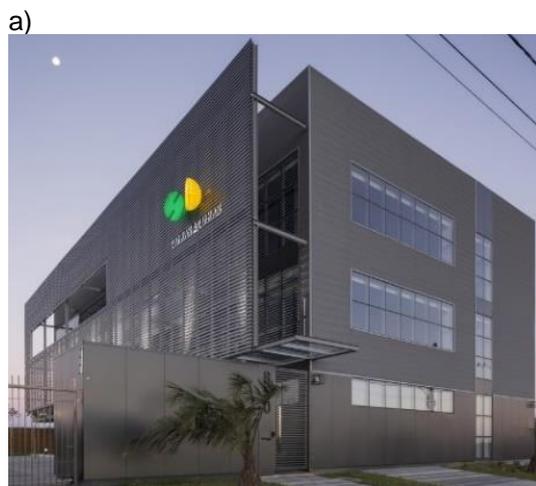


Figura 19 - a) e b) Imagens fachadas nordeste e sudoeste.
Fonte: ARCHDAILY BRASIL, 2019.

A edificação possui uma área total de 1.881,28m² e capacidade para 200 colaboradores. Os ambientes de trabalho estão orientados para o recuo, criado à noroeste, e são protegidos por um *brise* metálico. O térreo abriga zonas de uso comum e público: auditório, salas de reuniões, cantina e zonas de serviço. Já os demais pavimentos abrigam as estações de trabalho, organizadas em espaços contínuos, conforme plantas baixas esquemáticas nas Figura 20 a 22.

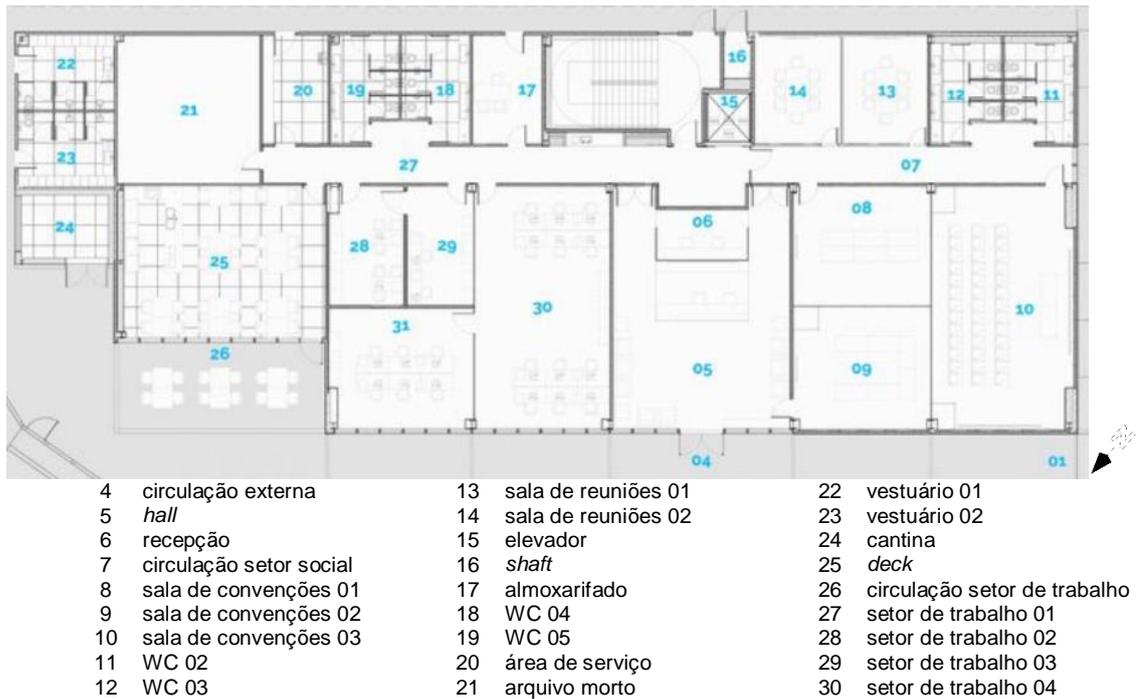


Figura 20 - Planta baixa pavimento térreo.

Fonte: ARCHDAILY BRASIL, 2019.



Figura 21 - Planta baixa segundo pavimento.

Fonte: ARCHDAILY BRASIL, 2019.



- | | | | |
|---|---------------------|----|---------------------|
| 1 | sala do diretor 03 | 7 | sala do diretor 05 |
| 2 | sala do diretor 04 | 8 | sala de reuniões |
| 3 | sala de reuniões 04 | 9 | WC 08 |
| 4 | shaft | 10 | WC 09 |
| 5 | elevador | 11 | sala de trabalho 07 |
| 6 | cpd | 12 | setor executivo 02 |

Figura 22 - Planta baixa terceiro pavimento.
Fonte: ARCHDAILY BRASIL, 2019.

3.2.3 Etapa 3 – Caracterização, modelagem e configuração computacional do objeto de estudo

Nesta etapa, o objeto de estudo foi modelado no *software Sketchup Make 17* com *plug-in Euclid*, configurado e simulado no *software EnergyPlus* versão 8.7.0. O modelo tridimensional pode ser observado na Figura 23.

3.2.3.1 Definição do Grupo Climático e Caracterização dos Dias Extremos

O modelo foi configurado para a cidade de Pelotas-RS (Latitude: 31°52'19" S, Longitude: 52°20'33" W), classificada como de clima subtropical úmido, de acordo com Kottek *et al.* (2006). Foi utilizado o arquivo climático disponível da cidade escolhida (LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES, 2018). Para a definição dos dias extremos, foi definida como frequência de ocorrência 99,6% para verão e 0,4% para o inverno, sendo os dias 23 de janeiro e 19 de junho.

3.2.3.2 Geometria e Definição das Zonas Térmicas

A edificação foi modelada com vinte zonas térmicas, sendo dez salas de escritório e dez zonas de uso transitório, todas com pé-direito livre de 3,85m. As dimensões do modelo estão ilustradas na planta esquemática, nas Figuras 24 a 26.

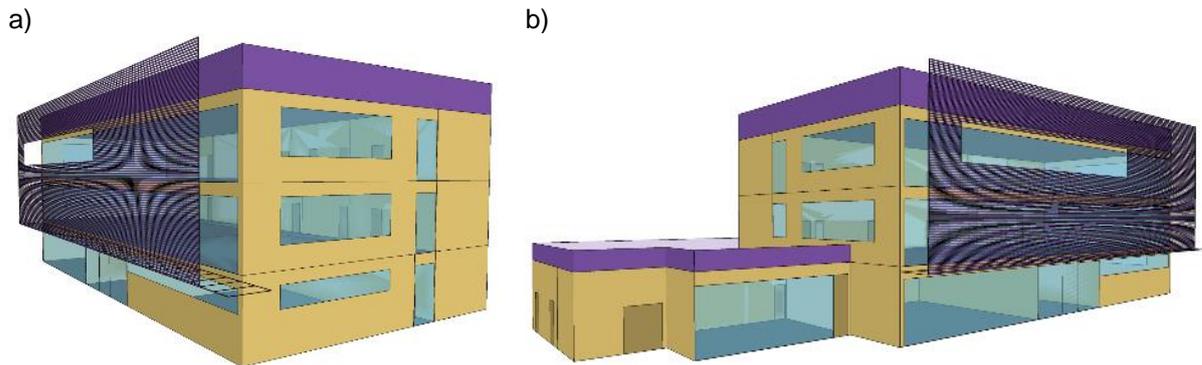


Figura 23 - a) e b) Modelo tridimensional do caso base – *SketchUp* e *Plug-in Euclid*.
Fonte: Autora.

O pavimento térreo foi dividido em dez zonas térmicas, sendo consideradas cinco de uso permanente e cinco de uso transitório (compostas por áreas de circulação, banheiros, área de escada e serviços) (Figura 24).

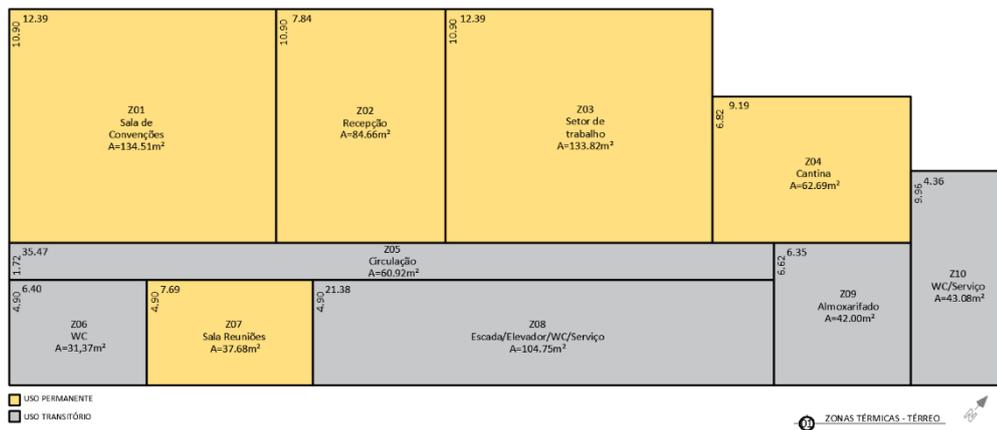


Figura 24 - Zonas Térmicas do Modelo de Simulação – Térreo.
Fonte: Autora.

O segundo e terceiro pavimentos foram modelados com cinco zonas térmicas, sendo três de uso permanente e duas de uso transitório (banheiros e área de escada), conforme representação nas Figura 25 e 26.

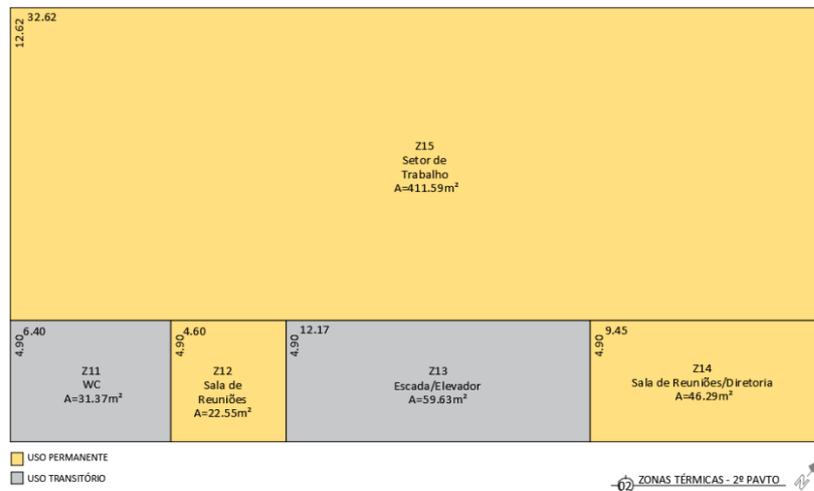


Figura 25 - Zonas Térmicas do Modelo de Simulação – 2º pavimento.
Fonte: Autora.

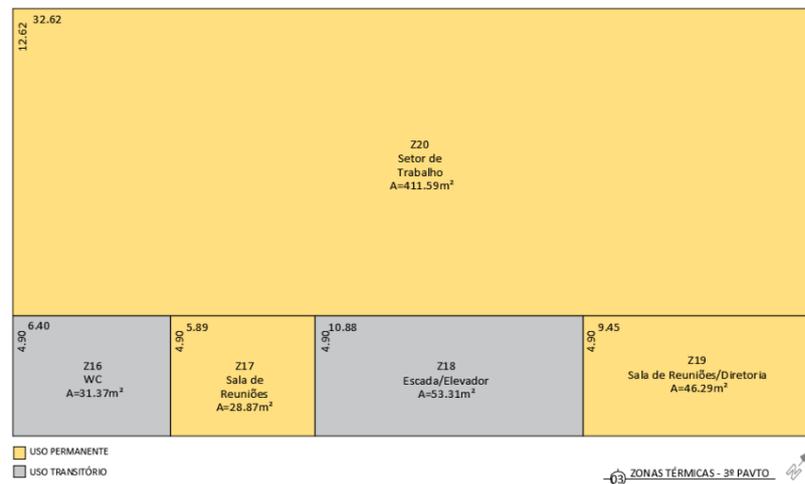


Figura 26 - Zonas Térmicas do Modelo de Simulação – 3º pavimento.
Fonte: Autora.

Conforme orientado por CIBSE (2007), foram configuradas, nas simulações, 0,6 trocas de ar/hora em todas as salas de escritório para infiltração de ar.

3.2.3.3 Características construtivas

A Tabela 12 apresenta as características construtivas do modelo de estudo, representando os materiais reais da edificação.

Tabela 12 - Resumo das características físicas do modelo.

Estrutura	Metálica e laje de concreto armado
Pé direito	2,90m
Paredes	Variadas (verificar Figura 28)
Revestimento externo	ACM (térreo) e <i>Miniwave</i> (2º e 3º pavimento) na cor cinza escuro
Revestimento interno	Parede do banheiro com azulejo (0,005m)
Esquadrias	Alumínio, janelas de vidro reflexivo 8 mm
Portas internas	Madeira compensada
Portas externas	Alumínio

Piso Térreo	Radier (0,15m), contrapiso (0,05m) e piso carpete (0,005m) / piso cerâmico (0,005)
Piso 2º e 3º pavimento	Laje de entresolo de concreto (0,15m) e piso carpete (0,005m) / piso cerâmico (0,005m)
Laje de forro	Laje de concreto (0,10m)
Forro	Gesso (0,013m)
Cobertura	Telha trapezoidal de alumínio
PAF	34,20%
Proteção Solar	Brise de alumínio

Fonte: Autora, com base no Projeto Arquitetônico.

Tendo em vista as variadas composições das paredes no caso base, foi necessário mapear a identificação das mesmas para posterior simulação do edifício com as configurações corretas. As paredes podem ser identificadas nas Figura 27, bem como na Figura 28.





Figura 27 - Configuração das paredes do (a) Pavimento térreo; (b) Segundo e (c) Terceiro pavimento. Fonte: Autora com base no Projeto Arquitetônico.

Após o mapeamento de todas as paredes, foram identificadas as configurações das mesmas, conforme apresentado na Figura 28. Assim, para efeitos de simulação computacional, foi realizada a configuração dos materiais presentes nos componentes construtivos no campo *Material*, que permite a inserção das propriedades térmicas de cada elemento integrante da composição do item *Construction*.

Tipo	Configuração	Material	Esp. (m)
PAR01		ACM OSB Perfil metálico + ar + lã de rocha Gesso Gesso	0,004 0,011 0,090 0,013 0,013
PAR01B		Miniwave OSB Perfil metálico + ar + lã de rocha Gesso Gesso	0,004 0,011 0,090 0,013 0,013
PAR02		ACM OSB Perfil metálico + ar + lã de rocha OBS	0,004 0,011 0,180 0,011
PAR02B		Miniwave OSB Perfil metálico + ar + lã de rocha OBS	0,004 0,011 0,180 0,011
PAR03		ACM OSB Perfil metálico + ar + lã de rocha Gesso Cerâmica	0,004 0,011 0,090 0,013 0,005
PAR03B		Miniwave OSB Perfil metálico + ar + lã de rocha Gesso Cerâmica	0,004 0,011 0,090 0,013 0,005

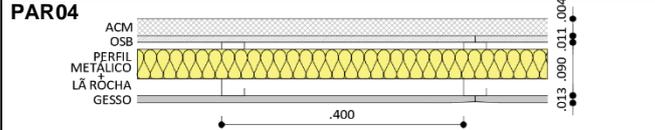
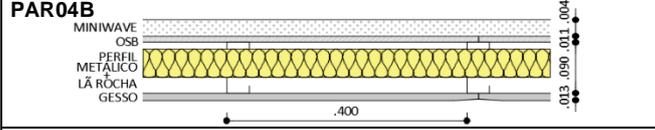
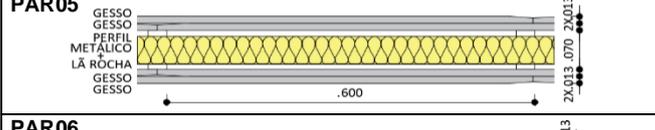
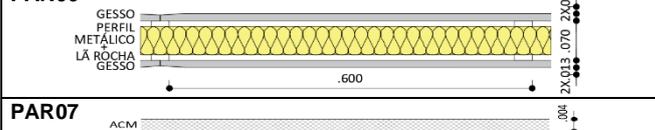
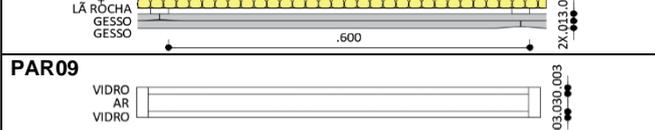
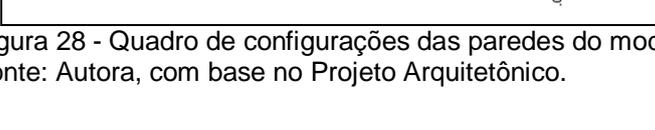
PAR04 	ACM OSB Perfil metálico + ar + lâ de rocha Gesso	0,004 0,011 0,090 0,013
PAR04B 	Miniwave OSB Perfil metálico + ar + lâ de rocha Gesso	0,004 0,011 0,090 0,013
PAR05 	Gesso Gesso Perfil metálico + ar + lâ de rocha Gesso Gesso	0,013 0,013 0,090 0,013 0,013
PAR06 	Gesso Perfil metálico + ar + lâ de rocha Gesso	0,013 0,700 0,013
PAR07 	ACM Parede cerâmica Cerâmica	0,004 0,250 0,005
PAR08 	Cerâmica Gesso Perfil metálico + ar + lâ de rocha Gesso Gesso	0,020 0,013 0,070 0,013 0,013
PAR09 	Vidro Ar Vidro	0,010 0,030 0,010

Figura 28 - Quadro de configurações das paredes do modelo caso base.
 Fonte: Autora, com base no Projeto Arquitetônico.

Dessa forma, para a realização da configuração no *EnergyPlus*, foram necessárias informações quanto às propriedades térmicas dos materiais utilizados, conforme apresentado na Tabela 13.

Cabe destacar que todas as paredes possuem, entre os perfis metálicos, isolante termoacústico do tipo lâ de rocha de aproximadamente 0,05m.

Tabela 13 - Parâmetros construtivos do modelo caso base.

	Material	e (m)	λ W/(m.K)	ρ kg/m ³	c J/(kg.K)	U W/(m ² .K)
Paredes (Ver Figura 28)	ACM	0,004	230	2700	880	1,01
	MINIWAVE	0,004	230	2700	880	
	OSB	0,011	0,17	650	2300	
	Ar	variável (ver Figura 28)				
	Lã de rocha	0,050	0,045	100	750	
	Gesso	0,013	0,350	750	840	
	Tijolo cerâmico	0,250	1,000	423	920	
Cobertura	Azulejo cerâmico	0,005	0,900	1600	920	1,719
	Telha de alumínio	0,004	230	2700	880	
	Ar	ver nota ¹				
	Laje de concreto	0,100	1,75	2200	1000	
	Lã de vidro	0,100	0,045	50	7000	
	Gesso	0,013	0,35	750	840	
Portas Externas Tipo 1	Alumínio	0,004	230,00	2700	880	6,680
Portas Externas Tipo 2	Caixilhos de alumínio					5,733
	Vidro reflexivo cinza	ver tabela 12				

Portas Internas	Compensado 5mm	0,005	0,120	300	1340	
	Ar		ver nota ²			
	Compensado 5mm	0,005	0,120	300	1340	
Janelas	Caixilhos de alumínio					5,733
	Vidro reflexivo cinza		ver tabela 12			
Pisos Tipo 1	Piso de carpete	0,005	0,07	200	400	2,876
	Poliestireno (EPS)	0,030	0,04	25	1,42	
	Laje de concreto	0,150	1,75	2200	1000	
Pisos Tipo 2	Piso cerâmico	0,005	0,900	1600	920	3,455
	Argamassa de assentamento	0,010	1,15	2000	1000	
	Poliestireno (EPS)	0,030	0,04	25	1,42	
	Laje de concreto	0,150	1,75	2200	1000	

* e – espessura (m)

* c – calor específico (J/kgK)

* λ – condutividade térmica (W/mK)

* U – transmitância térmica total (W/m²K)

* ρ – peso específico aparente (kg/m³)

* C – capacidade térmica total (kJ/m²K)

Nota 1: Resistência térmica do ar (R_{ar}) com direção do fluxo de calor descendente = 0,21

Nota 2: Resistência térmica do ar (R_{ar}) com direção do fluxo de calor horizontal = 0,16

Fonte: Adaptado de ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005.

Quanto às esquadrias, todas as janelas do caso base são de alumínio, sendo compostas por vidro reflexivo cinza de 8mm. As propriedades dos vidros são apresentadas na Tabela 14, mesmos valores utilizados para a configuração no *software EnergyPlus*, no campo *Window Material: Glazing*.

Tabela 14 - Parâmetros óticos do vidro reflexivo cinza utilizado nas janelas do caso base.

Espessura (mm)	8,00
Transmitância à radiação solar (incidência normal)	0,24
Refletância à radiação solar na face 1 (incidência normal)	0,17
Refletância à radiação solar na face 2 (incidência normal)	0,17
Transmitância à radiação solar no espectro visível (incidência normal)	0,20
Refletância à radiação visível na face 1 (incidência normal)	0,21
Refletância à radiação visível na face 2 (incidência normal)	0,51
Emissividade em ondas longas na face 1	0,84
Emissividade em ondas longas na face 2	0,84
Condutividade (W/m.K)	1,00
Transmitância térmica (W/m ²)	5,70
Fator Solar	0,39

Fonte: CB3E e ABIVIDRO, 2015.

Para a simulação computacional, tornou-se necessário definir a densidade de carga considerando os ganhos de calor provenientes das pessoas, dos equipamentos e da iluminação artificial, que serão explicadas nos próximos itens.

3.2.3.4 Configuração do Sistema de Iluminação, Padrão de Ocupação e Equipamentos

Com base no projeto de iluminação, foi possível verificar o valor de 8,10 W/m² para a densidade de potência de iluminação (DPI). Verificou-se também a

necessidade de iluminação pela ocupação que acontece nos dias de semana, das 8h às 12h e das 13h às 18h. Para efeito de simulação, conforme determina a INI-C, os dias de ocupação da tipologia de edifícios de escritório foram calculados com base na média de dias de semana por ano, excluindo-se os fins de semana. Como fração radiante do sistema de iluminação, foi utilizado o valor de 0,42, conforme o Manual *Input/Output Reference* (US DEPARTMENT OF ENERGY, 2019b).

Em relação à configuração da ocupação do edifício, utilizou-se como base a NBR 16401- Instalações de ar-condicionado - Sistemas centrais e unitários, (ABNT, 2008a, 2008b), contando a densidade de ocupação alta com um posto de trabalho a cada 7,7 m² e 0,14 pessoas/m², com 0,42 para a fração radiante.

A configuração da ocupação do edifício utilizou como base a INI-C, determinando a densidade de ocupação de 10 m²/pessoa para edificações de escritório.

Quanto à estimativa da carga interna pelo uso de equipamentos, foi configurada a mesma agenda para ocupação e sistema de iluminação do caso base. Para todas as simulações, foi adotado o valor de 0,25 para a fração radiante de ganho de calor pelos equipamentos, conforme recomendado pela ASHRAE (2009).

A densidade de potência de equipamentos (DPE) foi determinada pela INI-C, com o valor de 15,00 W/m², e utilizada como base para a configuração da densidade de carga interna (DCI) proveniente dos equipamentos.

A Tabela 15 apresenta um resumo das características das cargas internas utilizadas na configuração para simulação.

Tabela 15 - Características das cargas internas do caso base.

USO	CARACTERÍSTICAS	REFERÊNCIAS
Iluminação artificial	8,10 W/m ²	Projeto de Iluminação
Pessoas	0,10 pessoa/m ²	INI-C
Equipamentos	15,00 W/m ²	INI-C

Fonte: Projeto de iluminação e INMETRO, 2021.

