

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA, URBANISMO
E PAISAGISMO

Maurício Picetti dos Santos

**AVALIAÇÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS COMO PROTEÇÃO
SOLAR E FACHADA VENTILADA EM RELAÇÃO À EFICIÊNCIA
ENERGÉTICA DO EDIFÍCIO**

Santa Maria, RS
2021

Maurício Picetti dos Santos

**AVALIAÇÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS COMO PROTEÇÃO SOLAR E
FACHADA VENTILADA EM RELAÇÃO À EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DO
EDIFÍCIO**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Arquitetura, Urbanismo e Paisagismo da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Arquitetura, Urbanismo e Paisagismo**.

Orientadora: Prof^a Dr^a Ísis Portolan dos Santos
Coorientadora: Prof^a Dr^a Isabel Tourinho Salamoni

Santa Maria, RS
2021

This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001

Santos, Maurício Picetti dos

Avaliação de sistemas fotovoltaicos como proteção solar e fachada ventilada em relação à eficiência energética do edifício / Maurício Picetti dos Santos.- 2021.

159 p.; 30 cm

Orientadora: Ísis Portolan dos Santos

Coorientadora: Isabel Tourinho Salamoni

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Arquitetura, Urbanismo e Paisagismo, RS, 2021

1. Sistemas fotovoltaicos 2. Protetores solares 3. Eficiência energética I. Santos, Ísis Portolan dos II. Salamoni, Isabel Tourinho III. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

Declaro, MAURÍCIO PICETTI DOS SANTOS, para os devidos fins e sob as penas da lei, que a pesquisa constante neste trabalho de conclusão de curso (Dissertação) foi por mim elaborada e que as informações necessárias objeto de consulta em literatura e outras fontes estão devidamente referenciadas. Declaro, ainda, que este trabalho ou parte dele não foi apresentado anteriormente para obtenção de qualquer outro grau acadêmico, estando ciente de que a inveracidade da presente declaração poderá resultar na anulação da titulação pela Universidade, entre outras consequências legais.

Maurício Picetti dos Santos

**AVALIAÇÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS COMO PROTEÇÃO SOLAR E
FACHADA VENTILADA EM RELAÇÃO À EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DO
EDIFÍCIO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura, Urbanismo e Paisagismo da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Arquitetura, Urbanismo e Paisagismo**.

Aprovado em 06 de agosto de 2021:



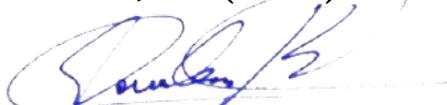
Ísis Portolan dos Santos, Dra. (UFSM) - Videoconferência
(Presidente/Orientador)



Isabel Tourinho Salamoni, Dra. (UFPEL) - Videoconferência
(Coorientador)



Minéia Johann Scherer, Dra. (UFSM) - Videoconferência



Antônio Cesar Silveira Baptista da Silva, Dr. (UFPEL) - Videoconferência

Santa Maria, RS
2021

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

À minha orientadora, Prof.^a Ísis, pela oportunidade, confiança e incentivo à pesquisa em energia solar fotovoltaica. Agradeço pela orientação e colaboração durante o desenvolvimento deste trabalho.

À minha coorientadora e aos professores membros da banca examinadora, pelas sugestões e contribuições que foram fundamentais para qualificar este trabalho.

Aos professores do Programa de Pós-graduação em Arquitetura, Urbanismo e Paisagismo da Universidade Federal de Santa Maria (PPGAUP UFSM), pelo conhecimento conquistado nas disciplinas do mestrado.

Aos colegas, pelos momentos compartilhados e a boa convivência diária que acompanhou esta trajetória.

Aos amigos, muitos dos quais conquistei neste período, pelo apoio em todos os momentos e que contribuíram, de alguma forma, com este trabalho.

Ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia (INCTGD), CNPq, CAPES e FAPERGS pelo apoio financeiro recebido para o desenvolvimento deste trabalho e ao Instituto de Redes Inteligentes (INRI UFSM) pelo suporte durante as etapas da pesquisa.

E, especialmente, à minha família e à Deus, por tudo.

RESUMO

AVALIAÇÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS COMO PROTEÇÃO SOLAR E FACHADA VENTILADA EM RELAÇÃO À EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DO EDIFÍCIO

AUTOR: Maurício Picetti dos Santos
ORIENTADORA: Prof^a Dr^a Ísis Portolan dos Santos
COORDINADORA: Prof^a Dr^a Isabel Tourinho Salamoni

No Brasil, a matriz energética é composta, predominantemente, por fontes renováveis, permitindo a obtenção de energia através de recursos cíclicos como a fonte hídrica, que corresponde à principal fonte de energia no país. Esta, no entanto, é caracterizada pela geração centralizada e distante dos pontos de consumo, ocasionando maiores perdas energéticas em transmissão, além de permitir um significativo impacto ambiental devido a instalação das usinas hidrelétricas, como na realocação de comunidades e desfiguração do ecossistema local. Diante da necessidade de diversificar as fontes energéticas, a energia solar fotovoltaica é uma alternativa ao promover a geração de energia a partir de uma fonte renovável e ao aproximar os núcleos de geração das unidades consumidoras, reduzindo as perdas durante o transporte da energia. Ainda, a partir da capacidade em compor estruturas modulares, os sistemas fotovoltaicos podem ser integrados à envoltória das edificações como componentes passivos, favorecendo a eficiência energética nestas. Neste contexto, a pesquisa avaliou a influência de conjuntos fotovoltaicos na forma de brises e fachada ventilada na promoção da eficiência energética quando aplicados nas envoltórias norte e oeste dos edifícios de tipologia padrão da Universidade Federal de Santa Maria no campus Camobi. Foi desenvolvido um modelo virtual das edificações onde foram inseridos os conjuntos fotovoltaicos para a obstrução da incidência de irradiação solar excessiva e para o potencial em geração energética; além disso, os conjuntos foram reproduzidos na cobertura do modelo, a fim de constituir conjuntos de referência. Então, foram realizadas simulações nos softwares PVsyst, para a análise da geração elétrica dos conjuntos, e DesignBuilder, para avaliar a variação do consumo no modelo. Através do balanço energético, foi verificado que os conjuntos fotovoltaicos contribuíram para a eficiência energética do modelo virtual, embora os conjuntos posicionados na cobertura tenham apresentado melhor desempenho devido ao potencial em geração elétrica. A fachada ventilada e os brises fotovoltaicos desenvolveram reduções no consumo por resfriamento artificial, porém ampliaram o consumo em iluminação, enquanto a geração de energia foi condicionada a perdas por sombreamento e ao ângulo de incidência da irradiação sobre os módulos. Nas avaliações, apenas os brises fotovoltaicos para a orientação norte promoveram reduções no consumo elétrico total anual (diminuição de 3,39%), enquanto, nas outras configurações, promoveram aumento no consumo elétrico. Em ambas as orientações, o balanço energético positivo foi verificado apenas com os módulos da fachada ventilada posicionados na cobertura (Cob. Fachada Ventilada), que possibilitaram um balanço energético positivo de 108,28 MWh para a orientação oeste e 134,47 MWh para norte. A pesquisa explorou a utilização da envoltória das edificações para a geração elétrica através de sistemas fotovoltaicos, bem como a aplicação destes na forma de soluções passivas para a redução da demanda energética. Assim, considerando as potencialidades da tecnologia fotovoltaica, o estudo permite novos entendimentos para a aplicação destes sistemas a fim de estimular a eficiência energética em edificações.

Palavras-chave: Sistemas fotovoltaicos. Protetores solares. Eficiência energética.

ABSTRACT

EVALUATION OF PHOTOVOLTAIC SYSTEMS AS SHADING DEVICES AND VENTILATED FACADE IN RELATION TO THE ENERGY EFFICIENCY OF THE BUILDING

AUTHOR: Maurício Picetti dos Santos
ADVISOR: Prof^a Dr^a Ísis Portolan dos Santos
CO-ADVISOR: Prof^a Dr^a Isabel Tourinho Salamoni

In Brazil, the national energy system is predominantly composed of renewable sources, allowing to obtain energy through cyclical resources such as water source, which corresponds to the main energy source in the country. This, however, is characterized by centralized generation and distant from consumption units, causing energy losses in transmission, and significant environmental impact due to the installation of hydroelectric plants, such as the relocation of communities and disfigurement of the local ecosystem. Faced with the need to diversify energy sources, photovoltaic solar energy is an alternative to promote energy generation from a renewable source and to bring generation centers closer to consumer units, reducing losses during energy transport. Also, based on the ability to compose modular structures, photovoltaic systems can be integrated into the building envelope as passive components, favoring energy efficiency. In this context, the research evaluated the influence of photovoltaic sets in the form of shading devices and ventilated facades in promoting energy efficiency when applied to the north and west envelopes of standard buildings at the Federal University of Santa Maria on the Camobi campus. A virtual model of the buildings was developed where the photovoltaic sets were inserted to obstruct the incidence of excessive solar radiation and potential for energy generation; in addition, the sets were reproduced in the roof of the model, in order to constitute reference sets. Then, simulations were performed using PVsyst software, to analyze the electrical generation of the sets, and DesignBuilder, to evaluate the variation in consumption in the model. Through the energy balance, it was verified that the photovoltaic sets contributed to the energy efficiency of the virtual model, although the sets positioned on the roof had better performance due to the potential in electrical generation. The ventilated facade and the shading devices developed reductions in consumption through artificial cooling, but increased consumption in lighting, while energy generation was conditioned to losses due to shading and the angle of incidence of radiation on the modules. In the evaluations, only the photovoltaic integrated shading devices for the north orientation promoted reductions in the annual electrical consumption (decrease of 3.39%), while, in the other configurations, they promoted an increase in electrical consumption. In both orientations, the positive energy balance was verified with the modules of the ventilated facade on the roof (Cob. Fachada Ventilada), with a positive energy balance of 108.28 MWh for the west orientation and 134.47 MWh for the north. The research explored the use of building envelopes for electricity generation through photovoltaic systems, as well as their application in the form of passive solutions to reduce energy demand. Therefore, considering the potential of photovoltaic technology, the study allows for new understandings for the application of these systems to promote energy efficiency in buildings.

Keywords: Photovoltaic systems. Shading devices. Energy efficiency.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Total diário da irradiação no plano inclinado na latitude.....	28
Figura 2 - Evolução da eficiência de células fotovoltaicas em laboratórios	33
Figura 3 - Estrutura do módulo fotovoltaico	34
Figura 4 - Modelos de inserção de módulos fotovoltaicos em edificações	38
Figura 5 - Modelo de representação do balanço energético	45
Figura 6 - Fluxograma metodológico	48
Figura 7 - Edifícios de tipologia padrão e perspectiva aérea da UFSM (campus Camobi)	50
Figura 8 - Universidade Federal de Santa Maria (campus Camobi) e edifícios de estudo.....	51
Figura 9 - Modelo de inventário para caracterização das edificações básicas	53
Figura 10 - Modelo com exposição longitudinal leste-oeste.....	54
Figura 11 – Sombreamento desenvolvido pelas estruturas expostas da edificação	55
Figura 12 - Máscaras solares para os brises nas fachadas leste e oeste.....	56
Figura 13 - Orientação dos módulos fotovoltaicos.....	58
Figura 14 - Inserção dos brises fotovoltaicos para a fachada oeste.....	59
Figura 15 - Perfil de sombreamento dos modelos A, B e C para a fachada oeste.....	61
Figura 16 - Formação dos brises para a fachada oeste	62
Figura 17 - Adaptação da máscara de sombreamento dos brises em fachada ventilada para a fachada oeste	63
Figura 18 - Formação da fachada ventilada para a fachada oeste	64
Figura 19 – Máscara solar para a fachada ventilada na fachada oeste	65
Figura 20 - Modelo com exposição longitudinal norte-sul.....	66
Figura 21 - Máscara solar para brises na fachada norte	67
Figura 22 – Inserção e perfil de sombreamento dos brises fotovoltaicos para a fachada norte	68
Figura 23 - Formação dos brises para a fachada norte	69
Figura 24 – Adaptação da máscara de sombreamento dos brises em fachada ventilada para a fachada norte	70
Figura 25 – Formação da fachada ventilada para a fachada norte.....	71
Figura 26 – Máscara solar para a fachada ventilada na fachada norte	72
Figura 27 - Perspectiva isométrica do modelo virtual.....	85
Figura 28 - Perspectiva isométrica explodida do modelo virtual	87
Figura 29 - Brises fotovoltaicos sobre a fachada oeste e conjunto de referência	88
Figura 30 - Fachada ventilada fotovoltaica sobre a fachada oeste e conjunto de referência....	89
Figura 31 – Brises fotovoltaicos sobre a fachada norte e conjunto de referência	90
Figura 32 - Fachada ventilada fotovoltaica sobre a fachada norte e conjunto de referência....	91
Figura 33 - Quantitativo de módulos sobre a fachada oeste.....	92
Figura 34 - Quantitativo de módulos sobre a fachada norte.....	101

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros meteorológicos para Santa Maria, RS	74
Tabela 2 - Características do módulo fotovoltaico	75
Tabela 3 - Configuração dos conjuntos fotovoltaicos para a geração de energia.....	76
Tabela 4 - Características do inversor fotovoltaico	77
Tabela 5 - Densidade de potência em equipamentos.....	79
Tabela 6 - Parâmetros de atividades e iluminação	80
Tabela 7 - Componentes da envoltória	81
Tabela 8 - Consumo elétrico no edifício 42 da UFSM.....	82
Tabela 9 - Perfil do consumo elétrico no modelo virtual	110

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Irradiação global efetiva nos conjuntos fotovoltaicos à oeste (kWh/m ²)	93
Gráfico 2 - Irradiação global efetiva nos brises fotovoltaicos à oeste (kWh/m ²)	94
Gráfico 3 - Energia efetiva gerada nos conjuntos fotovoltaicos à oeste (MWh).....	95
Gráfico 4 - Energia efetiva gerada nos brises fotovoltaicos à oeste (MWh).....	96
Gráfico 5 - Perdas energéticas nos conjuntos fotovoltaicos à oeste (%)	97
Gráfico 6 - Perdas energéticas nos brises fotovoltaicos à oeste (%)	98
Gráfico 7 – Performance ratio (PR) dos conjuntos fotovoltaicos à oeste (%).....	99
Gráfico 8 – Performance ratio (PR) dos brises fotovoltaicos à oeste (%).....	100
Gráfico 9 - Irradiação global efetiva nos conjuntos fotovoltaicos à norte (kWh/m ²).....	101
Gráfico 10 - Irradiação global efetiva nos brises fotovoltaicos à norte (kWh/m ²).....	102
Gráfico 11 - Energia efetiva gerada nos conjuntos fotovoltaicos à norte (MWh).....	103
Gráfico 12 - Energia efetiva gerada nos brises fotovoltaicos à norte (MWh).....	104
Gráfico 13 - Perdas energéticas nos conjuntos fotovoltaicos à norte (%).....	105
Gráfico 14 - Perdas energéticas nos brises fotovoltaicos à norte (%)	106
Gráfico 15 – Performance ratio (PR) dos conjuntos fotovoltaicos à norte (%).....	107
Gráfico 16 – Performance ratio (PR) dos brises fotovoltaicos à norte (%).....	108
Gráfico 17 - Consumo elétrico de referência e modelo virtual	109
Gráfico 18 - Consumo elétrico em iluminação artificial com conjuntos fotovoltaicos à oeste (kWh)	111
Gráfico 19 - Consumo elétrico em aquecimento artificial com conjuntos fotovoltaicos à oeste (kWh)	113
Gráfico 20 - Consumo elétrico em resfriamento artificial com conjuntos fotovoltaicos à oeste (kWh)	114
Gráfico 21 - Consumo elétrico total com conjuntos fotovoltaicos à oeste (kWh)	115
Gráfico 22 - Consumo elétrico em iluminação artificial com conjuntos fotovoltaicos à norte (kWh)	116
Gráfico 23 - Consumo elétrico em aquecimento artificial com conjuntos fotovoltaicos à norte (kWh)	117
Gráfico 24 - Consumo elétrico em resfriamento artificial com conjuntos fotovoltaicos à norte (kWh)	118
Gráfico 25 - Consumo elétrico total com conjuntos fotovoltaicos à norte (kWh)	119
Gráfico 26 - Balanço energético com os conjuntos fotovoltaicos à oeste (MWh).....	121
Gráfico 27 – Conjuntos fotovoltaicos à oeste e o eixo NZEB (MWh/ano).....	123
Gráfico 28 - Balanço energético com os conjuntos fotovoltaicos à norte (MWh).....	124
Gráfico 29 – Conjuntos fotovoltaicos à norte e o eixo NZEB (MWh/ano).....	126

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABSOLAR	Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BAPV	Building Applied Photovoltaics
BEN	Balanco Energético Nacional
BIPV	Building Integration Photovoltaics
COP	Coefficiente de Performance
ENCE	Etiqueta Nacional de Conservação de Energia
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
IAM	Modificador do Ângulo de Incidência
IEA	Agência Internacional de Energia
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Normalização E Qualidade Industrial
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPCC	Painel Intergovernamental Sobre Alterações Climáticas
IPHAN	Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional
MIGDI	Microssistema Isolado de Geração e Distribuição de Energia Elétrica
nZEB	Nearly Zero Energy Buildings
NZEB	Net Zero Energy Building
PBE	Programa Brasileiro de Etiquetagem
PIB	Produto Interno Bruto
PR	Performance Ratio
PROINFRA	Pró-reitoria de Infraestrutura da Universidade Federal de Santa Maria
RAC	Requisitos de Avaliação da Conformidade
RTQ-C	Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas
RTQ-R	Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética em Residências
SFCR	Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede
SFH	Sistemas Fotovoltaicos Híbridos
SFI	Sistema Fotovoltaico Isolado
SICG	Sistema Integrado de Conhecimento e Gestão
SIGFI	Sistema Individual de Geração de Energia Elétrica com Fonte Intermitente
STC	Standard Test Conditions
TN	Temperatura Neutra
UFSM	Universidade Federal de Santa Maria
UFV	Centrais Geradoras Fotovoltaicas
ZCB	Zero Carbon Building
ZEB	Zero Emissions Building

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	21
1.1	JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DO TEMA PROPOSTO.....	23
1.2	OBJETIVOS	25
1.2.1	Objetivo geral.....	25
1.2.2	Objetivos específicos.....	25
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO	25
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	26
2.1	ENERGIA SOLAR.....	26
2.1.1	Radiação solar	27
2.2	ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA.....	29
2.2.1	Sistemas fotovoltaicos.....	31
2.2.1.1	Células fotovoltaicas.....	31
2.2.1.2	Módulos fotovoltaicos	34
2.2.2	Instalações fotovoltaicas.....	35
2.2.2.1	Sistemas fotovoltaicos em edificações	37
2.3	EFICIÊNCIA ENERGÉTICA	39
2.3.1	Protetores solares.....	41
2.3.2	Balanco energético	44
3	METODOLOGIA.....	47
3.1	CARACTERIZAÇÃO DAS EDIFICAÇÕES.....	49
3.1.1	Método de Avaliação	52
3.2	DIMENSIONAMENTO DOS CONJUNTOS FOTOVOLTAICOS	54
3.2.1	Modelo com exposição longitudinal leste-oeste.....	54
3.2.1.1	Brisas fotovoltaicos	55
3.2.1.2	Fachada ventilada fotovoltaica	63
3.2.2	Modelo com exposição longitudinal norte-sul.....	66
3.2.2.1	Brisas fotovoltaicos	67
3.2.2.2	Fachada ventilada fotovoltaica	70
3.3	GERAÇÃO DE ENERGIA	73
3.3.1	Parâmetros iniciais de simulação	74
3.3.2	Método de simulação	76
3.4	CONSUMO ENERGÉTICO	78
3.4.1	Parâmetros iniciais de simulação	78
3.4.2	Método de simulação	79
3.5	BALANÇO ENERGÉTICO DOS CONJUNTOS FOTOVOLTAICOS	84
4	RESULTADOS	85
4.1	CARACTERIZAÇÃO DAS EDIFICAÇÕES.....	85
4.2	DIMENSIONAMENTO DOS CONJUNTOS FOTOVOLTAICOS	88
4.2.1	Modelo com exposição longitudinal leste-oeste.....	88
4.2.1.1	Brisas fotovoltaicos	88
4.2.1.2	Fachada ventilada fotovoltaica	89
4.2.2	Modelo com exposição longitudinal norte-sul.....	90
4.2.2.1	Brisas fotovoltaicos	90
4.2.2.2	Fachada ventilada fotovoltaica	91
4.3	GERAÇÃO DE ENERGIA	92
4.3.1	Modelo com exposição longitudinal leste-oeste.....	92
4.3.1.1	Irradiação global efetiva	92
4.3.1.2	Energia efetiva gerada	95

4.3.1.3	Perdas energéticas	96
4.3.1.4	Performance ratio (PR)	99
4.3.2	Modelo com exposição longitudinal norte-sul	101
4.3.2.1	Irradiação global efetiva.....	101
4.3.2.2	Energia efetiva gerada.....	103
4.3.2.3	Perdas energéticas	105
4.3.2.4	Performance ratio (PR)	107
4.4	CONSUMO ENERGÉTICO.....	109
4.4.1	Modelo com exposição longitudinal leste-oeste	111
4.4.1.1	Iluminação artificial	111
4.4.1.2	Aquecimento	112
4.4.1.3	Resfriamento	114
4.4.1.4	Consumo elétrico total	115
4.4.2	Modelo com exposição longitudinal norte-sul	116
4.4.2.1	Iluminação artificial	116
4.4.2.2	Aquecimento artificial.....	117
4.4.2.3	Resfriamento artificial.....	118
4.4.2.4	Consumo elétrico total	119
4.5	BALANÇO ENERGÉTICO DOS CONJUNTOS FOTOVOLTAICOS.....	121
4.5.1	Modelo com exposição longitudinal leste-oeste	121
4.5.2	Modelo com exposição longitudinal norte-sul	124
5	CONCLUSÃO	127
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	132
	APÊNDICE A – EDIFÍCIOS DO SETOR DE ENSINO (UFSM).....	138
	APÊNDICE B – MODELO VIRTUAL	154
	APÊNDICE C – CRONOGRAMAS DE USO	156

1 INTRODUÇÃO

O crescimento da população mundial, orientado em uma cultura progressivamente tecnológica, favorece o desenvolvimento de produtos processados e dependentes de acentuada carga energética. No Brasil, a ampliação na demanda energética está vinculada ao desenvolvimento da economia e transformações na qualidade de vida da população. Segundo o Ministério de Minas e Energia (BRASIL, 2017a), o aumento da renda de parcela significativa da população brasileira tem favorecido o acesso a infraestruturas básicas – moradia, saneamento e transporte – implicando uma ascensão no consumo energético. De acordo com dados da Agência Internacional de Energia (IEA, 2021), o consumo elétrico, no Brasil apresentou uma evolução de 19,06% entre os anos de 2010 e 2019, quando atingiu um consumo estimado em 553,3 TWh. Além disso, segundo o Relatório de Indicadores divulgado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), entre 2014 e 2019, o índice de intensidade energética¹ teve um aumento de aproximadamente 0,4% ao ano, indicando maior carga energética necessária para produzir uma unidade de produto final ou de serviço (BRASIL, 2020a).

Além do crescimento da demanda, o país tem apresentado uma ampliação na oferta energética. De acordo com o Balanço Energético Nacional (BEN), em 2019, a oferta interna de energia elétrica – que considera a disponibilidade total de energia no país – registrou uma evolução de 2,3% em relação ao ano de 2018, atingindo uma oferta estimada em 651,3 TWh. Em relação às unidades geradoras, as centrais de serviço público e autoprodutores², em 2019, apresentaram um crescimento de 4,1% comparado ao período de 2018, onde as centrais elétricas responderam por 83,7% da geração elétrica total (BRASIL, 2020b).

A matriz elétrica brasileira é predominantemente formada por fontes renováveis, permitindo uma variabilidade na produção energética amparada em recursos considerados inesgotáveis e de menor impacto ambiental. Em 2019, as fontes renováveis representaram 83,0% da oferta interna de energia elétrica no Brasil, resultante do somatório da produção energética nacional com importações; onde a fonte hídrica, principal fonte de energia, respondeu por 64,9% da oferta interna, com um crescimento de 2,3% em relação a 2018 (BRASIL, 2020b).

¹ Quociente entre consumo bruto de energia e Produto Interno Bruto (PIB) da economia, indicando a eficiência da utilização energética na produção de riqueza (BRASIL, 2020a).

² Empresas com concessão para produção de energia elétrica para uso exclusivo com comercialização do excedente, conforme autorização da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2015b).

No entanto, no país, o maior potencial hidrelétrico está situado na Bacia Amazônica, onde áreas inundadas para a construção de reservatórios estabelecem a desfiguração do espaço geográfico, ocasionando alterações nas relações ambientais. Ainda, a partir da configuração espacial das hidrelétricas, verifica-se que os maiores volumes gerados de energia ocorrem distantes dos pontos de consumo. Segundo o BEN (BRASIL, 2020b), em 2019, os maiores volumes de energia elétrica foram consumidos nas regiões sudeste (50,7%), sul (17,9%) e nordeste (17,1%), e pelos setores industrial, residencial e comercial, que corresponderam a 79,4% do consumo elétrico. Esta relação indica pontos de consumo distribuídos no território brasileiro, principalmente em áreas urbanas, distantes das fontes geradoras.

Com a base da matriz energética centralizada, há maior ocorrência de perdas na distribuição, redução do rendimento e aumento dos custos na geração de energia. Nesse sentido, a geração distribuída oferece vantagens ao setor elétrico ao aproximar a geração dos pontos de consumo, além de diversificar as tecnologias empregadas para a geração energética. De modo a regulamentar este modelo, a Resolução Normativa ANEEL nº 687/2015 definiu critérios para o desenvolvimento da geração distribuída de energia elétrica, possibilitando, ao consumidor, gerar energia a partir de fontes renováveis com o fornecimento do excedente para a rede de distribuição. Entre os benefícios ao sistema elétrico, estão a redução dos investimentos na expansão da rede elétrica, baixo impacto ambiental, redução da sobrecarga na rede elétrica, redução de perdas durante a transmissão e distribuição e diversificação da matriz energética (ANEEL, 2015b).

Nesse contexto, a tecnologia fotovoltaica, com fonte na energia solar, pode apresentar importante função na expansão da matriz elétrica brasileira ao fornecer diversificação e complementaridades. Os sistemas fotovoltaicos possibilitam o desenvolvimento da geração distribuída de energia elétrica através de instalações de pequena e média escala em edificações autoprodutoras, que fornecem o excedente energético para a rede do sistema elétrico e atenuam perdas na matriz elétrica nacional. O sistema elétrico brasileiro, em 2019, apresentou perdas energéticas de, aproximadamente, 7,33% relacionadas à distância entre núcleos geradores e centros de consumo (perdas de transmissão e distribuição) e, 6,44%, associadas ao desvio de energia, quando o consumidor faz uso de energia elétrica não contabilizada no sistema nacional (ANEEL, 2020).

1.1 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DO TEMA PROPOSTO

Os sistemas fotovoltaicos, além de oferecerem alternativa para a geração de energia e possibilitarem a expansão do sistema elétrico, podem desempenhar a função de componentes arquitetônicos na envoltória das unidades geradoras, pertencendo, assim, ao contexto das decisões projetuais como elementos arquitetônicos. Segundo Rüter (2004), os sistemas fotovoltaicos quando inseridos na envoltória da edificação podem adquirir a função de elementos construtivos, tornando-os mais versáteis que coletores solares para aquecimento de ar ou água. Em relação ao local de instalação, os sistemas podem ser aplicados nas edificações existentes sobre telhados e demais superfícies ou integrados, enquanto elementos arquitetônicos, como revestimentos em composições de fachadas e estruturas para sombreamento (RÜTHER, 2004).

A atribuição dos sistemas fotovoltaicos como elementos de sombreamento permite, a partir de suas características geométricas, o controle da incidência de irradiação solar sobre o interior dos ambientes, associando a geração de energia à redução da carga térmica da edificação. Segundo Lamberts, Dutra e Pereira (2014), a radiação solar é um dos principais colaboradores para o ganho térmico no interior de edificações, visto que, ao incidir pelas aberturas da edificação com comprimento de onda curta³, afetam os materiais no interior do ambiente, aquecendo-os e tornando-os emissores de radiação com comprimento de onda longa⁴. O vidro, como material predominante nas aberturas, apresenta alta opacidade para radiações neste comprimento de onda, obstruindo a difusão destas para o exterior e promovendo o aquecimento no ambiente (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014).

Quando atuam como componentes passivos na forma de protetores solares em ambientes com incidência de irradiação solar excessiva, os conjuntos fotovoltaicos permitem reduzir o consumo de energia na edificação. Nas regiões de climas quentes, como no Brasil, onde o sombreamento pertence às diretrizes bioclimáticas, os protetores solares reduzem a carga térmica originária da incidência de radiação solar, promovendo uma redução considerável na demanda de energia elétrica por minimizar a necessidade de equipamentos de condicionamento artificial (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014).

Os protetores solares são elementos fundamentais na envoltória de edificações para a promoção da eficiência energética destas. Desse modo, enquanto componentes do projeto,

³ Energia radiante na faixa do espectro entre os raios gama e o infravermelho próximo. Em geral, inclui radiações com comprimentos de onda entre 0,1 μm e 5,0 μm (LIOU, 1980).

⁴ Energia radiante que representa a maior parte da radiação emitida por superfícies da Terra e pela atmosfera, apresentando comprimento de onda próximo a 10,0 μm (LIOU, 1980).

foram desenvolvidos métodos de avaliação de protetores solares para explorar a sua contribuição na redução do consumo energético. Entre distintas ferramentas de avaliação, o Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas (RTQ-C) estima o desempenho dos protetores solares a fim de identificar o indicador de consumo da envoltória, como parâmetro para avaliar o desempenho energético de edificações (BRASIL, 2010).

Então, diante da necessidade de diversificar a matriz elétrica brasileira e reduzir o consumo energético crescente, a tecnologia fotovoltaica se apresenta como alternativa a ser utilizada em edificações. Na forma de protetores solares fotovoltaicos, atuam contribuindo no conforto ambiental de edifícios como soluções passivas, buscando racionalizar o uso de fontes de energia e diminuir o impacto sobre a matriz energética. Ao mesmo tempo, promovem a complementação do sistema elétrico através da geração distribuída de energia por fontes renováveis e reduzem as perdas na transmissão da energia ao aproximar os núcleos geradores das unidades consumidoras.

Assim, este trabalho busca avaliar a influência que sistemas fotovoltaicos como componentes passivos na envoltória da edificação promovem na eficiência energética de unidades consumidoras, associando a geração de energia à redução do consumo energético. Na pesquisa, como edifício de estudo, foi adotado um modelo virtual que representa os edifícios básicos do Setor de Ensino da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM).

Os edifícios do Setor de Ensino constituem as edificações de tipologia padrão do campus Camobi, em Santa Maria. Em oito unidades, as edificações são predominantes no espaço e pertencem ao contexto modernista que orientou a construção do campus, adquirindo representatividade histórica. Ainda, compreendendo ambientes de laboratórios, salas de aula, salas de professores, salas de estudo, áreas comerciais, entre outros, as edificações atendem a uma parcela significativa da população do campus e apresentam elevado consumo energético. Estes fatores justificam a importância em utilizar a tecnologia fotovoltaica na qualificação dos edifícios, buscando promover a sua eficiência energética.

Também, considerando o número de unidades das edificações de tipologia padrão, a pesquisa permite reproduzir os resultados obtidos para mais exemplares, atingindo uma maior escala no campus. Além disso, são edifícios com janelas em fita, circulação central e salas nas laterais, sendo similares a diversas ocorrências no país. Desse modo, esta análise viabiliza estudos subsequentes para estimar a contribuição das instalações fotovoltaicas nas edificações como estratégia para reduzir a demanda energética do campus e em outros edifícios educacionais similares.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Avaliar a eficiência energética promovida por conjuntos fotovoltaicos quando aplicados na forma de brises e fachada ventilada na envoltória de um edifício de tipologia padrão da Universidade Federal de Santa Maria.

1.2.2 Objetivos específicos

São objetivos específicos:

- a) caracterizar o edifício de tipologia padrão da Universidade Federal de Santa Maria;
- b) definir os modelos de brises e fachada ventilada para as orientações norte e oeste e suas reproduções em posicionamento ideal no edifício;
- c) simular a geração de energia elétrica pelos conjuntos;
- d) simular a influência dos conjuntos fotovoltaicos no consumo elétrico do edifício;
- e) avaliar o balanço energético do edifício com a inserção dos conjuntos fotovoltaicos;

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O desenvolvimento da pesquisa está dividido em introdução, revisão bibliográfica, metodologia, resultados, considerações finais, referências bibliográficas e apêndices. Neste **primeiro capítulo**, foram apresentados itens introdutórios da pesquisa, como o contexto em que se insere e a justificativa da escolha do tema, além dos objetivos gerais e específicos. No **segundo capítulo**, a revisão bibliográfica é utilizada como suporte teórico para o desenvolvimento da pesquisa, com estudos relacionados à radiação solar, energia solar fotovoltaica e eficiência energética nas edificações.

No **terceiro capítulo**, é apresentada a metodologia utilizada na elaboração do modelo virtual do edifício de estudo, dimensionamento dos conjuntos fotovoltaicos e métodos utilizados nas simulações da geração de energia e avaliação do consumo energético. No **quarto capítulo**, são demonstrados os resultados obtidos pela influência dos conjuntos fotovoltaicos no modelo virtual, considerando a energia gerada e consumida no modelo. No **quinto capítulo**, são realizadas as considerações finais da pesquisa desenvolvida, indicando conclusões gerais, diretrizes obtidas e sugestões para outros trabalhos. No **sexto capítulo**, são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas, enquanto, no **sétimo capítulo**, os materiais desenvolvidos na forma de apêndice.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, são apresentados os assuntos relacionados à temática da pesquisa, expondo suporte teórico para o desenvolvimento desta. A revisão bibliográfica aborda, inicialmente, temas vinculados à energia solar e o comportamento da radiação solar no Brasil. Na sequência, são apresentados assuntos pertinentes à energia solar fotovoltaica, como as tecnologias existentes, componentes e modelos de inserção em edificações. E, por fim, são descritos parâmetros associados à eficiência energética de edificações, com metodologias para o desenvolvimento de protetores solares e estudos de aplicação do balanço energético em edifícios para identificar o desempenho energético destes.

2.1 ENERGIA SOLAR

A energia solar é considerada uma fonte intermitente e resultante da fusão nuclear dos átomos de hidrogênio em hélio, em uma radiação de cerca de $3,86 \cdot 10^{26}$ W, atingindo uma faixa do espectro eletromagnético que, na atmosfera terrestre, situa-se entre os comprimentos de onda da luz visível ao infravermelho. Ainda, a radiação solar é uma fonte de energia primária e que subsidia outras fontes energéticas, como a geração de hidroeletricidade, ao permitir a configuração do ciclo das chuvas, e na geração eólica, ao favorecer a circulação de ar na atmosfera para a conversão em energia cinética. Por fim, as fontes energéticas como petróleo, carvão, gás natural e matéria orgânica, também, são dependentes da energia solar; já que esta foi a fonte do desenvolvimento dos componentes vegetais e animais que caracterizam o material combustível para a sua geração (PEREIRA et al., 2017, PINHO; GALDINO, 2014).

Ainda, atuando na geração de energia térmica e elétrica, como em concentradores solares térmicos para altas temperaturas e, principalmente, por sistemas fotovoltaicos, a energia solar é uma fonte fundamental para a expansão da matriz energética, diversificando as fontes de geração e explorando complementaridades para as fontes predominantes. Como exemplo, a utilização da energia solar como fonte alternativa de geração permite a manutenção do volume de água em reservatórios de hidrelétricas em períodos de baixo índice de chuvas. Também, nas unidades de consumo, o uso da energia solar para aquecimento da água para fins domésticos, substituindo dispositivos de aquecimento elétrico, é uma aplicação popular e maior viabilidade econômica. Assim, segundo o Painel Intergovernamental sobre Alterações Climáticas, a energia solar direta está associada como componente passivo em diretrizes de arquitetura bioclimática e ativo em processos de aquecimento e refrigeração (IPCC, 2011).

2.1.1 Radiação solar

A radiação solar que incide na superfície terrestre é afetada por fatores astronômicos e processos físicos que ocorrem na atmosfera. Durante a translação da Terra em torno do Sol, a distância entre estes varia de $1,47 \cdot 10^8$ km a $1,52 \cdot 10^8$ km, tornando os níveis de radiação solar entre os valores de 1.325 W/m^2 e 1.412 W/m^2 , onde a média de 1.366 W/m^2 é definida como a constante solar (NREL, 2017).

Então, ao incidir sobre a atmosfera terrestre, a radiação é afetada pelos gases atmosféricos em processos de absorção e espalhamento. No fenômeno de absorção, as moléculas de ozônio (O_3), vapor d'água, oxigênio (O_2) e dióxido de carbono (CO_2) reduzem a irradiância incidente para valores próximos de 1.000 W/m^2 ao meio-dia, horário de maior altura solar, em condições de céu claro. Apesar disso, já foram mensurados, no Brasil, valores para irradiância global horizontal de até 1.822 W/m^2 (RÜTHER; NASCIMENTO; CAMPOS, 2017).

O dióxido de carbono constitui, aproximadamente, 0,03% dos gases atmosféricos e possibilita a estabilidade da temperatura na superfície terrestre decorrente do efeito estufa. Nesse processo, a faixa do infravermelho no espectro da radiação incidente é absorvida e, assim, impede que uma parcela da energia atmosférica seja dissipada no espaço. O vapor d'água que, em regiões tropicais, corresponde a 4% dos gases atmosféricos e, em regiões polares e desérticas, à 1% também absorve a radiação eletromagnética na faixa do infravermelho (IPCC, 2015).

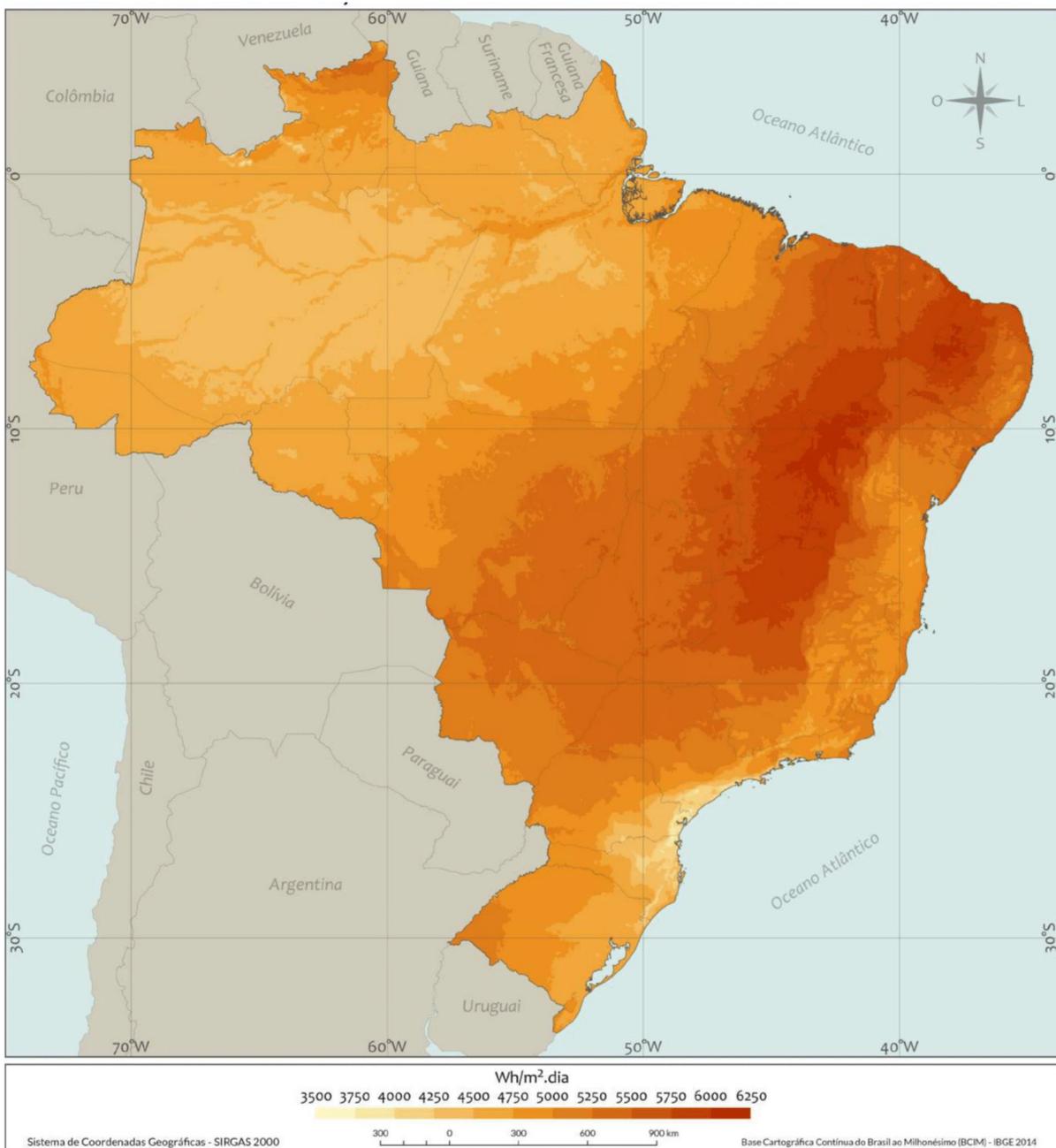
Por sua vez, o ozônio, concentrado na estratosfera em níveis e áreas não uniformes, absorve a radiação solar na faixa do ultravioleta durante o processo de decomposição em gás oxigênio (O_2), impedindo-a que alcance a superfície terrestre. Ainda, as partículas de aerossol suspensas no ar, em estado líquido ou sólido, interferem nos níveis da radiação solar, reduzindo seus valores entre $0,2 \text{ W/m}^2$ e $1,5 \text{ W/m}^2$ e promovendo o resfriamento da atmosfera. Por fim, as nuvens são os componentes que apresentam a maior influência nos níveis da radiação solar incidente. Isso ocorre devido às propriedades ópticas das gotículas de água ou cristais de gelo, com distribuição e tamanhos distintos, que promovem a difusão da radiação solar sobre a superfície terrestre (PEREIRA et al., 2017; IPCC, 2015).

Assim, a irradiância que atinge a superfície terrestre é composta pelas formas *direta*, quando a radiação não sofreu os processos de absorção e espalhamento, e *difusa*, com origem nas demais direções e decorrentes do espalhamento dos gases atmosféricos. Para a irradiação resultante na superfície, a *irradiância global horizontal* se refere à energia total incidente por unidade de área sobre um plano horizontal na superfície terrestre, sendo o somatório das

irradiâncias direta e difusa horizontais. Por sua vez, a irradiância no plano inclinado é a energia total incidente por unidade de área sobre um plano com inclinação idêntica à latitude local (PEREIRA et al., 2017).

A figura 1 ilustra o total diário da irradiação em um plano inclinado na latitude sobre o território brasileiro.

Figura 1 – Total diário da irradiação no plano inclinado na latitude



Fonte: Pereira et al. (2017).

O mapa da irradiação em um plano inclinado demonstra o potencial em geração fotovoltaica nas distintas regiões brasileiras considerando suas características locais como geografia e condições climáticas. Conforme estudos de Santos et al. (2012), ao avaliar o potencial de radiação solar em cidades brasileiras de diferentes latitudes, concluiu-se que a maior incidência de irradiação sobre os módulos fotovoltaicos ocorre quando estes apresentam inclinação próxima ao ângulo da latitude local devido à inclinação no globo terrestre durante a órbita solar.

Conforme Pereira et al. (2017), nos meses de verão, os estados do sul e sudeste apresentam maior incidência de irradiação e, assim, maior potencial para a geração de energia fotovoltaica, coincidindo com a maior demanda energética observada nessas regiões no período. Além disso, o Brasil apresenta elevados índices de irradiação solar em todo seu território, o que permite ampliar o potencial para geração energética fotovoltaica e satisfazer parte da demanda do Sistema Interligado Nacional.

2.2 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

A primeira estrutura fotovoltaica foi desenvolvida em 1876, tendo, somente em 1956, sua produção industrial devido à expansão da área eletrônica. Esta tecnologia apresentou, inicialmente, suporte no desenvolvimento de fontes de energia para sistemas isolados⁵, alavancando-se com o desenvolvimento da tecnologia espacial, como alternativa de menor custo, peso e segurança para fonte energética em equipamentos eletroeletrônicos no espaço. No final da década de 1990, os sistemas fotovoltaicos apresentaram avanços significativos, sobretudo por políticas pautadas no incentivo a fontes energéticas de menor impacto ambiental, como no tratado internacional Protocolo de Kyoto (1997) que propunha, entre outros, a redução na emissão de gases do efeito estufa (VALLÊRA; BRITO, 2006).

Segundo a Agência Internacional de Energia, no acordo colaborativo *Photovoltaic Power Systems Programme* (IEA PVPS), expresso pelo relatório *Snapshot Of Global Photovoltaic Markets* (2020), no ano de 2019, foram instalados 114,9 GW de potência em sistemas fotovoltaicos, aproximando-se de um acumulado de 657 GW de potência instalada, por esta fonte, no mundo. No período, a China apresentou uma expansão na capacidade instalada de 30,1 GW, atingindo o acumulado de 204,7 GW e representando cerca de um terço da potência global instalada em sistemas fotovoltaicos, embora tenha demonstrado uma redução

⁵ Sistemas desvinculados da rede elétrica. Normalmente, necessitam de dispositivos de armazenamento para acumulação da carga gerada e distribuição em períodos de geração insuficiente.

de 44% na implementação em relação ao ano-base de 2018. Na sequência, considerando a capacidade instalada acumulada, a União Europeia apresentou 137,7 GW em potência instalada, seguida por Estados Unidos (75,9 GW), Japão (63,0 GW), Alemanha (49,2 GW), Índia (42,8 GW), enquanto o Brasil, na décima sexta posição, apresentou potência acumulada de 4,5 GW. Os dez países que apresentaram maior potência acumulada em energia solar fotovoltaica representaram 72% da capacidade mundial (IEA, 2020).

Segundo o relatório, verificou-se uma contribuição dos sistemas fotovoltaicos para a descarbonização da matriz energética, estimando a redução das emissões de 720 milhões de toneladas de dióxido de carbono equivalente (CO₂eq). Em 2019, os sistemas fotovoltaicos reduziram 1,7% da emissão global de CO₂ e 5,3% da eletricidade relacionada às emissões. Este quantitativo foi considerado com base nas emissões que teriam ocorrido com a mesma quantidade de eletricidade gerada por diferentes fontes energéticas, além de considerar as emissões originadas durante o ciclo de vida dos sistemas fotovoltaicos (IEA, 2020).

Ainda, além de reduzir as emissões de CO₂, fornecendo alternativa para a geração energética renovável e de menor impacto ambiental, a tecnologia fotovoltaica permite estimular a inserção de novas fontes energéticas para enfrentar as mudanças climáticas. De acordo com a IEA, os sistemas fotovoltaicos são fonte de eletricidade mais competitiva em alguns segmentos do mercado e, em 2019, representou, aproximadamente, 59% da produção total de eletricidade em novas instalações com fontes renováveis (IEA, 2020).

No Brasil, segundo a Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR), em 2020, a potência instalada com fonte solar fotovoltaica atingiu 7,47 GW, onde a geração centralizada, em instalações para distribuição, apresentou 3,1 GW (41%) e a geração distribuída próxima às unidades de consumo, 4,37 GW (59%). O acumulado correspondeu a uma ampliação de 62,9% quando comparado à potência instalada em 2019, que totalizou 4,58 GW, e representa cerca de 1,6% da matriz elétrica brasileira (ABSOLAR, 2021a).

Na geração distribuída no país, a energia solar fotovoltaica correspondeu à 97,2% da potência instalada no país em fevereiro de 2021. Quanto ao número de instalações, aproximadamente 74,0% corresponderam a sistemas instalados em residências, 16,3% em edificações comerciais e de serviços, 7% no setor rural, 2,4% em indústrias e 0,44% no setor público. Em relação à potência instalada, há uma distribuição mais equitativa, com o 39,2% correspondendo ao setor residencial, 37,8% ao setor comercial e de serviços, 13,0% ao setor rural, 8,86% ao setor industrial e 1,32% ao setor público (ABSOLAR, 2021b).

2.2.1 Sistemas fotovoltaicos

O sistema fotovoltaico é composto por componentes geradores de energia, dispositivos de condicionamento de potência e equipamentos de armazenamento (quando em situações de instalação isolada). Os componentes geradores são definidos pelos módulos fotovoltaicos, composto por células fotogeradoras, bem como equipamentos complementares, como cabos e estruturas de apoio. Os dispositivos de condicionamento de potência são caracterizados por qualificar o fornecimento da energia gerada conforme o uso final; sendo composto pelos inversores, e, por vezes, conversores, controladores de carga, dispositivos de seguimento de ponto de potência máxima, mecanismos protetores e de controle. Enfim, os equipamentos de armazenamento, são alternativas para acumulação da carga elétrica gerada, sendo as baterias, com funcionamento eletroquímico, o equipamento de armazenamento predominante em sistemas fotovoltaicos isolados em função de sua viabilidade e eficiência em acumulação (PINHO; GALDINO, 2014).

2.2.1.1 Células fotovoltaicas

A energia solar fotovoltaica compreende a obtenção de energia elétrica a partir da conversão direta da luz através de um dispositivo composto por material semicondutor (célula fotovoltaica), em um processo denominado *efeito fotovoltaico*. Entre os elementos semicondutores, destacam-se os pertencentes aos grupos 14 a 16 da tabela periódica, como o Carbono (C), Silício (Si), Germânio (Ge), Arsênio (As), Fósforo (P), Selênio (Se) e Telúrio (Te), além de compostos como o Arsenieto de Gálio (GaAs), Nitreto de Gálio (GaN) e Telureto de Cádmio (CdTe) (PINHO; GALDINO, 2014).

As tecnologias aplicadas na produção de células fotovoltaicas são distintas em três gerações. A primeira geração é composta pelas células em silício monocristalino (m-Si) e silício policristalino (p-Si), que, em 2019, representaram 94,52 % da geração energética fotovoltaica no mundo. O silício monocristalino (m-Si) é obtido, principalmente, a partir do método de Czochralski⁶ (Si-Cz), criando um material homogêneo; enquanto o silício policristalino (p-Si) é originado de lâminas seccionadas de cristais de silício com espessuras de, aproximadamente, 0,2 mm. Atualmente, as células de silício cristalino são comercializadas em tonalidades distintas, onde as cores são formadas pela variação na composição ou espessura da camada antirreflexiva, no entanto, este processo implica na redução de sua eficiência (ISE, 2021; LUQUE; HEGEDUS, 2003; PINHO; GALDINO, 2014).

⁶ Obtenção, com elevada pureza, a partir de do silício policristalino fundido (LUQUE; HEGEDUS, 2003).

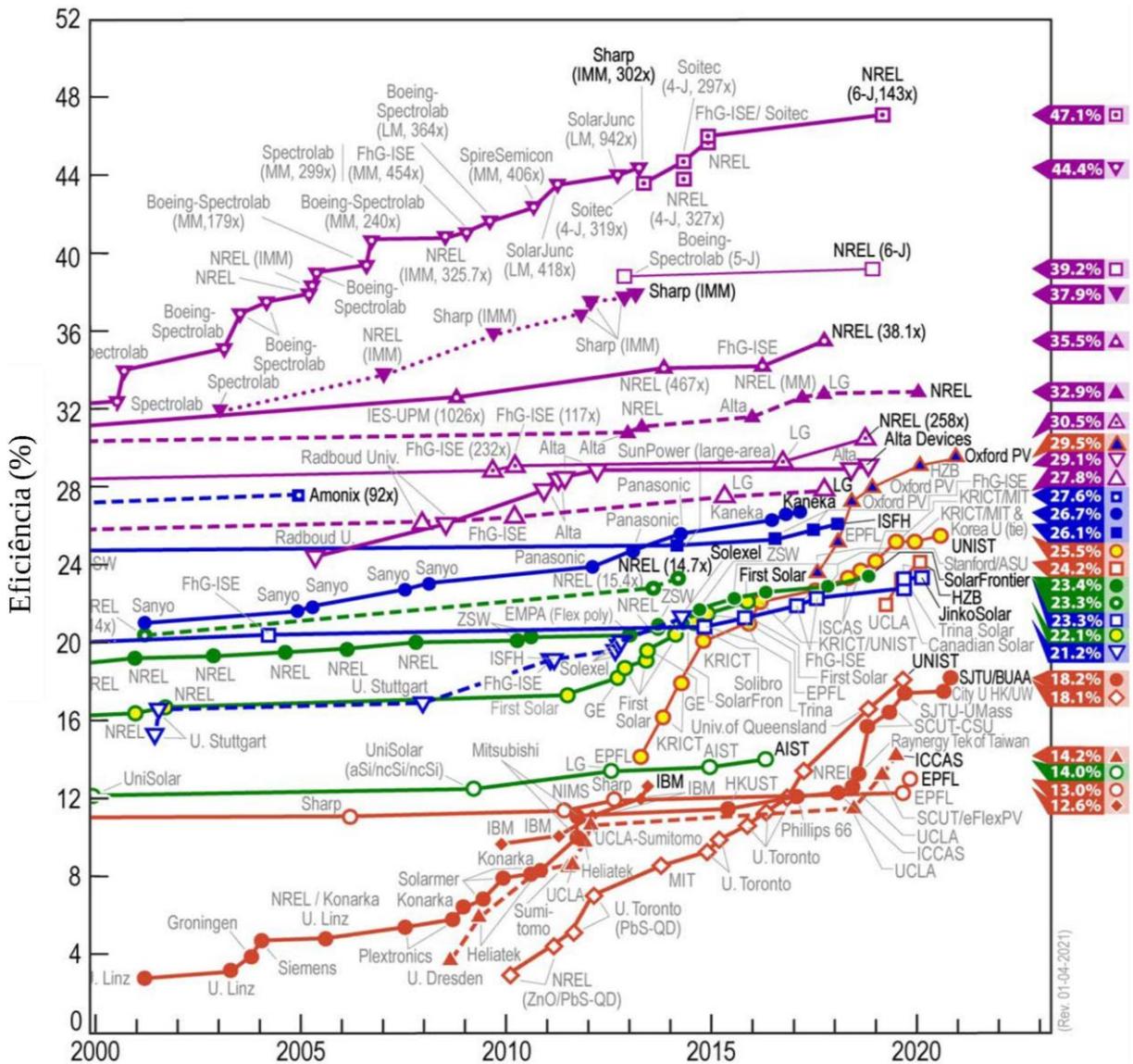
A segunda geração é composta pelos filmes finos, compreendendo as células de silício amorfo (a-Si), disseleneto de cobre e índio (CIS), disseleneto de cobre, índio e gálio (CIGS) e telureto de cádmio (CdTe). Os filmes finos apresentam alta absorção óptica, permitindo o desenvolvimento de células fotovoltaicas de baixa espessura e aplicáveis em superfícies extensas e flexíveis como em elementos arquitetônicos e equipamentos em geral. Apesar disso, esta geração fotovoltaica apresenta menor inserção no mercado devido a dificuldades associadas à disponibilidade de materiais e menor rendimento das células, visto que módulos silício amorfo apresentam eficiências de conversão de, aproximadamente, 10,2%, enquanto módulos fabricados em telureto de cádmio (CdTe) apresentam eficiência de até 21,0% (GREEN et al., 2020; LUQUE; HEGEDUS, 2003).

Por fim, a terceira geração é composta por células com composições que buscam a redução de custos de geração e ampliação da eficiência na conversão de irradiação em energia elétrica, destacando as células de multijunção, células concentradas (CPV – *Concentrated Photovoltaics*) e células sensibilizadas por corante (DSSC – *Dye-Sensitized Solar Cell*). As células fotovoltaicas concentradas são compostas sistemas ópticos de lentes e espelhos para concentrar a radiação solar incidente e ampliar a corrente elétrica em pequena área de célula, permitindo conjuntos com elevada eficiência. As células fotovoltaicas de multijunção são compostas pela deposição de películas de diferentes materiais sobre um material semiconductor, permitindo absorver distintas partes do espectro solar e atingir eficiências acima de 40%. As células sensibilizadas por corantes, por sua vez, são constituídas por substratos de vidros com filmes semicondutores transparentes imersos em solução condutora de corante com contato metálico, possibilitando alcançar eficiências de conversão superiores a 10% (GRÄTZEL, 2003; GREEN et al., 2020; PINHO; GALDINO, 2014).