3.2.3.5 Configuração do Sistema de Climatização Artificial

A partir da análise do projeto de climatização disponibilizado, verificou-se a presença de ar condicionado do tipo *Variable Refrigerant Flow* (VRF), sistema de condicionamento de ar do tipo expansão direta com múltiplas unidades evaporadoras, no qual pelo menos um compressor possui capacidade variável, que distribui gás refrigerante através de uma rede de tubulações para as unidades evaporadoras. As

mesmas têm a capacidade de controlar a temperatura individual de cada zona térmica por meio de dispositivos de controle de temperatura e de uma rede de comunicação comum, conforme parâmetros apresentados nas Tabelas Tabela 16 a Tabela 20.

A capacidade do ar condicionado (em Watts), atende às cargas necessárias da edificação, calculada por meio das temperaturas de pico e de cargas térmicas referentes ao clima estudado, por intermédio da utilização da condição *autosize* da simulação computacional, obtida pelo *EnergyPlus*.

Para simulação, o VRF foi configurado através dos seguintes objetos:

a) *HVACTemplate:Thermostat*: neste item foram inseridas as temperaturas de controle para aquecimento e resfriamento, definidas e baseadas na NBR 16401 (2008) (ABNT, 2008).

Tabela 16 - Configuração da temperatura de aquecimento e resfriamento do caso base.

<i>HVACTemplate:Thermostat</i>	
Temperatura de controle (aquecimento) (°C)	21
Temperatura de controle (resfriamento) (°C)	24*

*Valor referência para edificações de escritório, conforme INI-C.

Fonte: Autora, com base em INMETRO, 2021.

b) *HVACTemplate:Zone:VRF*: para essa configuração, foram criadas as evaporadoras para cada zona térmica, tendo como referência:

Tabela 17 - Configuração das evaporadoras do caso base.

<i>HVACTemplate:Zone:VRF</i>	
Nome da Zona	Zona que a evaporadora se encontra
Nome da Condensadora	Indica a condensadora do sistema (<i>HVACTemplate:System:VRF</i>)
Objeto	Indica o objeto criado (<i>HVACTemplate:Thermostat</i>)
Taxa de ar externo calibrada	0,0075 m³/s por pessoa (ANVISA, 2003, p.3)

Os demais valores foram mantidos no modo padrão do programa.

Fonte: Autora, com base nos dados do *EnergyPlus*.

A localização das unidades evaporadoras do sistema foram determinadas no projeto da seguinte forma:

Evaporadoras da UC-01: Zona 01, Zona 02, Zona 03, Zona 04 e Zona 07.

Evaporadoras da UC-02: Zona 12, Zona 14 e Zona 15.

Evaporadoras da UC-03: Zona 17, Zona 19 e Zona 20.

c) *HVACTemplate:System:VRF*: nesse item foram criadas as unidades condensadoras.

O projeto de ar condicionado indicou três unidades condensadoras, sendo essas denominadas como UC01, UC02 e UC03, atendendo às evaporadas dos pavimentos térreo, segundo e terceiro, respectivamente.

Tabela 18 - Configuração das unidades condensadoras do caso base.

<i>HVACTemplate:System:VRF:</i>	
Padrões (Agenda)	Busca agenda de acionamento do ar condicionado.
Capacidade do ar condicionado	<i>Autosize</i>
Coeficiente de Performance (COP) para resfriamento	3,33 W/W (valor mantido conforme modo padrão do programa).
COP para aquecimento	3,40 W/W (valor mantido conforme modo padrão do programa).

Os demais valores foram mantidos no modo padrão do programa.

Fonte: Autora, com base nos dados do *EnergyPlus*.

Após simulação com o modo *autosize*, o programa criou um arquivo de saída da simulação, denominado *Table.csv*, no qual foi possível identificar a capacidade do sistema de ar condicionado, conforme apresentado na Tabela 19.

Tabela 19 - Capacidade do sistema de ar condicionado calculado pelo *EnergyPlus* do caso base.

<i>AirConditioner:VariableRefrigerantFlow</i>	<i>Design Size Rated Total Cooling Capacity (gross) (W)</i>
SISTEMA_VRF_UC-01 VRF HEAT PUMP	19187,45
SISTEMA_VRF_UC-02 VRF HEAT PUMP	45503,37
SISTEMA_VRF_UC-03 VRF HEAT PUMP	57697,04
CAPACIDADE TOTAL (kW)	112,39

Fonte: Autora, com base nos dados do *EnergyPlus*.

Assim, as características do sistema de ar condicionado são apresentadas na Tabela 20.

Tabela 20 - Características do sistema de ar condicionado do caso base.

Tipo de equipamento	VRF com condensação a ar
Capacidade	≥70 kW
Classificação	Multi-split VRF
COP para resfriamento	3,33
COP para aquecimento	3,40
Temperatura de controle (aquecimento)	21°C
Temperatura de controle (resfriamento)	24°C

Fonte: INMETRO, 2021 e *EnergyPlus*.

3.2.4 Etapa 4 – Aplicação da Instrução Normativa para a Classe de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas (INI-C) no caso base

Nesta etapa, foi realizada a análise e a aplicação da INI-C no caso base por meio do método de simulação, onde foi possível identificar a classe de eficiência energética do edifício.

Conforme indica a INI-C (INMETRO, 2021), para a obtenção da classe de eficiência do edifício pelo método de simulação, foi necessária a elaboração de um modelo representativo da edificação real, neste estudo identificado como “caso base”. Além disso, foi fundamental a criação de um modelo representativo da condição de referência (Classe “D”), utilizando característica da tipologia de escritórios, de acordo com o Anexo A da INI-C, apresentada na Tabela 21.

Considerando que, na etapa anterior da pesquisa, foi elaborado o modelo do caso base, que representa o modelo real da edificação, nessa etapa foi necessária a elaboração do modelo representando a condição de referência (classe “D”).

Para essa etapa, a simulação da edificação foi realizada em duas condições: a real, a partir dos resultados da Etapa 3, e a de referência, com as características e configurações detalhadas a seguir.

3.2.4.1 Elaboração do Modelo na Condição de Referência

Para a elaboração da modelagem da condição de referência, classe “D” de eficiência, foi utilizado o *software Sketchup Make 17* com *plug-in Euclid* e a simulação computacional no *software EnergyPlus* versão 8.7.0. O modelo referência foi simulado para o grupo climático 05, conforme a INI-C.

O modelo que representa a condição de referência foi simulado considerando as características da envoltória, os componentes construtivos, a iluminação e os ganhos e condicionamento de ar, ambos de acordo com as Tabela 21 e 3.

Tabela 21 - Valores de referência para edificações de escritório na condição referência (Classe “D”).

Geometria	
Forma	Condição real
Orientação solar (°)	Condição real
Pé-direito (piso a teto) (m)	Condição real
Aberturas	
Percentual de abertura da fachada (%) (PAF)	50
Percentual de abertura zenital (%) (PAZ)	0
Componentes construtivos	
Parede	Argamassa interna (2,5 cm), bloco cerâmico furado (9 cm), argamassa externa (2,5 cm)
Transmitância da parede externa (W/m ² K) (U _{par})	2,39
Absortância da parede (adimensional) (α _{par})	0,5
Capacidade térmica da parede (kJ/m ² K) (CT _{par})	150
Cobertura	Telha de fibrocimento, câmara de ar (>5 cm) e laje maciça de concreto (10 cm)
Transmitância da cobertura (W/m ² K) (U _{cob})	2,06
Absortância da cobertura (adimensional) (α _{cob})	0,8
Capacidade térmica da cobertura (kJ/m ² K) (CT _{cob})	233
Vidro	Vidro simples incolor 6mm
Fator solar do vidro (adimensional) (FS)	0,82

Transmitância do vidro (W/m^2K) (U_{vid})	5,7
Ângulo horizontal de sombreamento ($^\circ$) (AHS)	0
Ângulo vertical de sombreamento ($^\circ$) (AVS)	0
Iluminação e ganhos	
Densidade de potência de iluminação (W/m^2) (DPI)	14,1
Ocupação ($m^2/pessoa$)	10
Densidade de potência de equipamentos (W/m^2) (DPE)	15,0
Horas de ocupação (horas)	10
Dias de ocupação (Nano)*	260*
Condição do piso	Condição real
Condição da cobertura	Condição real
Isolamento do piso	Sem isolamento
Condicionamento de ar (refrigeração)	
Coefficiente de performance (W/W) (COP)	2,6
Temperatura <i>setpoint</i> ($^\circ C$)	24

*Os dias de ocupação desta tipologia foram calculados com base na média de dias de semana por ano, excluindo-se os fins de semana.

Fonte: Adaptado de INMETRO, 2021.

3.2.4.1.1 Geometria e Definição das Zonas Térmicas

A edificação na condição de referência foi modelada com as mesmas zonas térmicas e dimensões do caso base (Figura 24 a 26).

As áreas de janelas foram remodeladas, com o PAF igual a 50%, conforme recomendação da INI-C (Tabela 21).

O modelo tridimensional do *Google SketchUp* pode ser observado na Figura 29.

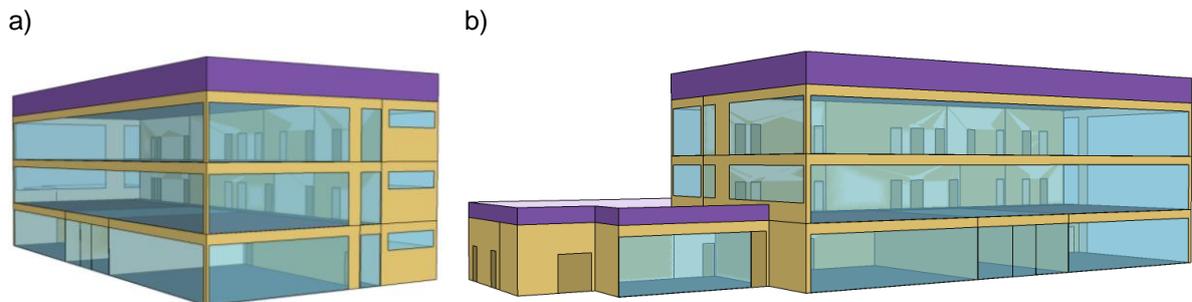


Figura 29 - a) e b) Modelo tridimensional do caso de referência – *SketchUp* e *Plug-in Euclid*.
Fonte: Autora.

3.2.4.1.2 Características construtivas

Para a simulação computacional, foram realizadas as configurações dos materiais presentes nos componentes construtivos, de acordo com a determinação da INI-C (Tabela 3).

Dessa forma, foram modeladas paredes externas e coberturas com transmitâncias térmicas de $2,39 W/m^2K$ e $2,06 W/m^2K$, respectivamente. Já a

capacidade térmica das paredes foi de 150 kJ/m²K, enquanto o valor da cobertura foi de 233 kJ/m²K (INMETRO, 2021).

Para o caso referência, foi configurado um vidro simples incolor de 6mm, com fator solar igual a 0,82 e transmitância térmica igual a 5,70 W/m²K. Os pisos foram mantidos conforme o caso base, porém sem material de isolamento, conforme indicado na Tabela 21.

3.2.4.1.3 Configuração do Sistema de Iluminação, Padrão de Ocupação e Equipamentos

A DPI foi configurada com base na Tabela 21, portanto, foi utilizado o valor de 14,10 W/m², o equivalente a uma Classe “D” de eficiência. Já com relação à configuração da densidade de ocupação do edifício, foi determinado o valor de 10 (m²/pessoa) para edificações de escritório, o mesmo valor considerado no caso base.

Para a configuração da DPE, foi determinado o valor de 15,00 W/m², usado como base para a configuração da densidade de carga interna (DCI) proveniente dos equipamentos, sendo a mesma do caso base. Esses parâmetros são apresentados na Tabela 22.

Tabela 22 - Características das cargas internas do modelo de referência.

USO	CARACTERÍSTICAS	REFERÊNCIAS
Iluminação artificial	14,10 W/m ²	INI-C (INMETRO, 2021).
Pessoas	0,10 pessoa/m ²	INI-C (INMETRO, 2021).
Equipamentos	15,00 W/m ²	INI-C (INMETRO, 2021).

Fonte: Autora, com valores de INMETRO, 2021.

3.2.4.1.4 Configuração do Sistema de Climatização Artificial

Para a configuração do condicionamento de ar, foi mantido o sistema VRF, com iguais unidades condensadoras e evaporadoras presentes nas zonas determinadas no caso base. Ainda, manteve-se a configuração de temperaturas de controle para aquecimento (21°C) e resfriamento (24°C).

Quanto à configuração das unidades condensadoras, foram mantidas as configurações do caso base, porém, conforme determina a INI-C, os valores de COP para resfriamento e aquecimento foram alterados para valores de 2,6 W/W.

Após simulação com o modo *autosize*, foi possível identificar a capacidade do sistema de ar condicionado, conforme apresentado na Tabela 23.

Tabela 23 - Capacidade do sistema de ar condicionado calculado pelo *EnergyPlus* do modelo de referência.

<i>AirConditioner:VariableRefrigerantFlow</i>	<i>Design Size Rated Total Cooling Capacity (gross) (W)</i>
SISTEMA_VRF_UC-01 VRF HEAT PUMP	28.548,56
SISTEMA_VRF_UC-02 VRF HEAT PUMP	57.006,98
SISTEMA_VRF_UC-03 VRF HEAT PUMP	74.958,73
CAPACIDADE TOTAL (kW)	160,51

Fonte: Autora, com base nos dados de saída do *EnergyPlus*.

3.2.4.1.5 Principais valores de referências adotados nas configurações do caso base e de referência (classe “D”)

Para facilitar a visualização das diferenças entre as configurações dos casos base e de referência quanto à geometria, aos componentes construtivos, à iluminação, ao condicionamento de ar e aos ganhos com iluminação, ocupação e equipamentos, os valores utilizados nas simulações são apresentados na Tabela 24.

Tabela 24 - Valores de referência adotados na condição real (Caso Base) e na condição de referência (Classe “D”).

Uso típico	Condição real (Caso Base)	Condição de referência (Classe “D”)
Geometria		
Forma		Condição real
Orientação solar (°)		Condição real
Pé-direito (piso a teto) (m)	Condição real	Condição real
Aberturas		
Percentual de abertura da fachada (%) (PAF)	Condição real 34,20	50
Componentes construtivos		
Parede	Condição real (ver Tabela 13)	Argamassa interna (2,5 cm), bloco cerâmico furado (9 cm), argamassa externa (2,5 cm)
Transmitância da parede externa (W/m ² K) (U _{par})	Condição real média 1,01	2,39
Absortância da parede (adimensional) (α _{par})	Condição real 0,50	0,50
Cobertura	Condição real (ver Tabela 13)	Telha de fibrocimento, câmara de ar (>5 cm) e laje maciça de concreto (10 cm)
Transmitância da cobertura (W/m ² K) (U _{cob})	Condição real 1,719	2,06
Absortância da cobertura (adimensional) (α _{cob})	Condição real 0,4	0,8
Vidro	Condição real vidro reflexivo cinza 8mm	Vidro simples incolor 6mm
Fator solar do vidro (adimensional) (FS)	Condição real 0,39	0,82
Transmitância do vidro (W/m ² K) (U _{vid})	Condição real 5,7	5,7
Iluminação e ganhos		
Densidade de potência de iluminação (W/m ²) (DPI)	Condição real 8,10	14,1
Ocupação (m ² /pessoa)		10
Densidade de potência de equipamentos (W/m ²) (DPE)		15

Horas de ocupação (horas)	10	
Dias de ocupação (Nano)*	260*	
Condição do piso	Condição real	
Condição da cobertura	Condição real	
Isolamento do piso	Condição real Poliestireno (EPS)	Sem isolamento
Condicionamento de ar (refrigeração)		
Coeficiente de performance (W/W) (COP)	Condição real	
	3,33 Resfriamento	2,60 Resfriamento
	3,40 Aquecimento	2,60 Aquecimento
Temperatura <i>setpoint</i> (°C)	24	

Fonte: Autora, com base em INMETRO, 2021.

3.2.4.2 Determinação da classe de eficiência energética geral do caso base

A classificação da eficiência do caso base foi dividida em três sistemas principais: envoltória, sistema de condicionamento de ar e sistema de iluminação.

A partir das simulações, obteve-se o consumo final por uso dos sistemas individuais em energia elétrica. Esses resultados foram utilizados para calcular o consumo de energia primária (CEP) das condições real e de referência.

O CEP da edificação em sua condição real (CEP_{REAL}) e de referência (CEP_{REF}) foi determinado a partir da Equação (3), definido pela soma do consumo estimado de energia elétrica (CTE_E), da Equação (4) multiplicado por seu respectivo fator de conversão (Tabela 2).

$$CEP_{REAL \text{ ou } REF} = (CTE_E \cdot fcE) + (CTE_T \cdot fcT) \quad (3)$$

Onde:

CEP é o consumo de energia primária da edificação avaliada (kWh/ano);

CTE_E é o consumo total de energia elétrica da edificação avaliada (kWh/ano);

CTE_T é o consumo total de energia térmica da edificação avaliada (kWh/ano);

fcE é o fator de conversão de energia elétrica em energia primária;

fcT é o fator de conversão de energia térmica em energia primária.

Para o objeto em estudo, não há o uso de energia térmica, portanto esse não foi calculado.

Quanto à obtenção do consumo total de energia elétrica, tanto para o caso real quanto para o de referência, foi utilizada a Equação (4).

$$CTE_E = CIL + CCAE + CAAE + CEQ - GEE \quad (4)$$

Onde:

$CTEE$ é o consumo total de energia elétrica (kWh/ano);

CIL é o consumo do sistema de iluminação (kWh/ano);

CCA_E é o consumo de energia elétrica do sistema de condicionamento de ar (kWh/ano);

CAA_E é o consumo do sistema de aquecimento de água - energia elétrica (kWh/ano);

CEQ é o consumo de equipamentos/tomadas (kWh/ano);

GE_E é a geração local de energia elétrica renovável (kWh/ano).

Destaca-se que a edificação não apresenta consumo de sistema de aquecimento de água (CAA_E), portanto, essa parcela foi desconsiderada na Equação (4).

Após o cálculo do CEP das condições real e de referência (CEP_{REF}), foram realizados os passos descritos a seguir:

O primeiro foi a realização do cálculo do percentual de redução do consumo de energia primária (PRCEP_{REAL-D}) da edificação em sua condição real (CEP), para a condição de referência (CEP_{REF}), por meio da Equação (5).

$$PRCEP_{REAL-D} = 1 - \left(\frac{CEP}{CEP_{REF}} \right) * 100 \quad (5)$$

Onde:

PRCEP_{REAL-D} é o percentual de redução do consumo de energia primária da edificação em sua condição real;

CEP é o consumo de energia primária da edificação em sua condição real (kWh/ano);

CEP_{REF} é o consumo de energia primária da edificação em sua condição de referência (kWh/ano).

No segundo passo, foi realizada a determinação do FF da edificação. Este é a razão entre a área total do envelope (área de fachadas, platibanda, cobertura e outros elementos da envoltória, desconsiderando as áreas em contato com o solo) e o volume total da edificação, através da Equação (6).

$$FF = \frac{A_{env}}{V_{tot}} \quad (6)$$

Onde:

FF é o fator de forma da edificação (m²/m³);

A_{env} é a área da envoltória (m²);

V_{tot} é a volume total construída da edificação (m³).

No que diz respeito ao terceiro passo, foi identificado o coeficiente de redução do consumo de energia primária da classe “D” para a classe “A” ($CRCEP_{D-A}$), com base no FF e no GCL correspondente, conforme Tabela 25.

Tabela 25 - Edificações de escritórios: coeficiente de redução do consumo de energia primária da classe D para a classe A ($PRCEP_{D-A}$) com base no fator de forma (FF) para o grupo climático 5.

Grupo Climático	Coeficiente de redução do consumo de energia primária da classe “D” para a classe “A” ($CRCEP_{D-A}$)				
	$FF \leq 0,20$	$0,20 < FF \leq 0,30$	$0,30 < FF \leq 0,40$	$0,40 < FF \leq 0,50$	$FF > 0,50$
GCL 5	0,29	0,33	0,34	0,35	0,35

Fonte: Adaptado de INMETRO, 2021.

No quarto passo, foram definidos os intervalos dentro dos quais a edificação proposta foi classificada (Equação (7)). Esses foram subdivididos em três partes a partir do coeficiente “i”, (ver Tabela 25), considerando que cada parte se refere a uma classe de desempenho, que varia de “A” até “D”.

$$i = \frac{CEP_{REF} \cdot CRCEP_{D-A}}{3} \quad (7)$$

Onde:

i é o coeficiente que representa os intervalos entre as classes;

CEP_{REF} é o consumo de energia primária da edificação em sua condição de referência (kWh/ano);

$PRCEP_{D-A}$ é o coeficiente de redução do consumo de energia primária da classe D para a classe A.

No quinto passo, com o valor de intervalo já definido, foi realizado o preenchimento da Tabela 26, para a identificação do nível de Eficiência Energética da edificação.

Tabela 26 - Intervalos relativos a cada uma das classes de eficiência energética.

Classe de eficiência	A	B	C	D	E
Limite superior	-	$> CEP_{REF} - 3i$	$> CEP_{REF} - 2i$	$> CEP_{REF} - i$	$> CEP_{REF}$
Limite inferior	$< CEP_{REF} - 3i$	$\leq CEP_{REF} - 2i$	$\leq CEP_{REF} - i$	$\leq CEP_{REF}$	-

Fonte: Adaptado de INMETRO, 2021.

Cabe destacar que, nos casos que a condição real da edificação apresentou consumo energético de energia primária superior à condição de referência, sua classificação final foi definida como classe “E”.

No sexto e último passo efetuado nesta etapa, ocorreram as comparações dos consumos de energia primária da edificação (CEP_{REAL-D}), encontrado por meio dos

limites da Tabela 26, possibilitando, assim, a identificação da classe de eficiência da edificação em avaliação.

3.2.5 Etapa 5 – Definição dos Modelos de Referência

A partir da identificação da classificação energética do caso base e do modelo na condição de referência (classe “D”) de acordo com a INI-C, foram definidos modelos para todas as outras classificações faltantes. Isso ocorreu por meio dos consumos energéticos de energia primária de cada intervalo relativo às classes de eficiência energética apresentadas na Tabela 26, objetivando, assim, a comparação entre as classes.

3.2.6 Etapa 6 – Obtenção do balanço energético nulo nos casos em estudo

Nesta etapa, foram aplicados sistemas FV em todos os casos analisados. Em seguida, foi realizada a avaliação da geração de energia FV, com o intuito de obter modelos com balanço energético nulo em um período avaliativo de um ano.

A definição dos SFV para cada um dos casos ocorreu em três etapas: avaliação da necessidade de potência a ser instalada, definição das áreas disponíveis para a instalação SFV e dimensionamento do sistema.

Cabe destacar que a edificação encontra-se isolada no terreno, com entorno sem proximidades de edificações, o que se tornou uma vantagem para a escolha das disposições dos SFV. Isto concorda com o que afirmam Chivelet e Solla (2010) ao estabelecerem que qualquer superfície de pele externa de um edifício, com boa orientação solar e livre de sombras, pode ser adequada para a instalação de módulos FV.

Considerando tratar-se de um edifício existente, foram definidas as áreas de instalação dos SFV na ordem de prioridade de menor impacto visual possível. Desse modo, a primeira opção definida foi a de exploração da área de cobertura disponível, de 408,00m² (Figura 30). Tratou-se de uma cobertura metálica com inclinação de 3° (indicada em projeto), de duas águas direcionadas a -41°N a noroeste e 139°N a sudeste. Possui platibanda de 75 centímetros (cm) acima do nível mais alto do telhado, fator este que influenciou na definição das disposições dos módulos FV, visando evitar o sombreamento dos mesmos.