O desenvolvimento de pesquisas referentes às tecnologias para sistemas fotovoltaicos possibilita, entre outros, a construção de novos modelos geradores e métodos de fabricação para ampliar a eficiência da incidência solar em energia elétrica, reduzindo custos de geração e permitindo novos entendimentos sobre a aplicação destes sistemas. Também, a inserção de novos materiais para as células fotogeradoras permite a redução do emprego de materiais poluentes, bem como o desenvolvimento de processos de fabricação com menor impacto ambiental.

A figura 2 apresenta a evolução da eficiência em células fotovoltaicas obtidas através de pesquisas em laboratórios, a partir de 2000, identificando o melhor desempenho obtido por células de multijunção, que atingiram, aproximadamente, 47,1% de eficiência no ano de 2019.

Figura 2 - Evolução da eficiência de células fotovoltaicas em laboratórios



- | | | |
|---|---|--|
| <p>CÉLULAS DE MULTIJUNÇÃO</p> <ul style="list-style-type: none"> ▽ Tripla-junção (concentrado) ▼ Tripla-junção (não concentrado) ▲ Dupla-junção (concentrado) △ Dupla-junção (não concentrado) □ Quatro junções ou mais (conc.) □ Quatro junções ou mais (não conc.) <p>JUNÇÃO SIMPLES GaAs</p> <ul style="list-style-type: none"> △ Cristal simples ▲ Concentrado ▽ Filmes finos de cristal | <p>CÉLULAS CRISTALINAS Si</p> <ul style="list-style-type: none"> □ Cristal simples (concentrado) ■ Cristal simples (não concentr.) □ Multicristais ■ Heteroestruturas de Silício ▽ Filmes finos de cristal <p>FILMES-FINOS</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ CIGS (concentrado) ● CIGS ● CdTe ○ Amorfo Si:H | <p>EMERGENTES</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ Células sensib. por corantes ● Células de Perovskita ▲ Perovskita/Si ● Células orgânicas (vários tipos) ▲ Células orgânicas em conjunto ◆ Células inorgânicas (CZTSSe) ◇ Células do ponto quântico □ Perovskita/CIGS |
|---|---|--|

Fonte: (NREL, 2021).

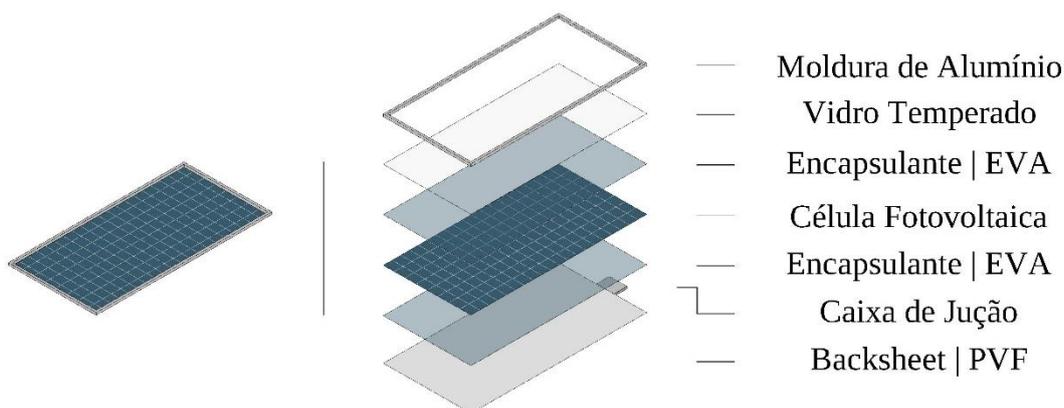
Pela figura, é verificado um avanço nas pesquisas com células orgânicas, iniciadas no início da década de 2000, apresentando a maior evolução em eficiência energética por período de tempo. No entanto, as células fotovoltaicas pertencentes à primeira geração, e que representam o predomínio do mercado global, possuem menor crescimento em eficiência energética, atingindo cerca de 27,6% de eficiência no ano de 2018.

2.2.1.2 Módulos fotovoltaicos

No conjunto dos componentes geradores, o módulo fotovoltaico é o dispositivo que permite a conversão de energia solar em energia elétrica, sendo constituído por células fotovoltaicas configuradas a produzir tensão e corrente elétrica suficiente para o uso adequado da energia gerada. Os módulos fotovoltaicos com células em silício são delimitados por uma superfície de vidro temperado e antirreflexivo, a fim de ampliar a absorção de irradiação solar e desenvolver proteção à impactos mecânicos, e moldura metálica para garantir a rigidez da estrutura. Em seu interior, as células fotovoltaicas de silício são encapsuladas por películas de etileno acetato de vinila (EVA), com comportamento flexível e translúcido para proteger as células do desgaste promovido pelos raios UV, temperaturas elevadas e umidade. Na parte inferior, uma película de fluoreto de polivinila (PVF) compõe o backsheet, atuando na proteção dos componentes internos e isolamento elétrico do módulo; enquanto, em módulos semitransparentes (*dual glass*), a película é substituída por uma lâmina de vidro. Por fim, a caixa de junção é o dispositivo que realiza as conexões elétricas entre as células e os demais módulos do conjunto fotovoltaico (LUQUE; HEGEDUS, 2003).

A figura 3 apresenta a estrutura de módulo fotovoltaico de silício monocristalino.

Figura 3 - Estrutura do módulo fotovoltaico



Fonte: Adaptado de Luque e Hegedus (2003).

No Brasil, os módulos fotovoltaicos comercializados são avaliados segundo os Requisitos de Avaliação da Conformidade (RAC) do INMETRO. Entre os parâmetros de ensaio, os módulos são avaliados segundo exposição à irradiância solar de 1.000 W/m^2 , em distribuição espectral padrão para AM 1,5 (coeficiente de Massa de Ar) e temperatura de células fotovoltaicas de $25 \text{ }^\circ\text{C}$ (estes parâmetros constituem as condições padrões de teste – *Standard Test Conditions*, STC). A partir disso, é avaliada a eficiência (η) dos módulos, descrita como a relação entre a potência elétrica máxima gerada e a irradiação incidente (1.000 W/m^2), originando a etiquetagem, segundo o modelo do PBE, para níveis de eficiência energética (BRASIL, 2011).

No módulo fotovoltaico, a irradiância solar e a temperatura das células influenciam no desempenho individual dos módulos, visto que o aumento da incidência de radiação solar provoca o aumento da corrente elétrica gerada, implicando correntes elétricas distintas entre módulos. Nesse sentido, em situações de desequilíbrio entre os módulos - como sombreamento parcial sobre o sistema, danificação de células ou sedimentação de resíduos -, a corrente elétrica de uma string (conjunto de módulos em série), será limitada ao valor da corrente elétrica inferior identificada no módulo afetado (HECKTHEUER, 2001).

A redução da corrente elétrica poderá se difundir para os demais módulos do conjunto, ocasionando perda de potência de geração e possível danificação do sistema. Em módulos que apresentam capacidade limitada de geração em função de um evento específico sobre uma célula, a potência elétrica gerada que não foi consumida é dissipada sobre o próprio módulo – por vezes, em um número reduzido de células – sob a forma de calor, originando um fenômeno denominado hot-spot. Então, para evitar este fenômeno, que pode danificar o módulo com a ruptura do vidro encapsulante ou a fusão de polímeros e metais, são utilizados dispositivos denominados diodos de desvio (ou *bypass*) nas caixas de junção, permitindo o trânsito da corrente elétrica por um meio alternativo. Quando a célula apresenta desempenho similar às demais, o diodo de desvio se apresenta inversamente polarizado, impedindo seu uso para circulação de corrente elétrica (HECKTHEUER, 2001).

2.2.2 Instalações fotovoltaicas

Os sistemas fotovoltaicos podem ser classificados, segundo sua forma de operação, em *sistema fotovoltaico isolado (SFI)* e *sistema fotovoltaico conectado à rede (SF CR)*. Os sistemas fotovoltaicos isolados, que necessitam de equipamentos de armazenamento para a carga gerada e distribuição em períodos de geração insuficiente, podem estar vinculados à outras fontes de energia, configurando os *sistemas fotovoltaicos híbridos (SFH)*, sendo presente em localidades

remotas, essencialmente rurais, ausentes de rede elétrica. Por sua vez, os sistemas fotovoltaicos conectados à rede são caracterizados pela emissão da energia gerada para a rede elétrica, sendo, por isso, necessário adequar o sistema à tensão de operação da rede, e compreendem os sistemas aplicados em áreas urbanizadas (PINHO; GALDINO, 2014).

Os sistemas fotovoltaicos isolados subdividem-se quanto à sua capacidade de atendimento, podendo ser classificados como *individuais* – quando a geração de energia atende uma unidade consumidora – e em *microsistema* – quando a geração é compartilhada entre unidades consumidoras próximas. A configuração destes sistemas foi regulamentada pela ANEEL, de acordo com a Resolução Normativa N° 493/2012, que “estabelece os procedimentos e as condições de fornecimento por meio de Microsistema Isolado de Geração e Distribuição de Energia Elétrica (MIGDI) ou Sistema Individual de Geração de Energia Elétrica com Fonte Intermitente (SIGFI)” (ANEEL, 2012).

Nos sistemas fotovoltaicos conectados à rede, a energia gerada é injetada na rede elétrica e utilizada pelas unidades consumidoras a partir do sistema de distribuição. A energia emitida para a rede é classificada segundo a potência instalada no sistema, sendo distintas em sistemas de microgeração e minigeração distribuídas. Segundo a Resolução Normativa N° 687/2015, a microgeração distribuída é uma “central geradora de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 75 kW e que utiliza cogeração qualificada ou fontes renováveis de energia elétrica, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras”. Enquanto, segundo a Resolução Normativa N° 786/2017, a minigeração distribuída compreende a geração de energia elétrica com potência instalada superior a 75 kW e menor ou igual a 5 MW nas mesmas condições (ANEEL, 2012; 2015b; 2017).

Para o desempenho dos sistemas de microgeração e minigeração distribuída, a ANEEL, ainda, estabelece o modelo para compensação de energia elétrica. De acordo com a Resolução Normativa N° 687/2015, no modelo, a “energia ativa injetada por unidade consumidora com microgeração ou minigeração distribuída é cedida, por meio de empréstimo gratuito, à distribuidora local e posteriormente compensada com o consumo de energia elétrica ativa”.

Ainda, os sistemas conectados à rede podem estar organizados na forma de *centrais geradoras fotovoltaicas (UFV)*. Estas são instalações de geração de energia elétrica de grande porte que fornecem energia para fins de distribuição, permitindo uma complementação energética e reduzindo os picos de demanda no sistema elétrico. A Resolução Normativa N° 676/2015 estabelece os requisitos necessários para exploração e alteração da capacidade instalada em centrais geradoras fotovoltaicas, bem como os procedimentos para registro de centrais geradoras entre outras providências (ANEEL, 2015a).

2.2.2.1 Sistemas fotovoltaicos em edificações

Através da integração entre os sistemas geradores e as unidades de consumo, é possível configurar uma melhor apropriação do uso da energia ao reduzir perdas com transmissão e distribuição a partir da rede elétrica. Os sistemas fotovoltaicos integrados em edificações, comumente inseridos em sistemas de minigeração e microgeração distribuída, pertencem a uma classe em expansão. Eles podem substituir componentes construtivos e pertencer ao plano de decisões projetuais, ou ainda, aplicados em superfícies, sobrepondo-se a estruturas preexistentes (ZOMER et al., 2012).

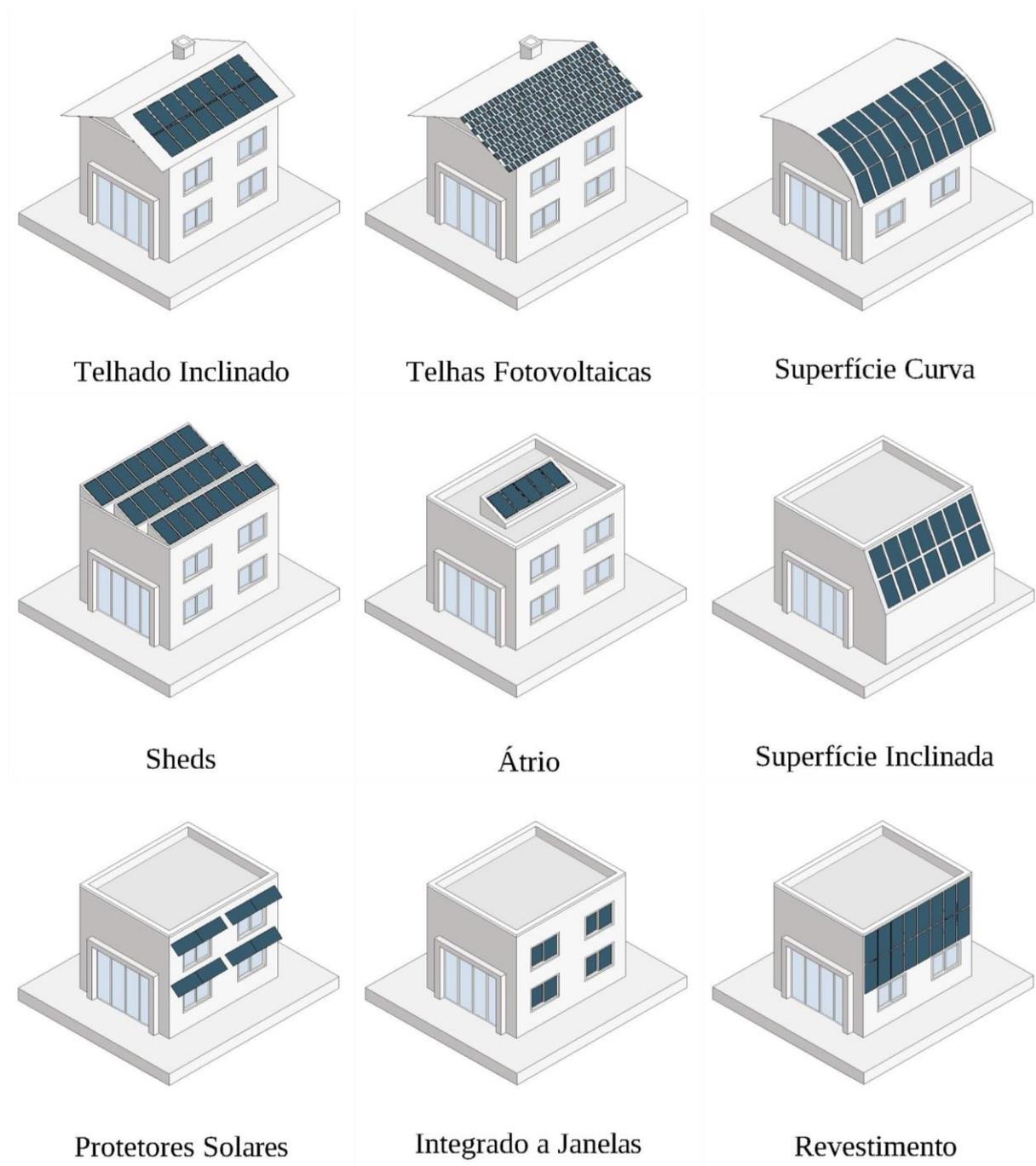
Os módulos fotovoltaicos foram desenvolvidos para a aplicação externa e exposição à diversos fatores climáticos a longo prazo, o que permite credenciá-los ao uso como componentes da envoltória de edificações. Quanto ao posicionamento, os componentes fotovoltaicos podem ser inseridos sob ambientes existentes – como em superfícies de vedação e elementos arquitetônicos – permitindo sombreamento no interior de espaços ou ampliando a inércia térmica de seus materiais, reduzindo os ganhos térmicos do meio externo. Também, com o desenvolvimento da tecnologia, é possível fazer uso de módulos fotovoltaicos com diferentes tonalidades, formas e grau de flexibilidade, compondo elementos estéticos em edifícios (ZOMER et al., 2012).

Sistemas fotovoltaicos integrados em edificações (*Building Integration Photovoltaics - BIPV*) são conjuntos geradores que apresentam funcionalidades adicionais, como na substituição de componentes convencionais em uma edificação, revestindo fachadas, substituindo coberturas, entre outros. Em especial, nas superfícies envidraçadas, o sistema permite vincular permeabilidade visual, no interior da edificação, e geração de energia de menor impacto ambiental (RÜTHER, 2004).

Os sistemas fotovoltaicos aplicados em edificações (*Building Applied Photovoltaics – BAPV*), por sua vez, são componentes sobrepostos à superfície de edifícios. Assim, a geração de energia neste sistema é dependente de orientações e inclinações da estrutura preexistente, podendo apresentar potencial de geração limitado. Nesta definição, a aplicação mais popular ocorre sobre a cobertura de edificações, especialmente por adequar-se à inclinação dos telhados e apresentar maior exposição à radiação solar. Ainda, entre outros modelos de inserção, podem ser aplicados como protetores solares para fins de sombreamento, na forma de fachadas ventiladas para a manutenção do conforto ambiental e sobre outras superfícies de vedação (RÜTHER, 2004).

Constituindo elementos da envoltória nos edifícios, a utilização de módulos fotovoltaicos deve se tornar um condicionante projetual, a fim de que o projetista possa vincular o potencial de geração elétrica das estruturas às possibilidades arquitetônicas que os módulos propõem. A figura 4 apresenta modelos de inserção de módulos fotovoltaicos em edificações.

Figura 4 - Modelos de inserção de módulos fotovoltaicos em edificações



Considerando as características geométricas e as propriedades físicas dos módulos, pesquisadores têm investigado o desempenho dos conjuntos fotovoltaicos como elementos promotores da eficiência energética em edificações. Nesse sentido, pesquisas têm explorado o emprego dos módulos fotovoltaicos como componentes passivos para a redução do consumo energético através do controle de ganhos térmico nos ambientes.

Dobrzycki et al. (2020) avaliaram o uso de módulos fotovoltaicos como revestimentos em paredes de uma edificação industrial, na Polônia, para os parâmetros de geração energética e desempenho térmico. Entre os resultados, verificaram que a composição promoveu melhorias para o conforto ambiental da edificação, especialmente, com o aumento da resistência térmica. Ainda, com a diminuição no consumo de gás nos sistemas de aquecimento da edificação e a geração de eletricidade pelo sistema, foi estimada uma redução de três anos no tempo de retorno do investimento quando comparada às situações em que os módulos não estariam aplicados sobre as paredes.

Jovanovic et al. (2017) simularam o desempenho de módulos fotovoltaicos integrados a paredes *Trombe* de edificações em cidades da China e Montenegro. Nesse sistema, os módulos fotovoltaicos e a parede externa da edificação delimitaram uma câmara de ar, permitindo o acúmulo de energia térmica (pela irradiação solar incidente nos módulos) e transmitindo-a para os ambientes internos através das paredes. Entre os resultados obtidos, as perdas na geração de eletricidade promovidas pela temperatura de operação dos módulos foram consideradas irrelevantes, quando comparadas às perdas devido ao ângulo de inclinação do conjunto fotovoltaico.

Por fim, Rodrigues, Carlo e Oliveira (2018) desenvolveram um método para simular a influência térmica de sistemas fotovoltaicos semitransparentes integrados a distintas configurações de esquadrias. Através de um software, verificaram que os sistemas promoveram um aumento na temperatura superficial das janelas mais relevante que a variação da eficiência elétrica dos sistemas fotovoltaicos.

2.3 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

A eficiência energética pode ser definida como o fator que representa o potencial de uma edificação em expressar conforto térmico, visual e acústico com baixo consumo energético. Então, comparativamente, uma edificação tem maior eficiência que outra quando permite condições ambientais equivalentes com menor consumo de energia (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014).

A partir da crise energética no início dos anos 2000, no Brasil, deflagrada com o colapso temporário no suprimento de energia elétrica em determinadas regiões do país, foi verificada uma inconsistência entre a geração e o consumo de energia. Partindo disso, uma série de resoluções a favor do controle do consumo energético foi promovida; quando, em outubro de 2001, foi promulgada a Lei nº 10.295 dispendo sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia, solicitando o desenvolvimento de mecanismos promotores de eficiência energética nas edificações construídas (BRASIL, 2014a).

Assim, o Decreto Federal nº 4.131, de fevereiro de 2002, determinou que os órgãos públicos adequassem suas metas de consumo de energia elétrica, bem como estabelecessem o diagnóstico de soluções projetuais para a redução do consumo. Posteriormente, foram criadas normatizações como a ABNT NBR 15.220:2005 (Desempenho Térmico de Edificações) e a ABNT NBR 15.575:2010 (Edifícios Habitacionais de até Cinco Pavimentos – Desempenho), que orientam a construção de edificações segundo critérios de eficiência energética.

Em 2009, passou a ser aplicado o Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos (RTQ-C), com o objetivo de incentivar o desenvolvimento de projetos com alternativas eficientes para iluminação, ventilação, refrigeração, aquecimento e uso racional da água, de modo a obter a Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE). A etiquetagem classifica o nível de eficiência energética do edifício a partir da avaliação dos componentes da envoltória, sistemas de iluminação e sistemas de condicionamento de ar, emitindo uma classificação final que varia de A (maior eficiência) a E (menor eficiência). Em outubro de 2010, o Regulamento foi adaptado para setores residenciais (RTQ-R) (BRASIL, 2010, 2014a).

Além disso, a Instrução Normativa nº 2, de 4 de junho de 2014, estabeleceu regras para a aquisição de equipamentos e uso da ENCE em edificações públicas federais novas ou que recebam *retrofit*. Nas aquisições ou locações de aparelhos consumidores de energia, foi exigida a classe A de eficiência energética, bem como os projetos de edificações públicas devem ser desenvolvidos buscando a ENCE Geral de Projeto classe A e, em sua execução, a ENCE Geral da Edificação Construída classe A. Em obras de *retrofit*, a Instrução exige a obtenção da ENCE Parcial da Edificação Construída classe A para os sistemas individuais de iluminação e condicionamento de ar, excetuando condições de inviabilidade técnica ou econômica justificadas (BRASIL, 2014b). Segundo o Ministério do Meio Ambiente (BRASIL, 2014a), as edificações públicas apresentam possibilidades para a redução do consumo de energia como no uso de equipamentos eficientes, atribuição de elementos arquitetônicos, educação dos usuários e sistematização do uso dos espaços.

A Portaria nº 42, em 24 de fevereiro de 2021, aprovou a Instrução Normativa Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas (INI-C), aperfeiçoando o RTQ-C e especificando os critérios e métodos para a classificação das edificações. Entre as alterações, a avaliação do desempenho energético passou a comparar o consumo de energia real do edifício com equivalências para a classificação energética D, em edificações comerciais, de serviços e públicas, e C, em residenciais. Dessa forma, a nova etiqueta fornece informações sobre o consumo em energia primária anual e mensal, além de possibilitar a certificação de edificações de balanço energético quase nulo. (BRASIL, 2021).

Para Lamberts, Dutra e Pereira (2014), devem ser incluídas perspectivas de desempenho energético no desenvolvimento do projeto arquitetônico, visto que decisões projetuais implicam na satisfação do conforto ambiental e desempenho térmico e visual na edificação. Aspectos projetuais - como os componentes da envoltória, orientação solar, dimensionamento e posição de esquadrias, sistemas de iluminação e condicionamento de ar - permitem reduzir custos em manutenção, equipamentos e infraestrutura adicional, favorecendo a relação do edifício com o espaço construído devido à redução na dissipação de calor e ruído (BRASIL, 2014a).

Segundo Bastide et al. (2006), no desenvolvimento do projeto, a não atribuição de características climáticas regionais pode interferir na eficiência energética da edificação, sobretudo, pela necessidade de dispositivos termorreguladores como mecanismo de correção do conforto ambiental. Nesse sentido, estratégias bioclimáticas poderão indicar, ao projeto, o uso de alternativas passivas como dispositivos para gerenciamento das variáveis externas sobre o ambiente; como no controle da incidência solar, segundo necessidade de sombreamento ou para fonte de calor, obstruções para a redução de perdas térmicas por ventilação, entre outros.

2.3.1 Protetores solares

Em regiões de clima tropical e subtropical, o controle da incidência solar é um parâmetro a ser considerado em projetos arquitetônicos. Soluções passivas devem explorar a irradiação solar, obstruindo-a em períodos em que é causa para desconforto térmico e permitindo sua incidência quando é fonte para aquecimento desejado. De acordo com Lamberts, Dutra e Pereira (2014), a radiação solar é uma das principais causas para os ganhos térmicos em edificações e, sendo assim, dispositivos para proteção solar deveriam estar inseridos na envoltória para atender as necessidades de sombreamento.

Então, foram elaborados métodos de avaliação de protetores solares como ferramentas projetuais para estimar a contribuição destes na eficiência energética de edifícios. Pereira e Souza (2008) desenvolveram um método baseado na zona de conforto térmico em ambientes

para determinar a necessidade de aplicação de protetores solares em aberturas de edificações. O estudo considera dados climatológicos que possibilitaram o desenvolvimento de temperaturas neutras mensais e limites de aceitação da radiação solar incidente sobre as aberturas nestas localidades. Assim, foram obtidas diretrizes para o dimensionamento dos protetores solares em função dos períodos onde foram considerados necessários, estimando a redução do consumo por condicionamento de ar para refrigeração decorrente da sobrecarga térmica nos ambientes internos de edificações.

Como critérios para definição dos horários de proteção solar, as autoras utilizaram dados relativos à latitude local, incidência da radiação solar sobre as fachadas, uso da edificação, clima das cidades e aclimação da população e área das aberturas. Os dados são referentes às normais climatológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), entre 1961 e 1990, e originaram dados horários da temperatura do ar para os meses do ano, estabelecendo o cálculo da temperatura neutra mensal, que representa o centro da zona de conforto térmico.

A proposta de metodologia desenvolvida no método da Temperatura Neutra (TN) permite a determinação adequada das situações onde os sistemas de proteção solar são necessários. Este modelo, anexado ao Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética em Residências (RTQ-R), favorece a identificação dos limites das zonas de conforto térmico, promovendo o desenvolvimento de protetores eficientes para períodos de temperatura em que a incidência de radiação solar é indesejável, sem obstruir a incidência em períodos com temperaturas abaixo da zona de conforto térmico (PEREIRA; SOUZA, 2008).

Ferreira e Souza (2010) avaliaram os impactos da aplicação de protetores solares no consumo de energia pelo condicionamento artificial do ar e pelos sistemas de iluminação artificial, utilizando como modelo de edificação o Tribunal de Justiça do Estado de Minas Gerais em simulações nos *softwares DesignBuilder e ReluxPro*. O modelo foi avaliado para situações de ausência de protetores solares (modelo base), com a inserção de protetores solares dimensionados a atingir um indicador de consumo mínimo (modelo RTQ-C) e com a aplicação de protetores solares dimensionados segundo diretrizes do método de Temperatura Neutra (modelo TN). Segundo as autoras, as proteções solares influenciaram no consumo energético da edificação, com a redução da carga térmica e do consumo do condicionamento de ar, ainda que tenham desenvolvido um aumento no consumo no sistema de iluminação artificial. O modelo TN apresentou maior redução no consumo de energia quando comparado ao modelo RTQ-C, evidenciando que protetores solares dimensionados em conformidade com as particularidades da edificação possibilitam maior eficiência energética quando comparados a modelos de proteção genéricos (FERREIRA; SOUZA, 2010).

Evangelisti et al. (2020) desenvolveram um método de avaliação do desempenho de protetores solares em janelas de edifícios localizados em Roma (Itália). Na pesquisa, levaram em consideração a temperatura superficial externa do vidro e identificaram protetores que reduziram a carga térmica sobre as janelas em 38,7% nos meses de verão. Cartana e Pereira (2016) avaliaram o desempenho lumínico de protetores solares em um modelo na cidade de Florianópolis (SC). Os protetores, obtidos através de modelagem paramétrica e algoritmos evolutivos, permitiram a dispersão mais homogênea da luz natural nos ambientes internos do modelo e reforçam a contribuição de métodos computacionais para estudos de sombreamento.

Ainda, devido às características geométricas e estrutura rígida, os módulos fotovoltaicos podem ser inseridos na envoltória das unidades consumidoras sobre a forma de protetores solares. Nesta composição, expostos à irradiação solar, poderão atuar como componentes passivos e contribuir para a redução das cargas térmicas sobre as edificações, enquanto permitem a geração elétrica para estas. Assim, Hofer et al. (2016) desenvolveram um método para a elaboração de conjuntos fotovoltaicos integrados a sistemas de sombreamento em fachadas. Utilizando modelagem paramétrica para os fatores de rendimento do sistema, rastreamento solar e sombreamento, foi possível elaborar um protótipo para aplicação de módulos fotovoltaicos compostos por filmes finos em geometrias complexas. Segundo os autores, os sistemas de sombreamento associados à geração de energia ampliam a eficiência energética das edificações e a utilização da composição paramétrica poderá ser uma ferramenta projetual para estudos de inserção de sistemas fotovoltaicos em edifícios.

Li et al. (2017) avaliaram os ângulos de inclinação ideais para módulos fotovoltaicos integrados a protetores solares em cinco cidades de diferentes condições climáticas na China. Na simulação, foram consideradas as inclinações adequadas para os níveis de irradiação solar mensal e anual, buscando maximizar a geração elétrica e reduzir o consumo de energia em função do sombreamento promovido sobre a superfície dos modelos virtuais. Como resultado, identificaram que os protetores solares fotovoltaicos desenvolveram maior eficiência energética no modelo quando dispostos com inclinação de acordo com as médias mensais da localidade.

Stamatakis, Mandalaki e Tsoutsos (2016) estabeleceram uma análise multicritério para orientar a integração de sistemas fotovoltaicos com protetores solares em edificações na região do Mediterrâneo. Na pesquisa, foram realizadas simulações com treze protótipos de protetores solares fotovoltaicos e avaliados para os fatores de geração de energia, redução do consumo energético em aquecimento, resfriamento e iluminação no modelo virtual e conforto luminoso. Posteriormente, os protótipos foram apresentados a indivíduos de diferentes grupos econômicos e sociais que classificaram as propostas segundo critérios de aceitabilidade estética.

2.3.2 Balanço energético

O balanço energético de uma edificação apresenta uma relação entre a energia produzida e consumida por este, podendo ser utilizado como métrica para discutir a sua eficiência energética. Atualmente, em políticas de incentivo à redução do consumo em edificações e geração energética por fontes renováveis, este conceito está associado à caracterização dos edifícios de balanço energético nulo (*Net Zero Energy Building, NZEB*) e edifícios de balanço energético quase nulo (*Nearly Zero Energy Buildings, nZEB*).

Segundo Torcellini et al. (2006), os edifícios NZEB e nZEB apresentam uma redução nas necessidades energéticas devido à ganhos energéticos eficientes e contribuição por fontes renováveis. Assim, quando uma edificação conectada à rede elétrica apresenta balanço energético nulo (NZEB), há uma redução no seu consumo energético e a demanda é fornecida por fontes renováveis locais no período de um ano.

De acordo com Kurnitski (2013), estes edifícios devem estar conectados à rede elétrica visto que as fontes de energia renovável podem ser incapazes de suprir a demanda energética da edificação em tempo real. Também, segundo Domingos et al. (2014), o balanço energético nulo é possível quando a edificação apresenta maior eficiência na gestão dos recursos energéticos. Isso ocorre, especialmente, quando a edificação apresenta uma configuração arquitetônica e elementos construtivos que possibilitem melhor desempenho térmico, além de apresentar equipamentos elétricos eficientes e fontes energéticas renováveis com elevado rendimento.

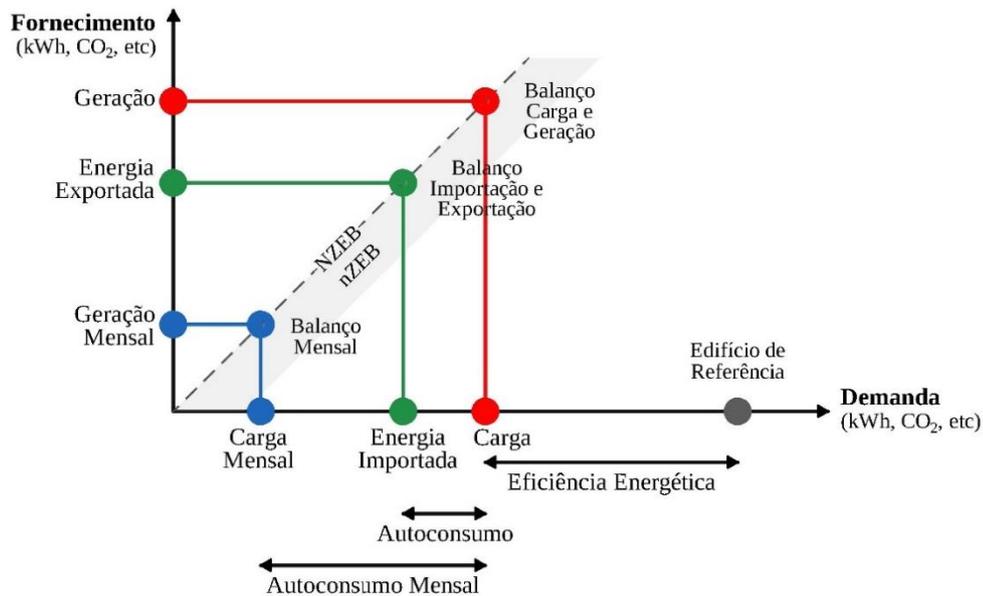
Conforme Heiselberg e Marszal (2009), a determinação do balanço energético de uma edificação pode ser obtida analisando distintos parâmetros, visto que não há um consenso sobre as métricas a serem adotadas. Entre as cargas consideradas, destacam-se as avaliações com base nas emissões de gás carbônico, energia elétrica, energia térmica, investimentos, custos da energia, custos de construção e manutenção. Atualmente, o modelo mais difundido utiliza a avaliação com base na energia, visto que, nas avaliações com custos, os preços variam ao longo do tempo, inviabilizando uma análise da vida útil da edificação. O consumo em gás carbônico, por sua vez, é orientado para a avaliação de Edifícios Carbono Zero (Zero Carbon Building, ZCB) ou Energia de Emissão Zero (Zero Emissions Building, ZEB)

No entanto, segundo Deng, Wang e Dai (2014), considerando que o balanço energético nulo resulta do equilíbrio entre a demanda energética e a geração de energia, a resultante pode ser obtida pela equação geral:

$$Net\ Energy = |Output| - |Input|$$

Na equação, *net energy* indica a energia resultante da diferença entre a energia gerada pelas fontes renováveis, sendo injetada na rede elétrica (*output*) e a energia consumida pela edificação a partir da rede (*input*). Quando a energia resultante apresentar valor igual ou superior a 0, a edificação apresenta balanço energético nulo (DENG, WANG, DAI; 2014). Então, o balanço energético da edificação pode ser representado graficamente, conforme a figura 5.

Figura 5 - Modelo de representação do balanço energético



Fonte: Adaptado de Sartori, Napolitano e Voss (2012).

Na figura, a linha tracejada indica o equilíbrio energético entre a energia gerada e o consumo da edificação, representando o balanço energético nulo (situação para NZEB), e, quando próxima ao equilíbrio energético, em um intervalo definido, a edificação apresenta balanço energético quase nulo (nZEB). Ainda, nas distintas unidades de medida, é possível avaliar o balanço energético em função da relação entre a energia importada e exportada e entre a demanda e geração. Também, a representação possibilita situar balanços energéticos parciais e modelos de referência afim de comparar a eficiência energética da edificação de estudo.

Após avaliar projetos de edifícios com balanço energético nulo, Voss e Musall (2012) identificaram tipologias com maior potencial para se tornarem NZEB. Segundo os autores, a fonte energética mais utilizada nas edificações tem origem solar, especialmente, em sistemas fotovoltaicos, sugerindo a utilização da envoltória para a geração energética. Também, indicam que edifícios mais baixos e com menor compactação apresentam maior potencial para o balanço

energético nulo, visto que possuem maior área exposta à incidência solar quando comparada ao volume total, ampliando a geração de energia sobre o consumo energético.

Didoné, Wagner e Pereira (2014) avaliaram o potencial de transformação de edifícios de escritórios em modelos com balanço energético nulo. No estudo, utilizaram simulações computacionais para a avaliação dos modelos situados nas cidades de Fortaleza e Florianópolis, com condições climáticas distintas. Entre os resultados, o equilíbrio energético foi obtido com a inserção de sistemas fotovoltaicos como fonte energética.

Costa (2018) avaliou diretrizes para projetos de *retrofit*, buscando o balanço energético nulo em edifícios de escritórios situados em Brasília. Na pesquisa, simulou o consumo energético em equipamentos de ar condicionado, iluminação e equipamentos de escritório em um modelo virtual, considerando as variáveis da envoltória, estratégias para ampliar a sua eficiência energética e inserção de sistemas fotovoltaicos para a geração de energia. Por fim, foi verificado o balanço energético nulo no modelo desenvolvido, obtendo diretrizes para atingir o equilíbrio energético em edifícios desta tipologia no contexto climático local.

Domingos et al. (2014) estabeleceram uma classificação climática para a obtenção de diretrizes para projetos de edifícios com balanço energético nulo no Brasil. Na pesquisa, consideraram os fatores de temperatura, umidade relativa do ar e irradiância solar global como variáveis climáticas de maior relevância. Entre os resultados, obtiveram a classificação hierárquica de oito regiões conforme o potencial para a instalação de edifícios NZEB, fornecendo orientações e incentivando o desenvolvimento destes nas localidades.

Na União Europeia, a Diretiva de Eficiência Energética em Edifícios (PE, 2010) foi uma das primeiras regulamentações para o desenvolvimento de edificações respeitando o balanço energético mínimo e busca reduzir o consumo energético nas unidades, bem como ampliar a geração de energia por fontes renováveis. No Brasil, a Chamada Pública Procel Edifica - NZEB Brasil (ELETROBRAS, 2019) foi um marco na inserção de políticas relacionadas à temática. Neste programa, foram selecionadas propostas de edificações a receberem recursos para o desenvolvimento de construções com balanço energético mínimo com o objetivo de introduzir a concepção de projetos associados a estratégias de sustentabilidade e eficiência energética.

Enfim, diante das possibilidades de inserção dos conjuntos fotovoltaicos em edificações e das métricas para avaliar a gestão da energia nestes, esta pesquisa considerou o balanço energético entre a energia elétrica consumida e gerada em um modelo virtual após a inserção dos conjuntos como critério para avaliar a eficiência energética promovida. Nesse sentido, o desempenho dos conjuntos fotovoltaicos na redução dos ganhos térmicos e no potencial para a geração de energia permite determinar as formas de inserção mais eficientes.

3 METODOLOGIA

No processo metodológico, as particularidades dos conjuntos fotovoltaicos na forma de componentes passivos da envoltória foram preservadas buscando o melhor desempenho na redução do consumo energético e geração de energia elétrica. Assim, enquanto os brises e fachadas ventiladas foram projetados para desempenhar sua função no controle dos ganhos térmicos sobre os ambientes internos, os módulos fotovoltaicos foram orientados para a maior geração de energia elétrica nas condições impostas.

A **primeira etapa** consistiu no desenvolvimento de um modelo virtual para a simulação das propostas dos conjuntos fotovoltaicos. Assim, ocorreu a identificação dos edifícios de tipologia padrão da Universidade Federal de Santa Maria, sendo, posteriormente, explorados através do levantamento de informações como a caracterização espacial, zoneamento, indicadores construtivos, materialidade e volumetria necessários para a constituição do modelo virtual.

Na **segunda etapa**, ocorreu o desenvolvimento das propostas de brises fotovoltaicos e fachada ventilada fotovoltaica. Neste processo, foram utilizadas diretrizes obtidas a partir da avaliação da temperatura neutra e geometria solar da localidade, associando a obstrução da irradiação solar excessiva à zona de conforto térmico. Então, a área de sombreamento necessária orientou a disposição dos módulos fotovoltaicos com suas características geométricas e inclinações ideais para a máxima geração elétrica. Ainda, os conjuntos fotovoltaicos foram reproduzidos na cobertura do modelo, com orientação ideal para a geração elétrica, a fim de constituir conjuntos de referência para a análise dos brises fotovoltaicos e fachada ventilada fotovoltaica.

Na **terceira etapa**, os conjuntos fotovoltaicos foram configurados para a geração de energia elétrica. Com a definição das dimensões gerais do sistema, foi utilizado o *software* PVsyst, que, a partir de dados climatológicos locais, características do projeto e especificidades dos componentes do sistema, permitiu a obtenção de quantitativos da geração elétrica, desempenho e representação dos fatores que compõem as perdas nos sistemas fotovoltaicos.

Na **quarta etapa**, os conjuntos fotovoltaicos foram avaliados para a influência no consumo elétrico do modelo virtual. Então, a partir das definições de padrões de consumo, dispositivos elétricos e componentes construtivos do modelo virtual, foram realizadas simulações, por meio do *software* DesignBuilder, com o intuito de identificar o desempenho dos conjuntos fotovoltaicos no consumo energético em iluminação e condicionamento artificial.

Por fim, na **quinta etapa**, foi realizado o balanço energético do modelo virtual com a inserção dos conjuntos fotovoltaicos. Assim, avaliando a diferença entre o consumo elétrico em usos finais desenvolvido no modelo e a geração elétrica pelos componentes fotovoltaicos, foi estimada a resultante energética e verificada a disposição dos conjuntos fotovoltaicos que desenvolveu a maior eficiência energética no modelo virtual.

A figura 6 apresenta o fluxograma do desenvolvimento metodológico considerando as etapas de caracterização da edificação, desenvolvimento dos conjuntos fotovoltaicos da envoltória, estimativas para a geração e consumo de energia e balanço energético.

Figura 6 - Fluxograma metodológico



Fonte: Autor.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DAS EDIFICAÇÕES

Na caracterização das edificações de tipologia padrão da Universidade Federal de Santa Maria, buscou-se explorar os modelos edificados do campus, relacionando-os ao contexto histórico e a representatividade destes na Cidade Universitária. Desta forma, identificando as suas configurações espaciais, formais e construtivas, objetiva-se encontrar padrões para o desenvolvimento de um modelo virtual e congruente para a aplicação dos conjuntos fotovoltaicos na avaliação da eficiência energética.

Nesse sentido, os edifícios básicos do Setor de Ensino apresentam uma importância histórica, pois são construções originárias dos Planos Diretores que nortearam o planejamento do campus e compreendem unidades predominantes no espaço. Ainda, a capacidade destas edificações em atender uma parcela significativa da população do campus - através de laboratórios, salas de aula, salas de professores, entre outros - justifica a adoção destas unidades para a avaliação da eficiência energética promovida pelos conjuntos fotovoltaicos como componentes passivos na envoltória.

As edificações que compõem o Setor abrigam diversos centros de ensino com diferentes cursos e totalizam oito unidades distribuídas em dois conjuntos. Ao norte, cinco edifícios constituem os Departamentos de Geociências e de Química, pertencentes ao Centro de Ciências Naturais e Exatas, os Departamentos de Morfologia e de Patologia e Microbiologia, do Centro de Ciências da Saúde, e o Departamento de Fisiologia e Comunicação Social, do Centro de Ciências Sociais e Humanas. Ao sul, três edificações compõem os atuais Centro de Artes e Letras e Centro de Ciências Rurais.

Os edifícios básicos apresentam similaridades, especialmente, pelo contexto modernista de criação do campus. Assim, é possível verificar a predominância de uma volumetria em barra, com janelas em fita para leste e oeste, disposta em três pavimentos (nas edificações ao norte) e quatro pavimentos (ao sul) com pavimento inferior semienterrado onde ocorrem atividades de serviço e comércio. Ainda, estas edificações apresentam uma relação similar com o entorno, através de acessos e recuos idênticos; bem como apresentam os mesmos materiais e componentes construtivos. As distinções ocorrem, especialmente, em planta baixa, quando foram necessárias adaptações para possibilitar as atividades específicas no interior de cada edificação; enquanto, externamente, a pintura da estrutura exposta é utilizada para a diferenciação das edificações.

A figura 7 apresenta as edificações de tipologia padrão da Universidade Federal de Santa Maria, no campus Camobi, e sua distribuição no plano da cidade universitária.

Figura 7 - Edifícios de tipologia padrão e perspectiva aérea da UFSM (campus Camobi)

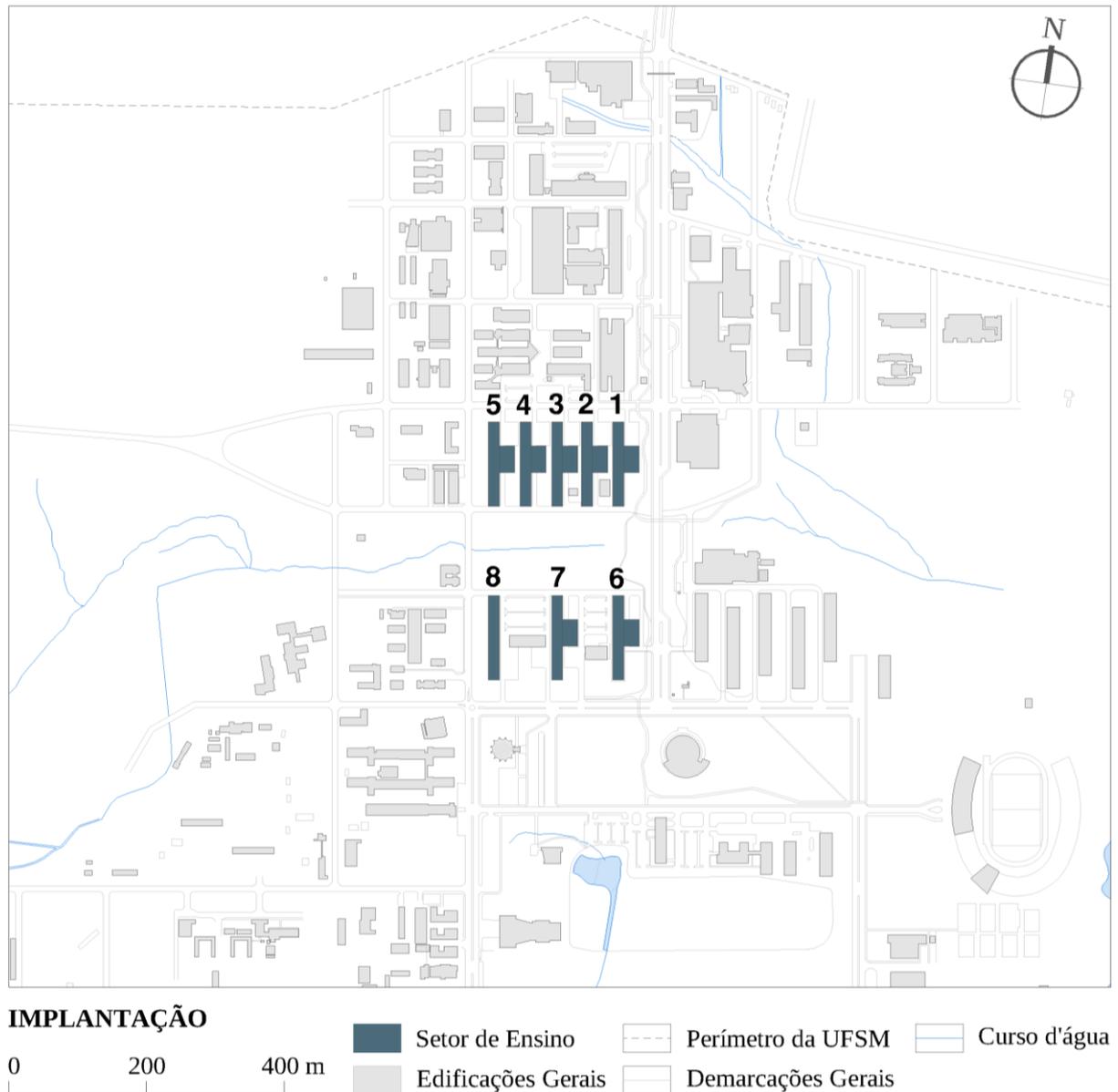


Fonte: Autor e UFSM (2010).

Os edifícios apresentam configuração espacial e arquitetônica vinculadas ao projeto em estilo modernista no qual o campus foi concebido, em 1960, pelos arquitetos Oscar Valdetaro e Roberto Nadalutti. Nesse sentido, apresenta uma distribuição axial caracterizado pela distribuição do programa de necessidades em edifícios com função e organização idênticas. Estes se apresentam dispostos paralelamente à Avenida Roraima, que secciona o campus no sentido norte e sul, determinando a orientação das fachadas principais para leste e oeste (ZAMPIERI, 2011).

As edificações consideradas para a caracterização e, posteriormente, o desenvolvimento do modelo padrão de avaliação são indicadas na figura 8.

Figura 8 - Universidade Federal de Santa Maria (campus Camobi) e edifícios de estudo



Fonte: Adaptado de UFSM (2019).

Na figura, as edificações avaliadas, em destaque, são o Departamento de Geociências e anfiteatro (1); Departamento de Química e anfiteatro (2); Departamento de Morfologia e anfiteatro (3); Departamento de Patologia e Microbiologia e anfiteatro (4), Departamento de Fisiologia e anfiteatro (5); Centro de Artes e Letras e anfiteatro (6); Centro de Ciências Rurais I e anfiteatro (7) e Centro de Ciências Rurais II (8).

3.1.1 Método de Avaliação

Com o objetivo de construir um modelo virtual para o edifício de tipologia padrão, esta etapa metodológica fez uso de uma análise individual dos edifícios básicos que compõem o Setor de Ensino. Neste processo, foi utilizado um inventário para caracterizar os padrões construtivos, espaciais e formais das edificações, tendo como intuito o encontro de componentes comuns que possam desenvolver um modelo hipotético correspondente para as simulações.

O inventário desenvolvido tem como base os registros do patrimônio moderno do campus da Universidade Federal de Santa Maria desenvolvido por Wolle (2019), que, atendendo aos modelos cadastrais do Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional (IPHAN) e Sistema Integrado de Conhecimento e Gestão (SICG), reúne informações relativas aos edifícios modernos do campus e busca, especialmente, sua caracterização externa. Neste trabalho, entretanto, visando o desenvolvimento de simulações para o desempenho energético, há a necessidade da caracterização interna das edificações básicas e, desse modo, foram acrescentadas informações que viabilizassem identificar sua organização espacial, dimensões e distribuição dos espaços.

As fontes complementares para a constituição do inventário estão fundamentadas na pesquisa documental e descritiva. Quanto aos procedimentos técnicos, utiliza documentos como plantas técnicas sem tratamento analítico a partir do Setor de Cadastro da Pró-Reitoria de Infraestrutura (PROINFRA) e acervo fotográfico catalogado pelo Departamento de Arquivo Geral da Universidade Federal de Santa Maria. Quanto aos objetivos, faz uso de método observacional individual em visitas técnicas.

O inventário foi organizado a partir de três componentes, sendo eles *identificação*, *zoneamento* e *materialidade*. Na identificação, busca-se estabelecer informações gerais da edificação, como localização, tipologia, temática, ano de construção, indicadores construtivos e condições formais, como implantação, perspectiva geral e elevações. No componente de zoneamento, por sua vez, foi exposta a distribuição do programa de necessidades e a sua composição quantitativa na área total da edificação. Por fim, o inventário busca reunir informações sobre a materialidade das edificações. A partir deste aspecto, foi possível registrar a constituição dos elementos estruturantes, de vedação e aberturas necessários para a definição do modelo a ser desenvolvido.

Os ambientes dos edifícios foram distribuídos em *administrativo, banheiros, comerciais, laboratórios, recreativos, salas de aula, salas de estudos, salas de exposição, salas de professores, serviços e circulação*, de modo a classificar os espaços de funções e consumo energético similares. Os ambientes de serviço compreendem os depósitos e almoxarifados, os espaços de circulação compreendem o *hall*, corredores e escadas. Os ambientes recreativos são os espaços de convívio social e de uso temporário, como copas, diretórios acadêmicos e estar dos funcionários; enquanto os espaços expositivos compreendem os auditórios, salas de conferência e reuniões. As salas de professores, salas de estudos e ambientes administrativos são caracterizados como espaços de trabalho e de equipamentos similares, mas distintos quanto aos usuários. As salas de aula e laboratórios determinam os ambientes de ensino, distintos por seus equipamentos, enquanto os ambientes comerciais apresentam alto consumo energético e são representados por lancherias e gráficas.

O inventário das edificações básicas é apresentado no Apêndice A, enquanto o modelo de ficha utilizado para avaliação é ilustrado na figura 9.

Figura 9 - Modelo de inventário para caracterização das edificações básicas

1 - IDENTIFICAÇÃO			
Edificação	Implantação		
Localização			
Tipologia			
Temática			
Construção			
Área Total	Pavimentos		
Comprimento	Largura		
Altura Total	Pé direito		
Perspectiva Geral			
Elevações			
Fachada Leste		Fachada Norte	
Fachada Oeste		Fachada Sul	

2 - ZONEAMENTO								
Pav. 1								
Pav. 2								
Pav. 3								
Pav. 4								
	Pavimento 1		Pavimento 2		Pavimento 3		Pavimento 4	
Áreas	Un	Área (m²)	Un	Área (m²)	Un	Área (m²)	Un	Área (m²)
Administrativo								
Banheiros								
Comerciais								
Laboratórios								
Recreativos								
Salas de Aula								
Salas de Estudos								
Salas de Exposição								
Salas de Professores								
Serviços								
Circulação								
Estrutural								
TOTAL								
3 - MATERIALIDADE								
Cobertura				Estruturas				
Estrutura								
Pisos				Paredes				

Fonte: Autor.

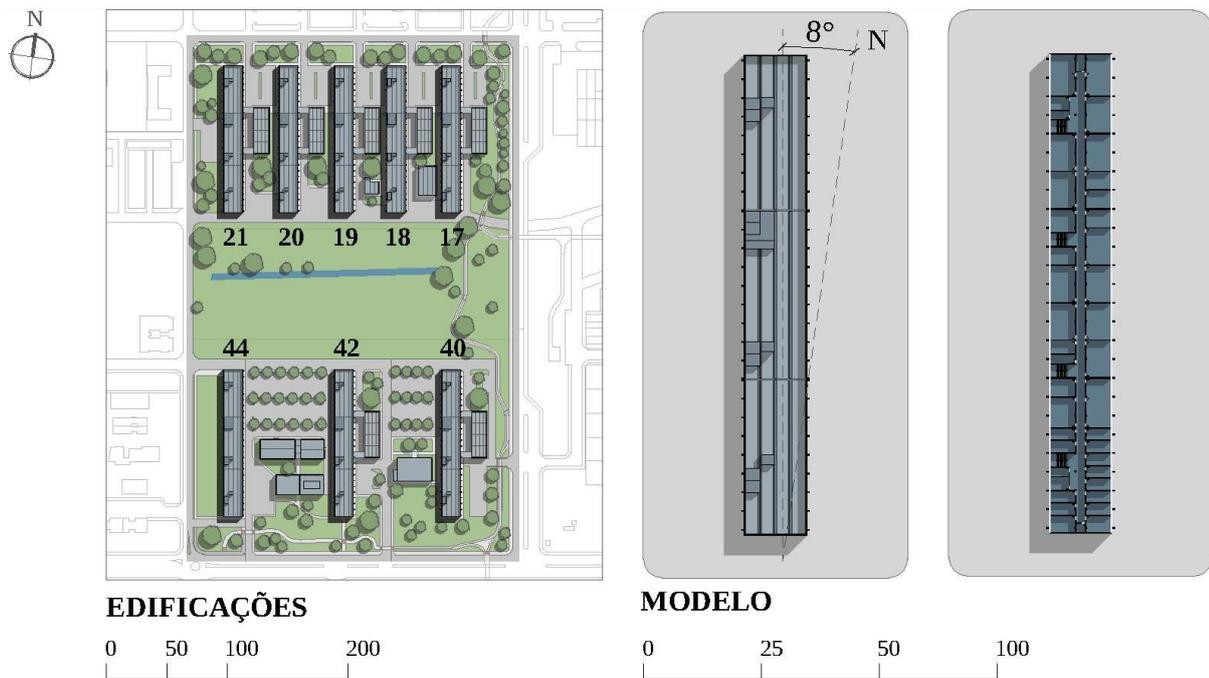
3.2 DIMENSIONAMENTO DOS CONJUNTOS FOTOVOLTAICOS

A partir da caracterização da edificação, ocorre o desenvolvimento dos brises e fachada ventilada e suas adaptações em sistemas fotovoltaicos a serem avaliados em um modelo virtual correspondente. De modo a ampliar os entendimentos a respeito da aplicação dos conjuntos, estes foram desenvolvidos para diferentes configurações do modelo estudado. Assim, o modelo virtual foi avaliado com as aberturas expostas às orientações leste e oeste, em configuração coincidente aos edifícios existentes, e expostas às orientações norte e sul, perpendicular aos edifícios. Estas disposições permitem explorar o potencial dos conjuntos fotovoltaicos desenvolvidos em distintas orientações e modos de instalação na envoltória, favorecendo sua reprodução em outras edificações do campus.