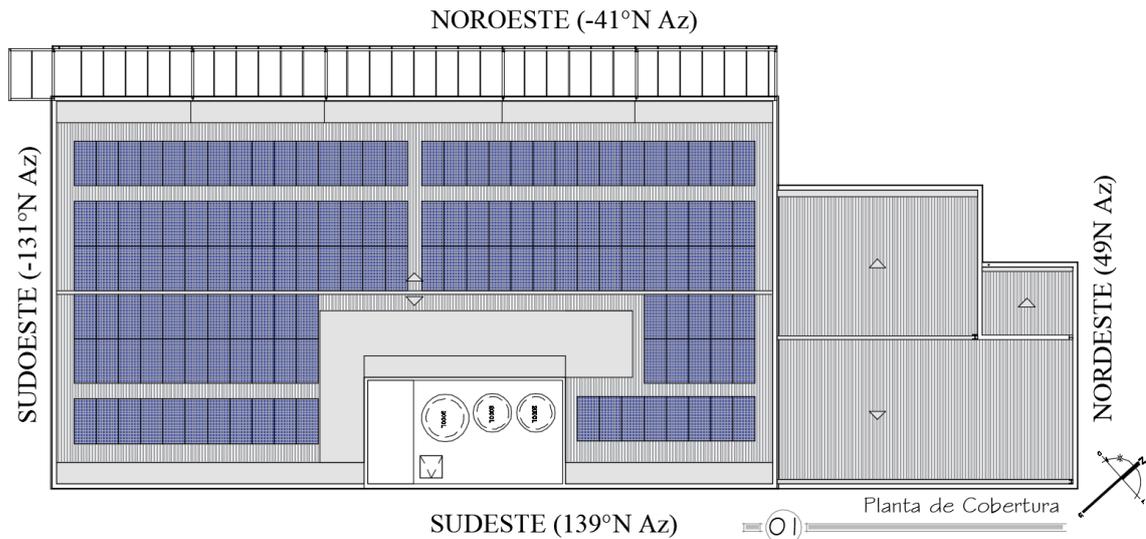


Figura 30 - Área de cobertura disponível para aplicação de SFV.
Fonte: Autora.

Nos casos em que a área de cobertura disponível não foi suficiente para gerar toda a energia necessária para a edificação atingir o balanço energético nulo, foi, então, explorada a envoltória do edifício, com a possibilidade de aplicação de módulos FV em partes opacas das fachadas, sempre visando o menor impacto possível na linguagem original do projeto.

Dessa forma, para a definição da disposição dos módulos FV opacos integrados com as fachadas, foram exploradas as áreas em destaque na cor azul na Figura 31, em substituição aos elementos de revestimento do tipo *miniwave* (segundo e terceiro pavimentos) e ACM (pavimento térreo).

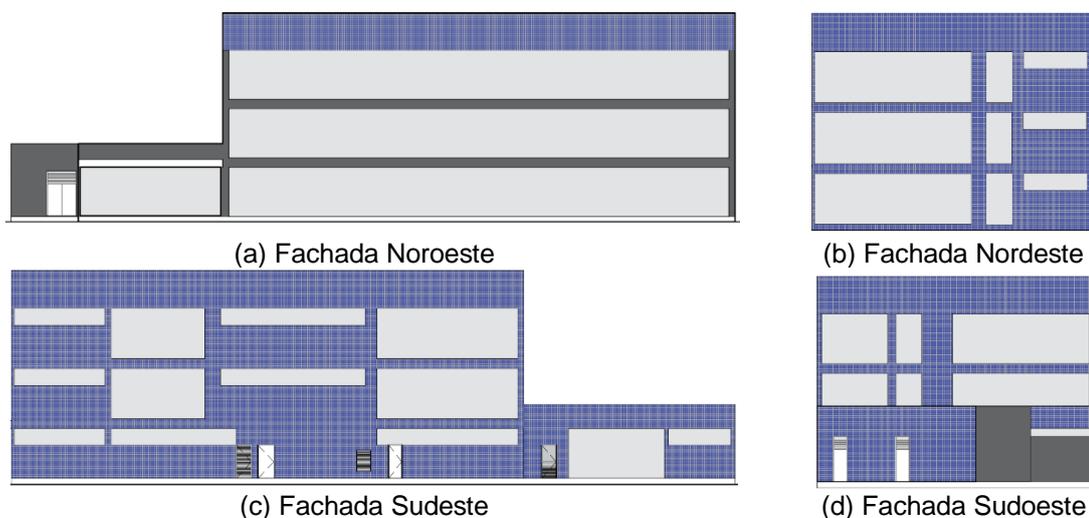


Figura 31 - Áreas disponíveis para aplicação de SFV – PAF igual a 50%.
Fonte: Autora.

Tendo em vista que o caso A apresenta um PAF igual a 34,20%, a área de fachadas opacas disponíveis para essa situação é maior do que a do caso D (50%). Dessa forma, não havendo o valor de PAF para os casos B e C, foi considerada a pior situação e adotado o mesmo valor do caso D. Da mesma forma, considerando que o caso D não possui *brise* metálico, este elemento também foi desconsiderado nos casos B e C.

Destaca-se que, diferentemente da cobertura, para a qual foi considerada a modulação e disposição dos módulos FV, para as fachadas foi avaliada a área dos módulos FV em relação às opacas disponíveis.

Conforme revisão da literatura realizada no capítulo 2, estudos confirmam que, apesar do *EnergyPlus* ser identificado como uma excelente ferramenta de análise de consumo de energia, o programa não é indicado para uso de análise de desempenho de SFV, pois seus dados não são precisos. Portanto, para os cálculos da estimativa de geração de energia elétrica através dos módulos FV, optou-se por utilizar o programa Radasol (LABSOL UFRGS, 2019).

Para a realização desses cálculos, foi utilizada a Equação 8, por meio da identificação dos consumos de energia dos casos em estudo, dos dados de disponibilidade de irradiação solar local e das características dos SFV adotados.

$$PFV = E.G/H_{tot}.R \quad (8)$$

Onde:

P_{FV} é a potência FV instalada (kWp).

E é a energia consumida ou gerada (kWh).

G é a irradiância na condição STC (1000W/m²).

H_{TOT} é a irradiação diária (kWh/m²/dia).

R é o rendimento do sistema conectado (inversor e conexões).

O valor da energia consumida para cada caso de referência foi determinado na Etapa 3.

O valor de irradiação diária recebido no plano do painel FV foi obtido através do programa Radasol (LABSOL UFRGS, 2019). Para cada caso em estudo, foi calculada a média das irradiações de todos os planos em que foram aplicados os módulos FV.

No que diz respeito ao rendimento do sistema, foi determinado o valor de 0,8 por ser o do sistema de 2 kWp do LABSOLAR, em operação desde 1997 (RUTHER, 2004), e usualmente recomendado pela literatura (ZOMER, 2010).

A escolha do tipo de módulo ocorreu em função de sua maior eficiência e por possuir classificação “A” em eficiência energética. O modelo utilizado foi o JKM410M-6RL3 (JINKO SOLAR, 2021), composto por 132 células de silício monocristalino, de dimensões de 1855x1029x30mm (Figura 32). Suas características são apresentadas na Tabela 27.



Figura 32 - Módulo JKM410M-6RL3 – 410W do Jinko Solar
Fonte: JINKO SOLAR, 2021.

Tabela 27 - Dimensões e parâmetros elétricos do módulo FV.

Parâmetros	Valores
Área (m ²)	1,91 m ²
Número de células em série	132 (2x66)
Potência nominal (Wp)	410
Tensão de potência máxima (Vmp)	36,84
Corrente de potência máxima (Imp) (A)	11,13
Tensão de circuito aberto (Vco) (V)	44,29
Corrente de curto-circuito (Isc) (A)	11,79
Eficiência do módulo STC (%)	21,48%
Temperatura de operação (°C)	-40 ~ +85
Tensão máxima do sistema	1000/1500VDC
Classificação máxima de fusível em série (A)	20
Tolerância de potência (%)	0~+3
Coeficiente de temperatura de Pmax	-0.35%/°C
Coeficiente de temperatura Voc	-0.28%/°C
Coeficiente de temperatura Isc	0.048%/°C
Temperatura operacional nominal da célula (NOCT)	45±2°C

Fonte: Adaptado de JINKO SOLAR, 2021.

3.2.7 Etapa 7 – Análise e viabilidade econômica

A análise econômica foi realizada com base nos dados de consumo energético do edifício, obtidos a partir do programa *EnergyPlus*, dos cálculos de geração de energia dos módulos FV e da pesquisa de preços dos SFV, realizada a partir do banco de dados Greener (2020).

Os dois indicadores utilizados foram: (I) VPL e (II) TIR , através das Equações 7 e 8. O VPL foi utilizado para identificar o tempo de retorno do investimento ao longo

de um período determinado, enquanto a TIR foi usada para calcular a taxa máxima de atratividade que o projeto oferece para o período analisado.

Desse modo, para os dois indicadores avaliados, em cada cenário financeiro, foram adotadas como variáveis principais: a) Taxa Mínima de Atratividade (TMA), equivalente ao Sistema Especial de Liquidação e Custódia – taxa básica de juros) (SELIC); b) período de retorno de investimento do SFV; c) custo da energia elétrica fornecida pela concessionária; e d) índice de reajuste anual do fornecimento da energia elétrica (%/ano).

a) Por meio da pesquisa dos valores dos últimos 10 anos (2011 a 2020), a taxa de atratividade escolhida foi a SELIC, com a maior taxa no ano de 2016 (13,2%) e a menor no ano de 2020 (2,72%) (Apêndice A);

b) O período de retorno de investimento adotado foi de 25 anos, que corresponde ao prazo de garantia da eficiência dos módulos FV fornecido pelos fabricantes;

c) Quanto às tarifas da energia elétrica aplicadas pela concessionária local da cidade de Pelotas-RS, tanto o preço final de energia consumida quanto a demanda de potência foram calculados conforme a Equação (9);

$$\text{Preço Final} = \text{Preço Homologado} / (1 - \text{PIS}(\%) - \text{COFINS}(\%) - \text{ICMS}(\%)) \quad (9)$$

Os preços homologados pela ANEEL com vigência a partir de novembro/2020, aplicáveis ao subgrupo A4 (média tensão) para edificações comerciais na modalidade tarifária horária verde fora de ponta (entre 21h e 18h do dia útil seguinte, e durante as 24h de sábados, domingos e feriados) são de R\$ 0,342220 por kWh e de R\$ 21,93 por kW, respectivamente para energia e demanda de potência. Além disso, foi considerado um segundo cenário com adicional bandeira vermelha (patamar 2), com acréscimo de R\$ 0,06243 por kWh.

Para os valores do Programa de Integração Social (PIS) e da Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social (COFINS) foi utilizada a média dos últimos quatro anos, conforme dados disponíveis no site da companhia elétrica, sendo 0,7762% e 3,5728%, respectivamente (Apêndice A). Quanto à alíquota de ICMS referente à classe comercial, foi adotado o valor de 30%, conforme determinação da Lei Estadual nº 8.820/1989 e posteriores alterações (RIO GRANDE DO SUL, 1989).

(d) O índice de reajuste anual da tarifa de energia elétrica foi determinado a partir dos dados disponíveis pela concessionária, levando em consideração o Índice de Reajuste Tarifário (IRT) dos últimos quatro anos, sendo o valor médio de 10,185% (Apêndice A).

Os valores das tarifas de energia elétrica e da demanda contratada, utilizados nos cenários em análise, encontram-se na Tabela 28.

Tabela 28 - Tarifas de energia elétrica com impostos.

	Preço Final com Impostos
Energia fora de ponta – Modalidade Horária Verde	0,52127 (R\$/kWh)
Energia fora de ponta – Bandeira Vermelha Patamar 2	0,61637 (R\$/kWh)
Demanda contratada	33,40 (R\$/kW)

Fonte: CEEE-D, 2020.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos por meio da aplicação do método proposto no objeto de estudo.

Os valores do consumo de energia gerada são resultados das simulações realizadas no programa *EnergyPlus*, versão 8.7. A energia gerada através dos módulos FV foi calculada manualmente, com o auxílio do programa Radiasol.

Os resultados são apresentados e discutidos na sequência: “4.1 Análise do consumo e desempenho termoenergético do Caso Base”; “4.2 Classificação energética do Caso Base: aplicação da Instrução Normativa para a Classe de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas (INI-C)”; “4.3 Definição dos modelos de referência”; “4.4 Verificação da possibilidade da obtenção do balanço energético nulo nos casos em estudo”; e “4.5 Análise e viabilidade econômica”.

4.1 Análise do consumo e do desempenho termoenergético do Caso Base

A partir dos dados de saída da simulação computacional realizada no *EnergyPlus* do Caso Base e, considerando que o edifício possui uma área de 1.881,28m², obteve-se o diagnóstico de desempenho energético por usos finais de sistemas de condicionamento de ar, iluminação e equipamentos, conforme valores que podem ser observados na Tabela 29.

Tabela 29 - Consumo do caso base em kWh/m².ano

Tipo de uso	Consumo	
	(kWh/m ² .ano)	%
Aquecimento	2,29	5,60%
Resfriamento	9,12	16,01%
Iluminação	17,66	30,99%
Equipamentos	27,61	48,47%
Outros	0,28	0,50%
Total	56,97	100%

Fonte: Autora com base nos dados de saída do *EnergyPlus*, 2020.

Como visto, foi identificado o consumo total de 56,97 kWh/m².ano, sendo que deste, os equipamentos corresponderam a 27,61 kWh/m².ano, cerca de 48,47% do consumo total do edifício, seguido de iluminação artificial, com 17,66 kWh/m².ano, representando 30,99% do total. Já as cargas térmicas para aquecimento e resfriamento da edificação foram responsáveis por 21,61% do consumo final, compreendendo 11,41 kWh/m².ano.

Com esses resultados, verificou-se que os maiores consumos ocorreram por meio dos sistemas de iluminação artificial e equipamentos, que juntos representaram 79,46% do total de energia consumida.

Tal fato se explica em função da configuração da alta densidade de potência de equipamentos, com valor igual a 15 W/m², conforme determinação da INI-C e, ainda, pela densidade de potência de iluminação (8,10 W/m²), sem considerar a análise da iluminação natural, fator que poderia contribuir significativamente na economia de energia.

Quando analisado o consumo energético do sistema de condicionamento de ar, a necessidade para resfriamento correspondeu a 16,1% do consumo de energia, aproximadamente 2,9 vezes superior ao valor do consumo para aquecimento. Tal situação se explicou pela elevada carga térmica interna de edifícios comerciais, provenientes da ocupação, do uso de equipamentos e da iluminação artificial, estes que impactaram diretamente no consumo dos sistemas de climatização artificial.

Apesar da edificação apresentar vidro reflexivo com baixo fator solar, tal elemento influenciou na quantidade de transferência de calor do ambiente externo para o interno, contribuindo também para o aumento do consumo para climatização.

4.2 Classificação energética do Caso Base: aplicação da Instrução Normativa para a Classe de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas (INI-C)

A partir dos dados de saída da simulação do caso base, e considerando que a condição de referência (classe “D”) possui uma área de 1.881,28m², obteve-se o diagnóstico de desempenho energético do edifício por usos finais de condicionamento de ar, iluminação e equipamentos, conforme a Tabela 30.

Tabela 30 - Consumo do caso referência em kWh/m².ano

Tipo de uso	Consumo	
	(kWh/m ² .ano)	%
Aquecimento	1,36	1,56%
Resfriamento	21,67	24,88%
Iluminação	35,89	41,21%
Equipamentos	27,61	31,71%
Outros	0,55	0,64%
Total	71,27	100%

Fonte: Autora, com base nos dados de saída do *EnergyPlus*.

Houve um consumo total de energia igual a 71,27 kWh/m².ano, com participação de 35,89 kWh/m².ano de iluminação artificial, aproximadamente 41,21% do total do caso referência; seguido dos equipamentos, com 27,61 kWh/m².ano, representando 31,71%; e das cargas térmicas para aquecimento e resfriamento da edificação, responsáveis por 26,44% do consumo final, o que equivale a 23,03 kWh/m².ano.

No que diz respeito à análise do consumo energético do sistema de condicionamento de ar, a necessidade para resfriamento foi significativamente superior a de aquecimento, aproximadamente 16 vezes maior.

Com base nos resultados da simulação, foi realizada a comparação dos dois casos, conforme Figura 33, onde observou-se que o Caso Base apresentou um consumo total de energia igual a 56,97 kWh/m².ano e o edifício referência demonstrou valor igual 87,08 kWh/m².ano, portanto este representou um acréscimo de 52,86% em relação ao Caso Base.

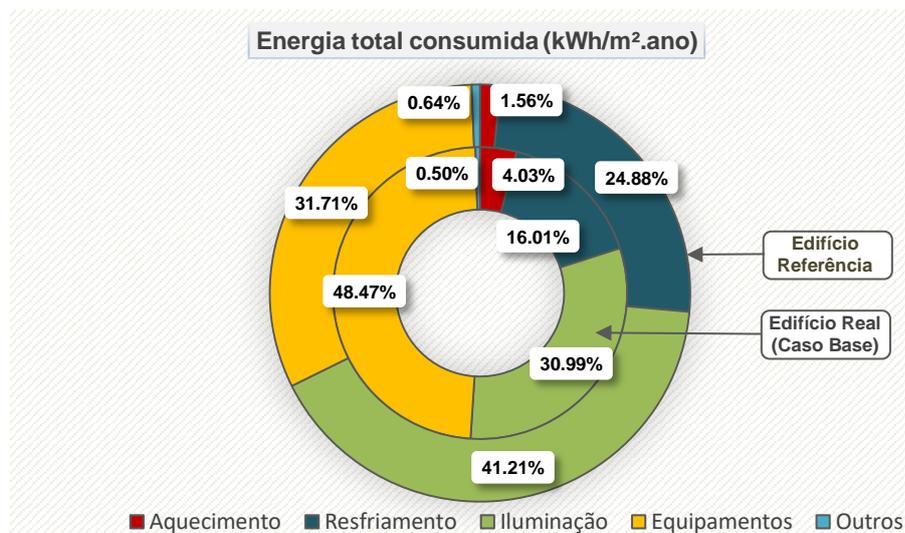


Figura 33 - Gráfico comparativo do consumo de energia do caso real e caso referência.
Fonte: Autora.

No que diz respeito à comparação de consumos energéticos do sistema de condicionamento de ar, a necessidade para aquecimento apresentou uma redução de 40,77%, enquanto para resfriamento foi constatado um acréscimo de 137,57% em relação ao Caso Base.

Esses resultados estão diretamente ligados à eficiência do sistema de condicionamento de ar, por meio da configuração do COP do sistema, uma vez que, para o Caso Base, essa configuração foi de 3,30 para resfriamento e de 3,40 para

aquecimento, enquanto para o caso de referência foi utilizado o valor de 2,60, tanto para aquecimento quanto resfriamento.

Outra influência relevante no consumo para climatização foram os parâmetros relacionados às janelas: PAF, tipo de vidro e ausência de dispositivo de sombreamento.

Tendo em vista que essas possuem grande área envidraçada e, por sua vez, apresentam uma resistência menor à transmissão de calor, observou-se um acréscimo de 15,8% no PAF do caso de referência em relação ao Caso Base, fator que facilitou as trocas de calor da edificação com o ambiente externo, contribuindo para o aumento do consumo para climatização. Tais resultados ratificam as constatações de Westphal e Andreis (2016), que apontam que, quanto maior o PAF, maior é o consumo energético.

Quando analisada a influência do tipo de vidro no impacto do consumo energético, devido às trocas térmicas na envoltória, o caso de referência foi configurado com vidros do tipo simples incolor 6mm de alto fator solar (0,82), valor significativamente superior ao Caso Base, que foi configurado com um vidro reflexivo cinza de 8mm e fator solar igual a 0,39. Essa propriedade interferiu diretamente na parcela de radiação solar que foi absorvida, refletida ou transmitida para o interior do edifício, acarretando, assim, o aumento da carga térmica interna do edifício e, conseqüentemente, o elevado consumo de energia para resfriamento.

Ao analisar o dispositivo de sombreamento, Chvatal e Corvacho (2009), Venâncio e Pedrini (2009) e Neves e Marques (2017), apontaram, em seus estudos, que a utilização desses dispositivos está diretamente relacionada ao decréscimo do consumo energético com climatização, pois eles evitam a incidência direta da radiação solar no vidro, controlando os ganhos de calor para o interior do edifício. Desse modo, demonstra-se que o elemento em questão, utilizado apenas no Caso Base, poderia ter auxiliado na redução do consumo para resfriamento caso tivesse sido utilizado para o caso de referência, em conjunto com o vidro simples.

Somado a isso, outra questão que pode ter influenciado no consumo para climatização foi o isolamento térmico das paredes do Caso Base ($U = 1,01 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$), que interfere diretamente nas trocas de calor pela envoltória do edifício, uma vez que o caso de referência foi configurado com paredes de transmitância térmica igual a $2,39 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$, ou seja, um acréscimo de 2,36 vezes em relação ao Caso Base.

Da mesma forma ocorreu na configuração de cobertura com uma transmitância térmica igual a 2,06 W/m²K, que cresceu 1,20 vezes em relação ao Caso Base (1,719 W/m²K), apontando, assim, que a falta de isolamento térmico da cobertura corroborou para o aumento do consumo para resfriamento, uma vez que tal elemento é a parte da edificação que mais recebe irradiação solar.

Quando comparados os consumos de iluminação, foi obtido o valor de 35,89 kWh/m².ano, representando um acréscimo de 103,26% em relação ao Caso Base. Isso se justificou em função da configuração do sistema, com densidade de potência de iluminação igual a 14,10 W/m², enquanto o Caso Base foi configurado com o valor de 8,10 W/m².

Devido às configurações de densidade de potência para os equipamentos terem permanecido iguais em ambos casos (Base e de Referência), os consumos dos sistemas se mantiveram iguais (15,00 W/m²), contribuindo, assim, para um consumo de 48,47% e de 31,71% do consumo total das edificações para o Caso Base e para o edifício de referência, respectivamente.

Diante disso, com os dados de consumo por usos finais dos dois casos, foi iniciado o procedimento de determinação da classe de eficiência por meio do cálculo do CEP da condição real e da de referência. Para a realização dos cálculos, foi necessária a identificação do consumo na unidade de kWh/ano, apresentados na Tabela 31.

Tabela 31 - Comparação dos consumos energéticos dos edifícios real e de referência em kWh/ano.

ENERGIA TOTAL CONSUMIDA (kWh/ano)	EDIFÍCIO REAL (CASO BASE)	EDIFÍCIO REFERÊNCIA (CLASSE "D")	DIFERENÇA
Aquecimento	4.316,53	2.556,77	-40,77%
Resfriamento	17.157,07	40.759,59	137,57%
Iluminação	33.216,63	67.514,17	103,26%
Equipamentos	51.944,18	51.944,18	-
Outros	534,75	1.043,13	95,07%
Total	107.169,16	163.818,37	52,86%

Fonte: Autora, com base nos dados de saída do *EnergyPlus*.

No primeiro momento, foi calculado o consumo total de energia elétrica, aplicando-se a Equação (4) para ambos os edifícios, onde foram somados os consumos de equipamentos, ar condicionado e iluminação, conforme Tabela 32.

Tabela 32 - Consumo total de energia elétrica dos edifícios real e de referência (kWh/ano).

EDIFÍCIO REAL	EDIFÍCIO REFERÊNCIA
$CTEE = CIL + CCAE + CAAE + CEQ - GEE$	$CTEE = CIL + CCAE + CAAE + CEQ - GEE$
$CTE_E = 33.216,63 + (4.316,53 + 17.157,07) + 51.944,18$	$CTEE = 67.514,70 + (2.556,77 + 40.759,59) + 51.944,18$
$CTE_E = 106.634,41 \text{ kWh/ano}$	$CTEE = 162.775,24 \text{ kWh/ano}$

Fonte: Autora, com base em INMETRO, 2021 e dados de saída do *EnergyPlus*.

A Equação (4) levou em consideração a parcela de geração local de energia elétrica renovável, porém, por não haver essa energia no Caso Base, esse não se aplicou aos cálculos.

Para o cálculo do CEP da edificação em sua condição real (CEP_{REAL}) e de referência (CEP_{REF}), foi aplicada a Equação (3). A energia térmica não se aplicou no objeto de estudo, portanto, o consumo de energia primária da edificação só levou em conta o consumo de energia elétrica. Quanto ao fator de conversão de energia elétrica em energia primária, foi utilizado o valor de 1,6, conforme Tabela 33.

Tabela 33 - Consumo de energia primária dos edifícios real e de referência (kWh/ano).