3.2.1 Modelo com exposição longitudinal leste-oeste

O modelo virtual, nessa configuração, apresenta as fachadas principais voltadas às orientações leste e oeste; enquanto as fachadas norte e sul apresentam empenas cegas. A figura 10 apresenta a disposição do modelo avaliado.

Figura 10 - Modelo com exposição longitudinal leste-oeste



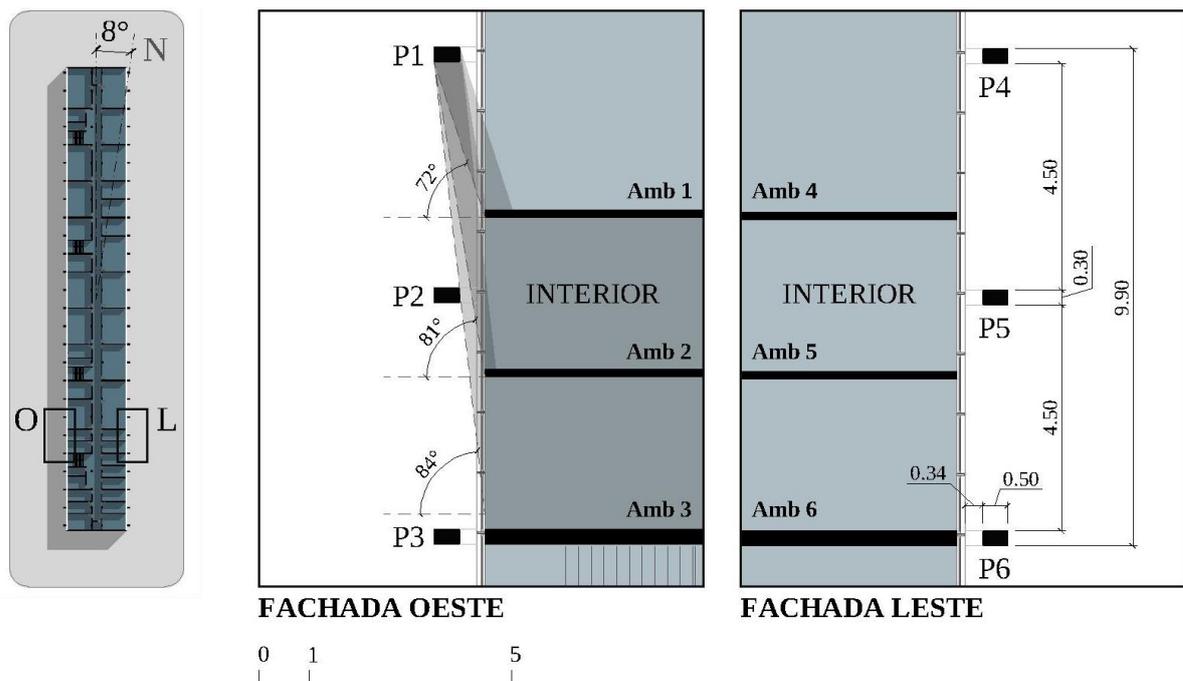
Fonte: Autor.

Na figura, é apresentada a implantação dos edifícios básicos no Setor de Ensino, bem como o modelo virtual, em cobertura e pavimento tipo, respectivamente. Nesta configuração, o modelo apresenta o eixo longitudinal rotacionado em 8° à oeste, preservando a orientação dos edifícios básicos existentes. Assim, o dimensionamento dos conjuntos fotovoltaicos foi organizado na condição de brises e fachadas ventiladas fotovoltaicas.

3.2.1.1 Brises fotovoltaicos

No desenvolvimento das estratégias de proteção solar, inicialmente, foi verificado o padrão de sombreamento existente sobre as aberturas das fachadas, a fim de avaliar a sua contribuição na constituição das máscaras de sombreamento. Nas edificações básicas, os componentes estruturais destacados do edifício estabelecem faixas sombreadas sobre as janelas em fita no centro da fachada, comportando-se como elementos verticais de sombreamento, sendo um condicionante inicial para o projeto de obstrução da incidência da irradiação solar. A figura 11 apresenta padrões de sombreamento desenvolvidos pelos pilares externos sobre os ambientes internos do modelo.

Figura 11 – Sombreamento desenvolvido pelas estruturas expostas da edificação

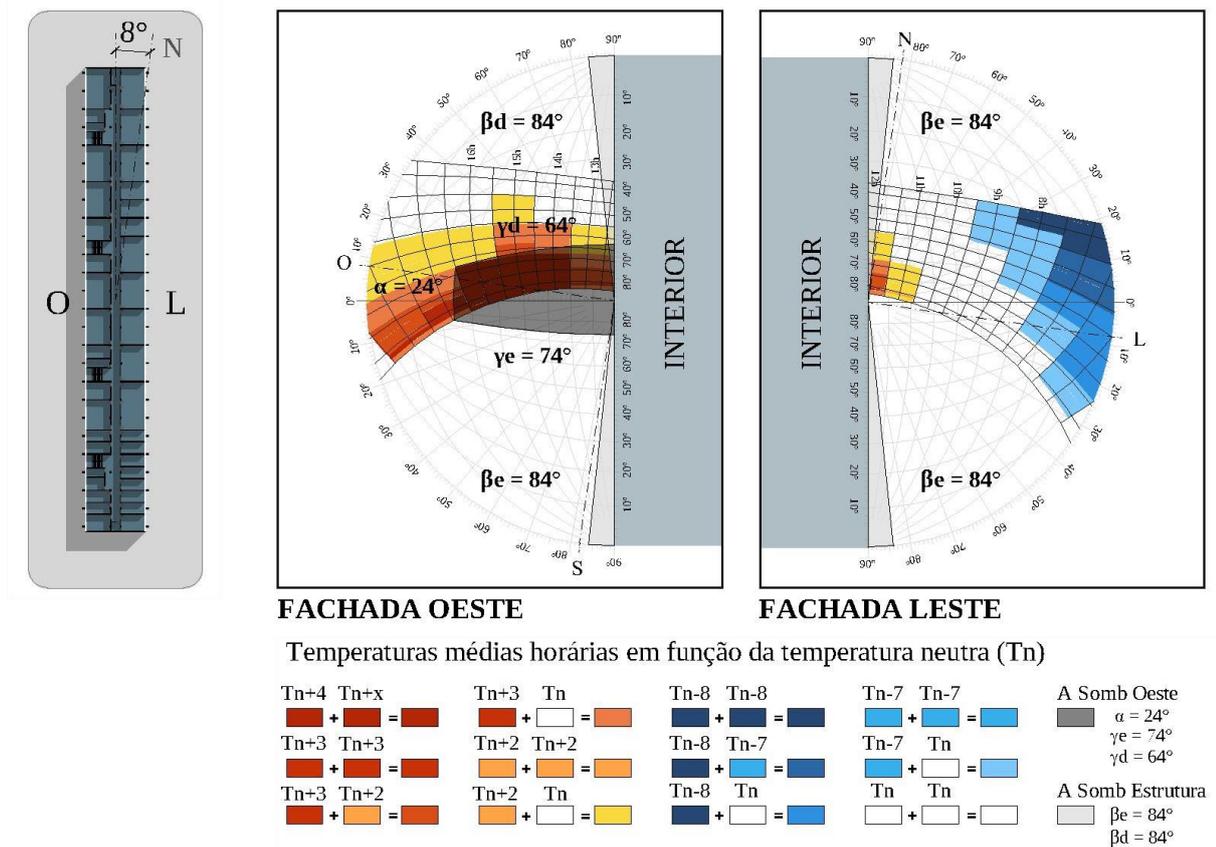


Fonte: Autor.

Conforme a figura, a estrutura desenvolve áreas de sombreamento com vários ângulos de incidência sobre os espaços, conforme a representação da obstrução ocasionada pelo pilar P1 sobre distintos ambientes (*Amb 1, 2 e 3*). Contudo, é possível verificar um sombreamento com inclinação de até 84°, resultante da incidência determinada pelas extremidades internas e externas de pilares sucessivos e distantes em 4,50 m. Esta inclinação máxima foi adotada no projeto e equivale a componentes verticais do protetor solar.

Posteriormente, na configuração dos brises, foi adotado o método de avaliação da temperatura neutra, que, a partir da média das temperaturas horárias locais conforme as Normais Climatológicas do INMET, permite associar a obstrução para irradiação solar à zona de conforto térmico em um ambiente (PEREIRA; SOUZA, 2008). A figura 12 apresenta a carta solar de Santa Maria/RS (latitude de 29° sul) para as fachadas leste e oeste do modelo em escalas de temperaturas médias horárias e em função da temperatura neutra; bem como a máscara de sombreamento para a obstrução da incidência de irradiação solar indesejada e o perfil de sombreamento dos pilares externos.

Figura 12 - Máscaras solares para os brises nas fachadas leste e oeste



Fonte: Autor.

De acordo com a figura, são representadas as escalas de temperaturas médias horárias em função da temperatura neutra (T_n), onde $T_n + x$ representa temperaturas médias horárias superiores à temperatura de conforto, enquanto $T_n - x$ representa temperaturas inferiores. As tonalidades resultantes correspondem às médias horárias de temperatura devido a trajetória solar apresentar dois percursos coincidentes durante o ano. Assim, é possível a identificação, em uma média cromática, de períodos de desconforto térmico, onde as zonas em escala de cores quentes representam ambientes potencialmente sobreaquecidos; enquanto as escalas de cores frias identificam períodos de temperaturas baixas, onde a incidência de irradiação solar deve ser utilizada como alternativa para aquecimento no interior da edificação.

A máscara de sombreamento dos brises sobre as janelas da edificação foi demarcada para a identificação dos ângulos de obstrução da incidência solar em períodos com temperaturas médias excedentes à zona de conforto na localidade. A definição da área de sombreamento segue adaptação das diretrizes estabelecidas pelo RTQ-R, o qual justifica que as proteções solares não são necessárias quando a necessidade de sombreamento for inferior ao período de dois meses ou acontecer em até duas horas diárias a partir das 17h00. Também, indica a necessidade da incidência solar em períodos de temperatura média inferior à temperatura neutra, onde a energia solar poderá ser utilizada como fonte para aquecimento em ambientes (BRASIL, 2014c).

Conforme a carta solar, não há a necessidade de sombreamento para fachada leste da edificação, visto que é exposta, predominantemente, a temperaturas médias horárias neutras e de desconforto térmico por temperaturas baixas. Na fachada oeste, foi definida uma máscara de sombreamento a partir das prescrições do RTQ-R, obstruindo os períodos com incidência de irradiação solar em temperaturas superiores a $T_n + 3$ e desconsiderando períodos de exposição excessiva inferiores a dois meses. Então, a máscara de sombreamento desenvolvida foi definida pelos ângulos α (24°), γ_e (74°) e γ_d (64°), enquanto os pilares constituem sombras adicionais com ângulos β_d e β_e (84°), entre os horários de 12h e 13h, em períodos identificados como de conforto térmico pela incidência de irradiação solar e levemente sobreaquecidos.

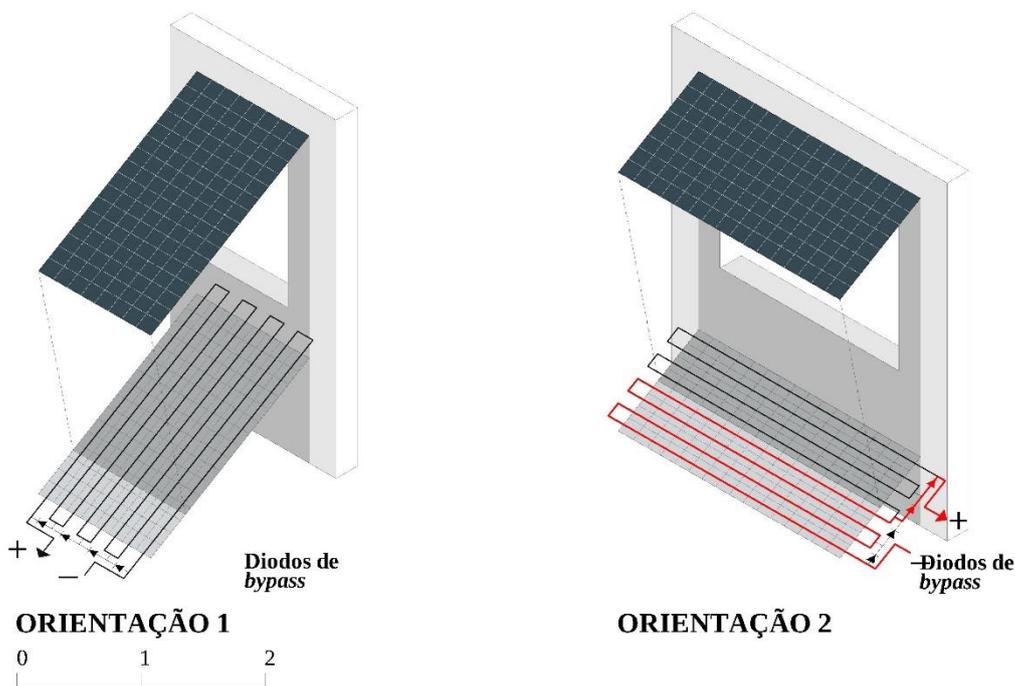
Os ângulos adotados na máscara de sombreamento determinam as dimensões dos brises. Assim, o ângulo α representa a inclinação existente entre a profundidade do brise, em relação à fachada, com a face externa e inferior da abertura; enquanto os ângulos γ_e e γ_d indicam o prolongamento lateral do brise, através da inclinação entre as faces laterais e externas do protetor com as extremidades das aberturas. Percebe-se, no desenvolvimento dos brises sobre as janelas em fita, que há sobreposição nos ângulos de sombreamento em ambientes adjacentes, determinando um protetor solar contínuo em toda a fachada.

Então, a partir dos ângulos solares obtidos, os brises foram constituídos por conjuntos de módulos fotovoltaicos. Como decisão projetual, foram adotados módulos fotovoltaicos de silício monocristalino, apresentando dimensões de 2067 mm x 1046 mm, potência de 435 w e eficiência energética de 20,1% (classificação energética A), atingindo uma geração média de energia de 54,38 kWh/mês (BRASIL, 2020c). Estes, foram inclinados em 30° à oeste como indicação para a maior geração elétrica na localidade, segundo o *software* PVsyst, e posicionados sob a estrutura externa da edificação, impedindo a ocorrência de sombreamento desta sobre os módulos.

Ainda, a disposição dos módulos fotovoltaicos é um condicionante para o seu desempenho. Quando ocorre sombreamento parcial sobre estes, poderá ocorrer a dissipação de potência na junção das células sombreadas, danificando-as e aumentando a temperatura no local em um efeito denominado *hot spot*. No entanto, o módulo apresenta um mecanismo denominado de diodo de *bypass* que, verificando células em condições de sombreamento, desvia a corrente elétrica do circuito afetado para outro de menor resistência (PINHO; GALDINO, 2014).

A figura 13 apresenta as possibilidades de orientação para os módulos fotovoltaicos sobre o plano das aberturas.

Figura 13 - Orientação dos módulos fotovoltaicos

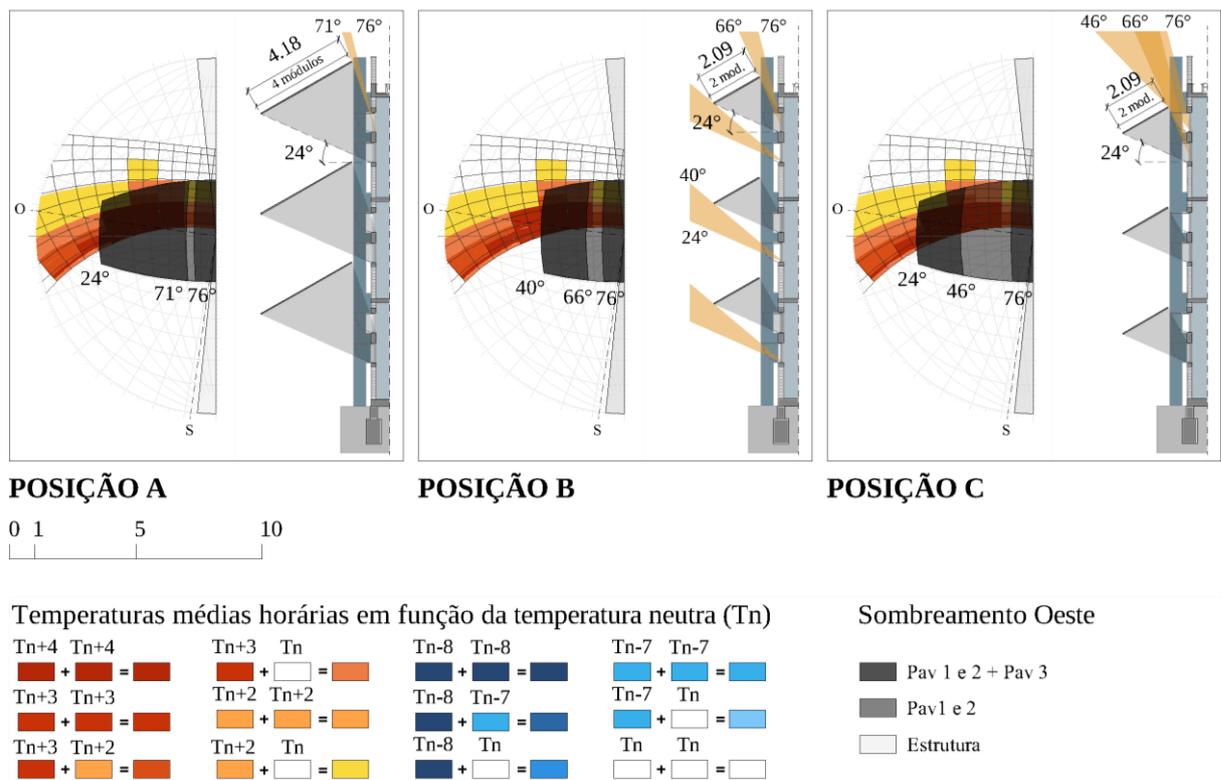


Fonte: Autor.

Na figura, em ambas as orientações, os módulos apresentam o mesmo ângulo de inclinação e originam sombras parciais sobre os módulos inferiores. Na orientação 1, o sombreamento secciona transversalmente as séries do circuito elétrico do módulo inferior, limitando a corrente elétrica de todo o módulo. Na orientação 2, por sua vez, o sombreamento é projetado de modo longitudinal às séries, permitindo isolar os circuitos afetados através dos diodos de *bypass* e manter os demais circuitos – em vermelho, na figura - em operação. Este entendimento sobre a orientação dos módulos é necessário, visto que o sombreamento parcial em módulos inferiores deverá ser recorrente ao longo do ano, limitando a geração energética.

Também, considerando que os brises fotovoltaicos ocorrem sobre as aberturas dos distintos pavimentos ao longo da fachada, foram avaliadas formas de inserção destes a fim de que não tenham sua função dual – geração elétrica e proteção solar - limitada. A figura 14 apresenta as possibilidades de inserção dos brises fotovoltaicos sobre as aberturas nos pavimentos da fachada oeste, com as máscaras de sombreamento desenvolvidas, na carta solar, e os ângulos de incidência de irradiação solar sobre os ambientes internos em corte.

Figura 14 - Inserção dos brises fotovoltaicos para a fachada oeste



Fonte: Autor.

Na figura, na posição A, os brises fotovoltaicos são compostos por quatro módulos fotovoltaicos utilizando a orientação 2 para promover sombreamento para os dois lances de janelas em fita que circundam cada pavimento. Na posição B, são compostos por módulos duplos, em mesma orientação, que promovem sombreamento para o lance superior das janelas do pavimento; enquanto, na posição C, os módulos duplos atuam na obstrução do lance inferior.

Nas posições, há ocorrência de incidência de irradiação solar indesejada nos ambientes internos devido ao afastamento dos brises em relação à fachada, bem como em situações onde os módulos duplos cobrem, parcialmente, as janelas em fita do pavimento. Assim, verifica-se que a posição A apresenta menor incidência de irradiação solar, ocorrendo no intervalo de altura solar de 71° e 76° e devido ao afastamento dos brises em relação à fachada. A incidência nos ambientes internos ocorre pelo lance superior das janelas em fita, no último pavimento, entre os horários de 13h e 13h30, e em faixas onde a irradiação solar promove desconforto térmico por aquecimento e atingindo até 3°C superiores ao conforto térmico (T_n+3).

Na posição B, verifica-se que, no último pavimento, a incidência de irradiação solar ocorre entre os ângulos de altura solar de 66° e 76° , nas janelas superiores, devido ao afastamento dos brises fotovoltaicos. Ainda, a atuação destes sobre as janelas dos lances superiores expõe as inferiores, em todos os pavimentos, à incidência de irradiação solar indesejada quando o ângulo de altura solar for inferior a 40° . Desse modo, haverá incidência nos ambientes internos da edificação, pelas janelas inferiores, a partir do horário de 15h; onde são configurados períodos de alto desconforto térmico ($T_n +4$).

Na posição C, a incidência de irradiação solar ocorre no último pavimento, em ambos os lances da janela em fita, devido ao afastamento dos brises em relação à fachada e entre os ângulos de altura solar de 46° e 76° . Este período ocorre entre os horários de 13h e 15h, quando o desconforto térmico por incidência de irradiação solar atinge até 4°C acima do conforto térmico ($T_n +4$).

Em relação às configurações avaliadas, a posição A apresentou menor possibilidade de incidência de irradiação solar no interior da edificação, enquanto a posição B possui maior exposição dos ambientes internos à incidência. Ainda, neste modelo, a incidência é característica em períodos de menor altura solar, atuando sobre as janelas inferiores (com peitoril de 1,40 m) e afetando a tarefa visual que possa ocorrer no interior da edificação.

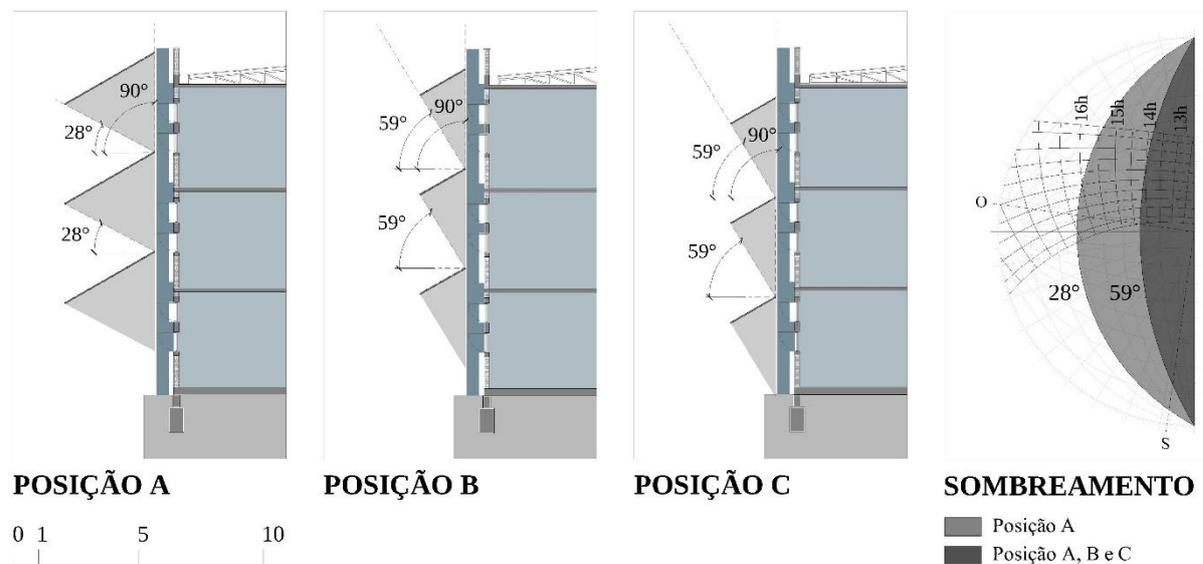
A incidência de irradiação solar no interior da edificação é um fator presente em todas as posições averiguadas e originada, especialmente, pelo deslocamento dos brises fotovoltaicos sobre a fachada. Esta ocorrência poderia ser atenuada com a inserção de componentes horizontais no espaço formado entre as extremidades internas dos protetores com a superfície

da fachada, no entanto, nessa pesquisa, busca-se avaliar, exclusivamente, a influência de componentes passivos na envoltória da edificação formados por componentes fotovoltaicos.

Após a avaliação da configuração dos protetores para a obstrução da irradiação solar, há a necessidade de verificar se as disposições desenvolvidas favorecem a geração de energia pelos módulos fotovoltaicos. Para isso, busca-se certificar as condições de sombreamento que um conjunto de brises fotovoltaicos poderá desenvolver sobre outro, limitando a geração de energia nos conjuntos fotovoltaicos inferiores.

Assim, a figura 15 apresenta o intervalo dos ângulos de altura solar em que os brises fotovoltaicos superiores desenvolvem sombreamento sobre os inferiores, bem como a carta solar com os períodos de ocorrência do sombreamento.

Figura 15 - Perfil de sombreamento dos modelos A, B e C para a fachada oeste



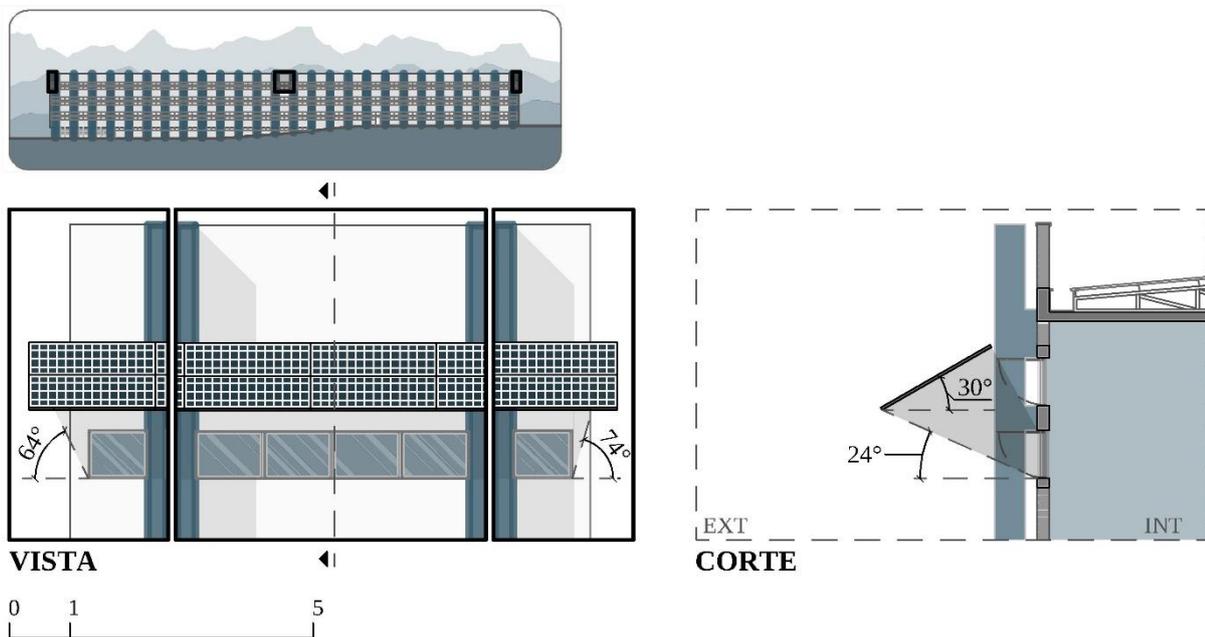
Fonte: Autor.

Conforme a figura, é verificado que, na posição A, os brises fotovoltaicos apresentam sombreamento entre módulos quando a altura solar estiver no intervalo de 90° a 28° , indicando que a incidência de irradiação solar sobre os módulos inferiores deverá ocorrer a partir de, aproximadamente, 16h30, quando a trajetória solar for próxima ao solstício de verão, e 15h30, quando próxima ao solstício de inverno. As posições B e C, por sua vez, apresentam sombreamento entre o intervalo angular de 90° a 59° para altura solar, representando que a incidência sobre os módulos inferiores ocorrerá a partir de, aproximadamente, 14h30, próximos ao solstício de verão e 14h no solstício de inverno.

As características do sombreamento desenvolvido entre os módulos demonstram que, em A, ainda que apresente melhor desempenho para proteção solar, é ineficiente para a geração de energia elétrica, quando comparada às posições B e C. Isso decorre do período de incidência de irradiação solar sobre os módulos fotovoltaicos inferiores, que ocorrerá a partir da metade do período da tarde, expondo os módulos a breves períodos de incidência. Em B e C, apesar de permitirem incidência parcial de irradiação solar nos ambientes internos, apresentam maiores períodos de exposição dos módulos fotovoltaicos à esta.

Então, de acordo com as avaliações preliminares, os brises fotovoltaicos inseridos na posição C apresentam uma relação satisfatória entre proteção solar e geração de energia. A figura 16 apresenta a configuração da proposta de brises adotada para a avaliação respeitando as inclinações mínimas de sombreamento e ideais para geração elétrica para a fachada oeste.

Figura 16 - Formação dos brises para a fachada oeste



Fonte: Autor.

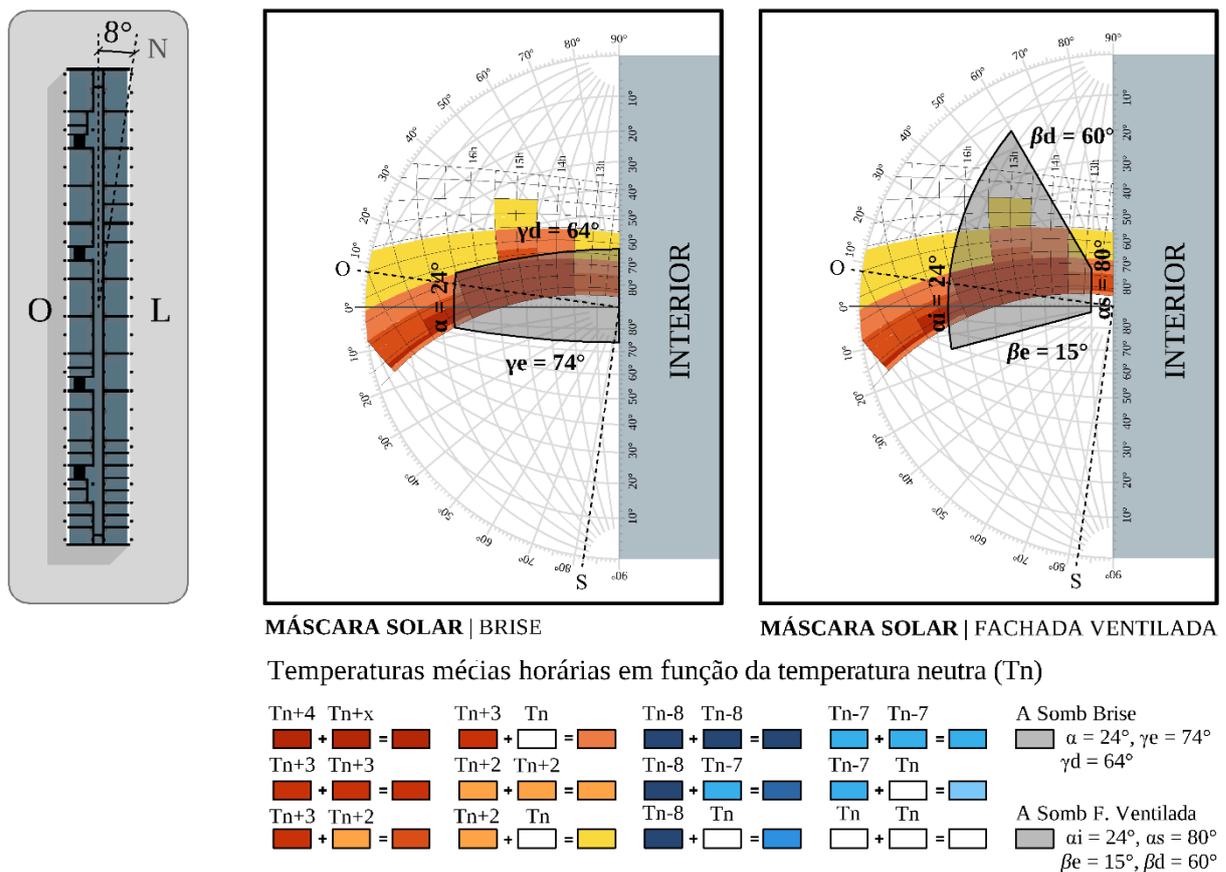
Conforme a figura, os ângulos solares obtidos para a formação dos brises da fachada oeste indicam as dimensões mínimas para o sombreamento necessário sobre as aberturas. Assim, com a inserção dos módulos na conformação dos brises fotovoltaicos, haverá a correção dos ângulos entre as extremidades do protetor solar e os referenciais adotados nas aberturas da fachada.

3.2.1.2 Fachada ventilada fotovoltaica

A fachada ventilada fotovoltaica consiste em um sistema composto por módulos fotovoltaicos adjacentes à fachada da edificação e afastados de modo a possibilitar o fluxo de ar na cavidade intermediária. Na sua constituição, foram adotados métodos que permitissem realizar análises comparativas com os brises propostos, sendo avaliada sobre os pavimentos de mesma fachada aos quais estes foram estabelecidos e utilizando as cartas solares da localidade integradas às temperaturas horárias e condições de temperatura neutra.

Então, o desenvolvimento da fachada ventilada fotovoltaica surge com a adaptação da máscara solar de sombreamento dos brises fotovoltaicos para a mesma orientação, à oeste. O método consiste na adoção de um perfil de obstrução que considere ângulos de sombreamento β para a definição das limitações verticais do sistema. A figura 17 apresenta a adaptação da máscara solar de sombreamento dos brises em um padrão de obstrução para fachadas ventiladas.

Figura 17 - Adaptação da máscara de sombreamento dos brises em fachada ventilada para a fachada oeste

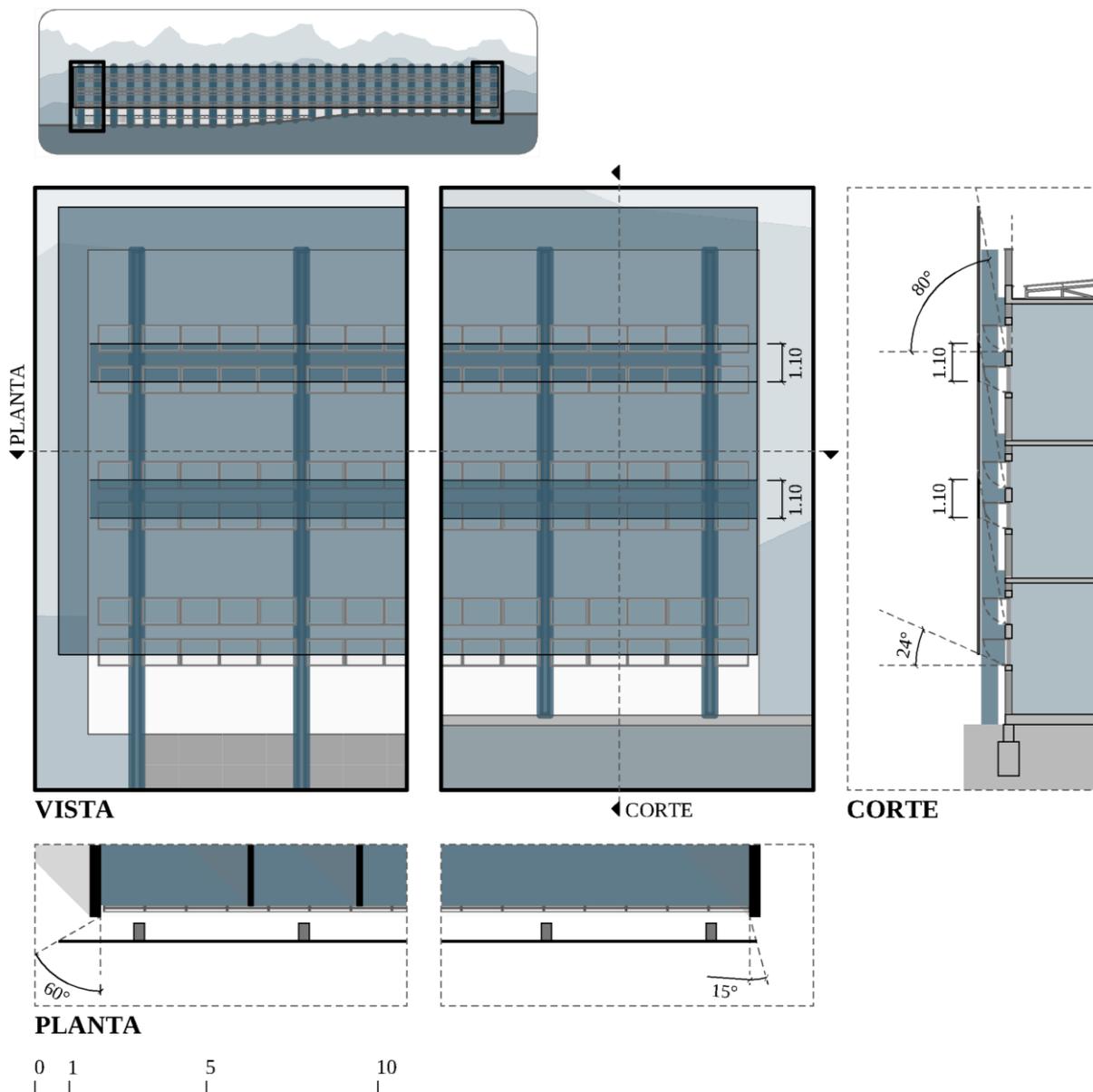


Fonte: Autor.

Foram obtidos ângulos solares mínimos para a definição de uma área de obstrução da incidência da irradiação solar nos períodos de desconforto térmico. Assim, o ângulo solar α_i (24°), delimita as extremidades inferiores da fachada ventilada em cada pavimento, enquanto foi adotado o ângulo α_s (80°) para delimitar as extremidades superiores. Os ângulos solares β_d (60°) e β_e (15°) determinam as extremidades laterais do sistema, como componentes verticais.

A figura 18 demonstra a constituição da fachada ventilada oeste a partir dos ângulos de sombreamento pré-estabelecidos.

Figura 18 - Formação da fachada ventilada para a fachada oeste

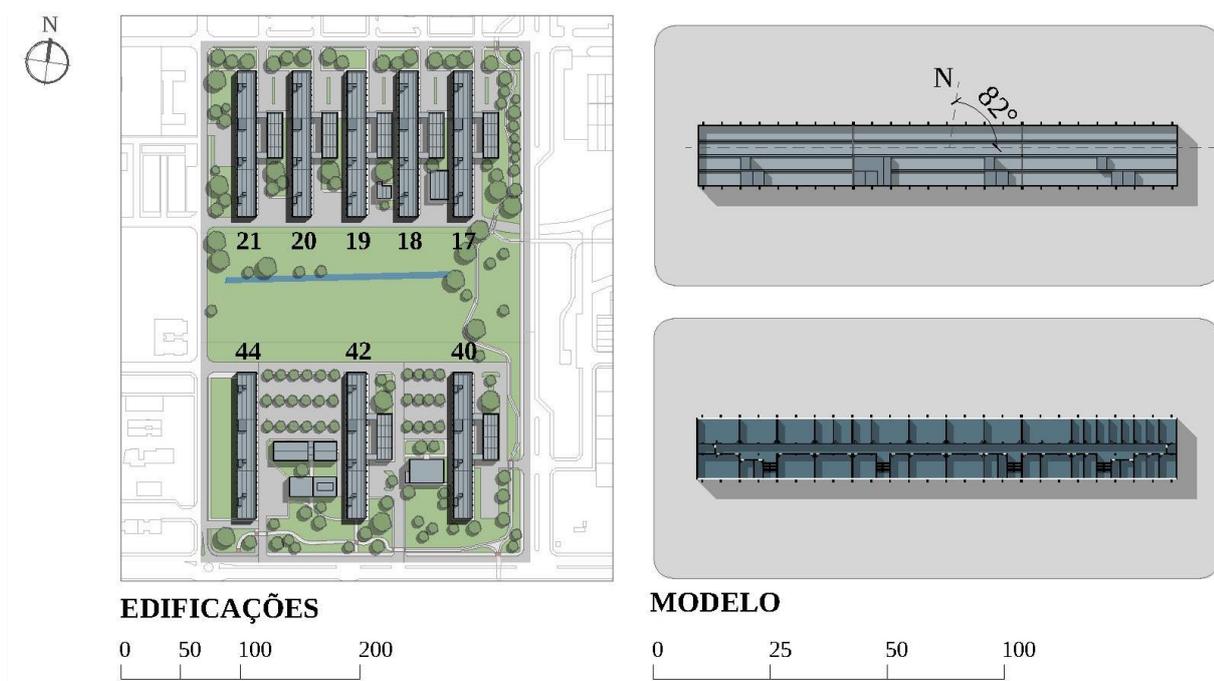


3.2.2 Modelo com exposição longitudinal norte-sul

O modelo com exposição longitudinal norte-sul apresenta implantação perpendicular à disposição dos edifícios básicos do campus. Nessa configuração, as fachadas principais do modelo estão expostas às orientações norte e sul e foram avaliadas de modo a permitir novas configurações de instalação dos conjuntos fotovoltaicos em outras edificações do campus.

A figura 20 caracteriza o modelo a ser avaliado com exposição longitudinal norte-sul.

Figura 20 - Modelo com exposição longitudinal norte-sul



Fonte: Autor.

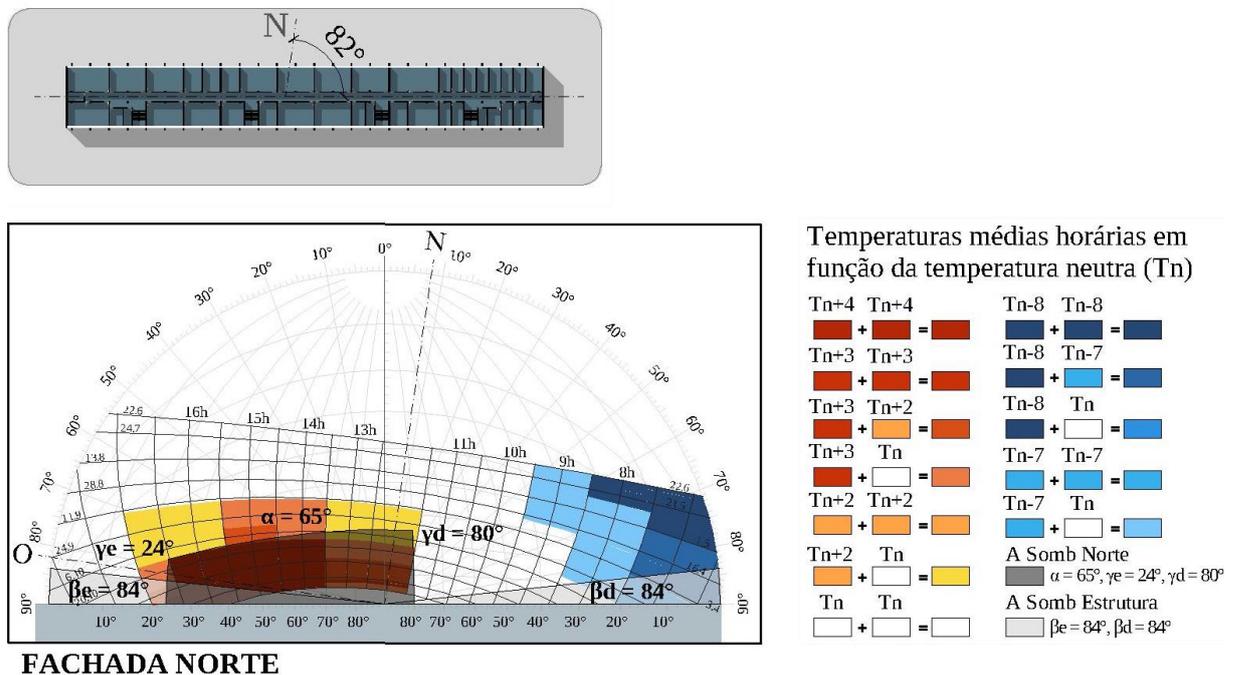
Na figura, é apresentada a configuração espacial das edificações básicas da Universidade Federal de Santa Maria e o modelo, em cobertura e pavimento tipo, com eixo longitudinal perpendicular ao das edificações existentes. No modelo avaliado, é verificado o posicionamento das caixas de escadas na face sul, favorecendo a maior exposição dos ambientes de ensino para a orientação norte com a contribuição de iluminação natural. Nestas condições, o dimensionamento dos conjuntos fotovoltaicos da envoltória foi distinto em brises fotovoltaicos e fachada ventilada fotovoltaica.

3.2.2.1 Brises fotovoltaicos

No modelo com exposição longitudinal norte-sul, os brises fotovoltaicos foram avaliados na fachada norte do modelo diante da necessidade de obstrução da incidência solar sobre as aberturas nesta face. A fachada sul foi desconsiderada para instalação do sistema de brises fotovoltaicos devido a menor incidência de irradiação solar como causa para desconforto térmico, além de limitar a geração elétrica pelos módulos.

Assim, na figura 21, a área de sombreamento adotada para a orientação norte é identificada na carta solar da localidade com as temperaturas médias horárias em função da temperatura neutra e com o sombreamento desenvolvido pelos pilares externos da edificação.

Figura 21 - Máscara solar para brises na fachada norte



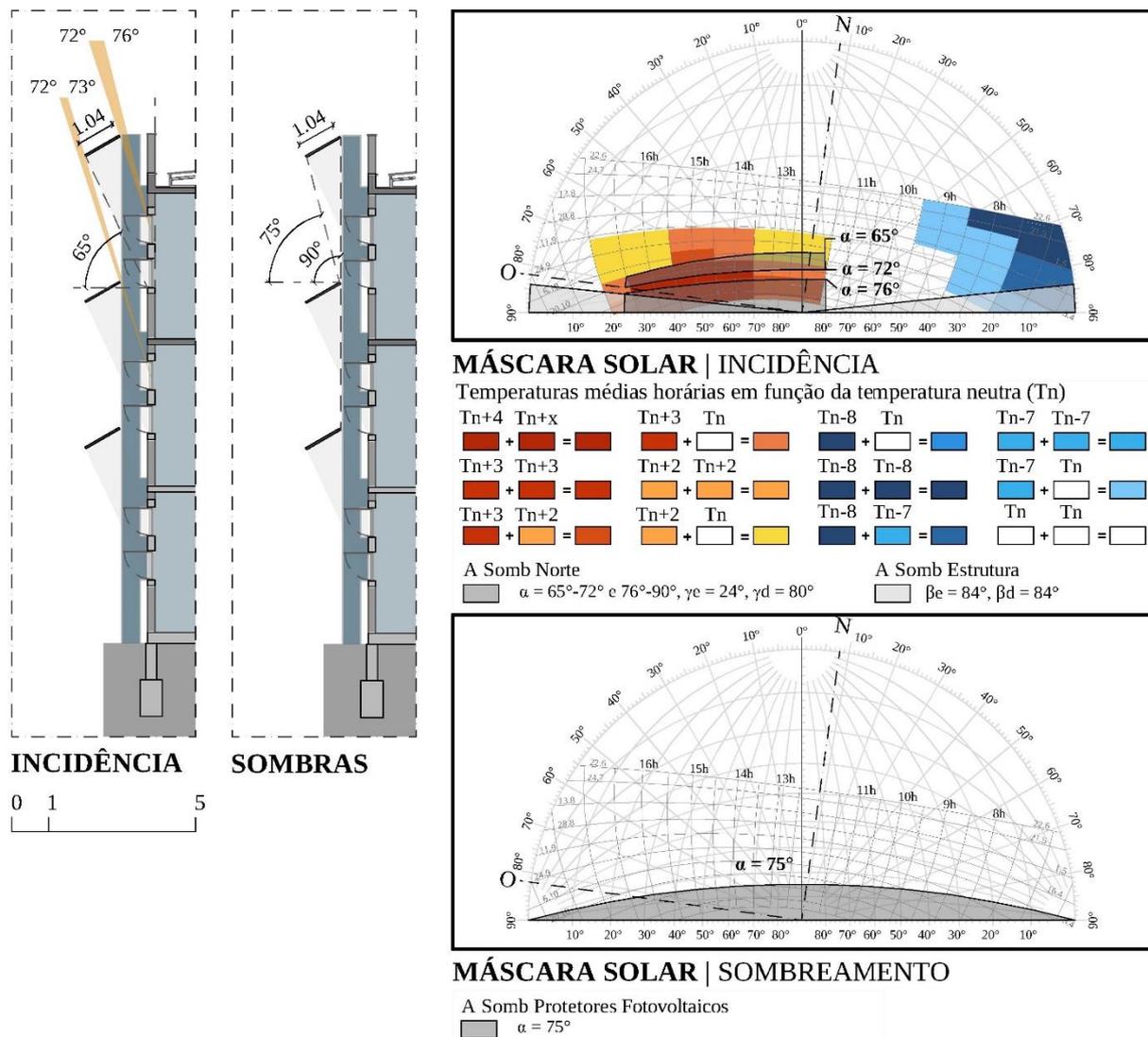
Fonte: Autor.

Considerando as diretrizes estabelecidas pelo RTQ-R (BRASIL, 2014c) para a obtenção da área de sombreamento dos brises, foram utilizados os ângulos γ_d (80°) e γ_e (24°) para a inclinação da lateral do plano horizontal sobre extremidade inferior das aberturas e o ângulo α (65°) para determinar a profundidade do plano horizontal. Ainda, a estrutura externa do edifício constitui os ângulos verticais mínimos β_d (84°) e β_e (84°), obstruindo a incidência de irradiação solar nos períodos de temperatura média horária inferiores à temperatura neutra – no início da manhã, nos meses frios -, quando a irradiação solar é fonte térmica para os ambientes. No

entanto, quando a trajetória solar se aproxima do solstício de verão, a estrutura amplia a área de sombreamento no período da tarde, quando a incidência ocasiona desconforto térmico.

A máscara de sombreamento foi reproduzida através do conjunto de módulos fotovoltaicos de dimensões e inclinações pré-estabelecidas, originando os brises fotovoltaicos. Os protetores apresentam inclinação de 30° a norte para ampliar a geração de energia e foi sobreposto à estrutura externa da edificação para evitar a ocorrência de sombreamentos por esta. Então, a partir das possibilidades de inserção dos brises fotovoltaicos na edificação, foi considerado um modelo de integração ideal para as funções de proteção solar e geração de energia, com apresentado na figura 22.

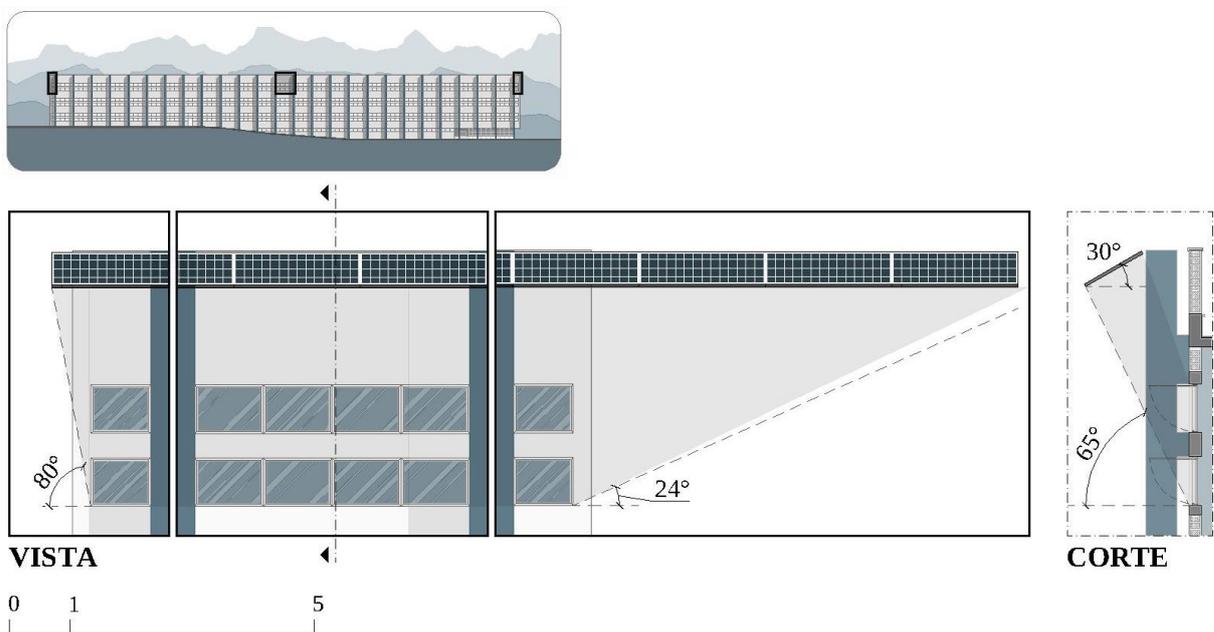
Figura 22 – Inserção e perfil de sombreamento dos brises fotovoltaicos para a fachada norte



Na figura, há incidência de irradiação solar indesejada sobre os ambientes em breves intervalos e devido ao afastamento entre os módulos e a face da edificação. A incidência ocorre quando a altura solar estiver entre a faixa de 72° e 76° , sendo verificada entre às 11h30 e 16h30 ao final dos meses de outubro e fevereiro. Ainda, os módulos superiores deverão ocasionar sombreamento sobre os módulos inferiores quando a altura solar for superior a 75° ; isto é, quando a trajetória solar se aproximar do solstício de verão na localidade.

Assim como na orientação oeste, a sobreposição entre as áreas de proteção necessárias em ambientes adjacentes indica a formação de brises contínuos, com a redução dos ângulos γ sobre as aberturas centrais dos pavimentos. A figura 23 apresenta a constituição dos brises para a fachada norte a partir da inserção de módulos fotovoltaicos.

Figura 23 - Formação dos brises para a fachada norte



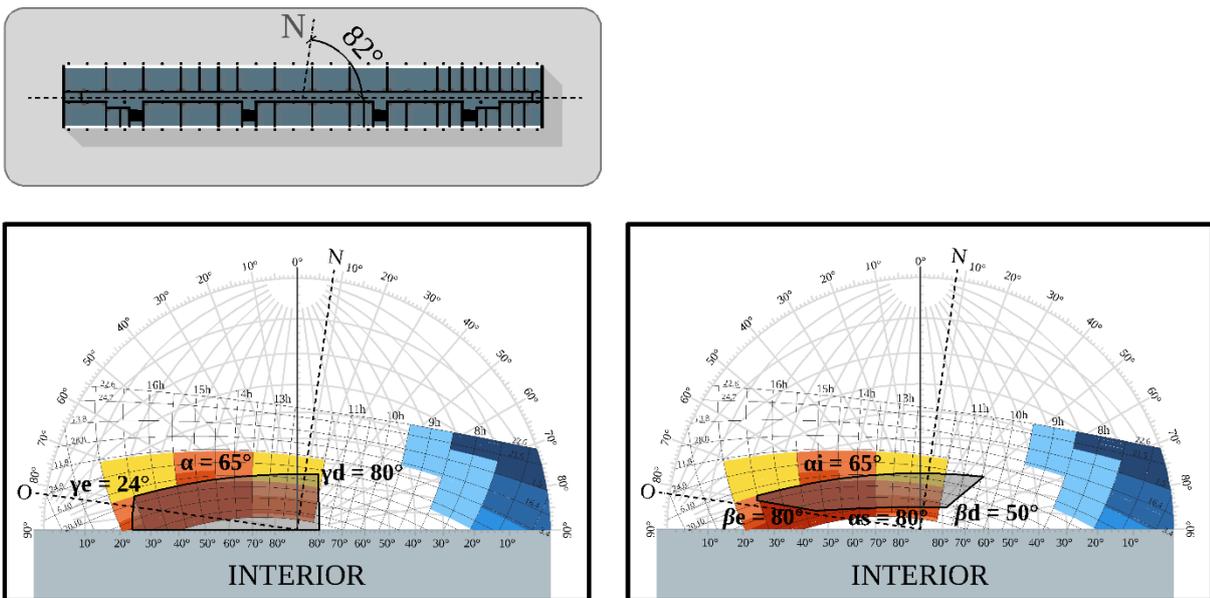
Fonte: Autor.