EDIFÍCIO REAL	EDIFÍCIO REFERÊNCIA
$CEP_{REAL} = (CTEE \cdot fcE)$	$CEP_{REF} = (CTEE \cdot fcE)$
$CEP_{REAL} = (106.634,41 \times 1,6)$	$CEP_{REF} = (162.775,24 \times 1,6)$
$CEP_{REAL} = 170.615,06 \text{ kWh/ano}$	$CEP_{REF} = 260.440,38 \text{ kWh/ano}$

Fonte: Autora, com base em INMETRO, 2021 e dados de saída do *EnergyPlus*.

Após o cálculo do consumo total de energia primária dos dois casos, foram, então, realizados os cinco passos para a identificação da classe da edificação, conforme Apêndice B.

Por fim, após a realização de todos os cálculos, foi realizado o preenchimento da Tabela 34 e foram identificados os consumos de energia primária para cada intervalo de referência.

Tabela 34 - Intervalos relativos a cada uma das classes de eficiência energética do objeto de estudo.

Classe de eficiência	A	B	C	D	E
Limite superior	-	> 174.495,06	> 203.143,50	> 231.791,94	> 260.440,38
Limite inferior	< 174.495,06	≤ 203.143,50	≤ 231.791,94	≤ 260.440,38	-

Fonte: Autora com base em INMETRO, 2021.

Portanto, com o valor calculado de CEP_{REAL} igual a 170.615,06 kWh/ano referente ao Caso Base, o mesmo sendo inferior do que o limite da classe "A" (174.495,06 kWh/ano), verificou-se que esse apresentou uma classe de eficiência energética "A", segundo a INI-C.

4.3 Definição dos modelos de referência

A partir do resultado da etapa anterior, com a identificação da classificação energética do caso base igual a “A”, de acordo com a INI-C e, ainda, tendo em vista que o modelo na condição de referência possui uma classificação igual a “D”, foram definidos modelos de referência B e C. Considerou-se os consumos de energia primária de cada intervalo relativo às classes de eficiência energética, na Tabela 4, identificando, assim, modelos de todas as classes de eficiência energética para comparação entre os mesmos.

A determinação do consumo de energia elétrica em cada um dos casos em estudo ocorreu a partir dos limites de consumo de energia primária, calculados e identificados na Tabela 35. A conversão de energia elétrica em primária foi realizada por intermédio da divisão do fator de conversão igual a 1,6, este determinado pela INI-C.

O Caso Base, identificado como classe “A” em eficiência energética, apresentou um consumo de energia igual a 106.634,41 kWh/ano, enquanto os casos B, C e D apresentaram 126.964,69 kWh/ano, 144.869,96 kWh/ano e 162.775,24 kWh/ano, respectivamente (Tabela 35). Tais diferenças levaram a um aumento de 19,07%, 35,86% e 52,65%, respectivamente, quando comparados com o caso “A”.

Tabela 35 - Valores de consumo de energia elétrica para cada classe de eficiência energética.

Classe de eficiência	A	B	C	D
Limite inferior Energia Primária (kWh/ano)	< 174.495,06	≤ 203.143,50	≤ 231.791,94	≤ 260.440,38
Consumo Energia Elétrica (kWh/ano)	Edifício Real (170.615,06/1,6) 106.634,41	(203.143,50/1,6) 126.964,69	(231.791,94/1,6) 144.869,96	(260.440,38/1,6) 162.775,24

Fonte: Autora com base nas definições da INI-C.

4.4 Obtenção do balanço energético nulo nos casos em estudo

Nesta etapa foi verificada a possibilidade de obtenção do balanço energético nulo nos casos A, B, C e D, de classificação de eficiência energética segundo a INI-C. Assim, foram aplicados SFV em cada um dos casos, com o objetivo de alcançar o balanço energético nulo no final do período de um ano.

A obtenção correu em três etapas: avaliação da necessidade de potência a ser instalada, definição das áreas disponíveis para a instalação do SFV e dimensionamento do sistema.

Nesta etapa também foi realizado o estudo das sombras da edificação, por meio do programa *SketchUp* 2017, com o objetivo de verificar o impacto do sombreamento das paredes da platibanda nos módulos FV da cobertura. Esse estudo contemplou os períodos de solstícios de inverno e verão e o equinócio de primavera e outono, nos horários de 8h e 16h (Apêndice C). Desse modo, observou-se uma pequena área sombreada nos primeiros horários da manhã e nos últimos da tarde, porém, esses sombreamentos não foram considerados para o cálculo de geração de energia solar neste estudo.

Nos casos em que o SFV aplicado na área de cobertura disponível não foi suficiente para gerar toda a energia solar necessária para a edificação obter o balanço energético nulo, foram, então, exploradas as áreas da envoltória do edifício pela possibilidade de aplicação de módulos FV em suas partes opacas.

De posse dos valores de consumos de energia elétrica para cada caso em estudo (A, B, C e D), apresentados na Tabela 35, foi possível calcular o dimensionamento dos SFV para os mesmos.

No que diz respeito às coberturas, o número máximo de módulos FV que puderam ser instalados no telhado foi de 141, sendo 90 deles na orientação noroeste e 51 na sudeste. Os mesmos foram arranjados conforme Figura 30, (a) -41°N e (b) 139°N , com inclinação de 3° . Essa situação foi chamada de real, enquanto a ideal se encontra na orientação norte e latitude local.

Visando o aproveitamento da inclinação da cobertura existente e o menor impacto possível em alterações da edificação, foi definida a aplicação do SFV na inclinação de 3° , tendo em vista uma redução pouco significativa da quantidade de radiação solar nessas superfícies, em torno de 2,75% de decréscimo em relação a situação ideal (Apêndice D).

Na Figura 34, são apresentados os dados de irradiância média nos planos da cobertura e fachadas, obtidos pelo programa *Radiasol*, através da inserção de dados do Atlas Brasileiro de Energia Solar (PEREIRA *et al.*, 2017), que possibilitaram identificar a diferença do nível de radiação entre as posições.

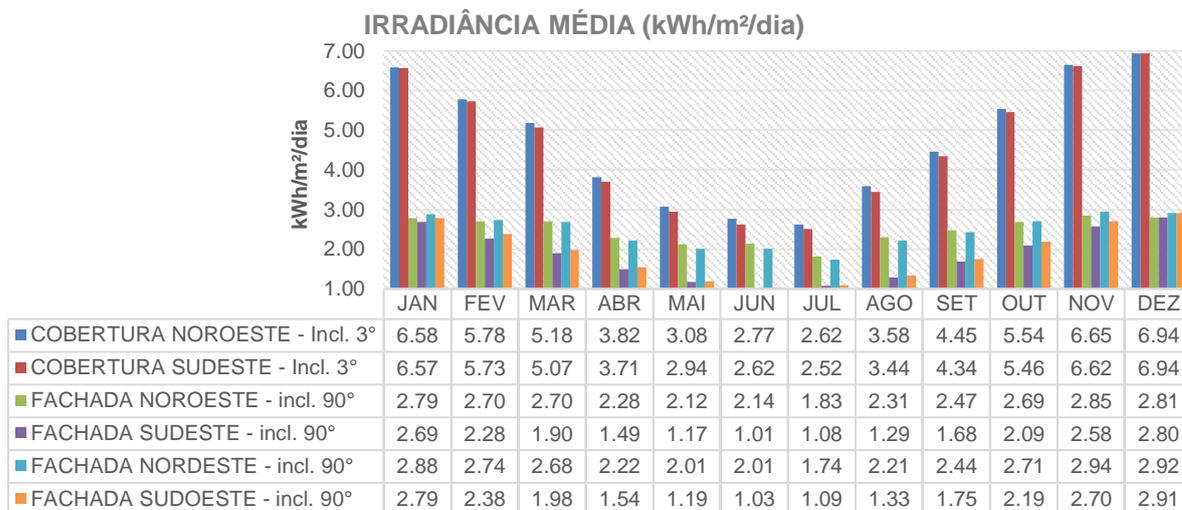


Figura 34 - Irradiância média diária nos planos da cobertura e fachadas.

Fonte: Autora com base nos dados do programa Radiasol.

As fachadas que apresentaram maior potencial para a geração de energia foram as que ficaram à noroeste e à nordeste, com valores de radiação solar igual a 2,791 kWh/m²/dia e 2,879 kWh/m²/dia, no período de janeiro, e de 1,826 kWh/m²/dia e 2,879 kWh/m²/dia, em julho, respectivamente. Ainda, apresentaram uma variação de 35% a 40% ao longo do ano.

Observa-se, também, que as fachadas noroeste e nordeste, além de possuírem maior uniformidade de distribuição de radiação solar ao longo do ano, no período de inverno apresentaram até 53% mais irradiância em relação às fachadas sudeste e sudoeste.

Quando comparados os potenciais de geração de energia das coberturas em relação as fachadas, mesmo na nordeste, com maior potencial de geração, apresentou uma redução de 42,34% em relação ao potencial. Nesse sentido, esgotando-se a possibilidade de implantação de SFV na cobertura, ainda assim foram exploradas as áreas da envoltória do edifício.

Cabe destacar que todas as propostas de substituição de elementos arquitetônicos impactaram na linguagem original do projeto, confirmando a importância das soluções arquitetônicas concebidas desde o início do processo projetual, uma vez que as decisões tomadas pelo arquiteto, no início da elaboração do projeto, acarretam impactos significativos no desempenho ambiental do edifício.

Desse modo, para a definição da disposição dos módulos FV opacos integrados às fachadas, foram exploradas as áreas em destaque na cor azul, apresentadas na Figura 31, essas detalhadas na Tabela 36.

Tabela 36 - Áreas disponíveis para aplicação de SFV.

	Área do módulo (m ²)	Área disponível PAF 34,20%	Quantidade de módulos	Área disponível PAF 50%	Quantidade de módulos
Fachada Noroeste	1,91	282,40	147,00	79,52	41,00
Fachada Nordeste	1,91	128,45	67,00	74,82	39,00
Fachada Sudeste	1,91	238,42	124,00	312,81	163,00
Fachada Sudoeste	1,91	161,90	84,00	95,96	50,00

Fonte: Autora.

Considerando que, em todos os casos, a disponibilidade de geração de energia FV por meio da cobertura não foi insuficiente para se obter um balanço energético nulo, visto que a potência máxima calculada atingiu o valor de 57,81 kWp (Apêndice D), foi necessária a inclusão das áreas de fachadas disponíveis. Para o cálculo da potência, foi utilizada a Equação (8), que encontra-se detalhadamente apresentada no Apêndice D.

A Tabela 37 apresenta os dados compilados dos dimensionamentos dos SFV para cada objeto de estudo.

Tabela 37 - Dimensionamentos dos SFV para os casos em estudo.

	CLASSE A		CLASSE B		CLASSE C		CLASSE D	
Consumo de energia (kWh/ano)	106.634,41		126.964,69		144.869,96		162.775,24	
Produção de energia (kWh/ano)	106.740,51		127.057,45		144.939,96		150.884,40	
Potência do módulo FV (Wp)	410,00		410,00		410,00		410,00	
nº módulos cobertura -41°	90,00		90,00		90,00		90,00	
nº módulos cobertura -131°	51,00		51,00		51,00		51,00	
	nº módulos FV		nº módulos FV		nº módulos FV		nº módulos FV	
	kWp	módulos FV						
SFV Cobertura	57,81	141,00	57,81	141,00	57,81	141,00	57,81	141,00
Fachada Sudeste (139°N)	50,02	122,00	66,83	163,00	66,83	163,00	66,83	163,00
Fachada Nordeste (49°N)	-	-	-	-	15,99	39,00	15,99	39,00
Fachada Sudoeste (-131°N)	-	-	-	-	9,84	24,00	20,50	50,00
Fachada Noroeste (-41°N)	-	-	15,58	38,00	16,81	41,00	16,81	41,00
SFV Fachadas	50,02	122,00	82,41	201,00	109,47	267,00	120,13	293,00
SFV (Cobertura+Fachadas)	107,83	263,00	140,22	342,00	167,28	408,00	176,53	434,00

Fonte: Autora.

A partir dos resultados obtidos, identificou-se a necessidade de utilização da área de cobertura, com um total de 141 módulos FV em todos os casos.

Quanto às fachadas, para o Caso A, foi necessária implantação de 122 módulos FV, explorando apenas uma delas (sudeste). Enquanto para o Caso B, foram exploradas duas fachadas, sendo, respectivamente, 163 e 38 unidades de módulos FV nas sudeste e noroeste, totalizando 201 módulos FV ao total, o que acarretou um acréscimo de 64,75% em relação ao caso A.

No Caso C, foi necessário explorar as quatro fachadas do edifício, com implantação de 163, 39, 24 e 41 módulos FV, respectivamente, nas fachadas sudeste,

nordeste, sudoeste e noroeste, totalizando, assim, 267 módulos FV. Dessa forma, pode-se perceber um aumento de 118,85% em relação ao Caso A.

No que se refere ao Caso D, foram esgotadas todas as possibilidades de exploração das áreas disponíveis, com o máximo de 293 módulos FV em todas as fachadas, sendo distribuídas com 163, 39, 50 e 41 unidades, respectivamente, nas fachadas sudeste, nordeste, sudoeste e noroeste. Dessa forma, uma vez que o consumo de energia do Caso D foi de 162.775,24 kWh/ano, e a produção máxima de energia pelo SFV instalado foi igual a 150.884,40 kWh/ano, observou-se que o SFV não foi suficiente para alcançar o balanço energético nulo, sendo esse, de menor eficiência, o único dos casos estudados que não conseguiu alcançar o balanço nulo.

Ainda, os resultados apontaram que os SFV instalados na cobertura foram responsáveis pela geração de cerca de 54%, 39% e 33% do total da energia solar produzida pelos edifícios nos casos A, B e C, respectivamente. Isso demonstra que essa foi a superfície de maior potencial de geração de energia e assinala que, quanto mais horizontal for a edificação, maior a área de cobertura disponível, o que, conseqüentemente, leva a maior facilidade de se obter o balanço energético nulo.

4.5 Análise e viabilidade econômica

Esta etapa consistiu em analisar e quantificar o investimento necessário para a implantação de cada SFV proposto, em cada um dos casos estudados. Como parâmetros, foram utilizados os custos das instalações do SFV e os valores poupados com energia elétrica, pelo fornecimento da concessionária, além de um parâmetro de atratividade do investimento para o período máximo de 25 anos, o equivalente ao prazo de garantia de eficiência dos módulos FV fornecido pelos fabricantes.

Dessa forma, foi realizada uma pesquisa na base de dados da Greener (2021) sobre os custos com os SFV, apresentados na Tabela 38. Cabe destacar que foi aplicado um percentual de 5% no custo final do SFV, tendo em vista eventuais manutenções durante a vida útil.

Tabela 38 - Custo do SFV para cada caso.

	CUSTO DO SISTEMA FV				
	Consumo energético (kWh/ano)	Potência do SFV (kWp)	Custo do Wp*	Custo manutenção SFV	Custo do SFV
CLASSE A	106.634,41	107,83	R\$ 3,60	5%	R\$ 407.597,40
CLASSE B	126.964,69	140,22	R\$ 3,60	5%	R\$ 530.031,60
CLASSE C	144.869,96	167,28	R\$ 3,60	5%	R\$ 632.318,40

*valores de referência utilizados através dos dados de preço final para o cliente da Greener.

Fonte: Autora com base nos dados de Greener, 2021.

A partir da análise de cada cenário, foi possível identificar que o edifício classe “A” se mostrou como o mais vantajoso financeiramente, o que decorreu do seu menor consumo energético e, conseqüentemente, da baixa potência do SFV a ser instalada, gerando, desse modo, uma economia de investimento de aproximadamente de 55,13% e 30,04%, quando comparado aos casos de classe “C” e “B”, respectivamente.

Considerando o método VPL, apresentado no Quadro 1 - Retorno financeiro do investimento inicial do SFV baseado no método VPL., observou-se que os investimentos iniciais de todos os casos estudados serão pagos em menos de 11 anos, o que indica a viabilidade econômica dos mesmos, uma vez que o tempo de retorno do investimento é menor do que o prazo de vida útil do SFV (25 anos).

		CASO A		CASO B		CASO C	
		CENÁRIO I	CENÁRIO II	CENÁRIO I	CENÁRIO II	CENÁRIO I	CENÁRIO II
Consumo anual (kWh/ano)		106.634,41		126.964,69		144.869,96	
Investimento sistema FV + 5% de manutenção		R\$ 407.597,40 = X		R\$ 530.031,60 = 1,3004X		R\$ 632.318,40 = 1,5513X	
IRT - Índice de Reajuste Tarifário anual da energia		10,185%		10,185%		10,185%	
Custo unitário inicial de energia (R\$/kWh)		0,6164	0,5213	0,6164	0,5213	0,6164	0,5213
TMA -Taxa Mínima de Atratividade (ano)		0,23%	1,10%	0,23%	1,10%	0,23%	1,10%
Retorno do investimento (tempo)		5 anos e 5 meses	9 anos	5 anos e 10 meses	10 anos	6 anos	10 anos e 7 meses
VALOR PRESENTE LÍQUIDO VPL	1 ano	-0,8411 X	-0,8729 X	-0,8545 X	-0,8836 X	-0,8608 X	-0,8887 X
	2 anos	-0,6707 X	-0,7501 X	-0,6985 X	-0,7712 X	-0,7116 X	-0,7811 X
	3 anos	-0,4880 X	-0,6314 X	-0,5312 X	-0,6625 X	-0,5516 X	-0,6772 X
	4 anos	-0,2921 X	-0,5167 X	-0,3518 X	-0,5575 X	-0,3800 X	-0,5768 X
	5 anos	-0,0820 X	-0,4059 X	-0,1594 X	-0,4560 X	-0,1960 X	-0,4797 X
	6 anos	0,1433 X	-0,2988 X	0,0468 X	-0,3580 X	0,0013 X	-0,3860 X
	7 anos	0,3849 X	-0,1954 X	0,2680 X	-0,2633 X	0,2128 X	-0,2953 X
	8 anos	0,6440 X	-0,0954 X	0,5052 X	-0,1717 X	0,4397 X	-0,2078 X
	9 anos	0,9217 X	0,0012 X	0,7596 X	-0,0833 X	0,6829 X	-0,1232 X
	10 anos	1,2196 X	0,0946 X	1,0323 X	0,0022 X	0,9438 X	-0,0414 X
	15 anos	3,0650 X	0,5162 X	2,7220 X	0,3883 X	2,5599 X	0,3278 X
20 anos	5,6814 X	0,8714 X	5,1176 X	0,7135 X	4,8512 X	0,6389 X	
25 anos	9,3909 X	1,1707 X	8,5141 X	0,9875 X	8,0998 X	0,9010 X	

Quadro 1 - Retorno financeiro do investimento inicial do SFV baseado no método VPL.

Fonte: Autora.

O caso A se mostrou mais vantajoso em relação aos outros, devido ao seu menor tempo de retorno de investimento, sendo esse de cinco anos e cinco meses

para a condição mais favorável (cenário I), e de nove anos para a menos favorável (cenário II).

Nos casos B e C, o tempo de retorno do investimento para a condição mais favorável foi de cinco anos e 10 meses e de seis anos, respectivamente, enquanto que a condição menos favorável apresentou um tempo de retorno igual a 10 anos e a 10 anos e oito meses, respectivamente.

Observou-se uma variação de cinco anos e dois meses entre a melhor (caso A – cenário I) e a pior situação (caso C – cenário II), o que correspondeu a uma diferença de aproximadamente 95,38% no tempo de retorno do investimento inicial.

Ao se apreciar os cenários mais favoráveis, para o fim do período de retorno de 25 anos, foram obtidos os montantes de 9,3909X, 8,5141X e 8,0998X para os casos A, B e C, respectivamente. Isso representa uma economia, em custo de energia, de 939%, 851% e 810% para os casos A, B e C, respectivamente, em relação aos investimentos iniciais. Neste sentido, apesar de todos os casos apontarem para a viabilidade econômica, novamente o caso A indicou ser a opção mais favorável.

Quanto ao método TIR, os valores encontram-se fundamentados nos investimentos iniciais e amortizados pelos fluxos de caixa (economia de energia), sintetizados no Quadro 2. Nesse caso, quando a Taxa Interna de retorno se igualou à taxa mínima de atratividade, o investimento foi liquidado.

		CASO A		CASO B		CASO C	
		CENÁRIO I	CENÁRIO II	CENÁRIO I	CENÁRIO II	CENÁRIO I	CENÁRIO II
Consumo anual (kWh/ano)		106.634,41		126.964,69		144.869,96	
Investimento sistema FV + 5% de manutenção		R\$ 407.597,40 = X		R\$ 530.031,60 = 1,3004X		R\$ 632.318,40 = 1,5513X	
IRT - Índice de Reajuste Tarifário anual da energia		10,185%		10,185%		10,185%	
Custo unitário inicial de energia (R\$/kWh)		0,6164	0,5213	0,6164	0,5213	0,6164	0,5213
TAXA INTERNA DE RETORNO TIR (%)	1 ano	-20,835%	-22,288%	-21,606%	-23,032%	-21,989%	-23,402%
	2 anos	-7,185%	-8,132%	-7,688%	-8,618%	-7,938%	-8,860%
	3 anos	-2,957%	-3,669%	-3,335%	-4,033%	-3,523%	-4,215%
	4 anos	-1,060%	-1,640%	-1,368%	-1,935%	-1,521%	-2,082%
	5 anos	-0,036%	-0,533%	-0,301%	-0,785%	-0,431%	-0,910%
	6 anos	0,579%	0,140%	0,345%	-0,081%	0,230%	-0,191%
	7 anos	0,978%	0,581%	0,766%	0,381%	0,662%	0,282%
	8 anos	1,249%	0,885%	1,055%	0,702%	0,959%	0,611%
	9 anos	1,442%	1,102%	1,260%	0,933%	1,171%	0,849%
	10 anos	1,583%	1,263%	1,412%	1,104%	1,328%	1,026%
	15 anos	1,918%	1,658%	1,779%	1,531%	1,711%	1,468%
	20 anos	2,026%	1,794%	1,901%	1,681%	1,840%	1,627%
25 anos	2,068%	1,850%	1,950%	1,745%	1,893%	1,695%	

Quadro 2 - Retorno financeiro do investimento inicial baseado no método TIR.

Fonte: Autora.

Observando-se os cenários de situações mais favoráveis, os valores da TIR tornam-se positivos a partir do sexto ano para todos os casos, com valores mensais

de 0,579%, 0,345% e 0,230% para os casos A, B e C, respectivamente. Para os cenários menos favoráveis, a TIR tornou-se positiva, no caso A, a partir do sexto ano, com valores mensais de 0,140% e, para os casos B e C, no período do sétimo ano, com percentuais de 0,381% e 0,282%, respectivamente. Isso confirmando que todos os casos apresentaram uma recuperação rápida do investimento inicial, considerando a validade da eficiência dos módulos FV ser de 25 anos.

Além disso, na menor taxa de retorno para o final do período analisado (cenário II do caso C) o percentual da TIR acumulado correspondeu a 20,34%, valor consideravelmente maior do que a taxa mais alta de atratividade definida neste estudo (13,20%/ano), ou seja, superior ao percentual de rentabilidade (ao ano) para investimentos bancários de baixo risco.

Dessa forma, conforme já exposto, os casos A, B e C apresentaram viabilidade econômica com diferença de investimento para a implantação do sistema igual a 1,3004 e 1,5513 vezes maior nos casos B e C, quando comparados ao valor mínimo investido no caso A.

Por fim, compreendeu-se que, quanto mais eficiente o edifício, menor a sua demanda energética e, conseqüentemente, menor o valor a ser investido com SFV. Tal constatação confirma a importância de, combinado com a arquitetura, adotar-se medidas com baixo ou nenhum custo para se atingir o melhor desempenho energético possível, fatores que devem sempre ser considerados em fase inicial de projeto.

5 CONCLUSÃO

Por meio de simulação computacional e de aplicação da Instrução Normativa Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas (INI-C), este estudo avaliou a viabilidade econômica de um edifício de diferentes níveis de eficiência energética, alcançar o balanço energético nulo, utilizando um modelo real de edifício horizontal de escritórios, localizado no GCL-05, por intermédio da utilização de tecnologias FV. Contribuição essa que demonstrou importância para a obtenção de edificações mais sustentáveis, uma vez que os edifícios são responsáveis por elevado consumo de energia.

Quanto aos objetivos específicos, a pesquisa utilizou a simulação computacional para avaliar o desempenho termoenergético do edifício em estudo, estimando, assim, os consumos de energia por usos finais e possibilitando a aplicação da INI-C, a identificação da classe energética do objeto de estudo, bem como os intervalos dos outros níveis de eficiência.

Os resultados apontaram que, segundo a INI-C, o objeto de estudo obteve uma classificação “A” em eficiência energética no contexto climático analisado, sendo possível, a partir do referido objeto, realizar a identificação dos casos de referência iguais a B, C e D.

Quando comparados os casos de classificação energética “A” e “D”, observou-se que o caso mais eficiente apresentou uma economia de energia 1,5 vezes em relação ao D, que, por sua vez, apresentou um acentuado consumo para climatização artificial.

Verificou-se que, mesmo um edifício horizontal com nível “A” em eficiência energética, não conseguiu obter o balanço energético nulo somente com aplicação de SFV na área de cobertura disponível, sendo necessária a exploração de partes opacas das fachadas como produtoras de energia em todos os casos em estudo.

Esta pesquisa apontou que o edifício com nível “D” em eficiência energética não conseguiu compensar seu elevado consumo anual através da geração FV, uma vez que não houve área suficiente disponível para aplicação da tecnologia, para se obter o balanço energético nulo. Esse fato demonstra a importância de se aplicar soluções construtivas que minimizem o consumo energético da edificação.

Desse modo, decisões que possam impactar no desempenho do edifício devem ser tomadas, preferencialmente, ainda na etapa de projeto, uma vez que, quando não

considerada antecipadamente, a aplicação de tecnologias FV pode comprometer a estética desejada para o edifício, bem como soluções projetuais podem sombrear áreas potenciais para a aplicação de FV.

Os resultados demonstram que a tecnologia BIPV possui potencial a ser explorado em edifícios de escritórios horizontais, no contexto climático do GCL-05, como alternativa de obtenção do balanço energético nulo, ainda que a cidade de Pelotas-RS se encontre no extremo sul do país e apresente baixa incidência solar anual média quando comparada ao restante do território nacional. Porém, o uso dessa tecnologia deve ser criteriosamente avaliado em cada projeto, particularmente, levando-se em conta as áreas disponíveis da cobertura, as características das fachadas, a orientação solar e o sombreamento do entorno.

Em relação à avaliação da viabilidade econômica dos casos estudados por meio do método TIR, considerando-se o tempo de validade da eficiência dos módulos FV, de 25 anos, em um cenário menos favorecido – taxa de atratividade do investimento bancário alta e baixo custo da energia elétrica –, foi obtido um percentual correspondente a 20,34%, valor consideravelmente superior quando comparado ao percentual de rentabilidade da maior taxa SELIC acumulada por ano observada nos últimos tempos, igual a 13,20%.

Quanto ao método VPL, o tempo de retorno do investimento para o caso de maior eficiência energética foi de cinco anos e cinco meses, enquanto o caso de menor eficiência leva até 10 anos e sete meses.

Com isso, principalmente para aqueles que não estão dispostos a correr grandes riscos e que, muitas vezes, não esperam grande rentabilidade, evidenciou-se que investir em SFV apresenta-se como um ótimo negócio, pois o retorno financeiro do investimento é rápido e tem alta rentabilidade do capital investido, nos cenários avaliados no estudo.

Ainda, comprovou-se que, quanto mais alto o nível de eficiência energética, maior a possibilidade de se obter o balanço energético nulo e, conseqüentemente, mais rapidamente se obtém o retorno do investimento inicial da implantação dos SFV.

Além disso, mesmo edificações de menor eficiência energética (classes “B” e “C”) conseguiram obter um balanço energético nulo, produzindo toda sua energia com um SFV de maior capacidade para suprir a demanda, revertendo o consumo no futuro e até mesmo liquidando o investimento no SFV muito antes do término da vida útil

deste. Contudo, destaca-se a importância de se reduzir o consumo a fim de tornar muito pequena a necessidade de geração própria, pois, embora se alcance o balanço nulo, não se pode deixar de caminhar junto à sustentabilidade.

O trabalho se limitou ao estudo do alcance do balanço nulo de energia da edificação, através da geração de energia própria, somente na fase operacional, ou seja, restringiu-se apenas à etapa de ocupação e de uso da edificação. Entretanto, fica evidente a importância de se avaliar o ciclo de vida do edifício, considerando o consumo energético da edificação desde sua fase pré-operacional, que consiste na energia incorporada para a obtenção da matéria-prima extraída da natureza para a construção do edifício e em transportes dos materiais para a obra, até a fase pós-operacional, que envolve a contabilização da energia necessária para desconstrução e destino de resíduos. Da mesma forma, os módulos FV devem ser avaliados nessa mesma perspectiva, uma vez que apresentam impactos ambientais em todo o seu ciclo de vida.

Ainda, este trabalho indicou a importância da maior integração entre o projeto arquitetônico e os parâmetros de eficiência energética de edificações. Isso pode ocorrer por meio de ferramentas como a utilização da simulação computacional e o domínio da INI-C, que auxiliam na tomada de decisões desde as fases iniciais do processo projetual, promovendo, assim, a importância da concepção de construções mais sustentáveis e energeticamente eficientes.

5.1 Delimitações do trabalho

A presente pesquisa contou com algumas limitações, relacionadas abaixo:

- a) estudo realizado apenas no contexto climático do GCL-05;
- b) o objeto de estudo foi um edificação horizontal de escritórios;
- c) objeto de estudo não possui interferência de construções lindeiras, visto que não há edificações em seu entorno imediato;
- d) este estudo se concentrou no consumo de energia durante a fase operacional da edificação;
- e) o estudo não avaliou o ciclo de vida do SFV.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Sugere-se para trabalhos futuros:

- a) estender a pesquisa a outros contextos climáticos de edifícios e a construções verticalizadas;
- b) considerar o efeito do contexto urbano no consumo e produção de energia;
- c) realizar análises que englobem o ciclo de vida do edifício, ou seja, que considerem o consumo energético da edificação desde sua fase pré-operacional até a fase pós-operacional;
- d) explorar, além dos módulos FV, outras fontes de energia;
- e) comparar a viabilidade econômica de efficientizar o edifício através de seus elementos construtivos em comparação um SFV e encontrar o ponto de equilíbrio em termos de custos-benefícios.

6 REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012**. 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 providências. Brasília, DF, 2012. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>. Acesso em: 10 mar. 2020.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa nº 687, de 24 de novembro de 2015**. Altera a Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012, e os Módulos 1 e 3 dos Procedimentos de Distribuição – PRODIST. Brasília, DF, 2015. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>. Acesso em: 10 mar. 2020.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Manual do Programa de Eficiência Energética**. Brasília, DF, 2008. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br>. Acesso em: 03 mar. 2020.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **NBR 15220-3**: Desempenho térmico de edificações – Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro, RJ, 2005b.

AKINYELE, D. O.; RAYUDU, R. K.; NAIR, N. K. C. Global progress in photovoltaic technologies and the scenario of development of solar panel plant and module performance estimation - Application in Nigeria. **Renewable & Sustainable Energy Reviews**, v. 48, p. 112–139, 2015.

ANDREIS, C.; BESEN, P.; WESTPHAL, F. S. Desempenho energético de fachadas envidraçadas em climas brasileiros. In: XV Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído: Avanços no desempenho das construções - pesquisa, inovação e capacitação profissional, 2017, Maceió. **Anais [...] Maceió**, 2014, p. 926–935, 2014.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERANT AND AIR CONDITIONING ENGINEERS. **ASHRAE Handbook**: Fundamentals. Atlanta, USA: ASHRAE, 2009.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERANT AND AIR CONDITIONING ENGINEERS. **Standard 140-2014**: Standard Method of Test for the Evaluation of Building Energy Analysis Computer Programs. Atlanta, USA: ASHRAE, 2014.

ARAGÓN, C. S.; PAMPLONA, E.; MEDINA, J. R. V. Identificação de investimentos em eficiência energética e sua avaliação de risco. **Gestão e Produção**, v. 20, n. 3, p. 525–536, mar. 2013.

ARCHDAILY BRASIL. Safras & Cifras / Rmk! Arquitetura. **ARCHDAILY BRASIL**. 2019. Disponível em: <https://www.archdaily.com.br/br/804085/safras-and-cifra-rmk-arquitetura>. Acesso em: 10 set. 2019.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 1640-1:** Instalações de ar-condicionado - Sistemas centrais e unitários. Parte 1: Projetos das instalações. Rio de Janeiro, RJ, 2008.

BAVARESCO, M. *et al.* **Classificação de climas brasileiros empregada na atualização dos Regulamentos Técnicos da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações.** Florianópolis, SC: CB3E/UFSC, ago. 2017.

BENDER, L. V. **Análise de desempenho energético e viabilidade econômica de fachadas solares fotovoltaicas na zona bioclimática brasileira 2.** 2018. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2018.

BIEZMA, M. V.; SAN CRISTÓBAL, J. R. Investment criteria for the selection of cogeneration plants - A state of the art review. **Applied Thermal Engineering**, v. 26, n. 5-6, p. 583-588, 2006.

BRASIL. **Lei 9.478, de 6 de agosto de 1997.** Dispõe sobre a política energética nacional, as atividades relativas ao monopólio do petróleo, institui o Conselho Nacional de Política Energética e a Agência Nacional do Petróleo e dá outras providências. Brasília, DF: Presidência da República, 1997. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L9478.htm. Acesso em: 10 jan. 2020.

BRASIL. **Decreto presidencial de 18 de julho de 1991.** Institui o Programa Nacional da Racionalização do Uso dos Derivados do Petróleo e do Gás Natural (Conpet) e dá outras providências. Brasília, DF: Presidência da República, 1991. Disponível em: http://legislacao.anp.gov.br/?path=legislacao-federal/decretos/1991&item=dec_sem_n_18_7_1991_2. Acesso em: 11 jan. 2020.

BRASIL. **Decreto presidencial de 08 de dezembro de 1993.** Dispõe sobre a instituição do Prêmio Nacional de Conservação e Uso Racional da Energia. Brasília, DF: Presidência da República, 1993. http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/DNN/Anterior_a_2000/1993/Dnn1927.htm. Acesso em: 11 jan. 2020.

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: Diário Oficial da União - Seção 1, Brasília, n. 242, p. 5, 20 dez. 2001b.

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: **Diário Oficial da União** - Seção 1, Brasília, p. 12, 18 out. 2001a.

BRASIL. **Lei 9.991/2000, de 24 de julho de 2000**. Dispõe sobre realização de investimentos em pesquisa e desenvolvimento e em eficiência energética por parte das empresas concessionárias, permissionárias e autorizadas do setor de energia elétrica, e dá outras providências. Brasília, DF, 2000. Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/2000/lei-9991-24-julho-2000-359823-publicacaooriginal-1-pl.html>. Acesso em: 19 jan. 2020.

BRASIL. **Lei 13.280/2016, de 3 de maio de 2016**. Altera a Lei nº 9.991, de 24 de julho de 2000, para disciplinar a aplicação dos recursos destinados a programas de eficiência energética. Brasília, DF, 2016. Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/2016/lei-13280-3-maio-2016-782990-publicacaooriginal-150238-pl.html>. Acesso em: 19 jan. 2020.

BRASIL. **Portaria Interministerial MME/MCT/MDIC nº 1.007**, de 31 de dezembro de 2010. Aprova a Regulamentação Específica de Lâmpadas Incandescentes na forma constante dos Anexos I e II à presente Portaria. Brasília, DF: Ministério de Minas e Energia, 2010. Disponível em: http://www.mme.gov.br/documents/36193/72181/2010+-+Portaria+Interministerial+MME-MCT-MDIC+n_1007-2010+-+L%C3%A2mpadas+Incandescentes.pdf/7b9b3318-1e25-bc30-0b93-aaa818f4031e. Acesso em: 12 jan. 2020.

BRASIL. **Portaria Interministerial MME/MIC nº 1.877**, de 30 de dezembro de 1985. Institui o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (Procel) e dá outras providências. Brasília, DF: Ministério de Minas e Energia, 1985. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/pri19851877.pdf>. Acesso em: 12 mar. 2020.

BRUGNERA, R. R.; MATEUS, R.; ROSSIGNOLO, J. A.; CHVATAL, K. M. S. Escritórios de planta livre: o impacto de diferentes soluções de fachada na eficiência energética. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, RS, v. 19, n. 3, p. 295-315, jul./set. 2019.

CARLO, J. C. **Desenvolvimento de Metodologia de Avaliação da Eficiência Energética do Envolvimento de Edificações não-residenciais**. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

CB3E; ABIVIDRO. **Catálogo de propriedades térmicas e óticas de vidros comercializados no Brasil**. Centro tecnológico. Departamento de Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, mar. 2015. Disponível em: <http://www.pbeedifica.com.br/etiquetagem/residencial/planilhas-catalogos>. Acesso em: 19 mai. 2020.

CHIVELET, N.M.; SOLLA, I.F. **Técnicas de vedação fotovoltaica na arquitetura**. Porto Alegre: Bookman, 2010.

COSTA, J. F. W. **Edifícios de balanço energético nulo: um estudo para escritórios em Brasília**. Dissertação (Mestrado EM Arquitetura e Urbanismo) - Programa de

Pesquisa e Pós-graduação da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília, Brasília, 2018.

D'AGOSTINO, D.; MAZZARELLA, L. What is a Nearly zero energy building? Overview, implementation and comparison of definitions. **Journal of Building Engineering**, v. 21, p. 200–212, jan. 2019.

DÁVI, G.A. **Avaliação do comportamento energético de um edifício residencial à energia neto positiva com sistema solar fotovoltaico conectado à rede (SFVCR)**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

DEPARTMENT FOR COMMUNITIES AND LOCAL GOVERNMENT. **Code for Sustainable Homes**: Technical Guide. London, UK: DCLG, 2010.

DEPARTMENT FOR COMMUNITIES AND LOCAL GOVERNMENT. Zero Carbon Non-domestic Buildings: phase 3 final report. London, UK: DCLG, 2011.

DIDONÉ, E. L. **Parametric study for net zero energy building strategies in Brazil considering semi-transparent PV windows**. Doctoral Thesis (Doctorate in Architecture) - Department of Architecture, Karlsruhe Institute of Technology (KIT), Karlsruhe, 2014.

DIDONÉ, E. L.; WAGNER, A. Semi-transparent PV windows: A study for office buildings in Brazil. **Energy and Buildings**, v. 67, p. 136–142, dec. 2013.

DIDONÉ, E. L.; WAGNER, A.; PEREIRA, F. O. R. Estratégias para edifícios de escritórios energia zero no Brasil com ênfase em BIPV. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, RS, v. 14, n. 3, p. 27–42, jul./set.2014.

DUTRA, L. P.; SALAMONI, I. T.; CUNHA, E. G. da. A aplicação de metas NZEB a edificação residencial na zona bioclimática brasileira nº 2. In: XV Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído e XI Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído: Mudanças climáticas, concentração urbana e novas tecnologias, 2019, João Pessoa. **Anais [...]**. João Pessoa: ANTAC, 2019, p. 2065-2074, 2019. Disponível em: <https://www.even3.com.br/encac2019>. Acesso em: 27 nov. 2019.

ELETROBRAS. **Edital de Chamada Pública NZEB Brasil**: PROCEL Edifica. Rio de Janeiro, RJ: Eletrobras, 2019. Disponível em: <https://eletrobras.com/pt/SiteAssets/Paginas/Chamada-Publica-Procel-Edifica2019/Edital%20Chamada%20P%C3%BAblica%20Procel%20Edifica%20-%20NZEB%20Brasil.pdf>. Acesso em: 15 set. 2020.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético Nacional 2019**: ano base 2018. Brasília, DF: EPE, 2019. Disponível em: http://www.epe.gov.br/sitespt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-377/topico-494/BEN_2019_Completo_WEB.pdf. Acesso em: 11 mar. 2020.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Nota Técnica EPE 030/2018**. Uso de Ar Condicionado no Setor Residencial Brasileiro: Perspectivas e contribuições para o avanço em eficiência energética. Brasília: EPE, 2018. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-341/NT%20EPE%20030_2018_18Dez2018.pdf. Acesso em: 10 jan. 2020.

ESBENSEN, T.; KORSGAARD, V., 1977. Dimensioning in of the solar Heating System in the Zero-Energy House in Denmark. **Solar Energy**, UK, v. 19, p.195–199, apr. 1977.

FRIESS, W. A.; RAKHSHAN, K.; DAVIS, M. P. A global survey of adverse energetic effects of increased wall insulation in office buildings: degree day and climate zone indicators. **Energy Efficiency**, v. 10, n. 1, p. 97-116, 2017.

GONÇALVES, J. C. S.; BODE, K. **Edifício Ambiental**. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

GONÇALVES, I. P. **Relação custo-benefício de medidas de conservação de energia em retrofit de edifício de escritórios na zona bioclimática 02**. (Mestrado em Arquiteura e Urbanismo) - Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, RS, 2017.

GREENER. Estudo **Estratégico Geração Distribuída**: Mercado Fotovoltaico. 1º sem. 2020. Disponível em: https://d335luupugsy2.cloudfront.net/cms/files/12882/1601560415Estudo_Estratgico_de_Gerao_Distribuda_-_1_Semestre_2020_2_4.pdf. Acesso em: 22 jan. 2021.

GRAHAM, J. R.; HARVEY, C. R. The theory and practice of corporate finance: Evidence from the field. **Journal of Financial Economics**, v. 60, n. 2-3, p. 187-243, 2001.

HARUS, N. C. **Analyzing energy efficiency investments in the process industry: Case Sachtleben Pigments Oy**. Doctoral Thesis (Doctorate in Accounting and Finance) - Department of Accounting and Finance Helsingin, School of Economics, Finlândia, 2009.

HUANG, Y.; NIU, J. L. Optimal building envelope design based on simulated performance: History, current status and new potentials. **Energy and Buildings**, v. 117, p. 387–398, apr. 2016.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Task 41 - Solar energy & Architecture**. SHC - Solar Heating & Cooling Programme, Sweden, sep. 2012. Disponível em: <http://task41.iea-shc.org/data/sites/1/publications/T41DA2-Solar-Energy-Systems-in-Architecture-28March20131.pdf>. Acesso em: 15 fev. 2020.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Solution Sets and Net Zero Energy Buildings**: A review of 30 Net ZEBs case studies worldwide. Researchgate.net,

may., 2014. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/279456421_Solution_Sets_and_Net_Zero_Energy_Buildings_A_review_of_30_Net_ZEBs_case_studies_worldwide. Acesso em: 15 fev. 2020.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Task 40 - Net Zero Energy Solar Buildings**. SHC - Solar Heating & Cooling Programme, Sweden, 2015. Disponível em: <https://www.iea-shc.org/publications-tasks>. Acesso em: 15 fev. 2020.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Inventory on Existing Business Models, Opportunities and Issues for BIPV**: IEA PVPS Task 15, Subtask B - Transition towards sound BIPV business models. IEA-PVPS T15-03, apr. 2018. Disponível em: https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/02/Inventory_on_Existing_Business_Models_Opportunities_and_Issues_for_BIPV_by_Task_15.pdf. Acesso em: 15 fev. 2020.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **United Kingdom Zero Energy Buildings**. International Energy Agency - IEA, Paris, FR. Disponível em: <https://www.iea.org/>. Acesso em: 11 jan. 2020.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Data and statistics**: Consistent, accurate and timely energy data and statistics. International Energy Agency, Paris, FR. Disponível em: <https://www.iea.org/data-and-statistics?country=WORLD&fuel=Energy%20supply&indicator=Coal%20production%20by%20type>. Acesso em: 1 jun. 2021.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL - INMETRO. **Selo CONPET**. Rio de Janeiro, RJ: Eletrobrás, 2005.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL - INMETRO. **Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas - Anexo da Portaria nº 372, de 17 de setembro de 2010, com alterações das portarias nº 17 de 2012 e nº 299 de 2013**. PBE Edifica, Rio de Janeiro, 2013. Rio de Janeiro, RJ: INMETRO, 2013. Disponível em: <http://www.pbeedifica.com.br>. Acesso em: 15 mar. 2019.

JÄGER-WALDAU, A. **PV Status Report 2019**. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2019. European Commission, 2019. Disponível em: https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC118058/kjna29938enn_1.pdf. Acesso em: 15 mar. 2020.

JINKO SOLAR. **Catálogo - Módulo Fotovoltaico**: JKM410M-6RL3. Jinko Solar, China, 2021. Disponível em: [https://www.jinkosolar.com/uploads/JKM390-410M-6RL3-\(V\)-F1-EN.pdf](https://www.jinkosolar.com/uploads/JKM390-410M-6RL3-(V)-F1-EN.pdf). Acesso em: 10 fev. 2021.

KAPSIS, K.; DERMARDIROS, V.; ATHIENITIS, A. K. Daylight performance of perimeter office façades utilizing semi-transparent photovoltaic windows: A simulation study. **Energy Procedia**, v. 78, p. 334–339, nov. 2015.

KIM, J. J.; JUNG, S. K.; CHOI, Y. S.; KIM, J. T. Optimization of photovoltaic integrated shading devices. **Indoor and Built Environment**, v. 19, n. 1, p. 114-122, 2010.

KOTTEK, M.; GRIESER, J.; BECK, C.; RUDOLF, B.; RUBEL, F. World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. **Meteorologische Zeitschrift**, Berlin, v. 15, n. 3, p. 259-263, jun. 2006. Disponível em: http://koeppen-geiger.vu-wien.ac.at/pdf/Paper_2006.pdf. Acesso em: 15 fev. de 2020.

KUMAR, M.; KUMAR, A. Performance assessment and degradation analysis of solar photovoltaic technologies: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 78, p. 554-587, oct. 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.083>. Acesso em: 12 jan. 2021.

LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES - LabEEE. **Arquivos climáticos**. LabEEE, Florianópolis, SC, 2018. Disponível em: <http://www.labeee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos/inmet2018>. Acesso em: 2 dez. 2019.

LABSOL UFRGS. **Radiasol**. Solar UFRGS, Porto Alegre, 2019. Disponível em: <http://www.solar.ufrgs.br>. Acesso em: 15 out. 2019.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. **Eficiência Energética na Arquitetura**. 3. ed., Rio de Janeiro, RJ: Eletrobras/PROCEL/PROCEL Edifica, 2014.

LAUSTSEN, J.; INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Energy Efficiency Requirements in Building Codes, Energy Efficiency Policies for New Buildings**. Paris, FR: OECD/IEA, 2008.

LUND, H.; MARSZAL, A., HEISELBERGB, P., Zero energy buildings and mismatch compensation factors. **Energy and Buildings**, v. 43, n. 7, p. 1646-1654, jul. 2011. Disponível em: <https://sfx.aub.aau.dk/sfxaub?sid=pureportal&doi=10.1016/j.enbuild.2011.03.006>. Acesso em: 17 abr. 2020.

MARCHIONI, A.; MAGNI, C. A.; Investment decisions and sensitivity analysis: NPV-consistency of rates of return. **European Journal of Operational Research**, v. 268, n. 1, p. 361–372, jul. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.01.007>. Acesso em: 11 nov. 2020.

MARCONDES, M. P. **Soluções Projetuais de Fachadas para Edifícios de Escritórios com Ventilação Natural em São Paulo**. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) - Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2010.

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.

MEGLIORINI, E.; VALLIM, M. A. **Administração Financeira: Uma abordagem brasileira**. São Paulo: Pearson, 2009.

MENDES, N. *et al.* Uso de instrumentos computacionais para análise do desempenho térmico e energético de edificações no Brasil. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, RS, v. 5, n. 4, p. 47–68, out./dez. 2005.

MERCALDO, L. V. *et al.* Thin film silicon photovoltaics: Architectural perspectives and technological issues. **Applied Energy**, v. 86, n. 10, p. 1836-1844, oct. 2009.