De acordo com a figura, com a inserção dos módulos fotovoltaicos para a constituição do protetor solar, ocorre a correção dos ângulos solares que definem a máscara de sombreamento. Dessa forma, foram acrescentados módulos fotovoltaicos até a extremidade do protetor solar desenvolver um ângulo de obstrução próximo ao ângulo de referência - γ_d (80°) e γ_e (24°) - encontrado na máscara solar.

3.2.2.2 Fachada ventilada fotovoltaica

Buscando avaliar o potencial fotovoltaico na envoltória da edificação, os módulos fotovoltaicos foram simulados na forma de fachada ventilada. Assim, a elaboração da fachada ventilada fotovoltaica para orientação norte ocorre pela adaptação da máscara solar de sombreamento dos brises fotovoltaicos nesta orientação. A figura 24 apresenta a configuração da máscara solar de sombreamento para fachada ventilada, em orientação norte, a partir do padrão de obstrução estabelecido para brises de mesma orientação.

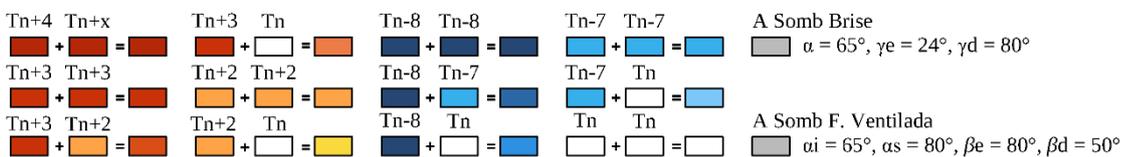
Figura 24 – Adaptação da máscara de sombreamento dos brises em fachada ventilada para a fachada norte



MÁSCARA SOLAR | BRISE

MÁSCARA SOLAR | FACHADA VENTILADA

Temperaturas médias horárias em função da temperatura neutra (T_n)

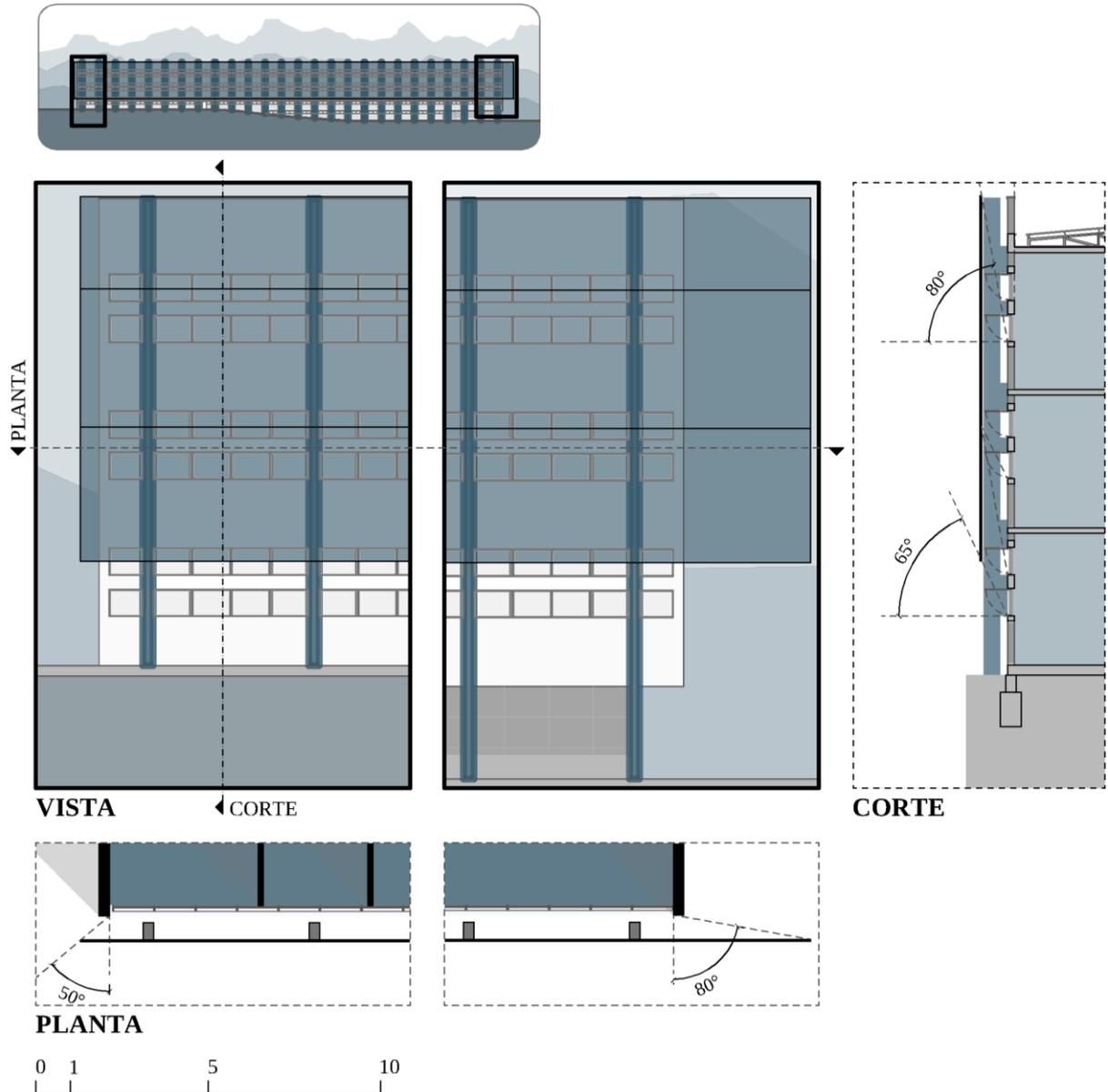


Fonte: Autor.

Assim, para a definição da máscara de obstrução da incidência de irradiação solar, foram estabelecidos os ângulos solares α_s de 80° , como limite superior para a estrutura da fachada ventilada fotovoltaica, e α_i de 65° como limite inferior da proteção em cada pavimento. Os ângulos β_d (50°) e β_e (80°) definem o prolongamento horizontal do sistema sobre os pilares externos da edificação.

Então, a partir dos ângulos de sombreamento pré-estabelecidos, foi constituída a fachada ventilada conforme a figura 25.

Figura 25 – Formação da fachada ventilada para a fachada norte



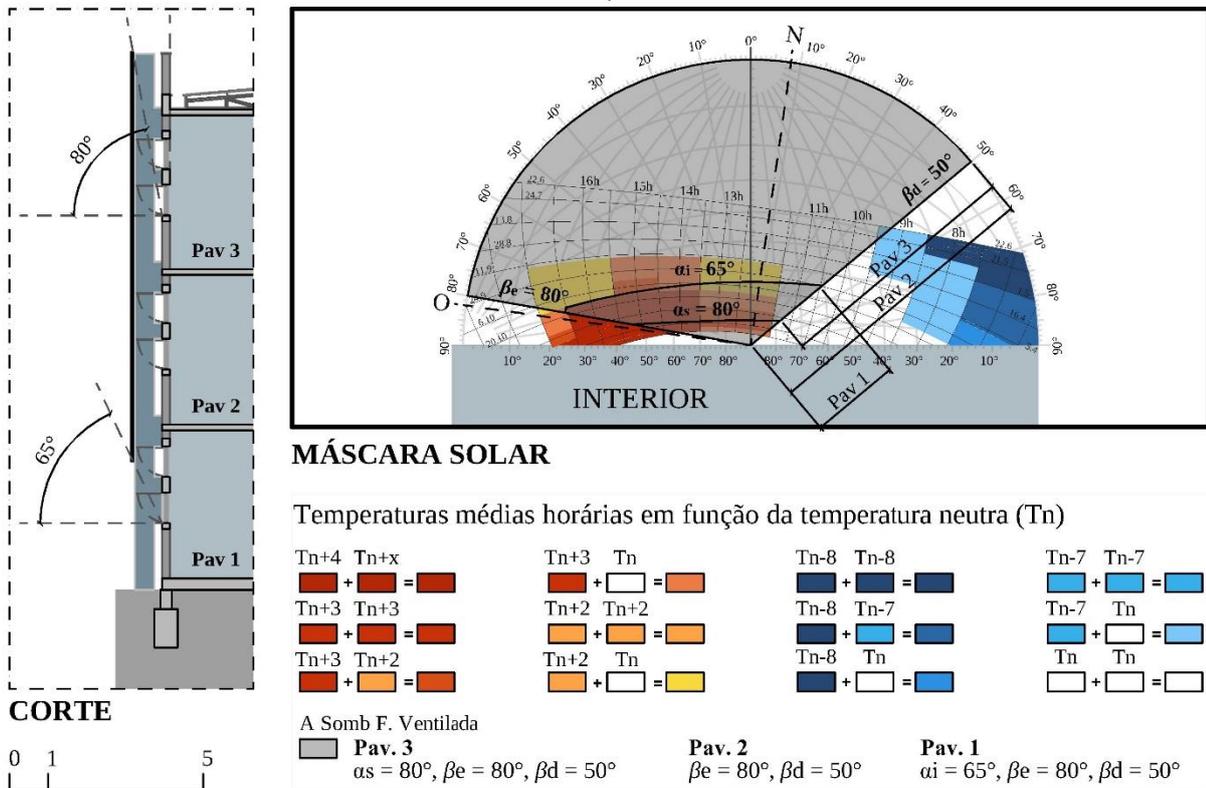
Fonte: Autor.

Nesta configuração, o ângulo α_s (80°), nos pavimentos 1 e 2, coincide com o ângulo α_i (65°) dos pavimentos superiores a estes, reproduzindo um sistema de fachada ventilada contínua entre os pavimentos. Embora a obstrução das aberturas ao norte tenha condicionado a disponibilidade de iluminação natural nos ambientes, nesta pesquisa, busca-se explorar o

desempenho dos conjuntos fotovoltaicos na condição de fachada ventilada a fim de comparar com outras composições na envoltória.

A figura 26 apresenta a configuração do sistema com o perfil de sombreamento desenvolvido.

Figura 26 – Máscara solar para a fachada ventilada na fachada norte



Fonte: Autor.

A fachada ventilada fotovoltaica foi obtida com a disposição vertical dos módulos fotovoltaicos e atendendo a área de sombreamento estimada. Nesse sentido, os ângulos de sombreamento foram adaptados em função das características geométricas dos módulos, como elementos constituintes do sistema. Enfim, a quantidade de módulos utilizada nos conjuntos fotovoltaicos da orientação norte foi reproduzida na cobertura do modelo, compondo os conjuntos fotovoltaicos de referência. Nestas condições, busca-se utilizar o quantitativo da geração elétrica dos módulos em posicionamento ideal para avaliar o desempenho energético dos conjuntos fotovoltaicos desenvolvidos para as funções de brises e fachada ventilada.

3.3 GERAÇÃO DE ENERGIA

Para a avaliação da geração de energia elétrica pelos conjuntos fotovoltaicos, foi utilizado o *software* PVsyst. Considerando dados geográficos sobre a incidência de irradiação solar característica e fatores ambientais do local, modelos comerciais de componentes do sistema e inclinações adotadas em projeto, o *software* fornece, através de recursos de simulação, relatórios do desempenho do sistema fotovoltaico como quantitativos da geração energética e fatores que compõem perdas nos sistemas.

Entre os parâmetros a serem avaliados, estão a *irradiação global efetiva*, *energia efetiva gerada*, *perdas* e *performance ratio (PR)*. A irradiação global horizontal, quando incide no plano dos módulos fotovoltaicos, é corrigida pela inclinação destes e identificada como irradiação solar global incidente. Esta, por sua vez, apresenta perdas na irradiância decorrentes de sombreamentos e quando a irradiação solar é dissipada ao seccionar as camadas protetoras do módulo, resultando na denominada irradiação global efetiva. Estas perdas ocorrem de modo distinto para os conjuntos fotovoltaicos, visto que apresentam orientações e inclinações variadas (PVSYST, 2020).

A energia efetiva gerada é identificada como a energia elétrica gerada pelos conjuntos fotovoltaicos desconsiderando as perdas relativas à transmissão e desempenho dos inversores. As perdas no desempenho dos sistemas fotovoltaicos são os fatores que particularizam a capacidade de geração de cada conjunto fotovoltaico, podendo estar relacionadas às perdas por geração, devido ao sombreamento, nível de irradiância, temperatura e a qualidade dos módulos, ou devido à transmissão, quando estão relacionadas ao desempenho do inversor ou sistema de fornecimento para a rede (PVSYST, 2020).

A *performance ratio* é determinada pela relação entre o desempenho do sistema, isto é, a energia injetada na rede, e o desempenho máximo teórico, que é representado pelo produto da irradiação global incidente sobre o plano dos módulos e a potência do sistema. Este parâmetro possibilita comparar o desempenho dos conjuntos, nas distintas configurações, com o seu limite teórico (PVSYST, 2020). No entanto, de modo a promover avaliações equivalentes entre os conjuntos, o desempenho do sistema foi indicado pela energia efetiva gerada pelos módulos fotovoltaicos, desconsiderando as perdas relacionadas aos inversores e cabos de transmissão. Desse modo, na determinação de PR, foi adotada a seguinte equação:

$$PR = \frac{\text{Energia efetiva gerada}}{\text{Irradiação global incidente} \times \text{Potência do sistema}}$$

3.3.1 Parâmetros iniciais de simulação

A simulação da geração de energia elétrica, no *software* PVsyst, ocorre pelo modo de “concepção de projeto”, que permite realizar análises detalhadas do projeto a partir da simulação tridimensional da proposta e de acordo com as variantes da localidade. Para a simulação do projeto, na localidade de Santa Maria, 29° 41' 29" sul e 53° 48' 3" oeste, foram utilizados os dados meteorológicos do *software* Meteonorm 7.2. Este utiliza dados meteorológicos mensais para a geração de valores horários sintéticos para componentes como irradiância global horizontal, irradiância difusa horizontal, velocidade do vento e temperatura.

A tabela 1 apresenta os dados meteorológicos obtidos para a localidade de Santa Maria, no período de 2008 a 2014, pelo *software* Meteonorm 7.2.

Tabela 1 - Parâmetros meteorológicos para Santa Maria, RS

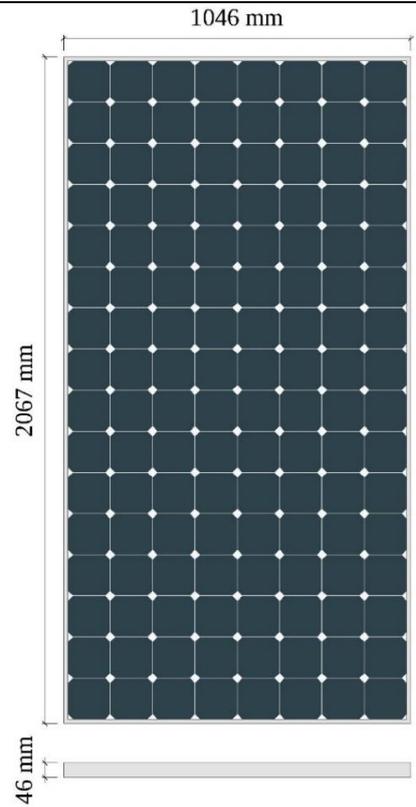
Período	Irradiação Global Horizontal (KWh/m².mês)	Irradiação Difusa Horizontal (KWh/m².mês)	Temperatura (°C)	Velocidade do Vento (m/s)	Umidade Relativa (%)
Janeiro	201,5	92,4	27,2	3,80	59,5
Fevereiro	161,1	73,9	26,2	3,70	62,8
Março	160,1	65,7	25,0	3,69	66,6
Abril	121,7	48,2	20,9	3,39	71,0
Mai	96,3	44,3	16,9	3,39	74,8
Junho	77,6	36,3	15,0	3,50	79,6
Julho	84,2	38,8	14,2	3,91	74,4
Agosto	103,9	45,9	16,3	3,99	69,6
Setembro	119,1	70,6	16,8	4,39	71,6
Outubro	167,1	75,7	20,8	4,29	69,0
Novembro	194,4	86,4	22,9	4,10	64,6
Dezembro	210,0	89,3	25,2	4,00	60,7
ANO	1.696,9	767,5	20,6	3,80	68,7

Fonte: PVsyst (2020).

Os dados obtidos constituem parâmetros básicos para a configuração das condições do ambiente em que os sistemas fotovoltaicos foram simulados. Em relação ao módulo fotovoltaico, o modelo adotado apresenta elevada eficiência energética quando avaliado para as condições de STC (*Standard Test Conditions*). Nestas avaliações, a massa de ar é determinada em 1,5 AM, irradiância de 1.000 W/m² e temperatura da célula é de 25°C. As características do módulo fotovoltaico adotado são descritas na tabela 2.

Tabela 2 - Características do módulo fotovoltaico

Módulo de Silício Monocristalino (mono-Si)	
Potência Nominal (P_{máx})	435 W
Eficiência (η)	20,1%
Tensão de máxima potência (V_{mpp})	72,90 V
Corrente de máxima potência (I_{mpp})	5,97 A
Tensão de circuito aberto (V_{oc})	85,60 V
Corrente de curto circuito (I_{sc})	6,43 A
Comprimento	2067 mm
Largura	1046 mm
Espessura	46 mm
Área do módulo	2,162 m ²
Área da célula	1,962 m ²
Peso	25,40 kg
Número de células	128
Temperatura de Operação	-40° C a 85° C



Fonte: Adaptado de PVsyst (2020).

A potência nominal ou potência de pico (P_{máx}) representa o valor máximo de potência desenvolvido pelo módulo quando o produto da tensão e corrente é máximo, identificando a maior geração de energia quando em condições ideais de irradiação e temperatura de operação dos módulos. A tensão em circuito aberto (V_{oc}) representa a tensão máxima do módulo quando a corrente elétrica e a potência, por sua vez, têm valor nulo, ocorrendo quando o circuito apresenta seus terminais abertos e desprovidos de um meio de condução. A corrente de curto circuito (I_{sc}) é a máxima corrente identificada quando o valor da tensão é nulo, bem como a potência, ocasionados, normalmente, pela perda de isolamento do circuito elétrico.

A eficiência do módulo fotovoltaico depende das características geométricas deste e da geração elétrica desenvolvida. Esse fator é identificado pela relação entre a potência máxima originada e a área do módulo, que, no modelo adotado, resulta em 20,1%. Esta característica estabelece, segundo os critérios do Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE), uma classificação energética do tipo A (BRASIL, 2020c).

3.3.2 Método de simulação

Foram avaliadas, para as orientações norte e oeste, a geração de energia pelo sistema de fachada ventilada fotovoltaica e pelo conjunto de brises fotovoltaicos. Também foi avaliada a reprodução destes conjuntos em condições ideais, na cobertura (Cob) do modelo, e três avaliações individuais para cada subconjunto de brises que compõem a proteção dos pavimentos. Esta distinção busca avaliar as contribuições individuais de cada subconjunto quando condicionados por formas de incidência de irradiação solar distintas, limitando a geração de energia total no conjunto.

De forma a possibilitar condições equivalentes de análise, foi utilizado um único modelo de inversor para as distintas análises. Este foi determinado após a caracterização dos conjuntos fotovoltaicos com a configuração dos arranjos e pela verificação da potência nominal do sistema. Então, foi utilizado o banco de dados do *software* PVsyst para a escolha do inversor com potência unitária comum à formatação dos sistemas.

A tabela 3 apresenta a configuração dos conjuntos fotovoltaicos avaliados, com a distinção entre quantidade de módulos, arranjo de distribuição destes e potência total do conjunto, bem como a potência unitária e quantidade de inversores.

Tabela 3 - Configuração dos conjuntos fotovoltaicos para a geração de energia

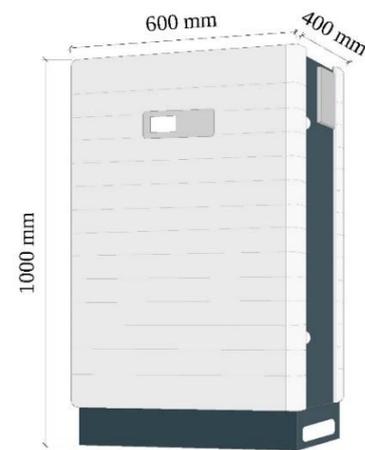
	Conjunto	Módulos			Inversores	
		Qtd.	Arranjo (Série x Strings)	Pot. Total (kW)	Qtd.	Potência (kW)
Norte	Fachada Ventilada	585	9 x 65	254,48	8	30
	Fachada Ventilada (Cob)	585	9 x 65	254,48	8	30
	Brise Total	189	7 x 27	82,22	3	30
	Brise Total (Cob)	189	7 x 27	82,22	3	30
	Brise Pavimento 1	63	7 x 9	27,41	1	30
	Brise Pavimento 2	63	7 x 9	27,41	1	30
	Brise Pavimento 3	63	7 x 9	27,41	1	30
Oeste	Fachada Ventilada	684	9 x 76	297,54	10	30
	Fachada Ventilada (Cob)	684	9 x 76	297,54	10	30
	Brise Total	360	10 x 36	156,60	5	30
	Brise Total (Cob)	360	10 x 36	156,60	5	30
	Brise Pavimento 1	120	10 x 12	52,20	2	30
	Brise Pavimento 2	120	10 x 12	52,20	2	30
	Brise Pavimento 3	120	10 x 12	52,20	2	30

De acordo com a tabela, foi adotado um modelo de inversor com potência nominal de 30 kW, visto que, a partir dessa capacidade, seria possível adequá-lo à potência total exigida pelos conjuntos de módulos através do emprego, em cada conjunto, de uma quantidade de inversores distinta. Ainda, as especificações do modelo de inversor orientaram o arranjo dos módulos em cada conjunto, limitando estes em séries de sete a dez módulos fotovoltaicos.

As especificações técnicas do inversor adotado são descritas conforme a tabela 4.

Tabela 4 - Características do inversor fotovoltaico

Potência AC Nominal	30 kW
Eficiência Máxima (η)	$\pm 98\%$
Tensão MPP mínima	420 V
Tensão MPP máxima	800 V
Corrente AC Nominal	43,5 A
Altura	1000 mm
Largura	600 mm
Profundidade	400 mm
Peso	155,0 kg



Fonte: Adaptado de PVsyst (2020).

O inversor apresenta cerca de 98% de eficiência, sendo uma relação entre a capacidade de conversão da energia elétrica gerada pelo sistema fotovoltaico, em corrente contínua (c.c.), para a rede elétrica, em corrente alternada (c.a.). Os parâmetros de tensão mínima e máxima do inversor, em relação às tensões características do módulo fotovoltaico utilizado, condicionam a capacidade de módulos em série na *string*; ocorrendo, neste caso, entre sete e dez módulos.

Embora as características do inversor e equipamentos de transmissão sejam fatores importantes na eficiência da conversão entre energia elétrica gerada e injetada na rede, este trabalho não avalia as perdas relativas à transmissão e conversão de energia. De modo a ampliar a eficiência do sistema fotovoltaico, em geral, seriam necessários avaliar individualmente cada conjunto fotovoltaico proposto, determinando, entre outros, a aplicação de inversores distintos. Ainda, a disposição destes influenciaria a ramificação dos cabos de transmissão, desenvolvendo quantitativos de perdas pelo desempenho do inversor e transmissão diferentes para os conjuntos fotovoltaicos pesquisados, inviabilizando uma avaliação equivalente.

3.4 CONSUMO ENERGÉTICO

Para a avaliação do desempenho energético dos conjuntos fotovoltaicos na envoltória da edificação, foi utilizado o *software* DesignBuilder. Este, através da avaliação dos condicionantes climáticos locais, dos materiais que compõem a edificação e atividades, permite desenvolver avaliações termo-energéticas do modelo virtual construído em sua plataforma.

O DesignBuilder foi desenvolvido a partir do banco de dados e mecanismos de simulação do *software* EnergyPlus, adaptando-o para uma interface gráfica orientada a gestão de projetos. O EnergyPlus, por sua vez, é uma das principais ferramentas de simulação energética disponíveis, sendo desenvolvido pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE) a partir dos *softwares* BLAST e DOE-2, e busca obter resultados para o aquecimento, refrigeração, iluminação, ventilação e demais fluxos de energia de uma edificação.

Com a simulação, podemos identificar os ganhos e perdas energéticas devido a influência do meio, pela composição dos materiais da edificação e em relação à sua ocupação. Assim, é possível avaliar o consumo energético relacionado a ventilação, iluminação e por equipamentos, tornando o *software* uma ferramenta útil na avaliação e melhoramento do desempenho de edificações. Nesta pesquisa, os parâmetros a serem avaliados são referentes ao consumo elétrico por *equipamentos, iluminação, aquecimento e resfriamento artificial*.

3.4.1 Parâmetros iniciais de simulação

O modelo foi simulado para a localidade de Santa Maria, utilizando, para a contextualização dos fatores ambientais, o arquivo climático obtido do projeto *SWERA (Solar and Wind Energy Resource Assessment)*. Este projeto, junto ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal de Santa Catarina, fornecem o arquivo climático de 20 localidades brasileiras a ser utilizado em *softwares* de simulação computacional. O arquivo contém informações que incluem os dados de recursos energéticos renováveis, como os solares e de ventos (LABEEE, 2015).

Na simulação, não foram considerados os componentes que caracterizam o entorno das edificações existentes. Assim, as massas de vegetação, pavimentações, volumetrias e materialidades das edificações adjacentes não foram representadas, visto que estes componentes apresentam distinções no contexto de cada edifício básico. No *software* DesignBuilder, a edificação foi modelada através do recurso *Building Block*, enquanto os elementos da estrutura foram desenvolvidos em *Component Block – Standard* e, para o solo, *Component Block - Ground*.

3.4.2 Método de simulação

O modelo virtual foi constituído por 154 zonas a serem simuladas e que configuram os ambientes do edifício. Estas foram organizadas em áreas administrativas, banheiros, circulações, comerciais, laboratórios, recreativas, salas de aula, salas de estudo, salas de exposição, salas de professores e serviços.

Na composição do modelo, foram caracterizados os componentes de *atividade*, *iluminação*, *condicionamento artificial*, *envoltória da edificação* e *cronogramas*. No parâmetro de atividades, os ambientes da edificação foram caracterizados quanto a densidade de ocupação no espaço e a taxa metabólica para desempenho da atividade de acordo com a ISO 7730 (2005), ASHRAE (2010) e NBR 16.401-3 (ABNT, 2008). O consumo elétrico por equipamentos foi obtido com o levantamento das cargas que caracterizam os ambientes, conforme a tabela 5.

Tabela 5 - Densidade de potência em equipamentos

Ambiente	Potência (W)
Administrativo	Computador (250), Monitor (30)
Banheiros	Secador (1.696)
Circulação	Bebedor (320), Aquecedor de Água (1.500)
Comerciais	Computadores (500), Monitores (60), Freezer (150), Refrigerador (150), Micro-ondas (1.150), Impressora (900)
Laboratórios	Computador (250), Monitor (30), Refrigerador (150)
Recreativos	Refrigerador (150), Televisor (100), Micro-ondas (1.150)
Salas de Aula	Computador (250), Projetor (210)
Salas de Estudo	Computador (250), Monitor (30)
Salas de Exposição	Computador (250), Monitor (30), Projetor (210), Televisor (100)
Salas de Professores	Computador (250), Monitor (30)
Serviços	Bomba de Água (2.238)

Fonte: CELPE (2018).

Em relação à iluminação, foram adotados níveis de iluminância aceitos no ambiente em conformidade com a NBR ISO/CIE 8.995-1 (ABNT, 2013). Na determinação da densidade de potência dos dispositivos de iluminação, foi utilizado BRASIL (2021) com níveis limites para a obtenção de classificação energética A de acordo com o *método das atividades do edifício*, onde a densidade de potência em iluminação é avaliada para cada ambiente considerando as atividades desempenhadas.

No modelo, para o controle de iluminação, foi adotado o método de controle *stepped*, onde a iluminação artificial é controlada em função da disponibilidade da iluminação natural e pelo escalonamento de grupos de luzes. Então, quando a iluminância no ambiente for inferior aos valores especificados, ocorre o acionamento escalonado da iluminação.

Os índices utilizados para as atividades e iluminação são apresentados na tabela 6.

Tabela 6 - Parâmetros de atividades e iluminação

Ambiente	Densidade de Ocupação (pessoas/m²)	Taxa Metabólica (W/pessoa)	Densidade de Potência - Equipamentos (W/m²)	Iluminância (lux)	Densidade de Potência - Iluminação (W/m²)
Administrativo	0,14	70	7,67	500	10,0
Banheiros	0,20	58	2,79	200	9,15
Circulação	0,10	110	2,45	100	7,10
Comerciais	0,70	116	8,9	200	6,80
Laboratórios	0,25	93	6,71	500	12,90
Recreativos	0,30	58	17,64	200	7,55
Salas de Aula	0,35	70	7,73	500	12,90
Salas de Estudo	0,10	70	7,66	500	8,85
Salas de Exposição	0,40	70	8,83	500	11,50
Salas de Professores	0,06	70	16,16	300	10,0
Serviços	0,10	116	9,31	100	4,65

Fonte: ABNT (2008, 2013), ASHRAE (2013), ISO (2005), BRASIL (2021).

Para o parâmetro de condicionamento artificial, foram consideradas temperaturas ideais para a climatização quando os ambientes estão ocupados e desocupados. Sendo assim, foi determinado como *setpoint*⁷ de aquecimento a temperatura de 20°C e, para resfriamento, de 26°C; com temperaturas de *setback*⁸ de até 12°C e 30°C respectivamente. Apesar disso, a utilização dos sistemas de aquecimento e resfriamento artificial estão condicionadas ao cronograma de uso deste equipamento.

⁷ Temperatura ideal no ambiente quando ocupado (DESIGNBUILDER, 2010).

⁸ Temperatura quando o ambiente estiver desocupado e o sistema de condicionamento artificial estiver em funcionamento (DESIGNBUILDER, 2010).

O condicionamento artificial foi aplicado nos ambientes com maior permanência do usuário, sendo estes as áreas administrativas, comerciais, laboratórios, salas de aula e salas de professores. Assim, foi adotado um modelo comercial de dispositivo identificado em ambientes dos edifícios, como um Split Inverter com *Coeficiente de Performance* (COP) de 3,28 W/W para aquecimento, *Índice de Eficiência de Energia* (EER) de 3,24 W/W para refrigeração e fluxo de ar ventilado interno de 1.100 m³/h. Nos banheiros e áreas de circulação, foi considerada uma contribuição por ventilação natural com taxas de trocas de ar por hora de 5,0 ac/h.

Quanto à envoltória, foram caracterizadas e levantadas as características construtivas da edificação, utilizando as normativas do Desempenho Térmico de Edificações (ABNT, 2005a, 2005b) e o Catálogo de Propriedades Térmicas de Paredes, Coberturas e Vidros (BRASIL, 2013). Os componentes considerados na simulação são apresentados na tabela 7.

Tabela 7 - Componentes da envoltória

Elementos	Componentes	Transmitância Térmica (W/m².K)	Capacidade Térmica (kJ/m².K)
Paredes Externas	Parede dupla de tijolos de 6 furos, assentados na menor direção, com espessura de 25,0 cm. Dimensões do tijolo: 10,0 x 20,0 x 20,0 cm. Espessura da arg. de assentamento: 1,0 cm. Espessura da argamassa de emboço: 2,5 cm.	1,52	248,00
Paredes Internas	Parede de tijolos de 6 furos, assentados na menor dimensão, com espessura de 15,0 cm. Dimensões do tijolo: 10,0 x 15,0 x 20,0 cm. Espessura da arg. de assentamento: 1,0 cm. Espessura da argamassa de emboço: 2,5 cm.	2,28	168,00
Lajes	Laje nervurada sem preenchimento, com espessura de 26,25 cm. Espessuras da laje de 22,5 cm, contrapiso de 2 cm, piso cerâmico de 0,75 cm e forro de gesso de 1 cm.	2,22	278,00
Piso Cerâmico	Espessura do piso cerâmico: 1,0 cm. Espessura da argamassa e contrapiso: 3,0 cm. Espessura da laje: 12,0 cm.	2,67	239,40
Piso em Tacos de Madeira	Espessura dos tacos de madeira: 2,0 cm. Espessura da argamassa e contrapiso: 3,0 cm. Espessura da laje: 12,0 cm.	2,304	242,44
Cobertura	Laje maciça: 10,0 cm Câmara de ar: superior a 5,0 cm Telha de fibrocimento: 0,60 cm	2,06	233,00

Fonte: ABNT (2005a, 2005b), BRASIL (2013).

Em relação às janelas, foram configuradas para o tipo *maxim-ar*, com perfil de ferro e vidro comum e incolor com espessura de 3 mm e fator solar (Fs) de 0,87 (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014) e, para caracterizar o solo na localidade, foi considerada uma condutividade térmica de 1,12 W/m.K (TEICHRIEB et al., 2016). Também, as propriedades físicas e térmicas dos módulos fotovoltaicos foram representadas na simulação, uma vez que, na envoltória do modelo, influenciam nos ganhos térmicos. Assim, foram adotadas a capacidade térmica de 823 J/kg.K e transmitância térmica de 8,61 W/m².K (RUSCHEL; GASPARIN; KRENZINGER, 2015).

Com a constituição dos componentes físicos do modelo virtual, foi necessário adequar o consumo elétrico do modelo ao observado nas edificações reais e, assim, foi adotado o levantamento do consumo elétrico do edifício 42, Centro de Ciências Rurais, como referência. O monitoramento do consumo elétrico individual nas edificações do campus Camobi se iniciou em agosto de 2019 e, anteriormente, ocorria de modo centralizado, impedindo a formação de um histórico de consumo específico para os edifícios.

Nesta pesquisa, o levantamento do consumo elétrico foi considerado até o mês de março de 2020, quando a universidade declarou a suspensão das atividades acadêmicas presenciais, em 16 de março de 2020, devido a pandemia de COVID-19. A partir deste período, as atividades na instituição foram consideradas atípicas, reduzindo o consumo elétrico característico e, desse modo, os quantitativos do consumo elétrico, nos dias subsequentes do mês de março, foram projetados em função dos dias letivos típicos e anteriores à suspensão; enquanto, nos meses posteriores, o consumo foi integralmente desconsiderado. A tabela 8 apresenta o consumo elétrico no edifício 42, Centro de Ciências Rurais da Universidade Federal de Santa Maria.

Tabela 8 - Consumo elétrico no edifício 42 da UFSM

Mês/Ano	Consumo (kWh)	Mês/Ano	Consumo (kWh)
Agosto/19	25.953,28	Dezembro/19	20.772,27
Setembro/19	20.667,50	Janeiro/20	28.091,90
Outubro/19	23.616,18	Fevereiro/20	24.546,66
Novembro/19	26.086,93	Março/20	36.441,98

Fonte: UFSM (2020).

Então, buscando caracterizar o consumo real no modelo virtual, os ambientes foram configurados com cronogramas de uso específico de acordo com a sua atividade. As rotinas foram organizadas em três padrões gerais em função das atividades observadas na edificação, resultando nos períodos de *férias*, *intermediário* e *letivo*.

No período de férias, em janeiro e fevereiro, não ocorrem atividades em salas de aula, estudos e expositivo, além da redução na ocupação em banheiros, áreas de circulação, comercial e laboratórios e ampliação no uso das salas de professores. Nos meses intermediários, em março, julho, agosto e dezembro, ocorre um período de transição, com a ocupação parcial dos ambientes. Nos meses letivos, em abril, maio, junho, setembro, outubro e novembro, ocorrem as atividades letivas típicas, com uso intenso dos ambientes de ensino.

Posteriormente, os meses foram segmentados em horários característicos para o desempenho das atividades a fim de detalhar a rotina da edificação. Foram classificados em horário comercial e de aulas diurnas (8h às 12h e 14h às 18h) e noturnas (19h às 23h), intervalos (12h às 14h e 18h às 19h), períodos de pré e pós-ocupação, restrito a iluminação e equipamentos gerais (7h às 8h e 23h às 0h) e período de desocupação (0h às 7h).

Na fidelização do modelo virtual ao modelo real, há, ainda, a necessidade de tornar o consumo energético simulado em acordo com o perfil de consumo verificado em instituições de mesma finalidade. Segundo a Eletrobrás (2007, apud LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014), em edificações públicas, aparelhos de ar condicionado representam até 48% do total do consumo de energia elétrica, enquanto a iluminação corresponde a 23%, equipamentos de escritório, 15%, e demais usos, 14%. Santana (2006), ao simular o consumo de energia em edifícios de escritórios, obteve como resultantes no consumo energético o percentual de 39% para equipamentos de ar condicionado, 21% para sistemas de iluminação e 40% para demais equipamentos. Diante disso, buscou-se desenvolver, no modelo virtual, um perfil de consumo energético intermediário, com consumo para ar condicionado de 40%, para iluminação de 25% e equipamentos em 35%, respeitando um desvio percentual de até 5% por componente.

Para gerenciar os componentes de consumo energético no modelo, foram criados cronogramas individuais de uso para a *climatização, equipamentos, iluminação e ocupação* em cada ambiente. No cronograma de climatização foi caracterizado o uso de aparelhos de ar condicionado, onde percentuais acima de 50% indicam ambientes ocupados e utilizando a temperatura de *setpoint* para aquecimento e resfriamento; enquanto percentuais menores ou iguais a 50% e superiores a 0% indicam um ambiente desocupado, operando em temperatura de *setback*. Quando o percentual indicado é 0%, o sistema de ar condicionado está desligado. Nos cronogramas de equipamentos e iluminação, os percentuais indicam a utilização destes em função de suas densidades de potência; enquanto o cronograma de ocupação indica o padrão de presença dos usuários em função da densidade de ocupação (DESIGNBUILDER, 2010).

Os cronogramas de atividades desenvolvidos para o modelo virtual constituem o Apêndice C.

3.5 BALANÇO ENERGÉTICO DOS CONJUNTOS FOTOVOLTAICOS

O balanço energético determina o desempenho geral dos conjuntos fotovoltaicos, em suas distintas configurações, quando inseridos no modelo virtual que caracteriza as edificações de tipologia padrão da Universidade Federal de Santa Maria no campus Camobi. Através desse parâmetro, relacionando a demanda energética com a geração de energia, foi possível identificar os conjuntos fotovoltaicos que promoveram a maior eficiência energética no modelo virtual.

Nesta pesquisa, como métrica adotada para o balanço energético, foi considerada a diferença entre a energia elétrica consumida pelo modelo virtual em relação aos usos finais e a energia elétrica efetiva gerada pelos componentes fotovoltaicos. Assim, a energia consumida corresponde à demanda elétrica em equipamentos, iluminação e condicionamento artificial verificada com a inserção dos conjuntos fotovoltaicos. A energia efetiva gerada, por sua vez, corresponde à energia elétrica gerada através dos módulos fotovoltaicos, desconsiderando as perdas relacionadas ao desempenho dos inversores e durante a transmissão do volume energético para a rede elétrica.

Então, o balanço energético, em cada situação avaliada, determina a condição energética do modelo virtual, sendo apresentado pela diferença entre a energia consumida e gerada conforme a equação geral:

$$\text{Balanço Energético} = \sum \text{Energia_Consumida} - \sum \text{Energia_Gerada}$$

A partir dos resultados obtidos, foi adotada a representação gráfica de Sartori, Napolitano e Voss (2012) para expressar a resultante energética promovida por cada conjunto fotovoltaico. O recurso permite relacionar os balanços energéticos identificados no modelo virtual, indicando os conjuntos com maior eficiência energética. Ainda, possibilita situar os valores obtidos em relação aos limites para a obtenção do balanço energético nulo (NZEB).

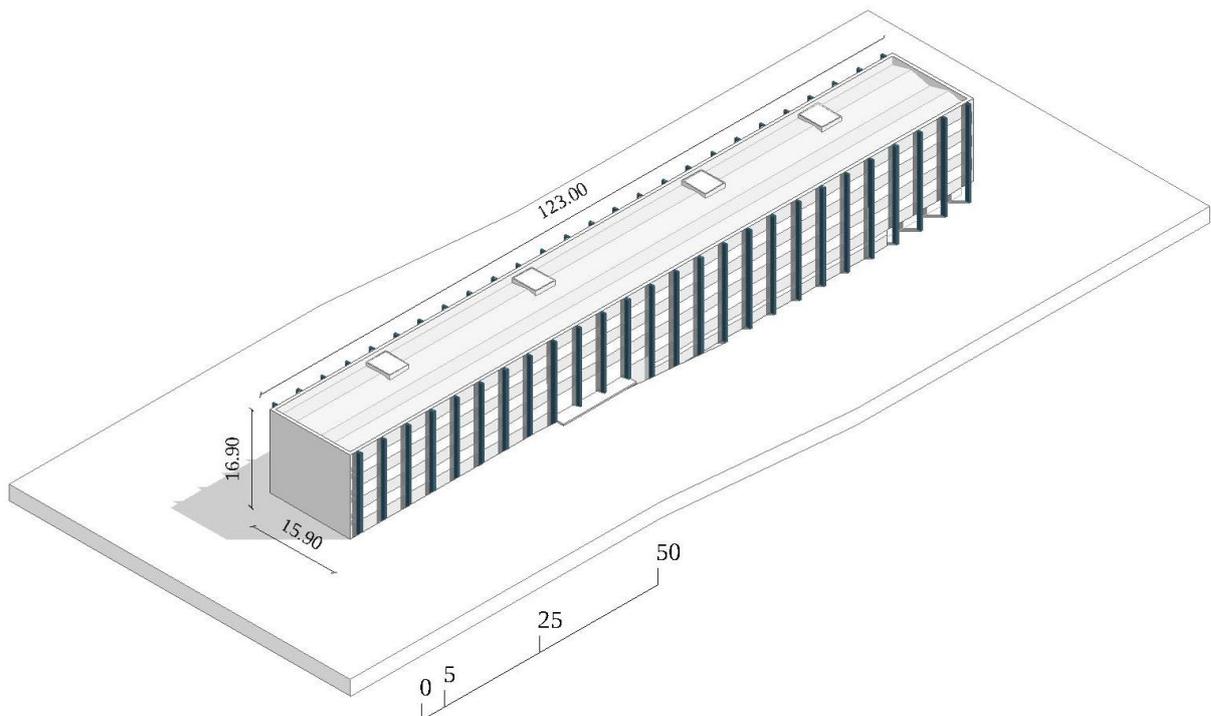
4 RESULTADOS

Neste capítulo, é apresentado o modelo virtual desenvolvido a partir da caracterização das edificações, as propostas de conjuntos fotovoltaicos – brises e fachadas ventiladas para as orientações oeste e norte – e seus respectivos conjuntos de referência, quantitativos da geração de energia pelos módulos fotovoltaicos dos conjuntos, desempenho destes em relação ao consumo energético do modelo e o balanço energético promovido pelos sistemas.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DAS EDIFICAÇÕES

O modelo de estudo é resultante da avaliação das edificações existentes a partir do inventário desenvolvido. Dessa forma, o modelo é representado com a quantidade de pavimentos, volumetria, materialidade e características espaciais pertinentes nas oito edificações básicas do Setor de Ensino da Universidade Federal de Santa Maria, campus Camobi. A figura 27 apresenta a configuração geral do modelo de estudo.

Figura 27 - Perspectiva isométrica do modelo virtual



Fonte: O autor.

O modelo apresenta volumetria na forma de barra, estando diretamente relacionada com o contexto modernista onde o campus da Universidade Federal de Santa Maria foi concebido.

As faces das extremidades da edificação apresentam empenas cegas, tendo as aberturas voltadas para as faces do comprimento. As aberturas, por sua vez, apresentam-se dispostas em duas fitas, em cada pavimento, e são sobrepostas pelos pilares que determinam a estrutura externa da edificação. Esta configuração é ponto fundamental na arquitetura moderna dos edifícios do campus, possibilitando a planta livre necessária para disposição dos espaços internos (WOLLE, 2019).

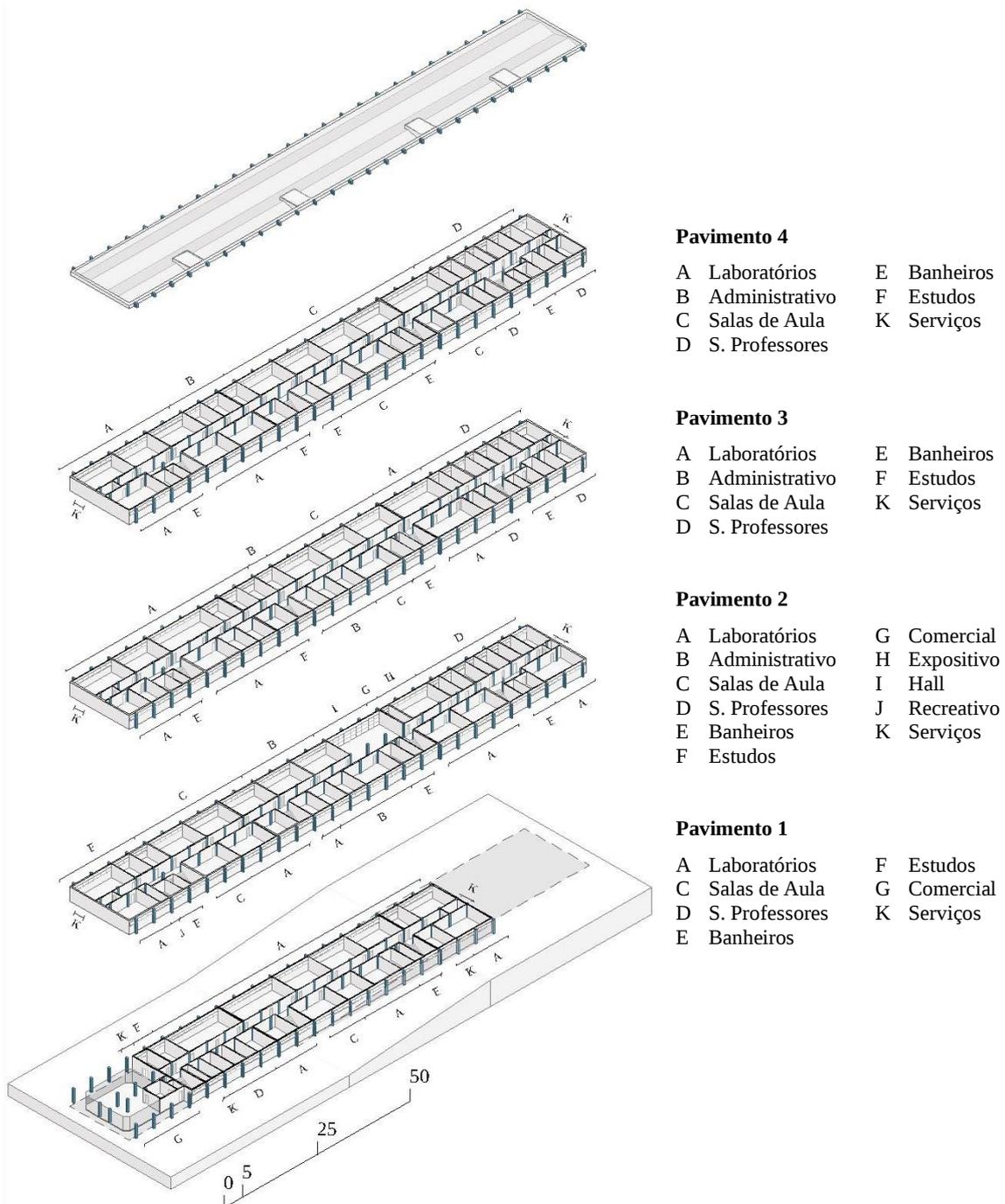
Ainda, o modelo virtual apresenta, como dimensões gerais, comprimento de 123,00 m, largura de 15,90 m e altura de 16,90 m, com área total de 7.361,50 m². É organizado em quatro pavimentos, onde o primeiro pavimento, semienterrado, tem uma área de 1.456,36 m² e os demais apresentam áreas de 1.968,38 m². A organização dos ambientes, nos pavimentos, é resultante das avaliações dos inventários e estabelece espaços com dimensões e posicionamento recorrentes nos respectivos pavimentos de cada edificação levantada. A configuração do modelo em quatro pavimentos, também, busca promover os estudos para uma situação de elevada demanda energética, aproximando a edificação da configuração volumétrica identificada nas edificações básicas compreendidas na face sul do campus – Centro de Artes e Letras e Centro de Ciências Rurais da UFSM.

O primeiro pavimento é composto pela grande área comercial (lancheria), laboratórios, salas de professores, banheiros e áreas de serviços com depósitos. O segundo pavimento, possuindo o acesso principal da edificação, através de um hall, apresenta a maior variedade de ambientes, como salas destinadas ao setor administrativo, salas de aula, de professores, de estudos e laboratórios, como componentes do setor de ensino, e ambientes de exposição, comercial (copiadora e serviços gráficos), recreação (copa para funcionários), banheiros e de serviços (arquivos). O terceiro e quarto pavimentos apresentam disposição similar, constituídos, principalmente, por laboratórios, salas de aula e de professores.

No modelo de estudo, tendo em vista as simulações de geração de energia e eficiência energética, não foram considerados os elementos que caracterizam o entorno das edificações básicas. Isto ocorre pelo intuito de avaliar o desempenho da edificação, em distintas orientações, independentemente do seu contexto, restringindo para a influência de suas características próprias, como volumetria e materialidade. Assim, foram desconsideradas as edificações de apoio, como os auditórios, equipamentos urbanos, vegetação e condições de acesso.

A figura 28 apresenta a configuração espacial de cada pavimento com a distribuição de seus ambientes.

Figura 28 - Perspectiva isométrica explodida do modelo virtual



Fonte: O autor.

4.2 DIMENSIONAMENTO DOS CONJUNTOS FOTOVOLTAICOS

Os conjuntos fotovoltaicos foram desenvolvidos para os modelos com exposição longitudinal leste-oeste e norte-sul. Nessas condições, os módulos foram organizados sob a forma de brises e fachadas ventiladas, sendo dimensionados em função da avaliação da temperatura neutra e para a geração de energia. Ainda, a quantidade de módulos que configura os conjuntos fotovoltaicos foi redistribuída na cobertura do modelo, a fim de possibilitar um conjunto de referência para a máxima geração energética.

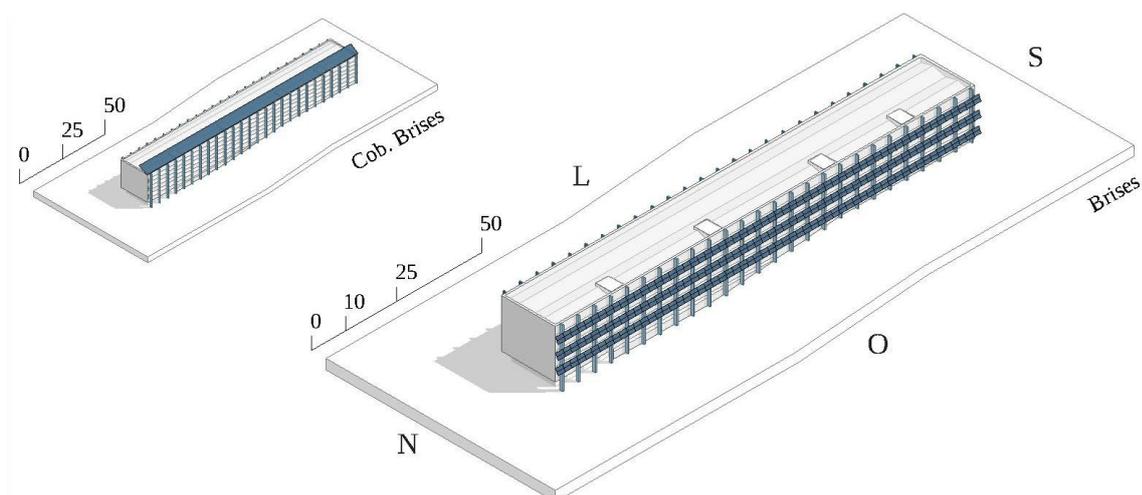
4.2.1 Modelo com exposição longitudinal leste-oeste

Nesta configuração, o modelo tem orientação coincidente com a situação dos edifícios básicos do campus. Dessa forma, o dimensionamento dos conjuntos fotovoltaicos está vinculado às características construtivas reais dos edifícios, viabilizando a sua inserção.

4.2.1.1 Brises fotovoltaicos

Os brises fotovoltaicos, assim, atuam como protetores solares para a fachada oeste e foram compostos por 360 módulos distribuídos em três conjuntos de brises de 120 módulos - em duas linhas com 60 módulos -, com comprimento de 124,20 m e largura de 2,08 m que protegem as aberturas do segundo ao quarto pavimento. Os brises e seu referencial correspondente, compondo o conjunto fotovoltaico na cobertura (Cob. Brises), são apresentados pela figura 29.

Figura 29 - Brises fotovoltaicos sobre a fachada oeste e conjunto de referência



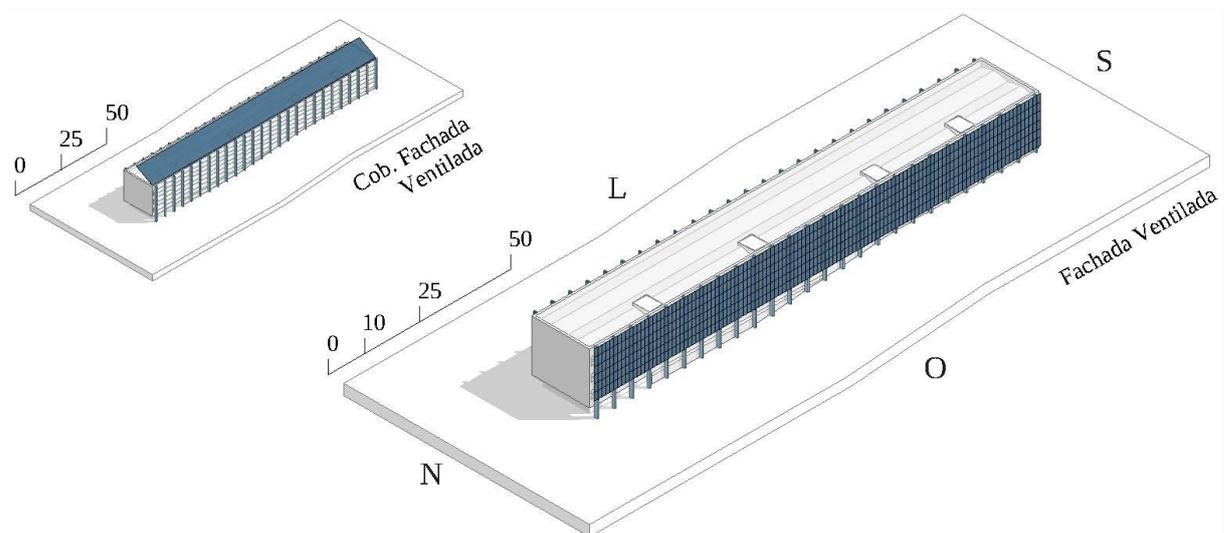
Os módulos foram posicionados sobre as janelas em fita e apoiados no sistema estrutural exposto da edificação com uma inclinação de 30° , de forma a otimizar a geração de energia. Ainda, os protetores solares deslocam-se em, aproximadamente, 0,75 m na fachada oeste, em direção ao norte, e 0,35 m, em direção ao sul, devido às dimensões dos módulos e ângulos de sombreamento necessários. A distância vertical entre os pontos de fixação dos brises, na estrutura externa da edificação, é de 4,00 m.