MEUSEL, M. D. Z. VON. **Investigação da simulação computacional de desempenho energético integrada às etapas iniciais do processo de projeto**. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2016.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA - MMA. **Matriz Energética Nacional 2030**. Brasília, DF: EPE, 2007.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA - MMA. **Plano Nacional de Eficiência Energética: Premissas e Diretrizes Básicas**. Brasília, DF: MME, 2011.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA - MMA. **Protocolo de Quioto**. Ministério de Minas e Energia, Brasília, DF. Disponível em: <https://www.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/protocolo-de-quioto.html>. Acesso em: 10 dez. 2019.

MOTTA, R. da R., CALÔBA, G.M. **Análise de Investimentos: tomada de decisão em projetos industriais**. São Paulo: Atlas, 2002.

NATURAL RESOURCES CANADA. **Factsheet: Building-Integrated Photovoltaics (BIPV)**. Natural Resources Canada, Boulevard, 2019. Disponível em: https://www.nrcan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/energy/pdf/solar-photovoltaic/NRCan_BIPV_Factsheet_EN.pdf. Acesso em: 15 abr. 2020.

NEVES, L. DE O.; MARQUES, T. H. T. Building Envelope Energy Performance of High-Rise Office buildings in São Paulo city, Brazil. **Procedia Environmental Sciences**, v. 38, p. 821-829, dec. 2017.

OCHOA, C. E.; CAPELUTO, I. G. Decision methodology for the development of an expert system applied in an adaptable energy retrofit façade system for residential buildings. **Renewable Energy**, v. 78, p. 498-508, 2015.

OGBOMO, O.; AMALU, E. H.; EKERE, N. N; OLAGBEGI, P.O. A review of photovoltaic module technologies for increased performance in tropical climate. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 75, p. 1225-1238, aug. 2017.

OLIVIERI, L. *et al.* Integral energy performance characterization of semi-transparent photovoltaic elements for building integration under real operation conditions. **Energy**

and Buildings, v. 68, part A, p. 280–291, jan. 2014.

PANAGIOTIDOU, M.; FULLER, R. J. Progress in ZEBs: A review of definitions, policies and construction activity. **Energy Policy**, vol. 62, p. 196-206, nov. 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2013.06.099i>. Acesso em: 17 abr. 2020.

PARLAMENTO EUROPEU; CONSELHO DA UNIÃO EUROPEIA. Directiva 2010/31/UE do Parlamento Europeu e do Conselho de 19 de maio de 2010 relativa ao desempenho energético dos edifícios (reformulação). **Jornal Oficial da União Europeia**. Strasbourg, FR, 2010. Disponível em: <http://eurlex.europa.eu/legal-content/pt/TXT/?uri=CELEX:32010L0031>. Acesso em: 12 dez. 2019.

PARLAMENTO EUROPEU; CONSELHO DA UNIÃO EUROPEIA. Diretiva (UE) 2018/844 do Parlamento Europeu e do Conselho, de 30 de maio de 2018, que altera a Diretiva 2010/31 / UE sobre o desempenho energético dos edifícios e a Diretiva 2012/27 / UE sobre eficiência energética (Texto relevante para efeitos do EEE) PE/4/2018/REV/1 JO L 156 de 19.6.2018, p. 75-91 (BG, ES, CS, DA, DE, ET, EL, EN, FR, GA, HR, IT, LV, LT, HU, MT, NL, PL, PT, RO, SK, SL, FI, SV). **Jornal Oficial da União Europeia**. Strasbourg, FR, 2018. Disponível em: <http://data.europa.eu/eli/dir/2018/844/oj>. Acesso em: 01 mar. 2021.

PBE EDIFICA. Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica – PROCEL. **PBE Edifica**, Rio de Janeiro, RJ, 2003. Disponível em: <http://www.pbeedifica.com.br/node/24>. Acesso em: 15 mar. 2020.

PENG, C.; YANG, J. The Effect of Photovoltaic Panels on the Rooftop Temperature in the EnergyPlus Simulation Environment. **International Journal of Photoenergy**, v. 2, p. 1-12, jan. 2016.

PENG, J. *et al.* Developing a method and simulation model for evaluating the overall energy performance of a ventilated semi-transparent photovoltaic double-skin facade. **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**, v. 24, n. 6, p. 781-799, dec. 2015.

PEREIRA, C. D.; GHISI, E. Calibração de um modelo computacional de uma residência unifamiliar localizada em Florianópolis. *In*: XII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído - ENTAC, 2008, Juiz de Fora. **Anais [...]** Fortaleza: ANTAC, 2008.

PEREIRA, E. B. *et al.* **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 2. ed. São José dos Campos: INPE, 2017. Disponível em: http://sonda.ccst.inpe.br/publicacoes/atlas_solar.html. Acesso em: 3 nov. 2019.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. (Orgs.). **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Edição revisada e atualizada. Rio de Janeiro: CEPREL-CRESESB, mar. 2014. Disponível em: http://www.ecovolts.net.br/downloads/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf. Acesso em: 10 mar. 2020.

POMPERMAYER, Máximo Luiz. Lei 13.280/2016. O que muda no programa de Eficiência Energética? *In*: 13º COBEE – Congresso Brasileiro de Eficiência Energética e Expoeficiência - Paineis 4: Eficiência Energética no Brasil, 2016, Consolação, SP. **Anais [...]** Consolação, SP: 13º COBEE, p. 1-21, set. 2016. Disponível em: <https://pt.slideshare.net/slides-mci/lei-132802016-o-que-muda-no-programa-de-eficincia-energtica>. Acesso em: 22 jan. 2020.

PROCEL; ELETROBRAS. **Resultados Procel 2019**: ano base 2018. Procel Info, Rio de Janeiro, RJ, 2019. Disponível em: www.procelinfo.com.br/resultadosprocel2019/Procel_rel_2019_web.pdf. Acesso em: 12 dez. 2019.

PROCEL INFO. **O Programa**. Procel Info, Rio de Janeiro, RJ. Disponível em: <http://www.procelinfo.com.br/main.asp?TeamID=%7B921E566A-536B-4582-AEAF-7D6CD1DF1AFD%7D>. Acesso em: 12 jan. 2020.

RORIZ, M. **Segunda proposta de revisão do zoneamento bioclimático do Brasil**. p. 1-12. São Carlos, SP: ANTAC, ago. 2012.

RÜTHER, R. **Edifícios solares fotovoltaicos**: O potencial da geração solar fotovoltaica integrada a edificações urbanas e interligada à rede elétrica pública no Brasil. Florianópolis: LABSOLAR, 2004.

SABER, E. *et al.* PV (photovoltaics) performance evaluation and simulation-based energy yield prediction for tropical buildings. **Energy**, v. 71, p. 588-595, jul. 2014.

SALAMOLI, I. T. **Um programa residencial de telhados solares para o Brasil**: diretrizes de políticas públicas para a inserção da geração fotovoltaica conectada à rede elétrica. Tese (Doutorado em Energia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

SANTOS, J. B. DOS. **O uso do PMV para avaliação do conforto térmico em edifício de escritório tipo plano aberto e sua viabilidade de aplicação em clima quente e úmido**. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) -Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2018.

SAVAL, Nikil. **Cubiculados**: A história secreta do local de trabalho. Angela Lobo de Andrade (Tradutora). Rio de Janeiro: Anfiteatro, 2015.

SOLARGIS. **Download solar resource maps and GIS data for 180+ countries**. 2020. Solargis, Slovakia. Disponível em: <https://solargis.com/maps-and-gis-data/download>. Acesso em: 10 jan. 2021.

SORGATO, M. J.; SCHNEIDER, K.; RÜTHER, R. Viabilidade técnica e econômica da aplicação de módulos fotovoltaicos (fv) de telureto de cádmio (cdte) em fachadas opacas de um edifício comercial de escritórios. *In*: VII Congresso Brasileiro de Energia Solar - CBENS. 2018, Gramado. **Anais [...]** Gramado, RS: CBENS, 2018.

Disponível em:

https://fotovoltaica.ufsc.br/artigos_em_anais/CBENS_Kathlen_Marcio_Ricardo.pdf.
Acesso em: 16 jun. 2020.

SORGATO, M. J.; SCHNEIDER, K.; RÜTHER, R. Technical and economic evaluation of thin-film CdTe Building-Integrated Photovoltaics (BIPV) replacing façade and rooftop materials in office buildings in a warm and sunny climate. **Renewable Energy**, v. 118, p. 84–98, apr. 2018.

TORCELLINI, P. *et al.* Zero Energy Buildings: A Critical Look at the Definition. ACEEE Summer Study. Pacific Grove, CA, 2006. **Anais [...]** Pacific Grove, USA, 2006. Disponível em: <http://www.nrel.gov/docs/fy06osti/39833.pdf>. Acesso em: 18 jan. 2020.

TORCELLINI, P. *et al.* **EnergyPlus Version 8.7 Documentation: Input Output Reference - The Encyclopedic Reference to EnergyPlus Input and Output.** San Francisco, CA: NREL, 2019b. Disponível em: https://energyplus.net/sites/all/modules/custom/nrel_custom/pdfs/pdfs_v8.7.0/InputOutputReference.pdf. Acesso em: 20 abr. 2019.

VASCONCELOS, Y. **A Breve História do Escritório.** Funcional, Curitiba, PR, 2019. Disponível em: <http://funcional.com.br/breve-historia-do-escritorio/>. Acesso em: 20 jan. 2020.

VETTORAZZI, E. **Contribuições das estratégias do conceito Passive House para edificações energeticamente mais eficientes na Região Sul-Brasileira.** Tese (Doutorado em Arquitetura) - Programa de Pesquisa e Pós-graduação em Arquitetura, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2019.

VOSS, K.; MUSALL, E. (Orgs.). **Net Zero Energy Buildings: International projects of carbon neutral buildings.** 2. ed. Munich: Detail Green Books, 2012.

VOSS, K.; SARTORI, I.; LOLLINI, R. Nearly-zero, Net zero and Plus Energy Buildings How definitions & regulations affect the solutions. **REHVA Journal**, v. 49, n. 6, p. 23-27, dec. 2012. Disponível em: <https://www.rehva.eu/rehva-journal/chapter/nearly-zero-net-zero-and-plus-energy-buildings-how-definitions-regulations-affect-the-solutions?limit=all&cHash=23d1375443574fc63ffcb6880b1dddb9>. Acesso em: 16 abr. 2020.

WANG, S., YAN, C., XIAO, F. Quantitative energy performance assessment methods for existing buildings. **Energy and Buildings**, v. 55, p. 873-888, dec. 2012.

WELLER, B. *et al.* **Photovoltaics: Technology, Architecture, Installation.** Edition Detail. Regensburg, Baviera: Aumüller Druck, 2010. Disponível em: https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=sWvUAAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA7&ots=atcbj6OKHu&sig=XFAAZvRhUSmzFMS1hSyqGY-Oku4&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false. Acesso em: 20 mai. 2020.

WESTPHAL, F. S.; ANDREIS, C. Influence of Glazed Façades on Energy Consumption for Air Conditioning of Office Buildings in Brazilian Climates. **Journal of Engineering Research and Application**, v. 6, n. 11, p. 54-60, nov. 2016.

YANG, R. J.; ZOU, P. X. W. Building Integrated Photovoltaics (BIPV): Costs, benefits, risks, barriers and improvement strategy. **International Journal of Construction Management**, v. 16, n. 1, p. 39-53, dec. 2016.

ZACÀ, I.; *et al.* Data of cost-optimality and technical solutions for high energy performance buildings in warm climate. **Data in Brief**, v. 4, p. 222-225, sep. 2015. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352340915000839>. Acesso em 17 abr. 2020.

ZOMER, C.D. **Megawatt Solar**: Geração solar fotovoltaica integrada a uma edificação inserida em um meio urbano e conectada à rede elétrica. Estudo de caso: edifício sede da Eletrosul, Florianópolis - Santa Catarina. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

Apêndices

APÊNDICE A

a.1. Parâmetros adotados para os cálculos de viabilidade econômica

A taxa de atratividade escolhida foi a SELIC, através da pesquisa dos valores dos últimos 10 anos (2011 a 2020). Foi escolhida a maior taxa no ano de 2016 (13,2%) e a menor no ano de 2020 (2,72%), conforme Quadro 3.

TAXA SELIC										
Mês	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Janeiro	0,86	0,89	0,60	0,85	0,94	1,06	1,09	0,58	0,54	0,38
Fevereiro	0,84	0,75	0,49	0,79	0,82	1,00	0,87	0,47	0,49	0,29
Março	0,92	0,82	0,55	0,77	1,04	1,16	1,05	0,53	0,47	0,34
Abril	0,84	0,71	0,61	0,82	0,95	1,06	0,79	0,52	0,52	0,28
Mai	0,99	0,74	0,60	0,87	0,99	1,11	0,93	0,52	0,54	0,24
Junho	0,96	0,64	0,61	0,82	1,07	1,16	0,81	0,52	0,47	0,21
Julho	0,97	0,68	0,72	0,95	1,18	1,11	0,80	0,54	0,57	0,19
Agosto	1,07	0,69	0,71	0,87	1,11	1,22	0,80	0,57	0,50	0,16
Setembro	0,94	0,54	0,71	0,91	1,11	1,11	0,64	0,47	0,46	0,16
Outubro	0,88	0,61	0,81	0,95	1,11	1,05	0,64	0,54	0,48	0,16
Novembro	0,86	0,55	0,72	0,84	1,06	1,04	0,57	0,49	0,38	0,15
Dezembro	0,91	0,55	0,79	0,96	1,16	1,12	0,54	0,49	0,37	0,16
Acumulada no ano	11,040	8,170	7,920	10,400	12,540	13,200	9,530	6,240	5,790	2,720

Quadro 3 - Média da SELIC.

Fonte: Autora baseada nos dados do Ministério da Economia, 2021.

Para o valor de PIS e COFINS foi utilizada a média dos últimos 4 anos, conforme dados disponíveis no site da companhia elétrica, sendo o valor de 0,7762% e 3,5728%, respectivamente, conforme Quadro 4.

Impostos					
Competência	PIS (%)	Cofins (%)	Competência	PIS (%)	Cofins (%)
mar/21	0,955	4,3985	out/19	0,854	3,935
fev/21	0,488	3,415	set/19	0,566	2,620
jan/21	1,144	5,278	ago/19	0,530	2,505
dez/20	0,697	3,197	jul/19	0,632	3,091
nov/20	0,883	4,038	jun/19	0,597	3,119
out/20	0,968	4,314	mai/19	0,739	3,456
set/20	0,529	2,649	abr/19	0,998	4,438
ago/20	0,599	2,745	mar/19	1,190	5,300
jul/20	0,463	2,134	fev/19	1,150	5,103
jun/20	0,405	2,220	jan/19	0,915	4,212
mai/20	0,876	4,035	dez/18	0,467	2,152
abr/20	1,286	5,924	nov/18	0,745	3,452
mar/20	0,831	3,828	out/18	0,736	3,412
fev/20	1,053	4,851	set/18	0,949	4,399
jan/20	1,020	4,690	ago/18	0,527	2,376
dez/19	0,542	2,497	jul/18	0,797	3,569
nov/19	0,409	1,913	jun/18	0,852	3,038
			Média	0,776	3,573

Quadro 4 - Média dos valores de PIS e COFINS.

Fonte: Autora, com base nos dados da CEEE, 2021.

O índice de reajuste anual da tarifa de energia elétrica foi determinado a partir dos dados disponíveis pela concessionária, levando em consideração o IRT – Índice de Reajuste Tarifário dos últimos 4 anos, sendo o valor médio de 10,185%, conforme Quadro 5.

IRT- Índice de Reajuste Tarifário Energia					
Data	nov/17	nov/18	nov/19	nov/20	MÉDIA
Percentual (%)	30,62	7,35	-5,06	7,83	10,185

Quadro 5 - Média dos valores de IRT – Índice de Reajuste Tarifário de Energia.

Fonte: Autora baseada nos dados da CEEE, 2021.

APÊNDICE B

b.1. Classificação energética do Caso Base: aplicação da INI-C

Após o cálculo do consumo total de energia primária do caso real e de referência, foram então realizados os cinco passos para a identificação da classe da edificação, conforme o que segue.

No primeiro passo foi calculado o percentual de redução do consumo de energia primária ($PRCEP_{REAL-D}$) da edificação em sua condição real (CEP), para a condição de referência (CEP_{REF}), utilizando a Equação (5) onde obteve-se o valor de 36,40%.

$$PRCEP_{REAL-D} = 1 - \left(\frac{CEP}{CEP_{REF}} \right) * 100$$

$$PRCEP_{REAL-D} = 1 - (170.615,06 / 260.440,38) * 100$$

$$PRCEP_{REAL-D} = 34,49\%$$

No segundo passo foi realizado o cálculo do fator de forma (FF) da edificação por meio da Equação (6), resultando em 0,29.

$$FF = \frac{A_{env}}{V_{tot}}$$

$$FF = (2.217,66 / 7.695,27)$$

$$FF = 0,29$$

Para o terceiro passo, foi verificado na Tabela 25, o valor do coeficiente de redução do consumo de energia primária da classe D para a classe A ($CRCEP_{D-A}$). O valor encontrado para o GCL 5 foi de 0,33.

Em seguida se aplicou o quarto passo, onde foi encontrado o intervalo dentro do qual a edificação proposta será classificada Equação (7).

$$i = \frac{CEP_{REF} \cdot CRCEP_{D-A}}{3}$$

$$i = (260.440,38 \times 0,33) / 3$$

$$i = 28.648,44$$

No quinto passo foi realizado o preenchimento da Tabela 26, que após o cálculo, foram obtidos os valores de referência conforme Tabela 33.

Tabela 33 - Intervalos relativos a cada uma das classes de eficiência energética do objeto de estudo.

Classe de eficiência	A	B	C	D	E
Limite superior	-	> 174.495,06	> 203.143,50	> 231.791,94	> 260.440,38
Limite inferior	< 174.495,06	≤ 203.143,50	≤ 231.791,94	≤ 260.440,38	-

Fonte: Autora com base (INMETRO, 2021).

Para o quinto e último passo, foi realizada a comparação do consumo de energia primária da edificação (CEP_{REAL-D}), calculado na Tabela 33.

Portanto, com o valor calculado de CEP_{REAL} igual a 106.634,41 kWh/ano, o mesmo é menor que 174.495,06 kWh/ano, verifica-se que o caso base possui classe de eficiência energética A, segundo a INI-C.

APÊNDICE C

c.1. Casos de balanço energético nulo - Estudo de sombras para SFV.

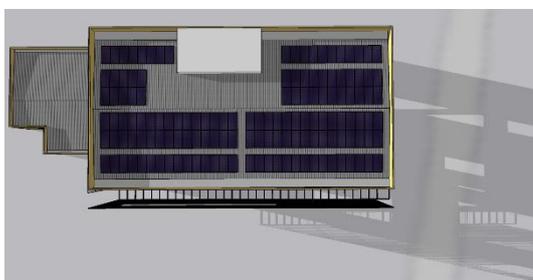


Data: 21 de junho / Horário: 8h

Figura 35 - Estudo de sombras dos módulos FV no Solstício de inverno.

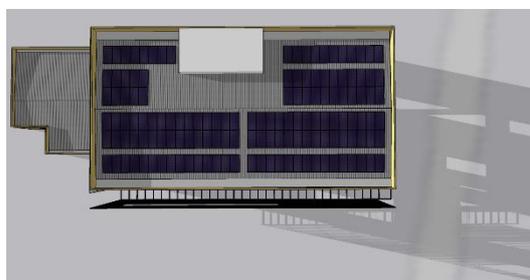


Data: 21 de junho / Horário: 16h

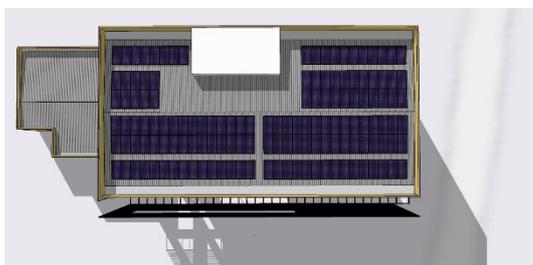


Data: 22 de setembro / Horário: 8h

Figura 36 - Estudo de sombras dos módulos FV no Equinócio de primavera.

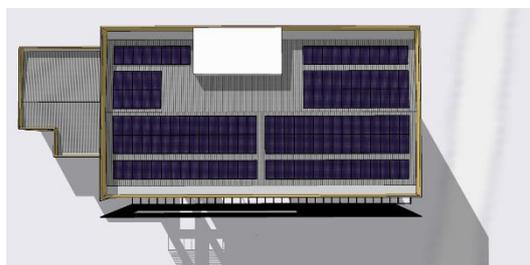


Data: 22 de setembro / Horário: 16h

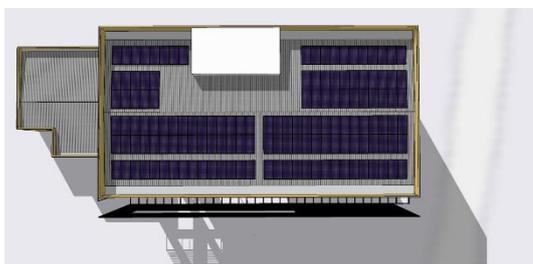


Data: 21 de dezembro / Horário: 8h

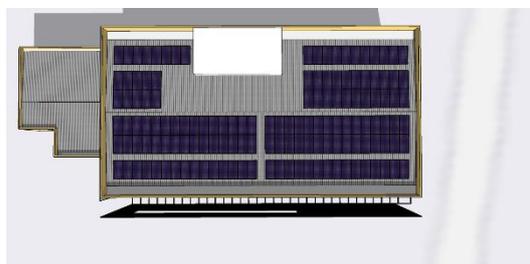
Figura 37 - Estudo de sombras dos módulos FV no Solstício de verão.



Data: 22 de dezembro / Horário: 16h



Data: 20 de março / Horário: 8h



Data: 20 de março / Horário: 16h

Figura 38 - Estudo de sombras dos módulos FV no Equinócio de outono.

Fonte: Autora com base no programa SketchUp.

APÊNDICE D

d.1. Dimensionamentos SFV: situação real e ideal

Na Figura 39 são apresentados os dados do nível de radiação solar, nas duas águas do telhado, que foram obtidos pelo programa Radiasol, através da inserção de dados obtidos pelo banco de dados de Atlas Brasileiro de Energia Solar, possibilitando confirmar a diferença do nível de radiação entre as posições reais e ideais.

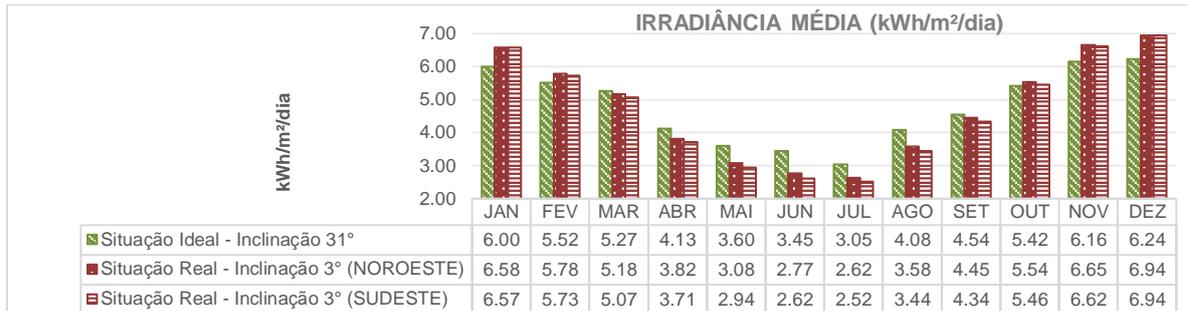


Figura 39 - Irradiação média do plano ideal e real.

Fonte: Autora com base nos dados do programa Radiasol.

Observa-se que tanto nas situações ideais quanto nas reais, a irradiância média não é uniforme, com picos nos meses de verão, enquanto nos meses de inverno, a quantidade de radiação diminui significativamente, devido a menor altura solar.

Para a situação real, nos mês de janeiro se tem uma irradiância de 9,68% maior do que a ideal, enquanto no mês de julho (menor radiação solar) se observa um decréscimo de valor significativo, de 86,09% em relação a ideal.

d.2. Dimensionamentos SFV 01 – CASO A

Tabela 39 - Dimensionamento SFV 01 – CASO A (107,83kWp).

		SISTEMA NOROESTE				SISTEMA SUDESTE				SISTEMA NORDESTE					
Meses	Nº dias do mês	Rendimento do sistema (Rn%)	Potência do Módulo FV (Wp)	3° incl.		3° incl.		3° incl.		90° incl.					
				Irradiação solar diária média - 41°N (kWh/m²/dia)	Nº de Módulos	Potência Instalada (kWp)	Geração Energia FV (kWh/mês)	Irradiação solar diária média 139°N (kWh/m²/dia)	Nº de Módulos	Potência Instalada (kWp)	Geração Energia FV (kWh/mês)	Irradiação solar diária média 49°N (kWh/m²/dia)	Nº de Módulos	Potência Instalada (kWp)	Geração FV (kWh/mês)
JAN	31	0,8	410	6581	90	36,90	6022	6572	51	20,91	3408	2879	122	50,02	3333
FEV	29			5784			4952	5733			2781	2740			2642
MAR	31			5176			4737	5073			2631	2683			2353
ABR	30			3822			3385	3710			1862	2224			1789
MAI	31			3078			2817	2944			1527	2011			1448
JUN	30			2770			2453	2617			1313	2008			1210
JUL	31			2624			2401	2518			1306	1737			1345
AGO	31			3582			3278	3440			1784	2213			1599
SET	30			4453			3944	4344			2180	2438			2020

OUT	31	5539	5069	5464	2833	2710	2594
NOV	30	6651	5890	6622	3323	2939	3092
DEZ	31	6942	6353	6942	3600	2917	3467
		Total anual (kWh/ano)	51.300	Total anual (kWh/ano)	28.548	Total anual (kWh/ano)	26.893
		Média mensal (kWh/mês)	4.275	Média mensal (kWh/mês)	2.379	Média mensal (kWh/mês)	2.241

Fonte: Autora com base nos dados do programa Radiasol.

DIMENSIONAMENTO SFV 01 - CASO A

		COBERTURA		FACHADA												
		SISTEMA 01	SISTEMA 02	SISTEMA	SISTEMA 05	TOTAL										
		NOROESTE	SUDESTE	SUDESTE	NOROESTE											
		36,90	20,91	50,02												
Potência instalada (kWp)		57,81		50,02		107,83										
Rendimento		0,8														
Meses		JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	média	TOTAL	
Produção Anual (kWh)		TOTAL	12.763,65	10.375,09	9.720,58	7.035,30	5.791,06	4.976,51	5.051,73	6.660,83	8.143,98	10.496,18	12.305,75	13.419,85	106.740,51	106.740,51
Consumo de energia (kWh/ano)		106.634,41														
Módulos FV (Wp)		410														
Quantidade de Módulos																
H média		3.750,69														

SISTEMA NOROESTE		3° incl.	-41°N Az														
Potência instalada (kWp)		36,90	Rendimento														
Rendimento		0,8															
Meses		HORA	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	MEDIA	TOTAL	
SISTEMA 01	Irradiação (Wh/m²*dia)	04:30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
		05:30	39	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	25	50	10	115
		06:30	171	119	66	10	0	0	0	0	38	97	160	188	71	849	
		07:30	334	272	210	124	73	50	54	102	165	246	329	358	193	2317	
		08:30	507	442	379	263	195	166	162	238	317	417	511	535	344	4132	
		09:30	651	590	538	404	325	292	277	380	467	570	664	681	487	5839	
		10:30	748	692	652	515	434	399	375	493	578	676	768	780	593	7110	
		11:30	801	744	711	574	495	460	431	556	636	731	824	835	650	7798	
		12:30	805	748	715	577	498	464	434	560	640	735	829	839	654	7844	
		13:30	759	702	663	523	442	408	382	504	588	687	780	791	602	7229	
		14:30	667	605	555	416	336	303	285	393	480	586	682	698	501	6006	
		15:30	526	458	395	273	203	174	167	248	330	433	532	556	358	4295	
		16:30	349	284	221	130	77	54	57	108	173	258	347	376	203	2434	
17:30	180	126	71	13	0	0	0	0	41	103	170	199	75	903			
18:30	44	1	0	0	0	0	0	0	0	0	30	56	11	131			
19:30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
20:30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
TOTAL		6581	5784	5176	3822	3078	2770	2624	3582	4453	5539	6651	6942	4750	57002		
Produção Anual (Wh)		6022	4952	4737	3385	2817	2453	2401	3278	3944	5069	5890	6353	4275	51300		
Módulos FV (Wp)		410															
Quantidade de Módulos		90															

SISTEMA SUDESTE		3° incl.	139°N Az													
Potência instalada (kWp)		20,91	Rendimento													
Rendimento		0,8														
Meses		HORA	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	MEDIA	TOTAL
SISTEMA 02	Irradiação (Wh/m²*dia)	04:30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		05:30	46	1	0	0	0	0	0	0	0	0	32	59	12	138
		06:30	183	127	71	12	0	0	0	40	103	173	203	76	912	
		07:30	352	284	219	128	74	51	55	105	170	257	349	379	202	2423
		08:30	526	455	389	266	196	166	162	240	323	429	531	557	353	4240
		09:30	665	599	543	404	322	287	274	377	469	577	678	697	491	5892
		10:30	754	693	648	507	422	385	366	483	572	676	773	787	589	7066
		11:30	799	738	698	559	475	437	414	536	622	722	820	834	638	7654
		12:30	796	735	694	555	471	433	412	532	619	719	816	830	634	7612
		13:30	744	684	637	498	414	376	359	473	563	665	761	776	579	6950
		14:30	649	585	527	392	312	277	267	365	455	562	659	679	477	5729
		15:30	508	439	373	257	188	158	157	230	311	412	510	536	340	4079
		16:30	336	272	208	122	70	47	52	99	163	245	331	361	192	2306
17:30	173	120	66	10	0	0	0	37	97	162	191	71	856			
18:30	41	1	0	0	0	0	0	0	0	27	53	10	122			
19:30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
20:30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
TOTAL		6572	5733	5073	3710	2944	2617	2518	3440	4344	5464	6622	6942	4665	55979	
Produção Anual (Wh)		3408	2781	2631	1862	1527	1313	1306	1784	2180	2833	3323	3600	2379	28548	
Módulos FV (Wp)		410														
Quantidade de Módulos		51														

SISTEMA SUDESTE		90° incl.	139°N Az													
Potência instalada (kWp)		50,02	Rendimento													
Rendimento		0,8														
Meses		HORA	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	MEDIA	TOTAL
SISTEMA 03	Irradiação (Wh/m²*dia)	04:30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		05:30	85	1	0	0	0	0	0	0	0	0	82	109	23	277
		06:30	184	125	80	23	0	0	0	48	108	188	215	81	971	
		07:30	266	206	160	88	52	36	37	74	120	188	272	296	150	1795
		08:30	307	253	205	134	91	71	78	114	166	233	309	333	191	2294
		09:30	305	257	202	147	119	103	112	129	171	233	297	323	200	2398
		10:30	265	223	187	171	142	126	138	151	180	198	243	274	192	2298
		11:30	221	220	196	184	156	139	153	163	190	206	205	212	187	2245
		12:30	222	221	198	187	162	146	159	167	193	207	205	212	190	2279
		13:30	215	214	193	183	159	144	154	166	188	201	200	206	185	2223
		14:30	201	199	182	167	142	127	132	152	175	188	188	194	171	2047
		15:30	177	171	154	129	102	87	89	116	143	162	167	173	139	1670
		16:30	136	124	103	70	42	29	32	57	87	115	130	136	88	1061
17:30	81	62	37	7	0	0	0	22	52	75	85	35	421			
18:30	22	1	0	0	0	0	0	0	0	15	27	5	65			
19:30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
20:30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
TOTAL		2687	2277	1897	1490	1167	1008	1084	1289	1683	2091	2576	2795	1837	22044	
Produção Anual (kWh)		3333	2642	2353	1789	1448	1210	1345	1599	2020	2594	3092	3467	2241	26893	
Módulos FV (Wp/m²)		410														
Quantidade de Módulos		122														

Quadro 6 – Dimensionamento SFV 01 – CASO A.

Fonte: Autora.

d.2. Dimensionamentos SFV 02 – CASO B

Tabela 40 - Dimensionamento SFV 02 – CASO B (140,22kWp).

SISTEMA NOROESTE										SISTEMA SUDESTE				
Meses	Nº dias do mês	Rendimento do sistema (80%)	Potência do Módulo FV (Wp)	SISTEMA NOROESTE			SISTEMA SUDESTE			3º incl.	3º incl.			
				Irradiação solar diária média -41°N (kWh/m²/dia)	Nº de Módulos	Potência Instalada (kWp)	Geração Energia FV (kWh/mês)	Irradiação solar diária média 139°N (kWh/m²/dia)	Nº de Módulos			Potência Instalada (kWp)	Geração Energia FV (kWh/mês)	
JAN	31	0,8	410	6581	90	36,90	6022	6572	51	20,91	3408			
FEV	29			5784			4952	5733			2781			
MAR	31			5176			4737	5073			2631			
ABR	30			3822			3385	3710			1862			
MAI	31			3078			2817	2944			1527			
JUN	30			2770			2453	2617			1313			
JUL	31			2624			2401	2518			1306			
AGO	31			3582			3278	3440			1784			
SET	30			4453			3944	4344			2180			
OUT	31			5539			5069	5464			2833			
NOV	30			6651			5890	6622			3323			
DEZ	31			6942			6353	6942			3600			
Total anual (kWh/ano)							51.300	Total anual (kWh/ano)			28.548			
Média mensal (kWh/mês)							4.275	Média mensal (kWh/mês)			2.379			
SISTEMA SUDESTE										SISTEMA NOROESTE				
Meses	Nº dias do mês	Rendimento do sistema (80%)	Potência do Módulo FV (Wp)	SISTEMA SUDESTE			SISTEMA NOROESTE			3º incl.	3º incl.			
				Irradiação solar diária média -41°N (kWh/m²/dia)	Nº de Módulos	Potência Instalada (kWp)	Geração Energia FV (kWh/mês)	Irradiação solar diária média 139°N (kWh/m²/dia)	Nº de Módulos			Potência Instalada (kWp)	Geração Energia FV (kWh/mês)	
JAN	31	0,8	410	2687	163	66,83	4453	2791	38	15,58	1078			
FEV	29			2277			3530	2699			976			
MAR	31			1897			3144	2704			1045			
ABR	30			1490			2390	2279			852			
MAI	31			1167			1934	2120			819			
JUN	30			1008			1617	2140			800			
JUL	31			1084			1797	1826			706			
AGO	31			1289			2136	2307			891			
SET	30			1683			2699	2474			925			
OUT	31			2091			3466	2686			1038			
NOV	30			2576			4132	2849			1065			
DEZ	31			2795			4632	2805			1084			
Total anual (kWh/ano)							35.931	Total anual (kWh/ano)			11.279			
Média mensal (kWh/mês)							2.994	Média mensal (kWh/mês)			940			

Fonte: Autora com base nos dados do programa Radiasol.

DIMENSIONAMENTO SFV 02 - CASO B

SISTEMA TOTAL	COBERTURA		FACHADAS			TOTAL									
	SISTEMA 01 NOROESTE	SISTEMA 02 SUDESTE	SISTEMA SUDESTE	SISTEMA NORDESTE	SISTEMA NOROESTE										
Potência Instalada requerida (kWp)	36,90	20,91	66,83	0,00	15,58	140,22									
Rendimento	0,8														
Produção Anual (kWh)	TOTAL	14.962,22	12.238,67	11.556,20	8.488,59	7.096,70	6.183,37	6.209,17	8.089,59	9.748,05	12.405,72	14.410,31	15.668,86	10.588,12	127.057,45
Consumo de energia (kWh/ano)	126.964,69														
Módulos FV (Wp)	410														
Quantidade de Módulos															
H média	3751														

SISTEMA 01		3° inclinação		-41°N Az												
Potência Instalada (kWp)		36,90														
Rendimento		0,8														
Meses	HORA	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	MEDIA	TOTAL	
	04:30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	05:30	39	1	0	0	0	0	0	0	0	0	25	50	10	115	
	06:30	171	119	66	10	0	0	0	0	38	97	160	188	71	849	
	07:30	334	272	210	124	73	50	54	102	165	246	329	358	193	2317	
	08:30	507	442	379	263	195	166	162	238	317	417	511	535	344	4132	
	09:30	651	590	538	404	325	292	277	300	467	570	664	661	487	5839	
	10:30	740	692	652	515	434	399	375	483	578	676	768	780	593	7110	
	11:30	801	744	711	574	495	460	431	556	636	731	824	835	650	7798	
	12:30	805	748	715	577	496	464	434	560	640	735	829	839	654	7844	
	13:30	759	702	663	523	442	408	382	504	588	687	780	791	602	7229	
	14:30	667	605	555	416	336	303	285	393	480	586	682	698	501	6006	
	15:30	526	456	395	273	203	174	167	248	330	433	532	556	358	4295	
	16:30	349	284	221	130	77	54	57	108	173	258	347	376	203	2434	
	17:30	180	126	71	13	0	0	0	0	41	103	170	199	75	903	
	18:30	44	1	0	0	0	0	0	0	0	0	30	56	11	131	
	19:30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	20:30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	TOTAL	6581	5784	5176	3822	3078	2770	2624	3582	4453	5539	6651	6942	4750	57002	
Produção Anual (kWh)	6022		4952	4737	3385	2817	2453	2401	3278	3944	5069	5890	6353	4275	51300	
Módulos FV (Wp)	410															
Quantidade de Módulos	90															

SISTEMA 02		3° inclinação		139°N Az												
Potência Instalada (kWp)		20,91														
Rendimento		0,8														
Meses	HORA	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	MEDIA	TOTAL	
	04:30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	05:30	46	1	0	0	0	0	0	0	0	0	32	59	12	138	
	06:30	183	127	71	12	0	0	0	0	40	103	173	203	76	912	
	07:30	352	284	219	128	74	51	55	105	170	257	349	379	202	2423	
	08:30	526	455	389	266	196	166	162	240	323	429	531	557	353	4240	
	09:30	665	599	543	404	322	287	274	377	469	577	678	697	491	5892	
	10:30	754	693	648	507	422	385	366	483	572	676	773	787	589	7066	
	11:30	799	738	698	559	475	437	414	536	622	722	820	834	638	7654	
	12:30	796	735	694	555	471	433	412	532	619	719	816	830	634	7612	
	13:30	744	684	637	498	414	376	359	473	563	665	761	776	579	6950	
	14:30	649	585	527	392	312	277	267	365	455	562	659	679	477	5729	
	15:30	508	439	373	257	188	158	157	230	311	412	510	536	340	4079	
	16:30	336	272	208	122	70	47	52	99	163	245	331	361	192	2306	
	17:30	173	120	66	10	0	0	0	0	37	97	162	191	71	856	
	18:30	41	1	0	0	0	0	0	0	0	0	27	53	10	122	
	19:30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	20:30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	TOTAL	6572	5733	5073	3710	2944	2617	2518	3440	4344	5464	6622	6942	4665	55979	
Produção Anual (kWh)	3408		2781	2631	1862	1527	1313	1306	1784	2180	2833	3323	3600	2379	28548	
Módulos FV (Wp)	410															
Quantidade de Módulos	51															

SISTEMA 03		90° incl.		139°N Az												
Potência Instalada (kWp)		66,83														
Rendimento		0,8														
Meses	HORA	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	MEDIA	TOTAL	
	04:30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	05:30	85	1	0	0	0	0	0	0	0	0	82	109	23	277	
	06:30	184	125	80	23	0	0	0	0	48	108	188	215	81	971	
	07:30	266	206	160	88	52	36	37	74	120	188	272	296	150	1795	
	08:30	307	253	205	134	91	71	78	114	166	233	309	333	191	2294	
	09:30	305	257	202	147	119	103	112	129	171	233	297	323	200	2398	
	10:30	265	223	187	171	142	126	138	151	180	198	243	274	192	2298	
	11:30	221	220	196	184	156	139	153	163	190	206	205	212	187	2245	
	12:30	222	221	198	187	162	146	159	167	193	207	205	212	190	2279	
	13:30	215	214	193	183	159	144	154	166	188	201	200	206	185	2223	
	14:30	201	199	182	167	142	127	132	152	175	188	188	194	171	2047	
	15:30	177	171	154	129	102	87	89	116	143	162	167	173	139	1670	
	16:30	136	124	103	70	42	29	32	57	87	115	130	136	88	1061	
	17:30	81	62	37	7	0	0	0	0	22	52	75	85	35	421	
	18:30	22	1	0	0	0	0	0	0	0	0	15	27	5	65	
	19:30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	20:30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	TOTAL	2687	2277	1897	1490	1167	1008	1084	1289	1683	2091	2576	2795	1637	22044	
Produção Anual (kWh)	4453		3530	3144	2390	1934	1617	1797	2136	2699	3466	4132	4632	2994	35931	
Módulos FV (Wp/m²)	410															
Quantidade de Módulos	163															

SISTEMA NOROESTE		90° inclinação	-41°N Az												
Potência Instalada (kWp)		15,88													
Rendimento		0,8													
Meses	HORA	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	MEDIA	TOTAL
	04:30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	05:30	24	1	0	0	0	0	0	0	0	0	16	31	6	72
	06:30	90	65	36	6	0	0	0	0	21	53	82	96	37	449
	07:30	143	124	96	62	37	25	29	50	79	111	134	145	86	1095
	08:30	177	166	140	112	84	70	75	96	126	153	166	174	128	1539
	09:30	199	194	169	151	142	140	134	145	159	180	186	193	166	1992
	10:30	214	212	217	223	221	225	202	227	222	203	199	206	214	2571
	11:30	242	275	303	295	297	309	266	309	298	284	246	224	279	3348
	12:30	309	336	371	345	350	366	307	369	355	349	326	300	340	4083
	13:30	347	364	400	357	358	374	308	384	375	379	372	345	364	4363
	14:30	344	351	379	322	312	321	260	344	347	364	372	349	339	4065
	15:30	301	296	308	240	217	216	172	251	271	303	326	310	268	3211
	16:30	225	207	200	132	102	94	73	132	164	207	242	236	168	2014
	17:30	132	107	85	34	0	0	0	0	57	100	139	143	66	797
	18:30	44	1	0	0	0	0	0	0	0	0	43	53	12	141
	19:30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20:30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
TOTAL	2791	2699	2704	2279	2120	2140	1826	2307	2474	2696	2849	2805	2473	29680	
Produção Anual (kWh)	410														
Módulos FV (Wp/m²)	38														
Quantidade de Módulos	38														

Quadro 7 - Dimensionamento SFV 02 – Caso B.
Fonte: Autora.

d.3. Dimensionamentos SFV 03 – CASO C

Tabela 41 - Dimensionamento SFV 03 – CASO C (1767,28kWp).

		SISTEMA NOROESTE				SISTEMA SUDESTE				SISTEMA NORDESTE					
Meses	Nº dias do mês	Rendimento do sistema (80%)	Potência do Módulo FV (Wp)	3° incl.			3° incl.			90° incl.					
				Irradiação solar diária média -41°N (kWh/m²/dia)	Nº de Módulos	Potência Instalada (kWp)	Geração Energia FV (kWh/mês)	Irradiação solar diária média 139°N (kWh/m²/dia)	Nº de Módulos	Potência Instalada (kWp)	Geração Energia FV (kWh/mês)	Irradiação solar diária média 49°N (kWh/m²/dia)	Nº de Módulos	Potência Instalada (kWp)	Geração FV (kWh/mês)
JAN	31	0,8	410	6581	90	36,90	6022	6572	51	20,91	3408	2879	39	15,99	1142
FEV	29			5784		4952	5733	2781	2740		1016				
MAR	31			5176		4737	5073	2631	2683		1064				
ABR	30			3822		3385	3710	1862	2224		853				
MAI	31			3078		2817	2944	1527	2011		797				
JUN	30			2770		2453	2617	1313	2008		771				
JUL	31			2624		2401	2518	1306	1737		689				
AGO	31			3582		3278	3440	1784	2213		878				
SET	30			4453		3944	4344	2180	2438		936				
OUT	31			5539		5069	5464	2833	2710		1075				
NOV	30			6651		5890	6622	3323	2939		1128				
DEZ	31			6942		6353	6942	3600	2917		1157				
Total anual (kWh/ano)				51.300			28.548			11.505					
Média mensal (kWh/mês)				4.275			2.379			959					
		SISTEMA SUDESTE				SISTEMA NOROESTE				SISTEMA					
Meses	Nº dias do mês	Rendimento do sistema (80%)	Potência do Módulo FV (Wp)	3° incl.			3° incl.			90° incl.					
				Irradiação solar diária média -41°N (kWh/m²/dia)	Nº de Módulos	Potência Instalada (kWp)	Geração Energia FV (kWh/mês)	Irradiação solar diária média 139°N (kWh/m²/dia)	Nº de Módulos	Potência Instalada (kWp)	Geração Energia FV (kWh/mês)	Irradiação solar diária média 49°N (kWh/m²/dia)	Nº de Módulos	Potência Instalada (kWp)	Geração FV (kWh/mês)
JAN	31	0,8	410	2687	163	66,83	4453	2791	41	16,81	1164	2787	24	9,84	680
FEV	29			2277		3530	2699	1053	2375		542				
MAR	31			1897		3144	2704	1127	1981		483				
ABR	30			1490		2390	2279	919	1537		363				
MAI	31			1167		1934	2120	884	1185		289				
JUN	30			1008		1617	2140	863	1028		243				

JUL 31	1084	1797	1826	761	1092	266
AGO 31	1289	2136	2307	962	1329	324
SET 30	1683	2699	2474	998	1749	413
OUT 31	2091	3466	2686	1120	2194	535
NOV 30	2576	4132	2849	1149	2701	638
DEZ 31	2795	4632	2805	1169	2907	709
	Total anual (kWh/ano)	35.931	Total anual (kWh/ano)	12.170	Total anual (kWh/ano)	5.487
	Média mensal (kWh/mês)	2.994	Média mensal (kWh/mês)	1.014	Média mensal (kWh/mês)	457

Fonte: Autora com base nos dados do programa Radiasol.