Por sua vez, o conjunto de referência para os brises fotovoltaicos da fachada oeste foi constituído pela mesma quantidade de módulos e sobre a cobertura do modelo, buscando a máxima geração de energia elétrica em função da ausência de sombreamento sobre o conjunto. Assim, constitui-se de uma mesa solar fotovoltaica com 124,20 m (60 módulos) de comprimento e 6,24 m (6 módulos) de largura, com inclinação de 30° para a orientação oeste.

4.2.1.2 Fachada ventilada fotovoltaica

A fachada ventilada fotovoltaica do modelo com exposição longitudinal leste-oeste, dimensionada para a fachada oeste, foi composta por 684 módulos posicionados verticalmente, distribuídos em 114 módulos no eixo horizontal e com seis módulos no eixo vertical, definindo o comprimento total de, aproximadamente, 122,20 m e altura de 12,45 m. A fachada ventilada fotovoltaica e seu conjunto de referência na cobertura (Cob. Fachada Ventilada) são apresentados na figura 30.

Figura 30 - Fachada ventilada fotovoltaica sobre a fachada oeste e conjunto de referência



Fonte: O autor.

A fachada ventilada fotovoltaica atende a área entre o segundo e o quarto pavimento e se situa apoiada no sistema estrutural exposto do modelo, afastada em 0,70 m das paredes externas. Ainda, o comprimento desta é recuado em 7 cm na extremidade norte e 81 cm na extremidade sul, em relação ao comprimento do modelo da edificação, atendendo aos ângulos obtidos na máscara solar e das dimensões dos módulos fotovoltaicos. O conjunto de referência para a fachada ventilada fotovoltaica, nesta orientação, apresenta dimensões idênticas e com inclinação de 30°, a oeste, sobre a cobertura.

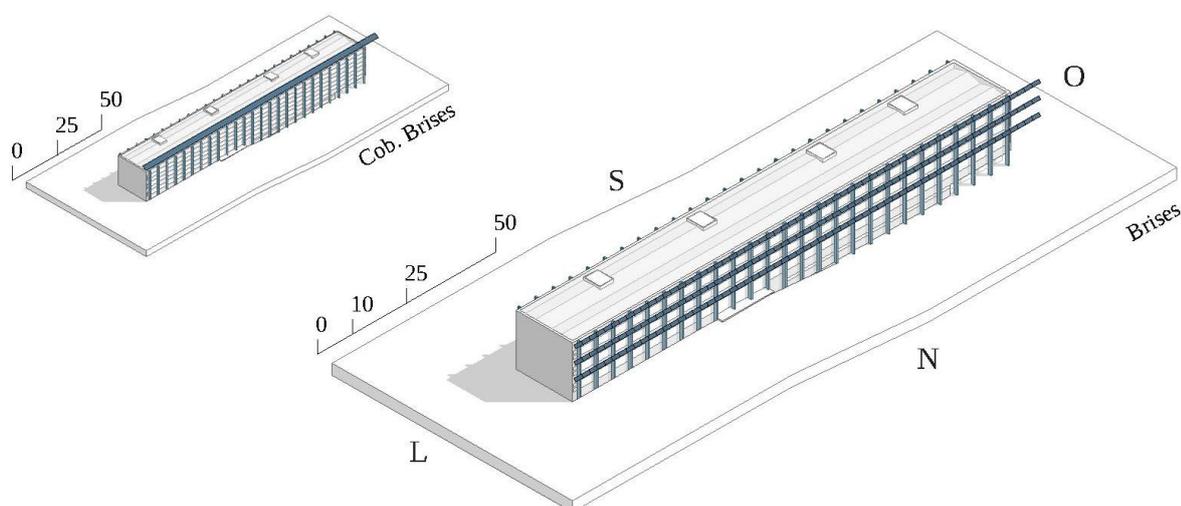
4.2.2 Modelo com exposição longitudinal norte-sul

O modelo com exposição longitudinal norte-sul tem orientação perpendicular aos edifícios básicos do Setor de Ensino. Dessa forma, busca-se explorar fachadas distintas, especialmente orientadas ao norte, ampliando a pesquisa para a disposição de outros edifícios do campus.

4.2.2.1 Brises fotovoltaicos

Os brises fotovoltaicos sobre o modelo com exposição longitudinal norte-sul foram constituídos por 189 módulos, distribuídos em três conjuntos de brises de 63 módulos, alinhados horizontalmente, com comprimento total de 130,40 m, largura de 1,04 m e posicionados sobre as aberturas do segundo ao quarto pavimentos. Os brises e o conjunto de referência, na cobertura do modelo, são apresentados na figura 31.

Figura 31 – Brises fotovoltaicos sobre a fachada norte e conjunto de referência

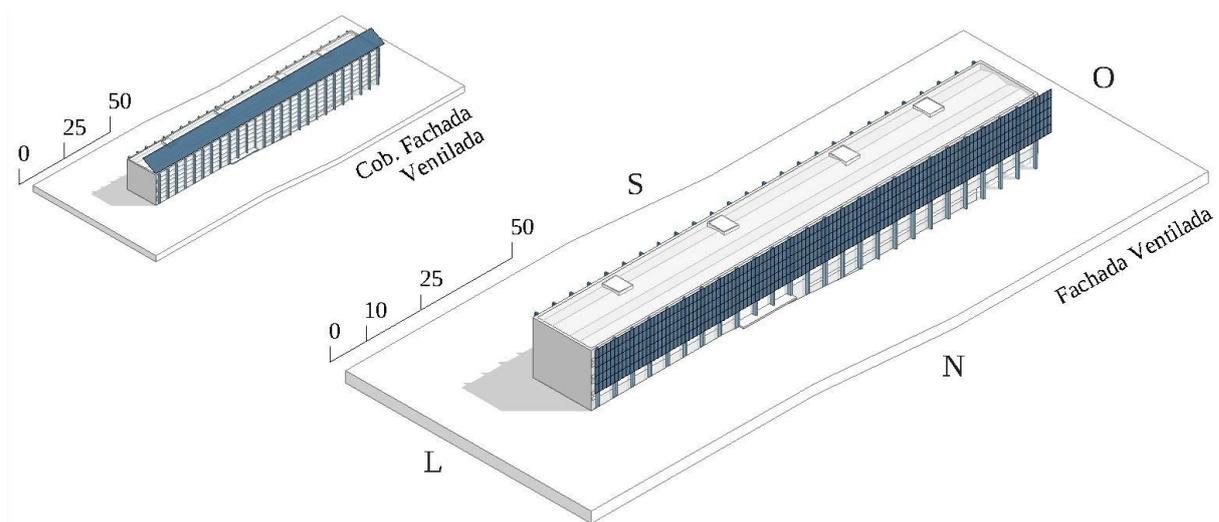


Os módulos, assim como na orientação oeste, apresentam uma inclinação de 30° , em função da máxima geração de energia, e foram apoiados nos pilares externos do modelo. Na fachada norte, os brises destacam-se em, aproximadamente, 0,34 m em direção a leste, e 6,94 m em direção a oeste, com distância vertical entre a fixação dos brises de 4,00 m. O conjunto de referência para os brises fotovoltaicos da fachada norte, então, caracteriza uma mesa fotovoltaica e com comprimento total de 130,40 m (63 módulos) e largura de 3,12 m (3 módulos) com inclinação de 30° ao norte.

4.2.2.2 Fachada ventilada fotovoltaica

A fachada ventilada fotovoltaica para a orientação norte foi composta por 585 módulos dispostos verticalmente e distribuídos em 117 módulos, no eixo horizontal, e em cinco módulos, no eixo vertical, que definem o comprimento total de 125,35 m e altura de 10,40 m. A fachada ventilada fotovoltaica e seu conjunto de referência são apresentados na figura 32.

Figura 32 - Fachada ventilada fotovoltaica sobre a fachada norte e conjunto de referência



Fonte: O autor.

Assim como na orientação oeste, a fachada ventilada fotovoltaica, ao norte, compreende uma área entre o segundo e quarto pavimento, estando apoiada no sistema estrutural externo do modelo, destacada em 0,70 m da superfície da fachada. Ainda, a fachada ventilada é reduzida em 0,45 m, na extremidade leste, e ampliada em 2,80 m, na extremidade oeste, em relação ao comprimento do modelo, em função das características de sombreamento e das dimensões dos módulos fotovoltaicos.

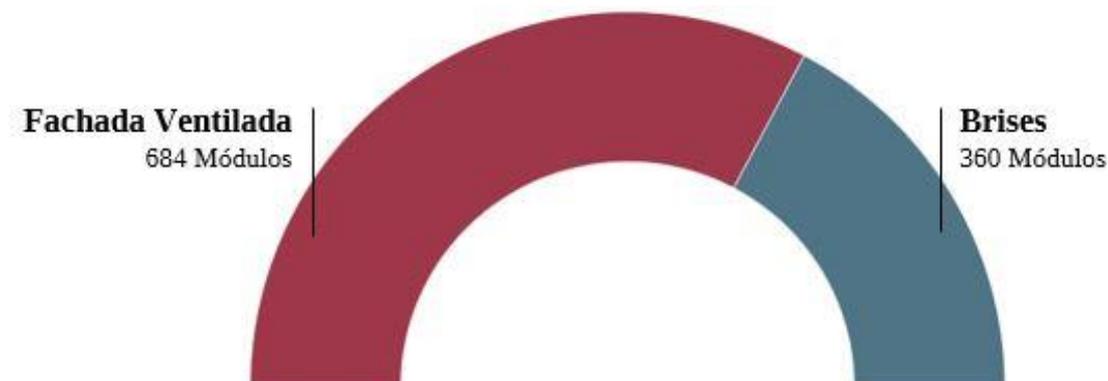
4.3 GERAÇÃO DE ENERGIA

Na simulação da geração de energia elétrica, os conjuntos fotovoltaicos – brises, fachadas ventiladas e na cobertura -, em suas distintas orientações sobre o modelo, foram avaliados através do software PVsyst. Assim, foram obtidos resultados para os fatores de *irradiação global efetiva, energia efetiva gerada, perdas e performance ratio*.

4.3.1 Modelo com exposição longitudinal leste-oeste

No modelo com exposição longitudinal leste-oeste, foi realizada a simulação da geração energética para os conjuntos fotovoltaicos sobre a fachada oeste e suas reproduções na cobertura (Cob. Brises e Cob. Fachada Ventilada). Nesse sentido, os brises fotovoltaicos foram formados por 360 módulos e a fachada ventilada fotovoltaica por 684 módulos, conforme a relação visual da figura 33.

Figura 33 - Quantitativo de módulos sobre a fachada oeste



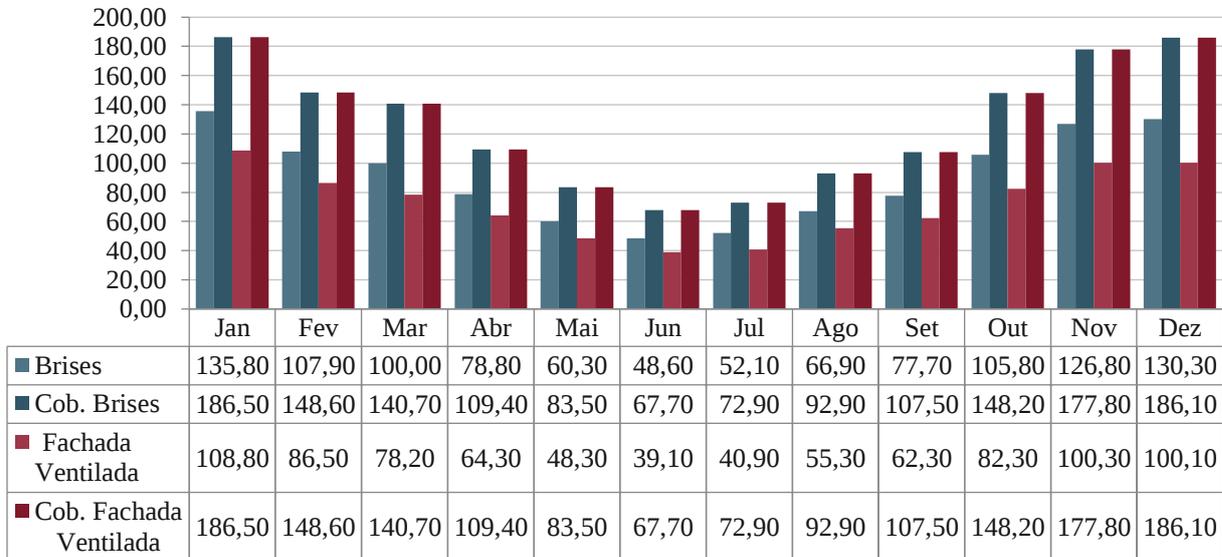
Fonte: O autor.

4.3.1.1 Irradiação global efetiva

A irradiação global efetiva representa a irradiação solar global incidente sobre o plano dos módulos fotovoltaicos e corrigida pelas perdas de sombreamento e quando a irradiação solar não é absorvida pelos módulos. Neste caso, considerando as condições distintas entre os módulos que constituem os conjuntos fotovoltaicos, a irradiação global efetiva particulariza a geração energética dos sistemas, indicando os níveis de irradiação solar efetivos para a geração de energia em cada conjunto.

O gráfico 1 apresenta os níveis de irradiação global efetiva mensal para os conjuntos fotovoltaicos.

Gráfico 1 – Irradiação global efetiva nos conjuntos fotovoltaicos à oeste (kWh/m²)



Fonte: O autor.

De acordo com o gráfico, a irradiação global efetiva foi superior e equivalente nos conjuntos fotovoltaicos de referência na cobertura da edificação (Cob. Brises e Cob. Fachada Ventilada). Isto ocorre devido às suas condições ideais de inclinação para a orientação oeste e pela ausência de sombreamento no sistema, o que permite atingir os níveis de 1.521,90 kWh/m² de incidência de irradiação solar.

Na forma de brises e fachada ventilada, por sua vez, apresentaram desempenho distinto para este componente em função do ângulo de inclinação e pela ocorrência de sombreamento promovido pela edificação. Os brises apresentaram um desempenho anual de 1.091,00 kWh/m², representando 71,69% do potencial da sua referência na cobertura, enquanto a fachada ventilada apresentou uma exposição a irradiação de 866,50 kWh/m², atingindo 56,94% da irradiação efetiva em seu conjunto de referência.

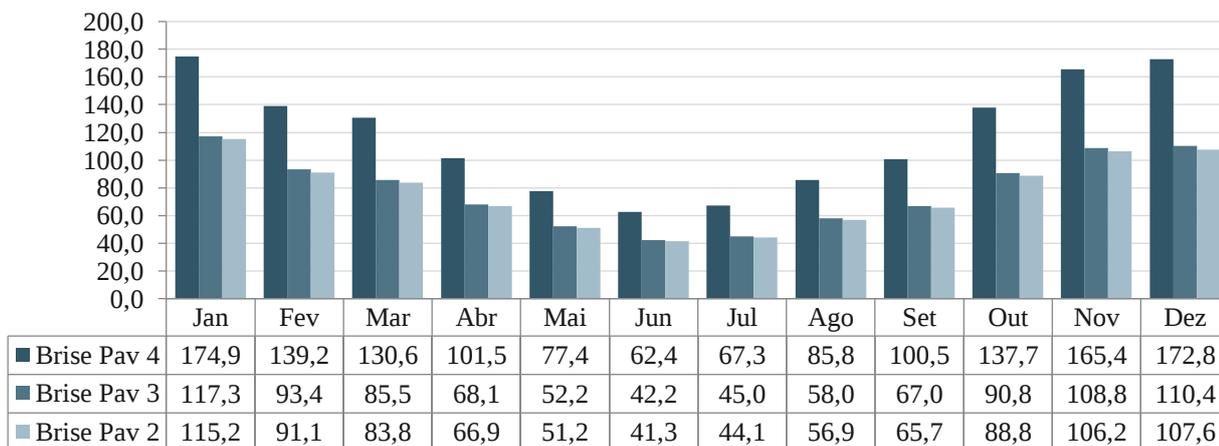
Na comparação entre os conjuntos fotovoltaicos da fachada, a irradiação global efetiva foi superior, o ano todo, para o conjunto de brises, com maiores diferenças nos meses de verão. Neste período, a altura solar é elevada e se aproxima ao eixo perpendicular do plano dos brises, favorecendo a incidência de irradiação solar sobre os módulos fotovoltaicos destes; enquanto há maior inclinação sobre o plano dos módulos na fachada ventilada, reduzindo a incidência de irradiação solar. Estes resultados coincidem com as avaliações de Santos et al. (2012), que

demonstraram uma redução de cerca de 50% no potencial de radiação recebido por módulos inclinados em 90° em superfícies de Porto Alegre (latitude de 30° sul, próxima à Santa Maria, de 29° sul); enquanto, em módulos inclinados à 30°, as perdas aproximam-se à 15%.

Também, verificou-se que a variação anual da irradiação global efetiva foi superior no conjunto fotovoltaico dos brises, atingindo, entre máxima e mínima, 87,20 kWh/m²; enquanto para o conjunto da fachada ventilada foi de 69,70 kWh/m². As médias mensais para os sistemas foram de 90,92 kWh/m².mês e 72,21 kWh/m².mês, respectivamente. A variação foi maior no conjunto dos brises devido à sua disposição horizontal, o que o torna sensível às mudanças na altura solar, ao longo do ano, e pela formação de sombreamento interno decorrente da sobreposição dos subconjuntos.

Ainda, foi possível avaliar o desempenho individual dos brises fotovoltaicos para a irradiação global efetiva, conforme o gráfico 2, observando os efeitos do sombreamento entre estes.

Gráfico 2 - Irradiação global efetiva nos brises fotovoltaicos à oeste (kWh/m²)



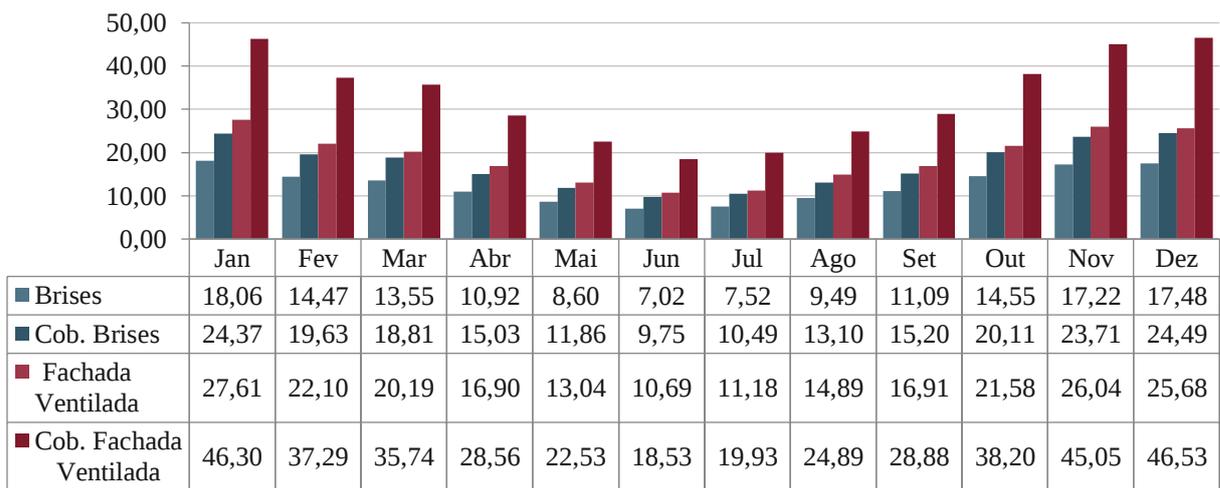
Fonte: O autor.

O gráfico mostra uma maior irradiação global efetiva sobre os módulos fotovoltaicos que constituem o brise do quarto pavimento (Brise Pav 4) em relação aos demais. Esta variação ocorre pela exposição direta do brise superior à incidência solar, enquanto, nos pavimentos inferiores (Brise Pav 2 e Brise Pav 3), houve ocorrência de sombreamento interno sobre os conjuntos. As diferenças nos níveis de irradiação são superiores nos meses de verão, quando a altura solar favorece a projeção de sombras dos módulos constituintes do brise do quarto pavimento sobre os módulos dos brises inferiores, reduzindo a exposição destes.

4.3.1.2 Energia efetiva gerada

A energia efetiva gerada representa a conversão da irradiação global efetiva em energia elétrica pelos conjuntos fotovoltaicos considerando as perdas durante a operação. Na avaliação da energia efetiva gerada, foram verificadas perdas no desempenho dos módulos por sua qualidade, temperatura, variação da irradiância e sombreamento. Assim, houve uma geração elétrica superior nos conjuntos fotovoltaicos de referência, na cobertura, conforme o gráfico 3.

Gráfico 3 - Energia efetiva gerada nos conjuntos fotovoltaicos à oeste (MWh)



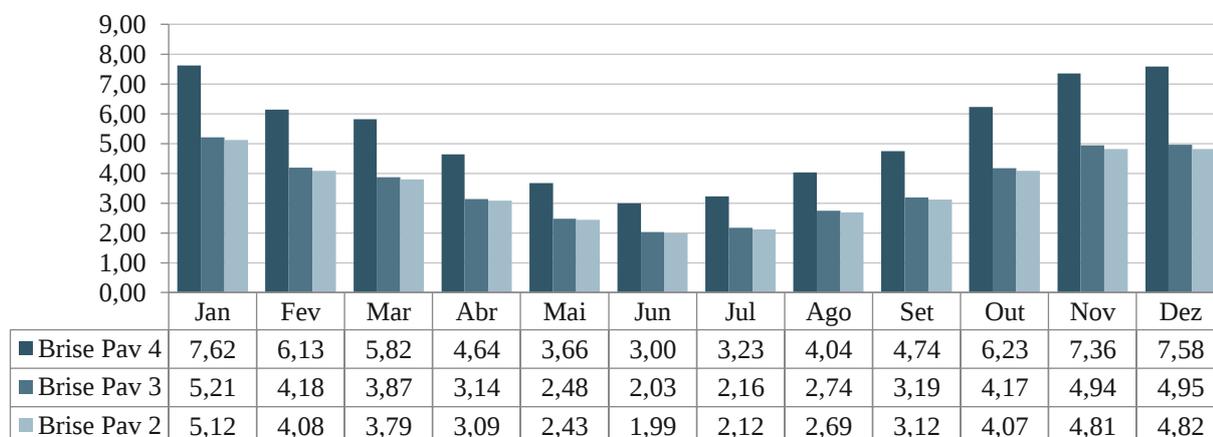
Fonte: O autor.

A partir do gráfico, é visto que a maior quantidade de módulos fotovoltaicos em orientação favorável contribui para a maior geração energética. Os módulos que compõem o rearranjo da fachada ventilada na cobertura (Cob. Fachada Ventilada) apresentaram uma geração energética anual de 392,43 MWh, enquanto o conjunto de referência para brises (Cob. Brises) apresentou 206,54 MWh.

Os brises fotovoltaicos, que possuem cerca da metade da quantidade de módulos que compõem a fachada ventilada, apresentaram um desempenho anual de 72,61% de sua referência, na cobertura, com uma geração de 149,97 MWh (média de 12,49 MWh/mês), enquanto a fachada ventilada fotovoltaica respondeu por 57,79% de seu potencial, com 226,79 MWh (média de 18,90 MWh/mês). Esta relação ocorre, especialmente, devido a irradiação global efetiva ser superior nos brises, inclinados a favor da máxima geração energética, enquanto na fachada ventilada, com módulos dispostos verticalmente, houve menor exposição à incidência de irradiação solar no plano dos módulos.

Ainda, é possível verificar a energia efetiva gerada individualmente pelos subconjuntos dos brises fotovoltaicos, conforme o gráfico 4.

Gráfico 4 - Energia efetiva gerada nos brises fotovoltaicos à oeste (MWh)



Fonte: O autor.

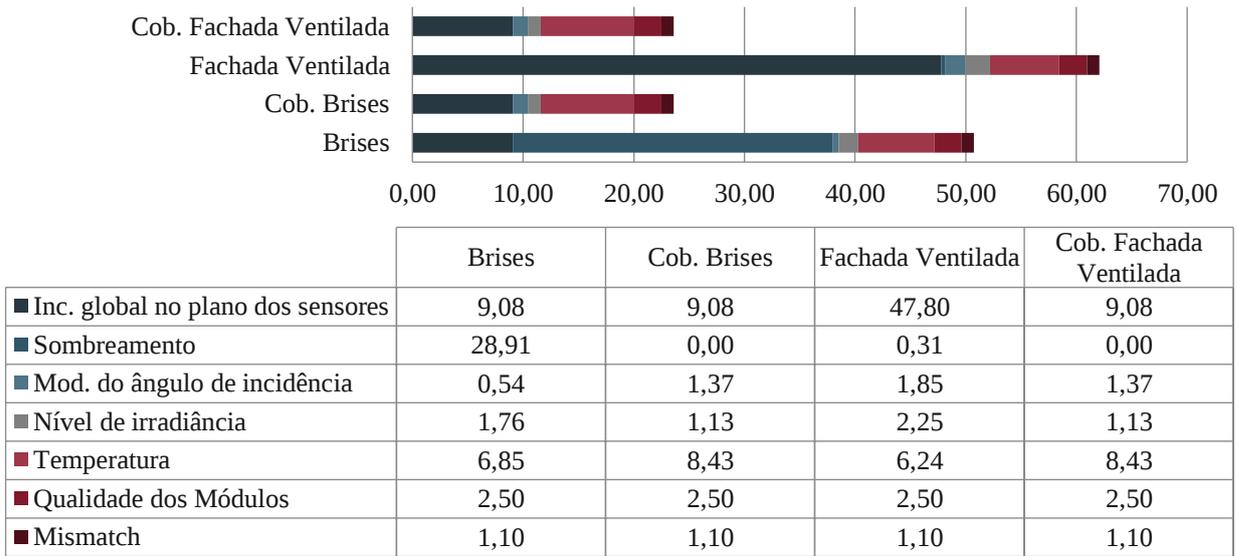
De acordo com o gráfico, o brise superior, no quarto pavimento, apresentou a maior geração de energia elétrica devido ao seu posicionamento, que favorece a maior incidência de irradiação global efetiva e menores perdas de energia. Também, houve uma maior geração de energia nos meses de verão por todos os subconjuntos de brises, visto que é o período com maior irradiação global efetiva.

No entanto, nos meses de inverno, foram verificadas menores variações na geração energética entre os subconjuntos, quando a diferença mínima entre o brise superior, no quarto pavimento, e inferiores atingiu, aproximadamente, 1 MWh em junho. Isto decorre da menor altura solar, que permite uma incidência de irradiação global efetiva equivalente sobre os subconjuntos, bem como promove menor projeção de sombreamento interno entre estes.

4.3.1.3 Perdas energéticas

As perdas energéticas no desempenho dos sistemas fotovoltaicos podem estar relacionadas ao posicionamento do módulo, afetando o aproveitamento da incidência de irradiação solar, bem como em função das características do sistema. Dessa forma, o gráfico 5 apresenta os principais fatores de perdas energéticas identificados nos conjuntos fotovoltaicos simulados na fachada oeste e cobertura.

Gráfico 5 - Perdas energéticas nos conjuntos fotovoltaicos à oeste (%)



Fonte: O autor.

As perdas por *incidência global no plano dos sensores* representam a parcela dissipada de irradiação solar devido à inclinação dos módulos com base na irradiação global horizontal no ambiente (1.697 kWh/m².ano), resultando na *irradiação solar global incidente*. Verificou-se maiores perdas para o sistema de fachada ventilada (47,82%) devido a sua inclinação, em 90°, apresentar menor exposição à incidência de irradiação solar, quando comparada aos demais sistemas, com 30° de inclinação, que apresentaram perdas de 9,08%.

Quanto ao *sombreamento*, os brises apresentaram maiores perdas (28,91%) devido à sobreposição destes em cada pavimento, enquanto, nos conjuntos da cobertura, não houve esta ocorrência. As perdas devido ao *modificador do ângulo de incidência (IAM)* são às perdas quando a irradiação incide pelas camadas do módulo antes de atingir as células fotovoltaicas. Neste caso, além da relação com o ângulo de inclinação do conjunto, as perdas são reduzidas quando próximas de superfícies refletoras, onde há contribuição da irradiação refletida no entorno sobre os módulos. Assim, ocorreram menores perdas no conjunto de brises da fachada (0,54%), enquanto na fachada ventilada, em maior inclinação, as perdas foram superiores (1,85%).

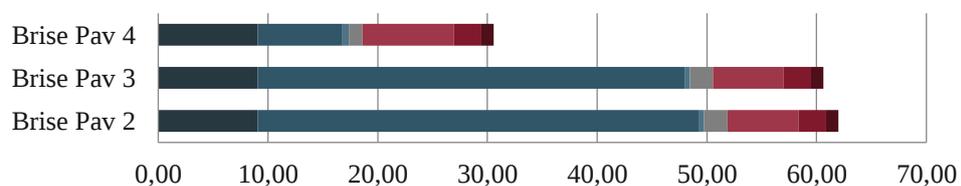
As perdas em função do *nível de irradiância* são caracterizadas pela perda de desempenho do módulo fotovoltaico para situações de menores irradiâncias, isto é, inferiores a 1000 W/m². Neste caso, como são dependentes da irradiação efetiva sobre os módulos, as perdas foram superiores no sistema de fachada ventilada, com 2,25%, enquanto os sistemas de referência, na cobertura, apresentaram 1,13% de perdas para este fator.

As perdas de geração por *temperatura* ocorrem em função da temperatura do conjunto fotovoltaico – influenciada pela irradiância, velocidade do vento e temperatura local – e características do módulo fotovoltaico. O aumento da irradiância ou temperatura ambiente favorece o aumento da temperatura da célula fotovoltaica, reduzindo a sua tensão e a eficiência na geração de energia (PINHO; GALDINO, 2014). Na simulação, as perdas energéticas por temperatura foram superiores nos módulos de referência na cobertura (8,43%), especialmente por apresentarem maior exposição à irradiação, enquanto os conjuntos fotovoltaicos sobre a fachada do modelo, com maior sombreamento, apresentaram menores perdas.

Em relação à *qualidade dos módulos*, o software avalia o desempenho destes a partir de suas características de fabricação e, tratando-se de módulos idênticos, as perdas relativas à qualidade dos módulos foram equivalentes (2,5%). O efeito *mismatch*, por sua vez, ocorre quando as células de menor corrente elétrica limitam o desempenho do conjunto devido a circunstâncias como sombreamento não uniforme, variação da temperatura, sedimentação e degradação em parte do módulo (PINHO; GALDINO, 2014). Para as perdas energéticas por *mismatch*, a simulação dos conjuntos fotovoltaicos identificou o percentual de 1,1%.

Por fim, é possível avaliar o desempenho individual dos brises fotovoltaicos a fim de compreender as perdas energéticas que limitam a geração de todo o conjunto. O gráfico 6 apresenta as perdas de energia elétrica individuais dos brises que constituem a fachada oeste.

Gráfico 6 - Perdas energéticas nos brises fotovoltaicos à oeste (%)



	Brise Pav 2	Brise Pav 3	Brise Pav 4
■ Inc. global no plano dos sensores	9,08	9,08	9,08
■ Sombreamento	40,15	38,86	7,71
■ Mod. do ângulo de incidência	0,50	0,50	0,59
■ Nível de irradiância	2,14	2,09	1,24
■ Temperatura	6,49	6,47	8,33
■ Qualidade dos Módulos	2,50	2,50	2,50
■ Mismatch	1,10	1,10	1,10

Fonte: O autor.

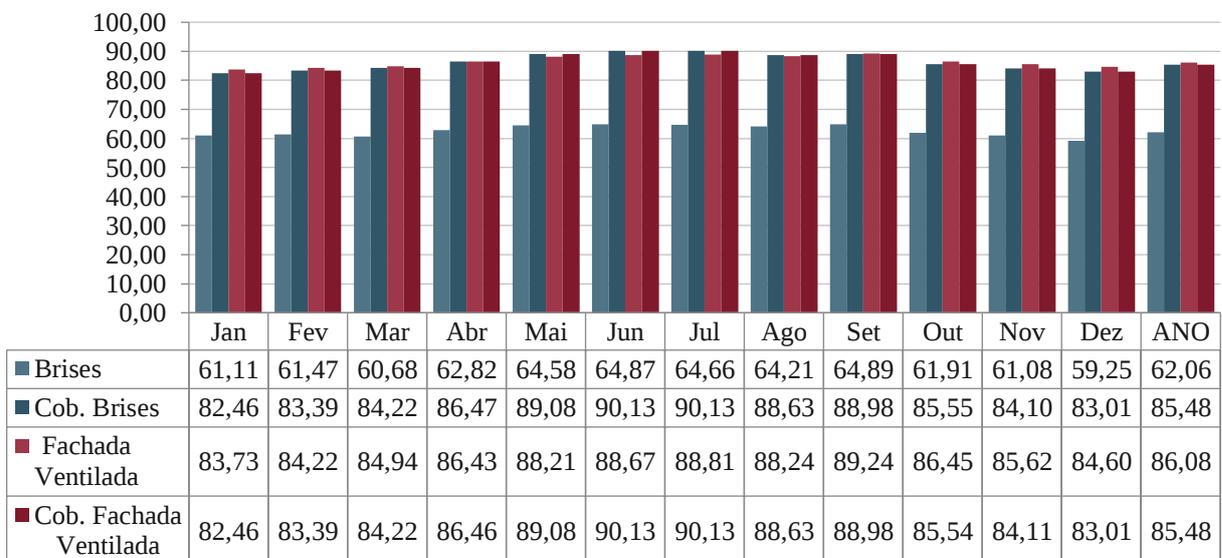
É possível averiguar, segundo o gráfico, que as principais perdas ocorrem pelo sombreamento a que estão sujeitos os brises nos pavimentos 2 (40,15%) e 3 (38,86%), limitando a geração elétrica no conjunto dos brises. Ainda, a temperatura exerce perdas consideráveis aos sistemas, afetando, principalmente, o conjunto de brises fotovoltaicos no pavimento 4, com 8,33%, quando comparado aos brises dos pavimentos 3 e 2, com 6,47% e 6,49% respectivamente. Isto ocorre devido a maior exposição dos módulos fotovoltaicos do pavimento superior à irradiação, favorecendo o seu aquecimento, e em oposição ao sombreamento que condiciona a incidência solar sobre os brises inferiores.

4.3.1.4 Performance ratio (PR)

Nesta pesquisa, a *performance ratio* foi obtida através da relação entre a energia elétrica gerada pelos conjuntos fotovoltaicos e o produto entre a irradiação global incidente sobre os módulos e a potência do sistema, desconsiderando as perdas por inversores e sistemas de transmissão. Este fator permite avaliar as formas de inserção dos sistemas fotovoltaicos nas edificações visto que, a partir desta análise, é possível verificar se os módulos fotovoltaicos apresentam desempenho satisfatório em relação ao seu limite teórico de geração energética.

O gráfico 7 apresenta o desempenho dos conjuntos fotovoltaicos ao longo do ano.

Gráfico 7 – Performance ratio (PR) dos conjuntos fotovoltaicos à oeste (%)



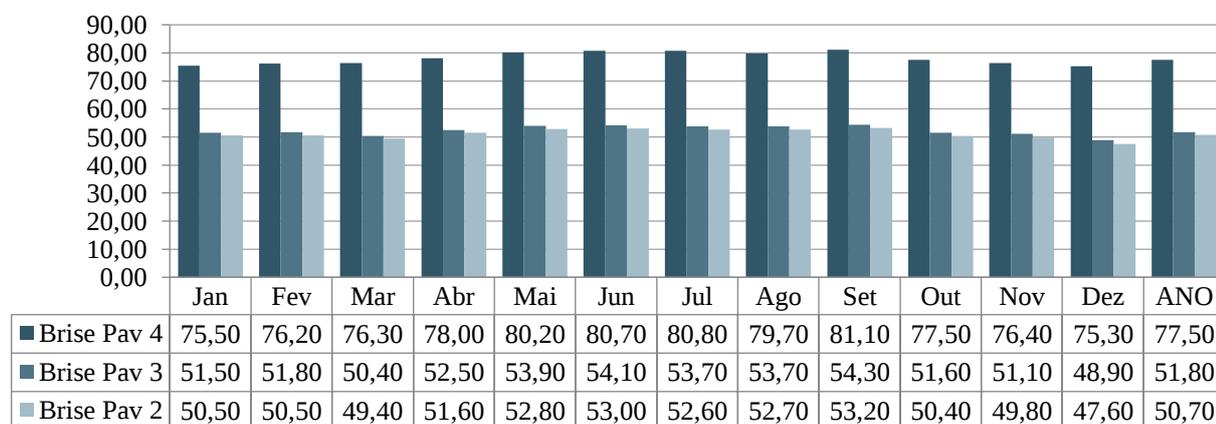
Fonte: O autor.

O gráfico demonstra desempenhos idênticos para os conjuntos fotovoltaicos de referência Cob. Brises e Cob. Fachada Ventilada, com percentuais anuais de 85,48%. Isto ocorre devido aos índices de irradiação e perdas equivalentes entre os sistemas, que orientam gerações elétricas proporcionais à potência dos sistemas.

Ainda, verificou-se que os brises fotovoltaicos, com orientação favorável a geração elétrica, apresentaram menor desempenho anual (62,06%) na comparação com a fachada ventilada fotovoltaica (86,08%). Esta relação ocorre devido a geração energética pelo conjunto da fachada ventilada apresentar maior proximidade ao limite teórico para esta inclinação, bem como, a partir da irradiação global incidente sobre os módulos, o maior quantitativo de perdas ocorre no conjunto dos brises fotovoltaicos e devido, especialmente, aos efeitos do sombreamento.

Em relação aos brises fotovoltaicos, o gráfico 8 apresenta o desempenho individual dos subconjuntos de cada pavimento.

Gráfico 8 – Performance ratio (PR) dos brises fotovoltaicos à oeste (%)



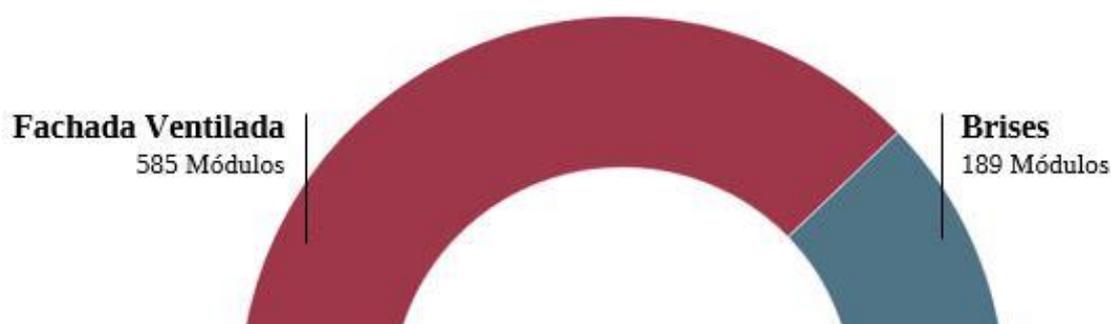
Fonte: O autor.

O brise superior (Brise Pav 4) apresentou o melhor desempenho, com percentual anual de 77,50%, quando comparado aos brises dos pavimentos 2 e 3, de percentuais 50,70% e 51,80% respectivamente. Esta relação ocorre devido a maior geração elétrica e menor ocorrência de perdas energéticas no brise superior, enquanto os brises inferiores têm as suas gerações condicionadas pelas perdas por sombreamento. Também, apesar de as menores gerações elétricas ocorrerem nos meses de inverno, o período apresentou uma maior eficiência nos subconjuntos. Isso ocorre, principalmente, em função da diminuição nas perdas energéticas pela temperatura, visto que estas compõem fatores que condicionam o desempenho dos subconjuntos.

4.3.2 Modelo com exposição longitudinal norte-sul

No modelo com exposição longitudinal norte-sul, os conjuntos foram simulados para a geração energética sobre a fachada norte e com seus referenciais, na cobertura, inclinados para a mesma orientação. Assim, os brises foram compostos por 189 módulos e a fachada ventilada por 585 módulos, conforme a relação ilustrada na figura 34.

Figura 34 - Quantitativo de módulos sobre a fachada norte

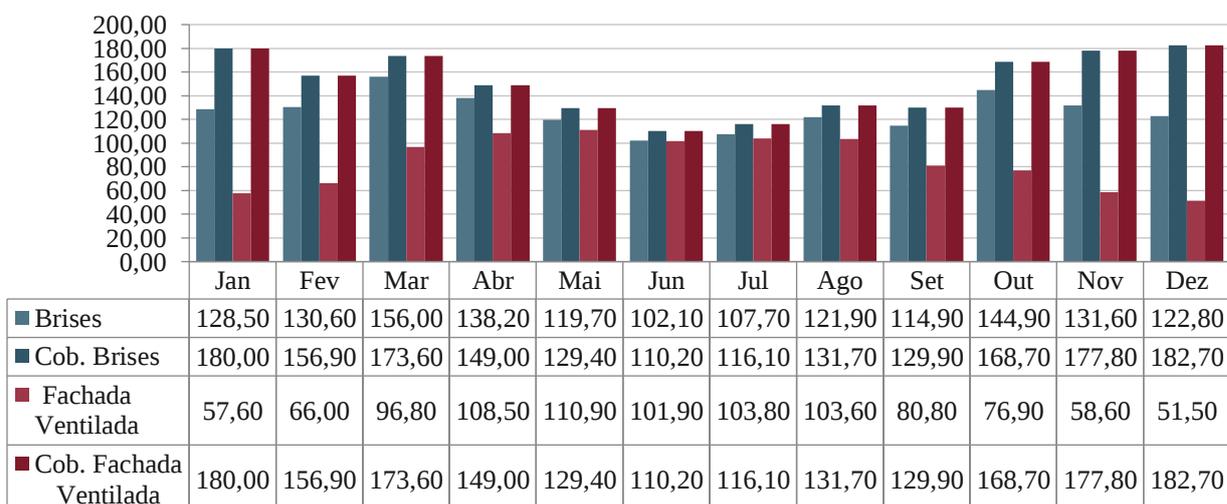


Fonte: O autor.

4.3.2.1 Irradiação global efetiva

Com os conjuntos fotovoltaicos orientados ao norte e com menores perdas por irradiância, houve maior irradiação global efetiva sobre os planos dos módulos nestes sistemas. O gráfico 9 apresenta a irradiação global efetiva sobre o conjunto de brises e fachada ventilada e seus referenciais na cobertura da edificação.

Gráfico 9 - Irradiação global efetiva nos conjuntos fotovoltaicos à norte (kWh/m²)



Fonte: O autor.

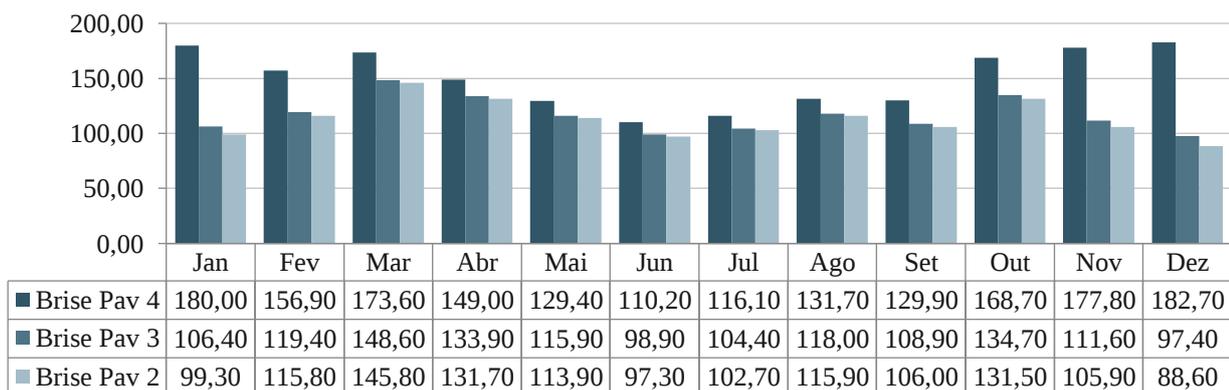
Os maiores índices de irradiação global efetiva foram percebidos nos componentes da cobertura, com um valor de 1.806,00 kWh/m². Também, os brises apresentaram maior irradiação global efetiva, atingindo 84,10% de seu potencial, ao ano, no comparativo com Cob. Brises e, nos meses de inverno, com a incidência de forma equivalente sobre os subconjuntos de brises devido a menor altura solar, o desempenho foi superior, atingindo 92,76% da irradiação referencial de julho. A fachada ventilada, por sua vez, apresentou um breve decréscimo na irradiação efetiva, alcançando, anualmente, uma taxa de 56,31% em relação a sua referência Cob. Fachada Ventilada.

Nos conjuntos fotovoltaicos posicionados na fachada do modelo, a irradiação global efetiva foi superior para os brises devido a sua maior exposição à irradiância, estando com inclinação de 30°, enquanto a fachada ventilada, de modo vertical (em 90°), apresentou menor exposição. Assim, a irradiação global efetiva anual para o conjunto fotovoltaico dos brises totalizou 1.518,90 kWh/m², enquanto a fachada ventilada atingiu 1.016,90 kWh/m².

Ainda, estes conjuntos apresentaram variações na irradiação efetiva, no ano, de 53,90 kWh/m² e 59,40 kWh/m² para os brises e fachada ventilada, respectivamente; enquanto os conjuntos de referência apresentaram uma variação de 72,50 kWh/m². As variações na irradiação global efetiva ocorreram devido às maiores perdas por sombreamento, nos brises, e ângulo de incidência, na fachada ventilada, limitando a irradiação efetiva nos meses de verão; enquanto os conjuntos da cobertura apresentaram perdas mínimas para estes fatores no período, ampliando a incidência. Nos meses de inverno, no entanto, a redução da irradiação global horizontal, no ambiente, limita a irradiação efetiva sobre os módulos dos conjuntos.

Por fim, o desempenho individual dos subconjuntos de brises fotovoltaicos para a irradiação global efetiva é apresentado no gráfico 10.

Gráfico 10 - Irradiação global efetiva nos brises fotovoltaicos à norte (kWh/m²)

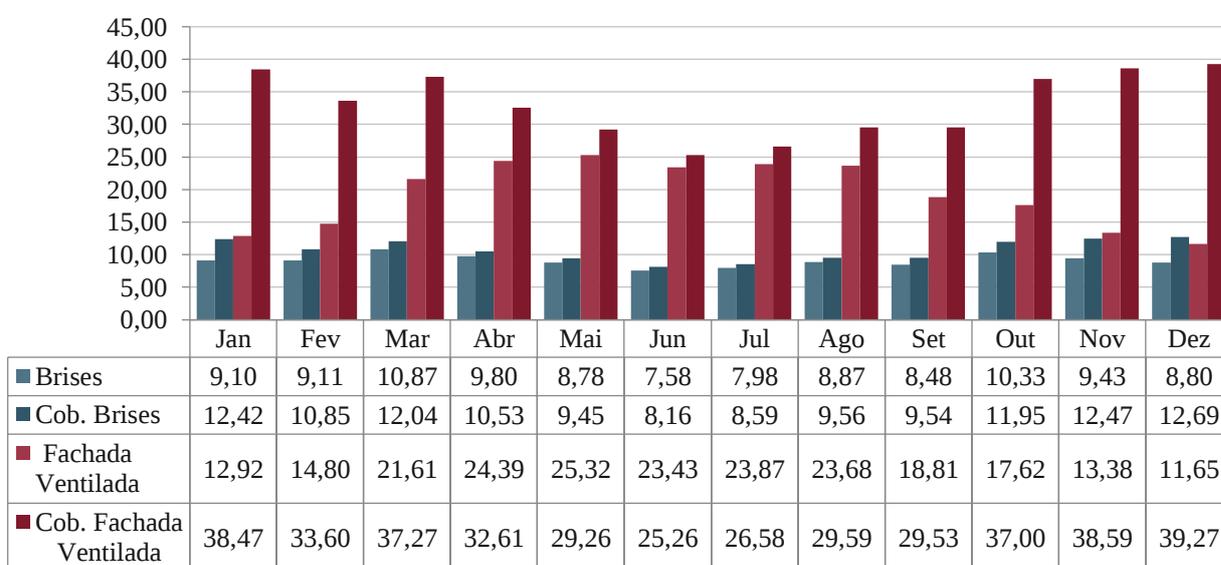


Ocorreu uma maior irradiação global efetiva sobre os módulos fotovoltaicos do subconjunto superior (Brise Pav 4) devido a sua maior exposição à irradiância e menores perdas energéticas por sombreamento. Assim, verificaram-se maiores diferenças na irradiação global efetiva entre os subconjuntos nos meses de verão em função da elevada altura solar, que projeta maior sombreamento do subconjunto superior sobre os inferiores.

4.3.2.2 Energia efetiva gerada

A energia efetiva gerada pelos conjuntos fotovoltaicos considera as diferenças verificadas na irradiação global efetiva e decrescidas das perdas referentes ao desempenho dos módulos. O gráfico 11 apresenta a energia efetiva gerada pelos sistemas fotovoltaicos.

Gráfico 11 - Energia efetiva gerada nos conjuntos fotovoltaicos à norte (MWh)



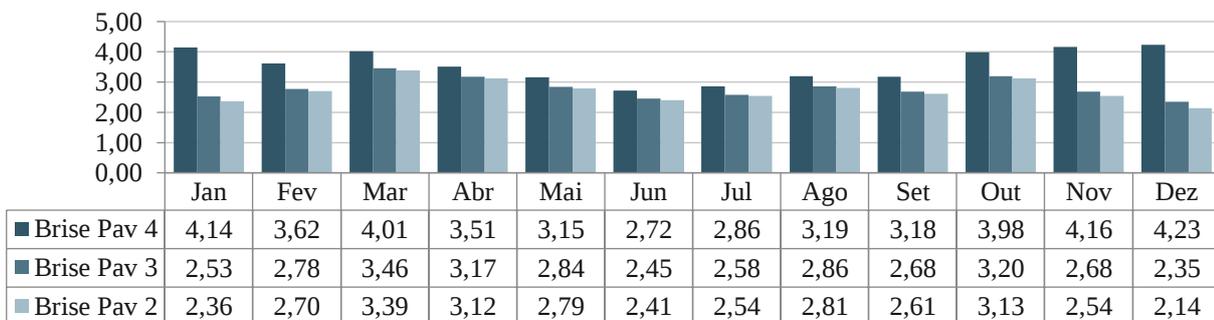
Fonte: O autor.

A composição, na cobertura, da fachada ventilada (Cob. Fachada Ventilada) apresentou a maior geração com um total anual de 397,02 MWh, enquanto a fachada ventilada apresentou uma geração de 231,47 MWh. Por sua vez, os brises fotovoltaicos apresentaram uma geração energética de 109,11 MWh, enquanto seu referencial (Cob. Brises) atingiu a geração de 128,25 MWh. Estas variações acontecem devido a maior quantidade de módulos fotovoltaicos utilizados na composição dos sistemas de fachada ventilada, ampliando a geração; bem como, inseridos na cobertura, os conjuntos de referência apresentam maior exposição à irradiação solar e menores fatores de perdas.

Na fachada do modelo virtual, os conjuntos fotovoltaicos apresentaram desempenho distinto quando comparados aos seus referenciais, onde os brises aproximaram-se de uma eficiência de 85,07% do seu potencial anual, enquanto a fachada ventilada atingiu 58,30%. O desempenho da fachada ventilada, no entanto, nos meses de inverno, apresentou uma ampliação na eficiência quando comparada ao referencial, atingindo 92,76% do potencial de geração energética em junho. Isto ocorre devido a incidência de irradiação solar próximo ao eixo perpendicular dos módulos na fachada, ampliando a geração elétrica, enquanto, nos módulos da cobertura, a incidência ocorre com maior inclinação, reduzindo a irradiação efetiva destes e condicionando a geração. Os brises fotovoltaicos apresentaram uma média mensal de energia gerada de 9,09 MWh/mês, enquanto o conjunto fotovoltaico da fachada ventilada apresentou 19,29 MWh/mês.

Avaliando a geração elétrica dos brises fotovoltaicos, a energia efetiva gerada individualmente pelos subconjuntos é demonstrada pelo gráfico 12.

Gráfico 12 - Energia efetiva gerada nos brises fotovoltaicos à norte (MWh)



Fonte: O autor.

Conforme o gráfico, o brise superior (Brise Pav 4) apresentou a maior geração de energia elétrica devido, principalmente, a maior irradiância global efetiva recebida e aos menores quantitativos de perdas de energia. O brise superior apresentou, ao ano, uma geração elétrica de 42,75 MWh, média de 3,56 MWh/mês, enquanto o brise de menor desempenho, no segundo pavimento (Brise Pav 2), apresentou uma geração anual de 32,54 MWh (média de 2,71 MWh/mês).

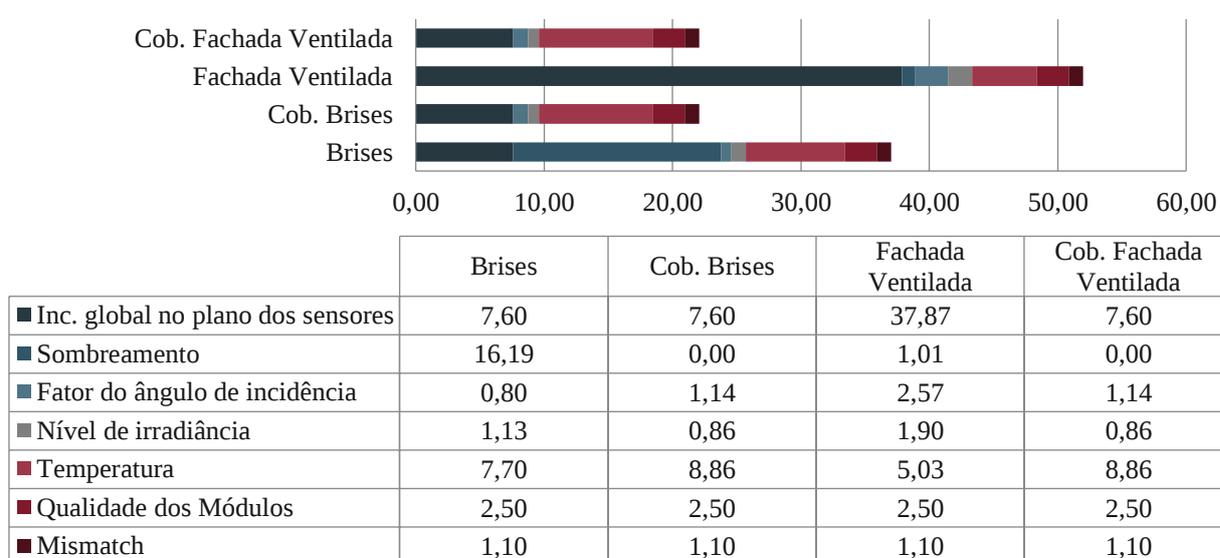
Além disso, o gráfico revelou uma maior geração de energia pelo brise superior nos meses de verão, enquanto os brises inferiores apresentaram gerações reduzidas neste período. Isto ocorre devido à altura solar, que, nestas condições, projeta maior sombreamento para os brises inferiores, a partir da volumetria do brise superior. A geração de energia nos brises

inferiores se eleva nos meses de outono e primavera, quando reduzem as perdas por sombreamento interno e a irradiação global efetiva é superior.

4.3.2.3 Perdas energéticas

As perdas energéticas nos conjuntos fotovoltaicos podem ocorrer relacionadas aos parâmetros da incidência de irradiação, quanto ao desempenho dos módulos e as características do sistema. O gráfico 13 apresenta os principais fatores de perdas identificadas para os conjuntos fotovoltaicos na orientação norte.

Gráfico 13 - Perdas energéticas nos conjuntos fotovoltaicos à norte (%)



Fonte: O autor.

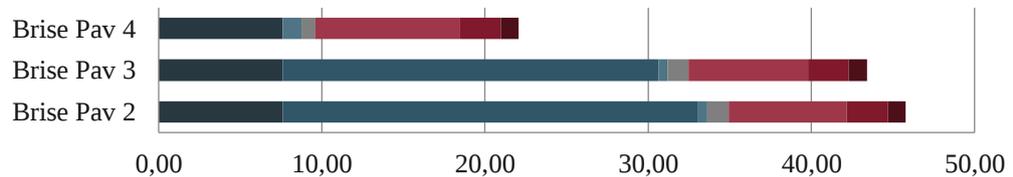
Nas perdas relacionadas à irradiação, os quantitativos de *incidência global no plano dos sensores* e *sombreamento* representaram os principais fatores de perdas energéticas nos conjuntos. A incidência global no plano dos sensores atingiu 37,87% de perdas na fachada ventilada devido à disposição vertical dos módulos, o que reduziu a exposição à incidência de irradiação solar. Por sua vez, as perdas por sombreamento, nos brises, foram de 16,19%, influenciadas pela projeção de sombras entre os módulos do próprio conjunto.