DIMENSIONAMENTO SFV 03 - CASO C																			
SISTEMA TOTAL	COBERTURA			FACHADAS			TOTAL												
	SISTEMA 01 NOROESTE	SISTEMA 02 SUDESTE	SISTEMA SUDESTE	SISTEMA NORDESTE	SISTEMA NOROESTE	SISTEMA SUDOESTE													
	36,90	20,91	66,83	15,99	16,81	9,84													
Potência instalada requerida (kWp)	57,81			109,47			167,28												
Rendimento	0,8																		
Meses	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	MEDIA	TOTAL					
Produção Anual (kWh)	16.869,15	13.874,33	13.186,06	9.772,33	8.248,02	7.259,90	7.220,16	9.361,85	11.169,73	14.097,72	16.260,15	17.620,56	12.078,33	144.939,96					
Consumo de energia (kWh/ano)	144.869,96																		
Módulos FV (Wp)	410																		
Quantidade de Módulos	3237																		
H média	3237																		
SISTEMA NOROESTE 3° inclinação -41°N Az																			
Potência instalada (kWp)	36,90																		
Rendimento	0,8																		
Meses	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	MEDIA	TOTAL					
Irradiação (Wh/m²·dia)	04:30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0					
	05:30	39	1	0	0	0	0	0	0	0	25	30	10	115					
	06:30	171	119	66	10	0	0	0	38	97	160	188	71	849					
	07:30	334	272	210	124	73	50	54	102	165	246	329	336	193	2317				
	08:30	507	442	379	263	195	166	162	238	317	417	511	535	344	4132				
	09:30	651	590	538	404	325	292	277	380	467	570	664	681	487	5839				
	10:30	748	692	652	515	434	399	375	493	578	676	768	780	593	7110				
	11:30	801	744	711	574	495	460	431	556	636	731	824	835	650	7798				
	12:30	805	748	715	577	498	464	434	560	640	733	829	839	654	7844				
	13:30	759	702	663	523	442	408	382	504	588	687	780	791	602	7329				
	14:30	667	605	555	416	336	303	285	393	480	586	682	698	501	6006				
	15:30	526	458	395	273	203	174	167	248	330	433	532	536	358	4295				
	16:30	349	284	221	130	77	54	57	108	173	258	347	376	203	2434				
	17:30	180	126	71	13	0	0	0	0	41	103	170	199	75	903				
	18:30	44	1	0	0	0	0	0	0	0	0	30	36	11	131				
	19:30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
	20:30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
TOTAL	6581	5784	5176	3822	3078	2770	2624	3592	4453	5539	6651	6942	4750	37002					
Produção Anual (kWh)	6022	4952	4737	3385	2817	2453	2401	3278	3944	5069	5890	6353	4275	51300					
Módulos FV (Wp)	410																		
Quantidade de Módulos	90																		
SISTEMA SUDESTE 3° inclinação 139°N Az																			
Potência instalada (kWp)	20,91																		
Rendimento	0,8																		
Meses	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	MEDIA	TOTAL					
Irradiação (Wh/m²·dia)	04:30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0					
	05:30	46	1	0	0	0	0	0	0	0	32	39	12	138					
	06:30	183	127	71	12	0	0	0	40	103	173	203	76	912					
	07:30	352	284	219	128	74	51	55	105	170	257	349	379	202	2423				
	08:30	526	455	389	266	196	166	162	240	323	429	531	557	353	4240				
	09:30	665	599	543	404	322	287	274	377	469	577	678	697	491	5892				
	10:30	754	693	648	507	422	385	366	483	572	676	773	787	589	7066				
	11:30	799	738	698	559	475	437	414	536	622	722	820	834	638	7654				
	12:30	796	735	694	555	471	433	412	532	619	719	816	830	634	7612				
	13:30	744	684	637	498	414	376	359	473	563	663	761	776	579	6950				
	14:30	649	585	527	392	312	277	267	365	455	562	659	679	477	5729				
	15:30	508	439	373	257	188	158	157	230	311	412	510	536	340	4079				
	16:30	336	272	208	122	70	47	52	99	163	245	331	361	192	2306				
	17:30	173	120	66	10	0	0	0	0	37	97	162	191	71	856				
	18:30	41	1	0	0	0	0	0	0	0	0	27	33	10	122				
	19:30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
	20:30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
TOTAL	6572	5733	5073	3710	2944	2617	2518	3440	4344	5464	6622	6942	4665	55979					
Produção Anual (kWh)	3408	2781	2631	1862	1527	1313	1306	1784	2180	2833	3323	3600	2379	28548					
Módulos FV (Wp)	410																		
Quantidade de Módulos	51																		

SISTEMA SUDESTE		90° incl.	139°N Az												
Potência Instalada (kWp)		66,83													
Rendimento		0,8													
Meses	HORA	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	MEDIA	TOTAL
	04:30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	05:30	85	1	0	0	0	0	0	0	0	0	82	109	23	277
	06:30	184	125	80	23	0	0	0	0	48	108	188	215	81	971
	07:30	266	206	160	88	52	36	37	74	120	188	272	296	150	1795
	08:30	307	253	205	134	81	71	78	114	166	233	309	333	191	2294
	09:30	305	257	202	147	119	103	112	129	171	233	297	323	200	2398
	10:30	265	223	187	171	142	126	138	151	180	198	243	274	192	2298
	11:30	221	220	196	184	156	139	153	163	190	206	205	212	187	2245
	12:30	222	221	198	187	162	146	159	167	193	207	205	212	190	2279
	13:30	215	214	193	183	159	144	154	166	188	201	200	206	185	2223
	14:30	201	199	182	167	142	127	132	152	175	188	188	194	171	2047
	15:30	177	171	154	129	102	87	89	116	143	162	167	173	139	1670
	16:30	136	124	103	70	42	29	32	57	87	115	130	136	88	1061
	17:30	81	62	37	7	0	0	0	0	22	52	75	85	35	421
	18:30	22	1	0	0	0	0	0	0	0	15	27	5	65	
	19:30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	20:30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	TOTAL	2687	2277	1897	1490	1167	1008	1084	1389	1683	2091	2376	2795	1837	22044
Produção Anual (kWh)		4453	3530	3144	2390	1934	1617	1797	2136	2699	3466	4132	4632	2994	35951
Módulos FV (Wp/m²)		410													
Quantidade de Módulos		163													

SISTEMA NORDESTE		90° incl.	49°N Az												
Potência Instalada (kWp)		15,99													
Rendimento		0,8													
Meses	HORA	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	MEDIA	TOTAL
	04:30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	05:30	53	1	0	0	0	0	0	0	0	0	53	65	14	172
	06:30	148	117	92	37	0	0	0	0	62	109	157	163	74	885
	07:30	246	223	212	137	105	97	75	137	172	222	266	262	180	2154
	08:30	323	312	321	245	219	217	174	236	280	319	350	336	279	3352
	09:30	361	362	386	323	310	317	258	344	351	374	390	370	346	4146
	10:30	355	367	398	351	347	360	298	374	370	380	380	356	361	4336
	11:30	307	329	357	330	329	341	290	348	341	339	321	299	328	3931
	12:30	230	259	280	272	270	277	244	281	276	264	230	212	238	3095
	13:30	214	212	188	198	192	192	179	196	195	198	199	206	197	2369
	14:30	200	195	170	148	118	112	115	129	160	181	186	194	159	1908
	15:30	179	168	143	113	84	70	75	97	128	156	168	177	130	1558
	16:30	146	127	99	64	37	25	29	51	81	114	138	148	88	1059
	17:30	92	67	37	6	0	0	0	0	22	54	84	98	38	460
	18:30	25	1	0	0	0	0	0	0	0	17	31	6	74	
	19:30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	20:30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	TOTAL	2879	2740	2683	2224	2011	2008	1737	2213	2438	2710	2939	2917	2458	29489
Produção Anual (kWh)		1142	1016	1064	853	797	771	689	878	936	1075	1128	1157	959	11505
Módulos FV (Wp/m²)		410													
Quantidade de Módulos		39													

SISTEMA NOROESTE		90° inclinação	-41°N Az												
Potência Instalada (kWp)		16,81													
Rendimento		0,8													
Meses	HORA	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	MEDIA	TOTAL
	04:30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	05:30	24	1	0	0	0	0	0	0	0	0	16	31	6	72
	06:30	90	65	36	6	0	0	0	0	21	53	82	96	37	449
	07:30	143	124	96	62	37	25	29	50	79	111	134	145	86	1035
	08:30	177	166	140	112	84	70	75	96	126	153	166	174	128	1539
	09:30	199	194	169	151	142	140	134	145	159	180	186	193	166	1992
	10:30	214	212	217	223	221	225	202	227	222	203	199	206	214	2571
	11:30	242	275	303	295	297	309	266	309	298	284	246	224	279	3348
	12:30	309	336	371	345	330	366	307	369	355	349	326	300	340	4083
	13:30	347	364	400	357	338	374	308	384	375	379	372	345	364	4363
	14:30	344	351	379	322	312	321	260	344	347	364	372	349	339	4065
	15:30	301	296	308	240	217	216	172	251	271	303	326	310	268	3211
	16:30	225	207	200	132	102	94	73	132	164	207	242	236	168	2014
	17:30	132	107	85	34	0	0	0	0	57	100	139	143	66	797
	18:30	44	1	0	0	0	0	0	0	0	0	43	53	12	141
	19:30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	20:30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	TOTAL	2791	2699	2704	2279	2120	2140	1826	2307	2474	2686	2849	2805	2473	29680
Produção Anual (kWh)		1164	1053	1127	919	884	863	761	962	998	1120	1149	1169	1014	12170
Módulos FV (Wp/m²)		410													
Quantidade de Módulos		41													

SUDOESTE		90° inclinação	-131°N Az												
Potência Instalada (kWp)		9,84													
Rendimento		0,8													
Meses	HORA	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	MEDIA	TOTAL
	04:30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	05:30	22	1	0	0	0	0	0	0	0	0	15	27	5	65
	06:30	83	64	38	7	0	0	0	0	22	53	77	87	36	431
	07:30	140	127	106	71	43	30	32	58	89	118	133	140	91	1087
	08:30	179	174	157	130	102	88	89	117	143	165	170	175	141	1691
	09:30	201	200	183	167	141	127	132	152	175	189	189	195	171	2051
	10:30	215	214	193	182	157	142	152	164	188	201	200	206	185	2214
	11:30	222	221	197	186	159	143	156	166	192	207	205	212	189	2266
	12:30	221	220	196	182	154	136	151	161	189	206	205	213	186	2234
	13:30	284	245	187	170	141	124	136	149	179	218	268	294	200	2395
	14:30	327	280	231	166	119	103	111	141	196	259	325	347	217	2605
	15:30	328	274	229	151	108	89	90	135	187	257	335	336	212	2539
	16:30	282	221	176	98	61	46	43	86	133	205	292	315	163	1958
	17:30	194	133	88	27	0	0	0	0	54	116	200	226	87	1038
	18:30	89	1	0	0	0	0	0	0	0	87	114	24	291	
	19:30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	20:30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	TOTAL	2787	2375	1981	1537	1185	1028	1092	1329	1749	2194	2701	2907	1905	22863
Produção Anual (kWh)		680	542	483	363	289	243	266	324	413	535	638	709	457	5487
Módulos FV (Wp/m²)		410													
Quantidade de Módulos		24													

Quadro 8 - Dimensionamento SFV 03 – Caso C.
Fonte: Autora.

d.4. Dimensionamentos SFV 04 – CASO D

Tabela 42 - Dimensionamento SFV 04 – CASO D

				SISTEMA NOROESTE				SISTEMA SUDESTE				SISTEMA NORDESTE			
Meses	Nº dias do mês	Rendimento do sistema (80%)	Potência do Módulo FV (Wp)	Irradiação solar diária média -41°N (kWh/m²/dia)	Nº de Módulos	Potência Instalada (kWp)	3º incl. Geração Energia FV (kWh/mês)	Irradiação solar diária média 139°N (kWh/m²/dia)	Nº de Módulos	Potência Instalada (kWp)	3º incl. Geração Energia FV (kWh/mês)	Irradiação solar diária média 49°N (kWh/m²/dia)	Nº de Módulos	Potência Instalada (kWp)	90º incl. Geração FV (kWh/mês)
JAN	31	0,8	410	6581	90	36,90	6022	6572	51	20,91	3408	2879	39	15,99	1142
FEV	29			5784			4952	5733			2781	2740			1016
MAR	31			5176			4737	5073			2631	2683			1064
ABR	30			3822			3385	3710			1862	2224			853
MAI	31			3078			2817	2944			1527	2011			797
JUN	30			2770			2453	2617			1313	2008			771
JUL	31			2624			2401	2518			1306	1737			689
AGO	31			3582			3278	3440			1784	2213			878
SET	30			4453			3944	4344			2180	2438			936
OUT	31			5539			5069	5464			2833	2710			1075
NOV	30			6651			5890	6622			3323	2939			1128
DEZ	31			6942			6353	6942			3600	2917			1157
				Total anual (kWh/ano) 51.300				Total anual (kWh/ano) 28.548				Total anual (kWh/ano) 11.505			
				Média mensal (kWh/mês) 4.275				Média mensal (kWh/mês) 2.379				Média mensal (kWh/mês) 959			
				SISTEMA SUDESTE				SISTEMA NOROESTE				SISTEMA NORDESTE			
Meses	Nº dias do mês	Rendimento do sistema (80%)	Potência do Módulo FV (Wp)	Irradiação solar diária média -41°N (kWh/m²/dia)	Nº de Módulos	Potência Instalada (kWp)	3º incl. Geração Energia FV (kWh/mês)	Irradiação solar diária média 139°N (kWh/m²/dia)	Nº de Módulos	Potência Instalada (kWp)	3º incl. Geração Energia FV (kWh/mês)	Irradiação solar diária média 49°N (kWh/m²/dia)	Nº de Módulos	Potência Instalada (kWp)	90º incl. Geração FV (kWh/mês)
JAN	31	0,8	410	2687	163	66,83	4453	2791	41	16,81	1164	2787	39	15,99	963
FEV	29			2277			3530	2699			1053	2375			768
MAR	31			1897			3144	2704			1127	1981			685
ABR	30			1490			2390	2279			919	1537			514
MAI	31			1167			1934	2120			884	1185			410
JUN	30			1008			1617	2140			863	1028			344
JUL	31			1084			1797	1826			761	1092			378
AGO	31			1289			2136	2307			962	1329			459
SET	30			1683			2699	2474			998	1749			585
OUT	31			2091			3466	2686			1120	2194			758
NOV	30			2576			4132	2849			1149	2701			904
DEZ	31			2795			4632	2805			1169	2907			1005
				Total anual (kWh/ano) 35.931				Total anual (kWh/ano) 12.170				Total anual (kWh/ano) 7.774			
				Média mensal (kWh/mês) 2.994				Média mensal (kWh/mês) 1.014				Média mensal (kWh/mês) 648			

Fonte: Autora com base nos dados do programa Radiasol.

DIMENSIONAMENTO SFV 04 - CASO D

SISTEMA TOTAL	COBERTURA		FACHADAS					TOTAL
	SISTEMA 01 NOROESTE	SISTEMA 02 SUDESTE	SISTEMA 04 SUDESTE	SISTEMA 05 NORDESTE	SISTEMA NOROESTE	SISTEMA SUDESTE		
Potência Instalada requerida (kWp)	36,90	20,91	66,83	15,99	16,81	20,50	177,94	
Rendimento	0,8							

Meses	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	MEDIA	TOTAL
-------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-------	-------

Produção Anual (kWh)	17.605,94	14.461,69	13.709,77	10.165,56	8.561,29	7.522,91	7.508,85	9.713,20	11.617,19	14.677,74	16.951,17	18.389,08	12.573,70	150.884,40
Consumo de energia (kWh/ano)	162.775,24													
Módulos FV (Wp)	410													
Quantidade de Módulos	3015													
H média	3015													

SISTEMA NOROESTE		3° inclinação		-41°N Az															
Potência Instalada (kWp)		36,90																	
Rendimento		0,8																	
Meses	HORA	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	MEDIA	TOTAL				
	Irradiação (Wh/m²*dia)	04:30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
05:30		39	1	0	0	0	0	0	0	0	0	25	50	10	115				
06:30		171	119	66	10	0	0	0	0	38	97	160	188	71	849				
07:30		334	272	210	124	73	50	54	102	165	246	329	358	193	2317				
08:30		507	442	379	263	195	166	162	238	317	417	511	535	344	4132				
09:30		651	590	538	404	325	292	277	380	467	570	664	681	487	5839				
10:30		749	692	652	515	434	399	375	493	578	676	768	780	593	7110				
11:30		801	744	711	574	495	460	431	556	636	731	824	835	650	7798				
12:30		805	748	715	577	498	464	434	560	640	735	829	839	654	7844				
13:30		759	702	663	523	442	408	382	504	588	687	780	791	602	7229				
14:30		667	605	555	416	336	303	285	393	480	586	682	698	501	6006				
15:30		526	458	395	273	203	174	167	248	330	433	532	556	358	4295				
16:30		349	284	221	130	77	54	57	108	173	258	347	376	203	2434				
17:30	180	126	71	13	0	0	0	41	103	170	199	75	903						
18:30	44	1	0	0	0	0	0	0	0	30	56	11	131						
19:30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0						
20:30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0						
TOTAL	6581	5784	5176	3822	3078	2770	2624	3582	4453	5539	6651	6942	4750	57002					
Produção Anual (kWh)	6022	4952	4737	3385	2817	2453	2401	3278	3944	5069	5890	6353	4275	51300					
Módulos FV (Wp)	410																		
Quantidade de Módulos	90																		

SISTEMA SUDESTE		3° inclinação		139°N Az															
Potência Instalada (kWp)		20,91																	
Rendimento		0,8																	
Meses	HORA	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	MEDIA	TOTAL				
	Irradiação (Wh/m²*dia)	04:30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
05:30		46	1	0	0	0	0	0	0	0	0	32	59	12	138				
06:30		183	127	71	12	0	0	0	0	40	103	173	203	76	912				
07:30		352	284	219	128	74	51	55	105	170	257	349	379	202	2423				
08:30		526	455	389	266	196	166	162	240	323	429	531	557	353	4240				
09:30		665	599	543	404	322	287	274	377	469	577	678	697	491	5892				
10:30		754	693	648	507	422	385	366	483	572	676	773	787	589	7066				
11:30		799	738	698	559	475	437	414	536	622	722	820	834	638	7654				
12:30		796	735	694	555	471	433	412	532	619	719	816	830	634	7612				
13:30		744	684	637	498	414	376	359	473	563	665	761	776	579	6950				
14:30		649	585	527	392	312	277	267	365	455	562	659	679	477	5729				
15:30		508	439	373	257	188	158	157	230	311	412	510	536	340	4079				
16:30		336	272	208	122	70	47	52	99	163	245	331	361	192	2306				
17:30	173	120	66	10	0	0	0	37	97	162	191	71	856						
18:30	41	1	0	0	0	0	0	0	0	0	27	53	10	122					
19:30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0						
20:30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0						
TOTAL	6572	5733	5073	3710	2944	2617	2518	3440	4344	5464	6622	6942	4665	55979					
Produção Anual (kWh)	3408	2781	2651	1862	1527	1313	1306	1784	2180	2833	3323	3600	2379	28548					
Módulos FV (Wp)	410																		
Quantidade de Módulos	51																		

SISTEMA SUDESTE		90° incl.		139°N Az															
Potência Instalada (kWp)		66,83																	
Rendimento		0,8																	
Meses	HORA	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	MEDIA	TOTAL				
	Irradiação (Wh/m²*dia)	04:30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
05:30		85	1	0	0	0	0	0	0	0	0	82	109	23	277				
06:30		184	125	80	23	0	0	0	0	48	108	188	215	81	971				
07:30		266	206	160	88	52	36	37	74	120	188	272	296	150	1795				
08:30		307	253	205	134	91	71	78	114	166	233	309	333	191	2294				
09:30		305	257	202	147	119	103	112	129	171	233	297	323	200	2398				
10:30		265	223	187	171	142	126	138	151	180	198	243	274	192	2298				
11:30		221	220	196	184	156	139	153	163	190	206	205	212	187	2245				
12:30		222	221	198	187	162	146	159	167	193	207	205	212	190	2279				
13:30		215	214	193	183	159	144	154	166	188	201	200	206	185	2223				
14:30		201	199	182	167	142	127	132	152	175	188	188	194	171	2047				
15:30		177	171	154	129	102	87	89	116	143	162	167	173	139	1670				
16:30		136	124	103	70	42	29	32	57	87	115	130	136	88	1061				
17:30	81	62	37	7	0	0	0	0	22	52	75	85	35	421					
18:30	22	1	0	0	0	0	0	0	0	0	15	27	5	65					
19:30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0						
20:30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0						
TOTAL	2687	2277	1897	1490	1167	1008	1084	1289	1683	2091	2576	2795	1837	22044					
Produção Anual (kWh)	4453	3530	3144	2390	1934	1617	1797	2136	2699	3466	4132	4632	2994	35931					
Módulos FV (Wp/m²)	410																		
Quantidade de Módulos	163																		

SISTEMA NORDESTE		90° incl.		49°N Az															
Potência Instalada (kWp)		15,99																	
Rendimento		0,8																	
Meses	HORA	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	MEDIA	TOTAL				
	Irradiação (Wh/m²*dia)	04:30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
05:30		53	1	0	0	0	0	0	0	0	0	53	65	14	172				
06:30		148	117	92	37	0	0	0	0	62	109	157	163	74	885				
07:30		246	223	212	137	105	97	75	137	172	222	266	262	180	2154				
08:30		323	312	321	245	219	217	174	256	280	319	350	336	279	3352				
09:30		361	362	366	323	310	317	250	344	351	374	390	370	346	4146				
10:30		355	367	398	351	347	360	298	374	370	380	380	356	361	4336				
11:30		307	329	357	330	329	341	290	348	341	339	321	299	328	3931				
12:30		230	259	280	272	270	277	244	281	276	264	230	212	258	3095				
13:30		214	212	188	198	192	179	196	195	198	199	206	197	2369					
14:30		200	195	170	148	118	112	115	129	160	181	186	194	159	1908				
15:30		179	168	143	113	84	70	75	97	128	156	168	177	130	1558				
16:30		146	127	99	64	37	25	29	51	81	114	138	148	88	1059				
17:30	92	67	37	6	0	0	0	0	22	54	84	98	38	460					
18:30	25	1	0	0	0	0	0	0	0	0	17	31	6	74					
19:30	0	0	0	0	0														

SISTEMA NOROESTE		90° inclinação		-41°N Az												
Potência Instalada (kWp)		16,81														
Rendimento		0,8														
SISTEMA 05	Meses	HORA	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	MEDIA	TOTAL
	Irradiação (Wh/m²*dia)	04:30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		05:30	24	1	0	0	0	0	0	0	0	0	16	31	6	72
		06:30	90	65	36	6	0	0	0	0	21	53	82	96	37	449
		07:30	143	124	96	62	37	25	29	50	79	111	134	145	86	1035
		08:30	177	166	140	112	84	70	75	96	126	153	166	174	128	1539
		09:30	199	194	169	151	142	140	134	145	159	180	186	193	166	1992
		10:30	214	212	217	223	221	225	202	227	222	203	199	206	214	2571
		11:30	242	275	303	295	297	309	266	309	298	284	246	224	279	3348
		12:30	309	336	371	345	350	366	307	369	355	349	326	300	340	4083
		13:30	347	364	400	357	358	374	308	384	375	379	372	345	364	4363
		14:30	344	351	379	322	312	321	260	344	347	364	372	349	339	4065
		15:30	301	296	308	240	217	216	172	251	271	303	326	310	268	3211
		16:30	225	207	200	132	102	94	73	132	164	207	242	236	168	2014
		17:30	132	107	85	34	0	0	0	57	100	139	143	66	797	
		18:30	44	1	0	0	0	0	0	0	0	43	53	12	141	
		19:30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
		20:30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
		TOTAL	2791	2699	2704	2279	2120	2140	1826	2307	2474	2686	2849	2805	2473	29680
	Produção Anual (kWh)		1164	1053	1127	919	884	863	761	962	998	1120	1149	1169	1014	12170
	Módulos FV (Wp/m²)		410													
Quantidade de Módulos		41														
SUDOESTE		90° inclinação		-131°N Az												
Potência Instalada (kWp)		20,50														
Rendimento		0,8														
SISTEMA 06	Meses	HORA	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	MEDIA	TOTAL
	Irradiação (Wh/m²*dia)	04:30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		05:30	22	1	0	0	0	0	0	0	0	0	15	27	5	65
		06:30	83	64	38	7	0	0	0	0	22	53	77	87	36	431
		07:30	140	127	106	71	43	30	32	58	89	118	133	140	91	1087
		08:30	179	174	157	130	102	88	89	117	145	165	170	175	141	1691
		09:30	201	200	183	167	141	127	132	152	175	189	189	195	171	2051
		10:30	215	214	193	182	157	142	152	164	188	201	200	206	185	2214
		11:30	222	221	197	186	159	143	156	166	192	207	205	212	189	2266
		12:30	221	220	196	182	154	136	151	161	189	206	205	213	186	2234
		13:30	284	245	187	170	141	124	136	149	179	218	268	294	200	2395
		14:30	327	280	231	166	119	103	111	141	196	259	325	347	217	2605
		15:30	328	274	229	151	108	89	90	135	187	257	335	356	212	2539
		16:30	282	221	176	98	61	46	43	86	133	205	292	315	163	1958
		17:30	194	133	88	27	0	0	0	54	116	200	226	87	1038	
		18:30	89	1	0	0	0	0	0	0	0	87	114	24	291	
		19:30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
		20:30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
		TOTAL	2787	2375	1981	1537	1185	1028	1092	1329	1749	2194	2701	2907	1905	22865
	Produção Anual (kWh)		1417	1130	1007	756	602	506	555	676	861	1115	1329	1478	953	11432
	Módulos FV (Wp/m²)		410													
Quantidade de Módulos		50														

Quadro 9 - Dimensionamento SFV 04 – Caso D.

Fonte: Autora.