Em relação às perdas por desempenho dos sistemas, a *temperatura* representa o principal componente de perdas, atingindo 8,86% nos conjuntos da cobertura, devido a maior exposição solar, que favorece o sobreaquecimento do sistema e reduz a eficiência na geração de energia. Na fachada ventilada, foram verificadas as menores perdas por temperatura, 5,03%, ocasionadas pela menor irradiação global efetiva, que dificulta o aquecimento do conjunto. As

perdas simuladas para a *qualidade dos módulos* e *mismatch* foram iguais para os conjuntos e, portanto, não foram determinantes na diferenciação da geração elétrica.

Por fim, o gráfico 14 apresenta os quantitativos de perdas na geração de energia elétrica para os subconjuntos dos brises fotovoltaicos na orientação norte.

Gráfico 14 - Perdas energéticas nos brises fotovoltaicos à norte (%)



	Brise Pav 2	Brise Pav 3	Brise Pav 4
■ Inc. global no plano dos sensores	7,60	7,60	7,60
■ Sombreamento	25,45	23,02	0,00
■ Fator do ângulo de incidência	0,56	0,58	1,14
■ Nível de irradiância	1,32	1,27	0,86
■ Temperatura	7,25	7,33	8,86
■ Qualidade dos Módulos	2,50	2,50	2,50
■ Mismatch	1,10	1,10	1,10

Fonte: O autor.

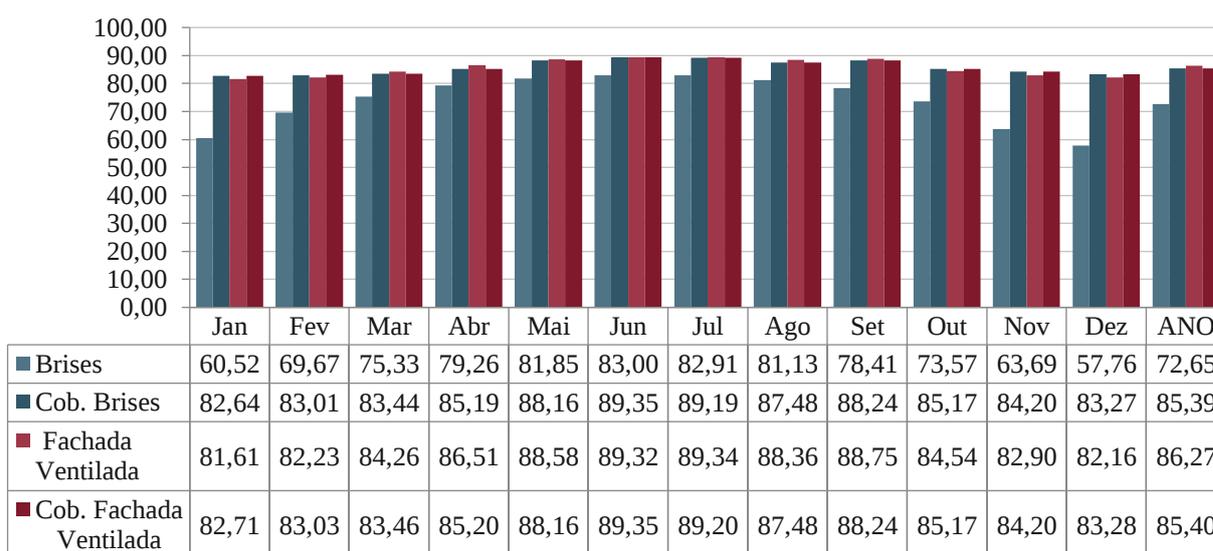
Segundo o gráfico, o principal componente de perdas energéticas para a incidência ocorre devido ao *sombreamento* sobre os brises nos pavimentos 2 e 3, com percentuais de 25,45% e 23,02%, respectivamente, enquanto o brise superior, no pavimento 4, não apresenta perdas para este parâmetro. Estas perdas são recorrentes nos meses de verão, quando o ângulo da altura solar é superior e projeta sombreamento do brise do quarto pavimento sobre os brises inferiores. As perdas relativas à *incidência global no plano dos sensores* foram similares entre os subconjuntos, representando 7,60%, e ocorrem devido à inclinação comum entre estes, em 30° para o norte.

Quanto às perdas energéticas no desempenho do sistema, a *temperatura* é um fator que condiciona a geração elétrica nos subconjuntos. Nos brises inferiores, com maiores sombreamentos, houve menor efeito de perdas por temperatura (7,25% e 7,33% para os subconjuntos nos pavimentos 2 e 3, respectivamente), enquanto, no brise superior, a sua maior exposição à irradiação solar promoveu o aquecimento do subconjunto, atingindo perdas de 8,86%, e reduz a eficiência do módulo na geração elétrica. Os demais parâmetros de perdas energéticas apresentaram similaridades e percentuais mínimos e, assim, não configuram fatores decisivos para as diferenças na geração de energia entre os subconjuntos.

4.3.2.4 Performance ratio (PR)

A *performance ratio* conclui as avaliações nas simulações em geração energética pelos conjuntos fotovoltaicos, resumindo o desempenho destes na geração de energia a partir da irradiação solar global incidente. O gráfico 15 apresenta a eficiência nos conjuntos de brises e fachada ventilada, para a orientação norte, e na cobertura do modelo como conjuntos de referência.

Gráfico 15 – Performance ratio (PR) dos conjuntos fotovoltaicos à norte (%)



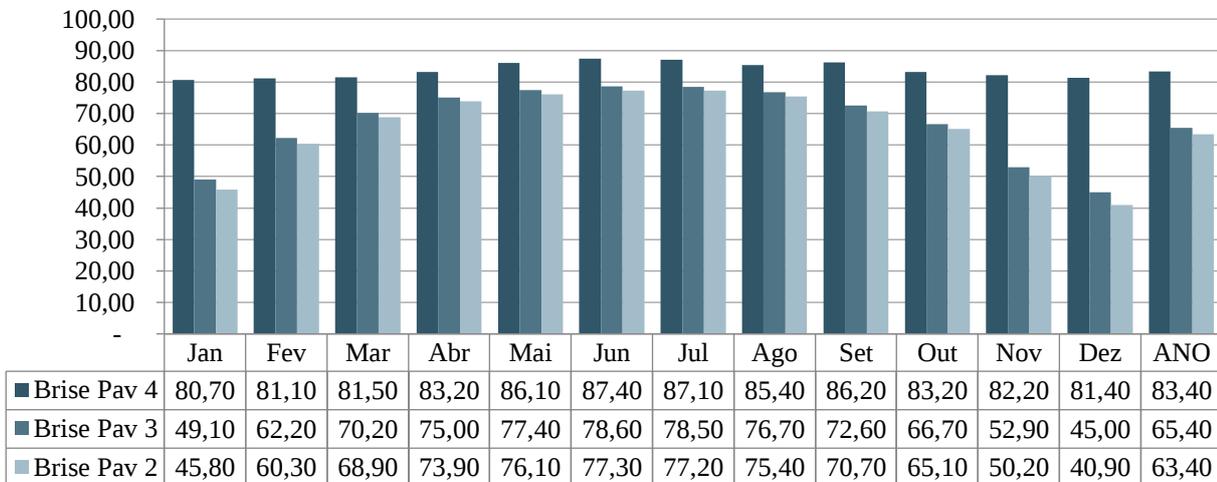
Fonte: O autor.

O gráfico demonstra a equivalência no desempenho entre os conjuntos de referência na cobertura do modelo. Estes, com um rendimento anual de, aproximadamente, 85,40% foram provenientes da elavada geração e menores perdas energéticas, aproximando-se de seus limites teóricos.

Os brises, com rendimento anual de 72,65%, apresentaram variações ao longo ano, com mínima de 57,76%, em dezembro, e máxima de 83,00%, em junho. A fachada ventilada, por sua vez, teve desempenho superior, com uma taxa anual de 86,27%, atingindo a máxima em julho (89,34%) e mínima em janeiro (81,61%). O desempenho, nos conjuntos fotovoltaicos, foi superior nos meses de inverno devido às menores perdas por temperatura e acréscimo na geração elétrica pela fachada ventilada (em 90°), com maior incidência de irradiação no plano dos módulos.

Por fim, o gráfico 16 apresenta o desempenho mensal e anual nos subconjuntos que constituem os brises.

Gráfico 16 – Performance ratio (PR) dos brises fotovoltaicos à norte (%)



Fonte: O autor.

O melhor desempenho foi verificado no brise superior (Brise Pav 4), com percentual anual de 83,40%, quando comparado aos brises do pavimento 2 e 3, com percentuais de 63,40% e 65,40%, respectivamente. Esta relação ocorre pela maior capacidade de geração de energia elétrica pelo brise superior, que apresenta menores perdas energéticas por sombreamento.

Além disso, foram verificadas maiores diferenças entre os rendimentos nos meses de verão, quando os brises inferiores apresentaram perdas na geração elétrica devido, especialmente, ao sombreamento projetado pelos brises superiores. Entretanto, nos meses de inverno, foram observados os melhores desempenhos, visto que houve redução nas perdas energéticas pela temperatura.

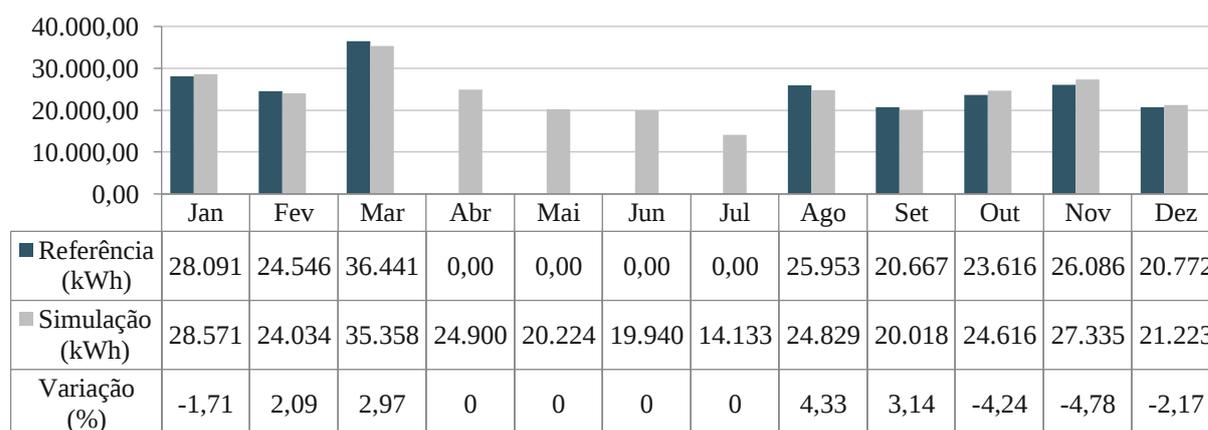
Na comparação entre as distintas orientações, os brises fotovoltaicos apresentaram desempenho superior quando inseridos na orientação norte. Apesar de os brises fotovoltaicos posicionados à oeste possuírem maior quantidade de módulos (360 módulos) comparados à orientação norte (189 módulos), a energia efetiva gerada foi pouco superior (geração de 149,97 MWh e 109,11 MWh para brises à oeste e norte, respectivamente). Este fator, por sua vez, está relacionado aos menores quantitativos de perdas e maior irradiação global efetiva sobre os módulos à norte, potencializando a geração elétrica destes.

4.4 CONSUMO ENERGÉTICO

Para avaliar a influência dos conjuntos fotovoltaicos no consumo elétrico do modelo virtual, em suas distintas orientações, foi utilizado o *software* DesignBuilder. A partir das configurações dos componentes físicos, dispositivos elétricos e padrões de utilização, no modelo virtual, foi necessário tornar o cronograma de atividades nos ambientes virtuais coincidente com o verificado nas edificações reais a fim de reproduzir perfis de consumo elétrico equivalentes. Para isso, utilizou-se o levantamento do consumo elétrico do edifício 42, Centro de Ciências Rurais (UFSM), como referência para os ajustes no cronograma virtual.

Foram considerados como parâmetros de consumo elétrico o consumo em equipamentos, iluminação, aquecimento e resfriamento. O gráfico 17 apresenta a comparação entre o consumo elétrico de referência e o obtido pela simulação no modelo virtual com orientação equivalente à edificação real – modelo com exposição longitudinal leste-oeste – e desprovido de conjuntos fotovoltaicos.

Gráfico 17 - Consumo elétrico de referência e modelo virtual



Fonte: O autor.

Nos meses em que foi possível equiparar o consumo elétrico, adotou-se um limite de 5% para a diferença, no consumo elétrico mensal, entre o modelo simulado e o edifício de referência. Então, foi observada uma maior variação no mês de novembro, com um consumo elétrico superior no modelo virtual de 4,78%, enquanto, em janeiro, ocorreu a variação mínima, com um consumo superior no modelo virtual de 1,71%.

Em ambas as situações, verificou-se uma ampliação no consumo durante o mês de março, diante da retomada das aulas e maior consumo energético em climatização, iluminação e equipamentos. O mês de julho, por sua vez, foi previsto como o de menor consumo energético,

diante do período de férias e menores demandas energéticas. O modelo virtual apresentou consumo total de 285.186,98 kWh no ano, com média de 23.765,58 kWh/mês.

Ainda, o modelo virtual foi configurado para apresentar um perfil de consumo energético coincidente ao observado em edificações de mesma função. A tabela 9 apresenta o consumo mensal simulado para equipamentos, iluminação e condicionamento artificial e a composição destes no consumo elétrico anual comparado ao perfil de consumo característico.

Tabela 9 - Perfil do consumo elétrico no modelo virtual

Mês	Equipamentos (kWh)	Iluminação (kWh)	Aquecimento (kWh)	Resfriamento (kWh)
Janeiro	8.617,69	3.001,94	0,00	16.952,17
Fevereiro	7.803,33	2.796,06	0,00	13.434,69
Março	10.750,02	7.074,13	0,00	17.534,49
Abril	9.226,20	7.534,84	15,96	8.123,97
Maiο	9.592,44	8.697,00	350,60	1.584,61
Junho	9.050,11	8.723,25	922,60	1.244,43
Julho	8.137,46	5.100,09	524,11	371,70
Agosto	11.761,75	9.354,31	339,84	3.373,63
Setembro	9.402,29	7.361,49	130,87	3.123,34
Outubro	9.245,64	6.655,67	14,58	8.700,96
Novembro	8.615,93	5.608,76	0,00	13.110,40
Dezembro	6.920,77	2.611,09	0,00	11.691,75
TOTAL	109.123,63	74.518,63	2.298,56	99.246,15
Simulação (%)	38,26	26,13	0,81	34,80
Referência (%)	35	25	40	

Fonte: O autor.

Na simulação, a composição do consumo anual por equipamentos (38,26%), iluminação (26,13%) e condicionamento artificial (35,61%) ocorre na variação de 5% do perfil do consumo elétrico de referência. A aproximação entre o padrão de energia elétrica consumida, na edificação, e simulada, no modelo virtual, é fundamental para situar os valores obtidos nas etapas de simulação energética dentro de variações esperadas nas edificações reais, que seriam afetadas pela existência dos módulos fotovoltaicos instalados na edificação.

Então, o modelo foi avaliado, nas distintas orientações, para a variação do consumo energético devido à aplicação de conjuntos fotovoltaicos na forma de brises, fachadas ventiladas e na cobertura.

4.4.1 Modelo com exposição longitudinal leste-oeste

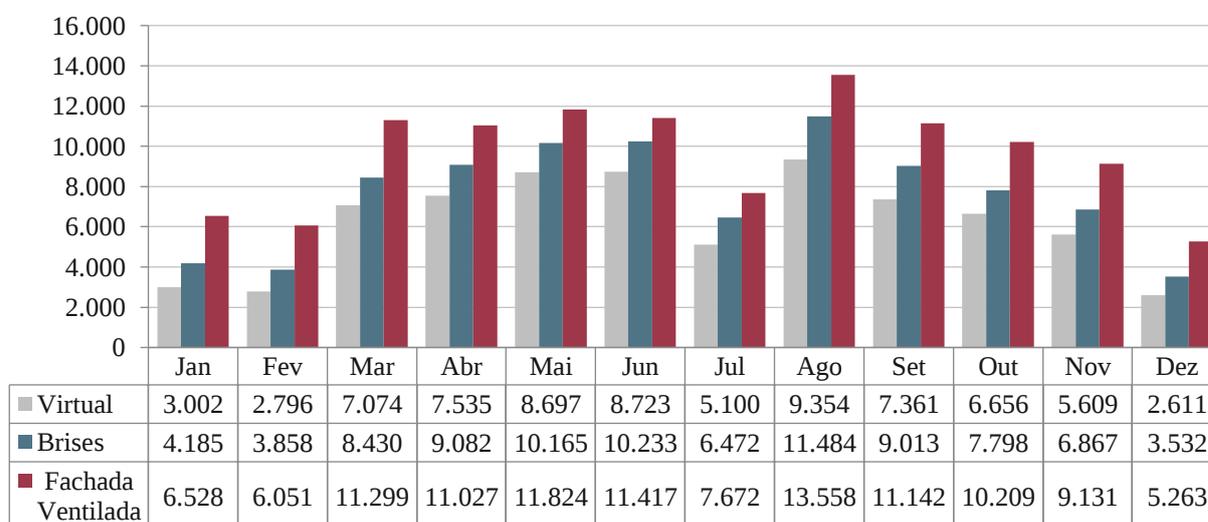
No modelo com exposição longitudinal leste-oeste, foi realizada a simulação dos conjuntos fotovoltaicos sobre a fachada oeste e dos conjuntos de referência, de mesma capacidade, instalados na cobertura do modelo e inclinados para a mesma orientação. Para tanto, a influência destes foi considerada nos parâmetros de consumo elétrico relativos à *iluminação, aquecimento e resfriamento artificiais*.

4.4.1.1 Iluminação artificial

A inserção dos conjuntos fotovoltaicos na fachada do modelo exerce significativa influência no aumento do consumo de energia elétrica por iluminação artificial. Isto ocorre pela obstrução da incidência de irradiação solar sobre as aberturas, favorecendo o consumo de iluminação artificial complementar nos ambientes.

O consumo elétrico por iluminação artificial no modelo virtual da edificação, bem como a sua variação pela utilização dos conjuntos fotovoltaicos sobre a fachada oeste é apresentado no gráfico 18.

Gráfico 18 - Consumo elétrico em iluminação artificial com conjuntos fotovoltaicos à oeste (kWh)



Fonte: O autor.

Através do gráfico, foi possível verificar que o consumo elétrico por iluminação artificial aumentou, em todos os meses, quando foram inseridos os conjuntos fotovoltaicos na forma de brises e fachada ventilada. Os brises fotovoltaicos ampliaram o consumo em 22,28% (aumento de 16.601,10 kWh) ao ano, com máxima de 2.129,64 kWh em agosto; enquanto, em dezembro, houve a menor ampliação no consumo, com uma diferença de 920,97 kWh. O sistema de fachada ventilada fotovoltaica, por sua vez, com maior área de obstrução solar sobre o modelo virtual, ampliou em 54,49% o consumo energético anual em iluminação artificial (acréscimo de 40.602,75 kWh), atingindo um aumento máximo de 4.224,81 kWh, em março, e menor ampliação do consumo em julho (2.571,46 kWh).

Ainda, verificou-se que as maiores variações no consumo energético por iluminação artificial ocorreram no início das aulas letivas para o primeiro e segundo semestre (março e agosto, respectivamente). Esta relação ocorre devido a ampliação das atividades e ocupações nos ambientes de salas de aula e laboratórios, o que ocasiona maior consumo elétrico em iluminação. Ao mesmo tempo, durante o período de férias, foi possível averiguar menores diferenças no consumo elétrico devido a menor densidade de ocupação e, durante o verão, maior período de irradiação solar sobre os ambientes.

Na simulação da iluminação artificial, não houve influência no consumo energético com a inserção dos conjuntos fotovoltaicos de referência na cobertura do modelo virtual. Isto ocorre devido a estes não atuarem na obstrução da incidência de irradiação solar, bem como não influenciam na propagação desta para os ambientes internos do modelo.

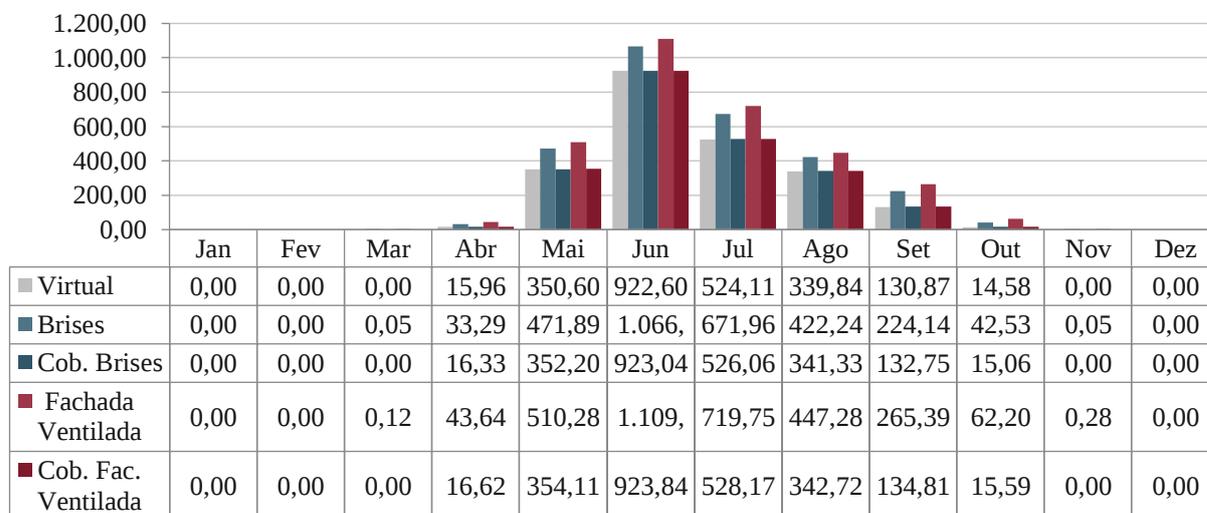
4.4.1.2 Aquecimento

Os conjuntos fotovoltaicos aplicados na fachada do modelo, ao obstruírem a incidência de irradiação solar, e os conjuntos de referência da cobertura, que reduzem a carga térmica na superfície superior, influenciam nas demandas por aquecimento no interior do modelo. Desta forma, o consumo elétrico em aquecimento, via condicionamento artificial, apresenta distinções com a inserção dos conjuntos fotovoltaicos.

Na simulação, foram estabelecidos como ambientes que utilizam o sistema de aquecimento artificial as áreas administrativas, comerciais, laboratórios, salas de aula e salas de professores. Cada ambiente, no entanto, apresenta padrão de utilização específico para estes dispositivos conforme o cronograma de atividades do Apêndice C.

O gráfico 19 apresenta a variação do consumo elétrico por aquecimento artificial no modelo virtual em função do acréscimo dos conjuntos fotovoltaicos.

Gráfico 19 - Consumo elétrico em aquecimento artificial com conjuntos fotovoltaicos à oeste (kWh)



Fonte: O autor.

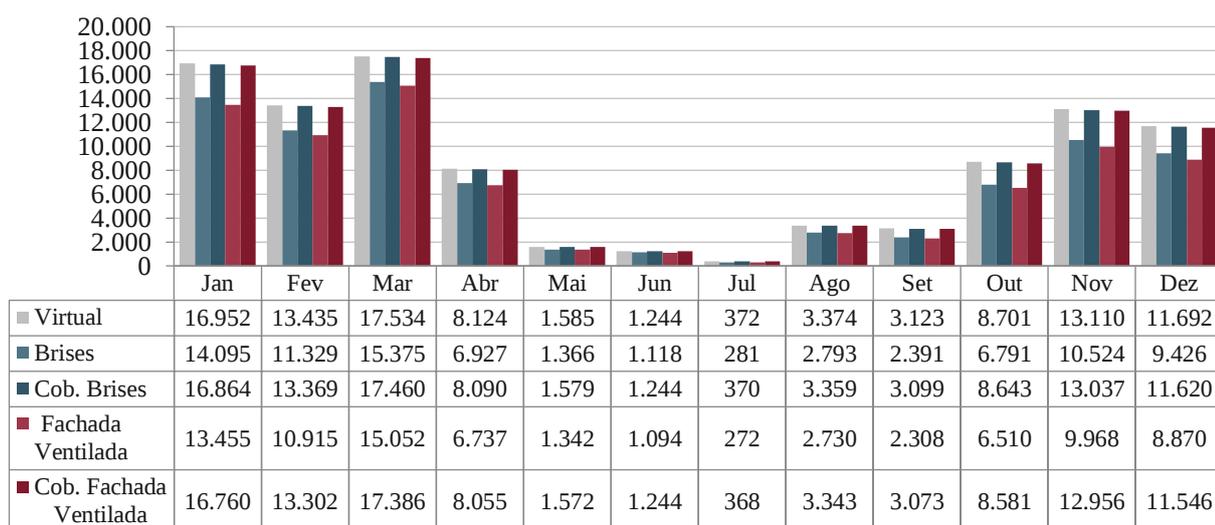
O consumo elétrico por aquecimento artificial aumentou quando foram inseridos os conjuntos fotovoltaicos na forma de brises e fachada ventilada. Os brises, ao obstruírem uma parcela da incidência de irradiação solar como fonte de aquecimento nos meses de inverno, ampliaram em 25,57%, ao ano, o consumo energético em aquecimento artificial (aumento de 633,79 kWh); atingindo, no mês julho, um aumento de 147,84 kWh. Também, a disposição dos módulos fotovoltaicos na cobertura do modelo (Cob. Brises) desenvolveu uma ampliação anual mínima (0,36%, ou 8,20 kWh) no consumo elétrico. Isto foi motivado pela obstrução de parte da incidência de irradiação solar sobre a cobertura do modelo virtual, reduzindo a carga térmica para o interior do modelo, nos meses frios, e ampliando o consumo em aquecimento artificial.

A fachada ventilada fotovoltaica, ao promover sombreamento excessivo e obstruir a incidência de irradiação solar como fonte térmica nos ambientes, ampliou em 37,41% o consumo anual em aquecimento artificial (859,84 kWh); atingindo, em julho, um aumento máximo de 195,63 kWh. Com os módulos constituintes da fachada ventilada inseridos na cobertura (Cob. Fac. Ventilada), houve uma ampliação mínima de 0,75% (17,30 kWh) no consumo elétrico anual. Enfim, os resultados parciais demonstraram um melhor desempenho dos conjuntos de referência, na cobertura, para o consumo elétrico em aquecimento artificial, quando comparados aos sistemas fotovoltaicos na fachada do modelo.

4.4.1.3 Resfriamento

A obstrução da incidência de irradiação solar pelos brises e fachada ventilada fotovoltaica promoveu a redução dos ganhos térmicos no interior do modelo, diminuindo o consumo elétrico em dispositivos de resfriamento artificial. O gráfico 20 apresenta o consumo elétrico mensal por resfriamento artificial observado no modelo virtual e com a inserção dos conjuntos fotovoltaicos.

Gráfico 20 - Consumo elétrico em resfriamento artificial com conjuntos fotovoltaicos à oeste (kWh)



Fonte: O autor.

Os brises fotovoltaicos reduziram em 16,96% (16.831,26 kWh), ao ano, o consumo energético em resfriamento artificial, com uma redução máxima de 2.856,86 kWh em janeiro; enquanto a fachada ventilada possibilitou uma diminuição anual de 20,15% (19.993,44 kWh), atingindo uma redução máxima de 3.496,91 kWh no mesmo mês. Os brises promovem a obstrução da incidência excessiva de irradiação solar direta, como causa de desconforto térmico; a fachada ventilada, por sua vez, além de obstrução solar, apresenta circulação de ar entre a estrutura fotovoltaica e a face do modelo, reduzindo os ganhos térmicos nos ambientes internos. Então, no verão, especialmente, ocorre uma redução na demanda energética por dispositivos de resfriamento artificial.

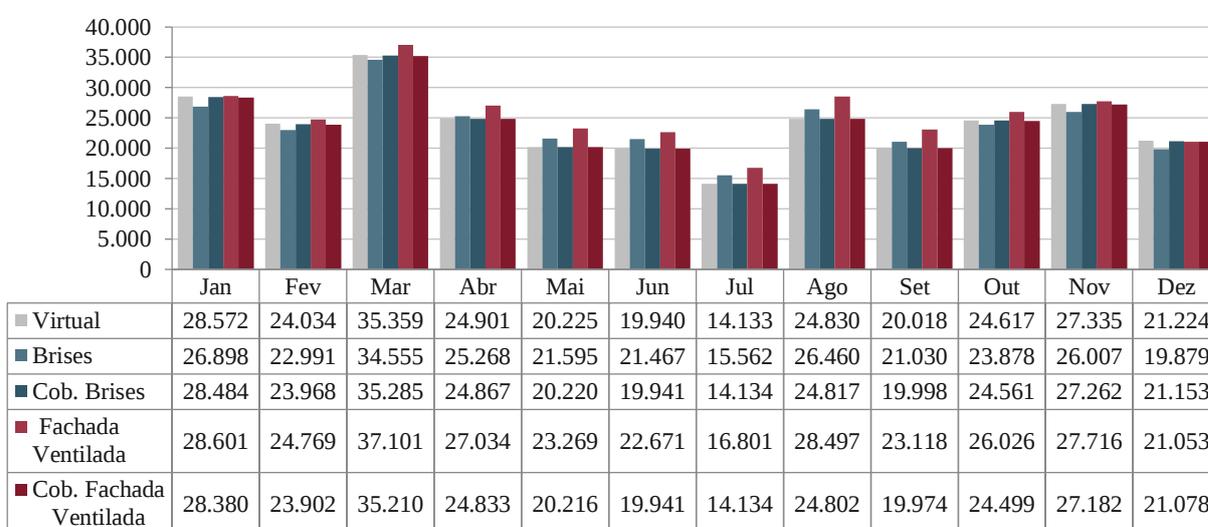
Com os conjuntos fotovoltaicos na cobertura, Cob. Brises permitiu uma redução anual de 0,52% (511,23 kWh), enquanto Cob. Fac. Ventilada promoveu uma diminuição de 1,07% (1.059,53 kWh) em resfriamento artificial. Estas reduções ocorrem devido à obstrução da

incidência solar em parte da cobertura, reduzindo a carga térmica transferida para o interior do modelo e diminuindo o consumo em dispositivos de condicionamento artificial.

4.4.1.4 Consumo elétrico total

O consumo elétrico total é constituído pela energia consumida em equipamentos, iluminação, aquecimento e resfriamento artificiais. Enquanto a carga de equipamentos é comum nas simulações, as variações no consumo por iluminação e condicionamento artificial são parâmetros para verificar as melhores alternativas de inserção dos conjuntos fotovoltaicos no modelo. O gráfico 21 apresenta as variações no consumo elétrico total com a inserção dos conjuntos fotovoltaicos no modelo virtual.

Gráfico 21 - Consumo elétrico total com conjuntos fotovoltaicos à oeste (kWh)



Fonte: O autor.

Os brises fotovoltaicos ampliaram o consumo elétrico total em 0,14% (403,63 kWh), ao ano, com aumento máximo em agosto, quando atingiu 1.630,93 kWh; enquanto, no mês de janeiro, houve uma redução de 1.674,25 kWh. Com a disposição na cobertura do modelo (Cob. Brises), promoveram uma redução no consumo energético anual de 0,17% (497,39 kWh), evidenciando um desempenho pouco superior.

A fachada ventilada fotovoltaica, por sua vez, ampliou o consumo elétrico anual em 7,53% (21.469,15 kWh), com aumento máximo de 3.667,48 kWh, em agosto; enquanto, em dezembro, apresentou uma redução de 170,37 kWh. Na cobertura do modelo, o quantitativo equivalente da fachada ventilada (Cob. Fac. Ventilada) apresentou um desempenho superior, reduzindo o consumo elétrico total em 0,36% (1.036,46 kWh).

Apesar da menor redução no consumo energético em resfriamento artificial, os conjuntos da cobertura apresentaram melhor desempenho geral quando comparados aos conjuntos aplicados na fachada do modelo. Isto está relacionado com a menor ampliação no consumo por aquecimento promovida pelos conjuntos de referência, bem como estes não influenciam no consumo em iluminação artificial. Os conjuntos de brises fotovoltaicos e fachada ventilada fotovoltaica, por sua vez, apresentaram elevada redução no consumo elétrico para resfriamento artificial, no entanto este quantitativo foi inferior ao consumo ampliado em iluminação e aquecimento artificiais.

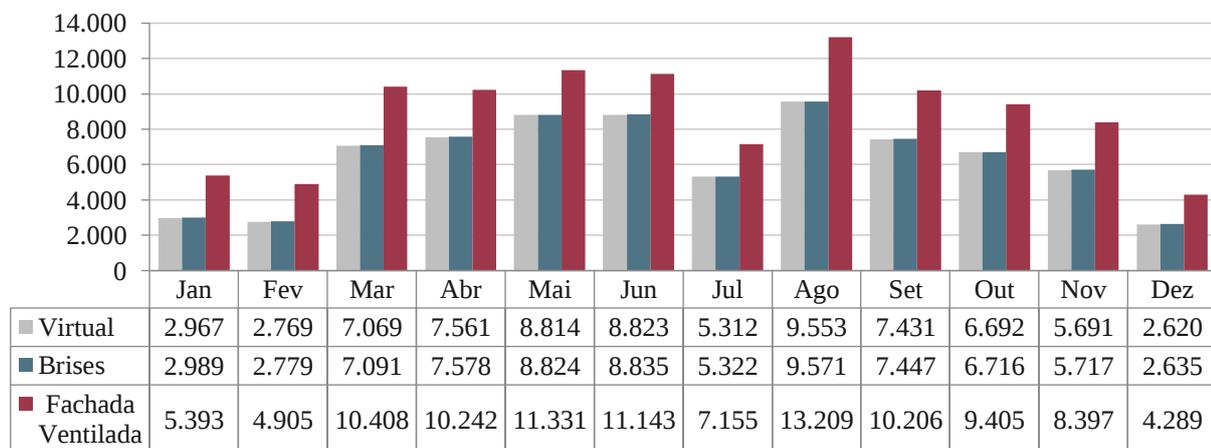
4.4.2 Modelo com exposição longitudinal norte-sul

No modelo com exposição longitudinal norte-sul, os conjuntos fotovoltaicos foram avaliados para a orientação norte. Nesta disposição, o modelo tem eixo perpendicular aos edifícios básicos do campus, permitindo ampliar as avaliações sobre a inserção de conjuntos fotovoltaicos para edifícios nesta orientação e que compõem o entorno.

4.4.2.1 Iluminação artificial

A obstrução da incidência de irradiação solar pelos conjuntos fotovoltaicos sobre a fachada norte influencia no consumo elétrico por iluminação artificial nos ambientes. As variações no consumo, ao ano, para o modelo e com a inserção dos conjuntos são apresentadas no gráfico 22.

Gráfico 22 - Consumo elétrico em iluminação artificial com conjuntos fotovoltaicos à norte (kWh)



Fonte: O autor.

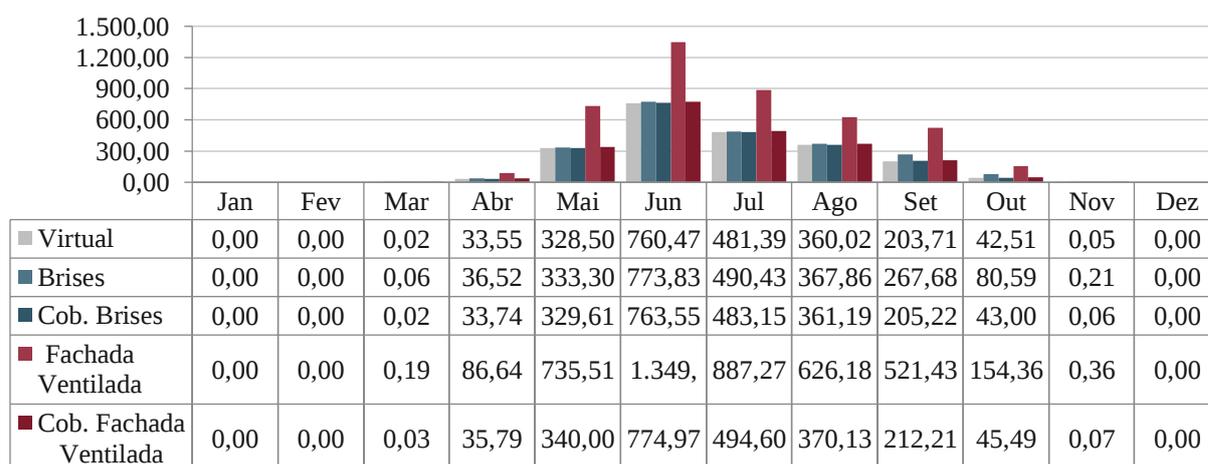
Ao ano, os brises mantiveram o consumo elétrico em iluminação artificial constante, com uma ampliação anual mínima de 0,27% (204,08 kWh); destacando-se o mês de outubro, que atingiu um aumento de 24,58 kWh, enquanto, no mês de julho, houve uma ampliação mínima de 9,59 kWh. A fachada ventilada fotovoltaica, por sua vez, apresentou uma ampliação anual de 40,88% (30.782,02 kWh), atingindo um aumento de 3.656,70 kWh, em agosto, e menor ampliação de 1.668,88 kWh em dezembro. Os conjuntos de referência não influenciaram no consumo energético em iluminação artificial visto que não promovem a obstrução da incidência solar sobre as aberturas.

O consumo energético em iluminação artificial foi um condicionante para o desempenho dos brises e fachada ventilada. Enquanto os brises favoreceram um aumento mínimo no consumo anual, a fachada ventilada ocasionou, ao ano, um acréscimo de consumo em iluminação superior à média mensal em consumo elétrico total. Esta relação ocorre devido a maior área de obstrução solar promovida pela fachada ventilada, enquanto, nos brises, ainda houve contribuição por iluminação natural dentro de limites aceitáveis.

4.4.2.2 Aquecimento artificial

A incidência de irradiação solar pode ser utilizada como solução passiva para aquecimento em ambientes, no entanto, a obstrução desta, promovida pelos conjuntos fotovoltaicos sobre a fachada do modelo, ampliou a demanda energética por aquecimento artificial. Assim, o gráfico 23 apresenta as variações mensais no consumo elétrico em aquecimento artificial com a inserção dos conjuntos fotovoltaicos no modelo virtual.

Gráfico 23 - Consumo elétrico em aquecimento artificial com conjuntos fotovoltaicos à norte (kWh)



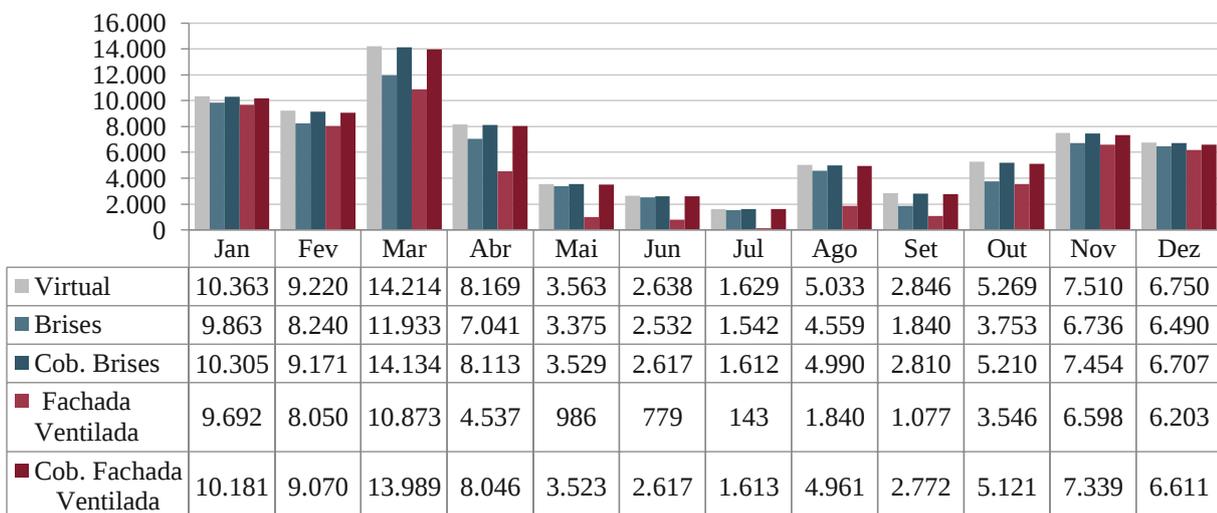
Os brises ampliaram o consumo energético anual por aquecimento artificial em 6,35% (140,26 kWh) e, em setembro, atingiram a máxima ampliação com 63,97 kWh. Quando os módulos foram inseridos na cobertura, o consumo anual apresentou variação mínima, ampliando em 0,42% (9,31 kWh). A fachada ventilada fotovoltaica ampliou em 97,34% (2.151,50 kWh) o consumo energético anual, atingindo um aumento máximo de 589,28 kWh em junho; enquanto, na cobertura, a ampliação do consumo anual foi de 2,85% (63,06 kWh).

Os módulos fotovoltaicos inseridos na cobertura apresentaram melhor desempenho, visto que não influenciaram significativamente no consumo elétrico em aquecimento artificial. Estes não atuam na obstrução da incidência solar sobre os ambientes, permitindo o uso desta como fonte térmica, no inverno, e reduzindo a demanda por aquecimento artificial. Em contrapartida, o conjunto de brises e a fachada ventilada ampliaram de maneira distinta a demanda por aquecimento artificial; uma vez que o sombreamento parcial sobre o modelo desenvolvido pelo conjunto de brises promove uma baixa ampliação no consumo elétrico, e a fachada ventilada, determinando sombreamento permanente, amplia de maneira significativa.

4.4.2.3 Resfriamento artificial

Os brises e fachada ventilada permitiram a redução na demanda energética por resfriamento artificial devido à obstrução da incidência de irradiação solar como fonte de desconforto térmico. O gráfico 24 apresenta as variações no consumo elétrico por resfriamento artificial no modelo e com a inserção dos conjuntos fotovoltaicos.

Gráfico 24 - Consumo elétrico em resfriamento artificial com conjuntos fotovoltaicos à norte (kWh)



O consumo elétrico por resfriamento artificial diminuiu, ao longo do ano, com a inserção dos conjuntos fotovoltaicos sobre a fachada norte. Os brises reduziram o consumo em 12,04% (9.297,25 kWh), ao ano, com redução máxima de 2.280,27 kWh em março. Por sua vez, na cobertura do modelo, Cob. Brises apresentou uma variação mínima no consumo anual com redução de 0,71% (551,26 kWh), com maior diminuição em março (79,27 kWh).

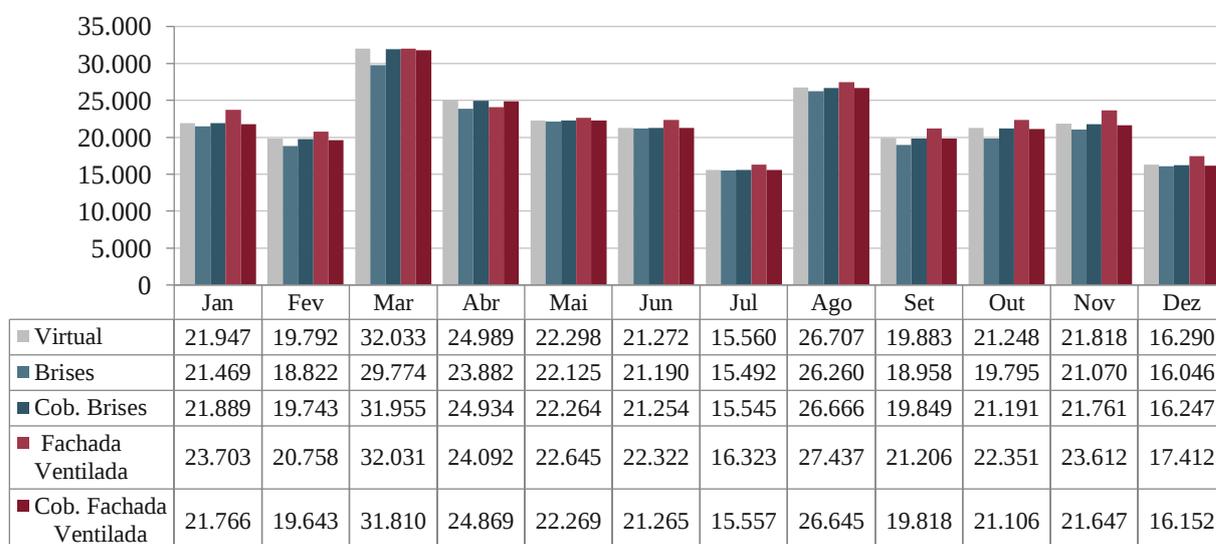
A fachada ventilada fotovoltaica foi mais eficiente, reduzindo o consumo por resfriamento artificial em 29,64% (22.879,92 kWh) ao ano, com redução máxima de 3.631,41 kWh em abril. Enquanto, o sistema Cob. Fac. Ventilada apresentou uma redução anual de 1,76% (1.360,37 kWh), com redução máxima de 224,32 kWh em março.

Os brises fotovoltaicos e fachada ventilada fotovoltaica apresentaram melhor desempenho devido à redução na carga térmica sobre os ambientes com a obstrução da incidência de irradiação solar e diminuição no aquecimento da face norte do modelo. Os conjuntos de referência, na cobertura, apresentaram uma redução inferior com a diminuição dos ganhos térmicos na face superior do modelo.

4.4.2.4 Consumo elétrico total

Por fim, o consumo elétrico total compreende os consumos individuais em iluminação, aquecimento e resfriamento artificiais acrescidos do consumo comum em equipamentos. O gráfico 25 apresenta este parâmetro no modelo e com a inserção dos conjuntos fotovoltaicos.

Gráfico 25 - Consumo elétrico total com conjuntos fotovoltaicos à norte (kWh)



Fonte: O autor.

Os brises fotovoltaicos e seu conjunto de referência, na cobertura, apresentaram uma redução no consumo elétrico total do modelo. Os brises reduziram em 3,39%, ao ano, o consumo elétrico total (economia de 8.952,91 kWh), com redução máxima no mês de março, atingindo 2.258,33 kWh; enquanto, em julho, apresentou redução mínima de 67,71 kWh. Quando aplicados na cobertura (Cob. Brises), apresentaram uma influência mínima no consumo energético anual, com redução de 0,20% (538,69 kWh), sendo esta redução relacionada à diminuição das trocas térmicas, atuando como coberturas ventiladas, o que permite superar o consumo elétrico acrescido por aquecimento artificial nos meses frios.

A fachada ventilada fotovoltaica, no entanto, ampliou o consumo elétrico total em 3,81% ao ano, acrescentando 10.053,60 kWh; com maior amplitude em novembro, com 1.793,97 kWh, e maior redução em abril, com 897,29 kWh. Na cobertura, Cob. Fac. Ventilada desenvolveu uma variação mínima no consumo elétrico total, com redução de 0,49% (1.291,33 kWh), com maior redução em março, com 223,04 kWh, em função das maiores diminuições no consumo em resfriamento artificial.

Assim, para a orientação norte do modelo com exposição longitudinal norte-sul, o conjunto fotovoltaico na forma de brises apresentou a maior redução no consumo elétrico total. O desempenho do conjunto está associado à metodologia utilizada no desenvolvimento das máscaras de sombreamento, permitindo a contribuição de iluminação natural e obstruindo-a em períodos onde a incidência de irradiação solar promove desconforto térmico. Dessa forma, foi possível promover uma redução no consumo elétrico em resfriamento e ampliações mínimas no consumo em iluminação e aquecimento artificiais.

A fachada ventilada, ao ampliar as áreas sombreadas na face norte do modelo, apresentou uma elevada redução no consumo elétrico por resfriamento artificial, no entanto, o quantitativo foi inferior ao consumo promovido nos parâmetros de iluminação e aquecimento artificiais. Os conjuntos de referência, por sua vez, ao atuarem como sistemas de coberturas ventiladas parciais, apresentaram reduções mínimas no consumo elétrico total devido às diminuições na demanda por resfriamento artificial; enquanto, no consumo em iluminação e aquecimento, não promoveram variações consideráveis.

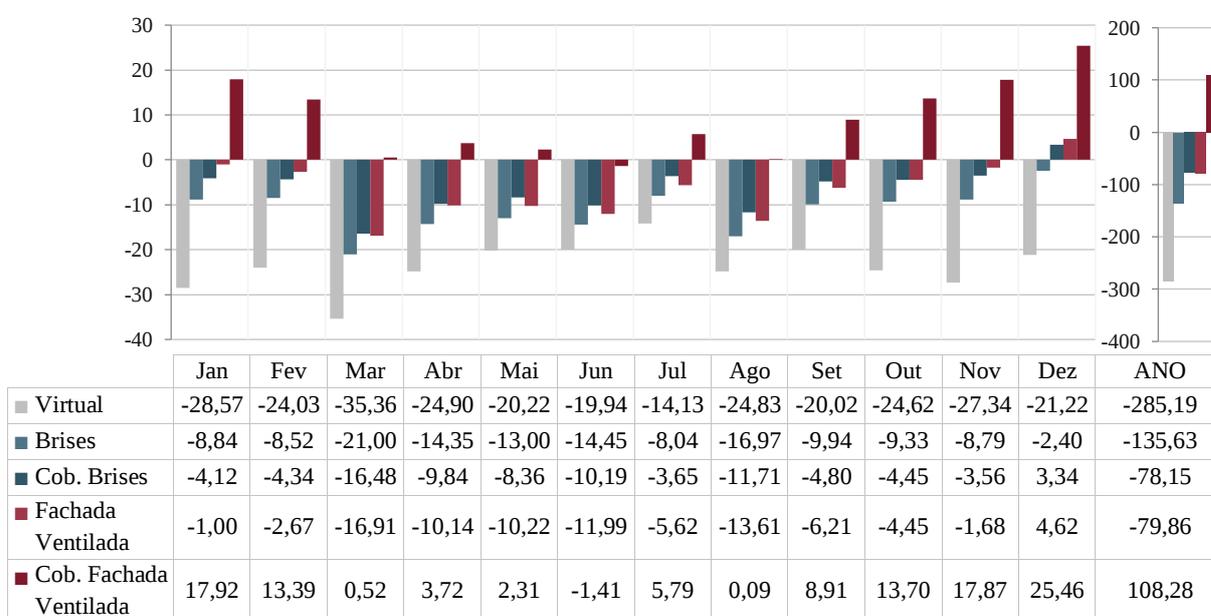
4.5 BALANÇO ENERGÉTICO DOS CONJUNTOS FOTOVOLTAICOS

O balanço energético promovido pelos conjuntos fotovoltaicos, nesta pesquisa, foi determinado pela diferença entre a energia efetiva gerada pelos módulos fotovoltaicos e o consumo em energia elétrica desenvolvido pelo modelo virtual ao qual os conjuntos se associam – sobre a fachada e cobertura. Dessa forma, foi possível avaliar o desempenho dos conjuntos quando inseridos no modelo, confrontando seu potencial em geração elétrica e a variação no consumo elétrico promovida por sua inserção. O balanço energético foi realizado para as orientações oeste e norte, o que permite obter diretrizes distintas para o melhor aproveitamento dos conjuntos nestas situações.

4.5.1 Modelo com exposição longitudinal leste-oeste

Com o modelo virtual nesta configuração, busca-se avaliar o balanço energético com a inserção dos brises fotovoltaicos e fachada ventilada fotovoltaica, bem como seus conjuntos correspondentes, na cobertura, para a orientação oeste. Assim, o gráfico 26 apresenta, ao longo do ano, o balanço energético resultante da diferença entre geração e consumo em energia elétrica promovida pelos sistemas quando inseridos no modelo.

Gráfico 26 - Balanço energético com os conjuntos fotovoltaicos à oeste (MWh)



Fonte: O autor.

O gráfico demonstra um melhor desempenho geral para os componentes fotovoltaicos na cobertura do modelo e que compreendem os conjuntos de referência. O conjunto Cob. Fachada Ventilada, composto por 684 módulos fotovoltaicos, desenvolveu o maior quantitativo no balanço energético anual, atingindo um volume positivo de 108,28 MWh (média de 9,02 MWh/mês), com máxima de 25,45 MWh, em dezembro, e com mínima de -1,41 MWh, em junho, quando apresentou balanço negativo. Este desempenho foi influenciado, especialmente, pela maior capacidade de geração de energia com os módulos fotovoltaicos em condições de maior exposição à incidência de irradiação solar. Além disso, o desempenho foi superior nos meses de verão, quando os módulos fotovoltaicos apresentaram maior geração elétrica e de maior amplitude em relação à geração dos demais conjuntos.

Enquanto isso, com a inserção do conjunto Cob. Brises, em menor quantidade de módulos fotovoltaicos (360), o modelo apresentou um consumo elétrico anual superior à energia gerada, representando um balanço energético negativo de 78,15 MWh. Nesta configuração, foi observado um balanço positivo apenas no mês de dezembro, com 3,34 MWh devido, principalmente, a ampliação na geração de energia.

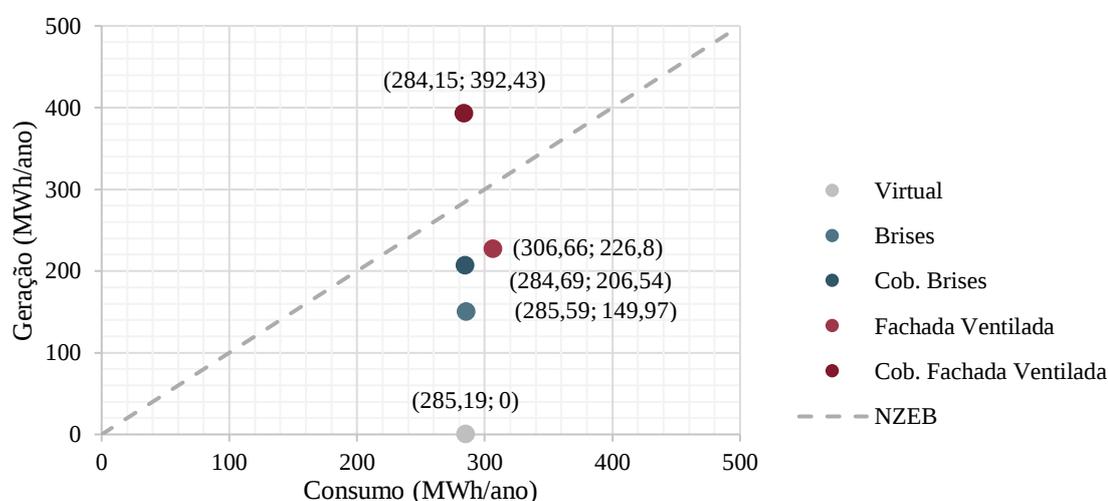
Sobre a fachada do modelo virtual, com a inserção dos brises fotovoltaicos, o modelo apresentou um balanço energético negativo, com consumo elétrico anual excedido em 135,62 MWh; enquanto, com a fachada ventilada fotovoltaica, ocorreu um balanço energético negativo anual de 79,86 MWh. Com os brises, a ampliação do consumo elétrico por iluminação e aquecimento artificial superou a redução no consumo por resfriamento artificial, bem como a sua geração elétrica foi condicionada por perdas energéticas relacionadas ao sombreamento. Na fachada ventilada, por sua vez, além de seu potencial em geração energética ser afetado com os módulos fotovoltaicos inclinados a 90°, o sombreamento desenvolvido sobre a fachada do modelo promoveu uma elevada ampliação no consumo energético por iluminação artificial nos ambientes; e, impedindo a incidência de irradiação solar como fonte de aquecimento, favoreceu o consumo elétrico por aquecimento artificial. Estes fatores contribuíram para o balanço energético inferior dos conjuntos sobre a fachada em relação aos seus conjuntos de referência.

Então, diante das características da edificação, representadas no modelo virtual, e dos conjuntos fotovoltaicos propostos para a fachada oeste, verificou-se que estes desenvolveriam maior eficiência energética se dispostos na cobertura da edificação, sem função de proteção solar. Essa situação ocorre devido à ampliação no consumo elétrico total promovido pela inserção dos conjuntos fotovoltaicos sobre as aberturas, enquanto, posicionados na cobertura, promoveram reduções no consumo.

Além disso, na cobertura, os conjuntos apresentaram geração energética significativamente superior devido à maior exposição solar e menores perdas energéticas, enquanto, sobre a fachada do modelo, foram condicionados a perdas por sombreamento ou ao ângulo de incidência sobre os módulos, reduzindo o seu potencial elétrico. Essas características justificam o melhor desempenho energético para os conjuntos fotovoltaicos Cob. Brises e Cob. Fachada Ventilada, que superaram em 57,48 MWh e 188,14 MWh o balanço energético desenvolvido por seus correspondentes na forma de brises fotovoltaicos e fachada ventilada fotovoltaica respectivamente.

Por fim, é possível identificar os balanços energéticos dos modelos simulados em relação ao perfil do balanço energético nulo (NZEB). O gráfico 27 ilustra o desempenho de cada modelo simulado e a sua proximidade com a situação de equilíbrio energético.

Gráfico 27 – Conjuntos fotovoltaicos à oeste e o eixo NZEB (MWh/ano)



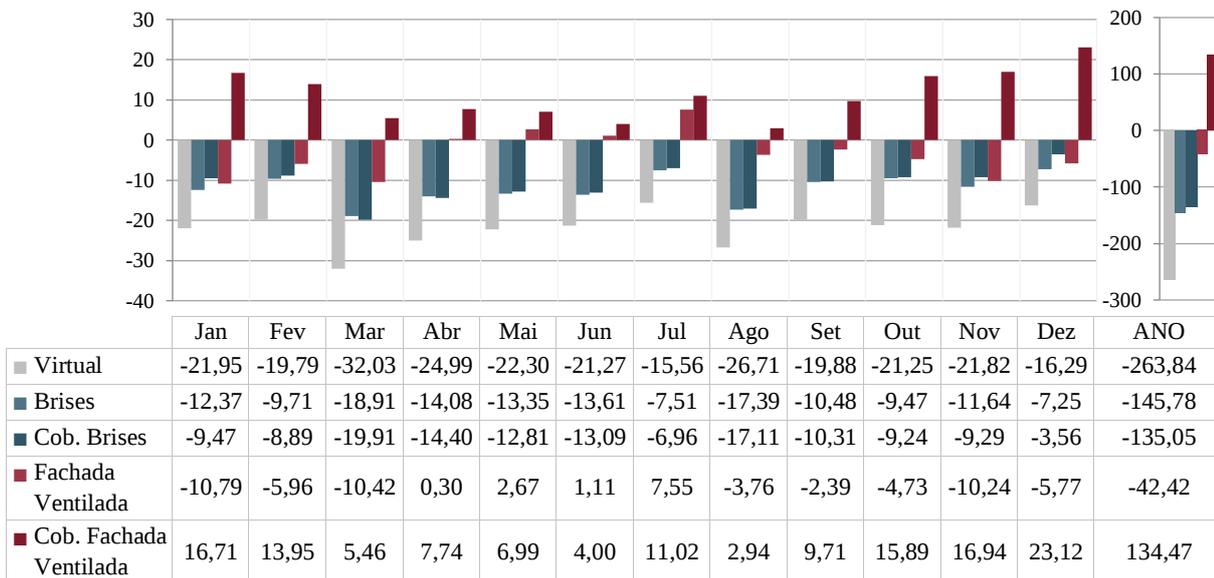
Fonte: O autor.

Conforme o gráfico, o modelo com acréscimo dos conjuntos fotovoltaicos na forma de Cob. Fachada Ventilada superou o balanço energético nulo, com limite identificado pela linha tracejada. Os conjuntos da fachada ventilada e Cob. Brises apresentaram desempenhos similares e próximos ao equilíbrio energético, enquanto o conjunto dos brises apresentou a menor eficiência. Ainda, é possível identificar a ampliação do consumo elétrico total no conjunto da fachada ventilada, deslocado em relação ao eixo de consumo verificado nos outros modelos. A geração energética pelo conjunto Cob. Fachada Ventilada, também, foi consideravelmente superior ao padrão de geração verificado nos outros conjuntos.

4.5.2 Modelo com exposição longitudinal norte-sul

Nesta configuração, o balanço energético do modelo com inserção dos conjuntos fotovoltaicos foi avaliado para a face norte. O gráfico 28, então, apresenta o balanço energético resultante da diferença entre geração e consumo de energia durante o ano.

Gráfico 28 - Balanço energético com os conjuntos fotovoltaicos à norte (MWh)



Fonte: O autor.

De acordo com o gráfico, o melhor desempenho geral para os sistemas fotovoltaicos foi apresentado pelo conjunto de referência da fachada ventilada na cobertura da edificação. Com o conjunto Cob. Fachada Ventilada, composto por 585 módulos fotovoltaicos, o modelo desenvolveu um balanço energético anual positivo de 134,47 MWh (média de 11,21 MWh/mês), com máxima de 23,12 MWh em dezembro, e mínima de 2,94 MWh em agosto. Enquanto isso, com o conjunto Cob. Brises, com 189 módulos, houve um balanço negativo de 135,05 MWh (o consumo mensal supera a geração energética em uma média de 11,25 MWh/mês).

Os brises fotovoltaicos desenvolveram um balanço energético negativo, com consumo elétrico anual excedente em 145,78 MWh. O consumo, que foi superior à geração elétrica o ano todo, apresentou a menor diferença em julho (7,51 MWh) devido a menor ocupação da edificação; enquanto a máxima foi verificada em março (18,91 MWh) diante do início do ano eletivo, o que favorece o consumo, especialmente, em resfriamento artificial.

A similaridade entre os balanços energéticos promovidos pelos brises e Cob. Brises ocorreu devido à proximidade entre a geração e o consumo energético nestes. Foi verificada uma geração energética mais equitativa, na comparação com a orientação oeste, principalmente pela exposição à irradiação solar entre os conjuntos apresentar menores diferenças, assim como estes desenvolveram um perfil de consumo energético semelhante.

Com a inserção da fachada ventilada fotovoltaica, por sua vez, o modelo apresentou um balanço energético negativo de 42,42 MWh ao ano devido, especialmente, a menor irradiância sobre os módulos. Assim como observado na orientação oeste, a geração energética foi afetada por uma irradiação global efetiva inferior a verificada nos outros conjuntos em função da verticalidade dos módulos fotovoltaicos (inclinados em 90°).

Apesar disso, próximo aos meses de inverno, quando a altura solar favoreceu a irradiação global efetiva sobre a fachada ventilada fotovoltaica, a geração elétrica foi superior ao consumo e reproduziu um balanço energético positivo total de 11,63 MWh entre os meses de abril e julho. Ainda, o conjunto promoveu o maior balanço energético negativo no mês de janeiro, quando o consumo superou a geração em 10,79 MWh devido à redução na geração elétrica e ampliação no consumo elétrico total; enquanto o melhor desempenho ocorreu em julho, com balanço energético positivo de 7,55 MWh motivado pelo aumento na geração elétrica.

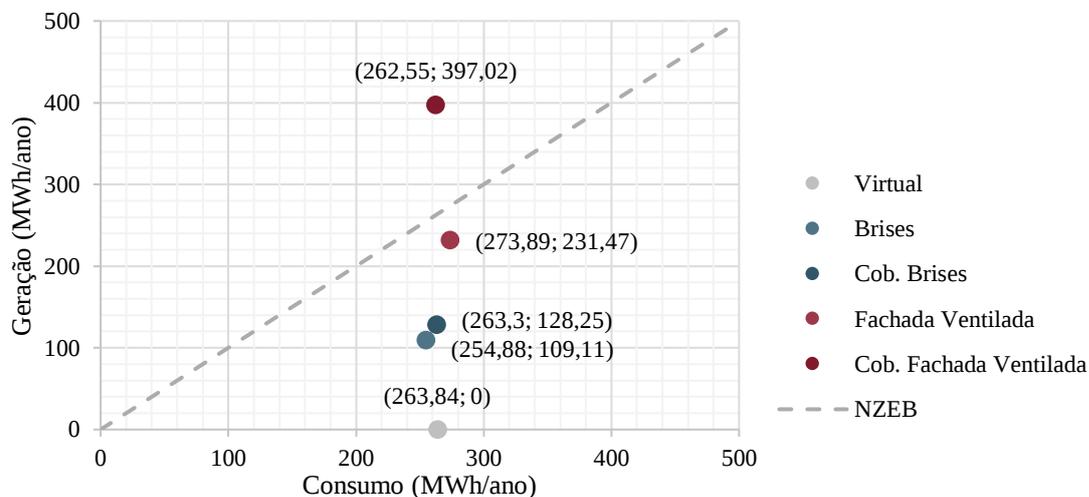
Nessas condições, foi verificado um melhor desempenho pelos módulos fotovoltaicos dispostos na cobertura do modelo, desvinculados da função de proteção solar. Nas simulações, foi identificado que, embora os conjuntos fotovoltaicos na fachada do modelo promovam a redução no consumo energético por resfriamento artificial, estes ampliaram o consumo elétrico em iluminação e aquecimento; ao mesmo tempo que tiveram sua geração elétrica limitada por perdas de sombreamento e pelo ângulo de incidência. Enquanto isso, os módulos fotovoltaicos da cobertura apresentaram condições ideais para a geração de energia e não influenciaram significativamente no consumo elétrico total.

Dessa forma, apesar de o brises fotovoltaicos apresentarem a maior eficiência como componentes passivos entre os conjuntos, promovendo a redução do consumo elétrico total, o desempenho destes foi superado pela maior geração elétrica no conjunto de referência na cobertura, que indica uma melhor posição para a inserção dos módulos fotovoltaicos. Esta relação, como verificada na orientação oeste, ratifica a geração elétrica fotovoltaica como o principal condicionante, na pesquisa, para a melhoria no balanço energético dos modelos avaliados.

Os resultados obtidos nos balanços energéticos, em ambas as orientações, também foram diretamente influenciados pelas configurações das aberturas do modelo. Neste, dispo de janelas em fita, os brises e fachada ventilada desenvolvidos para cada ambiente foram sobrepostos, recriando estruturas contínuas na fachada do modelo. Assim, a incidência de irradiação solar - fonte de aquecimento em períodos de desconforto térmico por temperaturas internas baixas – foi obstruída, especialmente, nos ambientes locados no centro do modelo. Esta situação justifica o aumento no consumo elétrico por aquecimento artificial, nos meses de inverno, e iluminação quando foram acrescidos os brises fotovoltaicos e fachada ventilada fotovoltaica.

Enfim, os balanços energéticos anuais dos modelos simulados para a orientação norte são identificados e comparados à situação de balanço energético nulo (NZEB). O gráfico 29 apresenta os desempenhos individuais dos modelos e o eixo de equilíbrio energético.

Gráfico 29 – Conjuntos fotovoltaicos à norte e o eixo NZEB (MWh/ano)



Fonte: O autor.

Conforme o gráfico, o modelo Cob. Fachada Ventilada foi a única configuração que atingiu o balanço energético nulo e devido a sua elevada geração de energia. O conjunto da fachada ventilada apresentou balanço próximo ao equilíbrio energético, enquanto os conjuntos dos brises e Cob. Brises, com menor capacidade de geração, apresentaram desempenho inferior. Também, é possível verificar um deslocamento do conjunto dos brises em relação ao eixo de consumo, indicando o seu melhor desempenho na redução da demanda energética.

5 CONCLUSÃO

Atualmente, em um contexto global, o uso crescente de equipamentos e serviços com elevada carga energética empregada tem contribuído para o aumento no consumo de energia. No Brasil, especialmente, estes fatores têm ampliado a demanda sobre a matriz energética nacional, que se configura em modelos convencionais, centralizados, de baixo rendimento e alto impacto ambiental.

A partir da caracterização do sistema energético nacional, então, há a necessidade de inserir fontes de energia que diversifiquem e complementem o potencial de geração, através de recursos renováveis e com núcleos geradores descentralizados. Nesse sentido, a tecnologia fotovoltaica, ao fazer uso da energia solar, possibilita a geração distribuída, favorecendo iniciativas individuais ao aproximar a geração das unidades consumidoras, reduzindo as perdas em distribuição e a necessidade de ampliação da rede elétrica.

Devido às características físicas, geométricas e à capacidade de modulação, os conjuntos fotovoltaicos podem ser integrados com a envoltória da edificação atuando como elementos arquitetônicos. Entre outras configurações, podem ser utilizados como elementos de sombreamento, tornando-os componentes passivos em estratégias bioclimáticas para a manutenção do conforto ambiental. Assim, ao limitar a incidência de irradiação solar, possibilitam a redução da carga térmica sobre o interior da edificação, reduzindo a demanda energética por dispositivos de condicionamento artificial ao mesmo tempo em que promovem a geração elétrica.

Nesse contexto, a pesquisa avaliou a integração de sistemas fotovoltaicos com a envoltória de edificações tendo em vista a promoção da eficiência energética. As avaliações foram realizadas em um modelo virtual que caracteriza as edificações de tipologia padrão da Universidade Federal de Santa Maria, campus Camobi, devido à representatividade histórica destas, número de exemplares e elevado consumo energético. Assim, os conjuntos fotovoltaicos – na condição de brises e fachada ventilada - foram desenvolvidos utilizando o método da Temperatura Neutra (PEREIRA; SOUZA, 2008), que possibilitou a identificação de perfis de obstrução solar em função das zonas de conforto térmico em ambientes. O modelo com os conjuntos fotovoltaicos foi simulado através dos *softwares* PVsyt, para a geração elétrica, e DesignBuilder, para a avaliação da influência dos conjuntos sobre o consumo energético.

O balanço energético permitiu identificar o desempenho dos conjuntos fotovoltaicos sobre a fachada do modelo (conjuntos Brises e Fachada Ventilada) e seus correspondentes, com mesma potência de geração, aplicados na cobertura (Cob. Brises e Cob. Fachada Ventilada)

para as orientações norte e oeste. Foram observados melhores desempenhos, em ambas as orientações, para os conjuntos posicionados na cobertura e, especialmente, na forma de Cob. Fachada Ventilada. Esta relação indicou que a capacidade de geração foi fundamental para o balanço energético positivo, apresentando maior relevância que o desempenho dos conjuntos na obstrução da incidência solar excessiva, tendo em vista a redução do consumo energético.

Apesar de os brises fotovoltaicos e a fachada ventilada fotovoltaica promoverem reduções significativas no consumo por resfriamento artificial, houve um aumento considerável em consumo elétrico por iluminação. Nestas condições, estes desenvolveram reduções no consumo elétrico total apenas no conjunto dos brises para a orientação norte, enquanto a fachada ventilada promoveu um elevado aumento no consumo elétrico em ambas as orientações. Na cobertura, os módulos promoveram variações mínimas no consumo elétrico total, visto que não influenciaram no consumo elétrico por iluminação artificial, e desenvolveram menores variações no consumo em condicionamento artificial quando comparados aos conjuntos aplicados nas fachadas do modelo.

Os conjuntos na cobertura apresentaram maior potencial em geração devido à maior incidência de irradiação solar, enquanto, inseridos nas fachadas do modelo virtual, o somatório da energia reduzida no consumo e a gerada atingiram valores inferiores. Nestes, a geração elétrica foi limitada a perdas por sombreamento entre os conjuntos e devido ao ângulo de incidência, quando os módulos estiveram inclinados verticalmente na forma de fachada ventilada.

No entanto, a pesquisa revelou a possibilidade de geração de energia através da envoltória dos edifícios. As fachadas permitiram ampliar a potência instalada em sistemas fotovoltaicos, viabilizando a geração de grandes volumes de energia, apesar de apresentarem maiores perdas energéticas nestas condições. Os conjuntos fotovoltaicos nas fachadas do modelo virtual apresentaram maior geração energética para orientação norte devido aos maiores índices de irradiação global efetiva, especialmente na forma de brises fotovoltaicos, que atingiram 85,07% de seu referencial na cobertura, enquanto a fachada ventilada fotovoltaica atingiu 58,30%. Apesar das limitações na geração de energia devido à inclinação dos módulos, a fachada ventilada fotovoltaica apresentou rendimento próximo ao seu limite teórico, alcançando, aproximadamente, 86,0% em ambas as orientações e em função de menores perdas por sombreamento e temperatura.

Ainda, o desempenho dos conjuntos fotovoltaicos sobre as fachadas foi condicionado pelas características da envoltória das edificações de estudo. Estas apresentam janelas contínuas ao longo das fachadas, orientando o desenvolvimento de estruturas prolongadas e com

obstrução excessiva sobre os ambientes centrais do modelo. A distância entre as janelas, nos distintos pavimentos, implica na sobreposição dos ângulos de sombreamento que configuram as estruturas, tornando a fachada ventilada um plano único sobre a face do modelo. Dessa forma, a incidência de irradiação solar é obstruída quando é fonte para aquecimento, nos meses frios, ou quando esta determina a temperatura neutra nos ambientes, favorecendo o consumo em aquecimento artificial. Ao mesmo tempo, a iluminação natural incidente foi reduzida, ampliando o consumo elétrico em iluminação complementar.

Em relação aos resultados da pesquisa, ainda que esta tenha apresentado limitações ao desconsiderar a influência do entorno e das perdas na geração energética pelos componentes de transmissão, estima-se que, com a reprodução dos resultados pelos edifícios de mesma tipologia, o volume gerado poderia atender a uma demanda significativa no consumo elétrico do campus. Além disso, em edificações com elevado consumo energético e menores áreas de cobertura, a pesquisa indicou que os módulos fotovoltaicos sobre as superfícies da fachada podem favorecer a promoção da eficiência energética. Em tipologias prediais, por exemplo, possibilitam a geração elétrica na fachada da edificação, concomitante à redução dos ganhos térmicos e a diminuição do consumo elétrico via condicionamento artificial.

Também, o balanço energético pode ser um recurso para orientar a implantação dos sistemas fotovoltaicos tendo em vista o aspecto econômico. De acordo com os resultados obtidos em ambas as orientações e considerando o mesmo quantitativo de módulos fotovoltaicos, o desempenho destes na cobertura foi significativamente superior, atingindo, inclusive, o NZEB quando compoendo o conjunto Cob. Fachada Ventilada. Dessa forma, embora os conjuntos da cobertura não tenham apresentado influência significativa sobre o consumo energético do modelo, a capacidade de geração energética destes permitiu desenvolver maior eficiência energética, indicando melhores posicionamentos para investimentos em tecnologia fotovoltaica.

Apesar disso, buscando um melhor desempenho para os conjuntos fotovoltaicos nas fachadas do modelo, alterações no método de desenvolvimento dos brises e fachada ventilada são sugeridas. A aplicação de modelagem paramétrica poderia ser adotada para a constituição destes conjuntos fotovoltaicos, buscando associar a geração elétrica à redução do consumo através de parâmetros como os níveis de irradiação solar, padrões de sombreamento, permeabilidade da iluminação natural e tecnologia fotovoltaica empregada. Este método consideraria distintos modelos e tecnologias de componentes fotovoltaicos, como módulos de menores dimensões, flexíveis ou semitransparentes (módulo *dual glass*), com inclinações que favorecessem o maior equilíbrio entre a redução do consumo e a geração energética.

Por outro lado, observando que a redução no consumo por resfriamento artificial foi, por vezes, superada pela ampliação no consumo em iluminação, o desempenho dos conjuntos poderia ser melhorado com a inserção destes, exclusivamente, sobre os ambientes com dispositivos de condicionamento artificial. Esta alternativa possibilitaria manter a redução do consumo elétrico por resfriamento e limitaria a ampliação do consumo em iluminação aos ambientes com os sistemas de proteção fotovoltaica, promovendo maiores reduções no consumo elétrico total.

Ademais, outras possibilidades poderiam ser exploradas buscando potencializar o desempenho dos conjuntos fotovoltaicos na fachada. Entre elas, estes poderiam estar integrados a prateleiras de luz, permitindo que a iluminação natural incida indiretamente sobre os ambientes, reduzindo o consumo em iluminação artificial. Enquanto, sobre a forma de brises fotovoltaicos móveis, possibilitariam uma obstrução personalizada da incidência de irradiação solar ao considerar o conforto luminoso e térmico pelos usuários. Desse modo, a incidência poderia ser controlada em função do desempenho das atividades nos ambientes, ampliando a disponibilidade de iluminação natural e ganhos térmicos nos períodos de temperaturas inferiores à zona de conforto térmico.

No entanto, considerando os resultados obtidos na pesquisa, é possível estabelecer diretrizes para a aplicação da metodologia em determinadas condições. Enquanto a configuração contínua das aberturas limitou a redução do consumo energético pelos brises fotovoltaicos, a geração elétrica foi afetada pela sobreposição dos conjuntos, que promovem sombreamento entre si. Portanto, recomenda-se a aplicação do método para edificações com aberturas isoladas e não sobrepostas ou quando a sobreposição é atenuada pela maior distância entre os níveis das aberturas.

Em relação à fachada ventilada fotovoltaica, a utilização dos módulos apenas sobre as superfícies opacas da envoltória é uma sugestão para pesquisas futuras, visto que possibilitaria a redução na demanda energética por condicionamento artificial, sem impactar no consumo em iluminação. Dessa forma, constituindo fachadas ventiladas nas áreas não compostas por aberturas, permitiria uma redução na transferência das cargas térmicas para o interior do modelo, reduzindo o consumo em resfriamento, enquanto permite a incidência de iluminação natural para os ambientes.

Também, a pesquisa indicou a possibilidade de abordar o uso dos conjuntos fotovoltaicos como soluções passivas na envoltória das edificações. O uso destes sistemas, atualmente, está relacionado à perspectiva de diminuir os custos no consumo elétrico e o potencial em ampliar o consumo, isto é, sem relação com a gestão energética da edificação.

Entretanto, conforme a pesquisa, quando foram aplicados na forma de brises e fachada ventilada, foi possível reduzir consideravelmente o consumo energético do modelo virtual em dispositivos de climatização artificial. Assim, associando a metodologia adotada com estratégias de manutenção da incidência de iluminação natural sobre os ambientes, seria possível ampliar as reduções no consumo energético total de edificações, diminuindo a demanda energética e, por sua vez, reduzir a potência instalada em sistemas fotovoltaicos.

Enfim, a pesquisa avaliou a inserção de sistemas fotovoltaicos na envoltória de edificações para a promoção da eficiência energética destas. Nesse sentido, através das metodologias adotadas e resultados obtidos, espera-se fornecer novos entendimentos sobre a utilização destes sistemas, viabilizando estudos que explorem as potencialidades da tecnologia fotovoltaica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15.220-1**. Desempenho térmico de edificações. Parte 1: Definições, símbolos e unidades. Rio de Janeiro: ABNT, 2005a.

_____. **NBR 15.220-2**. Desempenho térmico de edificações. Parte 2: Método de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 2005b.

_____. **NBR 16.401-3**. Instalações de ar-condicionado - Sistemas centrais e unitários. Parte 3: Qualidade do ar interior. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

_____. **NBR ISO/CIE 8.995-1**. Iluminação de ambientes de trabalho. Parte 1: Interior. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ABSOLAR. Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica. **Infográfico N° 27**. São Paulo, SP, 2021a.

_____. **Infográfico N° 29**. São Paulo, SP, 2021b.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Nota Técnica n° 0056/2017-SRD/ANEEL**: atualização das projeções de consumidores residenciais e comerciais com microgeração solar fotovoltaicos no horizonte 2017-2024. Brasília, DF, 2017.

_____. **Perdas de Energia Elétrica na Distribuição**. Edição 01. Brasília, DF, 2020. Disponível em: <<https://www.aneel.gov.br/documents/654800/18766993/Relat%C3%B3rio+Perdas+de+Energia+2019.pdf/6cb0bf36-4074-bbc3-d15d-ed370f44b34b>>. Acesso em: 14 jan. 2021.

_____. **Resolução Normativa N° 493/2012**: estabelece os procedimentos e as condições de fornecimento por meio de microssistema isolado de geração e distribuição de energia elétrica – MIGDI ou sistema individual de geração de energia elétrica com fonte intermitente – SIGFI. Brasília, DF, 2012.

_____. **Resolução Normativa n° 676/2015**: estabelece os requisitos necessários à outorga de autorização para exploração e alteração da capacidade instalada de centrais geradoras fotovoltaicas, bem como os procedimentos para registro de centrais geradoras com capacidade instalada reduzida, e dá outras providências. Brasília, DF, 2015a.

_____. **Resolução Normativa N° 687/2015**: altera a Resolução Normativa n° 482, de 17 de abril de 2012, e os Módulos 1 e 3 dos Procedimentos de Distribuição – PRODIST. Brasília, DF, 2015b.

ASHRAE. American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers. **Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings**. ASHRAE Standard 90.1. Atlanta, Estados Unidos, 2010.

BASTIDE, A.; GARDE, F.; LAURET, P.; BOYER, H. **Building energy efficiency and thermal comfort in tropical climates**: Presentation of a numerical approach for predicting the percentage of wellventilated living spaces in building. *In Energy and Building*. Université de La Réunion, França, 2006.

BRASIL. Ministério da Economia. Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial – INMETRO. **Portaria Nº 42, de 24 de fevereiro de 2021**. Brasília, DF, 24 fev. 2021. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC002707.pdf>. Acesso em: 08 set. 2021.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Atlas da eficiência energética - Brasil 2020**: relatório de indicadores. Brasília, DF, 2020a.

_____. **BEN – Balanço Energético Nacional 2020**: Ano base 2019, Rio de Janeiro, RJ, 2020b. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-479/topico-528/BEN2020_sp.pdf>. Acesso em: 21 fev. 2021.

_____. **PDE – Plano Decenal de Expansão de Energia 2026**, Brasília, DF, v. 2, 2017a. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/documents/10584/0/PDE2026_versao_para_publicacao_08dez2017.pdf/f5d8f999-566d-4f5b-9167-d80b6ea8924e>. Acesso em: 21 ago. 2018.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior - MDIC. Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial - INMETRO. **Requisitos Técnicos da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos, RTQ-C**. Rio de Janeiro, RJ, 2010.

_____. **Requisitos de avaliação da conformidade para sistemas e equipamentos para energia fotovoltaica, RAC**. Módulo, controlador de carga, inversor e bateria. Portaria INMETRO Nº 4/2011. Rio de Janeiro, RJ, 2011.

_____. **Manual para aplicação do RTQ-R**. Portaria nº 18/2012. Rio de Janeiro, RJ, 2014c.

_____. **Tabelas de consumo/eficiência energética**. Componente fotovoltaico – Módulo. Rio de Janeiro, RJ, 2020c. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/consumidor/pbe/tabela_fotovoltaiico_modulo.pdf>. Acesso em: 19 jul. 2020.

_____. **Anexo geral V**: catálogo de propriedades térmicas de paredes, coberturas e vidros. Portaria no 50/2013. Rio de Janeiro, RJ, 2013.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Guia prático de eficiência energética: reunindo a experiência prática do projeto de etiquetagem**: Ministério do Meio Ambiente e Ministério da Cultura. Brasília: MMA, 2014a.

BRASIL. Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão. **Instrução Normativa nº 2, de 4 de junho de 2014**. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Poder Executivo, Brasília, DF, 5 jun. 2014b. Seção 1, p. 102.

CARTANA, R. P; PEREIRA, F. O. R. **Elementos de controle solar desenvolvidos com modelagem paramétrica e algoritmos evolutivos**. PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção, Campinas, SP, v. 7, n. 3, p. 133–144, 2016. DOI: 10.20396/parc.v7i3.8647516.

CELPE. Companhia Energética de Pernambuco. **Fornecimento de energia elétrica em tensão secundária de distribuição a edificações individuais**. Anexo I. Potências Média dos Aparelhos Eletrodomésticos. 2018.

COSTA, J. F. W. **Edifícios de balanço energético nulo**: um estudo para escritórios em Brasília. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pesquisa e Pós-graduação da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2018.

DENG, S; WANG, R. Z; DAI, Y. J. **How to evaluate performance of net zero energy building** – A literature research. *Energy*, vol. 71, 2014.

DESIGNBUILDER. **Defining setpoint temperature and RH schedules**. 2010. Disponível em: <https://designbuilder.co.uk/helpv4.2/Content/Defining_setpoint_temperature_schedules.htm>. Acesso em: 05 jun. 2020.

DIDONÉ, E. L; WAGNER, A; PEREIRA, F. O. R. **Estratégias para edifícios de escritórios energia zero no Brasil com ênfase em BIPV**. *Revista Ambiente Construído*, vol. 14, 2014.

DOBZYCKI, A; KURZ, D; MIKULSKI, S; WODNICKI, G. **Analysis of the Impact of Building Integrated Photovoltaics (BIPV) on Reducing the Demand for Electricity and Heat in Buildings Located in Poland**. *Energies*, v.13, 2020. DOI: 10.3390/en13102549.

DOMINGOS, L. A; KALZ, D. E; DINKEL, A; LOMARDO, L. L. B; SILVA, V. G. **Definição de uma classificação climática para o estudo de edificações com balanço anual zero de energia no Brasil**. XV Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Maceió, AL, 2014.

ELETROBRAS. Centrais Elétricas Brasileiras S.A. **Chamada Pública Procel Edifica - NZEB Brasil**. Memorandos PRJJ-320/2019 e PRJJ335/2019. Rio de Janeiro, RJ, 2019.

EVANGELISTI, L; GUATTARI, C; ASDRUBALI, F; VOLLARO, R.L. **An experimental investigation of the thermal performance of a building solar shading device**. *Journal of Building Engineering*, v. 28, 2020. DOI: 10.1016/j.job.2019.101089.

FERREIRA, C. C.; SOUZA, R. V. G. **Avaliação dos impactos dos brises no conforto térmico e luminoso conforme as recomendações do RTQ-C**: estudo de Tribunal de Justiça de Minas Gerais. XIII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído (ENTAC), Canela, RS, 2010.

GRÄTZEL, M. **Dye-sensitized solar cells**. *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, v. 4, 2003.

GREEN, M; Dunlop, E; HOHL-EBINGER, J; YOSHITA, M; KOPIDAKIS, N; HAO, X. **Solar cell efficiency tables**. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, v. 57, 2020.

GREEN, M. **Thin-film solar cells**: Review of materials, technologies and commercial status. *In Journal of Materials Science Materials in Electronic*. 2007.

HECKTHEUER, L. A. **Análise de associações de módulos fotovoltaicos**. 2001. 138 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2001.

HEISELBERG, P; MARSZAL, J. **A Literature Review of Zero Energy Buildings (ZEB) Definitions**. Department of Civil Engineering, Aalborg University. DCE Technical reports No. 78, Dinamarca, 2009.

HOFER, J; GROENEWOLT, A; JAYATHISSA, P; NAGY, Z; SCHLUETER, A. **Parametric analysis and systems design of dynamic photovoltaic shading modules**. Energy Science & Engineering, v. 4, p. 134-152, 2016. DOI: 10.1002/ese3.115.

IEA. International Energy Agency. **Electricity consumption, Brazil 1990-2019**. Disponível em: <<https://www.iea.org/data-and-statistics?country=BRAZIL&fuel=Energy%20consumption&indicator=TotElecCons>>. Acesso em: 20 mar. 2021.

_____. **Snapshot of global photovoltaic markets**. Disponível em: <https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/04/IEA_PVPS_Snapshot_2020.pdf> Acesso em: 15 mar. 2020.

ISE. Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems. **Photovoltaics report**, 2021. Disponível em: <<https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf>>. Acesso em: 01 jul 2021.

ISO. International Organization for Standard. **ISO 7730: moderate thermal environments: determination of the PMV and PPD Indices and Specification of the conditions of Thermal Comfort**. Genebra, Suíça, 2005.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Change 2014: Synthesis Report**. Contribution of Working Groups I, II, and III to the Fifth Assessment Report. 2015.

_____. **Special report on renewable energy sources and climate change mitigation**, 2011. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/SRREN_FD_SPM_final-1.pdf>. Acesso em: 18 jan. 20.

JOVANOVIC, J; SUNB, X; STEVOVIC, S; CHEN, J. **Energy-efficiency gain by combination of PV modules and Trombe wall in the low-energy building design**. Energy and Buildings, v. 152, 2017. DOI: 10.1016/j.enbuild.2017.07.073.

KURNITSKI, J. **Technical definitions for nearly zero energy buildings**. REHVA Journal, 2013.

LABEEE. Laboratório de Eficiência Energética em Edificações. **Análise de arquivos climáticos para a simulação do desempenho energético de edificações**. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2015.

LAMBERTS, R; DUTRA, L; PEREIRA, F.O.R. **Eficiência energética na arquitetura**. PROCEL - Eletrobrás 2014. 3 ed. Rio de Janeiro, RJ, 2014.

LI, X; PENG, J; LI, N; WANG, M; WANG, C. **Study on optimum tilt angles of photovoltaic shading systems in different climatic regions of China**. Procedia Engineering, v. 205, p. 1157-1164, 2017. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.10.185.

LIOU, K.N. **An introduction to atmospheric radiation**. Academic Press California. 1980.

LUQUE, A.; HEGEDUS, S. **Handbook of photovoltaic science and engineering**. Inglaterra: John Wiley & Sons, 2003.

NREL. National Renewable Energy Laboratory. **Best research-cell efficiencies**, 2021. Disponível em: <<https://www.nrel.gov/pv/assets/pdfs/best-research-cell-efficiencies.20200104.pdf>>. Acesso em: 14 abr. 2020.

_____. **Glossary of solar radiation resource terms**. 2017. Disponível em: <http://rredc.nrel.gov/solar/glossary/gloss_s.html>. Acesso em: 18 ago. 2020.

PE. Parlamento Europeu. **Diretiva 2010/31/EU**. Jornal Oficial Da União Europeia, 13–35. 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.3000/17252601.L_2010.153.por> Acesso em: 25 ago. 2020.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; GONÇALVES, A. R.; COSTA, R. S.; LIMA, F. L.; RÜTHER, R.; ABREU, S. L.; TIEPOLO, G. M.; PEREIRA, S. V.; SOUZA, J. G. **Atlas brasileiro de energia solar**. 2.ed. São José dos Campos, SP: INPE, 2017. 80p. Disponível em: <<http://doi.org/10.34024/978851700089>> Acesso em: 15 jul. 2020.

PEREIRA, I. M.; SOUZA, R. V. G. **Proteção solar em edificações residenciais e comerciais: desenvolvimento de metodologia**. XII Encontro Nacional De Tecnologia Do Ambiente Construído (ENTAC), Fortaleza, CE, 2008.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Rio de Janeiro, RJ: CRESESB, 2014.

PVSYST. **PVsystem help contents**, 2020. Disponível em: <<https://www.pvsyst.com/help/index.html>>. Acesso em: 05 jul. 2020.

RODRIGUES, T. T. V.; CARLO, J. C.; OLIVEIRA FILHO, D. **Modelagem térmica de fotovoltaicos semitransparentes: impactos na eficiência da célula e no desempenho da zona**. PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção, Campinas, SP, v. 9, n. 4, p. 305–318, 2018. DOI: 10.20396/parc.v9i4.8652785.

RUSCHEL, C.S; GASPARIN, F.P; KRENZINGER, A. **Determinação da capacidade térmica de módulos fotovoltaicos de diferentes tecnologias**. Revista Brasileira de Energia Solar. v.6, n. 2. 2015.

RÜTHER, R. **Edifícios solares fotovoltaicos: o potencial da geração solar fotovoltaica integrada a edificações urbanas e interligada à rede elétrica pública no Brasil**. 1ª. ed. Florianópolis, SC: Editora UFSC/ LABSOLAR, 2004.

RÜTHER, R., NASCIMENTO, L. R., CAMPOS, R. A. **Extreme overirradiance events in Brazil: consequences on PV power plant output performance**. Solar Energy, 2017.

SANTANA, M. V. **Influência de parâmetros construtivos no consumo de energia de edifícios de escritório localizados em Florianópolis – SC**. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2006.

SANTOS, I.P; RÜTHER, R; NASCIMENTO, L., PEREIRA, L.C. **Ábacos para análise simplificada de orientação e inclinação de sistemas solares fotovoltaicos integrados a edificações**. V Congresso Brasileiro de Energia Solar e V Conferência Latino-Americana da ISES – São Paulo, SP, 2012.

SARTORI, I; NAPOLITANO, A; VOSS, K. **Net zero energy buildings: A consistent definition framework**. Energy and Buildings, vol. 48, 2012.

STAMATAKIS, A; MANDALAKI, M; TSOUTSOS, T. **Multi-criteria analysis for PV integrated in shading devices for Mediterranean region**. Energy and Buildings, v. 117, p. 128-137, 2016. DOI: 10.1016/j.enbuild.2016.02.007.

TEICHRIEB, C. A; OLIVEIRA, P. E. S; ZIMMER, T; MABONI, C; SANTOS, D, M, S; ROBERTI, D. R; ZIMERMANN, W. R; **Análise comparativa do regime hídrico e térmico de dois sítios experimentais no Pampa**. Ciência e Natura, Santa Maria v.38. 2016.

THOMAS, R.; GRAINER, T. **Photovoltaic in buildings - a design guide**: Department of trade and industry. Londres, Inglaterra, 1999.

TORCELLINI, P; PLESS, S; DERU, M; CRAWLEY, D. **Zero Energy Buildings: A Critical Look at the Definition** National Renewable Energy Laboratory and Department of Energy. Estados Unidos, 2006.

UFSM. Universidade Federal de Santa Maria. **Cinquenta Anos**. 2010. Disponível em: <<http://w3.ufsm.br/50anos/index.php?canal=fotos>>. Acesso em: 30 mar. 2020.

UFSM. Universidade Federal de Santa Maria. Pró-Reitoria de Infraestrutura da Universidade Federal de Santa Maria. **Desenho urbanístico da Universidade Federal de Santa Maria**. Cidade Universitária, Santa Maria, RS, 2019.

_____. **Consumo elétrico das edificações da Universidade Federal de Santa Maria**. Cidade Universitária, Santa Maria, RS, 2020.

VALLÊRA, A.; BRITO, M. C. **Meio século de história fotovoltaico**. Departamento de Física e Centro de Física da Matéria Condensada (CFMC): 2006.

VOSS, K; MUSALL, E. **Net zero energy buildings: international projects of carbon neutral buildings**. 2.ed. Munich: Detail Green Books, 2012.

WOLLE, A. B. **Campus da Universidade Federal de Santa Maria: inventário do patrimônio moderno (1960-1970)**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação Profissional em Patrimônio Cultural. Universidade Federal de Santa Maria, SC, 2019.

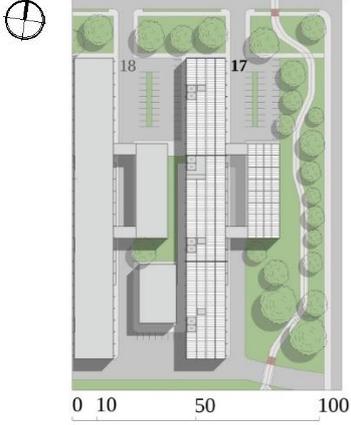
ZAMPIERI, R. V. **Campus da Universidade Federal de Santa Maria: um testemunho, um fragmento**. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Arquitetura. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2011.

ZOMER, C. D.; RÜTHER, R.; NASCIMENTO, L.; URBANETZ, J.; OKUDA, B. S.; FLORES, F. **Geração solar fotovoltaica integrada a edificações urbanas: compromissos entre forma e função**. In: Congresso Brasileiro de Energia Solar (CBENS). São Paulo, SP, 2012.

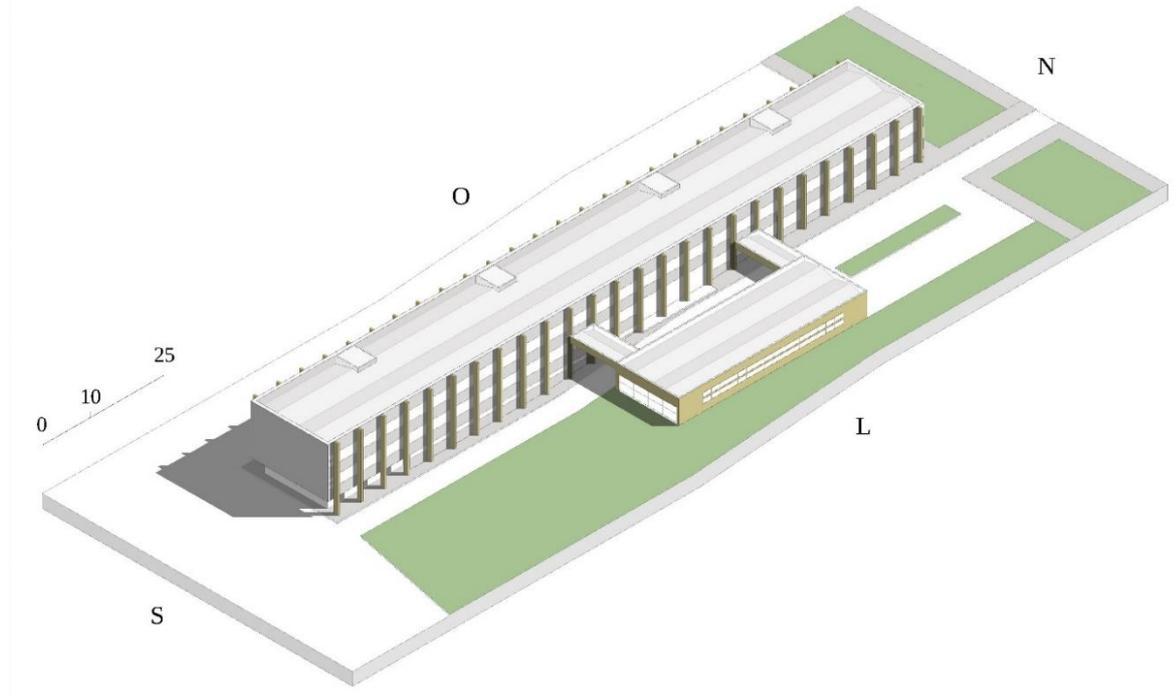
APÊNDICE A – EDIFÍCIOS DO SETOR DE ENSINO (UFSM)

EDIFÍCIO 17

1 - IDENTIFICAÇÃO			
Edificação	Edifício 17 - Institutos Básicos, Geociências		
Localização	Universidade Federal de Santa Maria, campus Camobi, Santa Maria/RS		
Tipologia	Civil/Educacional		
Temática	Arquitetura e Urbanismo Moderno		
Construção	1964-1978		
Área Total	5.109,21 m ²	Pavimentos	3
Comprimento	123,00 m	Largura	15,90 m
Altura Total	13,40 m	Pé direito	3,85 m



Perspectiva Geral



Elevações

Fachada Leste



Fachada Norte



Fachada Oeste

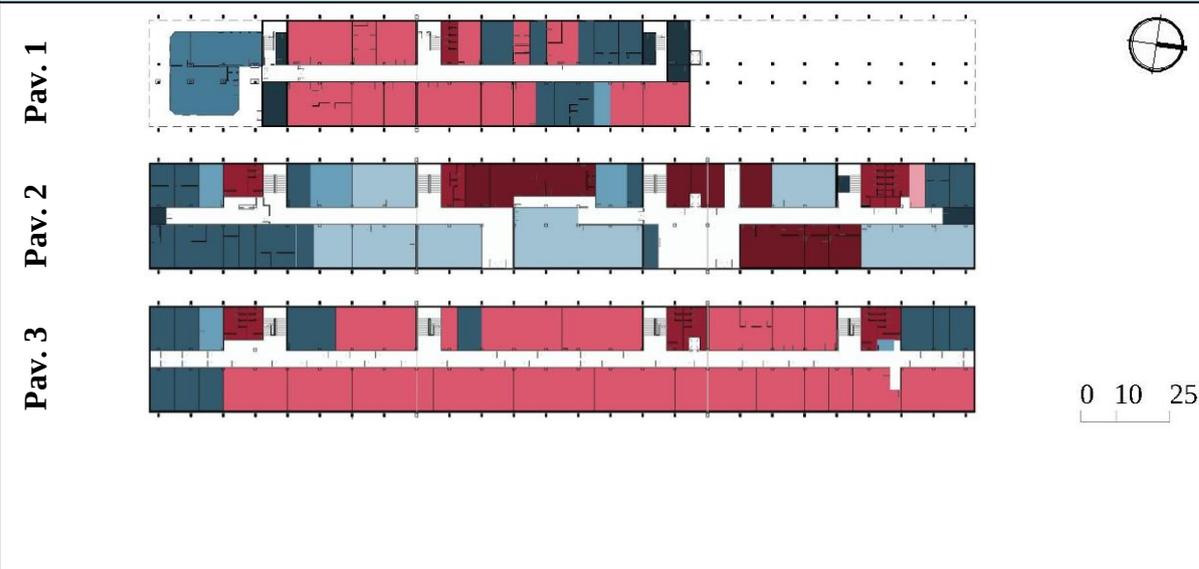


Fachada Sul



0 10 40

2 - ZONEAMENTO



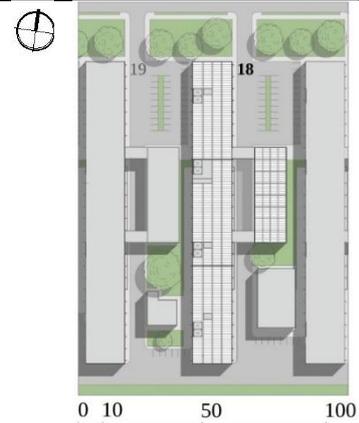
Áreas	Pavimento 1		Pavimento 2		Pavimento 3	
	Un	Área (m ²)	Un	Área (m ²)	Un	Área (m ²)
Administrativo	0	0,00	12	285,81	0	0,00
Banheiros	1	14,17	8	87,51	6	88,92
Comerciais	0	0,00	1	13,92	0	0,00
Laboratórios	15	474,25	0	0,00	21	1041,34
Recreativos	0	0,00	1	14,17	0	0,00
Salas de Aula	0	0,00	9	535,17	0	0,00
Salas de Estudos	1	14,42	3	88,95	2	25,94
Salas de Exposição	1	144,30	0	0,00	0	0,00
Salas de Professores	10	153,09	13	252,60	11	239,00
Serviços	5	61,50	3	20,11	0	0,00
Circulação	1	192,28	1	490,23	1	398,53
Estrutural	1	118,44	1	179,91	1	174,65
TOTAL	35	1172,45	52	1968,38	42	1968,38

3 - MATERIALIDADE

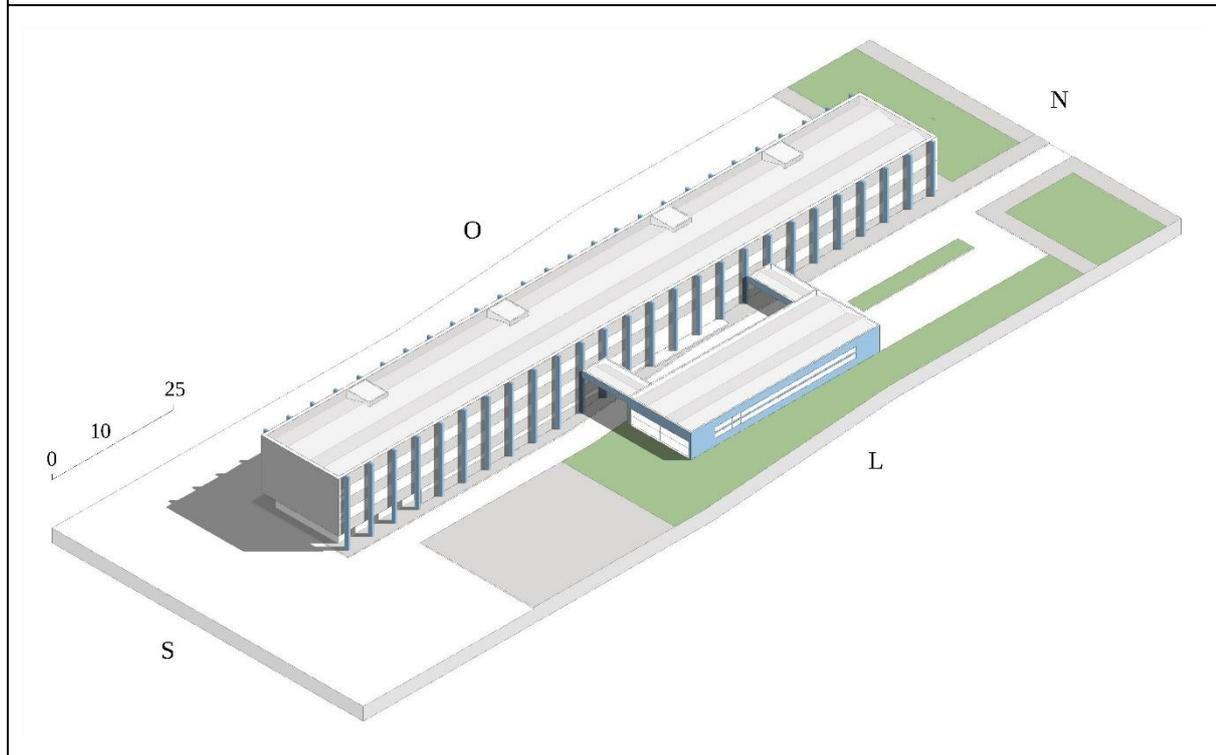
Cobertura	Esquadrias
Telhado de fibrocimento em quatro águas, com estrutura em madeira de pinho, calhas em concreto impermeabilizado. Platibanda com rufo de fibrocimento.	Janelas em fita do tipo <i>maxim ar</i> , nas faces leste e oeste, e portas e painéis envidraçados, no acesso ao <i>hall</i> , em perfis de ferro e metalon, pintura cinza, baguetes de alumínio e vidro incolor. Internamente, portas de madeira em pintura cinza.
Estrutura Estrutura de laje, vigas e pilares em concreto armado com os pilares expostos à edificação.	
Pisos Piso cerâmico predominante em áreas de maior circulação, banheiros, áreas comerciais, recreativas e de exposição. Piso em tacos de madeira, em menor área, em salas de aula, salas de professores e administração.	Paredes Paredes externas e internas em alvenaria de tijolos cerâmicos furados, assentados em argamassa de cimento, areia e cal, rebocada e com acabamento em pintura acrílica branca. Internamente, são verificadas adaptações com divisórias em PVC ou gesso.

EDIFÍCIO 18

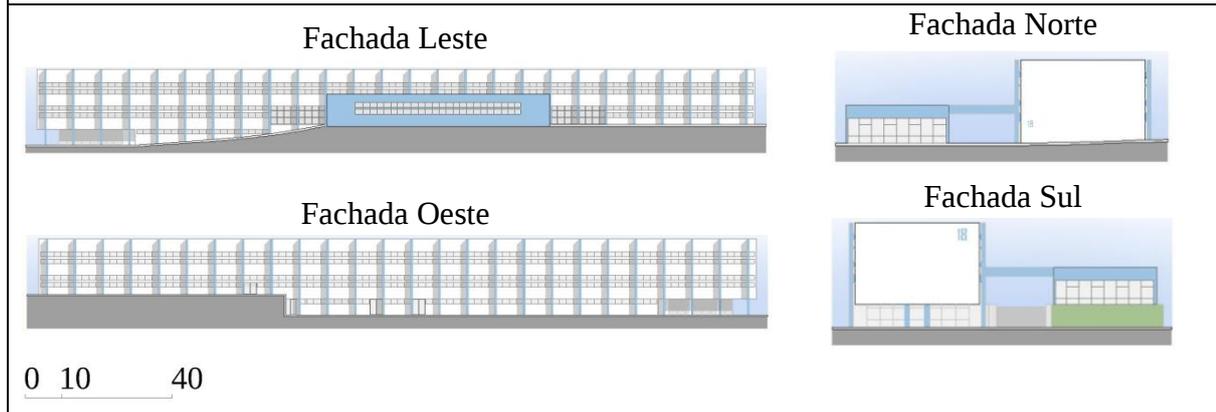
1 - IDENTIFICAÇÃO			
Edificação	Edifício 18 - Institutos Básicos, Química		
Localização	Universidade Federal de Santa Maria, campus Camobi, Santa Maria/RS		
Tipologia	Civil/Educacional		
Temática	Arquitetura e Urbanismo Moderno		
Construção	1965-1978		
Área Total	5.115,51m ²	Pavimentos	3
Comprimento	123,00 m	Largura	15,90 m
Altura Total	13,40 m	Pé direito	3,85 m



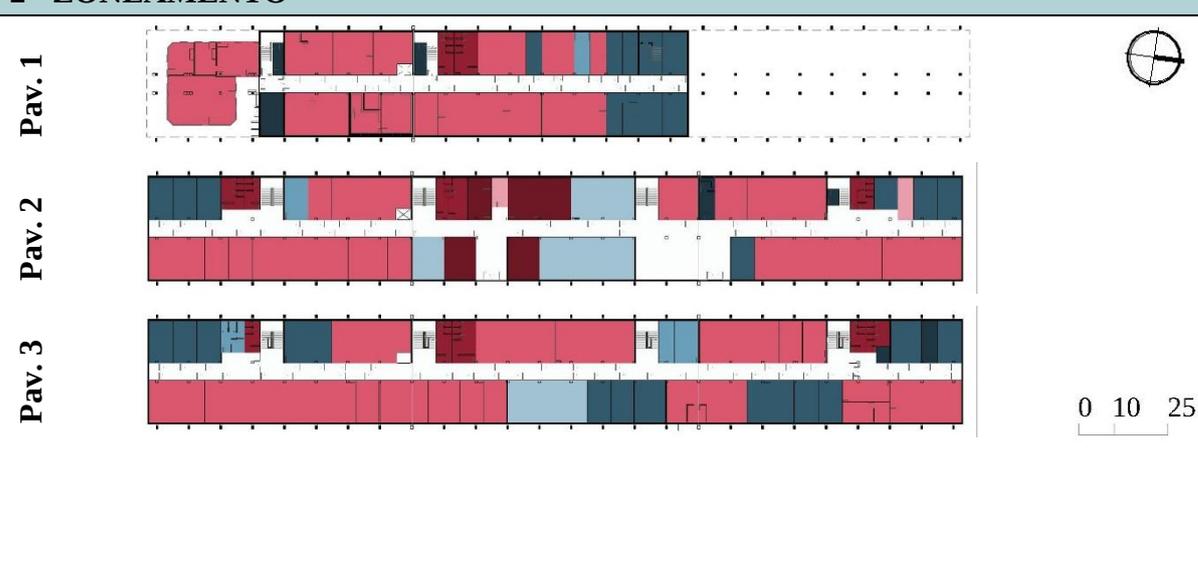
Perspectiva Geral



Elevações



2 - ZONEAMENTO



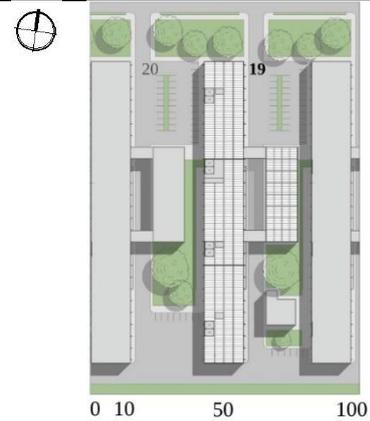
Áreas	Pavimento 1		Pavimento 2		Pavimento 3	
	Un	Área (m ²)	Un	Área (m ²)	Un	Área (m ²)
Administrativo	0	0,00	5	139,86	0	0,00
Banheiros	2	35,91	6	70,20	5	71,32
Comerciais	0	0,00	0	0,00	0	0,00
Laboratórios	17	632,79	15	668,82	16	857,64
Recreativos	0	0,00	1	24,18	0	0,00
Salas de Aula	0	0,00	3	178,75	1	74,65
Salas de Estudos	1	14,17	1	21,57	3	51,65
Salas de Exposição	0	0,00	0	0,00	0	0,00
Salas de Professores	8	158,76	7	146,46	14	316,10
Serviços	3	35,71	2	18,09	2	18,73
Circulação	1	182,97	1	525,27	1	399,20
Estrutural	1	118,44	1	175,18	1	179,09
TOTAL	33	1178,75	42	1968,38	43	1968,38

3 - MATERIALIDADE

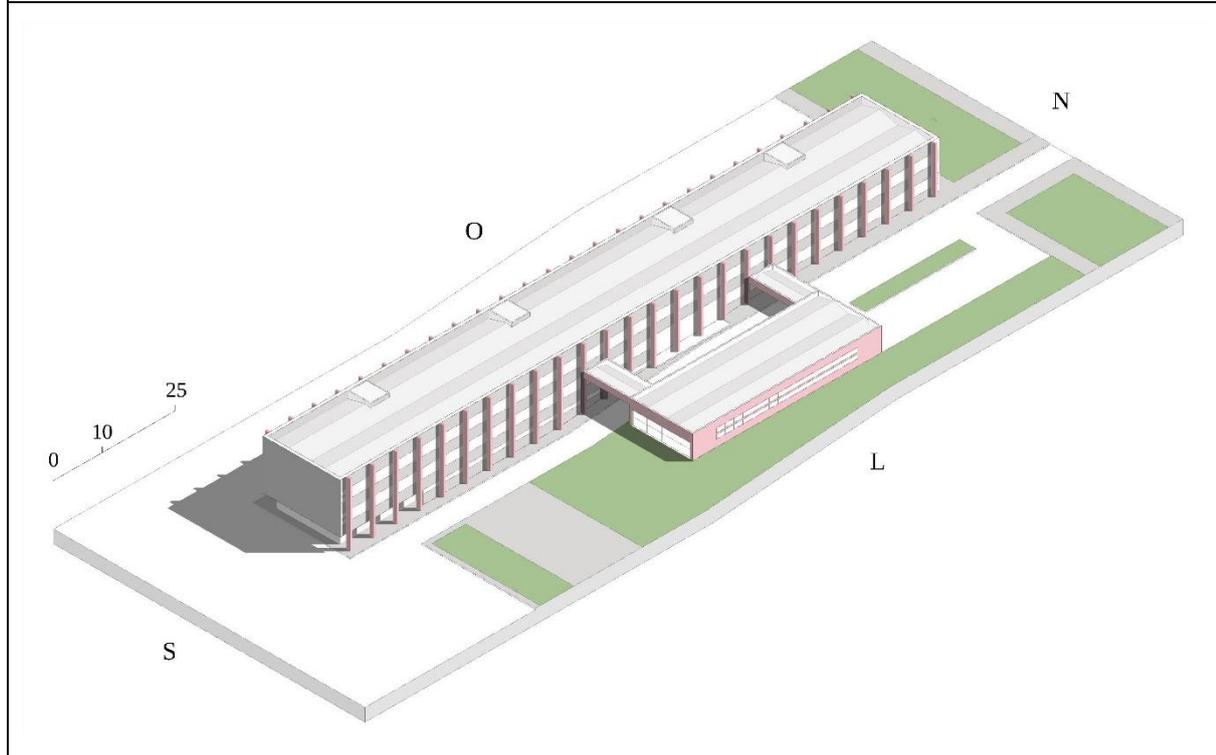
Cobertura	Esquadrias
Telhado de fibrocimento em quatro águas, com estrutura em madeira de pinho, calhas em concreto impermeabilizado. Platibanda com rufo de fibrocimento.	Janelas em fita do tipo <i>maxim ar</i> , nas faces leste e oeste, e portas e painéis envidraçados, no acesso ao <i>hall</i> , em perfis de ferro e metalon, pintura cinza, baguetes de alumínio e vidro incolor. Internamente, portas de madeira em pintura cinza.
Estrutura Estrutura de laje, vigas e pilares em concreto armado com os pilares expostos à edificação.	
Pisos Piso cerâmico predominante em áreas de maior circulação, banheiros, áreas comerciais, recreativas e de exposição. Piso em tacos de madeira, em menor área, em salas de aula, salas de professores e administração.	Paredes Paredes externas e internas em alvenaria de tijolos cerâmicos furados, assentados em argamassa de cimento, areia e cal, rebocada e com acabamento em pintura acrílica branca. Internamente, são verificadas adaptações com divisórias em PVC ou gesso.

EDIFÍCIO 19

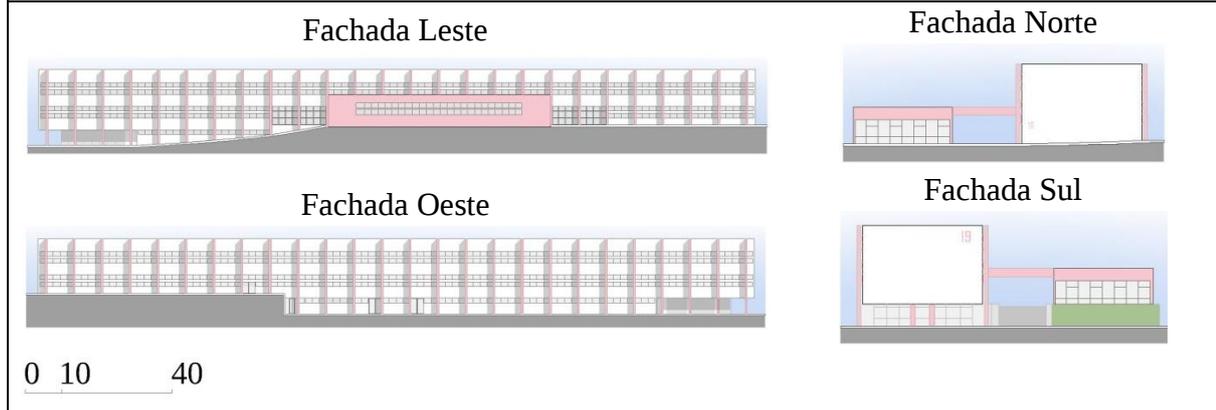
1 - IDENTIFICAÇÃO			
Edificação	Edifício 19 - Institutos Básicos, Morfologia		
Localização	Universidade Federal de Santa Maria, campus Camobi, Santa Maria/RS		
Tipologia	Civil/Educacional		
Temática	Arquitetura e Urbanismo Moderno		
Construção	1965-1978		
Área Total	5.124,38 m ²	Pavimentos	3
Comprimento	123,00 m	Largura	15,90 m
Altura Total	13,40 m	Pé direito	3,85 m



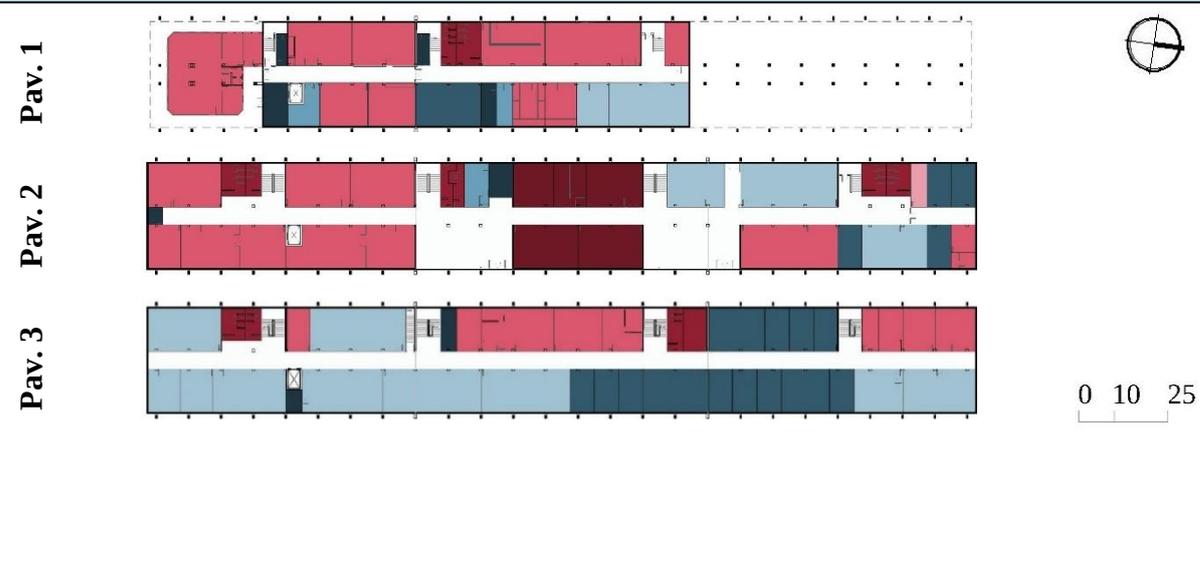
Perspectiva Geral



Elevações



2 - ZONEAMENTO



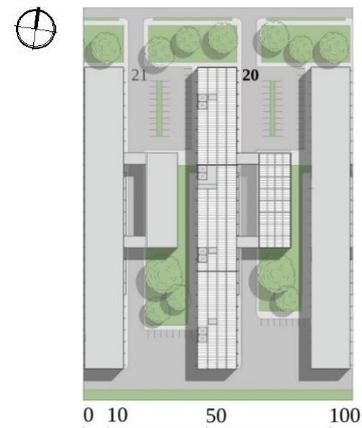
Áreas	Pavimento 1		Pavimento 2		Pavimento 3	
	Un	Área (m ²)	Un	Área (m ²)	Un	Área (m ²)
Administrativo	0	0,00	5	236,65	0	0,00
Banheiros	2	35,91	6	79,65	4	62,22
Comerciais	0	0,00	0	0,00	0	0,00
Laboratórios	10	590,02	13	533,21	10	292,00
Recreativos	0	0,00	1	14,17	0	0,00
Salas de Aula	2	104,00	3	202,91	10	640,20
Salas de Estudos	2	36,25	1	21,73	0	0,00
Salas de Exposição	0	0,00	0	0,00	0	0,00
Salas de Professores	3	59,63	4	86,94	16	370,56
Serviços	4	51,04	2	21,70	2	21,26
Circulação	1	207,65	1	607,55	1	403,55
Estrutural	1	103,12	1	163,87	1	178,59
TOTAL	25	1187,62	37	1968,38	44	1968,38

3 - MATERIALIDADE

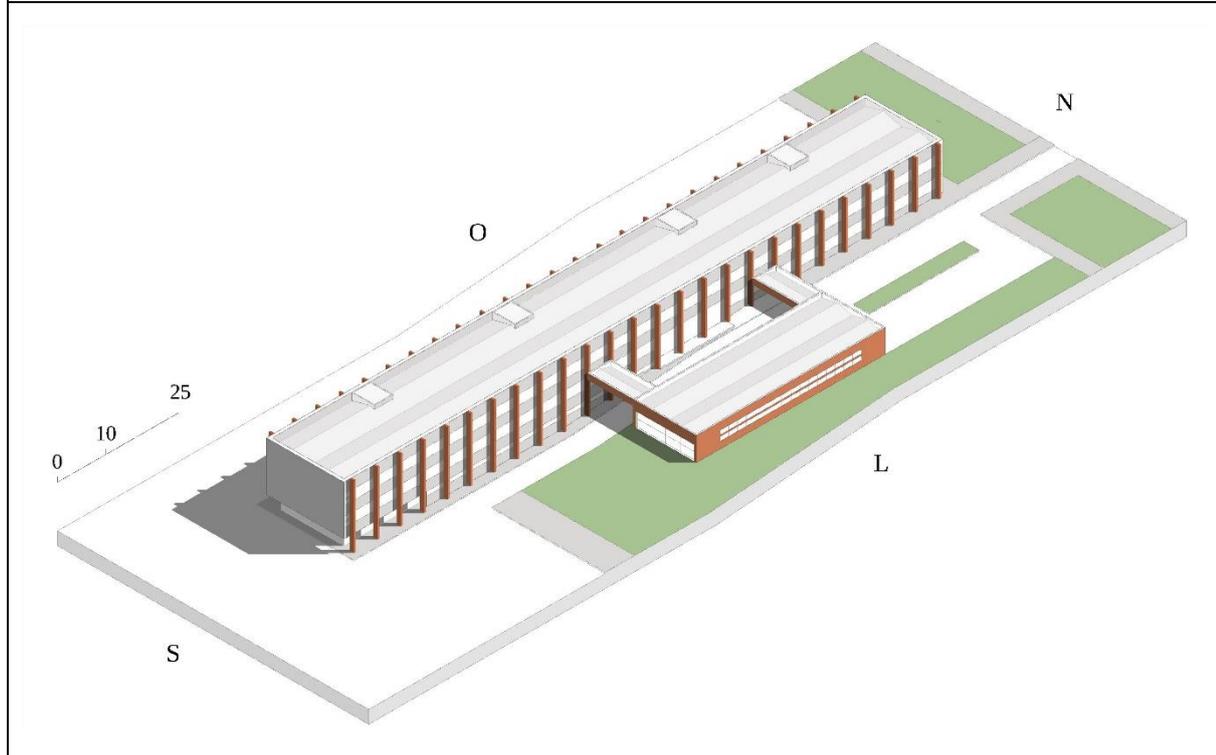
Cobertura	Esquadrias
Telhado de fibrocimento em quatro águas, com estrutura em madeira de pinho, calhas em concreto impermeabilizado. Platibanda com rufo de fibrocimento.	Janelas em fita do tipo <i>maxim ar</i> , nas faces leste e oeste, e portas e painéis envidraçados, no acesso ao <i>hall</i> , em perfis de ferro e metalon, pintura cinza, baguetes de alumínio e vidro incolor. Internamente, portas de madeira em pintura cinza.
Estrutura Estrutura de laje, vigas e pilares em concreto armado com os pilares expostos à edificação.	
Pisos Piso cerâmico predominante em áreas de maior circulação, banheiros, áreas comerciais, recreativas e de exposição. Piso em tacos de madeira, em menor área, em salas de aula, salas de professores e administração.	Paredes Paredes externas e internas em alvenaria de tijolos cerâmicos furados, assentados em argamassa de cimento, areia e cal, rebocada e com acabamento em pintura acrílica branca. Internamente, são verificadas adaptações com divisórias em PVC ou gesso.

EDIFÍCIO 20

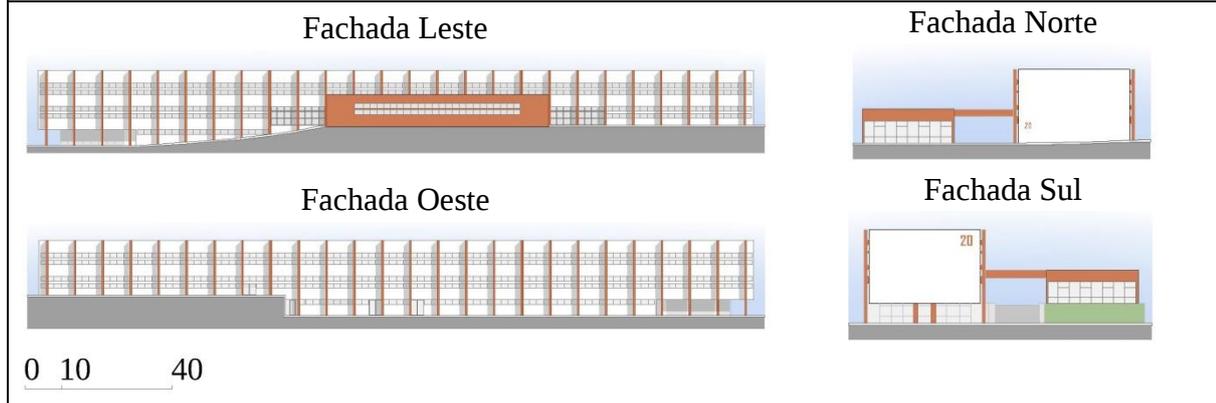
1 - IDENTIFICAÇÃO			
Edificação	Edifício 20 - Institutos Básicos, Patologia e Microbiologia		
Localização	Universidade Federal de Santa Maria, campus Camobi, Santa Maria/RS		
Tipologia	Civil/Educacional		
Temática	Arquitetura e Urbanismo Moderno		
Construção	1965-1978		
Área Total	5.107,87m ²	Pavimentos	3
Comprimento	123,00 m	Largura	15,90 m
Altura Total	13,40 m	Pé direito	3,85 m

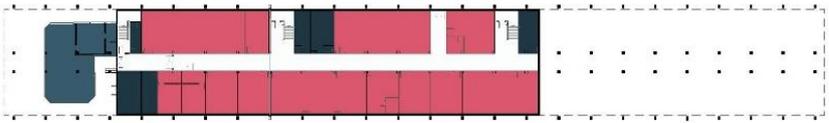
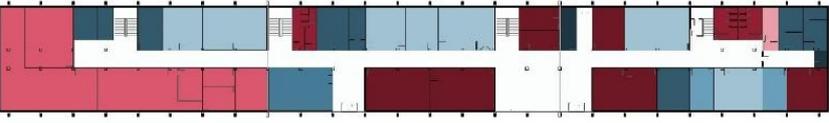
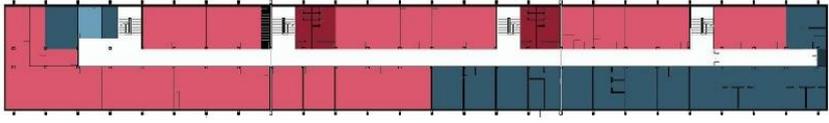


Perspectiva Geral



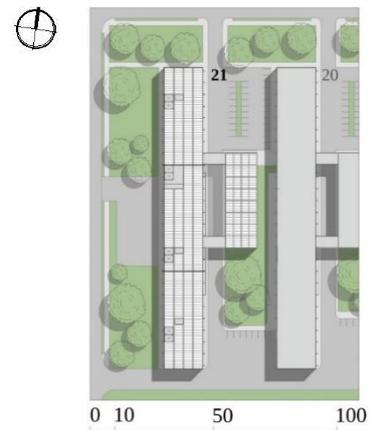
Elevações



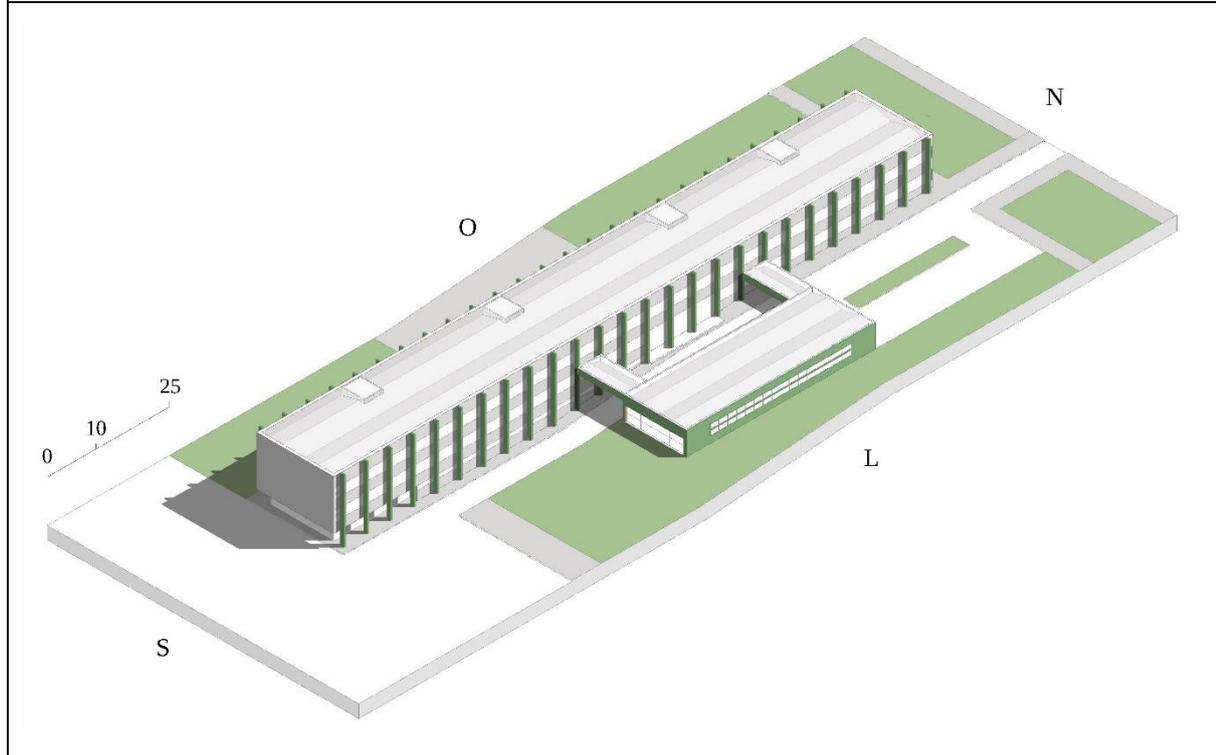
2 - ZONEAMENTO							
Pav. 1							
	Pav. 2						
		Pav. 3					
0 10 25							
		Pavimento 1		Pavimento 2		Pavimento 3	
Áreas	Un	Área (m ²)	Un	Área (m ²)	Un	Área (m ²)	
Administrativo	0	0,00	8	279,64	0	0,00	
Banheiros	0	0,00	4	52,86	4	71,34	
Comerciais	1	104,69	0	0,00	0	0,00	
Laboratórios	15	600,86	6	338,28	18	895,35	
Recreativos	0	0,00	1	14,17	0	0,00	
Salas de Aula	0	0,00	7	317,75	0	0,00	
Salas de Estudos	0	0,00	2	43,78	1	15,86	
Salas de Exposição	0	0,00	1	59,65	0	0,00	
Salas de Professores	0	0,00	8	165,25	16	431,32	
Serviços	6	95,57	2	18,25	1	3,06	
Circulação	1	222,38	1	507,46	1	360,16	
Estrutural	1	147,61	1	171,29	1	191,29	
TOTAL	24	1171,11	41	1968,38	42	1968,38	
3 - MATERIALIDADE							
Cobertura			Esquadrias				
Telhado de fibrocimento em quatro águas, com estrutura em madeira de pinho, calhas em concreto impermeabilizado. Platibanda com rufo de fibrocimento.			Janelas em fita do tipo <i>maxim ar</i> , nas faces leste e oeste, e portas e painéis envidraçados, no acesso ao <i>hall</i> , em perfis de ferro e metalon, pintura cinza, baguetes de alumínio e vidro incolor. Internamente, portas de madeira em pintura cinza.				
Estrutura							
Estrutura de laje, vigas e pilares em concreto armado com os pilares expostos à edificação.							
Pisos			Paredes				
Piso cerâmico predominante em áreas de maior circulação, banheiros, áreas comerciais, recreativas e de exposição. Piso em tacos de madeira, em menor área, em salas de aula, salas de professores e administração.			Paredes externas e internas em alvenaria de tijolos cerâmicos furados, assentados em argamassa de cimento, areia e cal, rebocada e com acabamento em pintura acrílica branca. Internamente, são verificadas adaptações com divisórias em PVC ou gesso.				

EDIFÍCIO 21

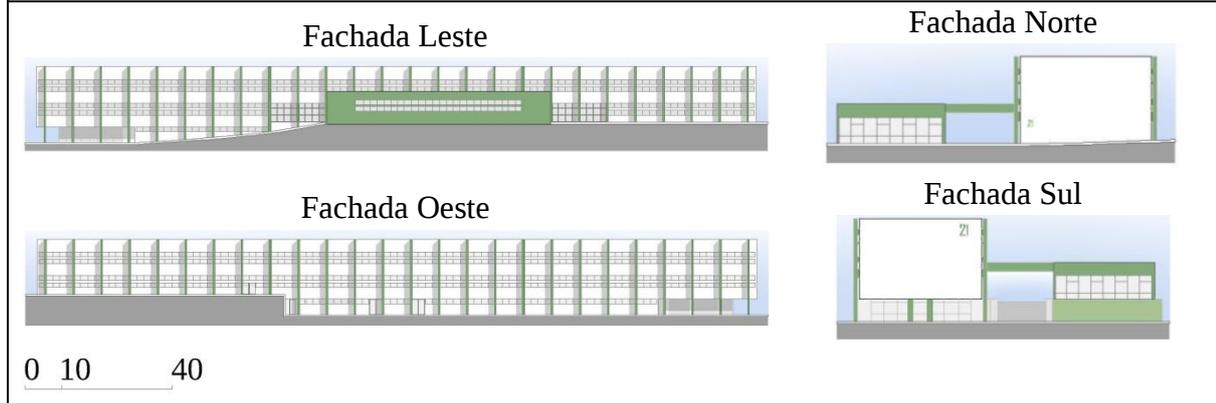
1 - IDENTIFICAÇÃO			
Edificação	Edifício 21 - Institutos Básicos, Fisiologia e Comunicação Social		
Localização	Universidade Federal de Santa Maria, campus Camobi, Santa Maria/RS		
Tipologia	Civil/Educacional		
Temática	Arquitetura e Urbanismo Moderno		
Construção	1965-1978		
Área Total	5.107,87m ²	Pavimentos	3
Comprimento	123,00 m	Largura	15,90 m
Altura Total	13,40 m	Pé direito	3,85 m



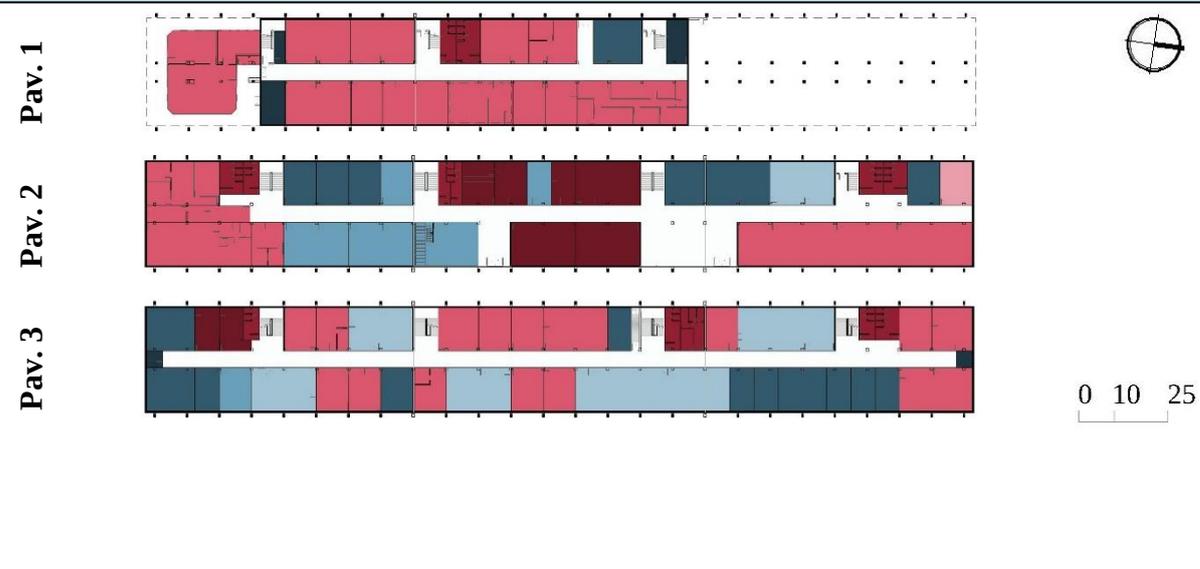
Perspectiva Geral



Elevações



2 - ZONEAMENTO



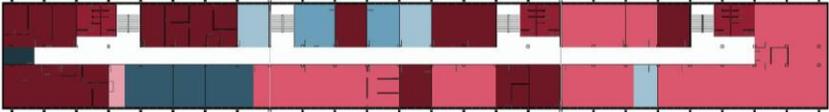
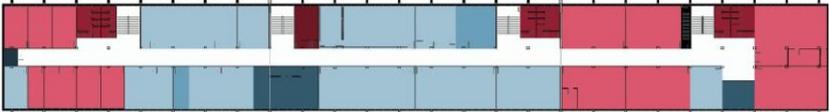
Áreas	Pavimento 1		Pavimento 2		Pavimento 3	
	Un	Área (m ²)	Un	Área (m ²)	Un	Área (m ²)
Administrativo	0	0,00	6	258,45	2	45,41
Banheiros	2	35,91	6	79,65	5	72,80
Comerciais	0	0,00	0	0,00	0	0,00
Laboratórios	12	720,40	9	446,31	15	521,48
Recreativos	0	0,00	1	29,29	0	0,00
Salas de Aula	0	0,00	1	59,37	6	410,57
Salas de Estudos	0	0,00	5	229,79	1	29,29
Salas de Exposição	0	0,00	0	0,00	0	0,00
Salas de Professores	1	44,25	7	212,25	14	310,74
Serviços	3	46,30	0	0,00	2	10,68
Circulação	1	222,71	1	486,93	1	389,75
Estrutural	1	101,54	1	166,34	1	177,66
TOTAL	20	1171,11	37	1968,38	47	1968,38

3 - MATERIALIDADE

Cobertura	Esquadrias
Telhado de fibrocimento em quatro águas, com estrutura em madeira de pinho, calhas em concreto impermeabilizado. Platibanda com rufo de fibrocimento.	Janelas em fita do tipo <i>maxim ar</i> , nas faces leste e oeste, e portas e painéis envidraçados, no acesso ao <i>hall</i> , em perfis de ferro e metalon, pintura cinza, baguetes de alumínio e vidro incolor. Internamente, portas de madeira em pintura cinza.
Estrutura Estrutura de laje, vigas e pilares em concreto armado com os pilares expostos à edificação.	
Pisos Piso cerâmico predominante em áreas de maior circulação, banheiros, áreas comerciais, recreativas e de exposição. Piso em tacos de madeira, em menor área, em salas de aula, salas de professores e administração.	Paredes Paredes externas e internas em alvenaria de tijolos cerâmicos furados, assentados em argamassa de cimento, areia e cal, rebocada e com acabamento em pintura acrílica branca. Internamente, são verificadas adaptações com divisórias em PVC ou gesso.

EDIFÍCIO 40

1 - IDENTIFICAÇÃO				
Edificação	Edifício 40 – Centro de Artes e Letras (CAL)			
Localização	Universidade Federal de Santa Maria, campus Camobi, Santa Maria/RS			
Tipologia	Civil/Educacional			
Temática	Arquitetura e Urbanismo Moderno			
Construção	1966-1979			
Área Total	7.144,75 m ²	Pavimentos		4
Comprimento	123,00 m	Largura		15,90 m
Altura Total	16,90 m	Pé direito	3,85 m	
Perspectiva Geral				
Elevações				
<p>Fachada Leste</p>		<p>Fachada Norte</p>		
<p>Fachada Oeste</p>		<p>Fachada Sul</p>		
<p>0 10 40</p>				

2 - ZONEAMENTO										
Pav. 1									0 10 25	
	Pav. 2									
		Pav. 3								
	Pav. 4									
		Pavimento 1		Pavimento 2		Pavimento 3		Pavimento 4		
Áreas	Un	Área (m ²)	Un	Área (m ²)	Un	Área (m ²)	Un	Área (m ²)		
Administrativo	2	28,90	2	50,87	13	456,90	1	21,73		
Banheiros	2	35,43	5	56,60	6	80,01	6	80,01		
Comerciais	0	0,00	1	11,04	0	0,00	0	0,00		
Laboratórios	12	776,45	8	634,79	8	602,75	14	538,48		
Recreativos	2	22,21	0	0,00	1	14,17	0	0,00		
Salas de Aula	0	0,00	3	163,64	3	80,16	14	620,28		
Salas de Estudos	0	0,00	6	185,48	3	66,15	2	50,87		
Salas de Exposição	0	0,00	1	122,37	0	0,00	0	0,00		
Salas de Professores	3	39,40	2	45,41	5	117,49	5	78,41		
Serviços	1	21,42	2	18,13	1	10,49	1	4,56		
Circulação	1	216,37	1	519,36	1	372,02	1	388,19		
Estrutural	1	99,43	1	160,69	1	168,24	1	185,85		
TOTAL	24	1239,61	32	1968,38	42	1968,38	45	1968,38		
3 - MATERIALIDADE										
Cobertura					Esquadrias					
Telhado de fibrocimento em quatro águas, com estrutura em madeira de pinho, calhas em concreto impermeabilizado. Platibanda com rufo de fibrocimento.					Janelas em fita do tipo <i>maxim ar</i> , nas faces leste e oeste, basculantes, ao sul, <i>maxim ar</i> , ao norte e portas e painéis envidraçados, no acesso ao <i>hall</i> , com perfis em ferro e metalon, pintura cinza, baguetes de alumínio e vidro incolor.					
Estrutura					Internamente, portas de madeira em pintura cinza.					
Estrutura de laje, vigas e pilares em concreto armado com os pilares expostos à edificação.					Paredes					
Pisos					Paredes externas e internas em alvenaria de tijolos cerâmicos furados, assentados em argamassa de cimento, areia e cal, rebocada e com acabamento em pintura acrílica branca. Internamente, são verificadas adaptações com divisórias em PVC ou gesso.					
Piso cerâmico predominante em áreas de maior circulação, banheiros, áreas comerciais, recreativas e de exposição. Piso em tacos de madeira, em menor área, em salas de aula, salas de professores e administração.										

EDIFÍCIO 42

1 - IDENTIFICAÇÃO			
Edificação	Edifício 42 – Centro de Ciências Rurais (CCR)		
Localização	Universidade Federal de Santa Maria, campus Camobi, Santa Maria/RS		
Tipologia	Civil/Educacional		
Temática	Arquitetura e Urbanismo Moderno		
Construção	1962-1979		
Área Total	7.127,06 m ²	Pavimentos	4
Comprimento	123,00 m	Largura	15,90 m
Altura Total	16,90 m	Pé direito	3,85 m

Perspectiva Geral

Elevações

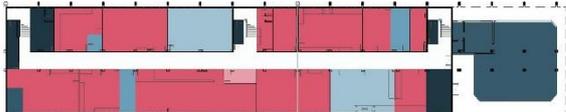
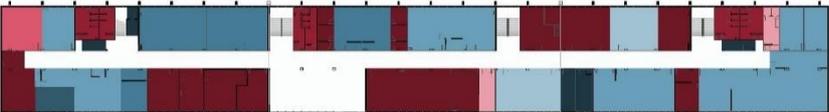
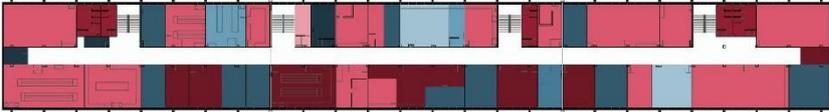
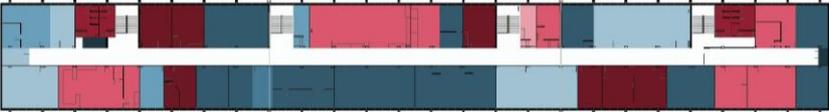
Fachada Leste

Fachada Norte

Fachada Oeste

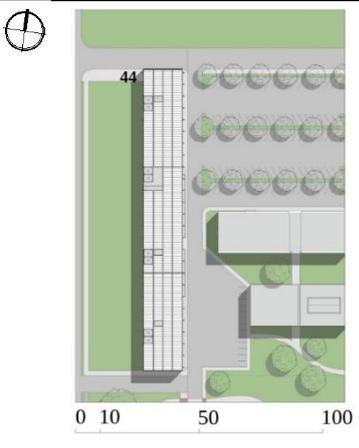
Fachada Sul

0 10 40

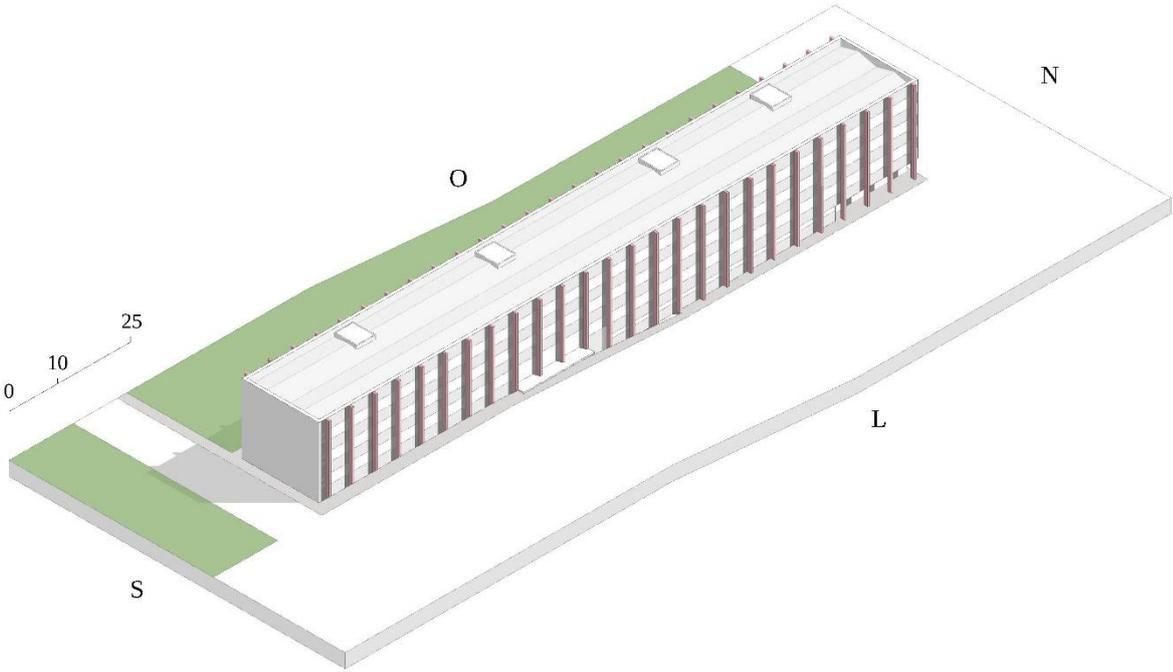
2 - ZONEAMENTO										
Pav. 1									0 10 25	
	Pav. 2									
										
										
		Pavimento 1		Pavimento 2		Pavimento 3		Pavimento 4		
Áreas	Un	Área (m ²)	Un	Área (m ²)	Un	Área (m ²)	Un	Área (m ²)		
Administrativo	0	0,00	17	412,87	9	238,91	8	197,89		
Banheiros	0	0,00	6	81,19	5	67,18	4	53,46		
Comerciais	1	159,65	1	15,37	0	0,00	0	0,00		
Laboratórios	12	528,38	1	36,69	16	667,92	8	326,18		
Recreativos	1	9,40	2	28,19	1	14,17	1	14,17		
Salas de Aula	2	119,07	2	104,07	2	81,93	7	247,70		
Salas de Estudos	3	36,96	10	428,49	2	51,66	3	80,16		
Salas de Exposição	0	0,00	4	195,61	2	21,25	1	17,92		
Salas de Professores	1	7,98	1	20,67	11	235,35	23	466,56		
Serviços	5	67,06	4	33,68	3	35,97	2	8,51		
Circulação	1	197,80	1	442,16	1	373,55	1	379,38		
Estrutural	1	95,62	1	169,39	1	180,49	1	176,45		
TOTAL	27	1221,92	50	1968,38	53	1968,38	59	1968,38		
3 - MATERIALIDADE										
Cobertura					Esquadrias					
Telhado de fibrocimento em quatro águas, com estrutura em madeira de pinho, calhas em concreto impermeabilizado. Platibanda com rufo de fibrocimento.					Janelas em fita do tipo <i>maxim ar</i> , nas faces leste e oeste, e portas e painéis envidraçados, no acesso ao <i>hall</i> , em perfis de ferro e metalon, pintura cinza, baguetes de alumínio e vidro incolor. Internamente, portas de madeira em pintura cinza.					
Estrutura										
Estrutura de laje, vigas e pilares em concreto armado com os pilares expostos à edificação.					Paredes					
Pisos					Paredes externas e internas em alvenaria de tijolos cerâmicos furados, assentados em argamassa de cimento, areia e cal, rebocada e com acabamento em pintura acrílica branca. Internamente, são verificadas adaptações com divisórias em PVC ou gesso.					
Piso cerâmico predominante em áreas de maior circulação, banheiros, áreas comerciais, recreativas e de exposição. Piso em tacos de madeira, em menor área, em salas de aula, salas de professores e administração.										

EDIFÍCIO 44

1 - IDENTIFICAÇÃO			
Edificação	Edifício 44 – Centro de Ciências Rurais (CCR)		
Localização	Universidade Federal de Santa Maria, campus Camobi, Santa Maria/RS		
Tipologia	Civil/Educacional		
Temática	Arquitetura e Urbanismo Moderno		
Construção	1967-1979		
Área Total	7.191,45m ²	Pavimentos	4
Comprimento	123,00 m	Largura	15,90 m
Altura Total	16,90 m	Pé direito	3,85 m



Perspectiva Geral



Elevações

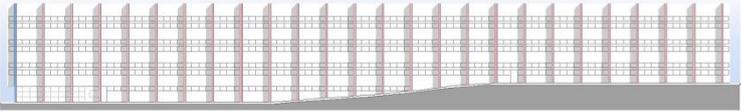
Fachada Leste



Fachada Norte



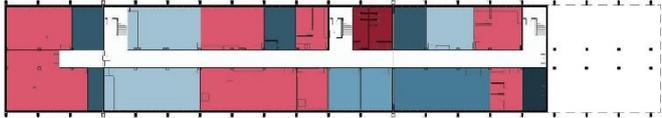
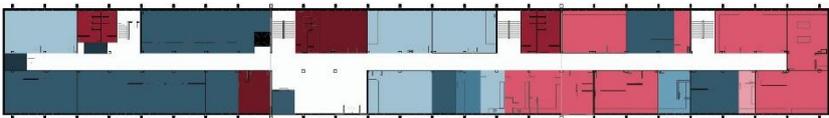
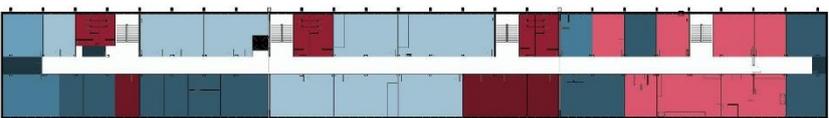
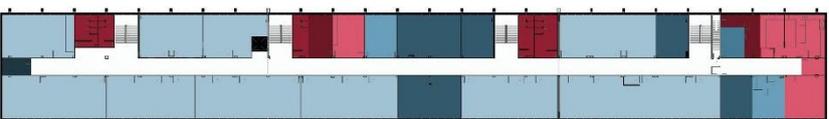
Fachada Oeste



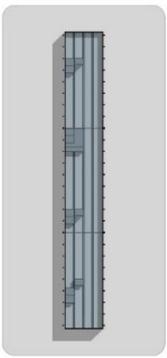
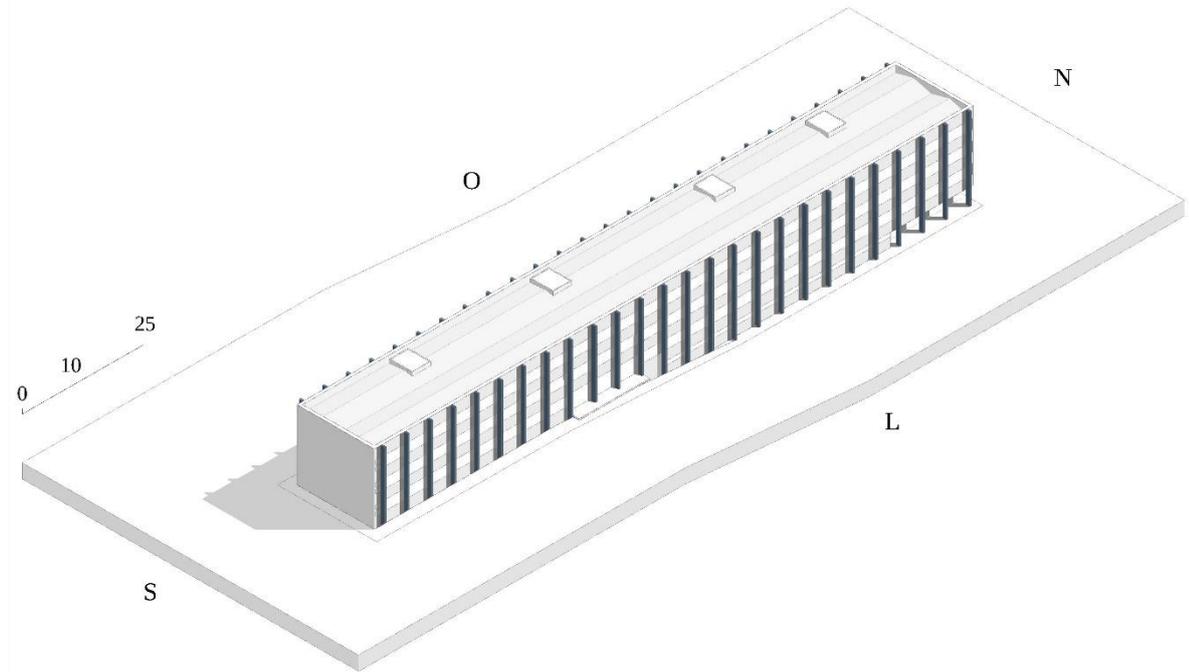
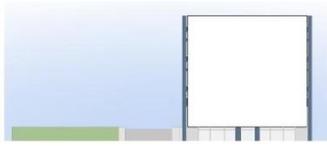
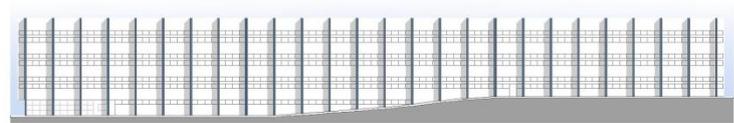
Fachada Sul

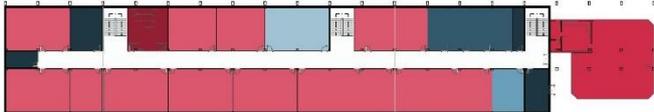
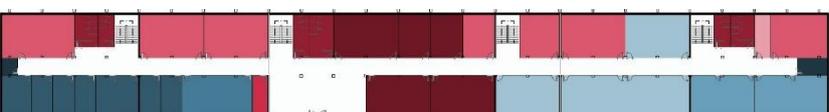
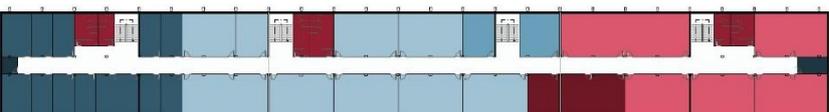


0 10 40

2 - ZONEAMENTO											
Pav. 1											
	Pav. 2										
		Pav. 3									
			Pav. 4								
0 10 25											
		Pavimento 1		Pavimento 2		Pavimento 3		Pavimento 4			
Áreas		Un	Área (m ²)	Un	Área (m ²)	Un	Área (m ²)	Un	Área (m ²)		
	Administrativo	0	0,00	4	72,50	5	109,93	4	42,16		
	Banheiros	2	35,43	6	82,51	6	97,69	6	78,87		
	Comerciais	0	0,00	1	11,79	0	0,00	0	0,00		
	Laboratórios	9	435,58	14	400,52	10	272,32	6	130,16		
	Recreativos	0	0,00	1	14,49	0	0,00	0	0,00		
	Salas de Aula	3	201,72	5	267,96	8	467,77	11	873,76		
	Salas de Estudos	2	58,15	1	29,29	1	36,85	4	58,65		
	Salas de Exposição	1	89,27	1	22,59	2	80,85	1	15,51		
	Salas de Professores	4	101,66	24	433,78	15	328,75	8	204,25		
	Serviços	1	21,45	2	13,28	3	24,20	1	10,20		
	Circulação	1	238,77	1	441,96	1	367,28	1	381,46		
	Estrutural	1	115,38	1	174,01	1	179,04	1	169,66		
TOTAL		24	1297,41	61	1964,68	52	1964,68	43	1964,68		
3 - MATERIALIDADE											
Cobertura					Esquadrias						
Telhado de fibrocimento em quatro águas, com estrutura em madeira de pinho, calhas em concreto impermeabilizado. Platibanda com rufo de fibrocimento.					Janelas em fita do tipo <i>maxim ar</i> , nas faces leste e oeste, e portas e painéis envidraçados, no acesso ao <i>hall</i> , em perfis de ferro e metalon, pintura cinza, baguetes de alumínio e vidro incolor. Internamente, portas de madeira em pintura cinza.						
Estrutura											
Estrutura de laje, vigas e pilares em concreto armado com os pilares expostos à edificação.					Paredes						
Pisos					Paredes externas e internas em alvenaria de tijolos cerâmicos furados, assentados em argamassa de cimento, areia e cal, rebocada e com acabamento em pintura acrílica branca. Internamente, são verificadas adaptações com divisórias em PVC ou gesso.						
Piso cerâmico predominante em áreas de maior circulação, banheiros, áreas comerciais, recreativas e de exposição. Piso em tacos de madeira, em menor área, em salas de aula, salas de professores e administração.											

APÊNDICE B – MODELO VIRTUAL

1 - IDENTIFICAÇÃO				
Edificação	Edifício Modelo de Estudo			
Localização	Universidade Federal de Santa Maria, campus Camobi, Santa Maria/RS			
Tipologia	Civil/Educacional			
Temática	Arquitetura e Urbanismo Moderno			
Construção	-			
Área Total	7.361,50 m ²	Pavimentos	4	
Comprimento	123,00 m	Largura	15,90 m	
Altura Total	16,90 m	Pé direito	3,85 m	
Perspectiva Geral				
				
Elevações				
<p>Fachada A</p> 		<p>Fachada C</p> 		
<p>Fachada B</p> 		<p>Fachada D</p> 		
				

2 - ZONEAMENTO											
Pav. 1											
	Pav. 2										
		Pav. 3									
			Pav. 4								
0 10 25											
		Pavimento 1		Pavimento 2		Pavimento 3		Pavimento 4			
Áreas		Un	Área (m ²)	Un	Área (m ²)	Un	Área (m ²)	Un	Área (m ²)		
	Administrativo	0	0,00	5	236,72	4	116,23	3	87,06		
	Banheiros	2	36,13	6	89,45	6	89,45	6	89,45		
	Comerciais	1	159,41	1	13,54	0	0,00	0	0,00		
	Laboratórios	11	662,11	7	362,05	14	643,89	6	370,81		
	Recreativos	0	0,00	1	14,17	0	0,00	0	0,00		
	Salas de Aula	1	59,06	4	236,57	4	237,79	9	514,04		
	Salas de Estudos	1	29,13	3	124,89	1	36,44	2	65,26		
	Salas de Exposição	0	0,00	1	64,57	0	0,00	0	0,00		
	Salas de Professores	4	75,91	8	160,49	13	263,81	13	263,81		
	Serviços	4	70,67	2	15,84	2	15,84	2	15,84		
	Circulação	1	246,54	1	475,09	1	383,53	1	383,53		
	Estrutural	1	117,40	1	175,00	1	181,40	1	178,58		
TOTAL		26	1456,36	40	1968,38	46	1968,38	36	1968,38		
3 - MATERIALIDADE											
Cobertura					Esquadrias						
Telhado de fibrocimento em quatro águas, com estrutura em madeira.					Janelas em fita do tipo <i>maxim ar</i> , nas faces leste e oeste, e portas e painéis envidraçados, no acesso ao <i>hall</i> , em perfis de ferro, pintura cinza e vidro incolor. Internamente, portas de madeira em pintura cinza.						
Estrutura											
Estrutura de laje, vigas e pilares em concreto armado com os pilares expostos à edificação.					Paredes						
Pisos					Paredes externas e internas em alvenaria de tijolos cerâmicos furados, assentados em argamassa de cimento, areia e cal, rebocada e com acabamento em pintura acrílica branca.						
Piso cerâmico nas áreas de circulação, banheiros, áreas comerciais, recreativas e de exposição. Piso em tacos de madeira em salas de aula, salas de professores, laboratórios, administração e estudos.											

APÊNDICE C – CRONOGRAMAS DE USO

	Componente	Período de Férias							Período Intermediário							Período Letivo									
		0-7h	7-8h	8-12h	12-14h	14-18h	18-19h	19-23h	23-0h	0-7h	7-8h	8-12h	12-14h	14-18h	18-19h	19-23h	23-0h	0-7h	7-8h	8-12h	12-14h	14-18h	18-19h	19-23h	23-0h
Administrativo	Climatização	0	0	100	0	100	0	0	0	0	0	100	0	100	0	0	0	0	0	100	0	100	0	0	0
	Equipamentos	0	0	100	50	100	0	0	0	0	0	100	50	100	0	0	0	0	0	100	50	100	0	0	0
	Iluminação	0	0	100	0	100	0	0	0	0	0	100	0	100	0	0	0	0	0	100	0	100	0	0	0
	Ocupação	0	0	100	0	100	0	0	0	0	0	100	0	100	0	0	0	0	0	100	0	100	0	0	0
Banheiros	Climatização	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Equipamentos	0	0	10	50	10	0	0	0	0	0	20	90	20	60	20	0	0	0	30	100	30	70	30	0
	Iluminação	0	0	100	100	100	0	0	0	0	0	100	100	100	100	100	0	0	0	100	100	100	100	100	0
	Ocupação	0	0	10	40	10	0	0	0	0	0	20	90	20	60	20	0	0	0	30	100	30	70	30	0
Circulação	Climatização	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Equipamentos	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	Iluminação	40	100	100	100	100	100	40	40	40	100	100	100	100	100	40	40	40	100	100	100	100	100	100	40
	Ocupação	0	0	10	40	10	0	0	0	0	0	20	80	20	60	20	0	0	0	30	100	30	70	30	0
Comercial	Climatização	0	0	100	100	100	0	0	0	0	0	100	100	100	0	0	0	0	0	100	100	100	0	0	0
	Equipamentos	20	20	60	100	60	20	20	20	20	20	60	100	60	20	20	20	20	20	60	100	60	20	20	20
	Iluminação	40	100	100	100	100	100	40	40	40	100	100	100	100	100	40	40	40	100	100	100	100	100	40	40
	Ocupação	0	0	40	70	40	0	0	0	0	0	40	90	40	0	0	0	0	0	40	100	40	0	0	0
Estudos	Climatização	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	100	100	0	0	0	0	0	100	100	100	0	0	0
	Equipamentos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	90	20	90	0	0	0	0	0	100	20	100	0	0	0
	Iluminação	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	100	100	0	0	0	0	0	100	100	100	0	0	0
	Ocupação	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	90	30	90	0	0	0	0	0	100	30	100	0	0	0

Expositivo	Climatização	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	100	100	0	0	0	0	0	100	100	100	0	0	0
	Equipamentos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	90	20	90	0	0	0	0	0	100	20	100	0	0	0
	Iluminação	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	100	100	0	0	0	0	0	100	100	100	0	0	0
	Ocupação	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	90	30	90	0	0	0	0	0	100	30	100	0	0	0
Laboratórios	Climatização	0	0	100	0	100	0	0	0	0	0	100	0	100	0	100	0	0	0	100	0	100	0	100	0
	Equipamentos	10	10	100	10	100	10	10	10	10	10	100	10	100	10	40	10	10	10	100	10	100	10	50	10
	Iluminação	0	0	100	30	100	0	0	0	0	0	100	40	100	40	100	0	0	0	100	50	100	50	100	0
	Ocupação	0	0	60	0	60	0	0	0	0	0	90	0	90	0	40	0	0	0	100	0	100	0	40	0
Professores	Climatização	0	0	100	0	100	0	0	0	0	0	100	0	100	0	0	0	0	0	100	0	100	0	0	0
	Equipamentos	0	0	100	0	100	0	0	0	0	0	70	0	70	0	0	0	0	0	20	0	20	0	0	0
	Iluminação	0	0	100	0	100	0	0	0	0	0	70	0	70	0	0	0	0	0	30	0	30	0	0	0
	Ocupação	0	0	100	0	100	0	0	0	0	0	70	0	70	0	0	0	0	0	20	0	20	0	0	0
Recreativo	Climatização	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Equipamentos	50	50	50	100	50	50	50	50	50	50	50	100	50	50	50	50	50	50	100	50	50	50	50	50
	Iluminação	0	0	100	100	100	0	0	0	0	0	100	100	100	0	0	0	0	0	100	100	100	0	0	0
	Ocupação	0	0	50	100	50	0	0	0	0	0	50	100	50	0	0	0	0	0	50	100	50	0	0	0
S. de Aula	Climatização	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0	100	0	100	0	0	0	100	0	100	0	100	0
	Equipamentos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	90	0	90	0	40	0	0	0	100	0	100	0	50	0
	Iluminação	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0	100	0	100	0	0	0	100	0	100	0	100	0
	Ocupação	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	90	0	90	0	40	0	0	0	100	0	100	0	40	0
Serviços	Climatização	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Equipamentos	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	Iluminação	0	0	100	100	100	0	0	0	0	0	100	100	100	0	0	0	0	0	100	100	100	0	0	0
	Ocupação	0	0	30	100	30	0	0	0	0	0	30	100	30	0	0	0	0	0	30	100	30	0	0	0